

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Державний вищий навчальний заклад

“Національний гірничий університет”



І.О. Таран, А.В. Бубліков

# ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ОБ'ЄКТАМИ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ СИСТЕМ

Навчальний посібник

Дніпро  
НГУ  
2016

УДК 656.11:004.942

ББК 39.808

T19

*Рекомендовано вченою радою Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» як навчальний посібник для студентів спеціальностей 275 Транспортні технології (автомобільний транспорт) та 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (протокол № 3 від 11.03.2016).*

Рецензенти:

*В.С. Наумов*, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій та мехатроніки (Харківський національний автомобільно-дорожній університет);

*Ю.А. Монастирський*, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту (ДВНЗ «Криворізький національний університет»);

*В.В. Ткачов*, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних систем (ДВНЗ «Національний гірничий університет»).

**Таран І.О.**

T19 Дослідження автоматизованих систем керування транспортними об'єктами на основі теорії систем : навч. посіб. / І.О. Таран, А.В. Бубліков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2016. – 178 с.

ISBN 978-966-350-612-8

Присвячено питанням практичного застосування методів теорії систем для дослідження транспортних об'єктів. Вирішено завдання ідентифікації, математичного опису та моделювання елементів транспортної системи й зовнішнього середовища, а також дослідження поведінки системи за умови різних стратегій керування транспортними потоками. При цьому для вирішення задач застосовуються сучасні та потужні математичні пакети MATLAB та MathCad.

Посібник покликаний допомогти студентам у виконанні досліджень складних транспортних об'єктів. Викладений матеріал може також бути корисним аспірантам та інженерам у їхній практичній діяльності.

УДК 656.11:004.942

ББК 39.808

ISBN 978-966-350-612-8

© І.О. Таран, А.В. Бубліков, 2016

© Державний ВНЗ “Національний гірничий університет”, 2016

# З М І С Т

<b>Передмова</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1. СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДІНКИ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ТА ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА</b>	
1.1. Аналіз транспортного об'єкту для визначення мети досліджень, меж системи та її структурної схеми .....	7
1.2. Визначення моделі зовнішнього середовища .....	13
1.3. Отримання залежностей, що характеризують зв'язки між елементами моделі поведінки транспортної системи .....	56
<i>Контрольні завдання</i> .....	92
<i>Висновки</i> .....	97
<b>РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ</b>	
2.1. Дослідження процесів формування транспортних потоків в некерованій транспортній системі .....	99
2.2. Визначення критерію ефективності для досліджуваної транспортної системи .....	111
2.3. Розробка алгоритму формування керуючих впливів та проведення обчислювального експерименту роботи транспортної системи за визначеним критерієм ефективності .....	121
<i>Контрольні завдання</i> .....	143
<i>Висновки</i> .....	145
<b>РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ НА ТРАНСПОРТНІ ОБ'ЄКТИ</b>	
3.1. Створення пристрою керування транспортними об'єктами на основі теорії автоматів .....	147
3.2. Особливості реалізації алгоритму жорсткого однопрограмного керування транспортними потоками на перехрестях .....	157

3.3. Особливості реалізації алгоритму координованого керування транспортними потоками на перехрестях «зелена хвиля».....	163
<i>Контрольні завдання</i> .....	172
Список літератури.....	178

## Передмова

Одним із основних шляхів підвищення ефективності роботи складних транспортних об'єктів є застосування актуальних методів їх дослідження із використанням сучасних інформаційних технологій. Найбільш поширена та перспективна методологія дослідження складних соціально-технічних об'єктів базується на системному підході. Зважаючи на складність та неоднозначність застосування системного підходу для дослідження складних об'єктів, дуже важливо надати приклад використання методів теорії систем на практиці, по відношенню до конкретного об'єкту. В даному навчальному посібнику прийняте рішення ознайомити студентів із практичним застосуванням методів теорії систем для дослідження процесу формування транспортних потоків на окремій та відносно невеликій ділянці транспортної схеми міста. Отримані практичні навички студент за аналогією зможе використовувати для дослідження інших складних соціально-технічних об'єктів.

В першому розділі навчального посібника наведений один з можливих підходів щодо виконання підготовчих етапів дослідження конкретного транспортного об'єкту. Також в першому розділі представлені практичні приклади визначення моделей поведінки системи та зовнішнього середовища за умови дослідження конкретного транспортного об'єкту. При цьому разом з методами теорії систем використовуються методи теорій вірогідності і математичної статистики, а також методи аналізу випадкових даних і теорії регресії. Зазначимо, що визначення та реалізація моделей поведінки системи та зовнішнього середовища відбувається з використанням сучасних та потужних математичних пакетів MATLAB та MathCad.

В другому розділі навчального посібника для конкретного транспортного об'єкту, що досліджується, обґрунтовується критерій ефективності роботи системи та на його основі створюється модель прийняття рішень. Модель прийняття рішень задається у вигляді структурної схеми із використанням простих логічних операцій. Розглянуте питання реалізації моделі прийняття

рішень у математичному пакеті Matlab. В процесі обчислювального експерименту за допомогою створеної моделі поведінки транспортної системи підтверджується ефективність керування розподілом транспортних потоків на окремій ділянці транспортної схеми міста за умови використання запропонованої моделі прийняття рішень.

Третій розділ навчального посібника присвячений заключному етапу дослідження транспортного об'єкту на основі системного підходу – реалізації керуючих впливів на досліджуваний об'єкт. В цьому розділі розглянуті основи принципу побудови автоматизованих систем управління на транспорті (АСУТ) із використанням імітаційного моделювання процесів, що відбуваються в транспортних системах при автоматичному керуванні. При цьому моделі пристроїв керування у складі АСУТ задаються як комбінаційні схеми на основі правил теорії автоматів та булевої алгебри.

Навчальний посібник покликаний допомогти студентам у виконанні дослідницької частини кваліфікаційних робіт магістра, курсових та дипломних проектів. Викладений матеріал може також бути корисним аспірантам та інженерам у їхній практичній діяльності.

# 1. СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДІНКИ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ТА ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

## 1.1. Аналіз транспортного об'єкту для визначення мети досліджень, меж системи та її структурної схеми

У даному початковому посібнику описання процедури дослідження складних об'єктів на основі теорії систем проводиться на прикладі дослідження конкретного транспортного об'єкту – невеликої ділянки міської транспортної схеми, що зображена на рис.1.1. Отже, предметом дослідження є закономірності формування транспортних потоків на цій ділянці.

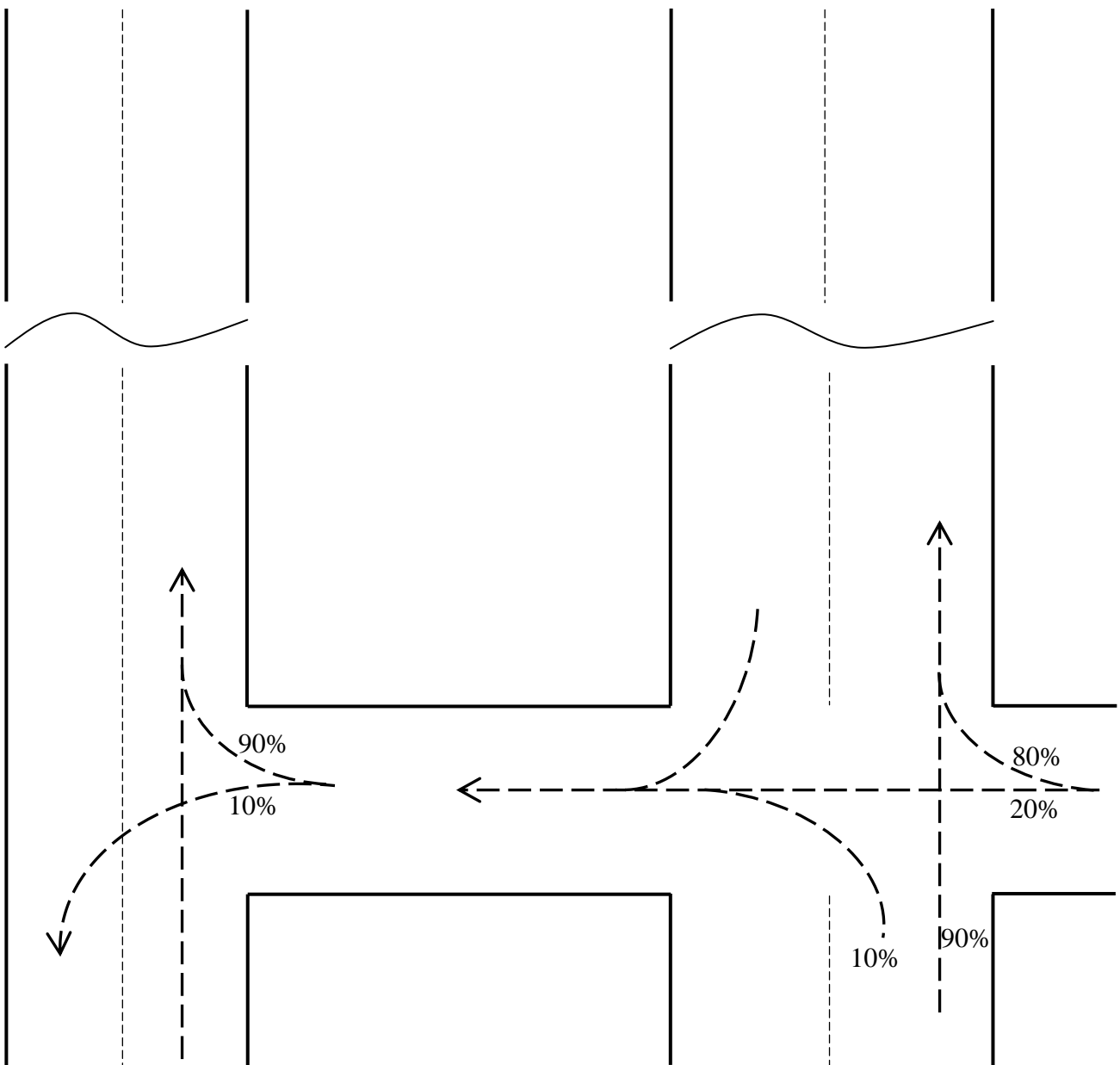


Рис.1.1. Схема ділянки міської транспортної мережі, що є об'єктом дослідження

Розглянемо основні етапи проведення дослідження складних об'єктів згідно теорії систем:

- на першому етапі визначається мета дослідження та у загальному вигляді формулюється критерій ефективності роботи транспортної системи;

- на другому етапі визначаються межі системи, тобто формується перелік елементів самої системи та зовнішнього середовища;

- на третьому етапі встановлюється структура моделі зовнішнього середовища, тобто обґрунтовуються внутрішні зв'язки між елементами зовнішнього середовища, та зовнішні зв'язки елементів зовнішнього середовища з елементами системи;

- на четвертому етапі встановлюється структура моделі поведінки системи, тобто обґрунтовуються внутрішні зв'язки між елементами системи;

- на п'ятому етапі визначаються залежності, що описують зв'язки між елементами зовнішнього середовища та системи, тобто створюються модель зовнішнього середовища та модель поведінки системи;

- на шостому етапі за допомогою експериментів на моделі зовнішнього середовища та моделі поведінки системи уточнюється критерій ефективності роботи системи та створюється модель прийняття рішень для формування керуючих впливів на систему;

- на сьомому етапі за допомогою обчислювального експерименту перевіряється ефективність роботи керованої системи за запропонованим критерієм та вирішується питання реалізації керуючих впливів на систему в реальних умовах.

Перші етапи дослідження складних об'єктів в рамках теорії систем мають досить суб'єктивний та творчий характер. Процедура їх виконання не формалізована, і тому можна керуватися тільки загальними рекомендаціями щодо їх проведення.

У багатьох випадках мету дослідження можна визначити в процесі вивчення та аналізу особливостей функціонування об'єкта дослідження.



Ретельний аналіз функціонування об'єкта дослідження також у значній мірі допомагає скласти перелік елементів системи та зовнішнього середовища. У зв'язку з цим проведемо аналіз дорожніх умов на ділянці міської транспортної схеми, що зображена на рис.1.1.

Головний транспортний потік рухається знизу вверх та зверху вниз по правій дорозі (рис.1.1), що є основною та має дві полоси руху для кожного напрямку. Зліва, паралельно основній дорозі, на відстані 750 метрів проходить другорядна дорога з двостороннім рухом, але з однією полосою руху для кожного напрямку. Перпендикулярно основній дорозі проходить дорога з одностороннім рухом (справа наліво) та однією полосою руху. Таким чином, дорожня схема ділянки, що розглядається, має два перехрестя. За перше приймемо перехрестя з основною дорогою, за друге – перехрестя з другорядною дорогою. Керування транспортними потоками на кожному перехресті здійснюється за допомогою світлофорних об'єктів.

Мета функціонування описаної ділянки міської транспортної схеми – це забезпечення проїзду автомобілів через ділянку у будь-якому напрямі за мінімальну кількість часу. За допомогою попередніх спостережень за транспортними потоками на ділянці встановлено, що існує проблема періодичного створення заторів на основній дорозі за першим перехрестям для напрямку руху автомобілів знизу вверх із-за недостатньої пропускнуої здатності дороги у цьому місці. Саме наявність даної проблеми зумовлює мету дослідження у нашому випадку – вдосконалення стратегії керування головним транспортним потоком у відповідному напрямі (знизу вверх) для запобігання виникненню заторів на основній дорозі за першим перехрестям. Звісно, вдосконалена стратегія керування головним транспортним потоком не повинна призводити до створення заторів у других місцях ділянки.

У разі недостатньої пропускнуої здатності основної дороги за першим перехрестям одним із способів вирішення проблеми є направлення частини головного транспортного потоку за об'їзним маршрутом через друге перехрестя

та другорядну дорогу. При цьому інструментом для реалізації розподілу головного транспортного потоку за прямим та об'їзним маршрутами може бути автоматизована система керування дорожнім рухом верхнього рівня разом з телематичними системами, встановленими на автомобілях.

Отже, з оглядом на сформульовану мету досліджень та спосіб вирішення проблеми, на рис.1.1 пунктирними стрілками виділені тільки ті маршрути руху автомобілів, що впливають на формування транспортних потоків на основній та другорядній дорогах за перехрестями у відповідному напрямі (знизу вверху). Причому за допомогою попередніх спостережень за транспортними потоками на ділянці встановлені процентні відношення кількостей автомобілів перед перехрестями, що їдуть за різними маршрутами (рис.1.1).

Згідно з означеною метою дослідження сформулюємо критерій ефективності роботи транспортної системи у загальному вигляді: робота транспортної системи є ефективною, якщо транспортний потік за першим чи другим перехрестям у відповідному напрямі (знизу вверху на рис.1.1) характеризується вільним рухом автомобілів. Робота транспортної системи є неефективною, якщо транспортний потік за першим чи другим перехрестям у відповідному напрямі характеризується груповим рухом автомобілів, що є передумовою створення затору.

Зазначимо, що для визначення характеру транспортних потоків на основній та другорядній дорогах за першим та другим перехрестями необхідно, щоб ці потоки були неперервними. Тобто, аналіз транспортних потоків треба проводити на певній відстані від перехресть, після дифузії груп автомобілів, виключивши при цьому вплив роботи світлофорів на наступних перехрестях (до місця аналізу потоків).

Для формування переліку елементів системи та зовнішнього середовища розіб'ємо ділянку міської транспортної схеми, що розглядається, на зони, де закономірності формування досліджуваних транспортних потоків мають істотні відмінності. Такими зонами є “входи” та “виходи” перехресть, а також ділянки,

що знаходяться на значній відстані від першого та другого перехресть. На рис.1.2 такі зони показані кругами, а кількість їх дорівнює десяти. Приймаючи виділені на ділянці міської транспортної схеми зони за елементи системи обґрунтуємо, які з них належать до самої системи, а які відносяться до зовнішнього середовища.

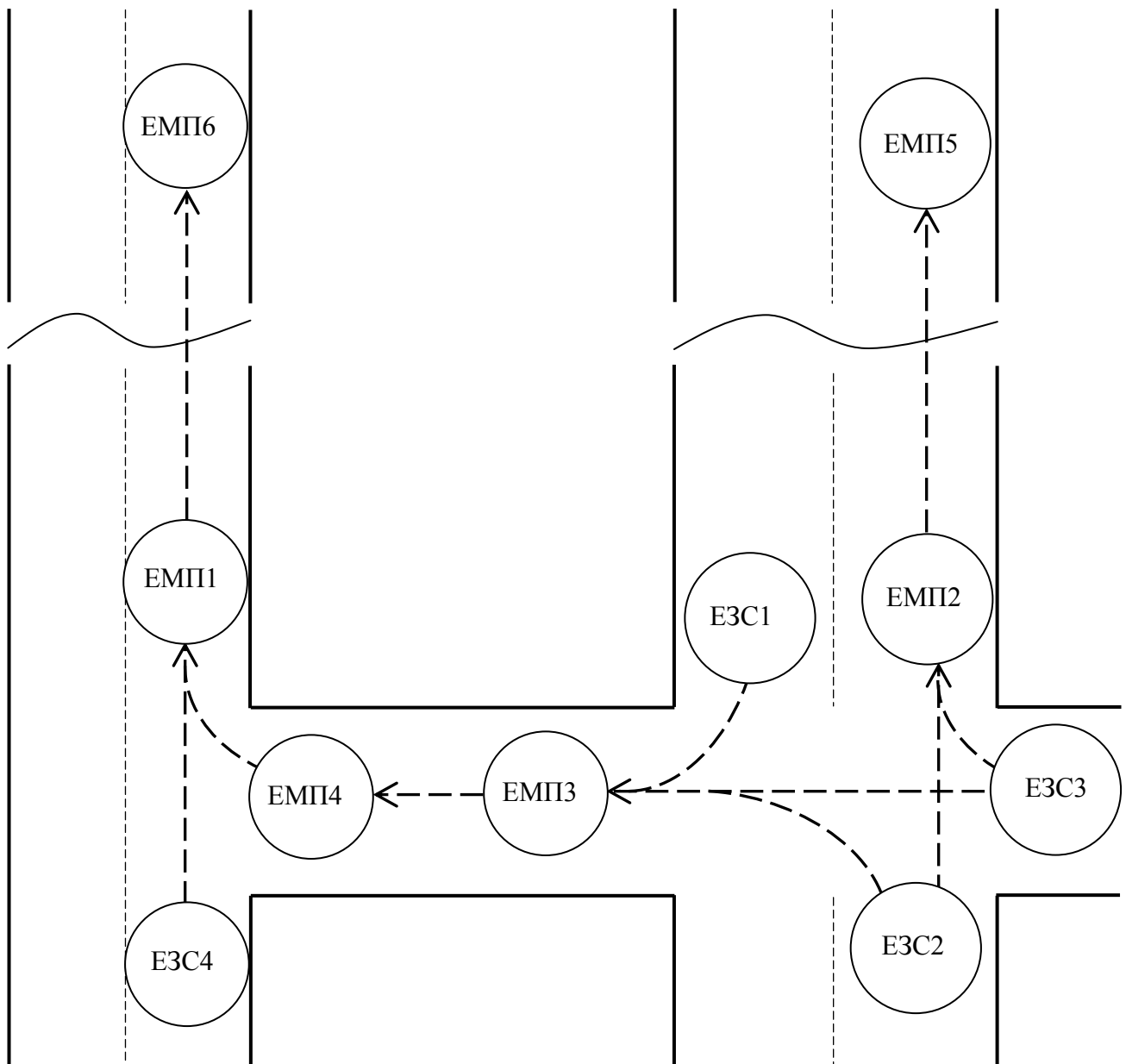


Рис.1.2. Структурна схема моделі поведінки транспортної системи разом з моделлю зовнішнього середовища

Для нашого випадку за межі досліджуваної транспортної системи можна прийняти межі ділянки міської транспортної схеми, що розглядається, але ці межі бажано проводити через перехрестя, щоб “входи” в систему, через які відбувається вплив зовнішнього середовища, співпадали зі “входами” перехресть. У такому разі зони перед перехрестями, що лежать на межах ділянки, можна віднести до елементів зовнішнього середовища (ЕЗС на рис.1.2), в той час, як інші зони можна віднести до елементів моделі поведінки системи (ЕМП на рис.1.2). Таким чином, маємо чотири елементи зовнішнього середовища та шість елементів моделі поведінки транспортної системи з нумерацією по порядку, як показано на рис.1.2.

Внутрішні зв'язки між елементами моделі поведінки системи та зовнішні зв'язки даних елементів з елементами зовнішнього середовища визначають маршрути руху автомобілів на ділянці міської транспортної схеми, що розглядається. Отже, позначивши ці маршрути на рис.1.2 пунктирними стрілками, отримаємо структурну схему моделі поведінки системи та моделі зовнішнього середовища.

У наступних підрозділах визначимо залежності, що описують зв'язки між елементами всередині системи та зв'язки елементів системи з елементами зовнішнього середовища. Для цього необхідно створити моделі всіх елементів як системи, так і зовнішнього середовища.

## 1.2. Визначення моделі зовнішнього середовища

Перший елемент зовнішнього середовища представляє собою зону ділянки міської транспортної схеми перед першим перехрестям, на якій формується перший конфліктний транспортний потік (рис.1.2). Модель даного елемента розробляється на основі результатів експериментальних замірів кількості автомобілів перед першим перехрестям у протилежному напрямі, що повертають направо (табл.1.1). Заміри проводились з 7.00 до 19.00 протягом п'яти днів (з понеділка по п'ятницю), з дискретністю у часі 60 хвилин.

Табл.1.1. Експериментальні заміри кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку

Година	Кількість автомобілів у черзі перед перехрестям				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
7.00	2	3	4	2	1
8.00	8	7	6	8	7
9.00	11	12	11	10	11
10.00	9	8	11	8	9
11.00	6	6	7	7	9
12.00	6	5	8	7	6
13.00	4	6	6	6	6
14.00	7	7	6	6	6
15.00	6	7	7	4	7
16.00	9	7	9	8	8
17.00	9	7	9	11	9
18.00	12	11	12	12	12
19.00	7	7	9	5	9

Введемо експериментальні дані, представлені у табл.1.1, до пакету MATLAB. Для цього використаємо редактор змінних математичного пакету «Variable Editor», вікно інтерфейсу якого наведено на рис.1.3.

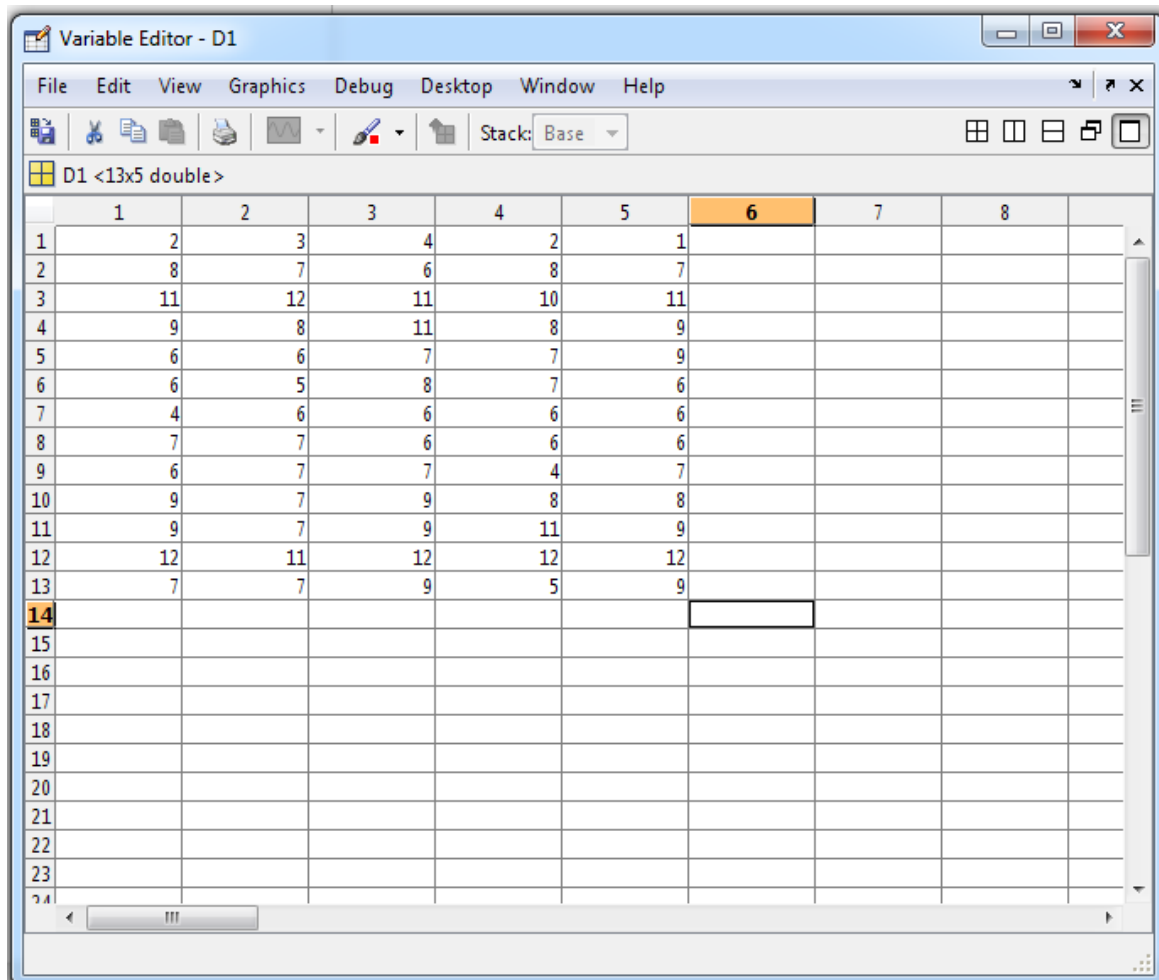


Рис.1.3. Вікно інтерфейсу редактора змінних математичного пакету MATLAB

Щоб увійти у редактор змінних, у робочому просторі «Workspace» пакету MATLAB через контекстне меню створюємо нову змінну (рис.1.4), називаємо її D1 (щільність першого конфліктного транспортного потоку перед першим перехрестям) та робимо подвійний натиск лівої клавіші мишки, навівши курсор на назву змінної (рис.1.5).

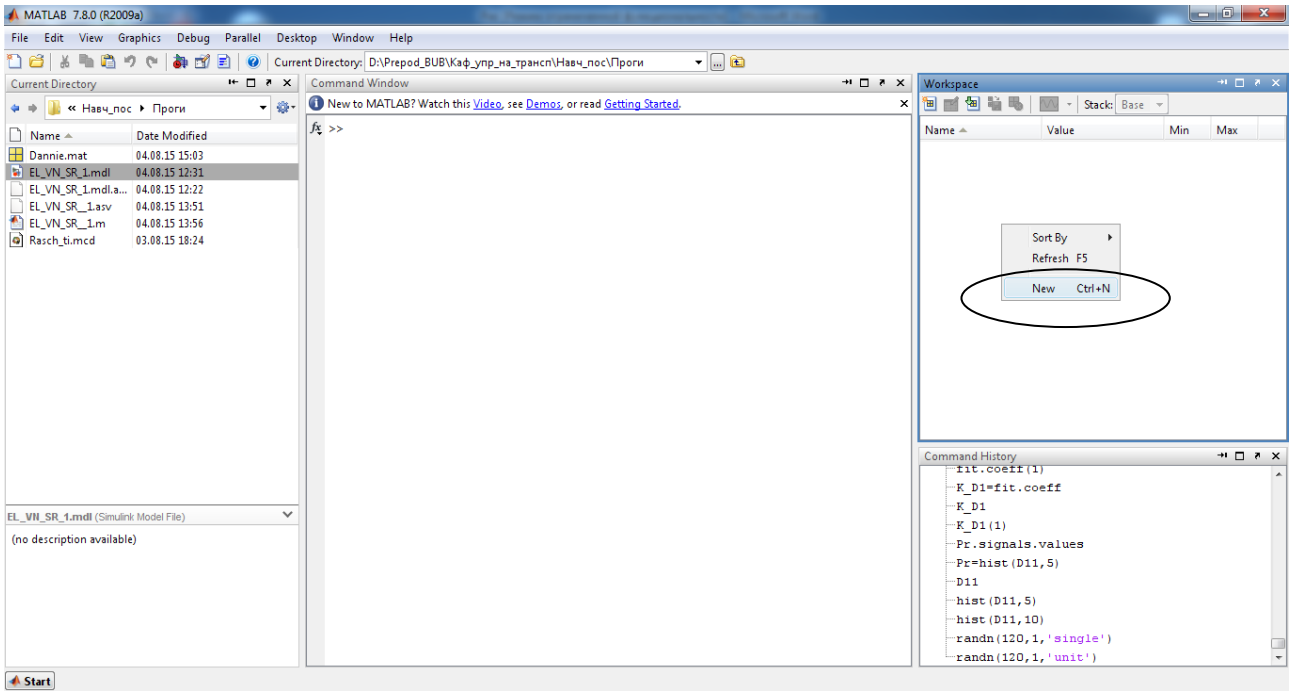


Рис.1.4. Головне вікно інтерфейсу математичного пакету MATLAB

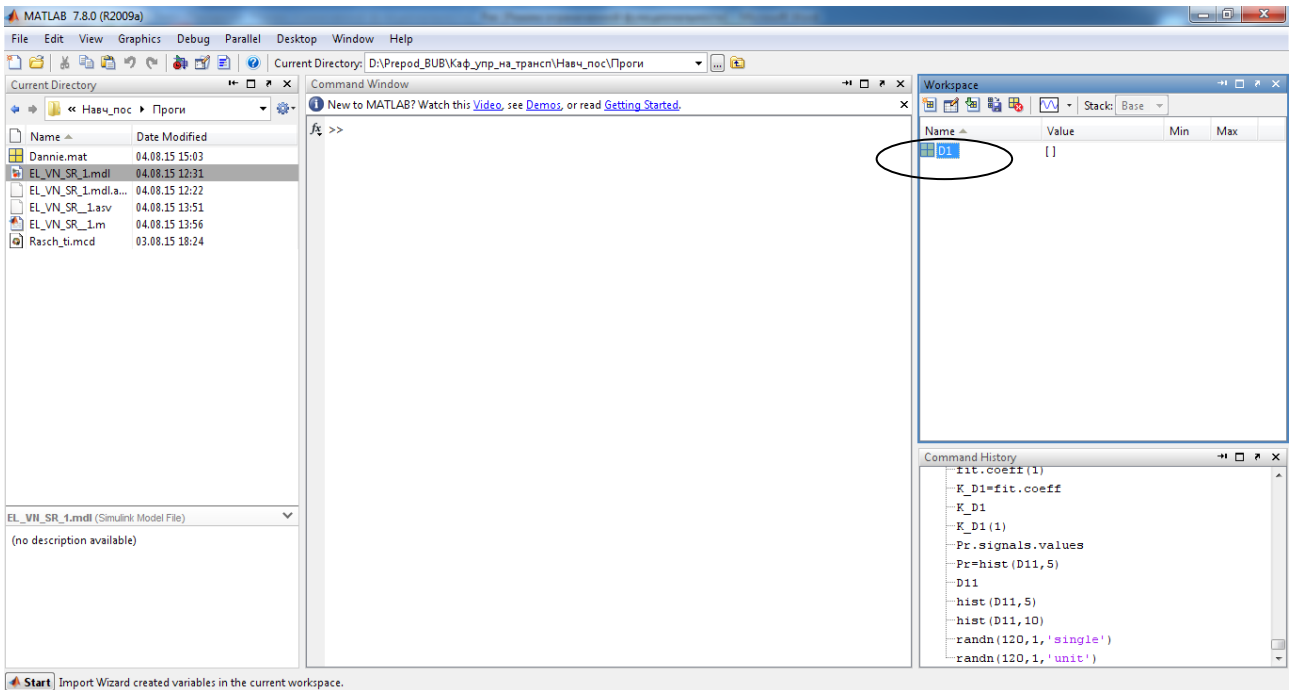


Рис.1.5. Головне вікно інтерфейсу математичного пакету MATLAB

Для кожної години знаходимо середнє значення кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку за

п'ять днів. Для цього у командному вікні пакета MATLAB («Command Window» на рис.1.5) вводимо команду:

```
D1_sr=transp(sum(transp(D1)))/5
```

та тиснемо клавішу «Enter».

Після виконання команди формується новий вектор D1\_sr, кожний елемент якого є результатом усереднення всіх елементів матриці D1 у відповідних рядках:

```
>> D1_sr=transp(sum(transp(D1)))/5
```

```
D1_sr =
```

```
2.4000
```

```
7.2000
```

```
11.0000
```

```
9.0000
```

```
7.0000
```

```
6.4000
```

```
5.6000
```

```
6.4000
```

```
6.2000
```

```
8.2000
```

```
9.0000
```

```
11.8000
```

```
7.4000
```

Для побудови графіку зміни у часі середньої кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку за допомогою редактора змінних пакету MATLAB задамо вектор часу (рис.1.6).



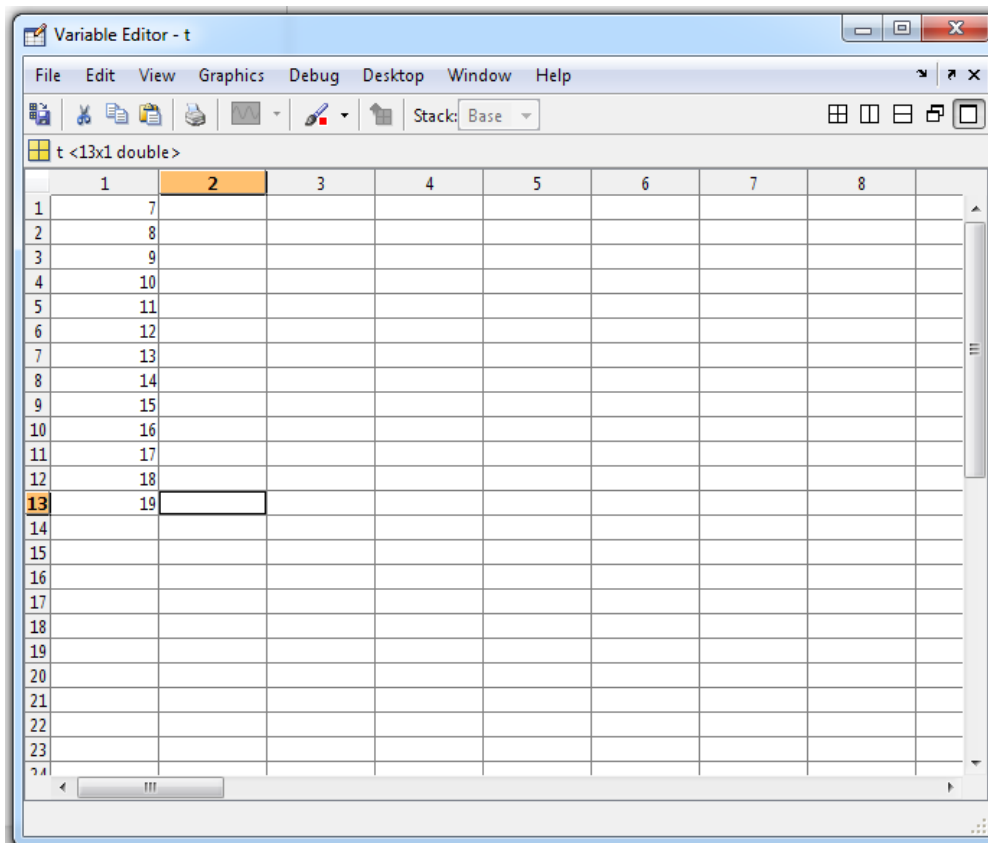


Рис.1.6. Вікно інтерфейсу редактора змінних математичного пакету MATLAB

Далі у командному вікні пакета MATLAB («Command Window» на рис.1.5) вводимо команду:

**plot(t,D1\_sr),grid**

та тиснемо клавішу «Enter». Результат виконання команди показаний на рис.1.7.

На рис.1.7 графік показаний з лінійною інтерполяцією, але значення кількості автомобілів у першому конфліктному напрямі перед першим перехрестям невідоме між моментами замірів, тому доцільніше буде даний графік представити за допомогою маркерів без лінійної інтерполяції. Для цього у пункті «Edit» головного меню графічного вікна оберемо підпункт «Figure Properties», та настроїмо редактор властивостей графіка («Property Editor») так, як показано на рис.1.8.

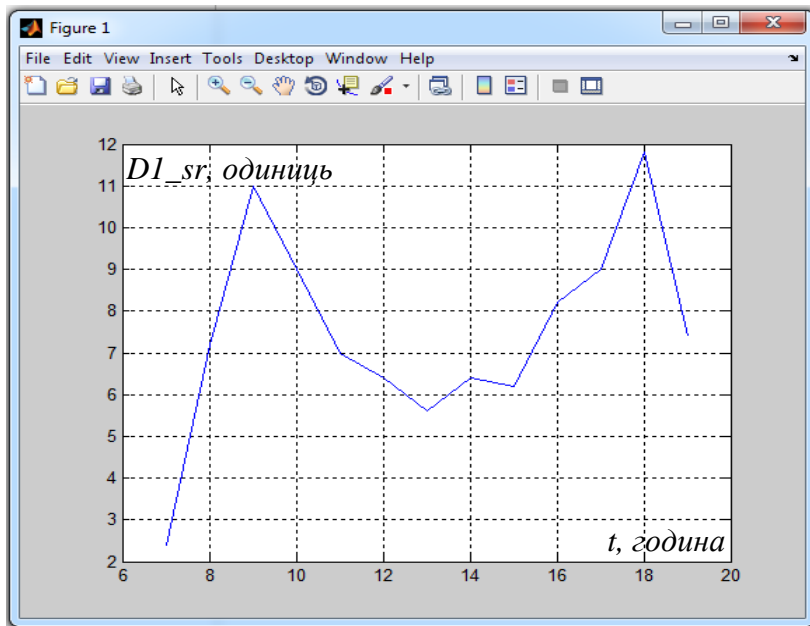


Рис.1.7. Графік зміни у часі середньої кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку

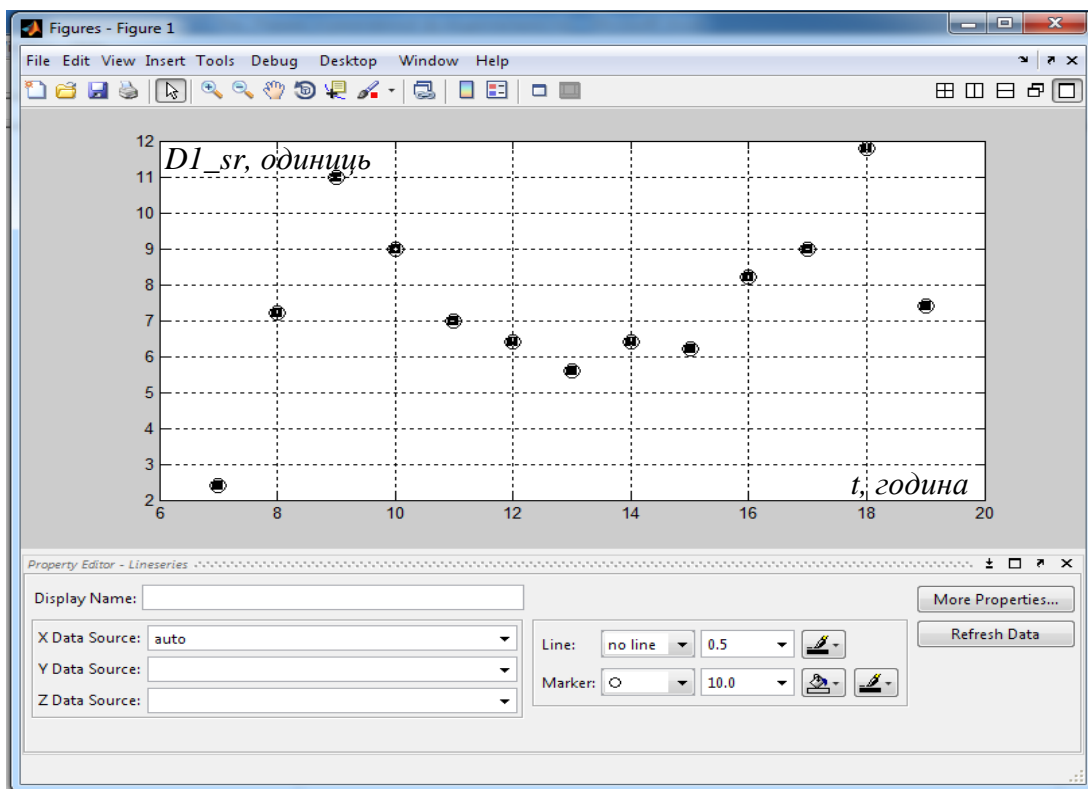


Рис.1.8. Графік зміни у часі середньої кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку разом з редактором властивостей графіка

Використаємо отриманий графік (рис.1.8) для визначення детермінованої складової моделі імітації зміни у часі кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку, яка представляє собою одну з двох частин моделі першого елемента зовнішнього середовища. Для цього застосуємо додаток «Basic Fitting», який визивається через відповідний підпункт пункту «Tools» головного меню графічного вікна (рис.1.9).

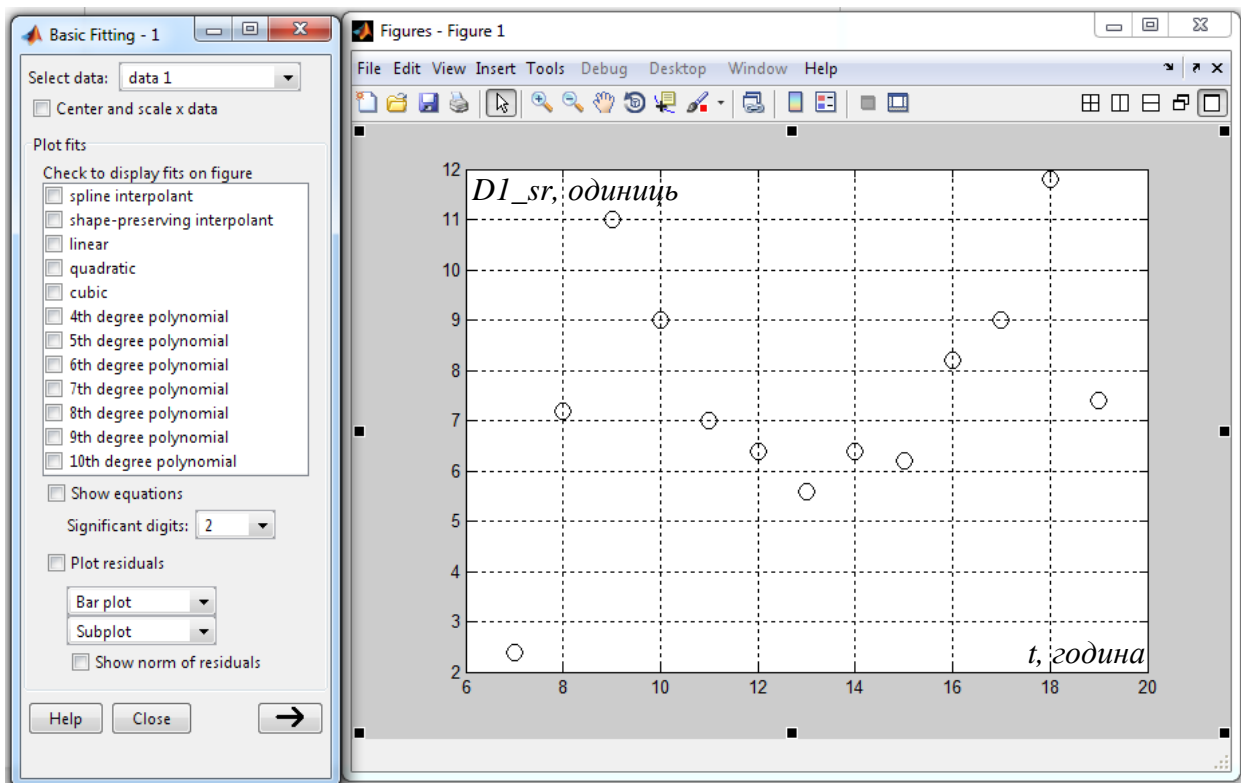


Рис.1.9. Графік зміни у часі середньої кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку разом з додатком «Basic Fitting»

Додаток «Basic Fitting» дозволяє проводити апроксимацію експериментальних даних ступеневими поліномами різних порядків та відображає результат апроксимації у вигляді графіків поліному та вихідної точкової експериментальної кривої (рис.1.10). Додатково можна спостерігати

рівняння ступеневого поліному (треба поставити галочку напроти пункту «Show equation»), графік відхилень точок експериментальних замірів від апроксимуючої кривої (треба поставити галочку напроти пункту «Plot residuals»), а також нормовану оцінку даних відхилень (треба поставити галочку напроти пункту «Show norm of residuals»). Щоб обрати порядок ступеневого поліному, треба поставити галочку навпроти відповідного пункту у вікні «Check to display fits on figure» (рис.1.10). На рис.1.10 показаний приклад апроксимації експериментальних даних ступеневим поліномом восьмого порядку.

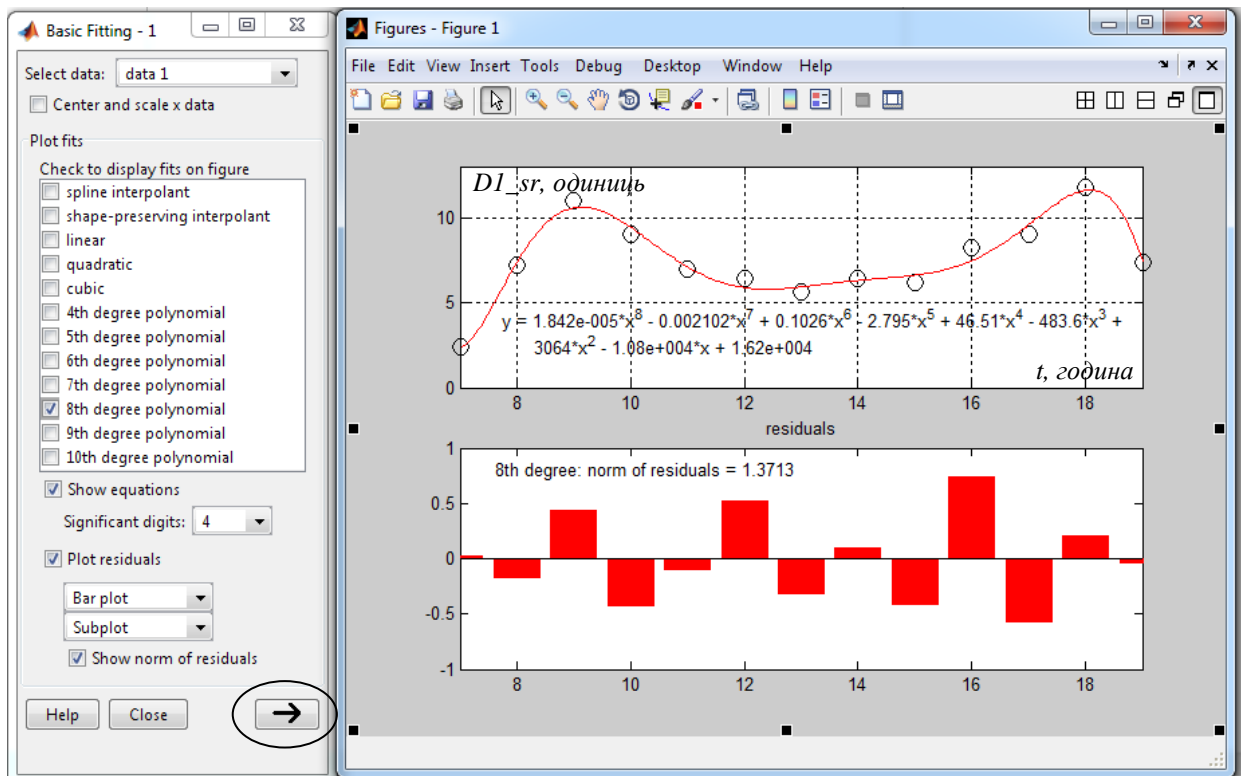


Рис.1.10. Результат апроксимації експериментальних даних ступеневим поліномом восьмого порядку

Із рис.1.10 видно, що максимальне значення абсолютного відхилення точок експериментальних замірів від апроксимуючої кривої за умови апроксимації експериментальних даних ступеневим поліномом восьмого

порядку не перевищує 0,8 одиниць, а корінь квадратний суми квадратичних відхилень точок експериментальних замірів від апроксимуючої кривої становить 1,37. Для наших досліджень приймемо таку точність апроксимації прийнятною.

Для зручності подальшого використання результатів апроксимації збережемо їх у робочому просторі пакета MATLAB. Для цього у правому нижньому куті вікна додатку «Basic Fitting» натиснемо стрілку “праворуч” (рис.1.10). У допоміжному вікні, що відкрилося, тиснемо кнопку «Save to workspace» (рис.1.11). Далі ставимо галочку тільки напроти пункту «Save fit as a MATLAB struct named» та тиснемо кнопку «Ok» (рис.1.11).

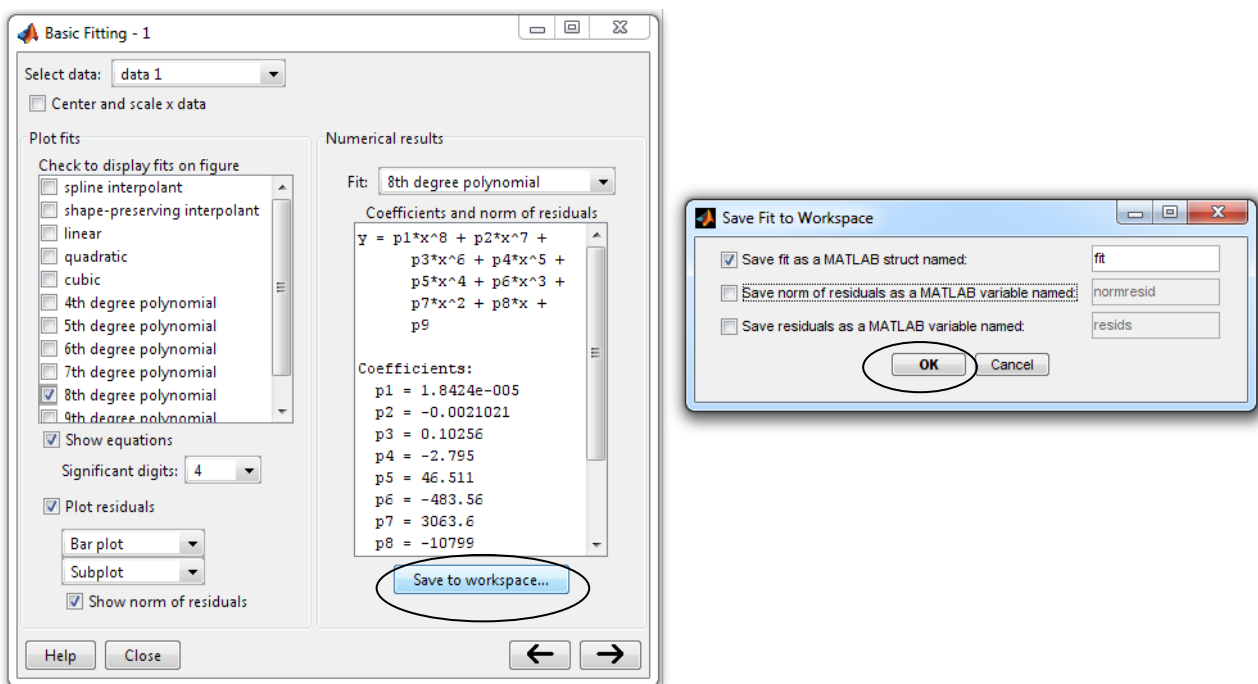


Рис.1.11. Вікно інтерфейсу додатку «Basic Fitting»

Після цього у командному вікні пакета MATLAB вводимо команду:

```
>> K_D1_sr=fit.coeff
```

та тиснемо клавішу «Enter».

Як результат виконання команди формується новий вектор  $K_{D1\_sr}$ , елементи якого є коефіцієнтами апроксимуючого ступеневого поліному:

$K_{D1\_sr} =$

$1.0e+004 *$

**Columns 1 through 7**

**0.0000 -0.0000 0.0000 -0.0003 0.0047 -0.0484 0.3064**

**Columns 8 through 9**

**-1.0799 1.6199**

Визначимо випадкову складову моделі імітації зміни у часі кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку, яка представляє собою другу частину моделі першого елемента зовнішнього середовища. Для цього проведемо оцінку стандартного відхилення миттєвих значень кількості автомобілів експериментальної вибірки (табл.1.1) від середнього значення, з урахуванням його зміни у часі, та обґрунтуємо закон розподілення даного відхилення як випадкової величини. Щоб оцінити стандартне відхилення кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку, перетворимо матрицю експериментальних даних  $D1$  у матрицю  $D1\_dev$  за допомогою короткої програми на мові пакета MATLAB, що вводиться у командне вікно:

```
>> for i=1:13
```

```
D1_dev(i,:)=D1(i,:)-D1_sr(i);
```

```
end
```

Результатом виконання програми є матриця відхилень миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення (рис.1.12), яке зберігається у векторі  $D1\_sr$  та відрізняється для кожної години.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0.4000	0.6000	1.6000	-0.4000	-1.4000			
2	0.8000	-0.2000	-1.2000	0.8000	-0.2000			
3	0	1	0	-1	0			
4	0	-1	2	-1	0			
5	-1	-1	0	0	2			
6	-0.4000	-1.4000	1.6000	0.6000	-0.4000			
7	-1.6000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000			
8	0.6000	0.6000	-0.4000	-0.4000	-0.4000			
9	-0.2000	0.8000	0.8000	-2.2000	0.8000			
10	0.8000	-1.2000	0.8000	-0.2000	-0.2000			
11	0	-2	0	2	0			
12	0.2000	-0.8000	0.2000	0.2000	0.2000			
13	-0.4000	-0.4000	1.6000	-2.4000	1.6000			
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								

Рис.1.12. Матриця відхилень миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення

Зазначимо, що для кожної години спостерігається приблизно такий самий діапазон зміни відхилень миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення (рис.1.12). Отже, приймемо припущення про однаковий характер випадкової зміни кількості автомобілів для кожної години, і параметри випадкової складової моделі елемента зовнішнього середовища будемо визначати за об'єднаною за годинами вибіркою. Це є примусовим кроком, оскільки на кожену годину маємо занадто мало статистичних даних. З цією метою перетворимо матрицю  $D1\_dev$  у вектор  $D1\_vec$  за допомогою двох команд, що виконуються по черзі:

```
D1_vec=D1_dev'
```

```
D1_vec= D1_vec(:)
```

Далі вводимо у командне вікно пакету MATLAB наступну команду:

```
ST_DEV1=std(D1_vec)
```

Результатом виконання команди є стандартне відхилення миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення для першого конфліктного транспортного потоку перед першим перехрестям:

```
>> ST_DEV1=std(D1_vec)
```

```
ST_DEV1 =
```

```
0.9779
```

З метою обґрунтування закону розподілу випадкової величини стосовно кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку побудуємо гістограму, що характеризує розподіл відхилень миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення за ділянками, на які розбитий діапазон зміни даного параметру. Ширину ділянки приймемо рівною 0,6 одиниць. Для побудови гістограми використаємо наступну команду:

```
hist(D1_vec,(max(D1_vec)-min(D1_vec))/0.6)
```

Результат виконання команди наведений на рис.1.13.



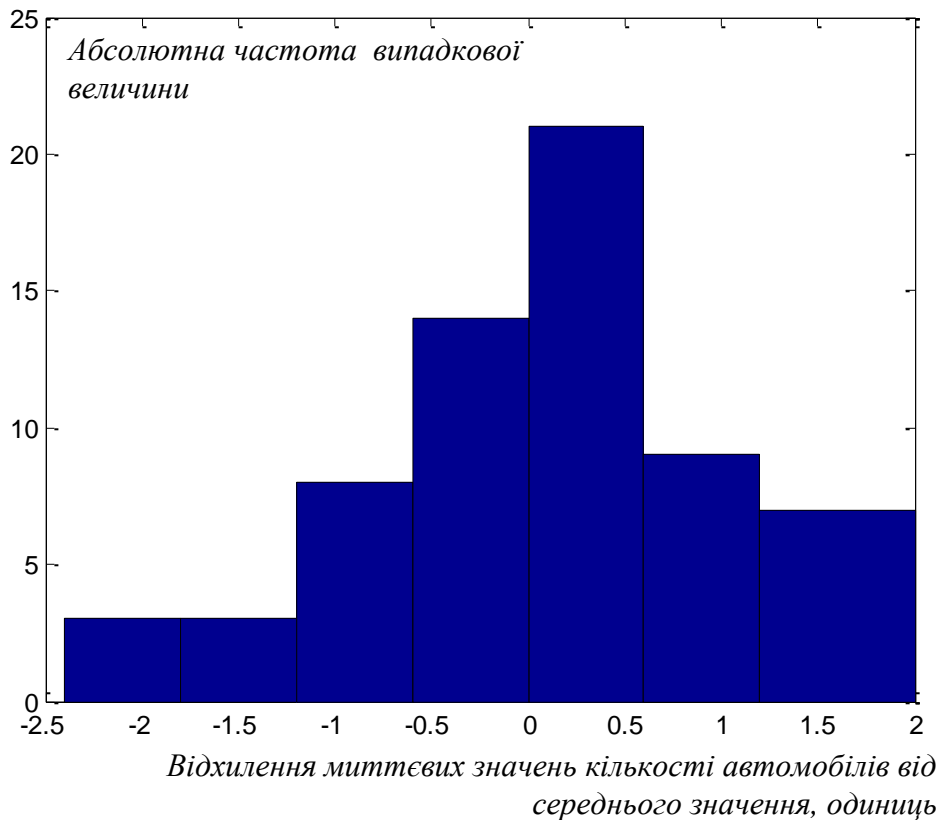


Рис.1.13. Гістограма розподілу відхилення миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення за ділянками діапазону зміни даного параметру

Зазначимо, що за видом гістограми (рис.1.13) закон розподілення відхилення миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення як випадкової величини близький до нормального.

Отже, за випадкову складову моделі першого елемента зовнішнього середовища приймаємо генератор випадкових чисел за нормальним законом розподілення із стандартним відхиленням 0.9779 та математичним очікуванням нуль.

Реалізуємо модель першого елемента зовнішнього середовища у додатку Simulink математичного пакету MATLAB. Щоб увійти у середовище додатку Simulink із списку «New» пункту «File» головного меню пакету MATLAB вибирається підпункт «Model» (рис.1.14). При цьому з'являється спеціальне

вікно, у якому математична модель створюється у вигляді структурної схеми (рис.1.15).

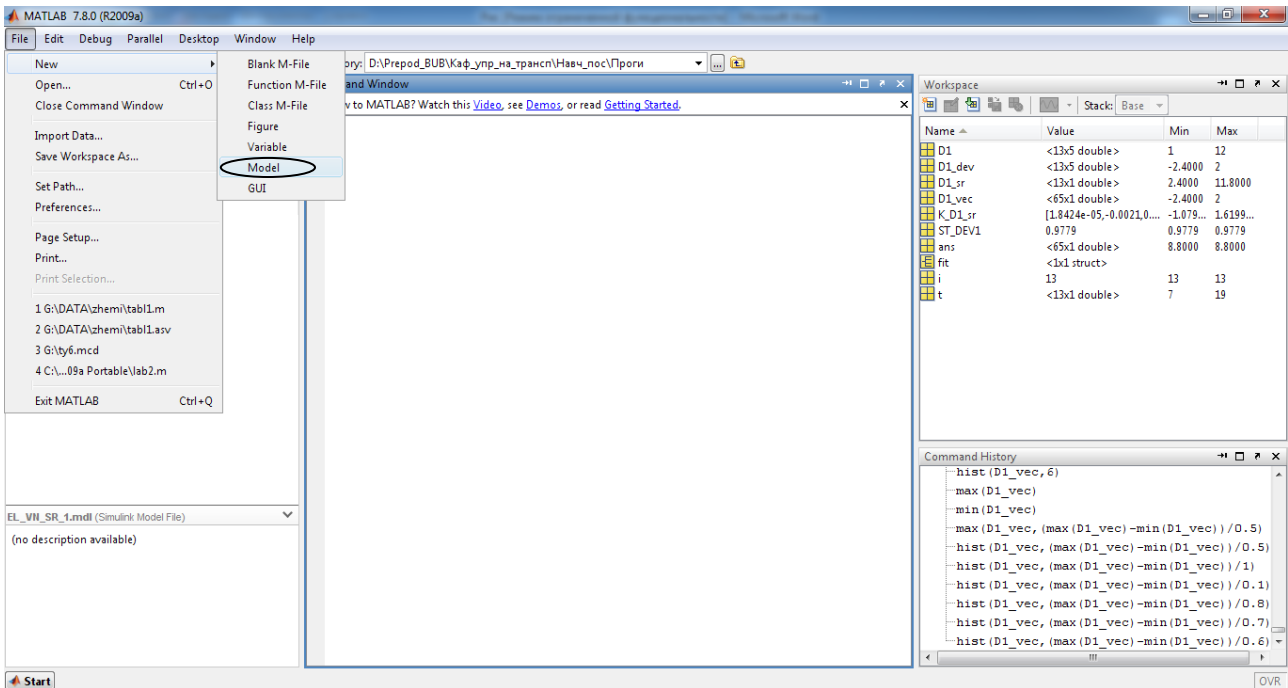


Рис.1.14. Головне вікно математичного пакету MATLAB

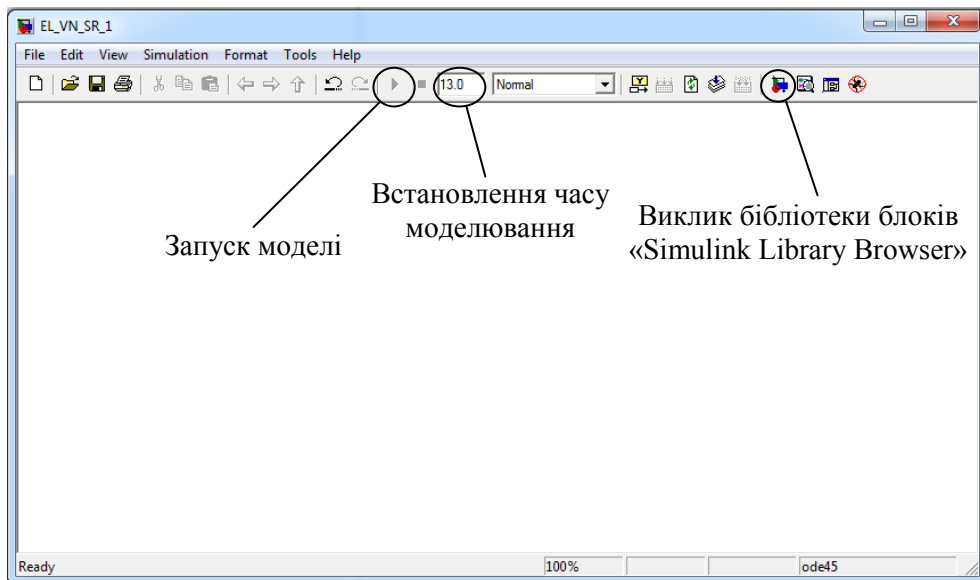


Рис.1.15. Вікно інтерфейсу додатку Simulink математичного пакету MATLAB

Блоки, з яких збирається математична модель, знаходяться у бібліотеці блоків «Simulink Library Browser», що викликається натисненням відповідної «іконки» на панелі інструментів вікна інтерфейсу додатку Simulink (рис.1.15). Бібліотека блоків складається з трьох основних частин (рис.1.16) – провідника (Libraries), вікна опису блока (Block Description) та області, в якій знаходяться блоки (в правій частині вікна інтерфейсу бібліотеки). Бібліотека блоків має ієрархічну структуру: в ній можна виділити головні розділи, з класифікацією блоків за призначенням, та допоміжні підрозділи.

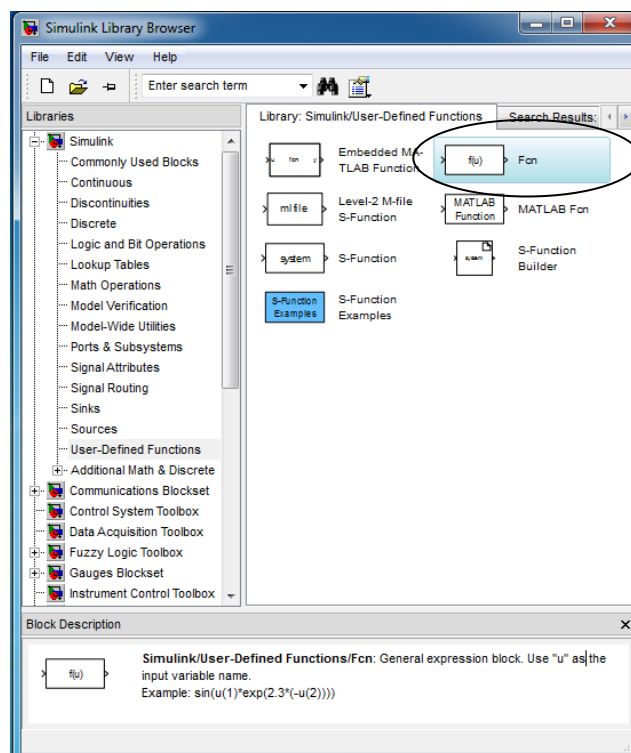


Рис.1.16. Вікно інтерфейсу бібліотеки блоків додатку Simulink

Для реалізації детермінованої складової моделі першого елемента зовнішнього середовища використаємо блок “Fcn”, що знаходиться в підрозділі “User-Defined Functions” розділу “Simulink” (рис.1.16). Щоб додати цей блок до моделі, треба навести на нього курсором, натиснути ліву клавішу мишки та, утримуючи її, перенести блок у вікно інтерфейсу додатку Simulink. Після цього блок “Fcn” з’явиться у вікні, де створюється модель (рис.1.17).

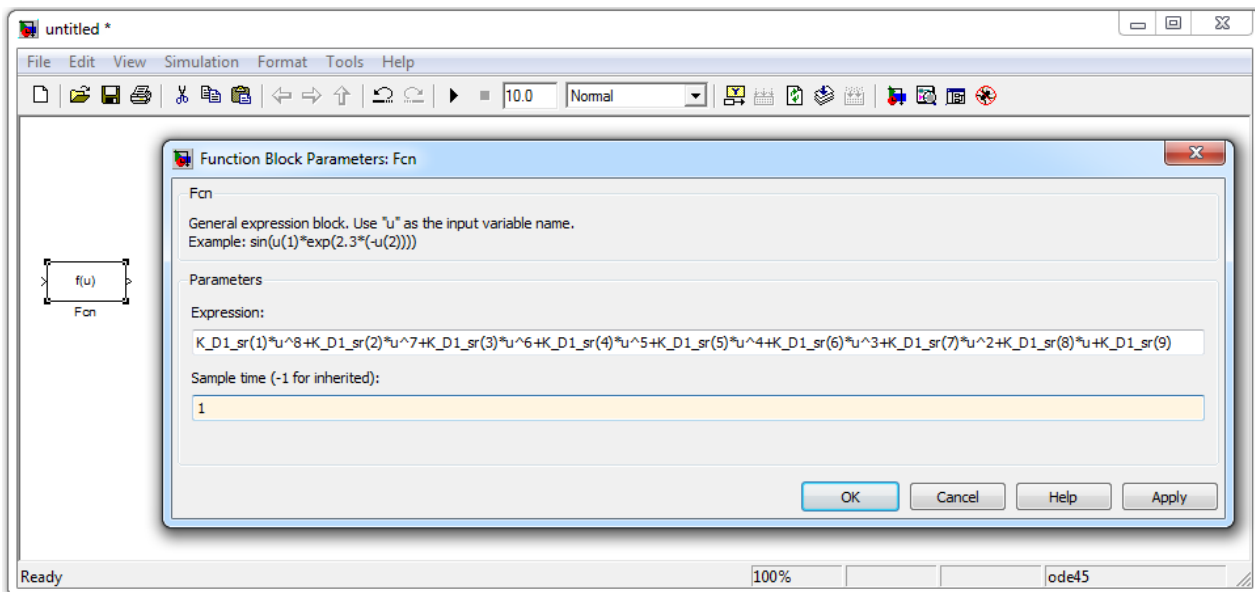


Рис.1.17. Вікно інтерфейсу додатку Simulink із блоком “Fcn”

Блок “Fcn” дозволяє задавати будь-яку функцію, що визначається користувачем. Для цього увійдемо до меню настройок даного блока, навівши на нього курсор та здійснивши подвійний натиск лівої клавіші мишки. У вікні меню настройок блока “Fcn” у полі “Expression” введемо ступеневий поліном, що визначений раніше та є детермінованою складовою моделі першого елемента зовнішнього середовища (рис.1.17). При цьому коефіцієнти полінома задамо через вектор  $K\_DI\_sr$ , який ми раніше зберегли у робочому просторі пакету MATLAB (рис.1.11).

У полі “Sample time” вказується крок дискретизації у часі вихідного сигналу блока “Fcn”, який, з урахуванням динаміки керування транспортними потоками на перехрестях, прийемо рівним 1 секунді (рис.1.17).

Для імітації часу в моделі використаємо блок “Digital Clock”, що знаходиться у підрозділі “Sources” розділу “Simulink”. В настройках блоку у полі “Sample time” також виставляємо крок дискретизації у часі вихідного сигналу 1 секунду (рис.1.18).

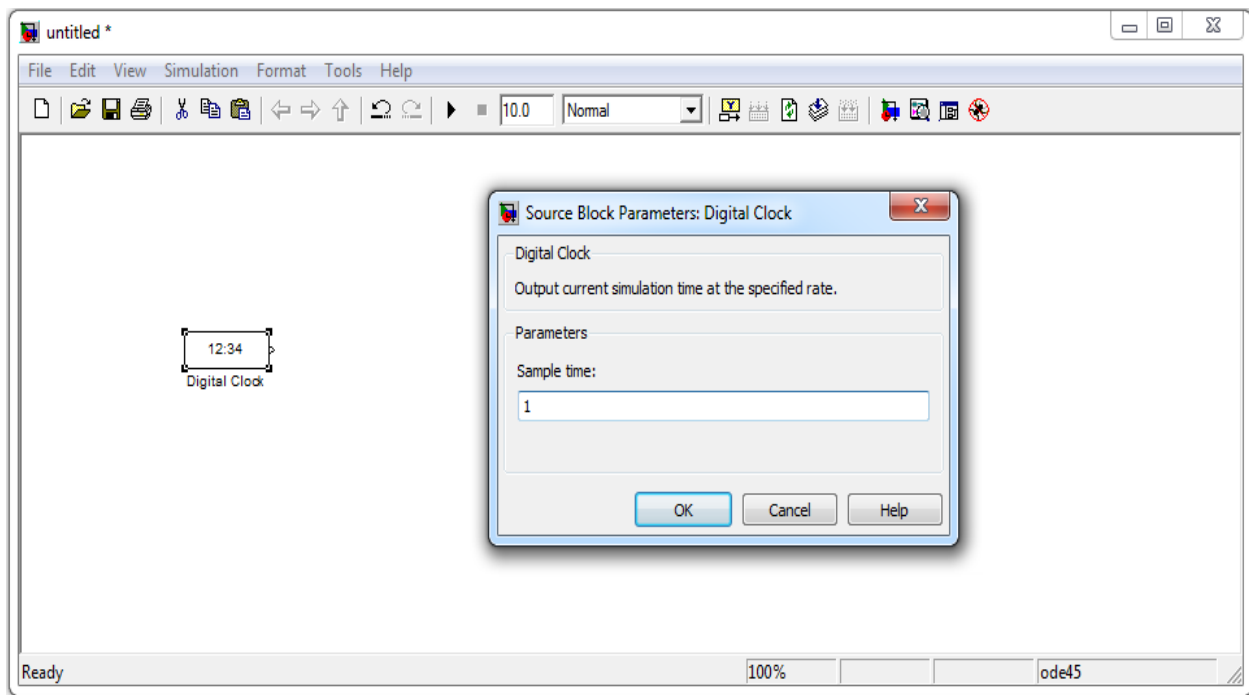


Рис.1.18. Вікно інтерфейсу додатку Simulink із блоком “Digital Clock”

Моделювання динаміки різноманітних процесів в додатку Simulink завжди відбувається в секундах та починається з нульової відмітки. Оскільки детермінована складова моделі елемента зовнішнього середовища була створена для вхідного сигналу, що вимірюється у годинах і змінюється з 7-ої до 19-ої години, проведемо відповідне перетворення сигналу на вході блока “Fcn” за допомогою блоків “Constant” (підрозділ “Sources” розділу “Simulink”), “Sum” (підрозділ “Math Operations” розділу “Simulink”) та “Gain” (підрозділ “Math Operations” розділу “Simulink”). Блоки “Constant” та “Sum” використовуються для завдання кількості секунд, на яку зміщується початковий час моделювання (7 годин = 7·3600 секунд). Відповідне число задається в полі “Constant value” меню налаштувань блока “Constant” (рис.1.19). Таким чином, 7-ма година в додатку Simulink умовно приймається нульовим початковим часом моделювання.

Блок “Gain” необхідний для перетворення секунд на години. Відповідний коефіцієнт пропорційності ( $1/3600$ ) задається в полі “Gain” меню налаштувань блока “Gain” (рис.1.20).

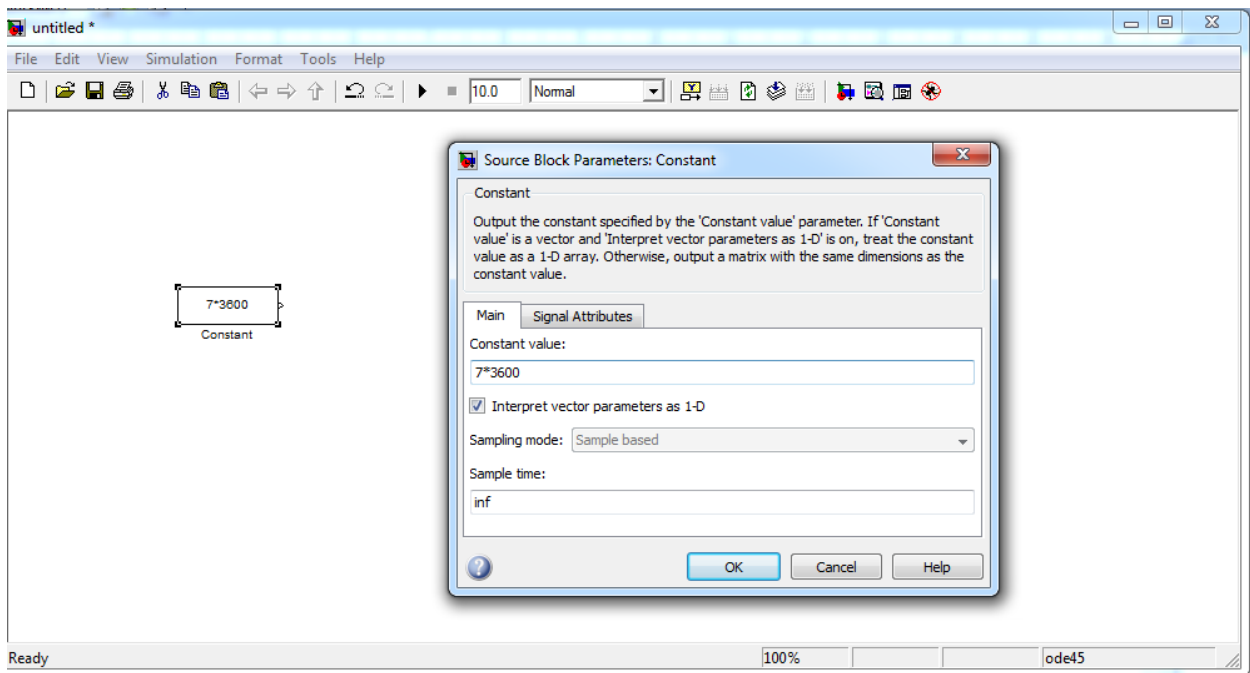


Рис.1.19. Вікно інтерфейсу додатку Simulink із блоком “Constant”

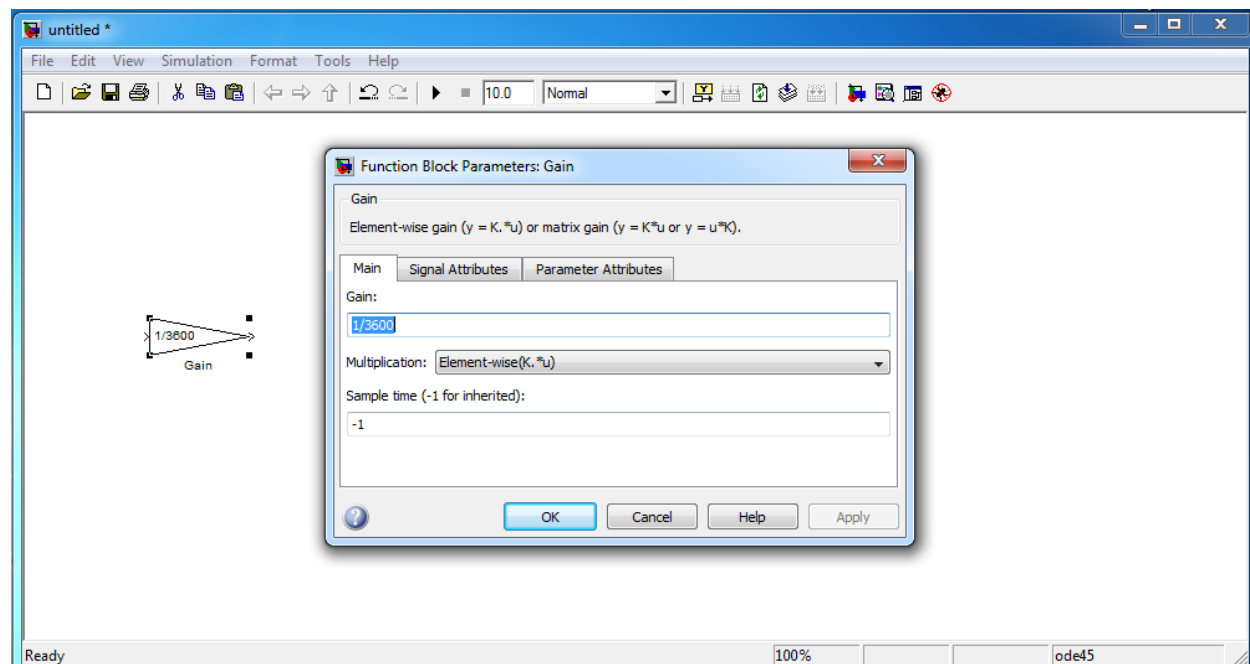


Рис.1.20. Вікно інтерфейсу додатку Simulink із блоком “Gain”

На основі вищеповисаних блоків створено структурну схему детермінованої складової моделі першого елемента зовнішнього середовища (рис.1.21).

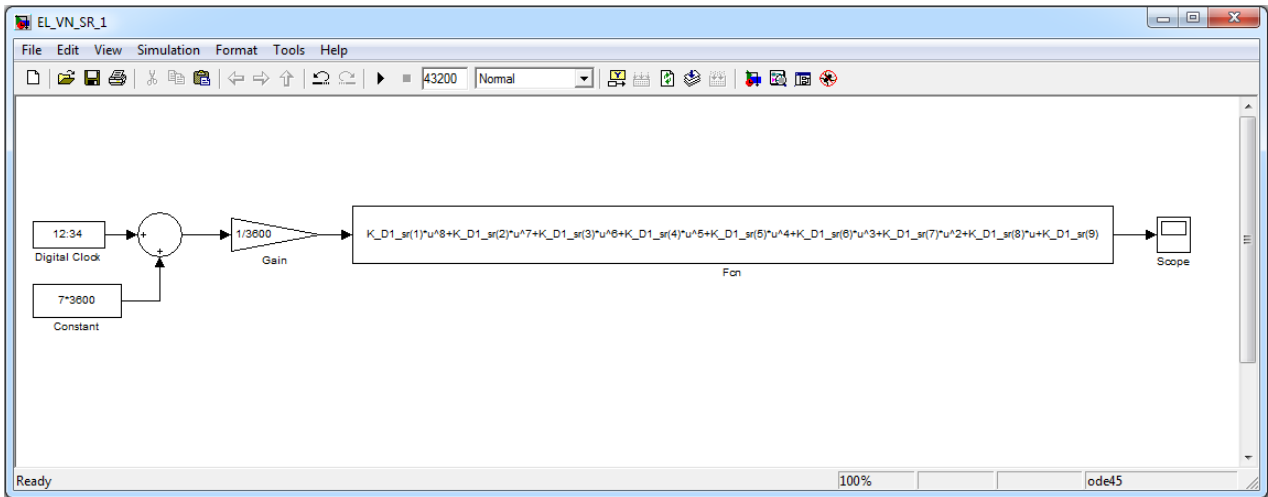


Рис.1.21. Структурна схема детермінованої складової моделі першого елемента зовнішнього середовища у додатку Simulink

Для перевірки детермінованої складової моделі першого елемента зовнішнього середовища приєднаємо вихід блока “Fcn” до блока “Scope” (підрозділ “Sinks” розділу “Simulink”). Також за допомогою відповідної “іконки” на панелі інструментів вікна інтерфейсу додатку Simulink (рис.1.15) час моделювання замість 10 секунд за умовчанням встановимо 43200 секунд (12 годин). Після цього для запуску моделі натискаємо на спеціальну “іконку” на панелі інструментів вікна інтерфейсу додатку Simulink (рис.1.15).

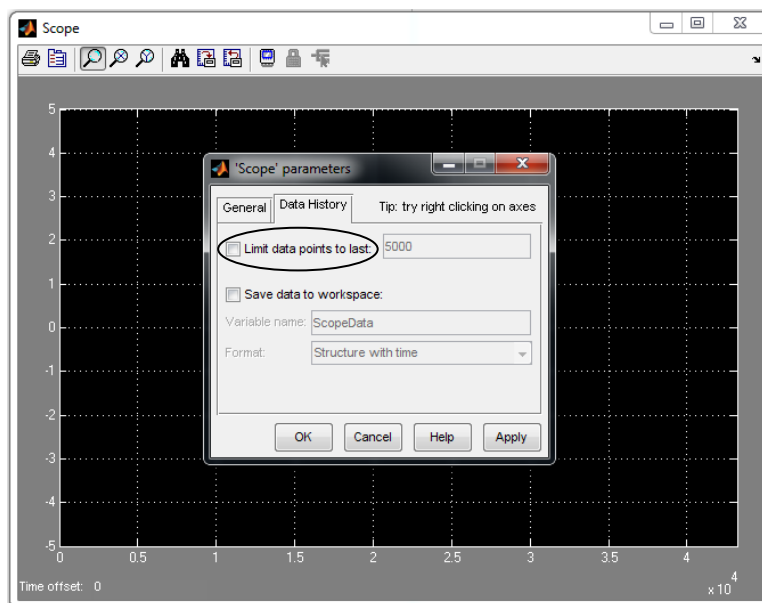


Рис.1.22. Вікно локальних налаштувань параметрів блоку “Scope”

Для відображення результатів моделювання наводимо курсор на блок “Score” та здійснюємо подвійний натиск лівої клавіші мишки. Для коректного представлення графіку в настройках блоку “Score” необхідно зняти обмеження щодо кількості точок, що відображуються у графічному вікні (рис.1.22).

Результат моделювання наведений на рис.1.23.

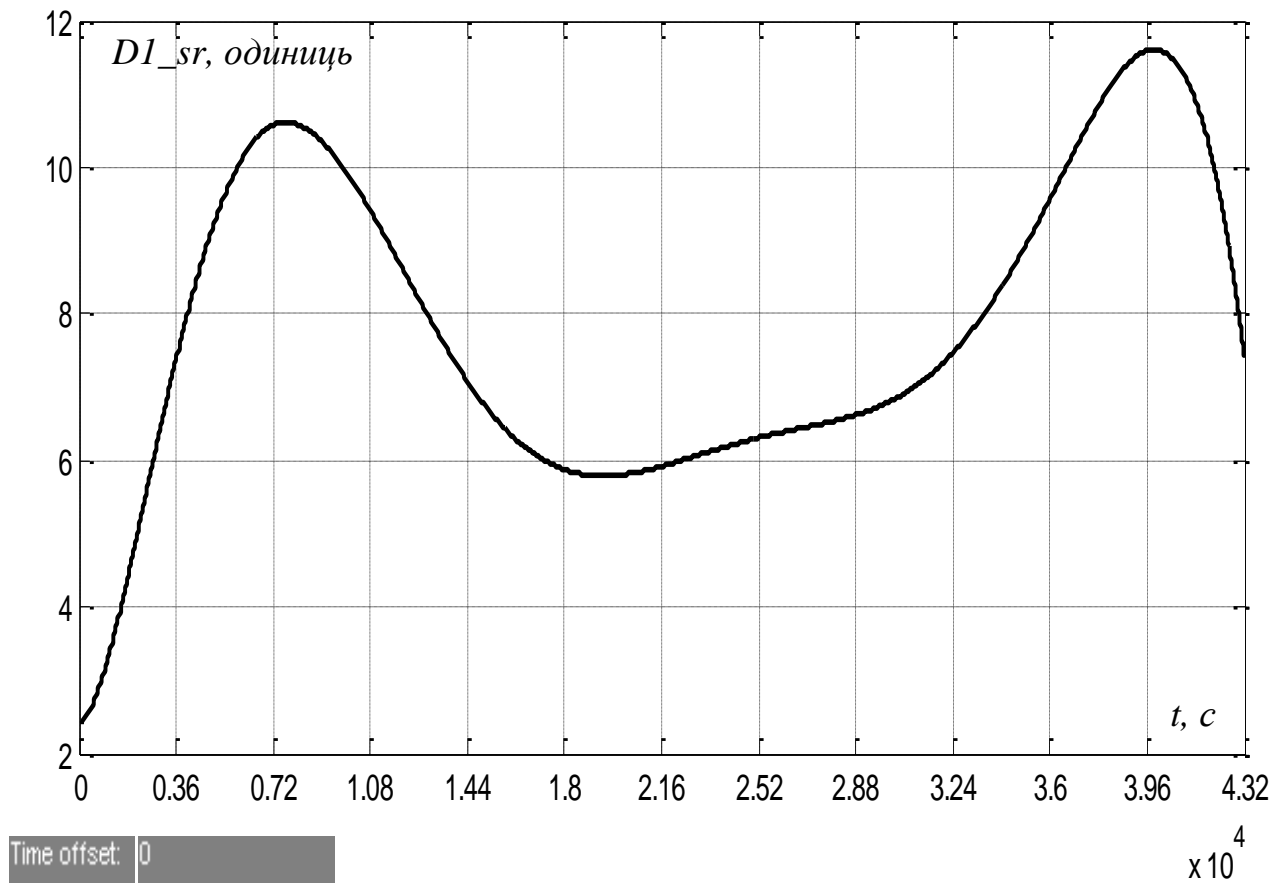


Рис.1.23. Зміна у часі середньої кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку

Зазначимо, якщо відстань між відмітками за віссю абсцис в меню настройок графічного вікна встановити рівною 3600 (рис.1.24), то вертикальні лінії сітки на рис.1.23 будуть відповідати годинам від 8 до 18, що спрощує візуальний аналіз кривої в реальному часовому масштабі.



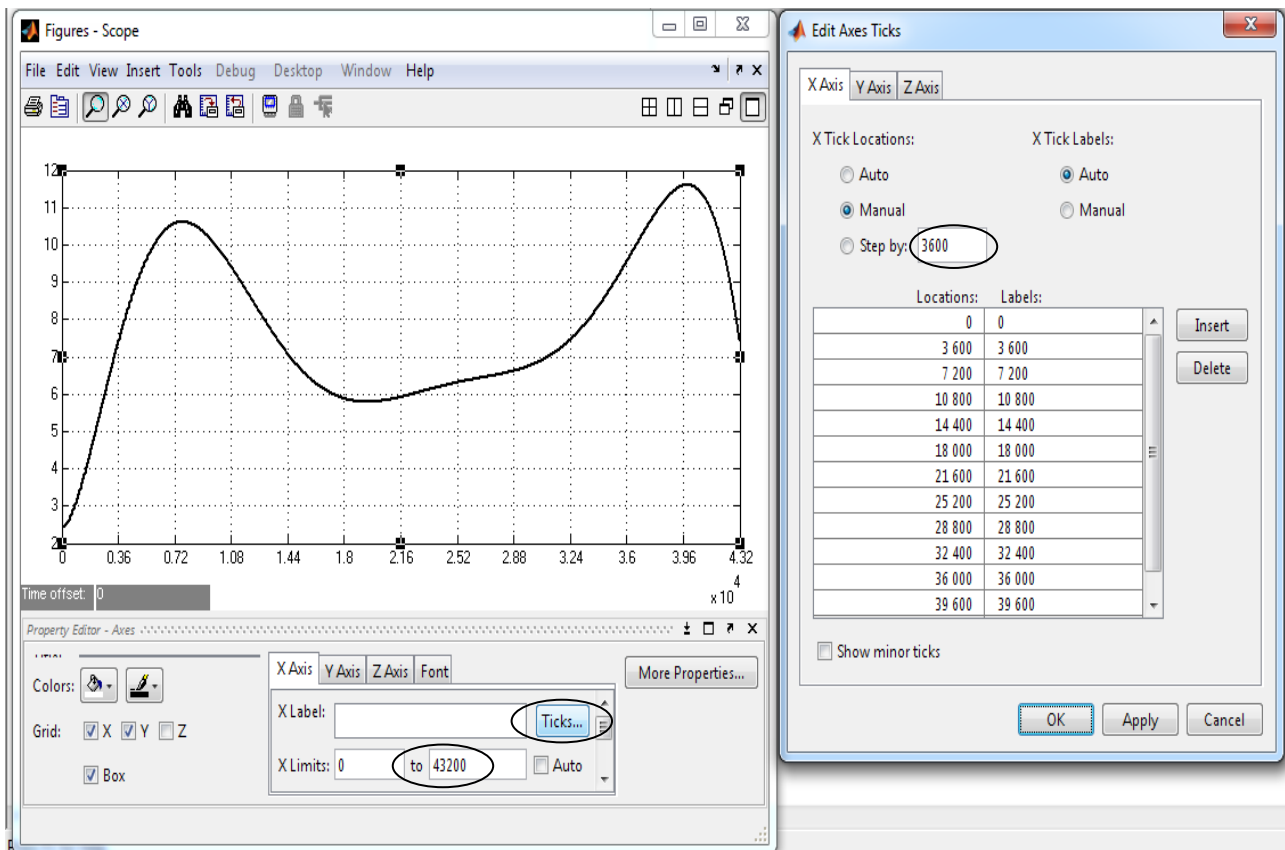


Рис.1.24. Вікно настройок графічного вікна блока “Score”

Для імітації зміни у часі випадкової складової моделі першого елемента зовнішнього середовища використаємо блок “Random Number” (підрозділ “Sources” розділу “Simulink”), який є генератором випадкових чисел за нормальним законом розподілу. Статистичні параметри блоку “Random Number” задаються згідно визначеним раніше статистичним характеристикам випадкової складової моделі першого елемента зовнішнього середовища – середнє значення дорівнює нулю (поле “Mean” у вікні настройок блоку на рис.1.25) та дисперсія дорівнює квадрату стандартного відхилення  $ST\_DEV1^2$  (поле “Variance” у вікні настройок блоку на рис.1.25). Крок дискретизації у часі вихідного сигналу генератора випадкових чисел приймається рівним періоду світлофорних циклів досліджуваних перехресть (100 с).

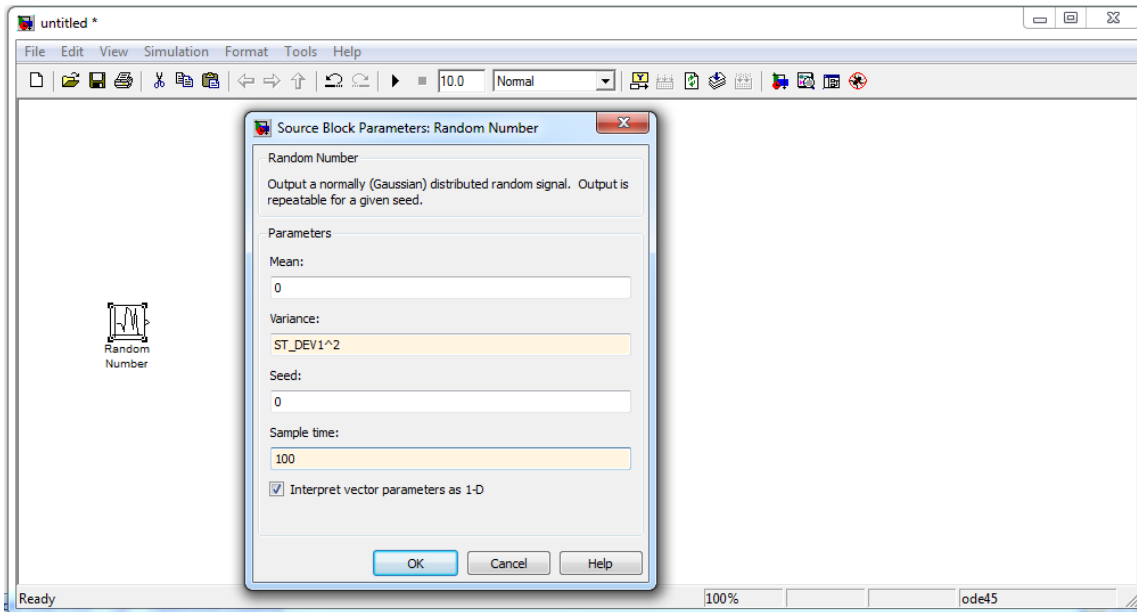


Рис.1.25. Вікно інтерфейсу додатку Simulink із блоком “Random Number”

З урахуванням як детермінованої складової, так і випадкової в додатку Simulink створено структурну схему моделі першого елемента зовнішнього середовища (рис.1.26).

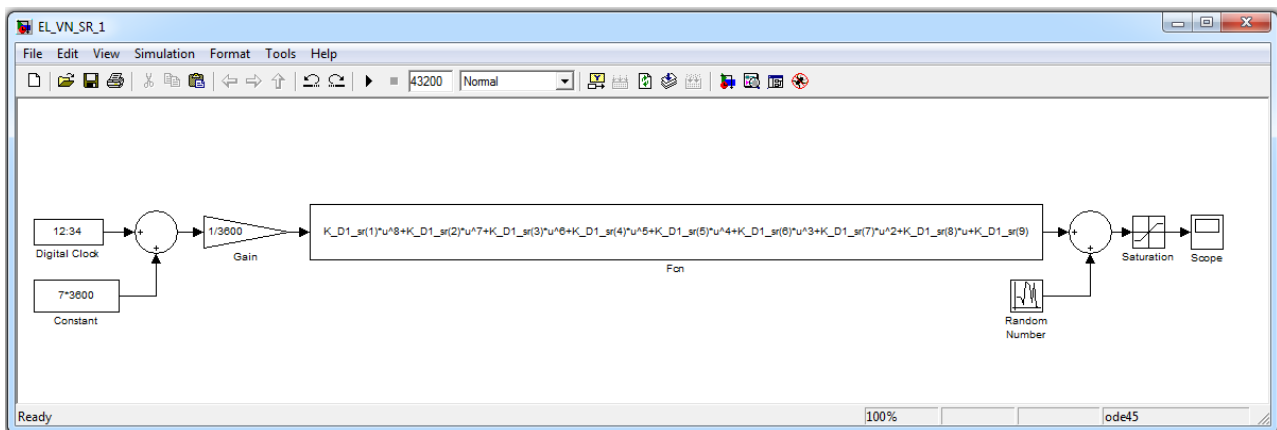


Рис.1.26. Структурна схема моделі першого елемента зовнішнього середовища у додатку Simulink

До моделі на рис.1.26 додано обмеження вихідного сигналу за нижньою межею, оскільки кількість автомобілів перед перехрестям не може бути від’ємною величиною. Обмеження вихідного сигналу реалізоване на

основі блоку “Saturation” (підрозділ “Discontinuities” розділу “Simulink”). У вікні налаштувань блоку “Saturation” в полі “Upper limit” вводимо нескінченність (немає обмеження), а в полі “Lower limit” вводимо нуль (рис.1.27).

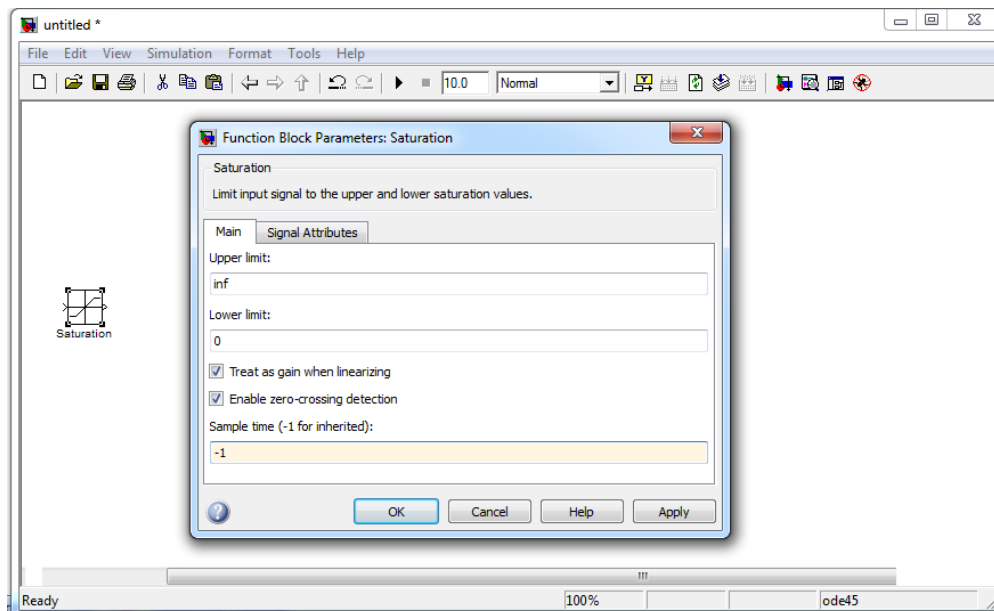


Рис.1.27. Вікно інтерфейсу додатку Simulink із блоком “Saturation”

Результат роботи моделі першого елемента зовнішнього середовища представлений на рис.1.28.

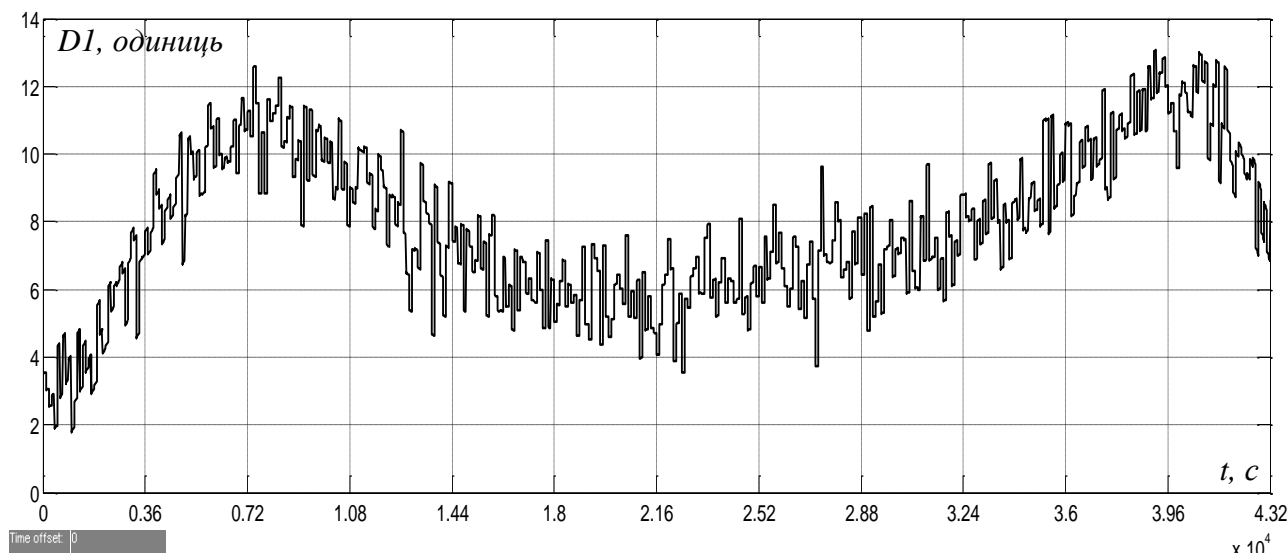


Рис.1.28. Зміна у часі кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку

Як видно з рис.1.28, у динаміці кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку спостерігається як детермінована складова (простежуються максимальні екстремуми у часи пік та зниження кількості автомобілів в ранковий, вечірній та обідній часи), так і випадкова (простежується відмінність графіку на рис.1.28 від графіку детермінованої складової на рис.1.23). Також з рис.1.28 можна зробити висновок про наявність резерву за пропускнуою здатністю об'їзного маршруту в обідній час.

Другий елемент зовнішнього середовища представляє собою зону ділянки міської транспортної схеми перед першим перехрестям, на якій формується транспортний потік у головному напрямі. Модель даного елемента розробляється на основі результатів експериментальних замірів кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі, що наведені у табл.1.2. Заміри проводились з 7.00 до 19.00 протягом п'яти днів (з понеділка по п'ятницю), з дискретністю у часі 60 хвилин.

Табл.1.2. Експериментальні заміри кількості автомобілів перед першим перехрестям для головного транспортного потоку

Година	Кількість автомобілів у черзі перед перехрестям				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
7.00	24	27	21	23	19
8.00	143	138	149	152	141
9.00	213	218	210	194	199
10.00	197	199	201	192	207
11.00	186	187	192	175	180
12.00	182	185	190	179	171
13.00	187	190	181	193	184
14.00	190	191	194	197	202
15.00	194	195	196	185	193

16.00	201	196	208	197	195
17.00	226	225	231	227	246
18.00	217	216	225	214	227
19.00	190	187	189	193	171

Нижче наведені основні результати розробки моделі другого елемента зовнішнього середовища по відношенню до досліджуваної транспортної системи без детального опису процедур ідентифікації складових моделі.

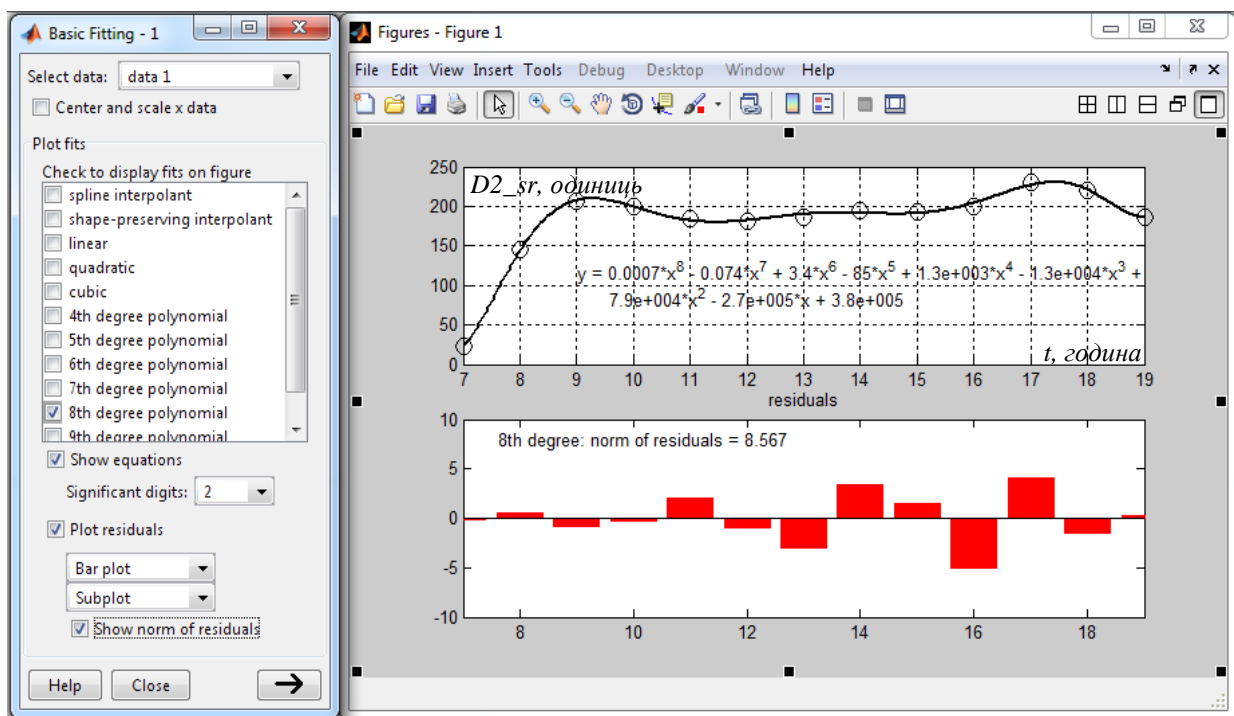


Рис.1.29. Результат апроксимації експериментальних даних ступеневим поліномом восьмого порядку для визначення детермінованої складової моделі другого елемента зовнішнього середовища

Із рис.1.29 видно, що максимальне значення абсолютного відхилення точок експериментальних замірів від апроксимуючої кривої за умови апроксимації експериментальних даних ступеневим поліномом восьмого порядку не перевищує 5,1 одиниць, а корінь квадратний суми квадратичних

відхилень точок експериментальних замірів від апроксимуючої кривої становить 8,567. Для наших досліджень прийемо таку точність апроксимації прийнятною.

Сформуємо новий вектор  $K\_D2\_sr$ , елементи якого є коефіцієнтами апроксимуючого ступеневого поліному для детермінованої складової моделі другого елемента зовнішнього середовища:

```
>> K_D2_sr=fit2.coeff
K_D2_sr =
1.0e+005 *
Columns 1 through 3
0.000000007009712 -0.000000738546734 0.000033514329625
Columns 4 through 6
-0.000854728521403 0.013385033981612 -0.131632651987910
Columns 7 through 9
0.792745991210634 -2.668597630171127 3.838702116040685
```

Визначимо випадкову складову моделі імітації зміни у часі кількості автомобілів перед першим перехрестям для головного транспортного потоку, яка представляє собою другу частину моделі другого елемента зовнішнього середовища. Для цього проведемо оцінку стандартного відхилення миттєвих значень кількості автомобілів експериментальної вибірки (табл.1.2) від середнього значення, з урахуванням його зміни у часі, та обґрунтуємо закон розподілення даного відхилення як випадкової величини. Щоб оцінити стандартне відхилення кількості автомобілів перед першим перехрестям для головного транспортного потоку, перетворимо матрицю експериментальних даних  $D2$  у матрицю  $D2\_dev$ :

```
>> for i=1:13
D2_dev(i,:)=D2(i,:)-D2_sr(i);
end
```

Результатом виконання програми є матриця відхилень миттєвих значень кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі від середнього значення (рис.1.30), яке зберігається у векторі  $D2\_sr$  та відрізняється для кожної години.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.2000	4.2000	-1.8000	0.2000	-3.8000			
2	-1.6000	-6.6000	4.4000	7.4000	-3.6000			
3	6.2000	11.2000	3.2000	-12.8000	-7.8000			
4	-2.2000	-0.2000	1.8000	-7.2000	7.8000			
5	2	3	8	-9	-4			
6	0.6000	3.6000	8.6000	-2.4000	-10.4000			
7	0	3	-6	6	-3			
8	-4.8000	-3.8000	-0.8000	2.2000	7.2000			
9	1.4000	2.4000	3.4000	-7.6000	0.4000			
10	1.6000	-3.4000	8.6000	-2.4000	-4.4000			
11	-5	-6	0	-4	15			
12	-2.8000	-3.8000	5.2000	-5.8000	7.2000			
13	4	1	3	7	-15			
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								

Рис.1.30. Матриця відхилень миттєвих значень кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі від середнього значення

Прийmemo припущення про однаковий характер випадкової зміни кількості автомобілів для кожної години, і параметри випадкової складової моделі другого елемента зовнішнього середовища будемо визначати за об'єднаною за годинами вибіркою. Для цього перетворимо матрицю  $D2\_dev$  у вектор  $D2\_vec$  за допомогою двох команд, що виконуються по черзі:

**$D2\_vec=D2\_dev'$**

**$D2\_vec= D2\_vec(:)$**

Далі визначаємо стандартне відхилення миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення для головного транспортного потоку перед першим перехрестям:

```
>> ST_DEV2=std(D2_vec)
```

```
ST_DEV2 =
```

```
5.832023662503437
```

З метою обґрунтування закону розподілу випадкової величини стосовно кількості автомобілів перед першим перехрестям для головного транспортного потоку побудуємо гістограму, що характеризує розподіл відхилень миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення за ділянками, на які розбитий діапазон зміни даного параметру. Ширину ділянки приймемо рівною 2,5 одиниці. Для побудови гістограми використаємо наступну команду:

```
hist(D2_vec,(max(D2_vec)-min(D2_vec))/2.5)
```

Результат виконання команди наведений на рис.1.31.

Зазначимо, що за видом гістограми (рис.1.31) закон розподілення відхилень миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення як випадкової величини близький до нормального.

Отже, за випадкову складову моделі другого елемента зовнішнього середовища приймаємо генератор випадкових чисел за нормальним законом розподілення із стандартним відхиленням 5.832 та математичним очікуванням нуль.

З урахуванням визначених детермінованої та випадкової складових створимо в додатку Simulink структурну схему моделі другого елемента зовнішнього середовища (рис.1.32).



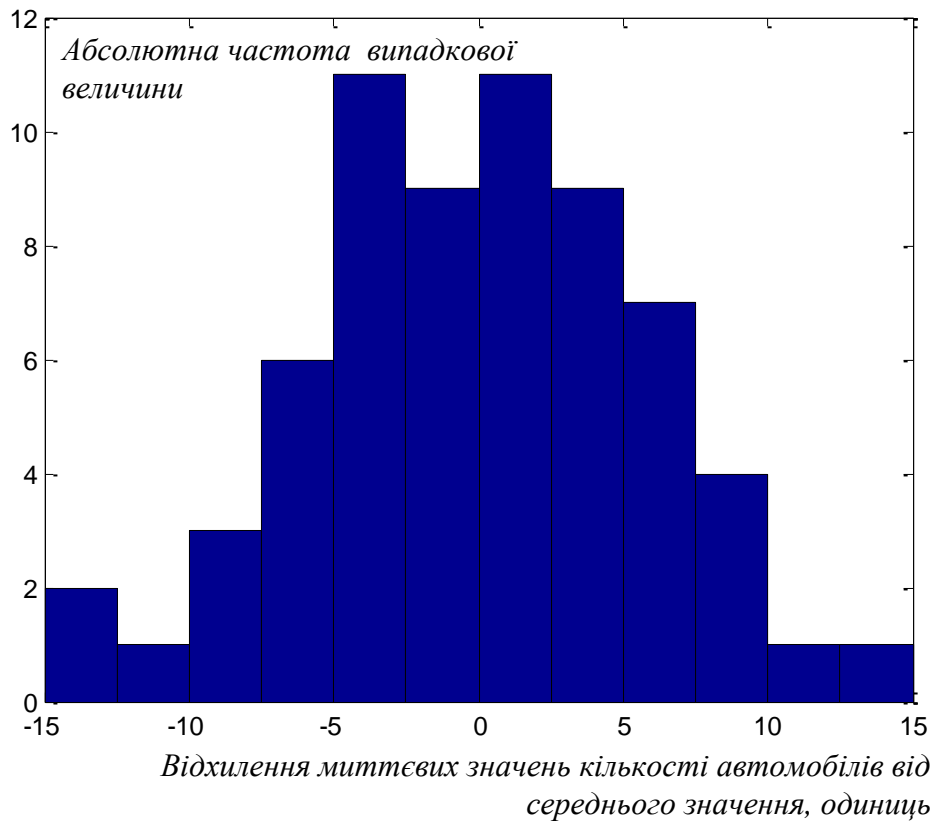


Рис.1.31. Гістограма розподілу відхилення миттєвих значень кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі від середнього значення за ділянками діапазону зміни даного параметру

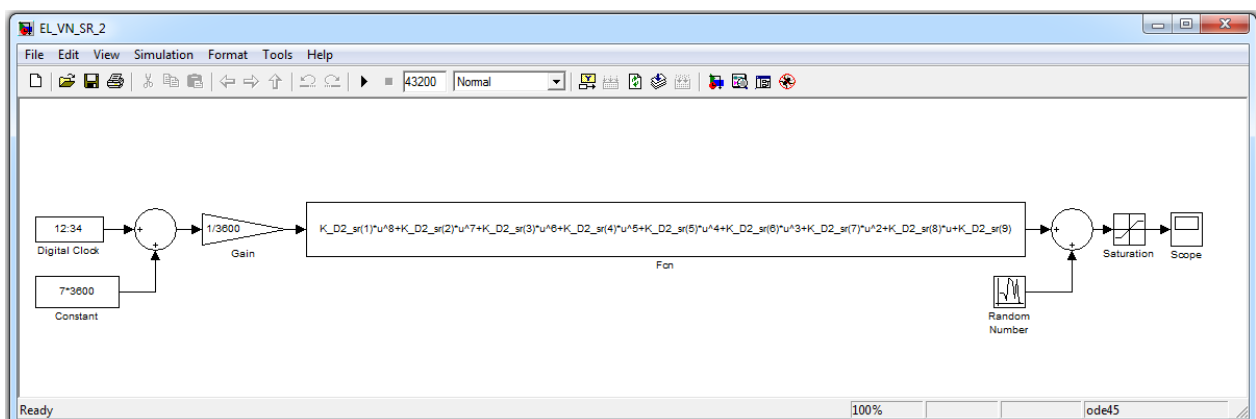


Рис.1.32. Структурна схема моделі другого елемента зовнішнього середовища у додатку Simulink

Результат роботи моделі другого елемента зовнішнього середовища представлений на рис.1.33.

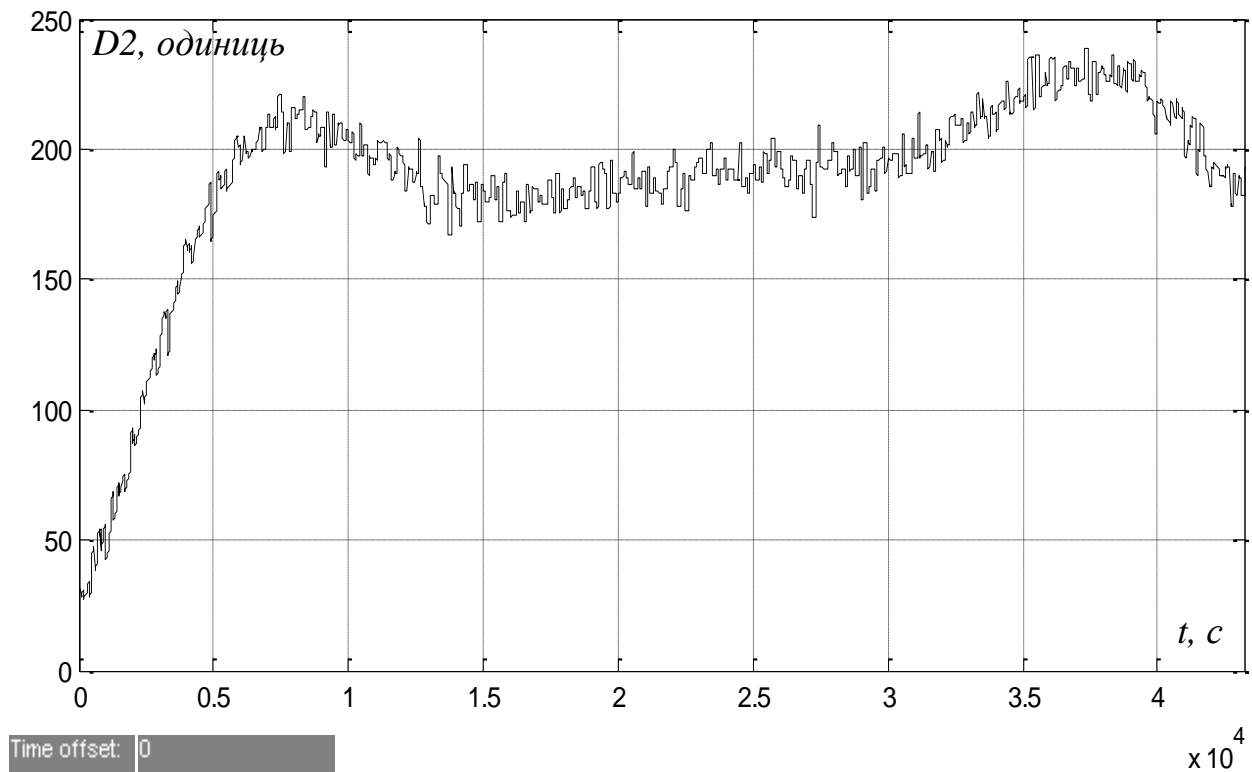


Рис.1.33. Зміна у часі кількості автомобілів перед першим перехрестям для головного транспортного потоку

Як видно з рис.1.33, у динаміці кількості автомобілів перед першим перехрестям для головного транспортного потоку домінує детермінована складова (простежуються незначний розкид миттєвих значень кількості автомобілів навколо середнього значення).

Також з рис.1.33 можна зробити висновок про значну щільність головного транспортного потоку протягом практично всього дня, починаючи з 8 години ранку та до 19 години вечора.

Третій елемент зовнішнього середовища представляє собою зону ділянки міської транспортної схеми перед першим перехрестям, на якій формується транспортний потік у другому конфліктному напрямі для даного перехрестя.

Модель цього елемента розробляється на основі результатів експериментальних замірів кількості автомобілів перед першим перехрестям у другому конфліктному напрямі (табл.1.3). Заміри проводились з 7.00 до 19.00 протягом п'яти днів (з понеділка по п'ятницю), з дискретністю у часі 60 хвилин.

Табл.1.3. Експериментальні заміри кількості автомобілів перед першим перехрестям для другого конфліктного транспортного потоку

Година	Кількість автомобілів у черзі перед перехрестям				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
7.00	9	8	8	17	7
8.00	31	35	30	31	30
9.00	33	34	35	31	37
10.00	27	28	29	28	26
11.00	25	26	28	26	30
12.00	23	25	31	23	21
13.00	24	24	30	21	29
14.00	28	38	22	22	31
15.00	26	21	18	27	25
16.00	30	22	34	24	26
17.00	32	27	24	28	38
18.00	34	29	34	40	33
19.00	30	28	30	28	32

Нижче наведені основні результати розробки моделі третього елемента зовнішнього середовища по відношенню до досліджуваної транспортної системи без детального опису процедур ідентифікації складових моделі.

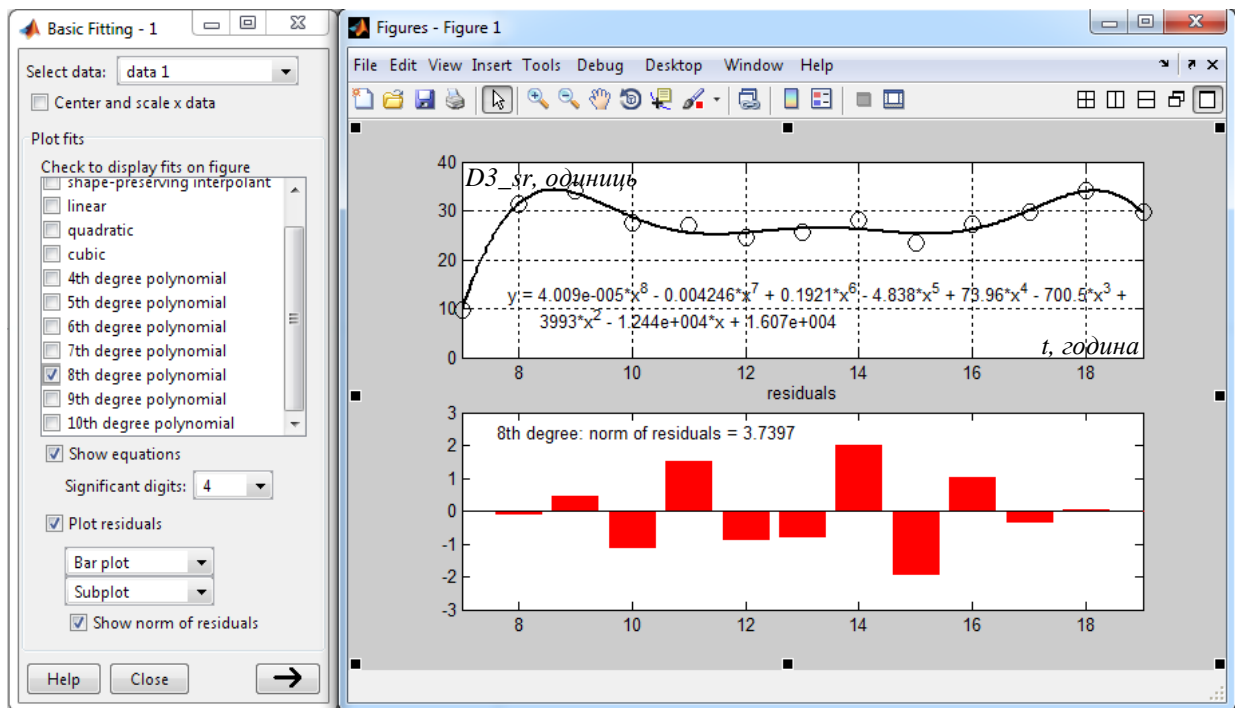


Рис.1.34. Результат апроксимації експериментальних даних ступеневим поліномом восьмого порядку для визначення детермінованої складової моделі третього елемента зовнішнього середовища

Із рис.1.34 видно, що максимальне значення абсолютного відхилення точок експериментальних замірів від апроксимуючої кривої за умови апроксимації експериментальних даних ступеневим поліномом восьмого порядку не перевищує 2,1 одиниць, а корінь квадратний суми квадратичних відхилень точок експериментальних замірів від апроксимуючої кривої становить 3,74. Для наших досліджень приймемо таку точність апроксимації прийнятною.

Сформуємо новий вектор  $K_{D3\_sr}$ , елементи якого є коефіцієнтами апроксимуючого ступеневого поліному для детермінованої складової моделі третього елемента зовнішнього середовища:

```
>> K_D3_sr=fit3.coeff
```

```
K_D3_sr =
```

**1.0e+004 \***

**Columns 1 through 3**

**0.000000004009279 -0.000000424637399 0.000019210007256**

**Columns 4 through 6**

**-0.000483756333420 0.007396415344193 -0.070051048608407**

**Columns 7 through 9**

**0.399334452965017 -1.243987677278409 1.607270058230930**

Визначимо випадкову складову моделі імітації зміни у часі кількості автомобілів перед першим перехрестям для другого конфліктного транспортного потоку, яка представляє собою другу частину моделі третього елемента зовнішнього середовища. Для цього проведемо оцінку стандартного відхилення миттєвих значень кількості автомобілів експериментальної вибірки (табл.1.3) від середнього значення, з урахуванням його зміни у часі, та обґрунтуємо закон розподілення даного відхилення як випадкової величини. Щоб оцінити стандартне відхилення кількості автомобілів перед першим перехрестям для другого конфліктного транспортного потоку, перетворимо матрицю експериментальних даних  $D3$  у матрицю  $D3\_dev$ :

```
>> for i=1:13
```

```
D3_dev(i,:)=D3(i,:)-D3_sr(i);
```

```
end
```

Результатом виконання програми є матриця відхилень миттєвих значень кількості автомобілів перед першим перехрестям для другого конфліктного транспортного потоку від середнього значення (рис.1.35), яке зберігається у векторі  $D3\_sr$  та відрізняється для кожної години.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0.8000	-1.8000	-1.8000	7.2000	-2.8000			
2	-0.4000	3.6000	-1.4000	-0.4000	-1.4000			
3	-1	0	1	-3	3			
4	-0.6000	0.4000	1.4000	0.4000	-1.6000			
5	-2	-1	1	-1	3			
6	-1.6000	0.4000	6.4000	-1.6000	-3.6000			
7	-1.6000	-1.6000	4.4000	-4.6000	3.4000			
8	-0.2000	9.8000	-6.2000	-6.2000	2.8000			
9	2.6000	-2.4000	-5.4000	3.6000	1.6000			
10	2.8000	-5.2000	6.8000	-3.2000	-1.2000			
11	2.2000	-2.8000	-5.8000	-1.8000	8.2000			
12	0	-5	0	6	-1			
13	0.4000	-1.6000	0.4000	-1.6000	2.4000			
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								

Рис.1.35. Матриця відхилень миттєвих значень кількості автомобілів перед першим перехрестям для другого конфліктного транспортного потоку від середнього значення

Прийmemo припущення про однаковий характер випадкової зміни кількості автомобілів для кожної години, і параметри випадкової складової моделі третього елемента зовнішнього середовища будемо визначати за об'єднаною за годинами вибіркою. Для цього перетворимо матрицю *D3\_dev* у вектор *D3\_vec* за допомогою двох команд, що виконуються по черзі:

**D3\_vec=D3\_dev'**

**D3\_vec= D3\_vec(:)**

Далі визначаємо стандартне відхилення миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення для другого конфліктного транспортного потоку перед першим перехрестям:

**>> ST\_DEV3=std(D3\_vec)**

**ST\_DEV3 =**

### 3.451448971084464

З метою обґрунтування закону розподілу випадкової величини стосовно кількості автомобілів перед першим перехрестям для другого конфліктного транспортного потоку побудуємо гістограму, що характеризує розподіл відхилень миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення за ділянками, на які розбитий діапазон зміни даного параметру. Ширину ділянки приймемо рівною 1,5 одиниці. Для побудови гістограми використаємо наступну команду:

**hist(D3\_vec,(max(D3\_vec)-min(D3\_vec))/1.5)**

Результат виконання команди наведений на рис.1.36.

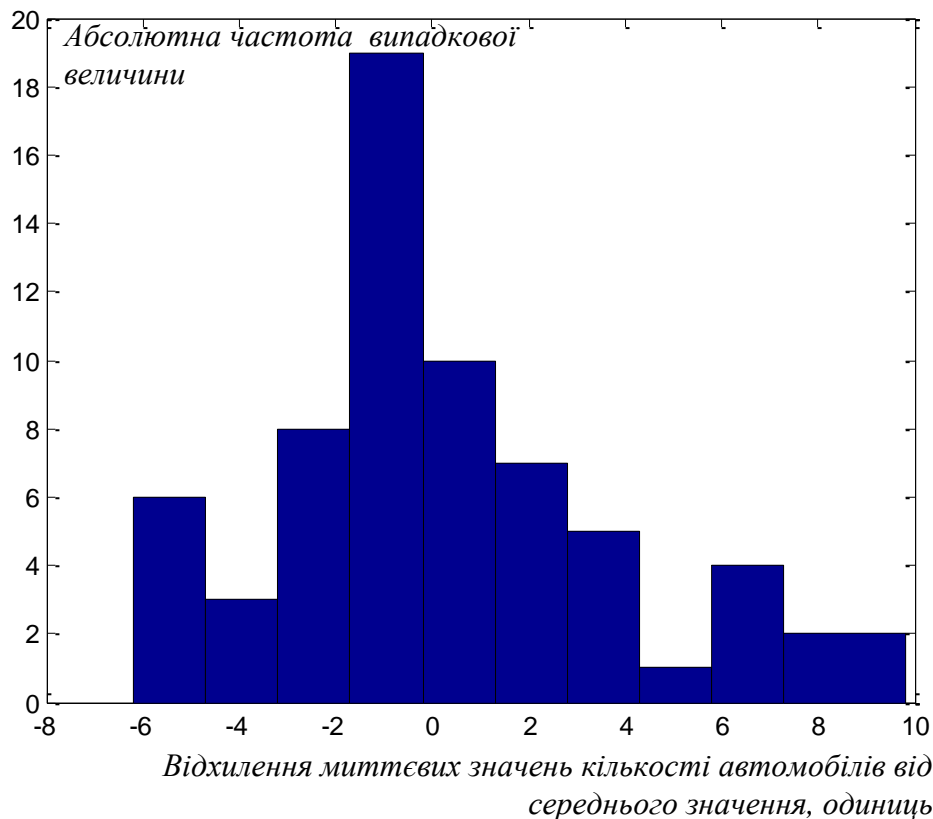


Рис.1.36. Гістограма розподілу відхилення миттєвих значень кількості автомобілів перед першим перехрестям для другого конфліктного транспортного потоку від середнього значення за ділянками діапазону зміни даного параметру

Зазначимо, що за видом гістограми (рис.1.36) закон розподілення відхилення миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення як випадкової величини близький до нормального.

Отже, за випадкову складову моделі третього елемента зовнішнього середовища приймаємо генератор випадкових чисел за нормальним законом розподілення із стандартним відхиленням 3.45 та математичним очікуванням нуль.

З урахуванням визначених детермінованої та випадкової складових створимо в додатку Simulink структурну схему моделі третього елемента зовнішнього середовища (рис.1.37).

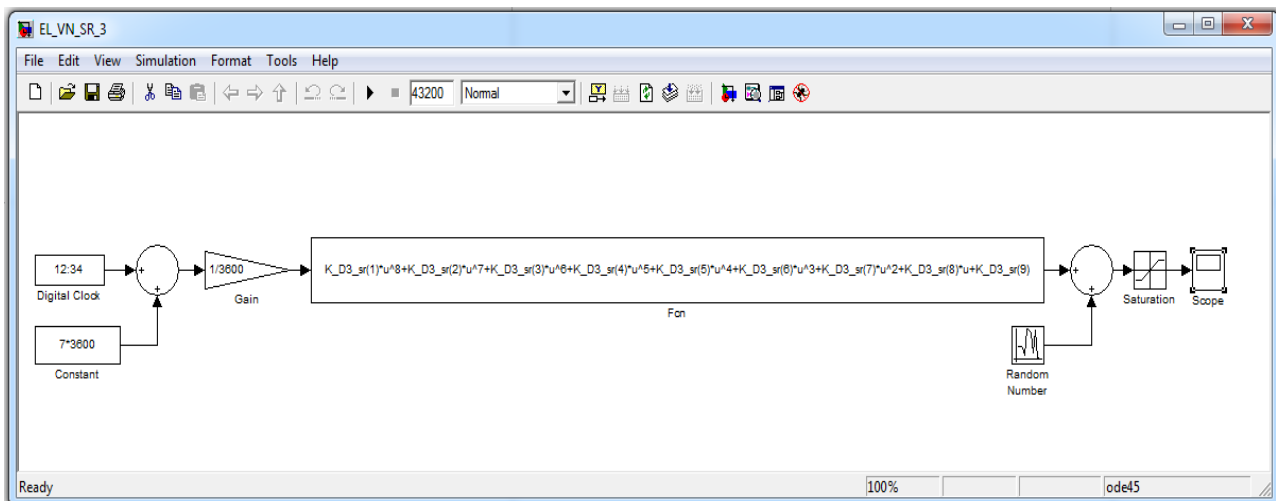


Рис.1.37. Структурна схема моделі третього елемента зовнішнього середовища у додатку Simulink

Результат роботи моделі третього елемента зовнішнього середовища представлений на рис.1.38.

Як видно з рис.1.38, у динаміці кількості автомобілів перед першим перехрестям для другого конфліктного транспортного потоку простежується



значна вага випадкової складової (спостерігається значний розкид миттєвих значень кількості автомобілів навколо середнього значення).

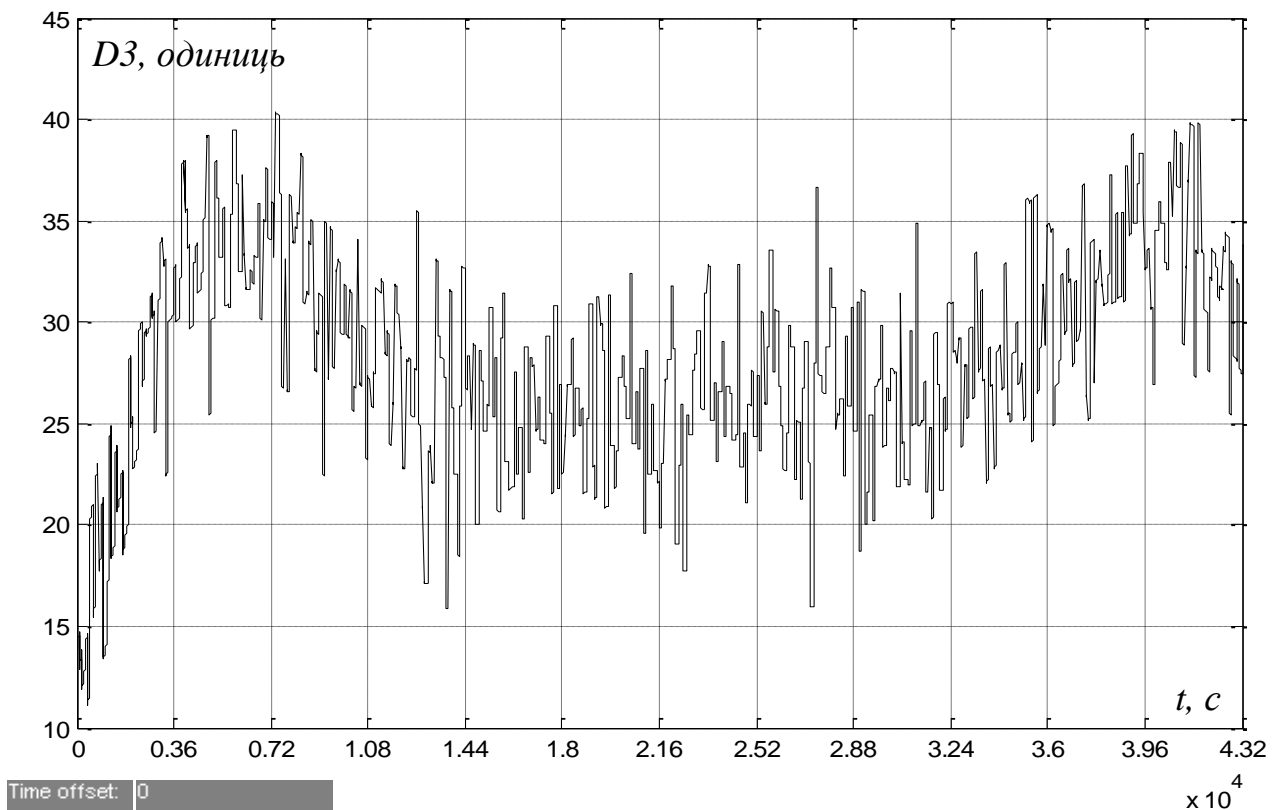


Рис.1.38. Зміна у часі кількості автомобілів перед першим перехрестям для другого конфліктного транспортного потоку

Також з рис.1.38 можна зробити висновок про відчутне (приблизно на 20 %) зниження щільності другого конфліктного транспортного потоку на проміжку часу між ранковим та вечірнім час-піками.

Четвертий елемент зовнішнього середовища представляє собою зону ділянки міської транспортної схеми перед другим перехрестям, на якій формується транспортний потік у конфліктному напрямі для даного перехрестя. Модель цього елемента розробляється на основі результатів експериментальних замірів кількості автомобілів перед другим перехрестям у конфліктному напрямі (табл.1.4). Заміри проводились з 7.00 до 19.00 протягом п'яти днів (з понеділка по п'ятницю), з дискретністю у часі 60 хвилин.

Табл.1.4. Експериментальні заміри кількості автомобілів перед другим перехрестям для конфліктного транспортного потоку

Година	Кількість автомобілів у черзі перед перехрестям				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
7.00	6	7	5	9	8
8.00	15	12	15	16	15
9.00	27	30	28	24	24
10.00	17	15	13	15	13
11.00	10	12	8	8	12
12.00	9	12	12	7	15
13.00	11	11	12	10	13
14.00	13	14	10	11	14
15.00	12	11	7	11	13
16.00	11	8	10	10	15
17.00	19	13	20	18	24
18.00	29	31	31	28	29
19.00	20	19	19	23	18

Нижче наведені основні результати розробки моделі четвертого елемента зовнішнього середовища по відношенню до досліджуваної транспортної системи без детального опису процедур ідентифікації складових моделі.

Із рис.1.39 видно, що максимальне значення абсолютного відхилення точок експериментальних замірів від апроксимуючої кривої за умови апроксимації експериментальних даних ступеневим поліномом восьмого порядку не перевищує 2,6 одиниць, а корінь квадратний суми квадратичних відхилень точок експериментальних замірів від апроксимуючої кривої становить 4,28. Для наших досліджень приймемо таку точність апроксимації прийнятною.

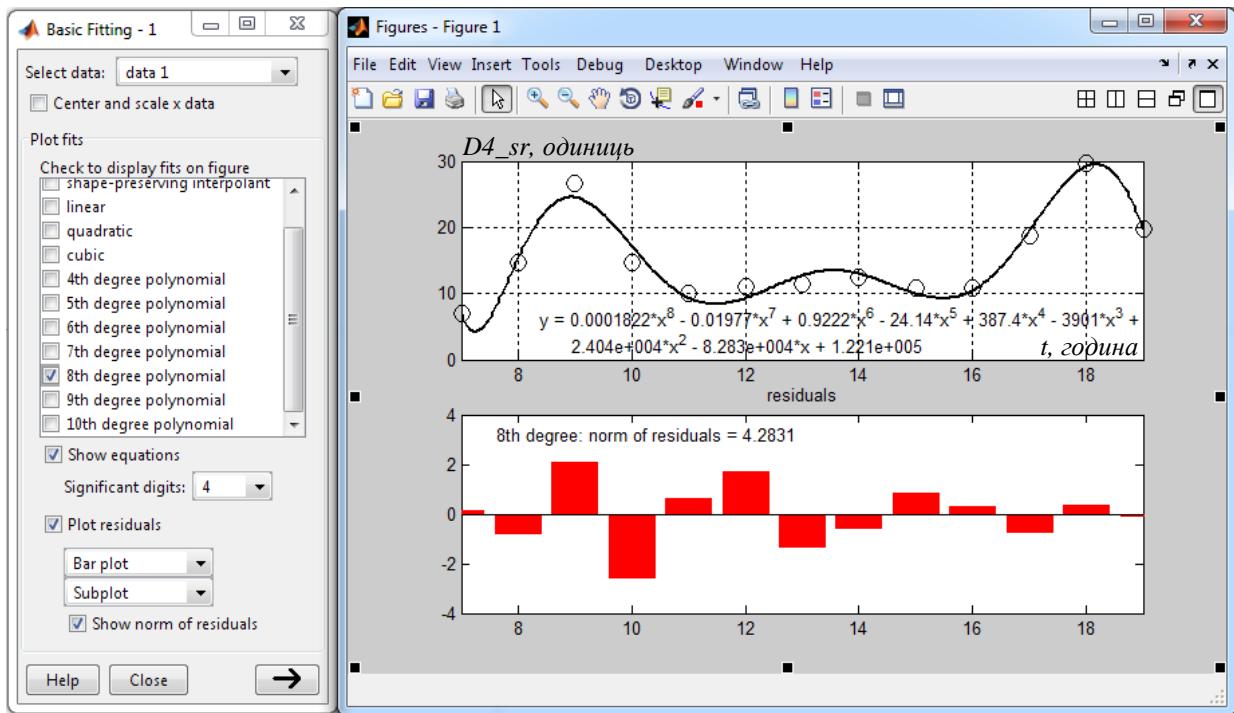


Рис.1.39. Результат апроксимації експериментальних даних ступеневим поліномом восьмого порядку для визначення детермінованої складової моделі четвертого елемента зовнішнього середовища

Сформуємо новий вектор  $K_{D4\_sr}$ , елементи якого є коефіцієнтами апроксимуючого ступеневого поліному для детермінованої складової моделі четвертого елемента зовнішнього середовища:

```
>> K_D4_sr=fit4.coeff
```

```
K_D4_sr =
```

```
1.0e+005 *
```

```
Columns 1 through 3
```

```
0.000000001821891 -0.000000197686531 0.000009222427084
```

```
Columns 4 through 6
```

```
-0.000241404134099 0.003874495778940 -0.039009386115736
```

```
Columns 7 through 9
```

```
0.240393304487364 -0.828330186638825 1.221233825508302
```

Визначимо випадкову складову моделі імітації зміни у часі кількості автомобілів перед другим перехрестям для конфліктного транспортного потоку,

яка представляє собою другу частину моделі четвертого елемента зовнішнього середовища. Для цього проведемо оцінку стандартного відхилення миттєвих значень кількості автомобілів експериментальної вибірки (табл.1.4) від середнього значення, з урахуванням його зміни у часі, та обґрунтуємо закон розподілення даного відхилення як випадкової величини. Щоб оцінити стандартне відхилення кількості автомобілів перед другим перехрестям для конфліктного транспортного потоку, перетворимо матрицю експериментальних даних  $D4$  у матрицю  $D4\_dev$ :

```
>> for i=1:13
D4_dev(i,:)=D4(i,:)-D4_sr(i);
end
```

Результатом виконання програми є матриця відхилень миттєвих значень кількості автомобілів перед другим перехрестям для конфліктного транспортного потоку від середнього значення (рис.1.40), яке зберігається у векторі  $D4\_sr$  та відрізняється для кожної години.

The screenshot shows a MATLAB Variable Editor window titled 'Variable Editor - D4\_dev'. The window displays a 13x8 matrix of double-precision floating-point numbers. The matrix is titled 'D4\_dev <13x5 double>'. The data is as follows:

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	0	-2	2	1			
2	0.4000	-2.6000	0.4000	1.4000	0.4000			
3	0.4000	3.4000	1.4000	-2.6000	-2.6000			
4	2.4000	0.4000	-1.6000	0.4000	-1.6000			
5	0	2	-2	-2	2			
6	-2	1	1	-4	4			
7	-0.4000	-0.4000	0.6000	-1.4000	1.6000			
8	0.6000	1.6000	-2.4000	-1.4000	1.6000			
9	1.2000	0.2000	-3.8000	0.2000	2.2000			
10	0.2000	-2.8000	-0.8000	-0.8000	4.2000			
11	0.2000	-5.8000	1.2000	-0.8000	5.2000			
12	-0.6000	1.4000	1.4000	-1.6000	-0.6000			
13	0.2000	-0.8000	-0.8000	3.2000	-1.8000			
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								

Рис.1.40. Матриця відхилень миттєвих значень кількості автомобілів перед другим перехрестям для конфліктного транспортного потоку від середнього значення

Приймемо припущення про однаковий характер випадкової зміни кількості автомобілів для кожної години, і параметри випадкової складової моделі четвертого елемента зовнішнього середовища будемо визначати за об'єднаною за годинами вибіркою. Для цього перетворимо матрицю *D4\_dev* у вектор *D4\_vec* за допомогою двох команд, що виконуються по черзі:

```
D4_vec=D4_dev'
```

```
D4_vec= D4_vec(:)
```

Далі визначаємо стандартне відхилення миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення для конфліктного транспортного потоку перед другим перехрестям:

```
>> ST_DEV4=std(D4_vec)
```

```
ST_DEV4 =
```

```
2.024845673131658
```

З метою обґрунтування закону розподілу випадкової величини стосовно кількості автомобілів перед другим перехрестям для конфліктного транспортного потоку побудуємо гістограму, що характеризує розподіл відхилень миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення за ділянками, на які розбитий діапазон зміни даного параметру. Ширину ділянки приймемо рівною 1,2 одиниці. Для побудови гістограми використаємо наступну команду:

```
hist(D4_vec,(max(D4_vec)-min(D4_vec))/1.2)
```

Результат виконання команди наведений на рис.1.41.

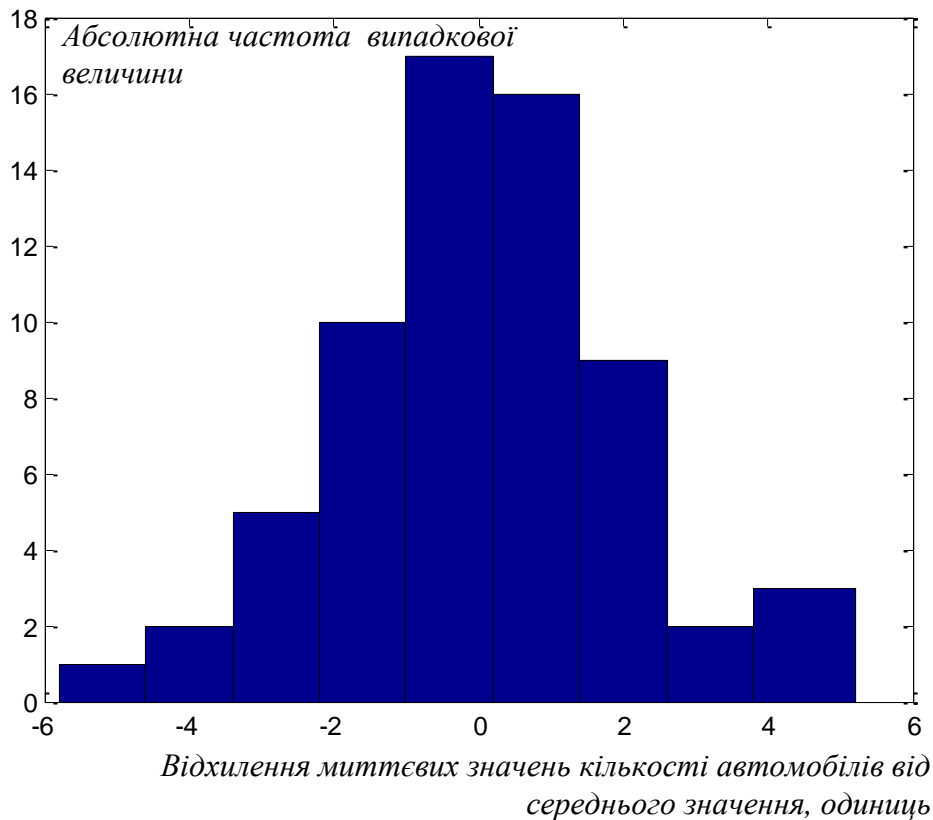


Рис.1.41. Гістограма розподілу відхилення миттєвих значень кількості автомобілів перед другим перехрестям для конфліктного транспортного потоку від середнього значення за ділянками діапазону зміни даного параметру

Зазначимо, що за видом гістограми (рис.1.41) закон розподілення відхилення миттєвих значень кількості автомобілів від середнього значення як випадкової величини близький до нормального.

Отже, за випадкову складову моделі четвертого елемента зовнішнього середовища приймаємо генератор випадкових чисел за нормальним законом розподілення із стандартним відхиленням 2.025 та математичним очікуванням нуль.

З урахуванням визначених детермінованої та випадкової складових створимо в додатку Simulink структурну схему моделі четвертого елемента зовнішнього середовища (рис.1.42).

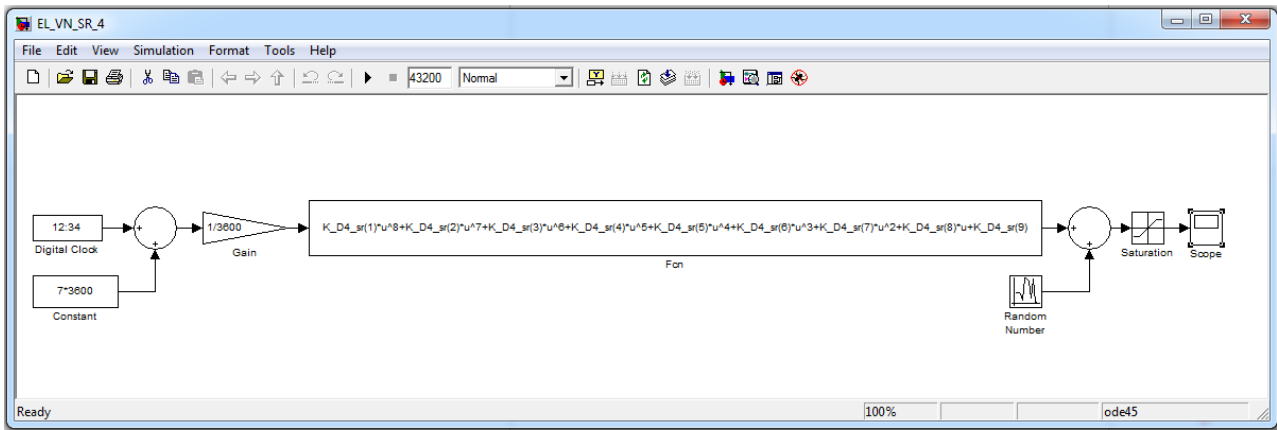


Рис.1.42. Структурна схема моделі четвертого елемента зовнішнього середовища у додатку Simulink

Результат роботи моделі четвертого елемента зовнішнього середовища представлений на рис.1.43.

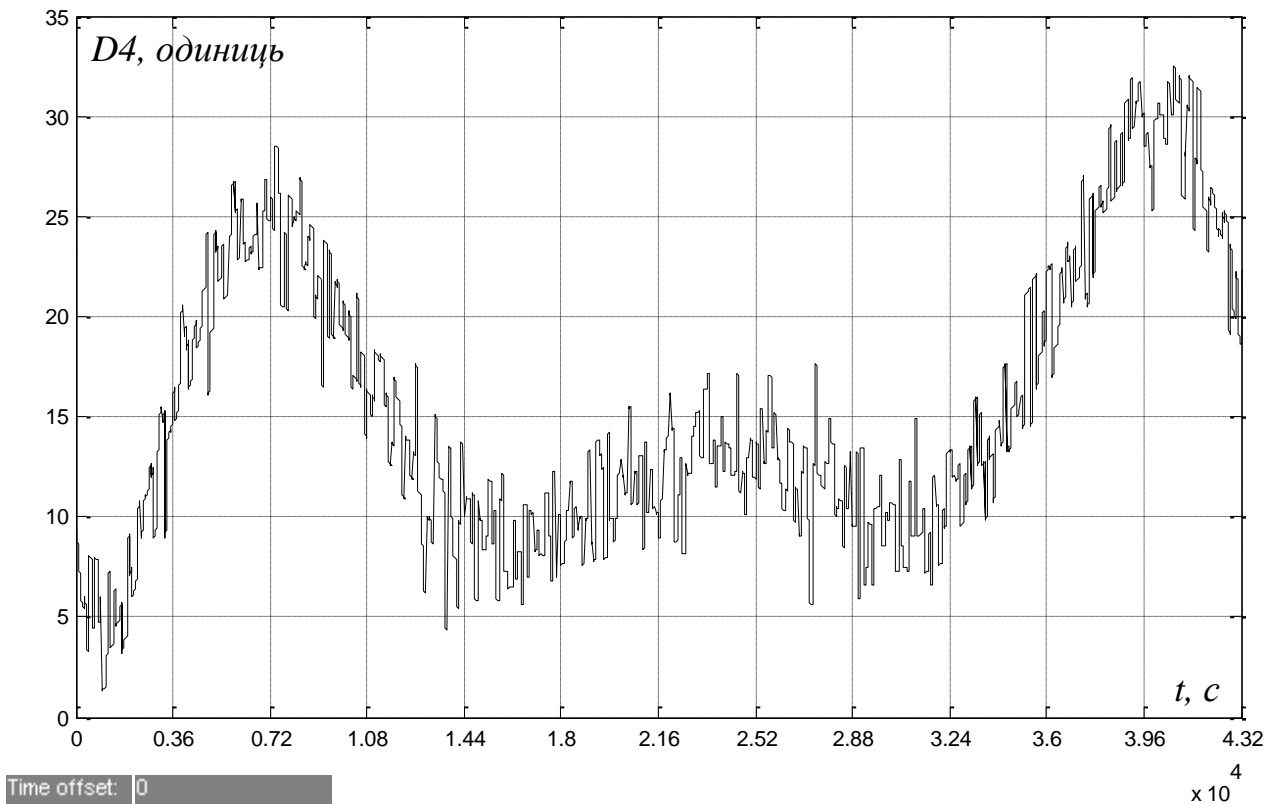


Рис.1.43. Зміна у часі кількості автомобілів перед другим перехрестям для конфліктного транспортного потоку

Як видно з рис.1.43, у динаміці кількості автомобілів перед другим перехрестям для конфліктного транспортного потоку переважає детермінована складова (спостерігається менший розкид миттєвих значень кількості автомобілів навколо середнього значення, чим для другого конфліктного транспортного потоку перед першим перехрестям).

Також з рис.1.43 можна зробити висновок про істотне (майже на 50 %) зменшення щільності конфліктного транспортного потоку перед другим перехрестям на проміжку часу між ранковим та вечірнім час-піками.

### **1.3. Отримання залежностей, що характеризують зв'язки між елементами моделі поведінки транспортної системи**

Перший елемент досліджуваної транспортної системи (рис.1.2) описує процес формування транспортного потоку відразу за другим перехрестям. На вхід цього елемента поступає інформація щодо кількості автомобілів перед другим перехрестям у головному та конфліктному напрямках. На виході елемента – інтенсивність транспортного потоку відносно стоп-лінії перед другим перехрестям. Модель першого елемента транспортної системи визначається на основі результатів експериментальних замірів зміни у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя (табл.1.5). Причому приймається однаковий характер зміни у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя як у головному, так і у конфліктному напрямках.

Табл.1.5. Результати експериментальних замірів зміни у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя

Для кількості автомобілів перед перехрестям 10 одиниць (на одній полосі)											
$t, c$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{m.n.}$ км/год.	0	11,5	19,2	25,6	29,1	32,7	34,5	36,4	37,5	38,7	39,8



Для кількості автомобілів перед перехрестям 22 одиниці (на одній полосі)											
$t, c$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$V_{m.n.}$ км/год.	0	9,9	17,1	23	27,6	30,3	32,8	34,5	36,1	37	37,6
Для кількості автомобілів перед перехрестям 46 одиниць (на одній полосі)											
$t, c$	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$V_{m.n.}$ км/год.	0	6,8	12,5	17,4	21	24,1	27	29,4	31	32,2	33,6

У якості математичної моделі, що описує динаміку просторової швидкості транспортного потоку перед перехрестям, прийmemo диференційне рівняння першого порядку із нульовим порядком правої частини:

$$a_0 \frac{dV_{m.n.}}{dt} + a_1 V_{m.n.} = b_0 U,$$

де  $V_{m.n.}$  – середня просторова швидкість транспортного потоку, км/г;  $U$  – керуючий вплив від автоматизованої системи керування дорожнім рухом (АСКДР) на світлофорний об'єкт (одиниця – зелене світло, нуль – червоне або жовте світло).

При дослідженні динаміки фізичних величин в системах більш прийнятною є друга форма запису диференційних рівнянь, коли вони розглядаються в операторній формі. При цьому використовується співвідношення прямого перетворення Лапласа:

$$F(p) = L(Y(t)) = \int_0^{\infty} e^{-pt} Y(t) dt,$$

де  $p$  – оператор Лапласа (в іноземних джерелах позначається через  $s$ );  $t$  – час, с;  $L(Y(t))$  – операція прямого перетворення Лапласа часової функції  $Y(t)$ .

Після прямого перетворення Лапласа рівняння динаміки просторової швидкості транспортного потоку запишеться у вигляді:

$$a_0 \bar{V}_{m.n.} p + a_1 \bar{V}_{m.n.} = b_0 \bar{U}.$$

У багатьох випадках математичну модель, що описує динамічні властивості елемента системи, подають у вигляді передаточної функції. Передаточна функція – це відношення зображення за Лапласом вихідної величини  $\bar{V}_{m.n.}$  до зображення за Лапласом вхідної величини  $\bar{U}$ . Як приклад, можна отримати передаточну функцію  $W(p)$  з рівняння динаміки просторової швидкості транспортного потоку, якщо це рівняння виразити відносно відношення  $\bar{V}_{m.n.}$  до  $\bar{U}$ :

$$W(p) = \frac{\bar{V}_{m.n.}}{\bar{U}} = \frac{b_0}{a_0 p + a_1}.$$

Представимо передаточну функцію  $W(p)$  у стандартній формі:

$$W(p) = \frac{b_0}{a_0 p + a_1} = \frac{K}{Tp + 1}, \quad (1.1)$$

де  $K$  та  $T$  – відповідно коефіцієнт підсилення та постійна часу елемента системи:

$$K = \frac{b_0}{a_1}, \quad T = \frac{a_0}{a_1}.$$

Після обґрунтування виду рівняння динаміки елемента транспортної системи далі вирішується задача визначення його параметрів. Параметри рівняння динаміки  $K$  та  $T$  визначаються за результатами експериментальних замірів, представлених у табл.1.5. Зазначимо, що для другого перехрестя ми

маємо три різні за своєю динамікою процеси розгону транспортного потоку для різної кількості автомобілів перед перехрестям (табл.1.5). Припустимо, що при збільшенні кількості автомобілів перед перехрестям вид рівняння динаміки просторової швидкості транспортного потоку не змінюється, а змінюються лише його параметри.

Знайдемо параметри рівняння динаміки просторової швидкості транспортного потоку для невеликої кількості автомобілів перед другим перехрестям (10 одиниць). Для цього використаємо додаток математичного пакету MATLAB «System Identification Tool», який дозволяє вирішувати різноманітні задачі параметричної оцінки динамічних моделей елементів систем. Графічний користувальницький інтерфейс додатку «System Identification Tool» представлений на рис.1.44.

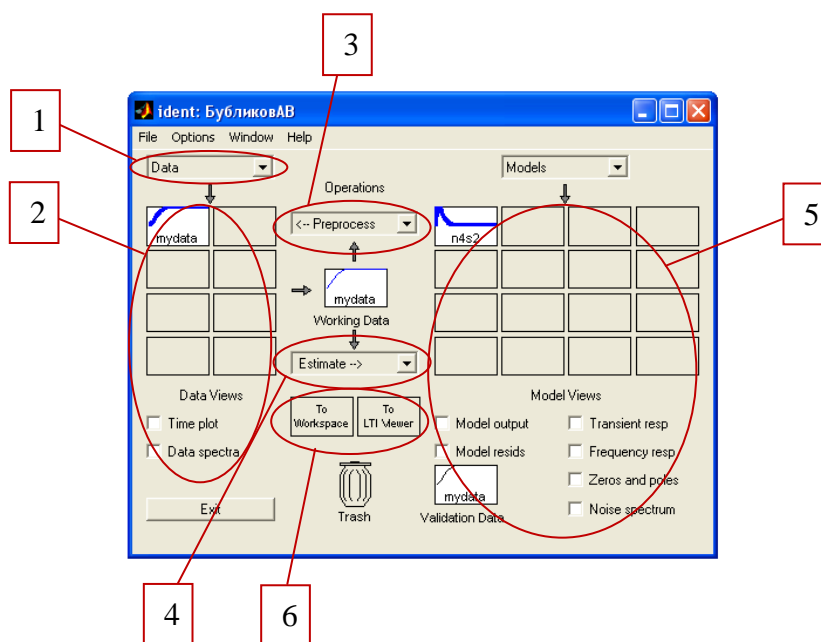


Рис.1.44. Головне вікно графічного користувальницького інтерфейсу додатку «System Identification Tool» математичного пакету MATLAB

Головне вікно графічного інтерфейсу додатку «System Identification Tool» викликається командою “IDENT”, яку треба ввести у командне вікно програми MATLAB “Command window” та натиснути “Enter”. Головне вікно додатку

можна умовно розділити на шість областей, кожна з яких відображає інформацію і виконує функції, властиві тільки даній частині вікна (рис.1.44).

Експериментальні дані для параметричної оцінки динамічної моделі елемента системи імпортуються у додаток через область 1 (рис.1.44). Але перед цим у робочому просторі пакету MATLAB сформуємо два вектори. Елементами першого вектору  $V1_{min}$  є значення просторової швидкості транспортного потоку для невеликої кількості автомобілів перед другим перехрестям у різні моменти часу, а елементами другого вектору  $U$  – значення керуючого впливу (всі одиниці).

Далі наводимо курсор мишки на кнопку розкриття списку в області 1 та обираємо пункт “Time domain data ...”, після чого розкриється вікно імпорту даних (рис.1.45).

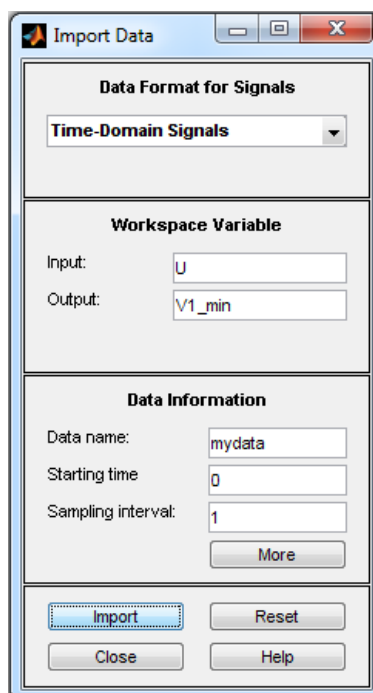


Рис.1.45. Графічне вікно імпорту даних у додаток «System Identification Tool»

У полі “Input” розділу “Workspace Variable” вікна імпорту даних вводиться ім’я вектору керуючого впливу  $U$ , а у полі “Output” – ім’я вектору просторової швидкості транспортного потоку  $V1_{min}$  (рис.1.45). Розділ вікна

імпорту даних “Data Information” призначений для завдання таких характеристик вибірки експериментальних даних, як початкове значення часу заміру (поле “Starting time”), крок зняття даних у часі (поле “Sampling interval”) та ім’я вибірки даних (поле “Data name”). Заповнимо ці поля так, як показано на рис.1.45, та натиснемо кнопку “Import”.

Після цього в області 2 на рис.1.44 з’явиться іконка графіку з іменем введеної вибірки, що свідчить про успішне введення експериментальних даних у додаток «System Identification Tool». В успішності процедури введення експериментальних даних також можна переконатись за виглядом експериментальної кривої (рис.1.46), поставивши галочку у полі “Time plot” області 2.

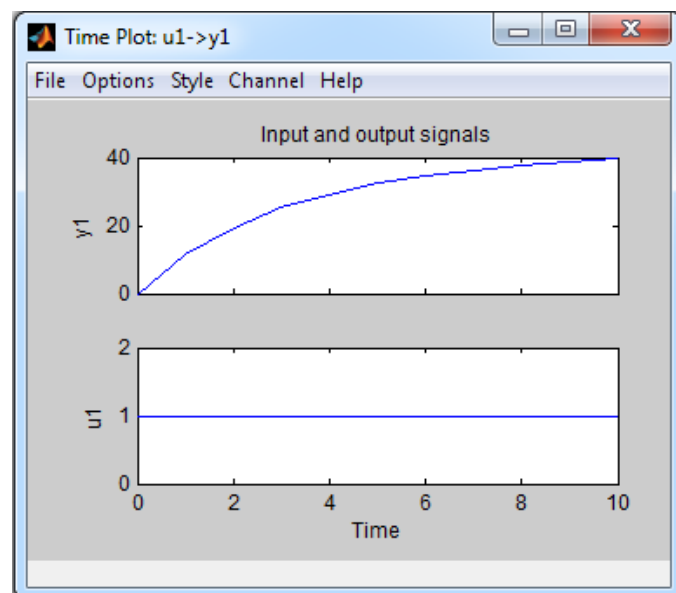


Рис.1.46. Графік зміни у часі просторової швидкості транспортного потоку, побудований за експериментальними даними (табл.1.5)

В області 3 інтерфейсу додатку «System Identification Tool» відбувається попередня обробка експериментальних даних перед параметричною оцінкою моделі елемента системи. Це необхідно, наприклад, якщо в процесі заміру фізичної величини мали місце суттєві високочастотні перешкоди, та їх

необхідно усунути. Робимо припущення про незначні перешкоди в каналі заміру просторової швидкості транспортного потоку та пропускаємо область 3.

Далі в області 4 інтерфейсу додатку «System Identification Tool» (рис.1.44) розкриваємо список та обираємо пункт “Process models ...”, після чого з’являється вікно параметричної оцінки динамічної моделі елемента системи (рис.1.47).

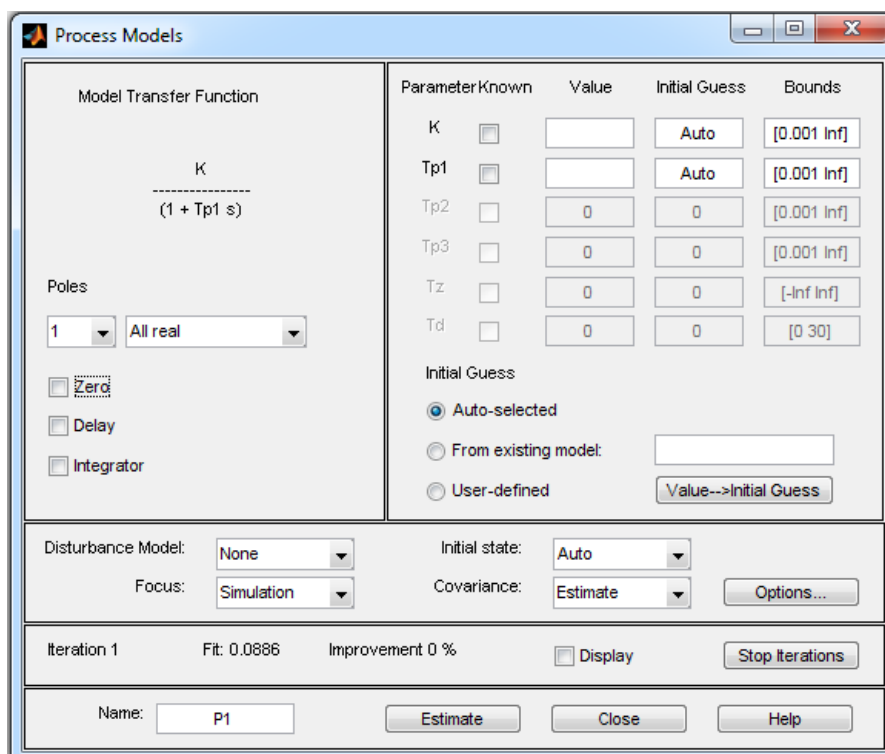


Рис.1.47. Графічне вікно параметричної оцінки динамічної моделі елемента системи додатку «System Identification Tool»

Параметри розділу “Model Transfer Function” вікна параметричної оцінки динамічної моделі елемента системи треба виставити таким чином, щоб передаточна функція, яка наведена у цьому розділі, відповідала формулі (1.1). Для цього у полі “Poles” для характеристичного рівняння (знаменник передаточної функції, прирівняний до нуля) призначимо один дійсний корінь (рис.1.47). Також уберемо галочки з пунктів “Zero” (підвищується порядок чисельника передаточної функції), “Delay” (затримка у часі вихідного сигналу

відносно вхідного) та “Integrator” (додається операція інтегрування вхідного сигналу у часі).

Крім того, у правій верхній частині вікна параметричної оцінки динамічної моделі елемента системи у полі “Bounds” для кожного параметру моделі виставляємо діапазон пошуку значень від 0,001 до нескінченності (рис.1.47). Далі тиснемо кнопку “Estimate” у нижній частині вікна параметричної оцінки динамічної моделі.

Після завершення процедури параметричної оцінки динамічної моделі в області 5 інтерфейсу додатку «System Identification Tool» з’явиться іконка графіку з ім’ям P1 за умовчанням, як графічний результат параметричної оцінки динамічної моделі. Щоб побачити графік динамічної моделі елемента системи (рис.1.48), треба натиснути один раз на іконку, щоб графік на ній став “жирним”, та поставити галочку у пункті “Model output” області 5 (рис.1.44).

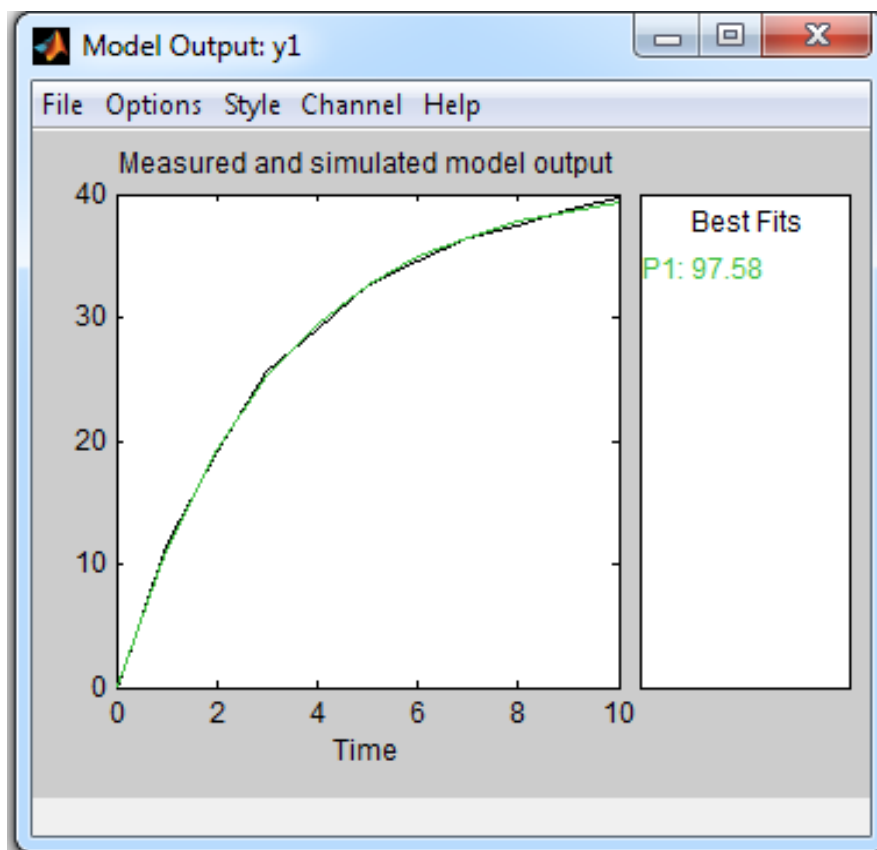


Рис.1.48. Результат параметричної оцінки динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку за умови незначної кількості автомобілів перед другим перехрестям

З рис.1.48 видно, що графік динамічної моделі майже співпав з графіком експериментальної вибірки. Показник, який характеризує рівень збігу графіків динамічної моделі та експериментальної вибірки та є непрямым показником точності параметричної оцінки моделі, дорівнює 97,58 % за умови абсолютної точності 100 %.

Щодо параметрів динамічної моделі  $K$  і  $T$ , то їх значення як результат параметричної оцінки після закінчення даної процедури з'являються у полі "Value" вікна параметричної оцінки динамічної моделі елемента системи (рис.1.49).

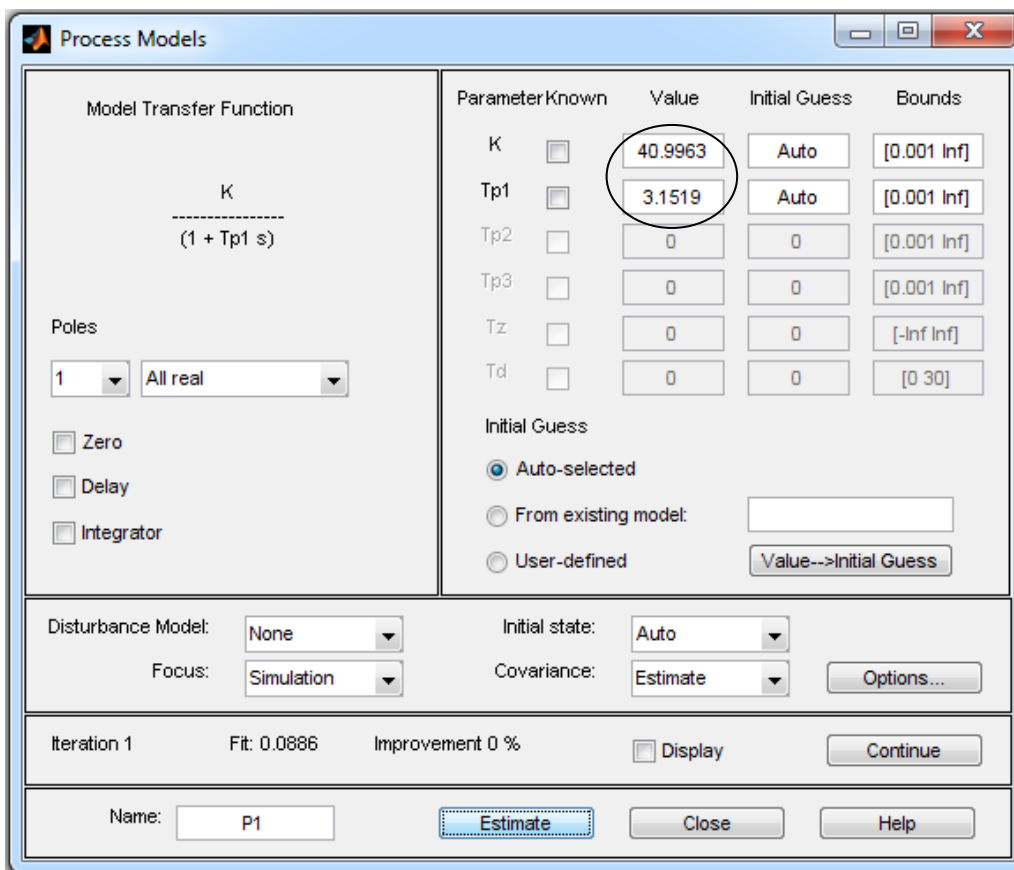


Рис.1.49. Графічне вікно параметричної оцінки динамічної моделі елемента системи додатку «System Identification Tool»

Таким чином, можна зробити висновок, що зміна у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя за умови невеликої



кількості автомобілів перед перехрестям описується передаточною функцією, що відповідає аперіодичній динамічній ланці, з коефіцієнтом підсилення 40,996 та постійною часу 3,15. При цьому відносна точність параметричної оцінки динамічної моделі склала 97,58 %.

Аналогічним способом здійсимо параметричну оцінку динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя за умови середньої кількості автомобілів перед перехрестям (22 одиниці). Результат параметричної оцінки показаний на рис.1.50 та рис.1.51.

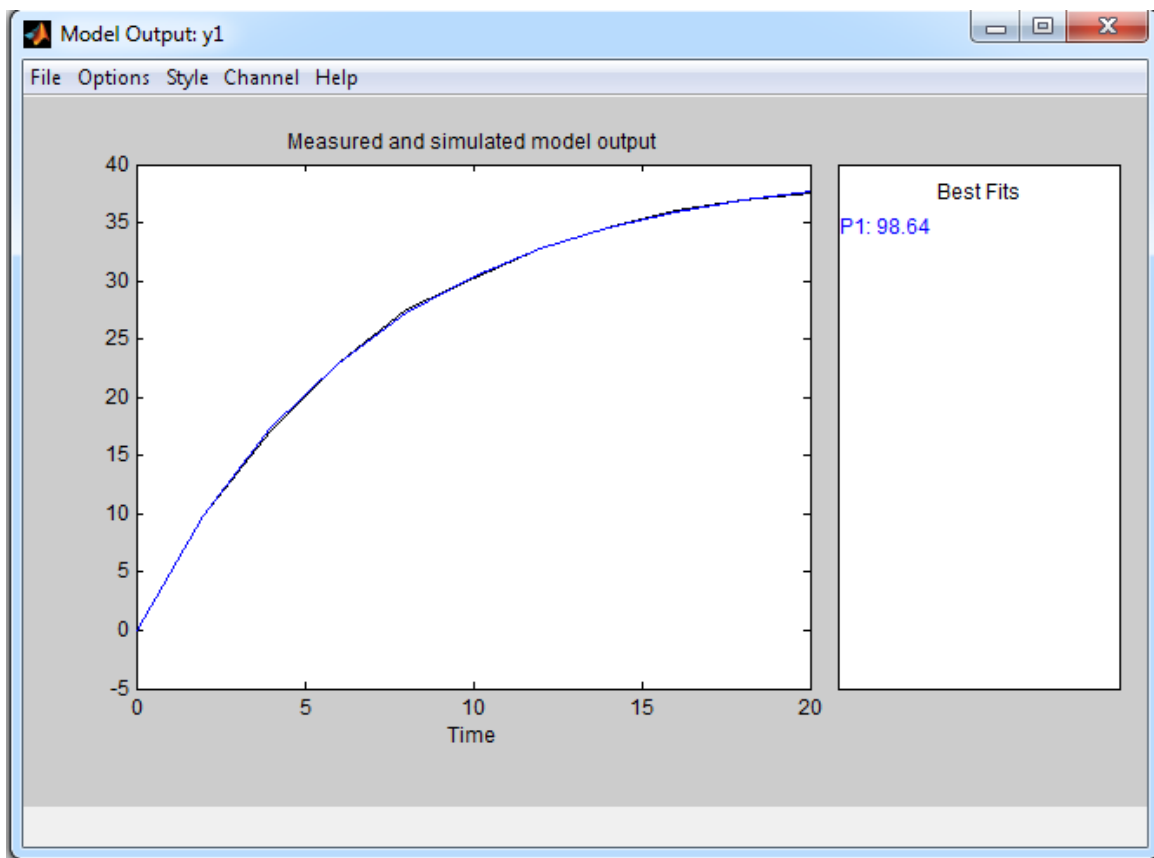


Рис.1.50. Результат параметричної оцінки динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку за умови середньої кількості автомобілів перед другим перехрестям

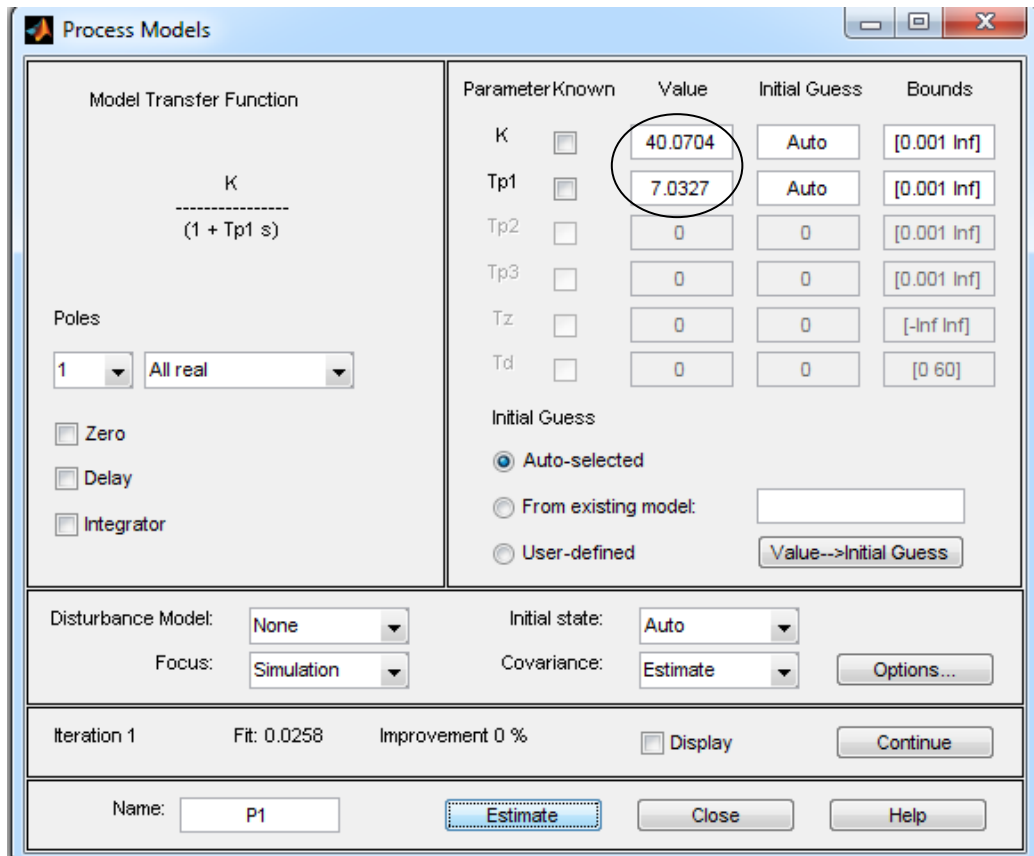


Рис.1.51. Графічне вікно параметричної оцінки динамічної моделі елемента системи додатку «System Identification Tool»

Таким чином, можна зробити висновок, що зміна у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя за умови середньої кількості автомобілів перед перехрестям описується передаточною функцією, що відповідає аперіодичній динамічній ланці, з коефіцієнтом підсилення 40,07 та постійною часу 7,03. При цьому відносна точність параметричної оцінки динамічної моделі склала 98,64 %.

Аналогічним способом здійсимо параметричну оцінку динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя за умови значної кількості автомобілів перед перехрестям (46 одиниць). Результат параметричної оцінки показаний на рис.1.52 та рис.1.53.

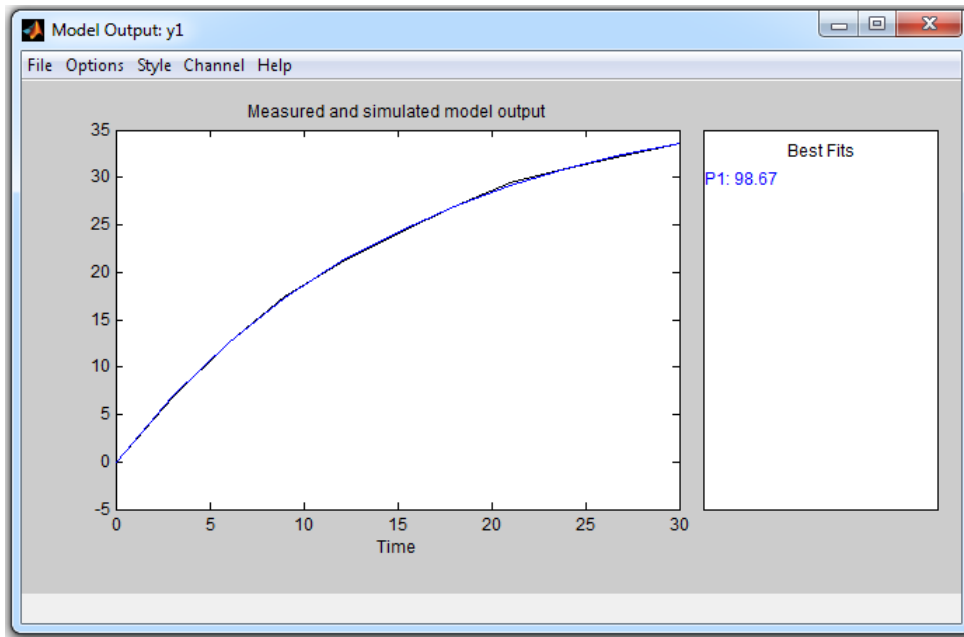


Рис.1.52. Результат параметричної оцінки динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку за умови значної кількості автомобілів перед другим перехрестям

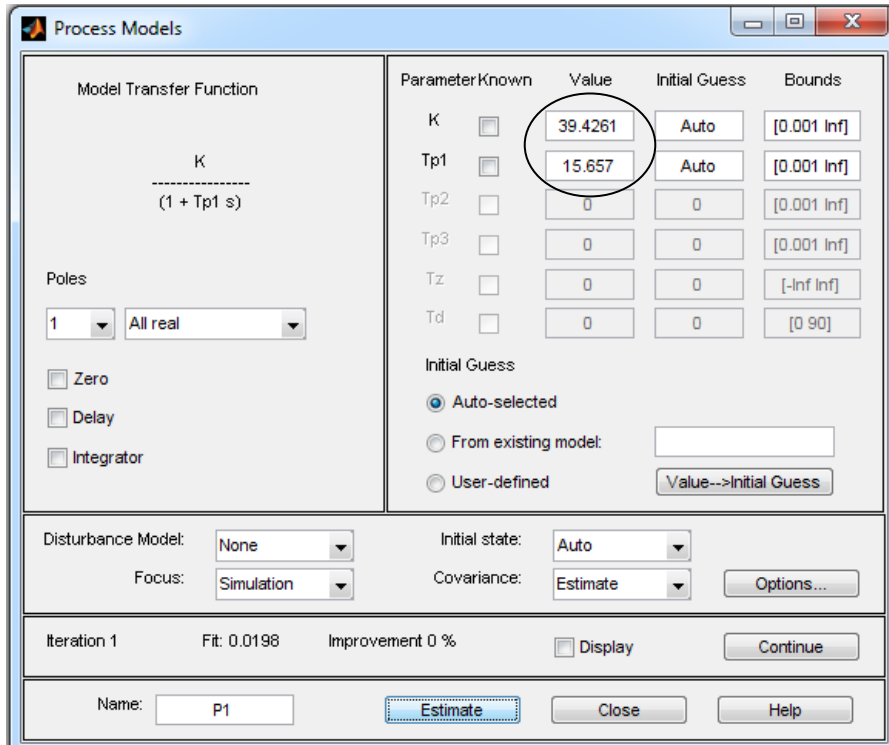


Рис.1.53. Графічне вікно параметричної оцінки динамічної моделі елемента системи додатку «System Identification Tool»

Таким чином, можна зробити висновок, що зміна у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя за умови значної кількості автомобілів перед перехрестям описується передаточною функцією, що відповідає аперіодичній динамічній ланці, з коефіцієнтом підсилення 39,43 та постійною часу 15,66. При цьому відносна точність параметричної оцінки динамічної моделі склала 98,67 %.

Проаналізуємо залежність параметрів динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя, від кількості автомобілів перед перехрестям. Коефіцієнт підсилення  $K$  за умови збільшення кількості автомобілів перед перехрестям змінюється у дуже вузькому діапазоні від 39,43 до 40,996. Тому можна зробити висновок, що кількість автомобілів перед перехрестям не впливає на даний параметр, який приймемо постійною величиною, що дорівнює 40. На відміну від коефіцієнта підсилення  $K$ , постійна часу  $T$  відчутно збільшується за умови зростання кількості автомобілів перед перехрестям. За допомогою додатку «Basic Fitting» здійснимо регресійний аналіз залежності постійної часу  $T$  від кількості автомобілів перед перехрестям. Для цього у робочій простір пакету MATLAB введемо два вектори (рис.1.54): вектор постійної часу динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя ( $T1$ ), та вектор кількості автомобілів перед другим перехрестям на момент заміру просторової швидкості ( $D1$ ).

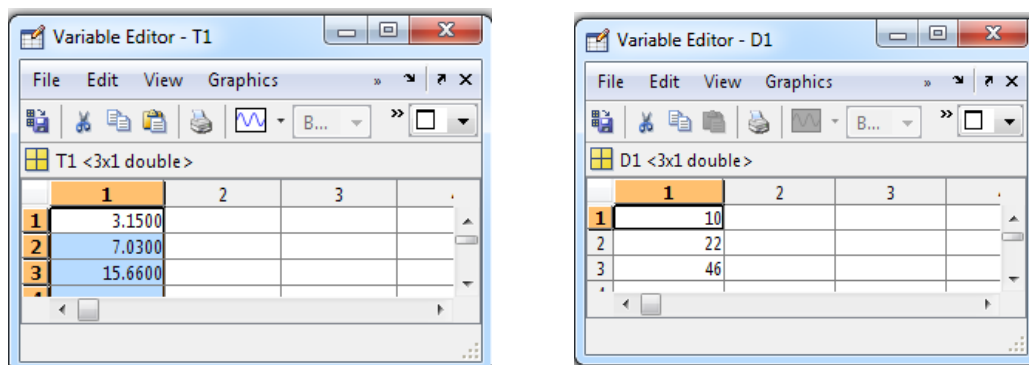


Рис.1.54. Вікно інтерфейсу редактора змінних математичного пакету MATLAB

Далі будемо графік експериментальної залежності  $T1$  від  $D1$  за допомогою команди (вводиться у командне вікно пакету MATLAB):

**plot(D1,T1),grid**

Після цього використовуємо додаток «Basic Fitting» для отримання функціональної залежності  $T1$  від  $D1$  (рис.1.55).

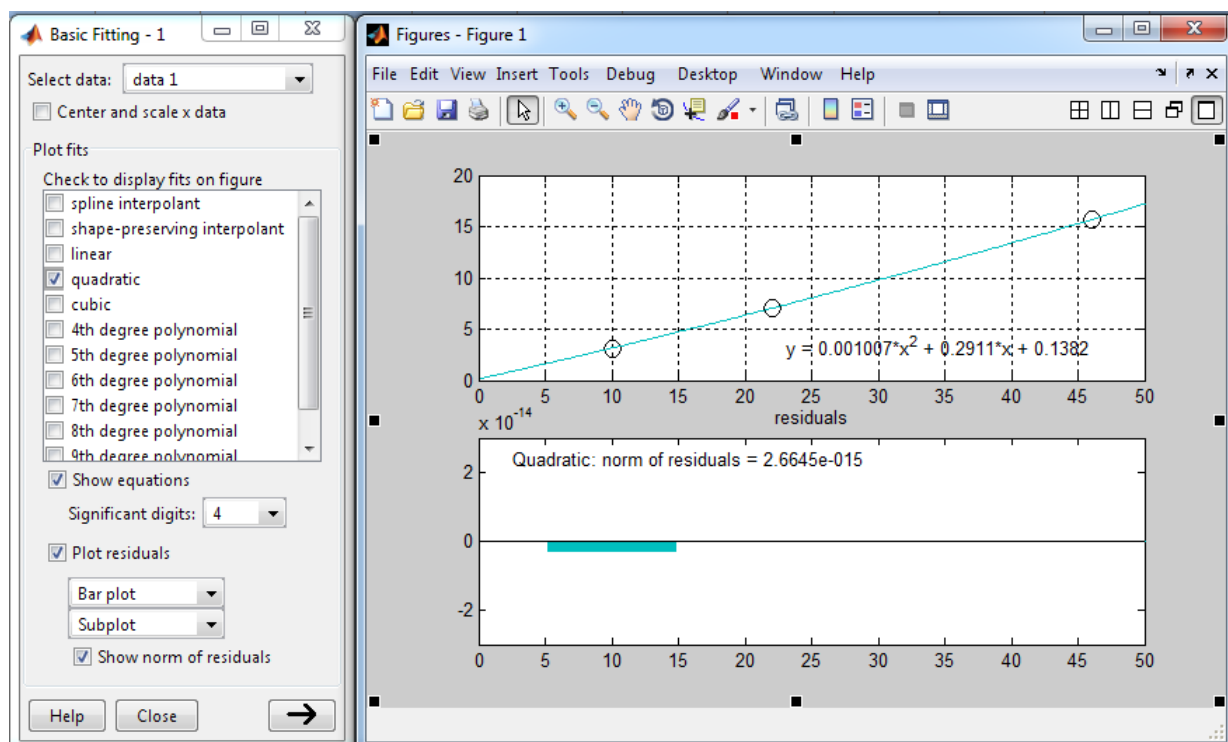


Рис.1.55. Результат регресійного аналізу залежності постійної часу  $T1$  динамічної моделі першого елемента транспортної системи від кількості автомобілів перед другим перехрестям  $D1$

З рис.1.55 видно, що експериментальна залежність постійної часу  $T1$  динамічної моделі першого елемента транспортної системи від кількості автомобілів перед другим перехрестям  $D1$  з високою точністю описується квадратичним рівнянням. При цьому максимальне значення абсолютного відхилення точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої не

перевищує  $2,7 \cdot 10^{-15}$ , а корінь квадратний суми квадратичних відхилень точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої становить  $2,66 \cdot 10^{-15}$ . Для наших досліджень приймемо таку точність апроксимації прийнятною.

Використовуючи процедуру переносу даних, описану в підрозділі 1.2, збережемо коефіцієнти квадратичного рівняння у робочому просторі пакету MATLAB як елементи вектору  $K\_T1$ .

Перетворимо передаточну функцію (1.1) у рівняння, що виражене відносно першої похідної просторової швидкості транспортного потоку:

$$\bar{V}_{m.n}.p = \frac{K}{T} \cdot \bar{U} - \frac{1}{T} \cdot \bar{V}_{m.n}. \quad (1.2)$$

Реалізуємо динамічну модель, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя, в додатку Simulink математичного пакету MATLAB (рис.1.56).

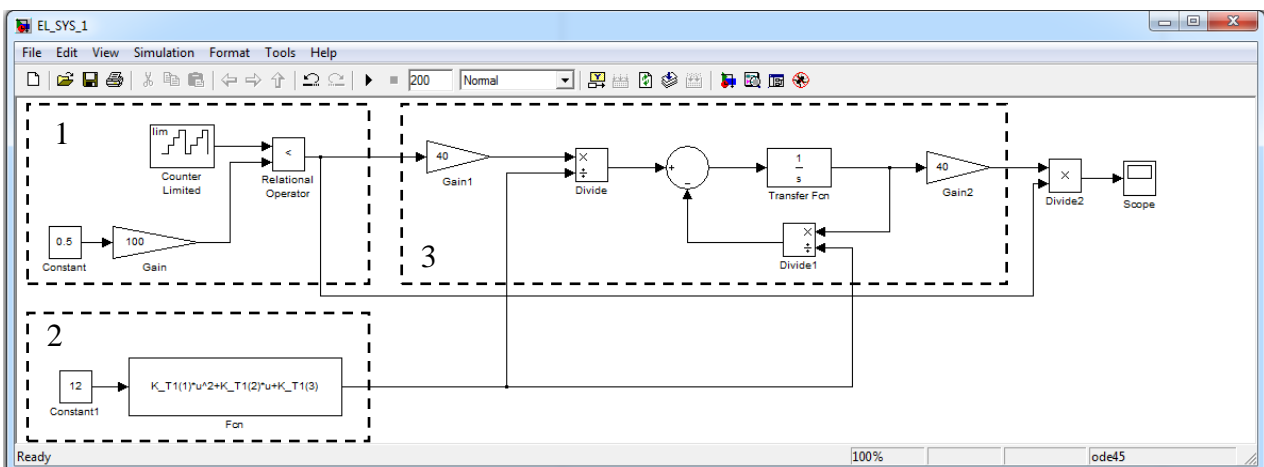


Рис.1.56. Структурна схема динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя

Динамічна модель, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя, складається з трьох основних

частин, які виділені на рис.1.56 пунктирними лініями. Перша частина представляє собою блок імітації керуючого впливу, на виході якого формується керуючий сигнал, що подається на світлофорний об'єкт (1 – зелене світло, 0 – червоне або жовте світло). Друга частина представляє собою блок, що реалізує функціональну залежність постійної часу  $T1$  динамічної моделі першого елемента транспортної системи від кількості автомобілів перед другим перехрестям  $D1$  (прийнятий випадок, коли перед перехрестям знаходяться 12 автомобілів). Третя частина реалізує рівняння (1.2). Крім того, вихід динамічної моделі на рис.1.56 помножується на керуючий вплив для того, щоб імітувати різку зупинку транспортного потоку, коли загоряється червоне світло. При цьому нехтуємо динамікою транспортного потоку на проміжному такті світлофорного циклу.

Блок “Counter Limited” (підрозділ “Sources” розділу “Simulink”) на рис.1.56 генерує пилоподібний сигнал з періодом, що дорівнює періоду світлофорного циклу – 100 с. Для цього у вікні налаштувань блоку “Counter Limited” в полі “Upper limit” вводимо число 99, а у полі “Sample time” вводимо крок дискретизації вихідного сигналу у часі 1 с (рис.1.57).

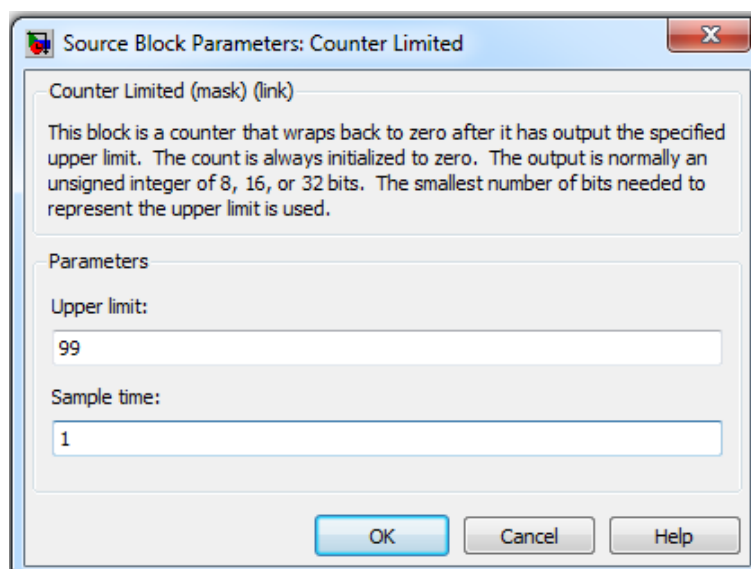


Рис.1.57. Графічне вікно налаштувань блоку “Counter Limited” додатку Simulink

Далі пилкоподібний сигнал порівнюється з константою, що представляє собою час, протягом якого повинне горіти зелене світло у відповідному напрямі. Ця константа формується в результаті множення частки періоду, коли горить зелене світло, на весь період світлофорного циклу. На рис.1.56 частка періоду, коли горить зелене світло, складає 0,5, що означає горіння зеленого світла протягом половини періоду світлофорного циклу (тобто 50 с). Порівняння сигналів здійснюється за допомогою блока “Relational Operator” (підрозділ “Logic and Bit Operations” розділу “Simulink”). В полі “Relational operator” вікна налаштувань даного блока обирається вид операції порівняння, а у полі “Sample time” вводимо крок дискретизації вихідного сигналу у часі 1 с (рис.1.58).

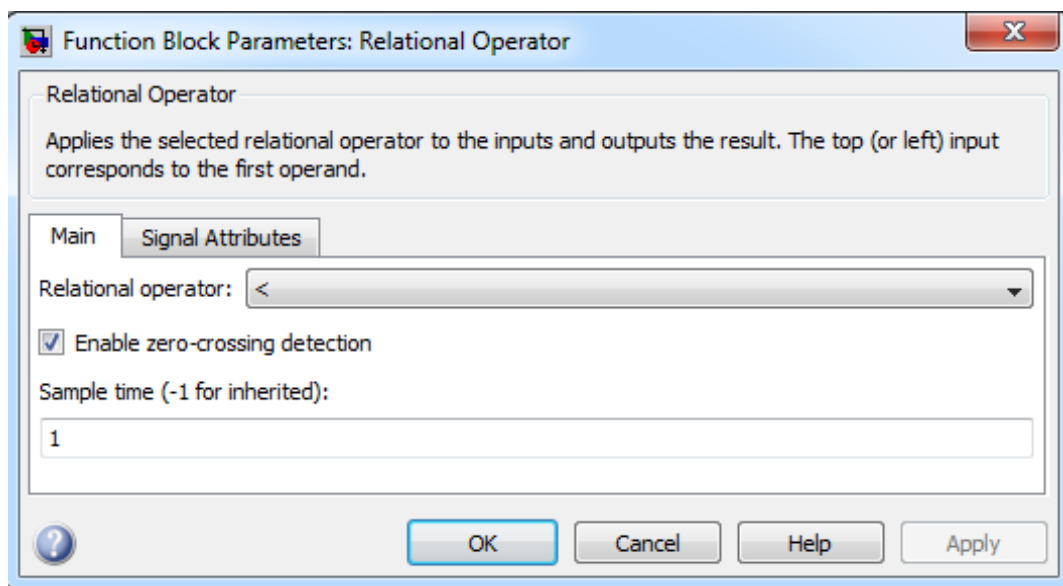


Рис.1.58. Графічне вікно налаштувань блоку “Relational Operator” додатку Simulink

Для множення та ділення сигналів застосовується блок “Divide” (підрозділ “Math Operations” розділу “Simulink”). В полі “Number of inputs” вікна налаштувань даного блока для кожного входу обирається вид операції



(ділення або множення), а у полі “Sample time” залишаємо значення “-1”, що означає відсутність квантування вихідного сигналу у часі (рис.1.59).

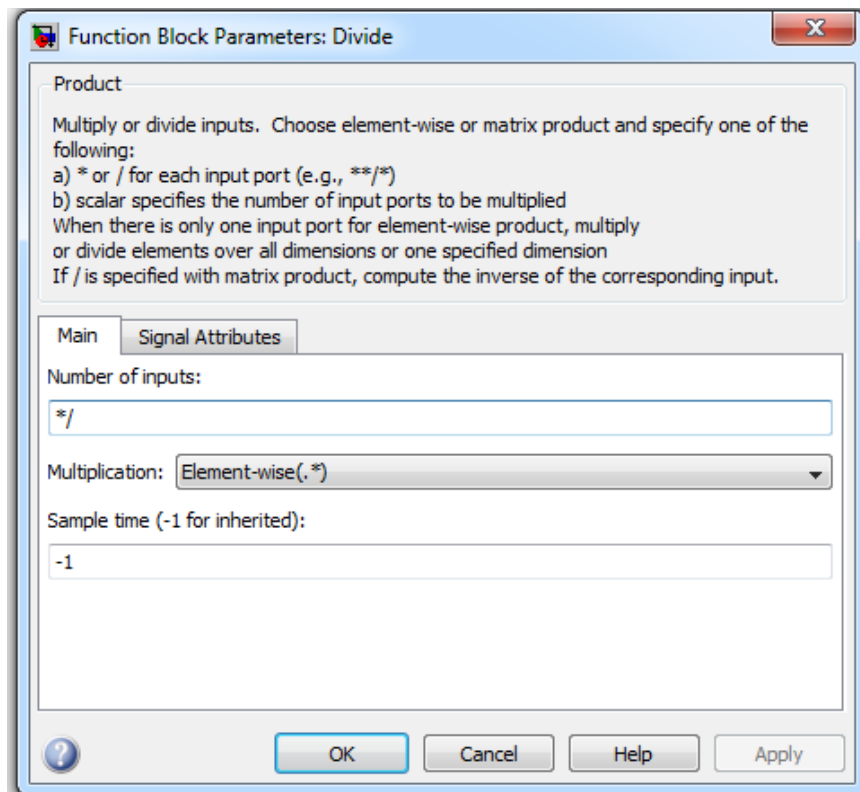


Рис.1.59. Графічне вікно налаштувань блоку “Divide” додатку Simulink

В динамічній моделі на рис.1.56 застосовується операція інтегрування сигналу за часом (щоб прискорення транспортного потоку перетворити на його швидкість), яка реалізується за допомогою блоку “Transfer Fcn” (підрозділ “Continuous” розділу “Simulink”). Блок “Transfer Fcn” призначений для введення в додаток Simulink динамічних моделей у вигляді передаточних функцій. У полі “Numerator coefficient” вікна налаштувань даного блоку у квадратних дужках через пробіл вводяться коефіцієнти чисельника передаточної функції, а в полі “Denominator coefficient” – коефіцієнти знаменника. Щоб виконувалась операція інтегрування вхідного сигналу за часом, настроїмо блок “Transfer Fcn” так, як показано на рис.1.60.

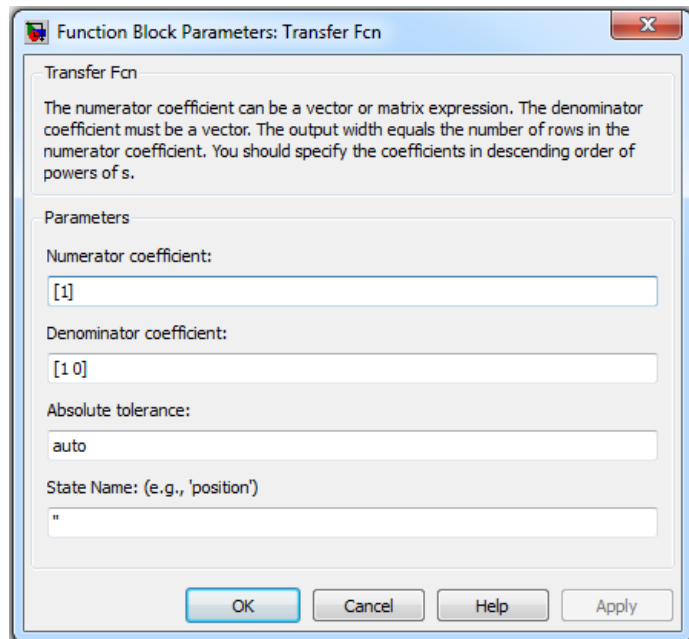


Рис.1.60. Графічне вікно настройок блоку “Transfer Fcn” додатку Simulink

Результат роботи динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя, показаний на рис.1.61 (блок “Score” на рис.1.56).

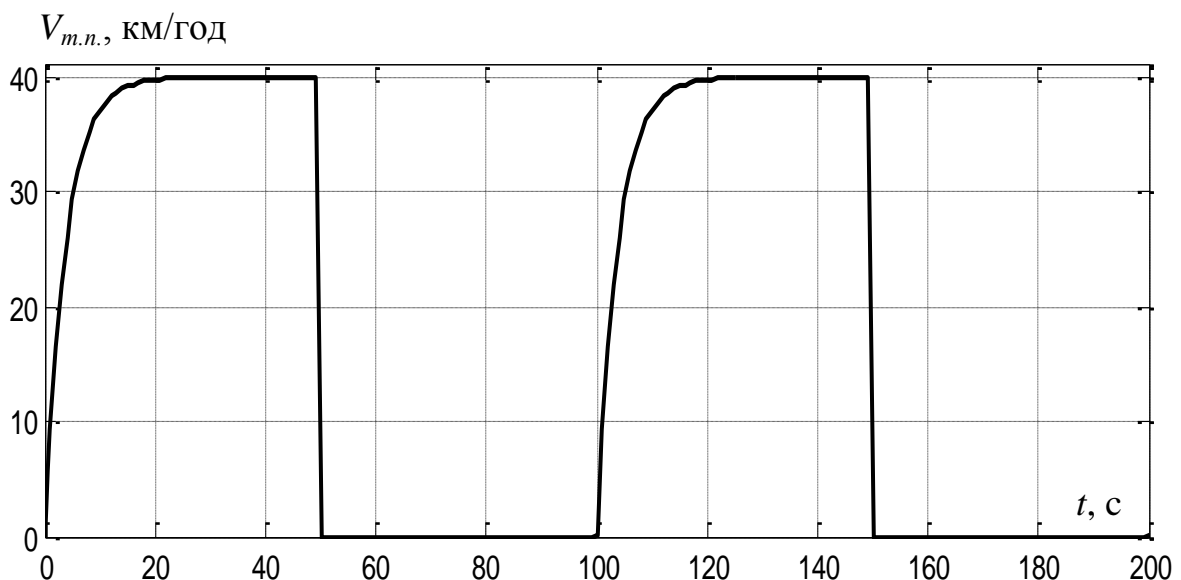


Рис.1.61. Зміна у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя

Із рис.1.61 ми бачимо, що після загоряння зеленого світла (нульова та сота секунди моделювання) транспортний потік розганяється до максимально допустимої для дорожніх умов в зоні другого перехрестя просторової швидкості 40 км/год приблизно за 12 с. Далі протягом 38-ми секунд моделювання спостерігається постійна просторова швидкість транспортного потоку 40 км/год. Після закінчення відповідного такту на 50 та 150 секундах моделювання просторова швидкість транспортного потоку різко знижується до нуля та залишається на цьому рівні, доки на другому перехресті для напрямку, що розглядається, горить червоне світло.

Перейдемо від просторової швидкості транспортного потоку до його інтенсивності, прийнявши лінійну залежність між цими характеристиками (інтенсивність потоку розглядається відносно стоп-лінії перед перехрестям):

$$I_{m.n.} = n \cdot \frac{V_{m.n.} \cdot \frac{1000}{3600}}{L_{авт.сер} + 2}, \quad од/с, \quad (1.3)$$

де  $I_{m.n.}$  – інтенсивність транспортного потоку відносно стоп-лінії перед перехрестям, од/с;  $n$  – кількість ліній руху у відповідному напрямі;  $L_{авт.сер.}$  – середня довжина автомобіля у відповідному напрямі, м. Середня відстань між автомобілями протягом всього такту приймається незмінною величиною, рівною 2 м.

Зазначимо, що інтенсивність транспортного потоку може стати рівною нулю ще до закінчення такту, коли горить зелене світло, якщо всі автомобілі, що були перед другим перехрестям у відповідному напрямі, встигли проїхати через стоп-лінію до закінчення такту. Щоб передбачити цей випадок, треба протягом такту результат інтегрування за часом інтенсивності транспортного потоку порівнювати з кількістю автомобілів, що були перед другим перехрестям у відповідному напрямі. І як тільки результат інтегрування за часом інтенсивності транспортного потоку стане більше кількості автомобілів,

що були перед другим перехрестям, інтенсивність необхідно встановити рівною нулю. Відмітимо, що в кінці кожного світлофорного циклу результат інтегрування за часом інтенсивності транспортного потоку треба скидати в нуль.

На основі динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку, та з урахуванням формули (1.3) розроблена модель першого елемента досліджуваної транспортної системи (рис.1.62).

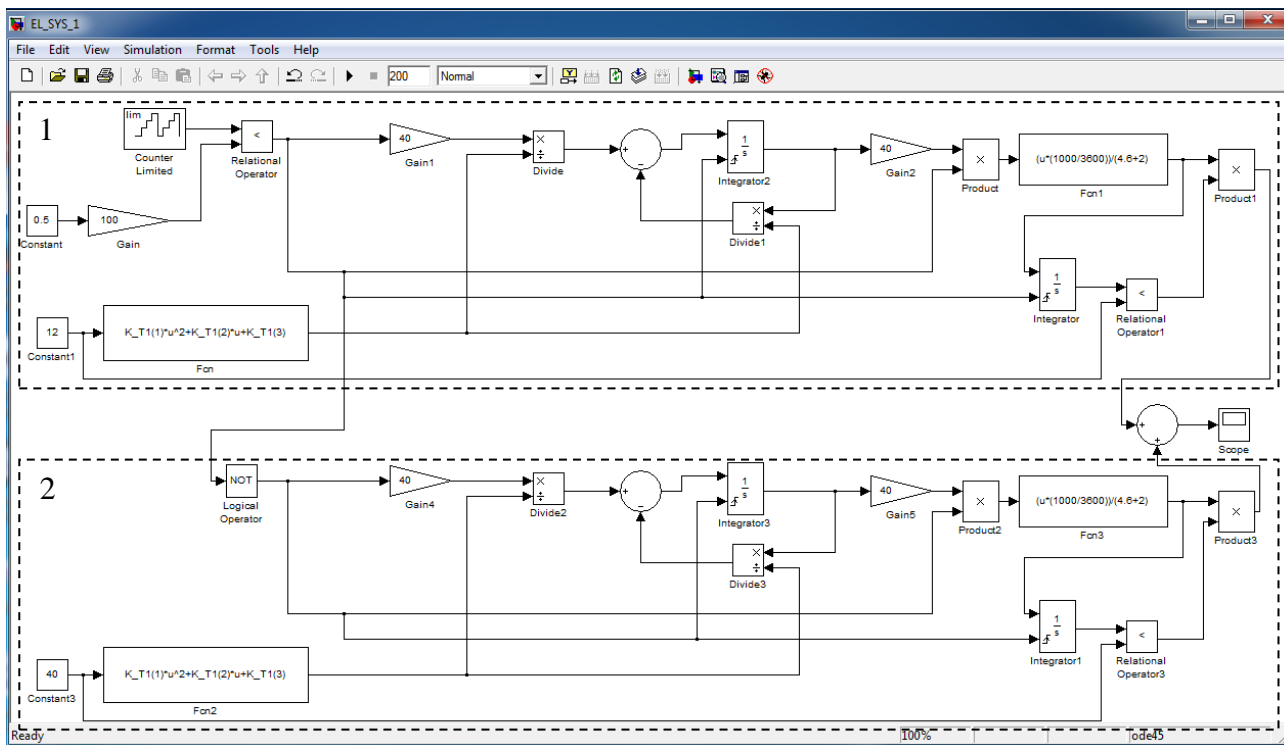


Рис.1.62. Структурна схема моделі першого елемента досліджуваної транспортної системи в додатку Simulink

Модель першого елемента досліджуваної транспортної системи складається з двох основних частин, що виділені на рис.1.62 пунктирними лініями. Перша частина формує інтенсивність транспортного потоку для конфліктного напрямку другого перехрестя, а друга – інтенсивність транспортного потоку для головного напрямку. Для конфліктного напрямку кількість автомобілів перед другим перехрестям прийнята рівною 12 (блок “Constant1” на рис.1.62), а для головного напрямку – 40 (блок “Constant3” на рис.1.62). Оскільки горіння зеленого та червоного світла для головного та

конфліктного напрямів носить протифазний характер, керуючим впливом на другу частину моделі першого елемента транспортної системи є результат інверсії керуючого сигналу на першу частину моделі. Операція інверсії реалізується за допомогою блока “Logical Operator” (підрозділ “Logic and Bit Operations” розділу “Simulink”). Для цього у полі “Operator” вікна настройок даного блока обирається вид операції «NOT» (рис.1.63).

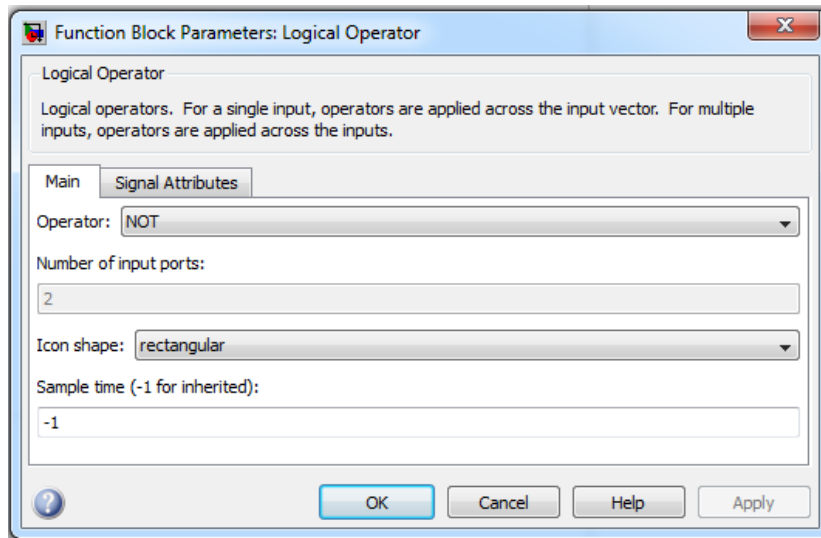


Рис.1.63. Графічне вікно настройок блоку “Logical Operator” додатку Simulink

В моделі першого елемента досліджуваної транспортної системи на рис.1.62 перехід від просторової швидкості транспортного потоку до його інтенсивності за формулою (1.3) відбувається у блоках “Fcn1” та “Fcn3”. При цьому враховується, що кількість ліній руху для всіх напрямів другого перехрестя дорівнює одиниці, а середня довжина автомобіля в обох напрямках складає 4,6 м.

Інтегрування за часом сигналів в кожній із частин моделі на рис.1.62 здійснюється за допомогою блока “Integrator” (підрозділ “Continuous” розділу “Simulink”). Відмінність даного блоку від блоку “Transfer Fcn” в тому, що його вихідний сигнал можна скидати в нуль за зовнішнім сигналом, яким є керуючий вплив, оскільки він визначає початок кожного нового світлофорного циклу. Для того, щоб установити скидання вихідного сигналу інтегратора за зовнішнім сигналом, настроїмо блок “Integrator” так, як показано на рис.1.64.

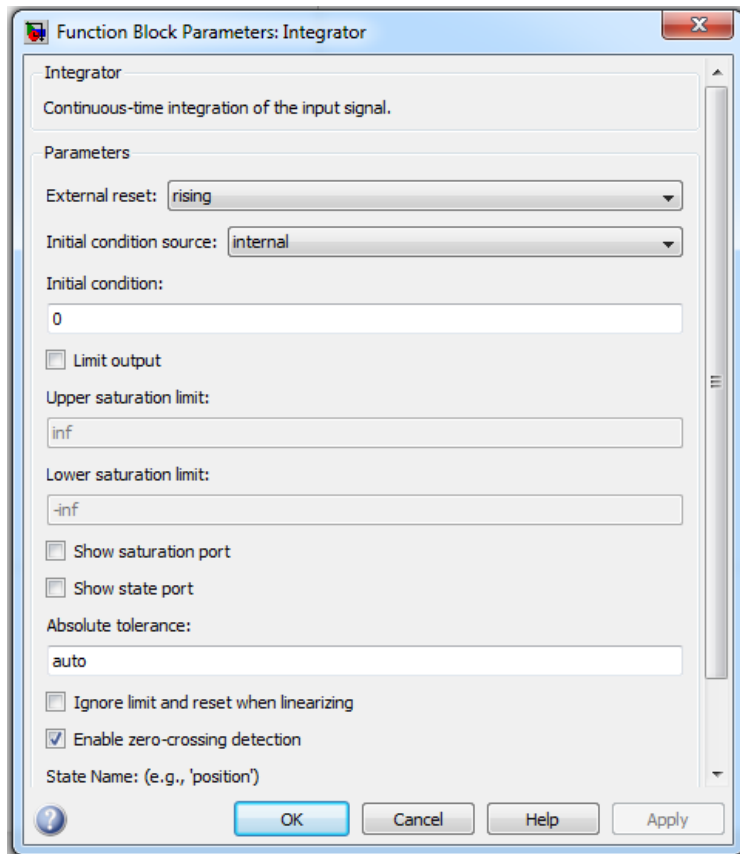


Рис.1.64. Графічне вікно налаштувань блоку “Integrator” додатку Simulink

Результат роботи моделі першого елемента досліджуваної транспортної системи показаний на рис.1.65 (блок “Scope” на рис.1.62).

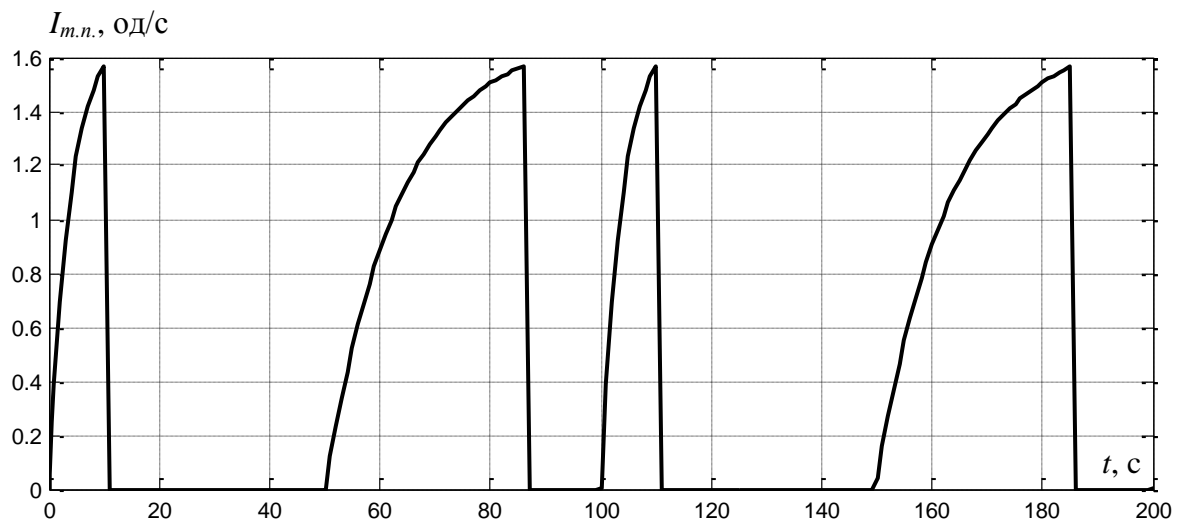


Рис.1.65. Зміна у часі інтенсивності транспортного потоку відносно стоп-лінії перед другим перехрестям

Із рис.1.65 ми бачимо, що через значно більшу кількість автомобілів перед перехрестям динаміка росту інтенсивності транспортного потоку у головному напрямі суттєво повільніша, ніж у конфліктному. Щоб всі автомобілі перед перехрестям перетнули стоп-лінію, для головного напрямку потрібно 37 с, тоді як для конфліктного – 11 с.

Також можна зробити висновок, що за умови знаходження перед другим перехрестям у конфліктному напрямі 12 автомобілів на цьому перехресті спостерігається значний запас за пропускнуою здатністю, оскільки автомобілі конфліктного транспортного потоку проїжджають перехрестя приблизно за 11 секунд. Таким чином, залишається 89 секунд, які можна виділити для пропуску автомобілів головного транспортного потоку через друге перехрестя.

Другий елемент досліджуваної транспортної системи (рис.1.2) описує процес формування транспортного потоку відразу за першим перехрестям. На вхід цього елемента поступає інформація щодо кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному та конфліктному напрямках, що їдуть за прямим маршрутом (рис.1.2). На виході елемента – інтенсивність транспортного потоку відносно стоп-лінії перед першим перехрестям у головному напрямі (рис.1.2). Модель другого елемента транспортної системи визначається на основі результатів експериментальних замірів зміни у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя (табл.1.6). Причому приймається однаковий характер зміни у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя як у головному, так і у конфліктному напрямках.

Табл.1.6. Результати експериментальних замірів зміни у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя

Для кількості автомобілів перед перехрестям 24 одиниці (на одній полосі)											
$t, c$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$V_{m.n.},$ км/год.	0	15,6	26,8	34,7	40,4	44,6	47,5	49,7	51,2	52,3	53

Для кількості автомобілів перед перехрестям 52 одиниці (на одній полосі)											
$t, c$	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$V_{m.n.},$ км/год.	0	13,3	23,4	31,1	36,9	41,3	44,6	47,1	49	50,5	51,6
Для кількості автомобілів перед перехрестям 103 одиниці (на одній полосі)											
$t, c$	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
$V_{m.n.},$ км/год.	0	10,2	18,6	25,3	30,9	35,3	39	42	44,4	46,4	48

Нижче наведені основні результати параметричної оцінки динамічних моделей для різної кількості автомобілів перед першим перехрестям за допомогою додатку «System Identification Tool» математичного пакету MATLAB (рис.1.66 – 1.71).

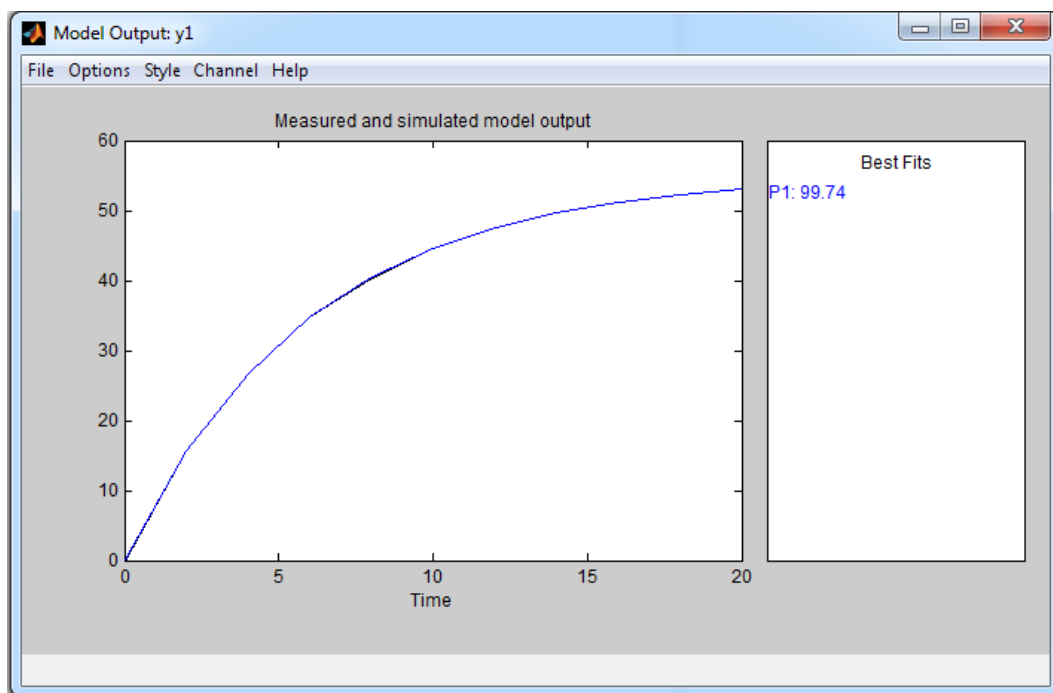


Рис.1.66. Результат параметричної оцінки динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку за умови незначної кількості автомобілів перед першим перехрестям



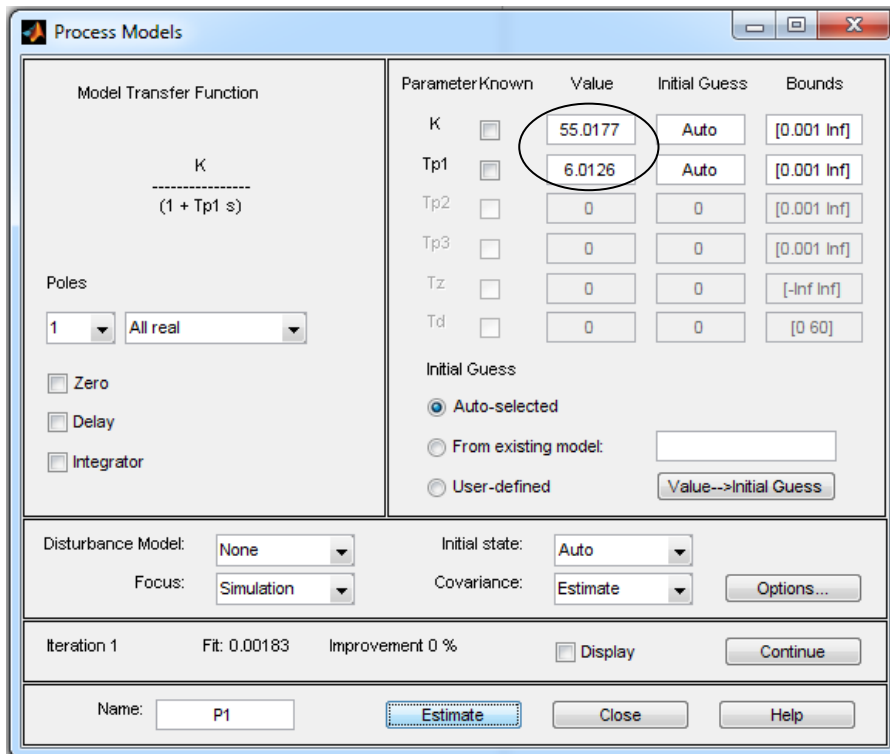


Рис.1.67. Результат параметричної оцінки динамічної моделі другого елемента системи для незначної кількості автомобілів перед першим перехрестям

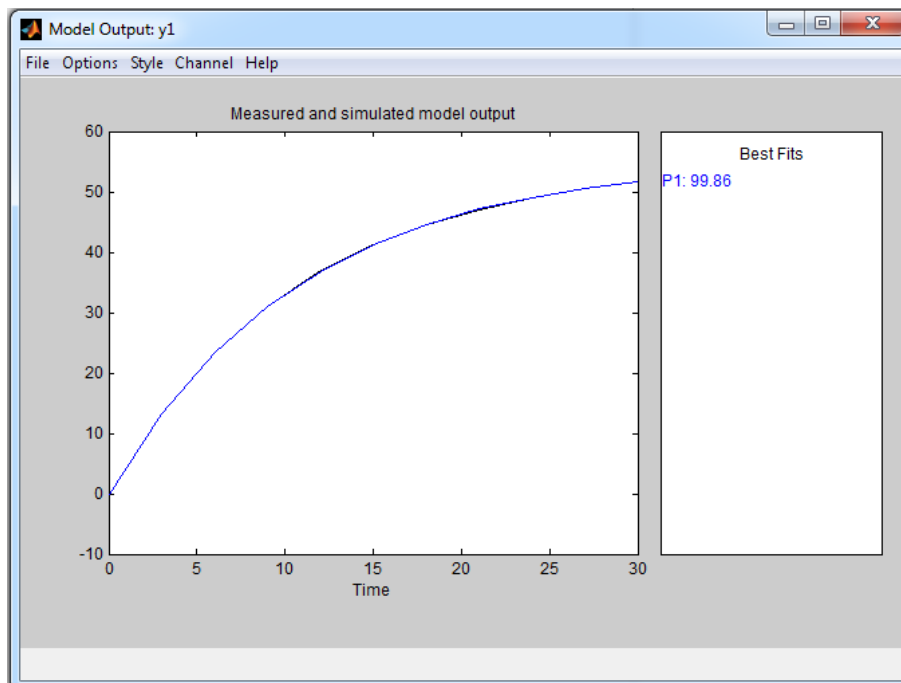


Рис.1.68. Результат параметричної оцінки динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку за умови середньої кількості автомобілів перед першим перехрестям

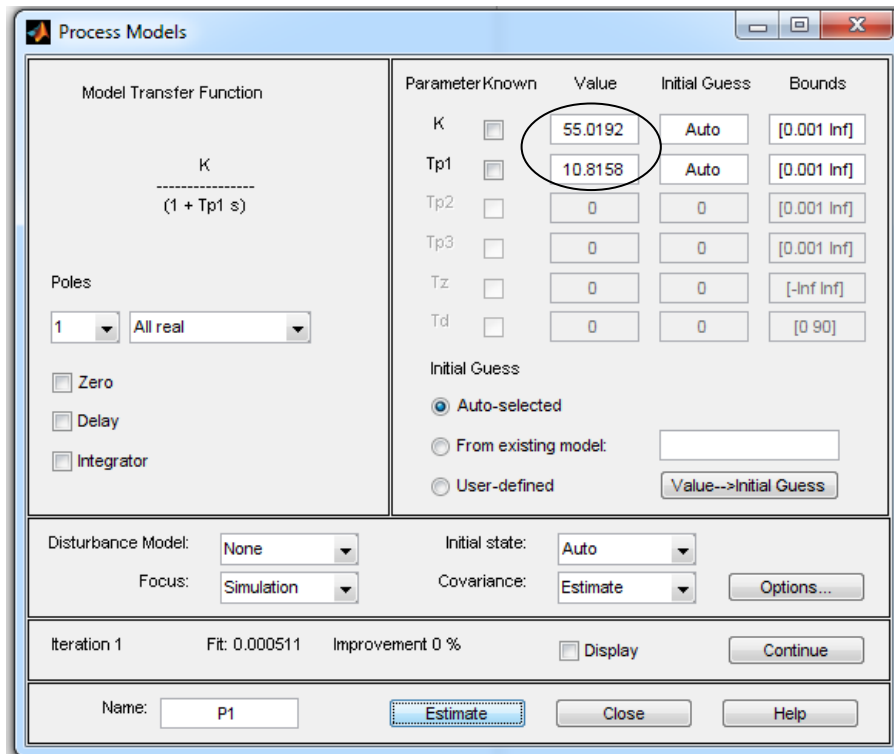


Рис.1.69. Результат параметричної оцінки динамічної моделі другого елемента системи для середньої кількості автомобілів перед першим перехрестям

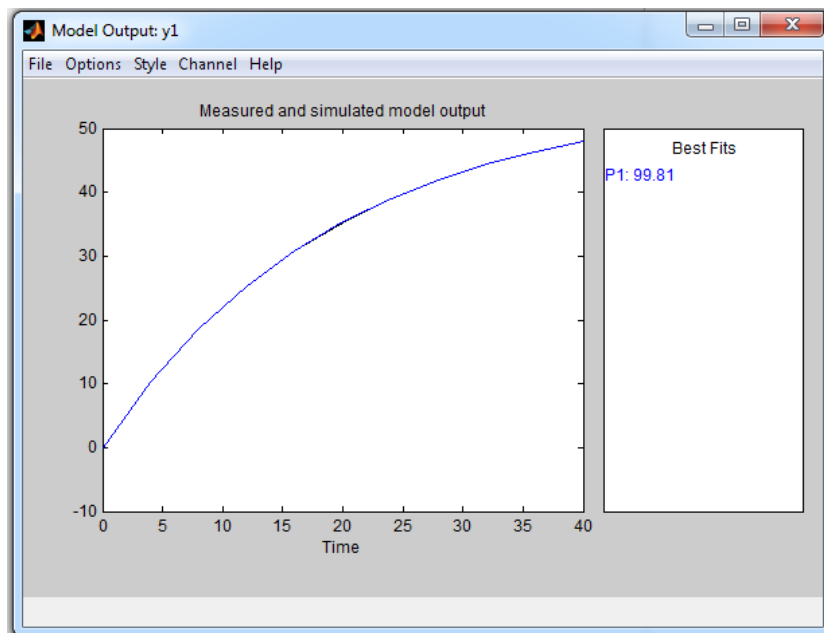


Рис.1.70. Результат параметричної оцінки динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку за умови значної кількості автомобілів перед першим перехрестям

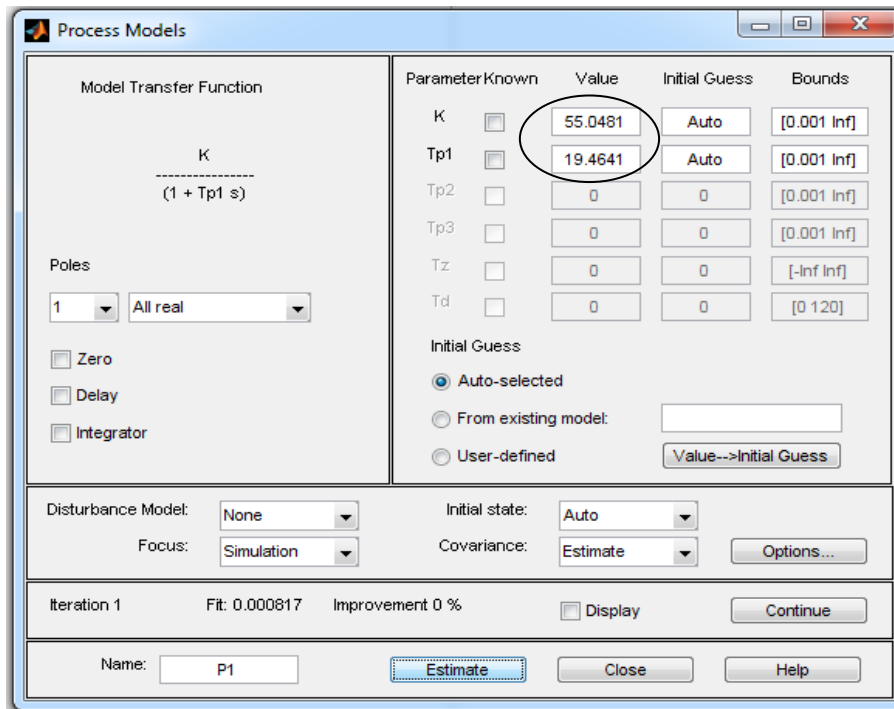


Рис.1.71. Результат параметричної оцінки динамічної моделі другого елемента системи для значної кількості автомобілів перед першим перехрестям

Таким чином, можна зробити висновок, що:

- зміна у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя за умови невеликої кількості автомобілів перед перехрестям описується передаточною функцією, що відповідає аперіодичній динамічній ланці, з коефіцієнтом підсилення 55,02 та постійною часу 6,01 (рис.1.67). При цьому відносна точність параметричної оцінки динамічної моделі склала 99,74 % (рис.1.66);

- зміна у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя за умови середньої кількості автомобілів перед перехрестям описується передаточною функцією, що відповідає аперіодичній динамічній ланці, з коефіцієнтом підсилення 55,02 та постійною часу 10,8 (рис.1.69). При цьому відносна точність параметричної оцінки динамічної моделі склала 99,86 % (рис.1.68);

- зміна у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя за умови значної кількості автомобілів перед перехрестям описується передаточною функцією, що відповідає аперіодичній динамічній

ланці, з коефіцієнтом підсилення 55,05 та постійною часу 19,46 (рис.1.71). При цьому відносна точність параметричної оцінки динамічної моделі склала 99,81 % (рис.1.70).

Проаналізуємо залежність параметрів динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя, від кількості автомобілів перед перехрестям. Коефіцієнт підсилення  $K$  за умови збільшення кількості автомобілів перед перехрестям змінюється у дуже вузькому діапазоні від 55,02 до 55,05. Тому можна зробити висновок, що кількість автомобілів перед перехрестям не впливає на даний параметр, який приймемо постійною величиною, що дорівнює 55. На відміну від коефіцієнта підсилення  $K$ , постійна часу  $T$  відчутно збільшується за умови зростання кількості автомобілів перед перехрестям. За допомогою додатку «Basic Fitting» здійснимо регресійний аналіз залежності постійної часу  $T$  від кількості автомобілів перед першим перехрестям.

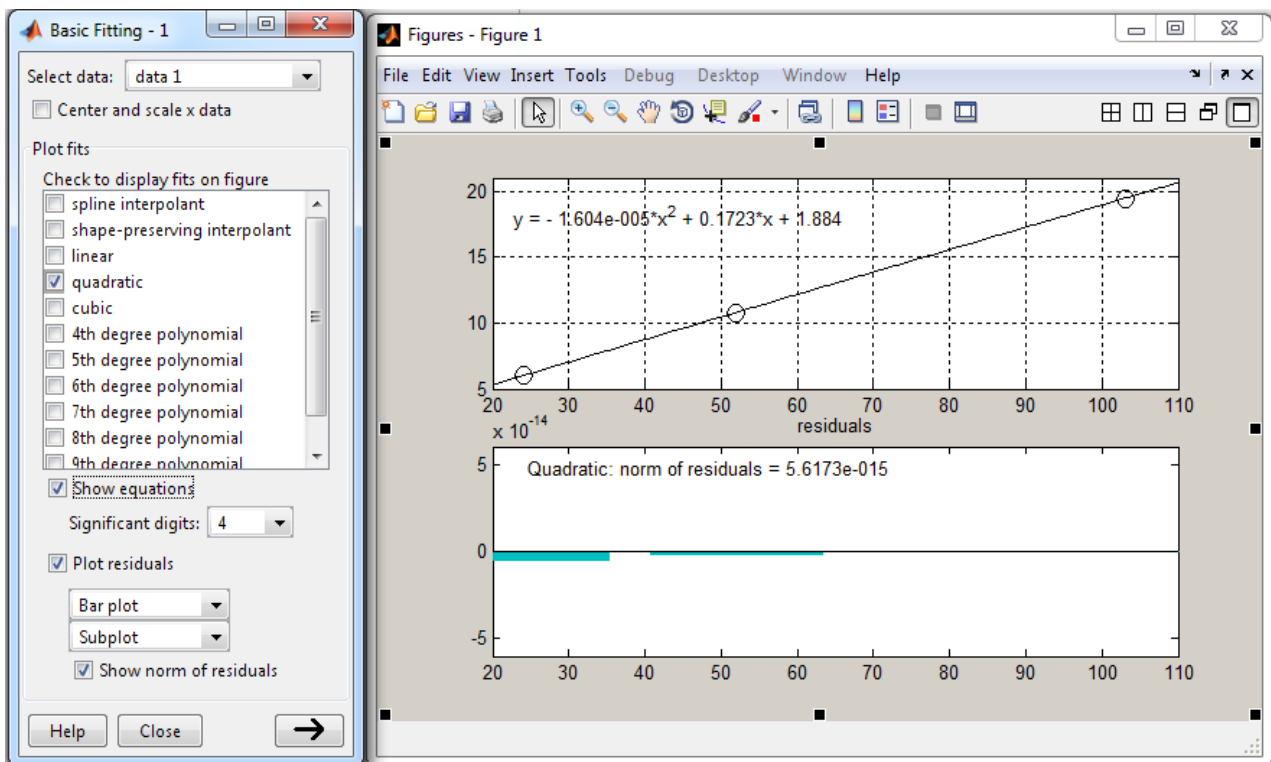


Рис.1.72. Результат регресійного аналізу залежності постійної часу  $T_2$  динамічної моделі другого елемента транспортної системи від кількості автомобілів перед першим перехрестям  $D_2$

З рис.1.72 видно, що експериментальна залежність постійної часу  $T_2$  динамічної моделі другого елемента транспортної системи від кількості автомобілів перед першим перехрестям  $D_2$  з високою точністю описується квадратичним рівнянням. При цьому максимальне значення абсолютного відхилення точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої не перевищує  $5,5 \cdot 10^{-15}$ , а корінь квадратний суми квадратичних відхилень точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої становить  $5,6 \cdot 10^{-15}$ . Для наших досліджень прийемо таку точність апроксимації прийнятною.

Використовуючи процедуру переносу даних, описану в підрозділі 1.2, збережемо коефіцієнти квадратичного рівняння у робочому просторі пакету MATLAB як елементи вектору  $K_{T2}$ .

На основі динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя, та з урахуванням формули (1.3) розроблена модель другого елемента досліджуваної транспортної системи (рис.1.73).

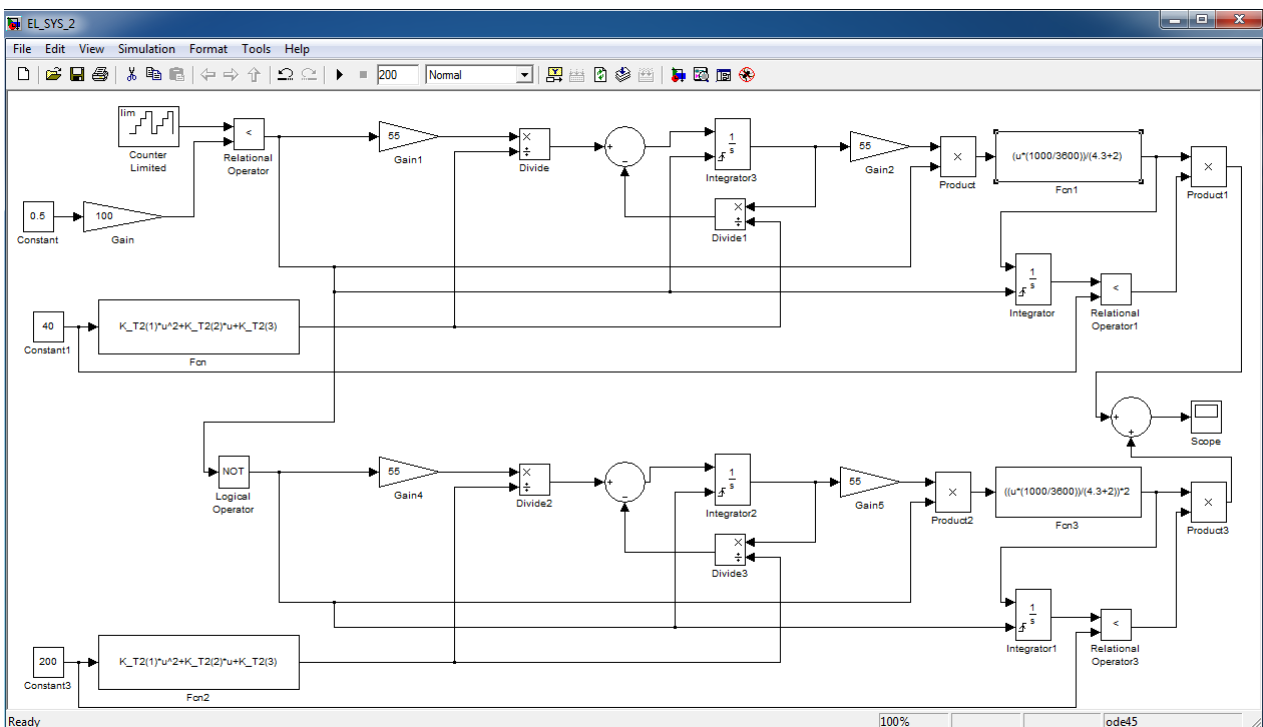


Рис.1.73. Структурна схема моделі другого елемента досліджуваної транспортної системи в додатку Simulink

В моделі на рис.1.73 для конфліктного напрямку кількість автомобілів перед першим перехрестям прийнята рівною 40 (блок “Constant1”), а для головного напрямку – 200 (блок “Constant3”). В формулі переходу від просторової швидкості транспортного потоку до його інтенсивності (блоки “Fcn1” та “Fcn3” на рис.1.73) враховується, що головний напрям першого перехрестя має дві лінії руху, а середня довжина автомобіля в обох напрямках прийнята рівною 4,3 м.

Результат роботи моделі другого елемента досліджуваної транспортної системи показаний на рис.1.74 (блок “Score” на рис.1.73).

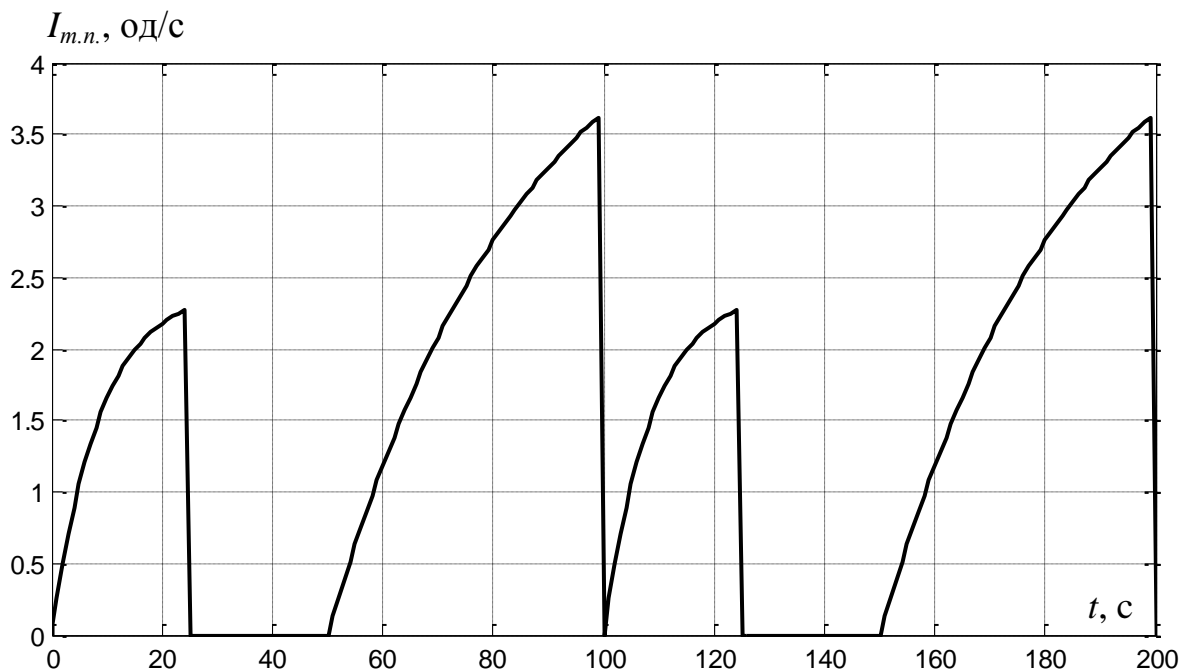


Рис.1.74. Зміна у часі інтенсивності транспортного потоку відносно стоп-лінії перед першим перехрестям у головному напрямі

Із рис.1.74 ми бачимо, що через значну кількість автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі автомобілі перетинають стоп-лінію протягом всього такту, коли горить зелене світло для даного напрямку, з поступово зростаючою інтенсивністю транспортного потоку. У конфліктному напрямі кількість автомобілів перед першим перехрестям значно менша, тому вони всі успівають роз’їхатись ще до закінчення відповідного такту – за 25 с.

Таким чином, можна зробити висновок, що у конфліктному напрямі на цьому перехресті спостерігається значний запас за пропускнуою здатністю, і його, у разі необхідності, можна використати для направлення частини головного транспортного потоку за об'їзним маршрутом через друге перехрестя.

Третій елемент досліджуваної транспортної системи також описує процес формування транспортного потоку відразу за першим перехрестям, але на його виході маємо інтенсивність транспортного потоку за об'їзним маршрутом (рис.1.2). Відповідно на вхід цього елемента поступає інформація щодо кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному та конфліктних напрямках, що їдуть за об'їзним маршрутом (рис.1.2). Модель третього елемента транспортної системи повторює модель другого елемента системи (рис.1.73).

Четвертий елемент досліджуваної транспортної системи (рис.1.2) описує процес формування черги автомобілів перед другим перехрестям, що їдуть у головному напрямі. Модель даного елемента системи реалізується на основі функціональної залежності кількості автомобілів перед перехрестям  $D_{m.n.}$  від інтенсивності транспортного потоку  $I_{m.n.}$

$$D_{m.n.} = \int_0^{T_u} I_{m.n.} dt, \quad \text{од,}$$

де  $T_u$  – період світлофорного циклу для другого перехрестя, с.

Кожний раз, коли на другому перехресті у головному напрямі загоряється червоне світло, результат інтегрування інтенсивності транспортного потоку у даному напрямі скидається в нуль. Таким чином, не враховується ситуація, коли в кінці такту, на якому для головного напрямку горить зелене світло, перед перехрестям залишається черга автомобілів, що для руху без заторів припустимо.

Вхідним сигналом для четвертого елемента досліджуваної транспортної системи є інтенсивність транспортного потоку на початку об'їзного маршруту, що є вихідним сигналом третього елемента системи. Але транспортному потоку

відразу за першим перехрестям, що прямує за об'їзним маршрутом, потрібен час, щоб дістатися другого перехрестя. З урахуванням відстані між перехрестями 750 м та середньої просторової швидкості транспортного потоку на цій ділянці 45 км/год часова затримка транспортного потоку буде дорівнювати

$$\frac{750}{45 \cdot \frac{1000}{3600}} = 60, \text{ с.}$$

Часову затримку сигналу у додатку Simulink реалізує блок “Transport Delay” (підрозділ “Continuous” розділу “Simulink”). Значення часової затримки вводиться в поле “Time delay” вікна настройок даного блока (рис.1.75).

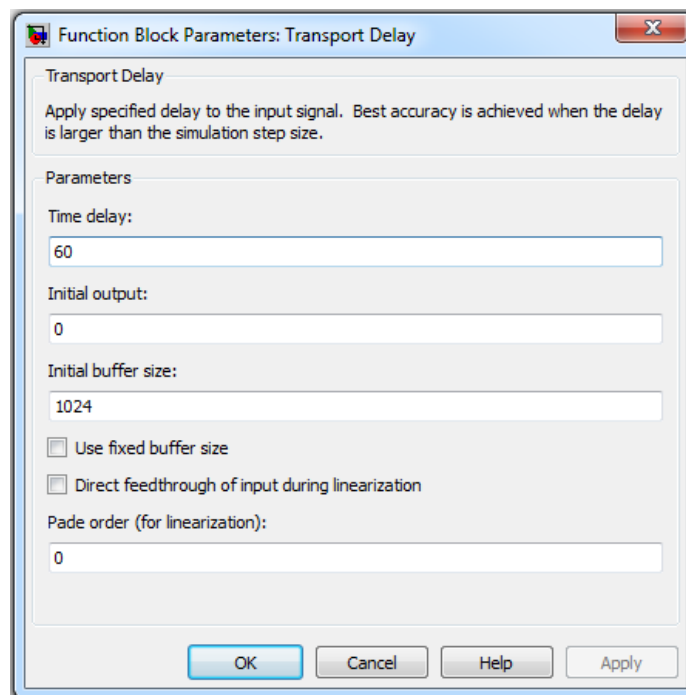


Рис.1.75. Графічне вікно настройок блоку “Transport Delay” додатку Simulink

Зазначимо, що з оглядом на незначну відстань не враховується дифузія груп автомобілів на ділянці між першим та другим перехрестями.



З урахуванням опису моделі четвертого елемента досліджуваної транспортної системи її структурна схема в додатку Simulink буде виглядати так, як на рис.1.76.

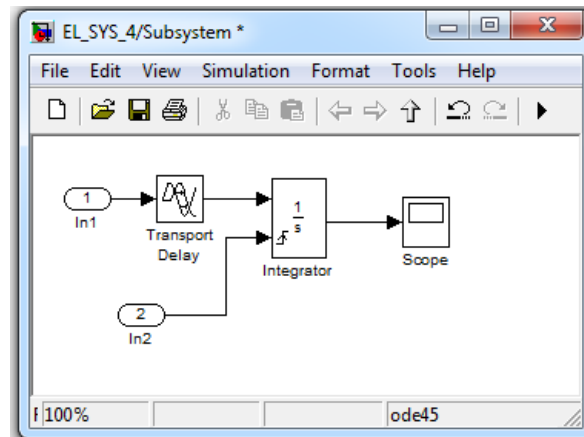


Рис.1.76. Структурна схема моделі четвертого елемента досліджуваної транспортної системи в додатку Simulink

В моделі на рис.1.76 перший вхідний сигнал (блок “In1”) представляє собою інтенсивність транспортного потоку на початку об’їзного маршруту, а другий (блок “In2”) – керуючий сигнал для конфліктного напрямку другого перехрестя (якщо скидання в нуль результату інтегрування відбувається за переходом з нуля до одиниці).

П’ятий елемент досліджуваної транспортної системи описує процес формування транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом (рис.1.2). В основі моделі п’ятого елемента лежить функціональна залежність між інтенсивностями переривистого транспортного потоку в зоні регульованого перехрестя  $I_{m.n.np}$  та транспортного потоку після дифузії груп автомобілів на відстані від перехрестя  $I_{m.n.duф}$

$$I_{m.n.duф} = \frac{\int I_{m.n.np}(t)dt - \int I_{m.n.np}(t - T_{уср})dt}{T_{уср}}, \quad од/с,$$

де  $T_{уср}$  – час ковзного усереднення інтенсивності переривистого транспортного потоку, с.

Наведена функціональна залежність між інтенсивностями переривистого транспортного потоку та транспортного потоку після дифузії груп автомобілів справедлива, якщо на наступних перехрестях у головному напрямі реалізований алгоритм координованого керування світлофорами “зелена хвиля”.

Для середньої просторової швидкості транспортного потоку за прямим маршрутом після першого перехрестя 71 км/год час досягнення автомобілем відмітки 1500 м від перехрестя дорівнює

$$\frac{1500}{71 \cdot \frac{1000}{3600}} = 76, \text{ с.}$$

Отже, на основі опису моделі п'ятого елемента досліджуваної транспортної системи у додатку Simulink математичного пакету MATLAB створено її структурну схему (рис.1.77).

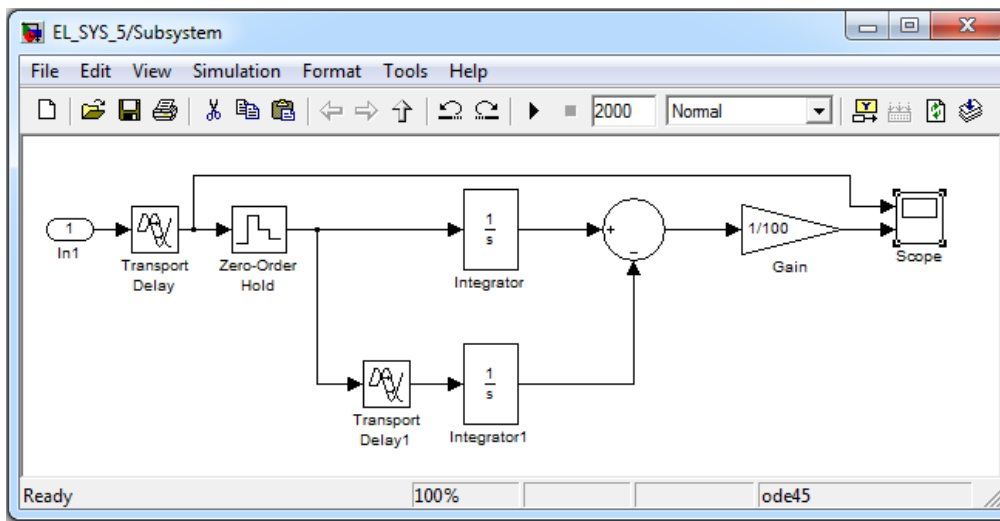


Рис.1.77. Структурна схема моделі п'ятого елемента досліджуваної транспортної системи в додатку Simulink

В моделі на рис.1.77 затримка у часі вхідного сигналу “In1” з метою врахування часу, що необхідний для досягнення автомобілем відмітки 1500 м від першого перехрестя, реалізується за допомогою блока “Transport Delay”. Значення часової затримки 76 с вводиться у поле “Time delay” вікна настройок даного блока.

Перед виконанням операції ковзного усереднення вхідного сигналу “In1” відбувається його квантування за часом з кроком 1 с. Для цього використовується блок “Zero-Order Hold” (підрозділ “Discrete” розділу “Simulink”). Крок квантування сигналу за часом 1 с вводиться у поле “Sample time” вікна налаштувань даного блока.

Функціональна залежність між інтенсивностями переривистого транспортного потоку та транспортного потоку після дифузії груп автомобілів реалізується на основі двох інтеграторів “Integrator” та “Integrator1”, в яких скидання результату інтегрування відсутнє (у полі “External reset” вікна налаштувань вибираємо пункт “None”). Час ковзного усереднення вхідного сигналу обираємо рівним періоду світлофорного циклу 100 с та вводимо у поле “Time delay” вікна налаштувань блока “Transport Delay1” та у блок “Gain” (рис.1.77).

Результат роботи моделі п'ятого елемента досліджуваної транспортної системи показаний на рис.1.78 (блок “Scope” на рис.1.77).

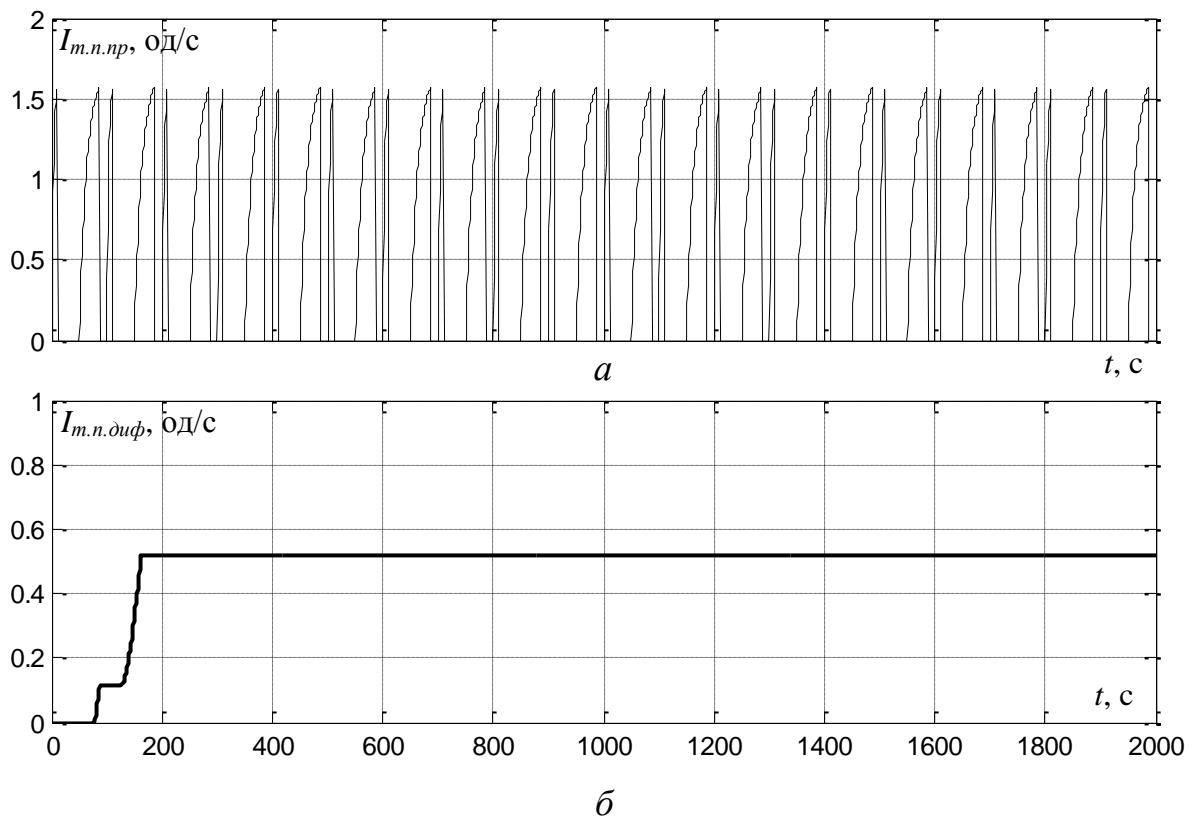


Рис.1.78. Зміна у часі: а – інтенсивності переривистого транспортного потоку в зоні першого перехрестя; б – інтенсивності транспортного потоку після дифузії груп автомобілів на відстані від перехрестя

На рис.1.78 показаний результат імітації явища дифузії груп автомобілів у головному напрямі після першого перехрестя на відстані 1500 м від нього для незначної щільності транспортного потоку. Причому до початкового (нульового) часу моделювання було прийняте припущення про повну відсутність автомобілів. Із рис.1.78,б ми бачимо, що інтенсивність транспортного потоку на відстані 1500 м від першого перехрестя починає поступово зростати тільки через 76 с, коли автомобілі, що рухаються з більш високою швидкістю, досягають відмітки 1500 м від перехрестя. Поступове зростання інтенсивності транспортного потоку на рис.1.78,б пояснюється розосередженням у просторі автомобілів першої групи із-за їх різної швидкості. Після проїзду першої групи автомобілів, починаючи зі 160 с значення інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 м від перехрестя стабілізується на рівні 0,52 од/с з відсутністю коливань (рис.1.78,б), на відміну від інтенсивності транспортного потоку в зоні першого перехрестя (рис.1.78,а).

Шостий елемент досліджуваної транспортної системи описує процес формування транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об'їзним маршрутом (рис.1.2). Модель шостого елемента транспортної системи повторює модель п'ятого елемента системи (рис.1.77), однак при цьому враховується відмінність середньої просторової швидкості транспортного потоку за об'їзним маршрутом після другого перехрестя.

### **Контрольні завдання**

1. На основі експериментальних замірів кількості автомобілів перед першим перехрестям (рис.1.1) для першого конфліктного транспортного потоку (табл.1.7) за допомогою інструментів математичного пакету MATLAB визначити модель першого елемента зовнішнього середовища та реалізувати її в додатку Simulink.

Табл.1.7. Експериментальні заміри кількості автомобілів перед першим перехрестям для першого конфліктного транспортного потоку

Година	Кількість автомобілів у черзі перед перехрестям				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
7.00	6	7	6	6	9
8.00	7	10	9	7	7
9.00	16	13	15	13	14
10.00	15	17	16	14	14
11.00	11	12	12	8	13
12.00	8	7	8	9	6
13.00	7	5	7	6	8
14.00	9	7	7	9	10
15.00	10	11	8	9	12
16.00	13	13	12	14	10
17.00	15	15	16	14	15
18.00	15	17	19	16	18
19.00	12	12	11	13	16

2. На основі експериментальних замірів кількості автомобілів перед першим перехрестям (рис.1.1) для головного транспортного потоку (табл.1.8) за допомогою інструментів математичного пакету MATLAB визначити модель другого елемента зовнішнього середовища та реалізувати її в додатку Simulink.

Табл.1.8. Експериментальні заміри кількості автомобілів перед першим перехрестям для головного транспортного потоку

Година	Кількість автомобілів у черзі перед перехрестям				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
7.00	42	34	38	40	43

8.00	187	211	160	133	174
9.00	251	238	243	248	250
10.00	244	236	241	266	248
11.00	201	198	206	182	208
12.00	196	175	191	213	190
13.00	214	211	222	220	210
14.00	223	218	230	222	229
15.00	230	257	202	233	211
16.00	215	210	198	187	236
17.00	247	229	235	245	253
18.00	259	270	250	279	274
19.00	245	267	240	247	214

3. На основі експериментальних замірів кількості автомобілів перед першим перехрестям (рис.1.1) для другого конфліктного транспортного потоку (табл.1.9) за допомогою інструментів математичного пакету MATLAB визначити модель третього елемента зовнішнього середовища та реалізувати її в додатку Simulink.

Табл.1.9. Експериментальні заміри кількості автомобілів перед першим перехрестям для другого конфліктного транспортного потоку

Година	Кількість автомобілів у черзі перед перехрестям				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
7.00	4	5	6	4	5
8.00	10	11	10	10	9
9.00	18	18	17	19	18
10.00	16	17	14	17	16
11.00	12	13	13	13	12

12.00	9	9	7	8	9
13.00	7	6	5	7	7
14.00	10	9	10	11	9
15.00	12	13	11	10	12
16.00	16	14	16	15	14
17.00	19	19	20	18	20
18.00	18	16	19	18	17
19.00	13	14	12	14	12

4. На основі експериментальних замірів кількості автомобілів перед другим перехрестям (рис.1.1) для конфліктного транспортного потоку (табл.1.10) за допомогою інструментів математичного пакету MATLAB визначити модель четвертого елемента зовнішнього середовища та реалізувати її в додатку Simulink.

Табл.1.10. Експериментальні заміри кількості автомобілів перед другим перехрестям для конфліктного транспортного потоку

Година	Кількість автомобілів у черзі перед перехрестям				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
7.00	19	22	16	18	20
8.00	23	24	21	25	21
9.00	43	41	44	38	42
10.00	35	30	34	38	33
11.00	29	32	26	36	24
12.00	17	15	16	20	14
13.00	19	19	18	18	17
14.00	23	25	19	24	18
15.00	18	19	19	15	16

16.00	21	18	19	27	21
17.00	39	38	39	42	41
18.00	43	44	45	45	40
19.00	30	34	27	28	32

5. На основі експериментальних замірів просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя для різної кількості автомобілів перед перехрестям (табл.1.11) за допомогою інструментів математичного пакету MATLAB визначити динамічну модель, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя, та реалізувати її в додатку Simulink.

Табл.1.11. Результати експериментальних замірів зміни у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні другого перехрестя

Для кількості автомобілів перед перехрестям 12 одиниць (на одній полосі)											
$t, c$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{m.n.},$ км/год.	0	11,4	20	26,4	31,1	34,7	37,3	39,3	40,7	41,8	42,6
Для кількості автомобілів перед перехрестям 25 одиниць (на одній полосі)											
$t, c$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$V_{m.n.},$ км/год.	0	9,4	16,9	22,8	27,4	31,1	34	36,3	38,1	39,6	40,7
Для кількості автомобілів перед перехрестям 49 одиниць (на одній полосі)											
$t, c$	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$V_{m.n.},$ км/год.	0	6,6	12,2	17	21,1	24,6	27,5	30,1	32,3	34,1	35,7

6. На основі експериментальних замірів просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя для різної кількості автомобілів перед перехрестям (табл.1.12) за допомогою інструментів



математичного пакету MATLAB визначити динамічну модель, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя, та реалізувати її в додатку Simulink.

Табл.1.12. Результати експериментальних замірів зміни у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні першого перехрестя

Для кількості автомобілів перед перехрестям 29 одиниць (на одній полосі)											
$t, c$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$V_{m.n.}, км/год.$	0	14,9	26,1	34,5	40,9	45,6	49,2	51,9	53,9	55,4	56,5
Для кількості автомобілів перед перехрестям 58 одиниць (на одній полосі)											
$t, c$	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$V_{m.n.}, км/год.$	0	13,3	23,6	31,6	37,9	42,8	46,6	49,5	51,9	53,7	55,1
Для кількості автомобілів перед перехрестям 100 одиниць (на одній полосі)											
$t, c$	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
$V_{m.n.}, км/год.$	0	10,4	19	26,1	32	36,8	40,9	44,2	46,9	49,2	51,1

## Висновки

1. Зміна у часі середньої кількості автомобілів перед перехрестями для всіх елементів зовнішнього середовища з припустимою точністю описується ступеневим поліномом восьмого порядку, що представляє собою детерміновану складову моделей. При цьому відносне відхилення точок експериментальних замірів від апроксимуючої кривої полінома не перевищує 10 %.

2. Для всіх елементів зовнішнього середовища закон розподілення відхилення миттєвих значень кількості автомобілів перед перехрестями від середнього значення як випадкової величини близький до нормального. Отже,

за випадкову складову моделей елементів зовнішнього середовища прийнятий генератор випадкових чисел за нормальним законом розподілення із стандартним відхиленням та математичним очікуванням, що отримані в результаті статистичної обробки даних експериментальних замірів.

3. Експериментальна зміна у часі просторової швидкості транспортних потоків в зоні перехресть описується динамічною моделлю, яка відповідає аперіодичній динамічній ланці з незмінним коефіцієнтом підсилення та постійною часу, що залежить від кількості автомобілів перед перехрестями. При цьому для обох перехресть залежність постійної часу динамічної моделі від кількості автомобілів перед перехрестям з високою точністю описується квадратичним рівнянням (максимальне значення абсолютного відхилення точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої не перевищує  $5,5 \cdot 10^{-15}$ ). Відносна точність параметричної оцінки динамічної моделі для обох перехресть становить більше 95 %.

4. Аналіз зміни у часі інтенсивності транспортних потоків в зоні перехресть показав наявність значного запасу за пропускною здатністю об'їзного маршруту, який, у разі необхідності, можна використати для направлення частини головного транспортного потоку по об'їзному маршруту через друге перехрестя.

## 2. СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

### 2.1. Дослідження процесів формування транспортних потоків в некерованій транспортній системі

На основі структури ділянки міської транспортної схеми, що описана у підрозділі 1.1 (рис.1.1), та моделей елементів зовнішнього середовища і транспортної системи, які визначені, відповідно, у підрозділах 1.2 та 1.3, у додатку Simulink математичного пакету MATLAB створимо модель транспортної системи, що описує процеси формування транспортних потоків на всій ділянці міської транспортної схеми. При цьому використаємо дворівневу ієрархічну структуру моделі транспортної системи. Перший рівень буде складатися з окремих моделей елементів транспортної системи і зовнішнього середовища, що реалізовані як підсистеми за допомогою блоків “Subsystem” (підрозділ “Ports & Subsystems” розділу “Simulink”).

Блок “Subsystem” дозволяє створювати у додатку Simulink підсистеми, всередині яких можуть знаходитися власні моделі. За умови подвійного натиснення лівою клавішею мишки на блоці “Subsystem” відкривається окреме вікно, в якому збирається схема моделі даної підсистеми. Для передачі сигналів між другим рівнем та першим використовуються блоки “Inport” (введення сигналів в підсистему) та “Outport” (виведення сигналів із підсистеми), що знаходяться у підрозділі “Ports & Subsystems” розділу “Simulink”.

Перший елемент зовнішнього середовища реалізуємо у додатку Simulink на основі підсистеми з ім'ям “EVS\_1”, всередину якої вставимо модель даного елемента (рис.1.26).

Вихідний сигнал моделі першого елемента зовнішнього середовища, що представляє собою кількість автомобілів перед першим перехрестям головного потоку у протилежному напрямі, позначимо як  $D1$ . Для зручності ім'я блоку “Outport” задамо так само (рис.2.1).

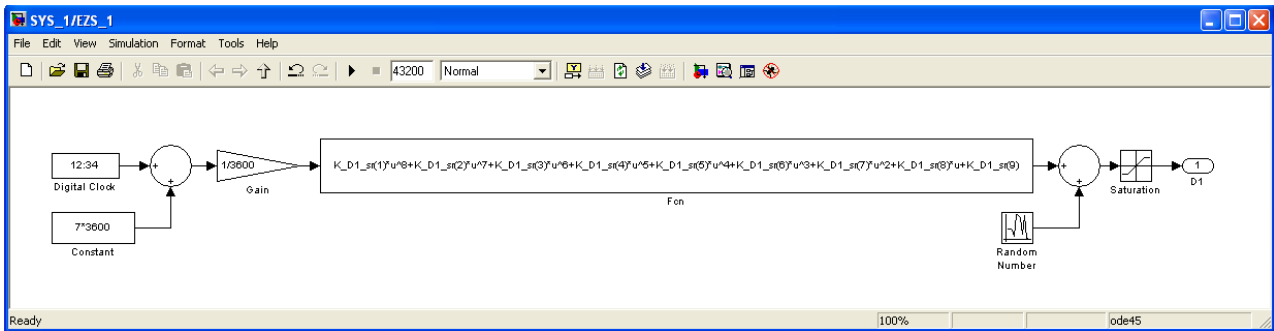


Рис.2.1. Вміст підсистеми “EZS\_1”, яка є першим елементом зовнішнього середовища

Аналогічним способом на основі рис.1.32, рис.1.37 та рис.1.42 реалізуємо у додатку Simulink другий, третій та четвертий елементи зовнішнього середовища як підсистеми з ім’ям “EZS\_2”, “EZS\_3” та “EZS\_4”.

Перший елемент моделі поведінки транспортної системи представимо у додатку Simulink підсистемою з ім’ям “EL\_SYS\_1”, всередину якої помістимо модель даного елемента (рис.2.2).

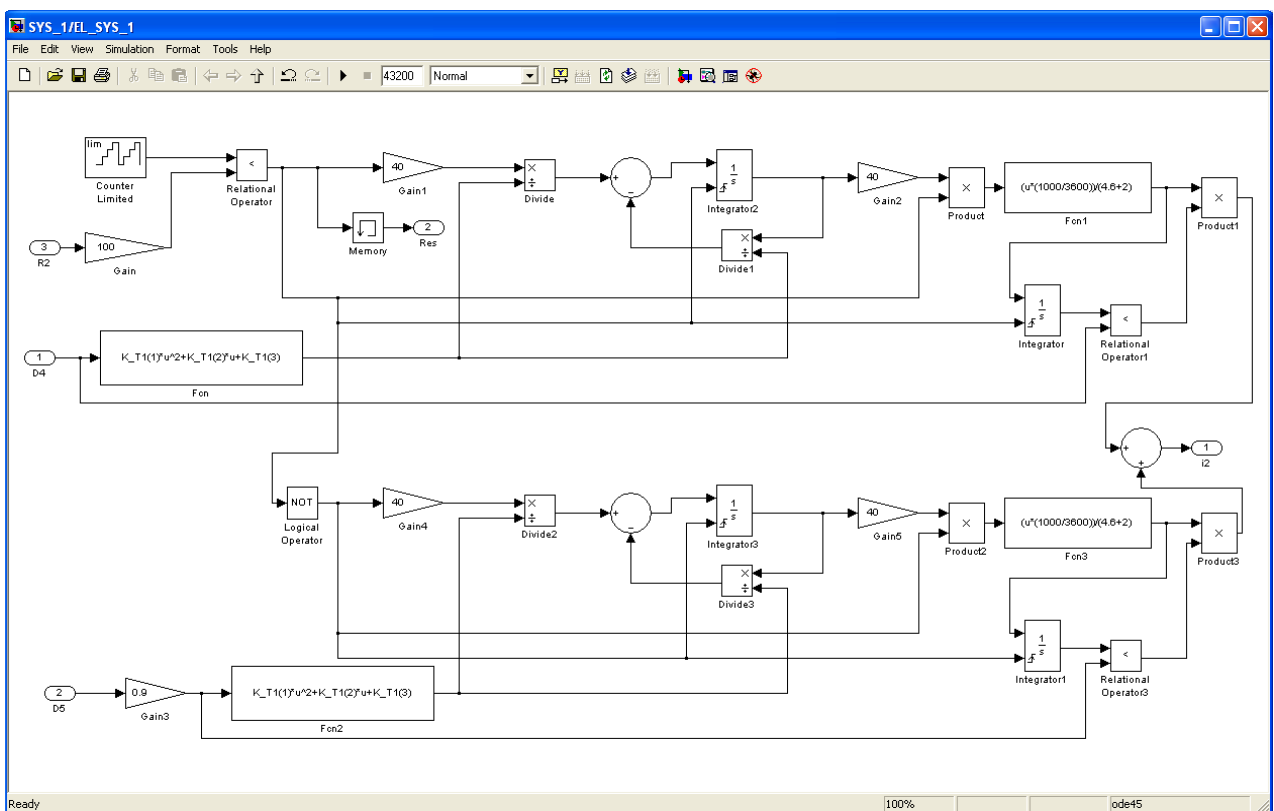


Рис.2.2. Вміст підсистеми “EL\_SYS\_1”, яка є першим елементом моделі поведінки транспортної системи

З рис.2.2 ми бачимо, що підсистема “EL\_SYS\_1” має три входи (блоки “Inport”) та два виходи (блоки “Outport”). Першим та другим вхідними сигналами є кількість автомобілів перед другим перехрестям, відповідно, у конфліктному напрямі  $D4$  та у головному  $D5$ . Третій вхідний сигнал  $R2$  – це керуючий вплив від автоматизованої системи керування дорожнім рухом (АСКДР), що являє собою відношення тривалості такту, коли у конфліктному напрямі на другому перехресті горить зелене світло, до періоду світлофорного циклу. Першим вихідним сигналом підсистеми “EL\_SYS\_1” є інтенсивність транспортного потоку відносно стоп-ліній другого перехрестя  $i2$ , а другим – сигнал скидання в нуль результату інтегрування інтенсивності транспортного потоку на ділянці між першим та другим перехрестями  $Res$ .

Зазначимо, що за допомогою блоку “Gain3” на рис.2.2 враховується той факт, що 90 % кількості автомобілів перед другим перехрестям у головному напрямі повертають направо.

Другий елемент моделі поведінки транспортної системи реалізуємо у додатку Simulink на основі підсистеми з ім'ям “EL\_SYS\_2”, всередину якої вставимо модель даного елемента (рис.2.3).

Першим та другим вхідними сигналами підсистеми “EL\_SYS\_2” є кількість автомобілів перед першим перехрестям, відповідно, у головному  $D2$  та у конфліктному  $D3$  напрямках. Третій вхідний сигнал  $R1$  це керуючий вплив від АСКДР, що являє собою відношення тривалості такту, коли у конфліктному напрямі на першому перехресті горить зелене світло, до періоду світлофорного циклу.

Четвертий вхідний сигнал  $R$  також є керуючим впливом від АСКДР, але він керує розподілом автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі між прямим маршрутом та об'їзним через друге перехрестя. Керуючий сигнал  $R$  дорівнює відношенню кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі, що поїдуть за прямим маршрутом, до

загальної кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі. Єдиний вихідний сигнал підсистеми “EL\_SYS\_2” – це інтенсивність транспортного потоку відносно стоп-ліній першого перехрестя за прямим маршрутом *il*.

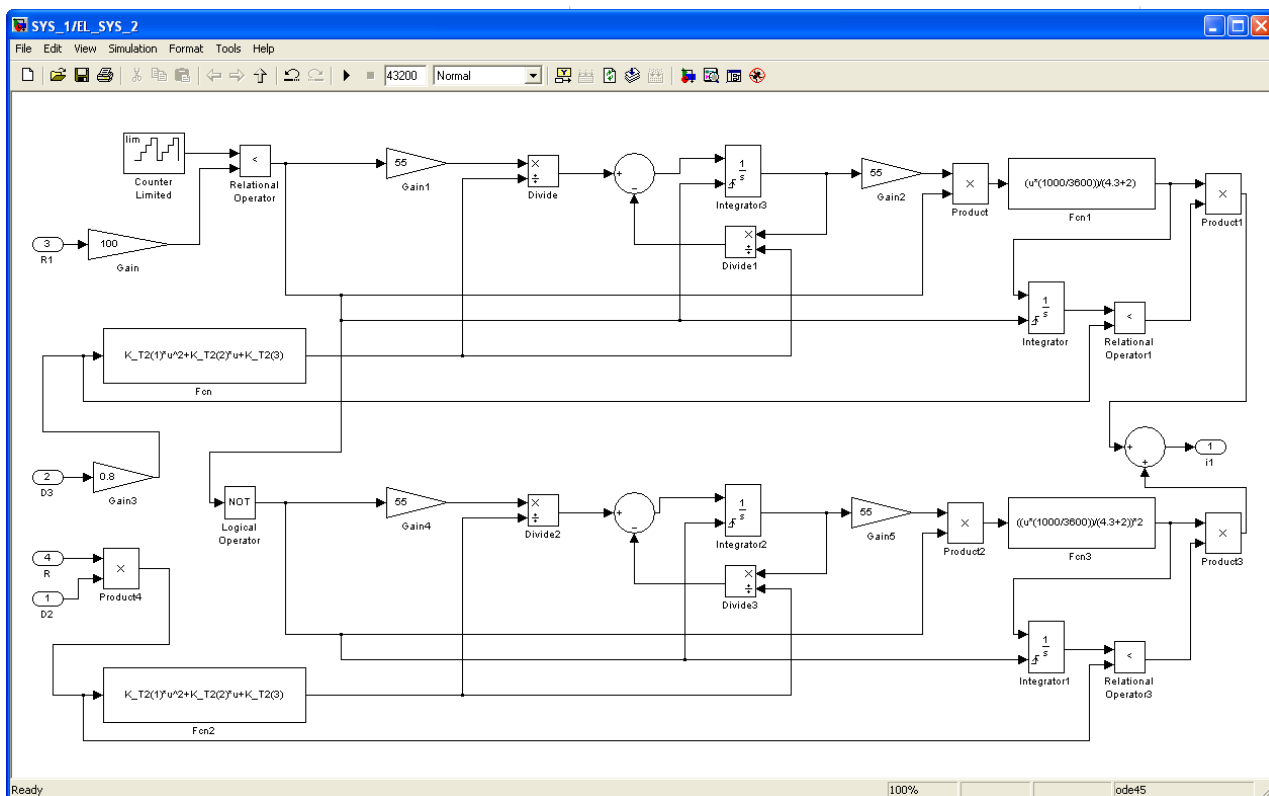


Рис.2.3. Вміст підсистеми “EL\_SYS\_2”, яка є другим елементом моделі поведінки транспортної системи

Зазначимо, що за допомогою блоку “Gain3” на рис.2.3 враховується той факт, що 80 % кількості автомобілів перед першим перехрестям у конфліктному напрямі повертають направо.

Третій елемент моделі поведінки транспортної системи представимо у додатку Simulink підсистемою з ім’ям “EL\_SYS\_3”, всередину якої помістимо модель даного елемента (рис.2.4).

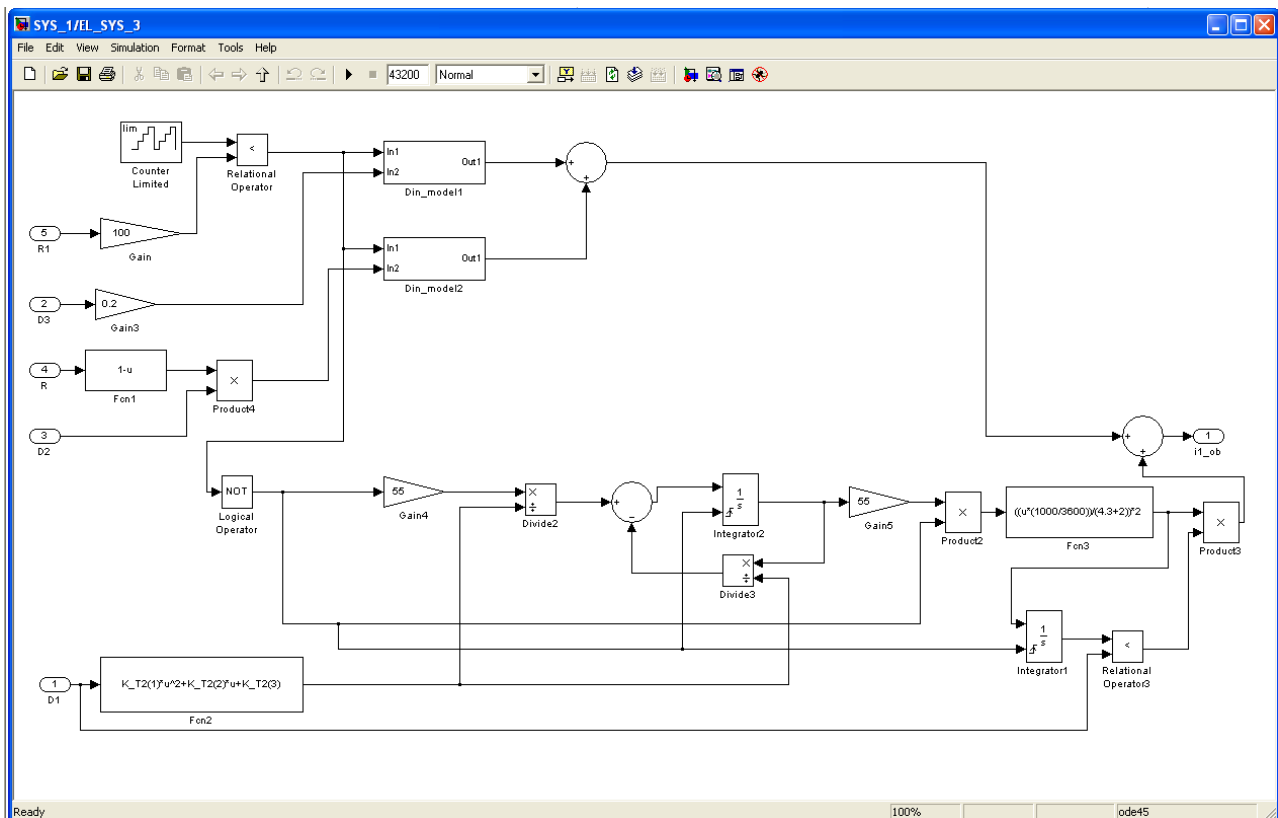


Рис.2.4. Вміст підсистеми “EL\_SYS\_3”, яка є третім елементом моделі поведінки транспортної системи

Для спрощення структури моделі підсистеми “EL\_SYS\_3” до її складу введені дві підсистеми “Din\_model1” та ” Din\_model2”. Всередині обох підсистем знаходиться динамічна модель імітації зміни у часі інтенсивності транспортного потоку відносно стоп-лінії першого перехрестя за об’їзним маршрутом (рис.2.5).

Підсистема “EL\_SYS\_3” має п’ять вхідних сигналів. Перший вхідний сигнал  $D1$  це кількість автомобілів перед першим перехрестям головного потоку у протилежному напрямі, що повертають направо; другий  $D2$  – кількість автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі; третій  $D3$  – кількість автомобілів перед першим перехрестям конфліктного потоку, що їдуть прямо. За допомогою блоку “Gain3” на рис.2.4 враховується той факт, що прямо їдуть тільки 20 % кількості автомобілів перед першим перехрестям конфліктного потоку.

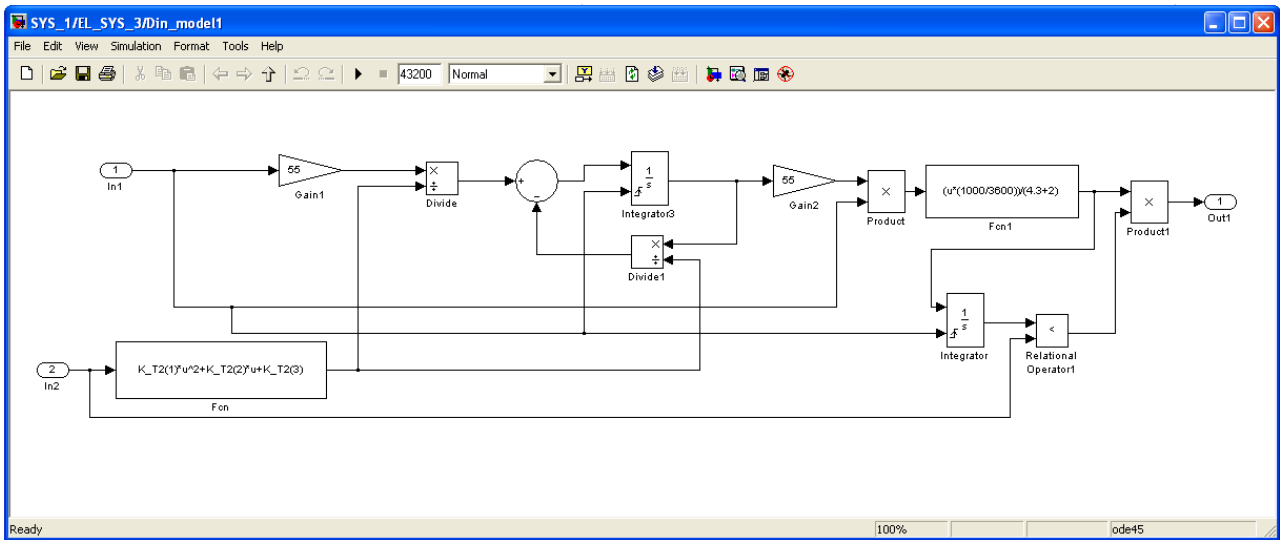


Рис.2.5. Динамічна модель імітації зміни у часі інтенсивності транспортного потоку відносно стоп-лінії першого перехрестя за об’їзним маршрутом

Четвертий  $R$  та п’ятий  $R1$  вхідні сигнали підсистеми “EL\_SYS\_3” аналогічні однойменним вхідним сигналам підсистеми “EL\_SYS\_2” й описані вище.

Єдиним вихідним сигналом підсистеми “EL\_SYS\_3” є інтенсивність транспортного потоку відносно стоп-лінії першого перехрестя за об’їзним маршрутом  $il_{ob}$ .

Четвертий елемент моделі поведінки транспортної системи реалізуємо у додатку Simulink на основі підсистеми з ім’ям “EL\_SYS\_4”, всередину якої вставимо модель, що зображена на рис.1.76. Першим вхідним сигналом підсистеми “EL\_SYS\_4” є інтенсивність транспортного потоку відносно стоп-лінії першого перехрестя за об’їзним маршрутом. Відповідно блок “In1” на рис.1.76 назвемо як “ $il_{ob}$ ”. Другий вхідний сигнал скидає в нуль результат інтегрування інтенсивності транспортного потоку на ділянці між першим та другим перехрестями. Відповідно блок “In2” на рис.1.76 назвемо як “Res”. Вихід моделі на рис.1.76, що з’єднаний з блоком “Score” та являє собою кількість автомобілів перед другим перехрестям за об’їзним маршрутом, під’єднаємо до блоку “Output” з ім’ям “D5”.



П'ятий елемент моделі поведінки транспортної системи реалізуємо у додатку Simulink на основі підсистеми з ім'ям "EL\_SYS\_5", всередину якої вставимо модель, що зображена на рис.1.77. Єдиним вхідним сигналом підсистеми "EL\_SYS\_5" є інтенсивність транспортного потоку відносно стоп-ліній першого перехрестя за прямим маршрутом. Відповідно блок "In1" на рис.1.77 назвемо як "i1". Вихід моделі на рис.1.77, що з'єднаний з блоком "Scope" та являє собою інтенсивність транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом, під'єднаємо до блоку "Outport" з ім'ям "I1".

Шостий елемент моделі поведінки транспортної системи реалізуємо у додатку Simulink на основі підсистеми з ім'ям "EL\_SYS\_6", всередину якої вставимо модель, що зображена на рис.1.77. Єдиним вхідним сигналом підсистеми "EL\_SYS\_6" є інтенсивність транспортного потоку відносно стоп-ліній другого перехрестя за об'їзним маршрутом. Відповідно блок "In1" на рис.1.77 назвемо як "i2". Вихід моделі на рис.1.77, що з'єднаний з блоком "Scope" та являє собою інтенсивність транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об'їзним маршрутом, під'єднаємо до блоку "Outport" з ім'ям "I2".

На другому рівні моделі транспортної системи встановлюються зв'язки між елементами моделі поведінки та елементами зовнішнього середовища, які представлені підсистеми у додатку Simulink. Схема моделі транспортної системи на другому рівні показана на рис.2.6.

Підсистема "EVS\_1" впливає на підсистему "EL\_SYS\_3" через кількість автомобілів перед першим перехрестям головного потоку у протилежному напрямі *D1* (рис.2.6). Відповідно, вихід блоку "EVS\_1" *D1* зв'язаний з однойменним входом блоку "EL\_SYS\_3". Також на підсистему "EL\_SYS\_3" створюють вплив підсистема "EVS\_2" (через кількість автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі *D2*) та підсистема "EVS\_3" (через кількість автомобілів перед першим перехрестям у конфліктному напрямі *D3*). Відповідно, виходи *D2* та *D3* підсистем "EVS\_2" та "EVS\_3" зв'язуємо з однойменними входами підсистеми "EL\_SYS\_3".

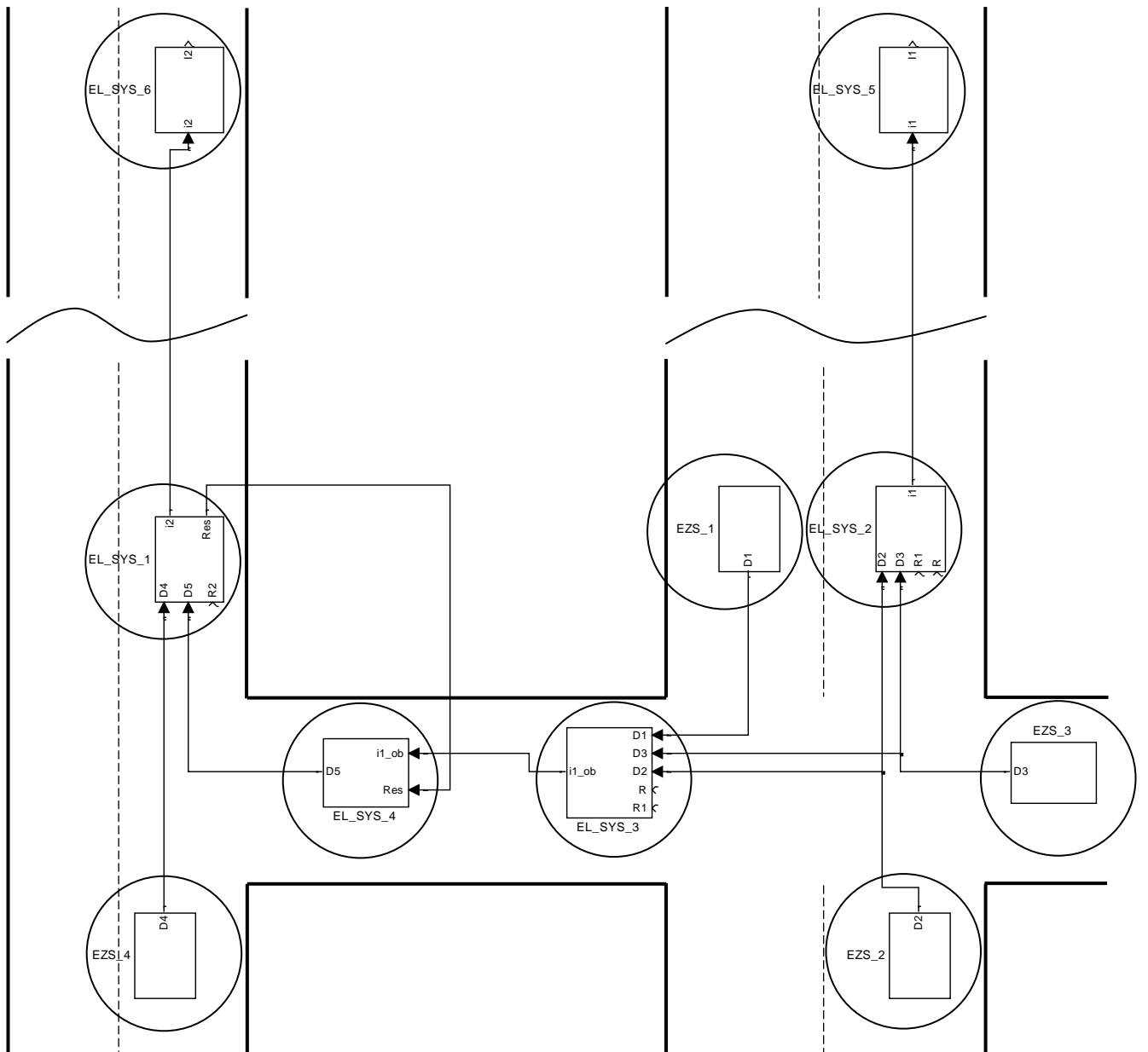


Рис.2.6. Структурна схема моделі транспортної системи на другому ієрархічному рівні

Кількості автомобілів перед першим перехрестям  $D2$  та  $D3$  визначають транспортний потік в зоні першого перехрестя не тільки за об'їзним, а й за прямим маршрутом. Тому другий і третій елементи зовнішнього середовища впливають ще й на другий елемент моделі поведінки транспортної системи

через параметри  $D2$  та  $D3$  (виходи  $D2$  і  $D3$  підсистем “EZS\_2” та “EZS\_3” зв’язуються з однойменними входами підсистеми “EL\_SYS\_2”).

Четвертий елемент зовнішнього середовища визначає транспортний потік в зоні другого перехрестя через кількість автомобілів перед другим перехрестям у конфліктному напрямі  $D4$ . Отже, вихід  $D4$  підсистеми “EZS\_4” зв’язується з однойменним входом підсистеми “EL\_SYS\_1”. Транспортний потік в зоні другого перехрестя також визначає кількість автомобілів перед другим перехрестям у головному напрямі  $D5$ . Тому вихід  $D5$  підсистеми “EL\_SYS\_4” зв’язується з однойменним входом підсистеми “EL\_SYS\_1”.

Якщо у головному напрямі другого перехрестя горить зелене світло, та має місце транспортний потік в зоні другого перехрестя, відбувається зменшення кількості автомобілів перед другим перехрестям у відповідному напрямі. Тобто, спостерігається зворотна залежність кількості автомобілів перед другим перехрестям у головному напрямі від транспортного потоку в зоні другого перехрестя. Ця залежність враховується за допомогою впливу першого елемента моделі поведінки системи на її четвертий елемент через параметр  $Res$ . Тобто, вихід  $Res$  підсистеми “EL\_SYS\_1” зв’язується з однойменним входом підсистеми “EL\_SYS\_4”.

Кількість автомобілів перед другим перехрестям у головному напрямі визначає інтенсивність транспортного потоку між першим та другим перехрестями за об’їзним маршрутом. Тому третій елемент моделі поведінки системи впливає на її четвертий елемент через параметр  $i1_{ob}$ . Отже, вихід  $i1_{ob}$  підсистеми “EL\_SYS\_3” зв’язується з однойменним входом підсистеми “EL\_SYS\_4”.

Інтенсивність транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом визначається інтенсивністю транспортного потоку відносно стоп-ліній першого перехрестя у відповідному напрямі. Тому другий елемент моделі поведінки системи впливає на її п’ятий елемент через

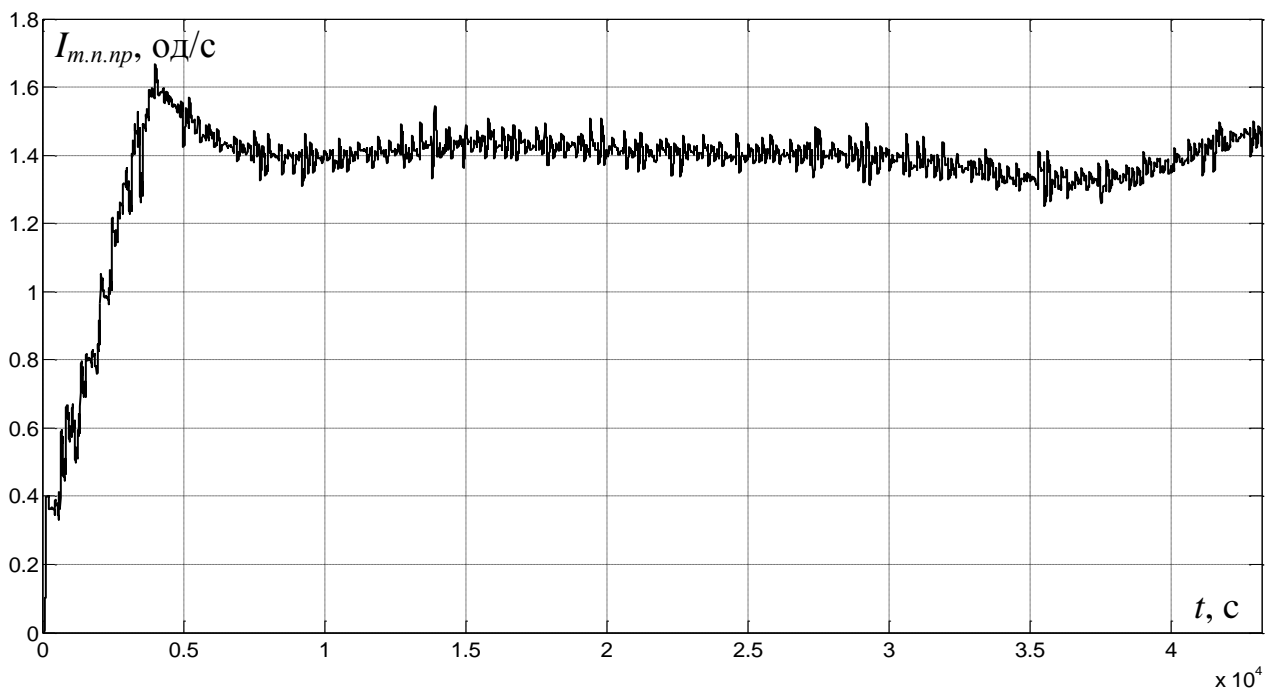
параметр  $i1$ . Отже, вихід  $i1$  підсистеми “EL\_SYS\_2” зв’язується з однойменним входом підсистеми “EL\_SYS\_5”.

Інтенсивність транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об’їзним маршрутом визначається інтенсивністю транспортного потоку відносно стоп-ліній другого перехрестя. Тому перший елемент моделі поведінки системи впливає на її шостий елемент через параметр  $i2$ . Отже, вихід  $i2$  підсистеми “EL\_SYS\_1” зв’язується з однойменним входом підсистеми “EL\_SYS\_6”.

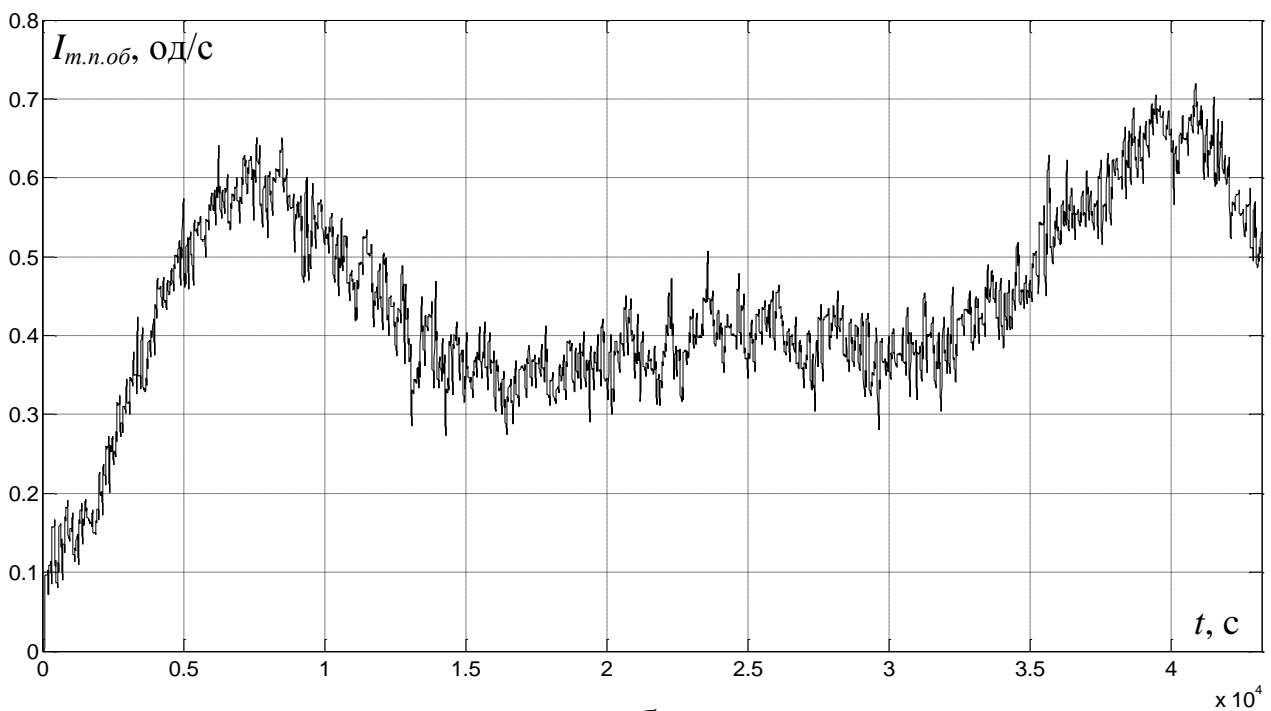
Дослідимо процеси формування транспортних потоків на ділянці міської транспортної схеми (рис.1.1) для випадку, коли розподіл автомобілів головного потоку між прямим та об’їзним маршрутами не відбувається. При цьому за прямим маршрутом їдуть 90 % загальної кількості автомобілів перед першим перехрестям головного потоку. Тривалості основних тактів світлофорних циклів для обох перехресть прийняті рівними (період світлофорного циклу для обох перехресть становить 100 с), тобто  $R1 = R2 = 0,5$ .

Із рис.2.7,а ми бачимо, що характер зміни у часі інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом визначається динамікою кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі (рис.1.33) – на інтервалі між час-піками відбувається незначне зменшення інтенсивності транспортного потоку до 1,4 од/с, а також спостерігається незначний рівень дисперсії інтенсивності транспортного потоку.

На відміну від головного маршруту, характер зміни у часі інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об’їзним маршрутом (рис.2.7,б) визначається динамікою кількості автомобілів перед перехрестями у конфліктних напрямках (рис.1.38 та рис.1.43). Це видно за істотним зменшенням інтенсивності транспортного потоку на інтервалі між час-піками, а також за значною дисперсією інтенсивності транспортного потоку.



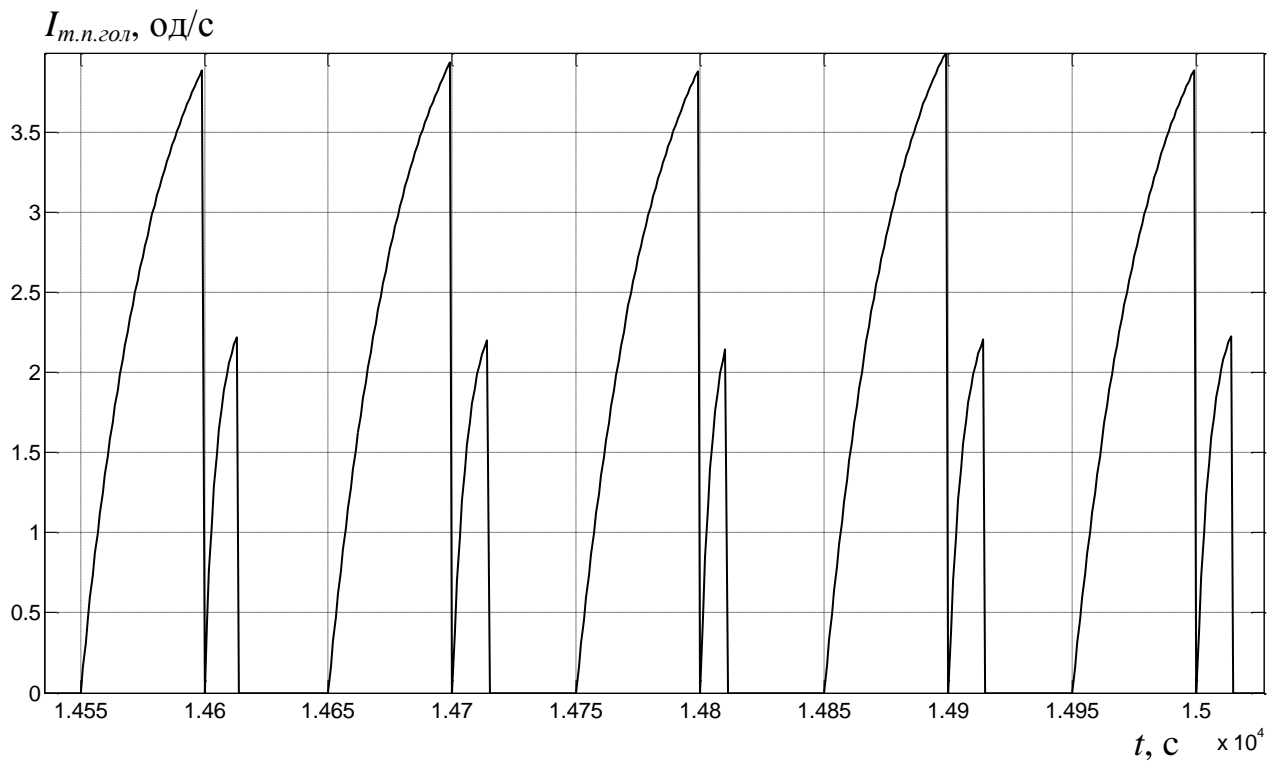
а



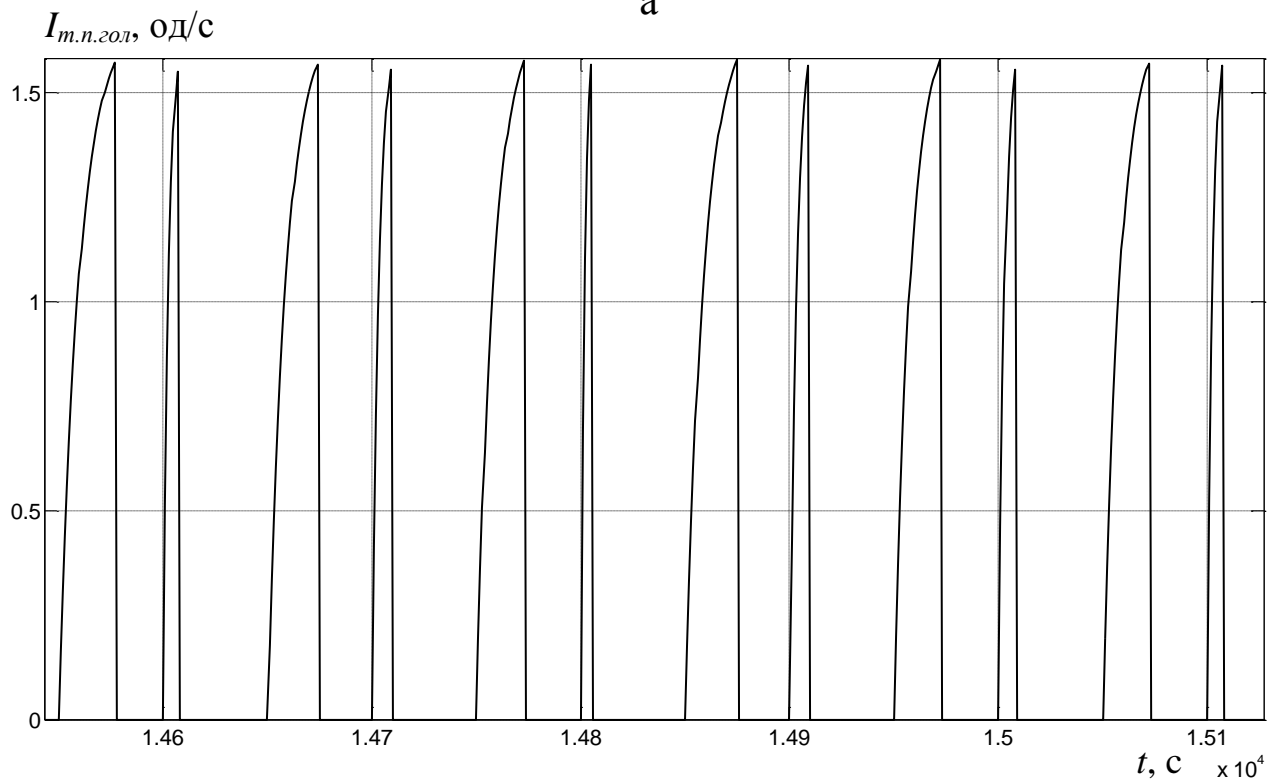
б

Рис.2.7. Зміна у часі середньої інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 метрів: а – від першого перехрестя за прямим маршрутом; б – від другого перехрестя за об'їзним маршрутом

Здійснимо аналіз пропускну́ї здатності перехресть у головних напрямках за умови встановлення тривалостей основних тактів світлофорних циклів для даних напрямів 50 с.



а



б

Рис.2.8. Зміна у часі інтенсивності переривистого транспортного потоку в зоні:  
 а – першого перехрестя у головному напрямі; б – другого перехрестя у  
 головному напрямі

З рис.2.8,а видно, що за прямим маршрутом на основному такті, коли у головному напрямі горить зелене світло, інтенсивність транспортного потоку продовжує збільшуватись протягом всього такту, доки він не закінчується. Це означає, що автомобілі у цьому напрямі не всі встигли перетнути перехрестя, і залишились на наступний цикл. На відміну від головного напрямку, у конфліктному напрямі інтенсивність становиться рівною нулю задовго до закінчення основного такту, коли для конфліктного напрямку горить зелене світло. Звідси можна зробити висновок про неефективне відношення тривалостей основних тактів світлофорного циклу для першого перехрестя. Тобто, потрібне обґрунтування ефективного відношення тривалостей світлофорного циклу першого перехрестя з позиції максимального використання його пропускної здатності.

На відміну від першого перехрестя, на другому інтенсивність починає дорівнювати нулю до закінчення основних тактів в обох напрямках (рис.2.8,б). Отже, робимо висновок про наявність запасу за пропускною здатністю другого перехрестя для обох напрямів.

## **2.2. Визначення критерію ефективності для досліджуваної транспортної системи**

Чисельний критерій ефективності роботи транспортної системи визначається на основі мети дослідження, що сформульована у підрозділі 1.1, – забезпечення вільних транспортних потоків на відстані 1500 м від перехресть за прямим та об'їзним маршрутами. Таким чином, критерій ефективності для досліджуваної транспортної системи повинен відображати характер транспортного потоку. Для визначення критерію скористаємося одною з основних закономірностей теорії транспортних потоків, за якою можна відстежити характер транспортного потоку. Ця закономірність описує

залежність між середньою інтенсивністю та середньою просторовою швидкістю транспортного потоку (рис.2.9).

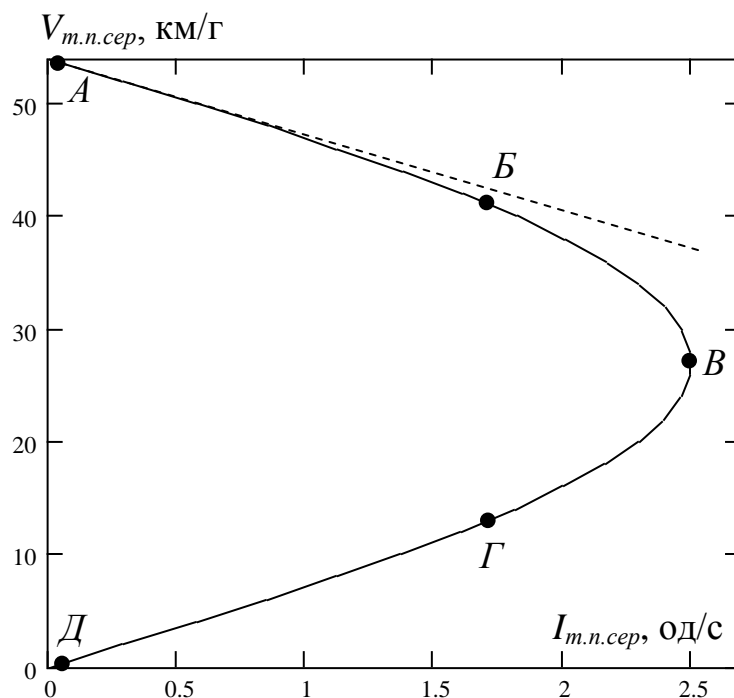


Рис.2.9. Графік залежності між середньою інтенсивністю та середньою просторовою швидкістю транспортного потоку

Між точками *A* та *B* на рис.2.9 спостерігається вільний транспортний потік. Між точками *B* та *Г* маємо груповий та нестійкий рух автомобілів, коли пропускна здатність ділянки дороги, що розглядається, близька до максимального значення (точка *B* на рис.2.9), але при цьому присутня висока ймовірність переходу до насиченого потоку (ділянка графіка між точками *Г* та *Д*). Отже, критерій ефективності роботи транспортної системи повинен давати відповідь на питання, де знаходиться точка, що визначає поточний характер транспортного потоку, – на ділянці *A-B* чи на ділянці *B-Г* (рис.2.9).

Границя між вільним та груповим рухами автомобілів (точка *B* на рис.2.9) характеризується порушенням лінійної залежності між середньою інтенсивністю та середньою просторовою швидкістю транспортного потоку. Таким чином, якщо початкову частину ділянки *A-B* апроксимувати прямою



лінією (пунктирна лінія на рис.2.9) та потім проаналізувати відхилення координат прямої лінії від координат графіку залежності між інтенсивністю та швидкістю транспортного потоку, то можна приблизно визначити границю між вільним та груповим рухами автомобілів.

Введемо граничне відносне відхилення координат прямої лінії від координат графіку залежності між інтенсивністю та швидкістю транспортного потоку, за умови перевищення якого робимо висновок про порушення лінійної залежності між інтенсивністю і швидкістю та зміну характеру руху автомобілів з вільного на груповий (перехід з ділянки *A-B* на ділянку *B-Г* на рис.2.9). Прийmemo це відхилення рівним 10 %.

Тоді формула критерію ефективності роботи досліджуваної транспортної системи з прив'язкою до інтенсивності транспортного потоку буде такою

$$K = \begin{cases} \frac{|I(V) - F(V)|}{I(V)} \cdot 100 \leq 10, \% & - \text{ вільний рух автомобілів;} \\ \frac{|I(V) - F(V)|}{I(V)} \cdot 100 > 10, \% & - \text{ груповий рух автомобілів,} \end{cases}$$

де  $I(V)$  – функція, що описує залежність середньої інтенсивності транспортного потоку від його середньої просторової швидкості, од/с;  $F(V)$  – рівняння прямої лінії, що апроксимує початкову ділянку графіку залежності між інтенсивністю та швидкістю транспортного потоку, од/с.

Якщо для ділянки дороги, що розглядається, залежність між середньою інтенсивністю та середньою просторовою швидкістю транспортного потоку залишається незмінною, то формулу для критерію ефективності можна спростити

$$K = \begin{cases} I_{\text{ном}} \leq I_{\text{кр}} & - \text{ вільний рух автомобілів;} \\ I_{\text{ном}} > I_{\text{кр}} & - \text{ груповий рух автомобілів,} \end{cases}$$

де  $I_{ном}$  – поточна інтенсивність транспортного потоку на ділянці дороги, що розглядається, од/с;  $I_{кр}$  – критичне значення інтенсивності транспортного потоку для ділянки дороги, що розглядається, за умови перевищення якого порушується лінійна залежність між інтенсивністю та швидкістю транспортного потоку, од/с. Критичне значення інтенсивності  $I_{кр}$  обчислюється лише один раз за повною формулою критерію ефективності та являє собою значення  $I(V)$ , при якому виконується рівність

$$\frac{|I(V) - F(V)|}{I(V)} \cdot 100 = 10, \%$$

Знайдемо критичне значення інтенсивності транспортного потоку на ділянці 1500 м від першого перехрестя за прямим маршрутом, використовуючи експериментальну залежність між середньою інтенсивністю та середньою просторовою швидкістю транспортного потоку для цієї ділянки (табл.2.1). Для цього у математичному пакеті Mathcad напишемо відповідну програму (Program\_Mathcad\_1).

Табл.2.1. Результати експериментальних замірів та обчислень середніх інтенсивності та просторової швидкості транспортного потоку на ділянці 1500 м від першого перехрестя за прямим маршрутом

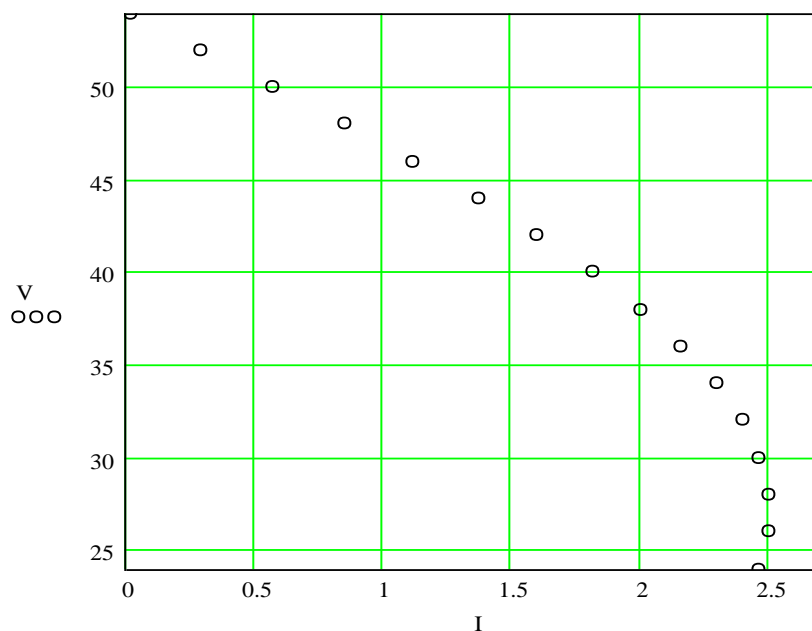
$V_{m.n.сep}$ , км/Г	24	26	28	30	32	34	36	38
$I_{m.n.сep}$ , од/с	2,46	2,5	2,5	2,46	2,4	2,3	2,16	2
$V_{m.n.сep}$ , км/Г	40	42	44	46	48	50	52	54
$I_{m.n.сep}$ , од/с	1,82	1,6	1,37	1,12	0,85	0,57	0,29	0,02

Program\_Mathcad\_1. Програма для визначення критичного значення інтенсивності транспортного потоку на ділянці 1500 м від першого перехрестя за прямим маршрутом

Задамо координати експериментальної залежності між середніми інтенсивністю та просторовою швидкістю транспортного потоку на ділянці 1500 м від першого перехрестя за прямим маршрутом у вигляді двох векторів, відповідно, I та V:

$$I := \begin{pmatrix} 2.46 \\ 2.5 \\ 2.5 \\ 2.46 \\ 2.4 \\ 2.3 \\ 2.16 \\ 2 \\ 1.82 \\ 1.6 \\ 1.37 \\ 1.12 \\ 0.85 \\ 0.57 \\ 0.29 \\ 0.02 \end{pmatrix} \quad V := \begin{pmatrix} 24 \\ 26 \\ 28 \\ 30 \\ 32 \\ 34 \\ 36 \\ 38 \\ 40 \\ 42 \\ 44 \\ 46 \\ 48 \\ 50 \\ 52 \\ 54 \end{pmatrix}$$

Побудуємо графік експериментальної залежності між середніми інтенсивністю та просторовою швидкістю транспортного потоку на ділянці 1500 м від першого перехрестя за прямим маршрутом:



Початкову ділянку графіку, де простежується лінійна залежність між інтенсивністю та просторовою швидкістю транспортного потоку, достатньо задати двома точками, за координатами яких визначимо рівняння лінійної регресії:

$$v := \begin{pmatrix} 50 \\ 46 \end{pmatrix} \quad i := \begin{pmatrix} 0.57 \\ 1.12 \end{pmatrix}$$

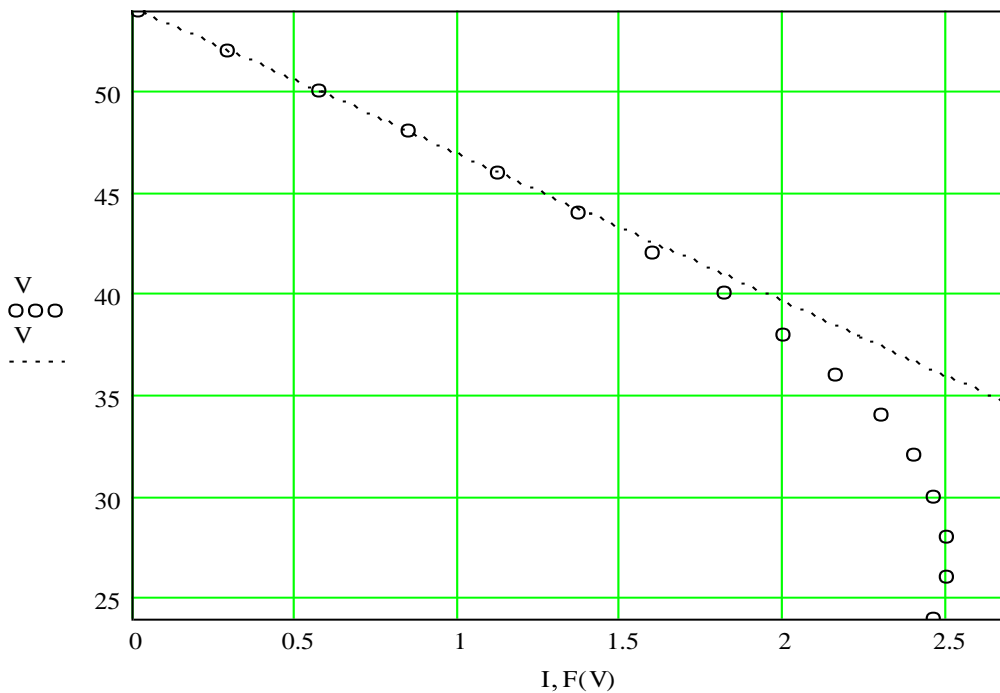
$$a := \text{intercept}(v, i) \quad b := \text{slope}(v, i)$$

$$a = 7.445 \quad b = -0.138$$

Рівняння лінійної регресії:

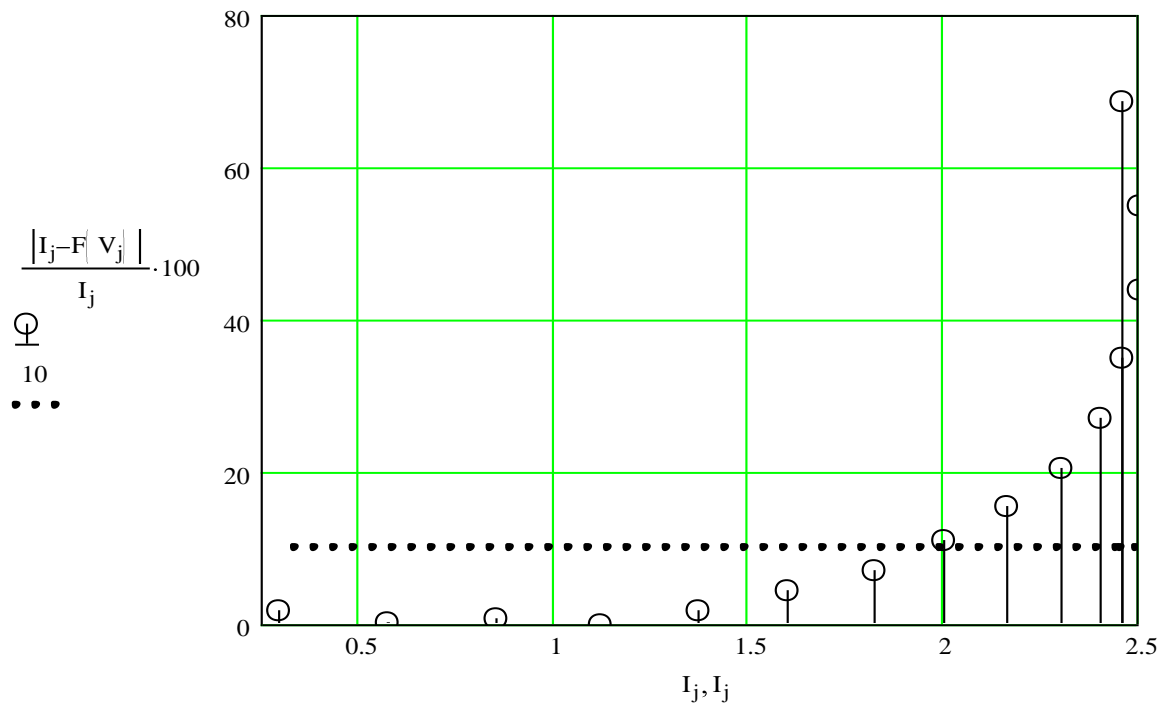
$$F(V) := a + b \cdot V$$

Побудуємо графік експериментальної залежності між середніми інтенсивністю та просторовою швидкістю транспортного потоку разом з графіком рівняння лінійної регресії:



Для кожного значення інтенсивності розрахуємо відносне відхилення точок експериментальної залежності від лінії регресії та побудуємо графік залежності між цим відхиленням та середньою інтенсивністю транспортного потоку:

$$j := 0..14$$



З графіку ми бачимо, що відносне відхилення точок експериментальної залежності від лінії регресії на рівні 10 % приблизно відповідає середній інтенсивності транспортного потоку 2 од/с.

Отже, робимо висновок про те, що критичне значення середньої інтенсивності транспортного потоку на ділянці 1500 м від першого перехрестя за прямим маршрутом дорівнює 2 од/с.

Враховуючи результати виконання програми «Program\_Mathcad\_1», зазначимо, що перший критерій ефективності роботи досліджуваної транспортної системи визначає характер транспортного потоку на ділянці 1500 м від першого перехрестя за прямим маршрутом та виглядає наступним чином

$$K_{np} = \begin{cases} I_{nom} \leq 2, \text{од/с} & - \text{вільний рух автомобілів;} \\ I_{nom} > 2, \text{од/с} & - \text{груповий рух автомобілів.} \end{cases}$$

Знайдемо критичне значення інтенсивності транспортного потоку на ділянці 1500 м від другого перехрестя за об'їзним маршрутом, використовуючи експериментальну залежність між середньою інтенсивністю та середньою просторовою швидкістю транспортного потоку для цієї ділянки (табл.2.2). Для

цього у математичному пакеті Mathcad напишемо відповідну програму (Program\_Mathcad\_2).

Табл.2.2. Результати експериментальних замірів та обчислень середніх інтенсивності та просторової швидкості транспортного потоку на ділянці 1500 м від другого перехрестя за об'їзним маршрутом

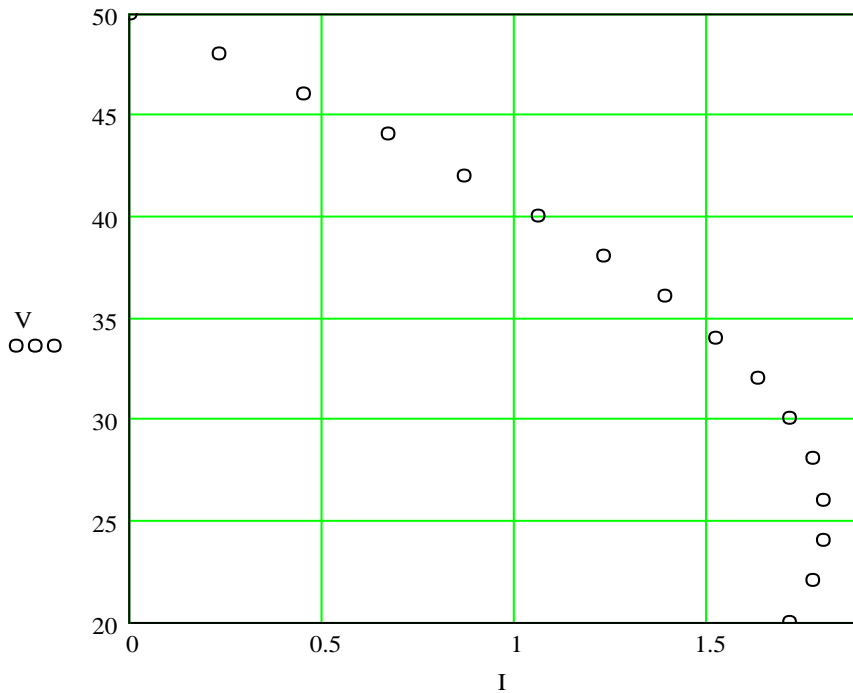
$V_{m.n.сер},$ км/Г	20	22	24	26	28	30	32	34
$I_{m.n.сер},$ од/с	1,71	1,77	1,8	1,8	1,77	1,71	1,63	1,52
$V_{m.n.сер},$ км/Г	36	38	40	42	44	46	48	50
$I_{m.n.сер},$ од/с	1,39	1,23	1,06	0,87	0,67	0,45	0,23	0,01

Program\_Mathcad\_2. Програма для визначення критичного значення інтенсивності транспортного потоку на ділянці 1500 м від другого перехрестя за об'їзним маршрутом

Задамо координати експериментальної залежності між середніми інтенсивністю та просторовою швидкістю транспортного потоку на ділянці 1500 м від другого перехрестя за об'їзним маршрутом у вигляді двох векторів, відповідно, I та V:

$$I := \begin{pmatrix} 1.71 \\ 1.77 \\ 1.8 \\ 1.8 \\ 1.77 \\ 1.71 \\ 1.63 \\ 1.52 \\ 1.39 \\ 1.23 \\ 1.06 \\ 0.87 \\ 0.67 \\ 0.45 \\ 0.23 \\ 0.002 \end{pmatrix} \quad V := \begin{pmatrix} 20 \\ 22 \\ 24 \\ 26 \\ 28 \\ 30 \\ 32 \\ 34 \\ 36 \\ 38 \\ 40 \\ 42 \\ 44 \\ 46 \\ 48 \\ 50 \end{pmatrix}$$

Побудуємо графік експериментальної залежності між середніми інтенсивністю та просторовою швидкістю транспортного потоку на ділянці 1500 м від другого перехрестя за об'їзним маршрутом :



Початкову ділянку графіку, де простежується лінійна залежність між інтенсивністю та просторовою швидкістю транспортного потоку, достатньо задати двома точками, за координатами яких визначимо рівняння лінійної регресії:

$$v := \begin{pmatrix} 46 \\ 42 \end{pmatrix} \quad i := \begin{pmatrix} 0.45 \\ 0.87 \end{pmatrix}$$

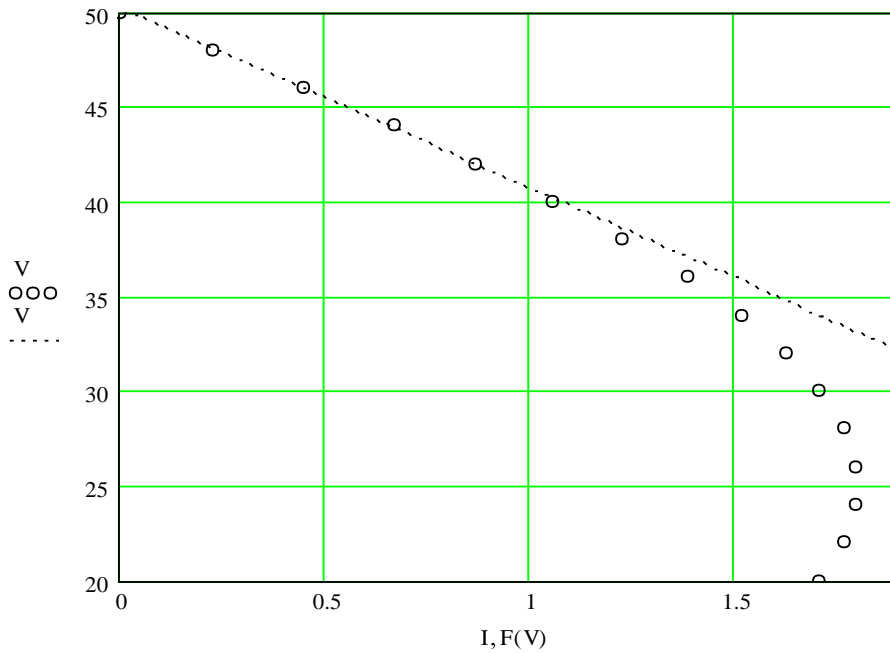
$$a := \text{intercept}(v, i) \quad b := \text{slope}(v, i)$$

$$a = 5.28 \quad b = -0.105$$

Рівняння лінійної регресії:

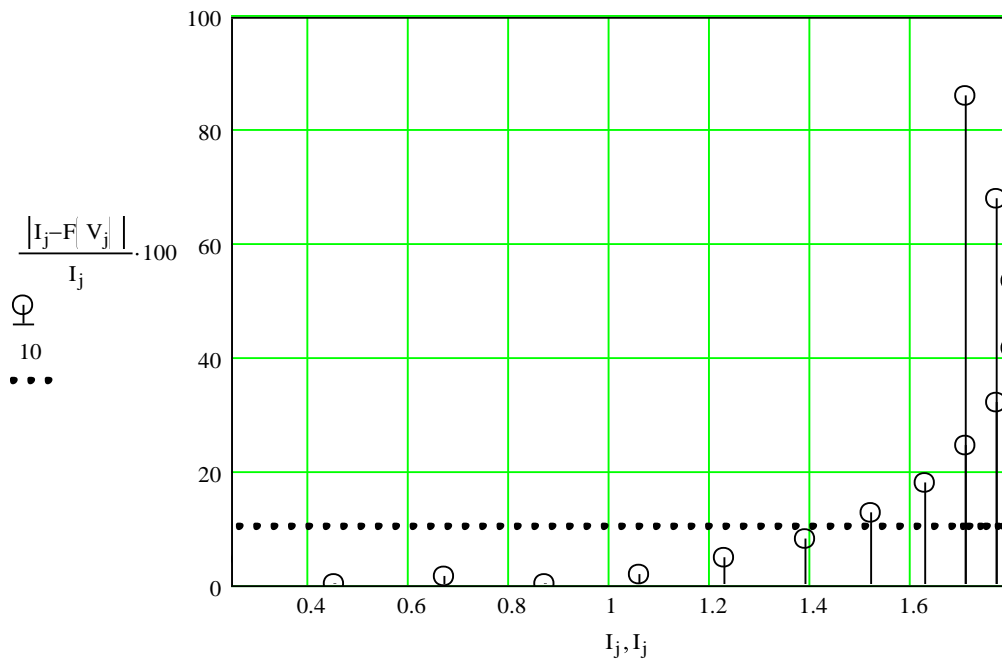
$$F(V) := a + b \cdot V$$

Побудуємо графік експериментальної залежності між середніми інтенсивністю та просторовою швидкістю транспортного потоку разом з графіком рівняння лінійної регресії:



Для кожного значення інтенсивності розрахуємо відносне відхилення точок експериментальної залежності від лінії регресії та побудуємо графік залежності між цим відхиленням та середньою інтенсивністю транспортного потоку:

$$j := 0..14$$



З графіку ми бачимо, що відносне відхилення точок експериментальної залежності від лінії регресії на рівні 10 % приблизно відповідає середній інтенсивності транспортного потоку 1,4 од/с.

Отже, робимо висновок про те, що критичне значення середньої інтенсивності транспортного потоку на ділянці 1500 м від другого перехрестя за об'їзним маршрутом дорівнює 1,4 од/с.



Враховуючи результати виконання програми «Program\_Mathcad\_2», зазначимо, що другим критерій ефективності роботи досліджуваної транспортної системи визначає характер транспортного потоку на ділянці 1500 м від другого перехрестя за об'їзним маршрутом та виглядає наступним чином

$$K_{об} = \begin{cases} I_{ном} \leq 1,4, од/с & - \text{ вільний рух автомобілів;} \\ I_{ном} > 1,4, од/с & - \text{ груповий рух автомобілів.} \end{cases}$$

### **2.3. Розробка алгоритму формування керуючих впливів та проведення обчислювального експерименту роботи транспортної системи за визначеним критерієм ефективності**

В досліджуваній автоматизованій системі керування дорожнім рухом передбачена можливість регулювання розподілом автомобілів перед першим перехрестям (рис.1.1) за прямим та об'їзним маршрутами, яке може здійснюватись за допомогою електронних табло або телематичних систем на автомобілях. У зв'язку з цим приймемо за керуючий вплив на досліджувану транспортну систему відношення кількості автомобілів у головному напрямі, що їдуть за прямим маршрутом, до загальної кількості автомобілів у головному напрямі перед першим перехрестям та позначимо цей вплив як  $R$ . В моделях другого та третього елементів транспортної системи (рис.2.3 та рис.2.4), що описані у підрозділі 2.1, вже існують однойменні входи та реалізований вплив параметру  $R$  на кількість автомобілів, що їдуть за прямим та об'їзним маршрутами.

Крім того, в досліджуваній автоматизованій системі керування дорожнім рухом передбачена можливість регулювання тривалостями основних тактів світлофорних циклів на першому та другому перехрестях. У зв'язку з цим приймемо за другий  $R1$  та третій  $R2$  керуючі впливи відношення тривалості

такту, коли у конфліктному напрямі горить зелене світло, до періоду світлофорного циклу, відповідно, на першому та другому перехрестях. В моделях першого, другого та третього елементів транспортної системи (рис.2.2, рис.2.3 та рис.2.4), що описані у підрозділі 2.1, вже існують однойменні входи та реалізовані впливи параметрів  $R1$  та  $R2$  на тривалості основних тактів світлофорних циклів на першому та другому перехрестях.

За результатами досліджень транспортних потоків в некерованій транспортній системі у підрозділі 2.1 зроблений висновок про неефективне відношення тривалостей основних тактів світлофорного циклу для першого перехрестя. За цією причиною на основі розробленої моделі поведінки транспортної системи проведемо дослідження залежності керуючих впливів  $R1$  та  $R2$ , коли пропускна здатність перехрестя у головному напрямі є максимальною, від керуючого впливу  $R$ .

Критерієм максимальної пропускної здатності перехрестя як у головному, так і у конфліктному напрямках є переривання транспортного потоку у відповідному напрямі перед закінченням “дозволяючого” такту. Отже, для різних значень кількості автомобілів, що направляються за об’їзним маршрутом, потрібно дослідити, при яких значеннях  $R1$  та  $R2$  спостерігається максимальна пропускна здатність перехрестя.

Наприклад, шляхом варіювання значеннями керуючого впливу  $R1$  та аналізу графіку зміни у часі інтенсивності транспортного потоку в зоні першого перехрестя за прямим маршрутом встановлено, що для керуючого впливу  $R=0,9$  максимальна пропускна здатність першого перехрестя у головному напрямі має місце за умови  $R1=0,3$ .

Цей висновок підтверджує рис.2.10, на якому видно, що при  $R=0,9$  та  $R1=0,3$  інтенсивність більш щільного транспортного потоку головного напрямку, що має більшу амплітуду, стає рівною нулю саме перед закінченням відповідного такту (після імпульсів з більшою амплітудою спостерігаються ділянки незначної тривалості, коли  $I_{m.n.np} = 0$ ). Також із рис.2.10 ми бачимо, що для конфліктного напрямку існує суттєвий запас за пропускною здатністю

першого перехрестя за прямим маршрутом (після імпульсів з меншою амплітудою спостерігаються ділянки значно більшої тривалості, коли  $I_{m.n.np} = 0$ ).

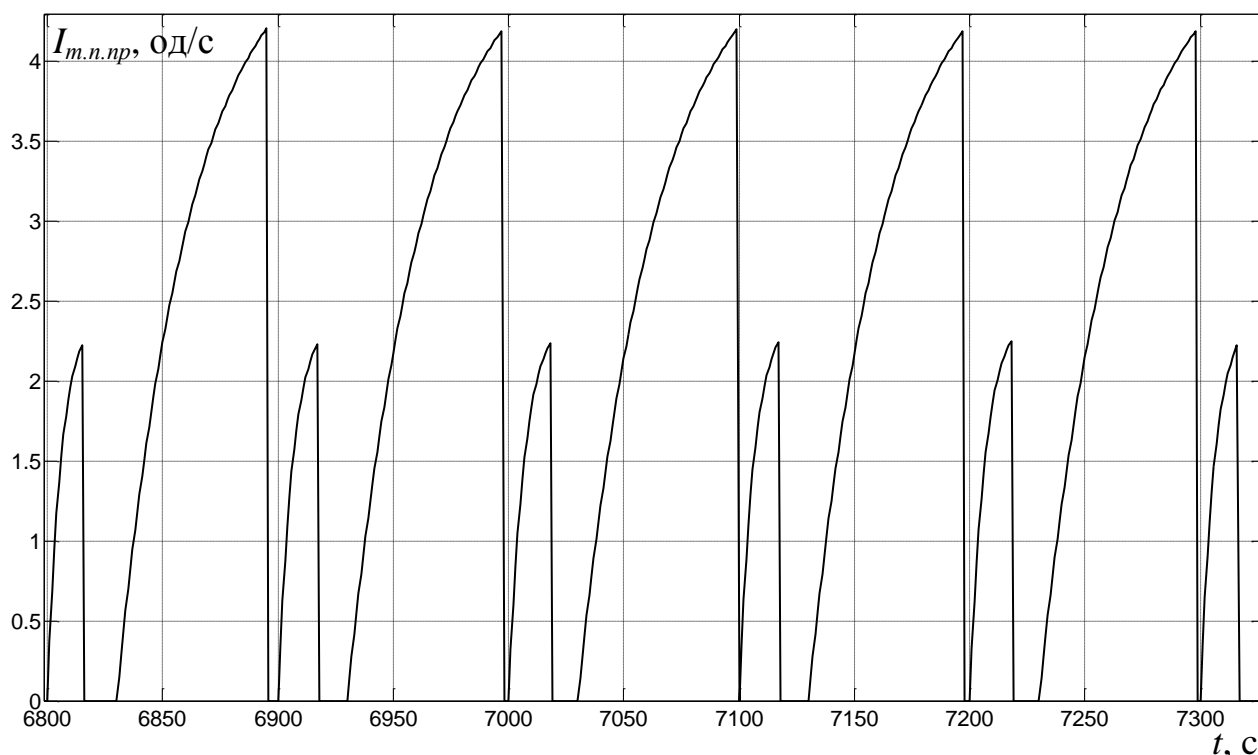


Рис.2.10. Зміна у часі інтенсивності переривистого транспортного потоку в зоні першого перехрестя за прямим маршрутом при  $R=0,9$  та  $R1=0,3$

Аналогічним шляхом для  $R=0,9$  визначене значення керуючого впливу  $R2$ , при якому має місце максимальна пропускна здатність другого перехрестя у головному напрямі ( $R2=0,65$ ).

Цей висновок підтверджує рис.2.11, на якому видно, що при  $R=0,9$  та  $R2=0,65$  інтенсивність транспортного потоку головного напрямку (суцільна лінія) стає рівною нулю саме перед закінченням відповідного такту (після імпульсів, що зображені суцільною лінією, спостерігаються ділянки незначної тривалості, коли  $I_{m.n.ob} = 0$ ). Також із рис.2.11 ми бачимо, що для конфліктного напрямку існує суттєвий запас за пропускною здатністю другого перехрестя за об'їзним маршрутом (після імпульсів, що зображені пунктирною лінією, спостерігаються ділянки значно більшої тривалості, коли  $I_{m.n.ob} = 0$ ).

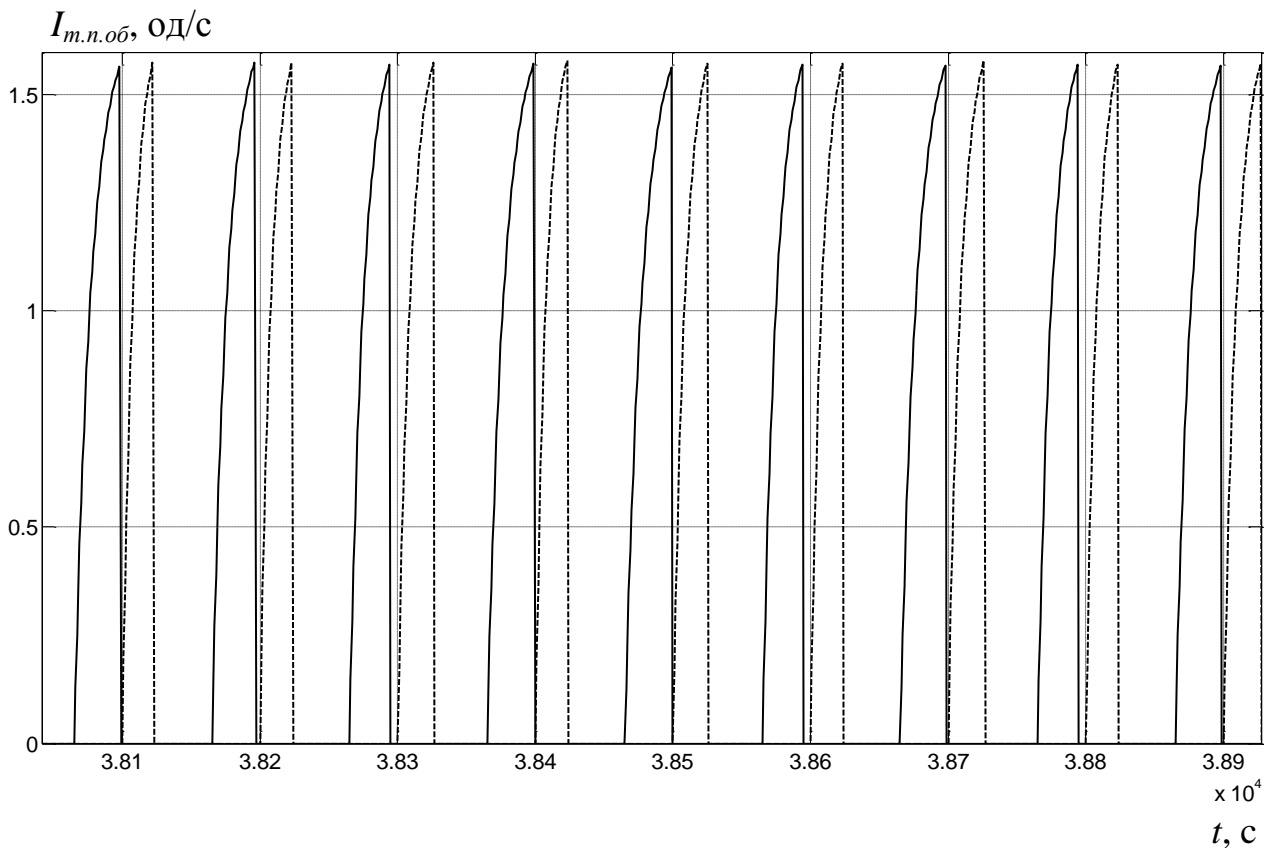


Рис.2.11. Зміна у часі інтенсивності переривистого транспортного потоку в зоні другого перехрестя за об'їзним маршрутом при  $R=0,9$  та  $R2=0,65$

На основі розробленої моделі поведінки транспортної системи проведемо аналогічні дослідження для інших відношень кількості автомобілів, що їдуть за прямим маршрутом, до загальної кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі. У табл.2.3 для різних значень керуючого впливу  $R$  зібрані всі значення керуючих впливів  $R1$  та  $R2$ , при яких спостерігається максимальна пропускна здатність першого та другого перехресть у головному напрямі.

Табл.2.3. Значення керуючих впливів  $R1$  та  $R2$ , при яких спостерігається максимальна пропускна здатність першого та другого перехресть

$R$	0,9	0,87	0,84	0,8	0,77	0,74	0,7	0,67
$R1$	0,3	0,3	0,31	0,33	0,35	0,37	0,4	0,42
$R2$	0,65	0,59	0,53	0,45	0,4	0,35	0,3	0,27

За даними, що наведені у табл.2.3, використовуючи додаток «Basic Fitting», здійснимо апроксимацію залежності керуючого впливу  $RI$  від керуючого впливу  $R$  за допомогою ступеневого поліному.

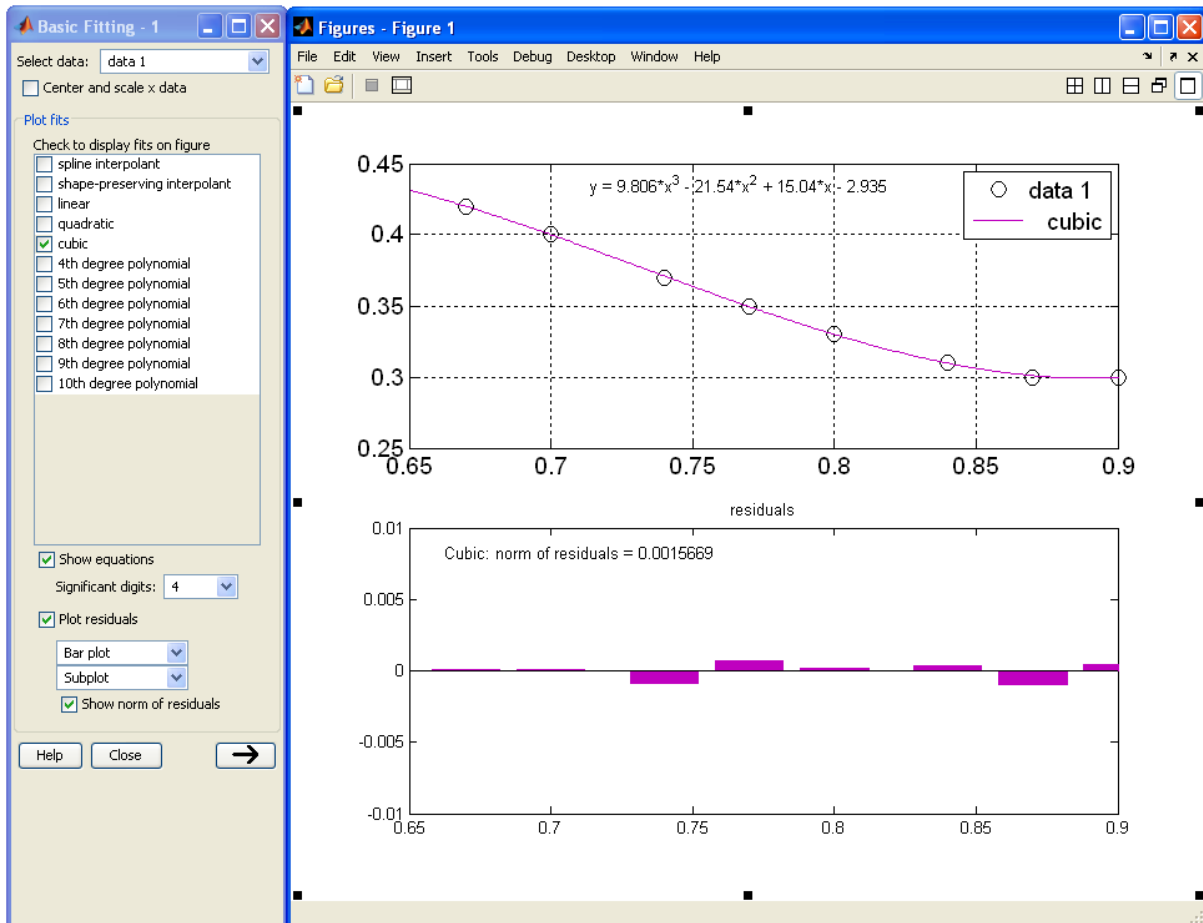


Рис.2.12. Результат апроксимації залежності керуючого впливу  $RI$  від керуючого впливу  $R$  за допомогою додатку «Basic Fitting»

Із рис.2.12 ми бачимо, що залежність керуючого впливу  $RI$  від керуючого впливу  $R$  описується ступеневим поліномом третього порядку. При цьому корінь квадратний суми квадратичних відхилень точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої становить 0,0016.

Також за даними, що наведені у табл.2.3, здійснимо апроксимацію залежності керуючого впливу  $R_2$  від керуючого впливу  $R$  за допомогою ступеневого поліному.

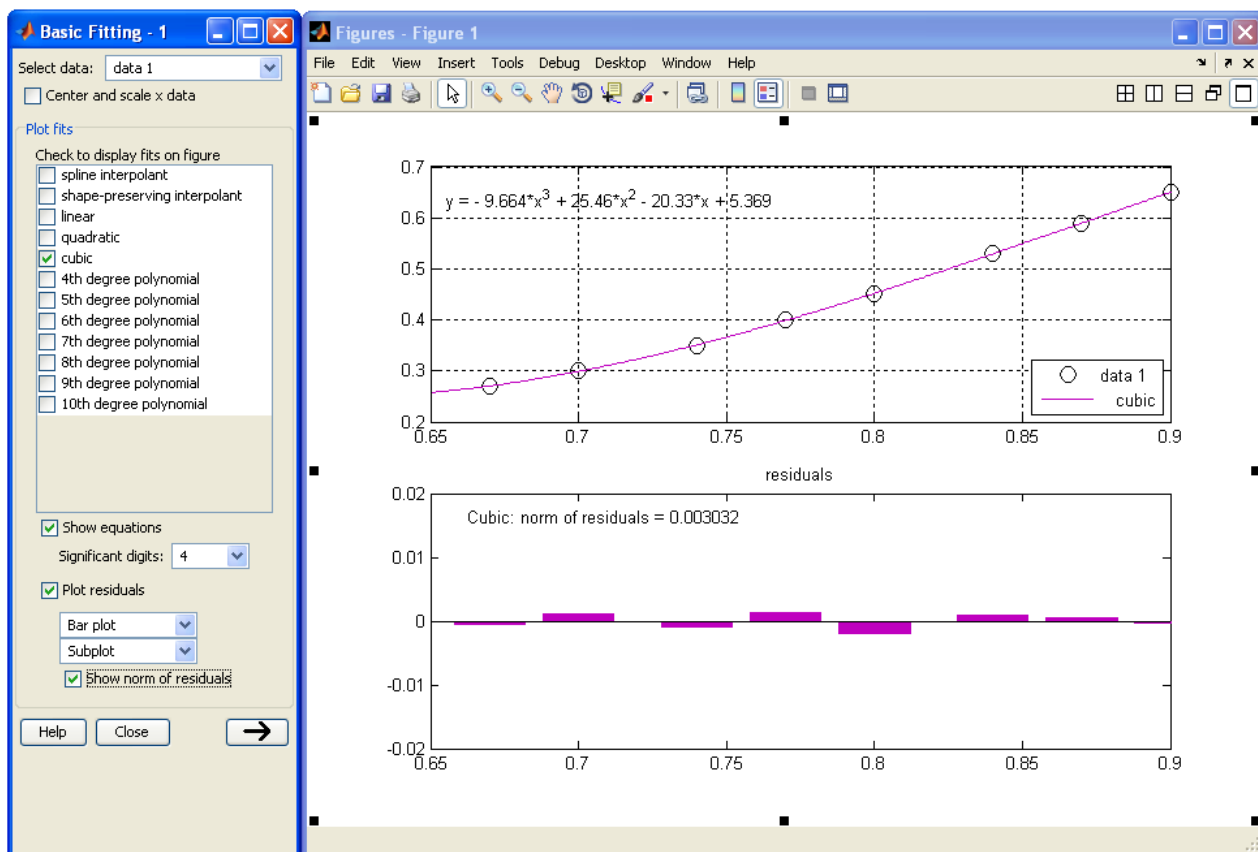
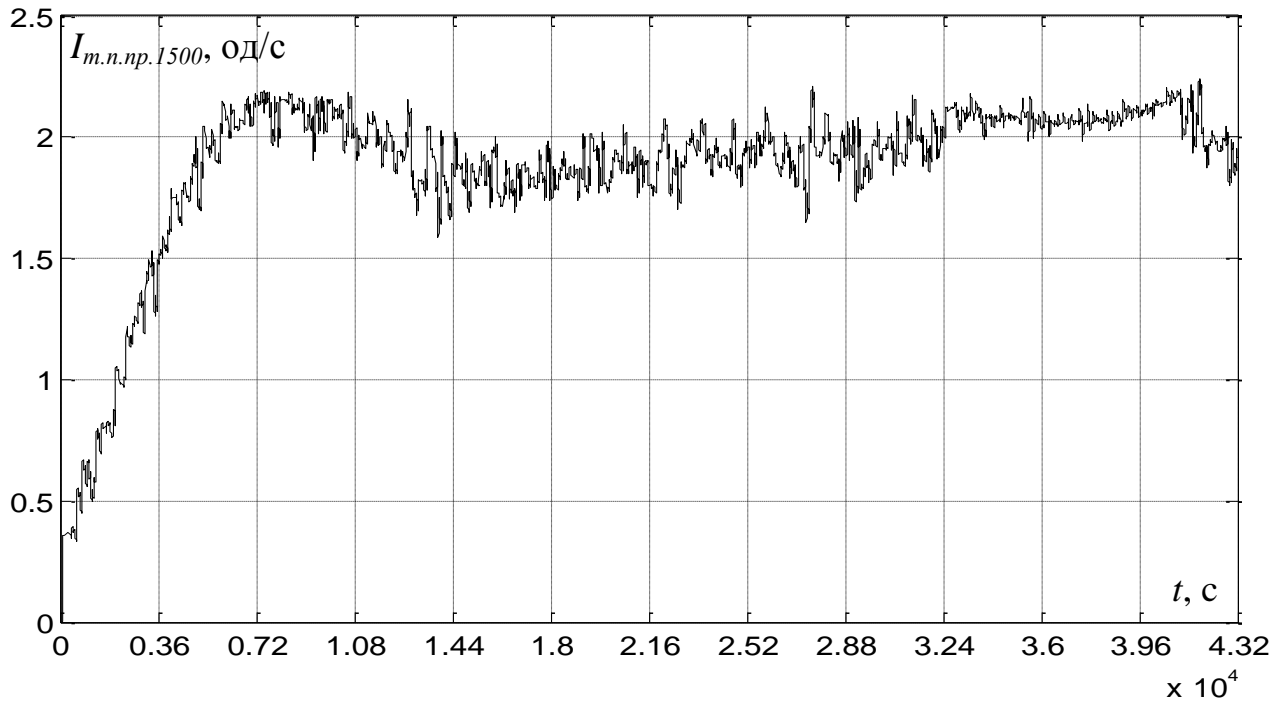


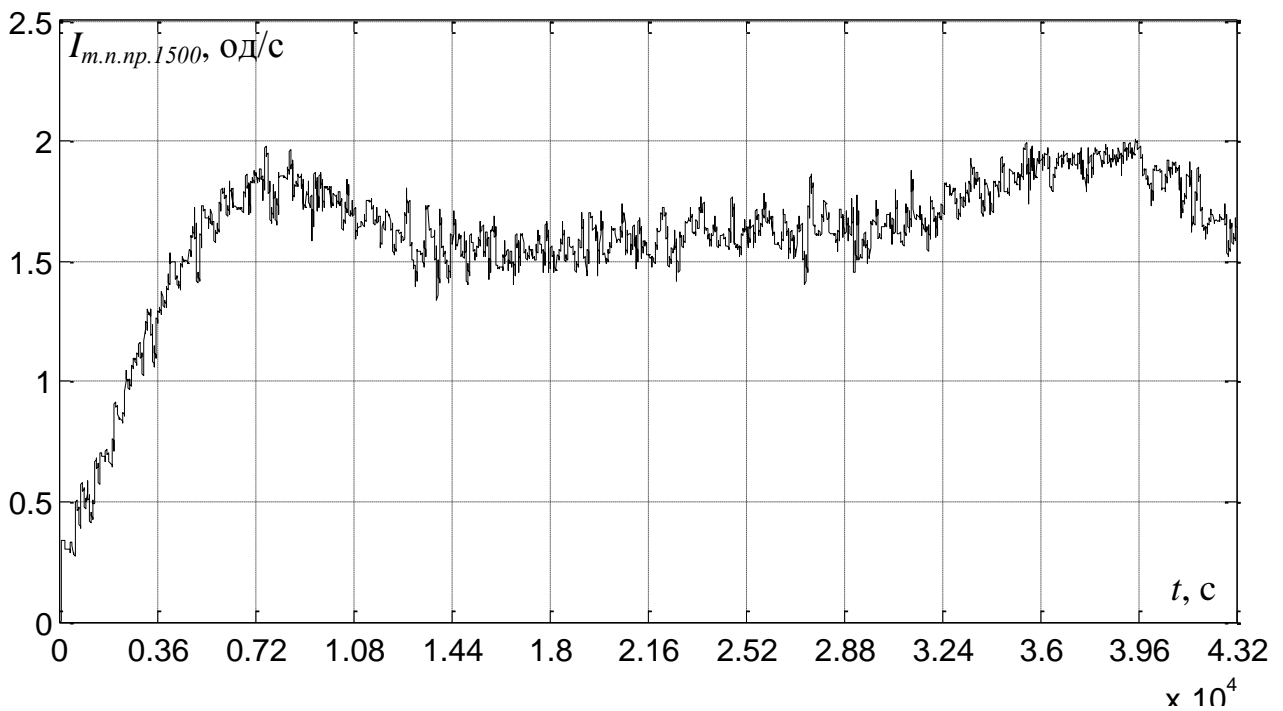
Рис.2.13. Результат апроксимації залежності керуючого впливу  $R_2$  від керуючого впливу  $R$  за допомогою додатку «Basic Fitting»

Із рис.2.13 ми бачимо, що залежність керуючого впливу  $R_2$  від керуючого впливу  $R$  також описується ступеневим поліномом третього порядку. При цьому корінь квадратний суми квадратичних відхилень точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої становить 0,003.

Проаналізуємо зміну у часі середніх інтенсивностей транспортних потоків на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом та від другого перехрестя за об'їзним маршрутом для різних значень керуючого впливу  $R$ . При цьому керуючі впливи  $R_1$  та  $R_2$  обчислюються у функції керуючого впливу  $R$  за ступеневими поліномами, які визначені раніше.



а



б

Рис.2.14. Зміна у часі середньої інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом для: а –  $R = 0,9$ ; б –  $R = 0,74$

Із рис.2.14,а ми бачимо, що за умови звичайного режиму руху без регулювання розподілом автомобілів за прямим та об'їзним маршрутами, коли  $R = 0,9$ , середня інтенсивність транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом стає більше свого критичного значення 2 од/с між 8<sup>30</sup> й 10<sup>30</sup> годинами ранку та між 16<sup>00</sup> й 18<sup>30</sup> годинами вечора. У свою чергу, рис.2.14,б демонструє, що зменшення керуючого впливу  $R$  з 0,9 до 0,74 запобігає перевищенню інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом свого критичного значення протягом всього часу. Звідси можна зробити висновок про те, що значення керуючого впливу  $R$  не буде опускатися нижче рівня 0,74.

Проаналізуємо зміну у часі середньої інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об'їзним маршрутом для значення керуючого впливу  $R=0,74$ .

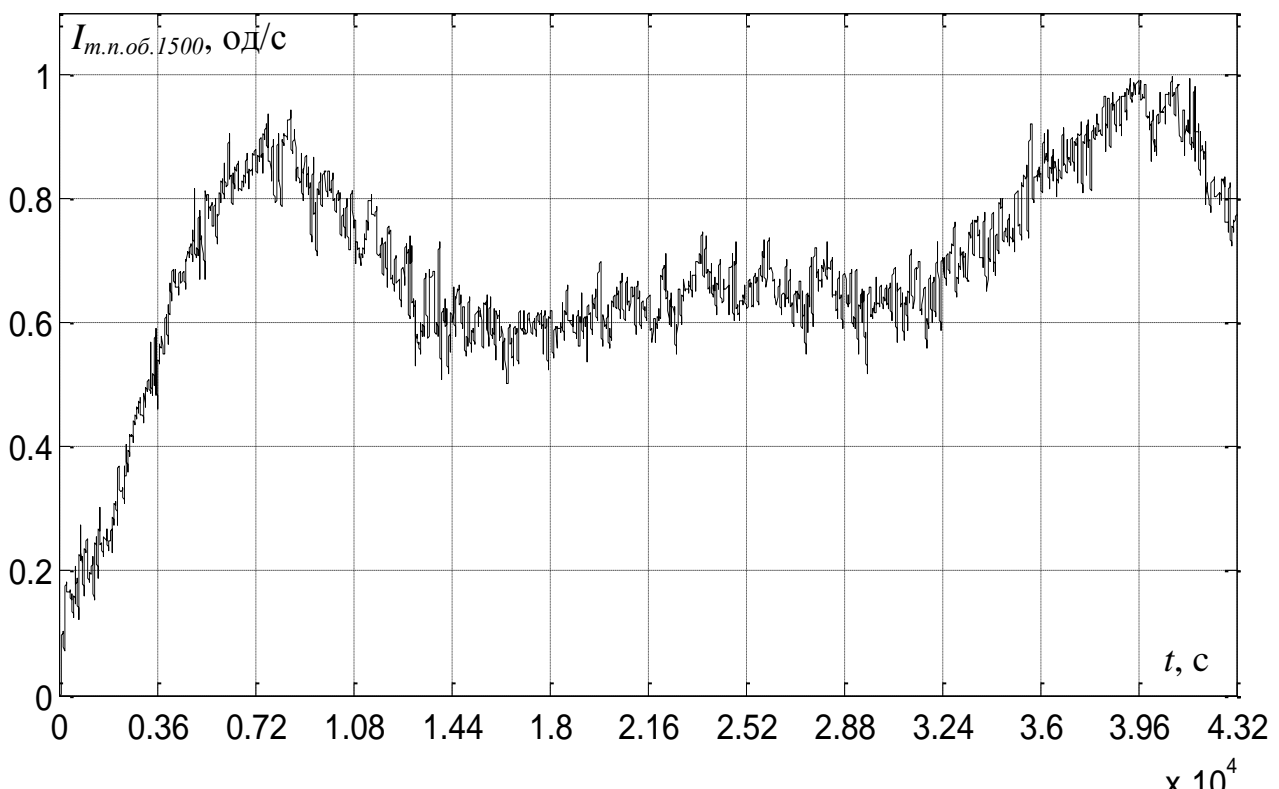


Рис.2.15. Зміна у часі середньої інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об'їзним маршрутом для  $R = 0,74$



Із рис.2.15 можна зробити висновок, що за умови керуючого впливу  $R=0,74$  протягом всього часу моделювання середня інтенсивність транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об'їзним маршрутом не перевищує своє критичне значення 1,4 од/с. Крім того, за відхиленням поточної середньої інтенсивності від свого критичного значення присутній значний запас, що становить 0,4 од/с. Отже, в алгоритмі формування керуючих впливів на транспортну систему нема необхідності перевіряти умову перевищення поточною середньою інтенсивністю транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об'їзним маршрутом свого критичного значення.

На основі результатів дослідження зміни у часі середніх інтенсивностей транспортних потоків на відстані 1500 метрів від першого та другого перехресть та з урахуванням запропонованих критеріїв ефективності роботи системи розробимо схему алгоритму формування керуючих впливів на транспортну систему (рис.2.16).

Опишемо схему алгоритму формування керуючих впливів на досліджувану транспортну систему, що зображена на рис.2.16.

У випадку самого першого використання моделі прийняття рішень алгоритм формування керуючих впливів на транспортну систему починається з блоку 1. При цьому у блоці 2 задається початкове значення керуючого впливу  $R$ , що відповідає звичайному режиму руху без регулювання розподілом автомобілів за прямим та об'їзним маршрутами ( $R = 0,9$ ). Для початкового значення керуючого впливу  $R$  у блоці 3 за визначеними раніше ступеневими поліномами обчислюються керуючі впливи  $R1$  та  $R2$ .

Далі у блоці 4 перевіряється умова перевищення поточною середньою інтенсивністю транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом  $I_{ном.пр.}$  свого критичного значення 2 од/с. Якщо умова в блоці 4 не виконується, у блоці 5 перевіряється зворотна їй умова. Якщо умова в блоці 5 також не виконується, це означає, що поточна середня інтенсивність транспортного потоку  $I_{ном.пр.}$  дорівнює своєму

критичному значенню. При цьому відбувається перехід до блоку 4 і керуючі впливи на систему залишаються незмінними.

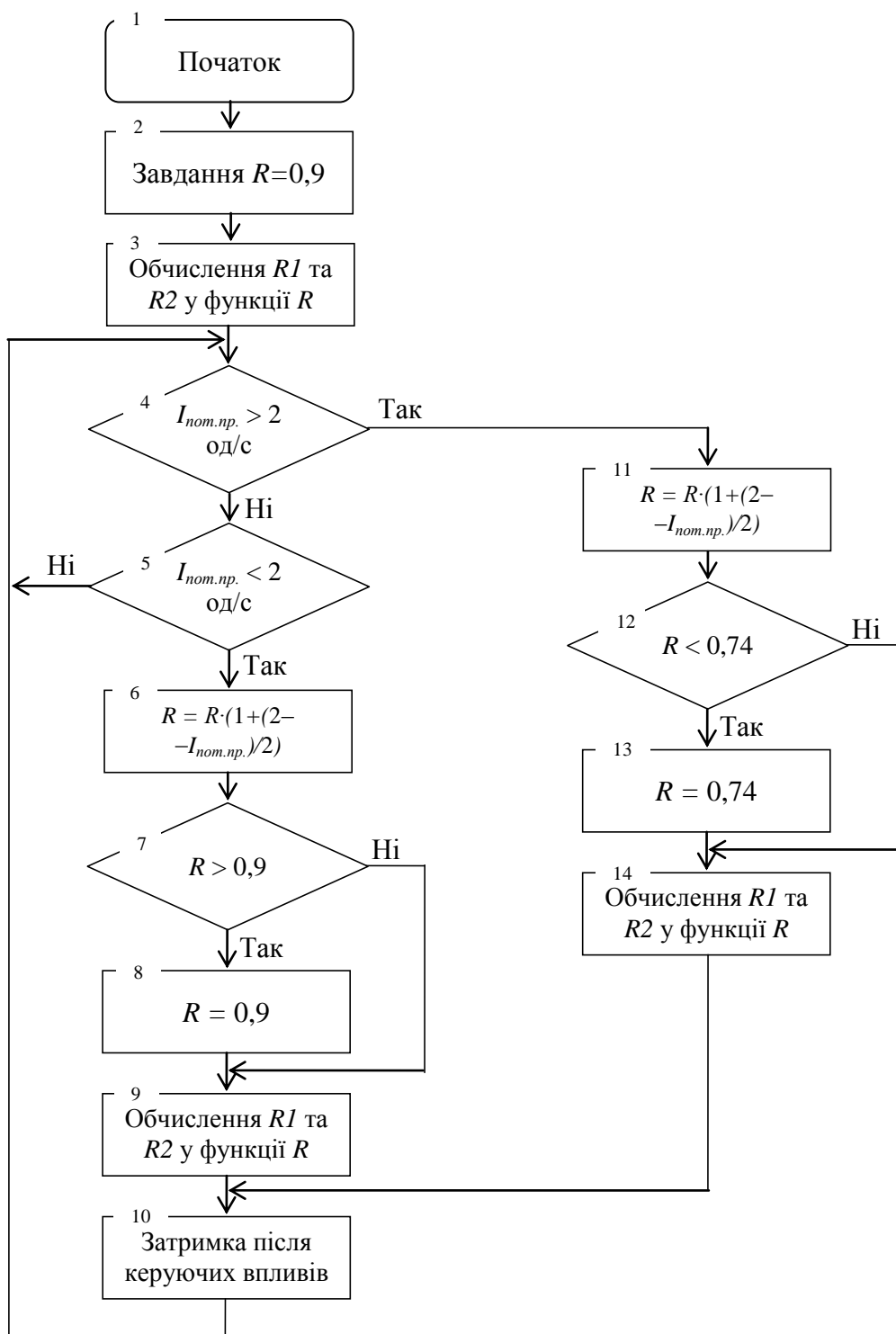


Рис.2.16. Блок-схема алгоритму формування керуючих впливів на досліджувану транспортну систему

Якщо умова в блоці 5 виконується, це говорить про наявність запасу за пропускною здатністю прямого маршруту і можливість направляти за цим маршрутом більшу кількість автомобілів. З цією метою у блоці 6 обчислюється нове значення керуючого впливу  $R$ , яке, згідно формулі розрахунку у блоці 6, збільшується пропорційно відносному відхиленню поточного значення інтенсивності транспортного потоку  $I_{ном.пр}$  від критичного. Таким чином, зміна керуючого впливу  $R$  буде відбуватися на тим більшу величину, чим більше відхилення поточного значення інтенсивності транспортного потоку  $I_{ном.пр}$  від критичного.

Далі у блоці 7 перевіряється умова перевищення керуючим впливом  $R$  своєї верхньої межі 0,9. Якщо умова виконується, у блоці 8 задається значення керуючого впливу  $R = 0,9$ , а якщо умова не виконується – він залишається незмінним.

Після зміни керуючого впливу  $R$  у блоці 9 перераховуються керуючі впливи  $R1$  та  $R2$ .

Регулювання розподілом кількості автомобілів, що їдуть за прямим або об'їзним маршрутами, відбувається в зоні першого перехрестя, тоді як оцінювання ефективності роботи транспортної системи здійснюється за інтенсивністю транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя. Тобто, після корегування керуючих впливів на транспортну систему наслідки цього корегування можна оцінити лише через деякий час, коли автомобілі в зоні першого перехрестя досягнуть відмітки 1500 метрів від перехрестя. Тому після кожної процедури корегування значень керуючих впливів на транспортну систему потрібно робити часову затримку, протягом якої керуючі впливи залишаються незмінними, а аналіз ефективності роботи системи не відбувається. З урахуванням середньої просторової швидкості транспортного потоку 71 км/год на ділянці 0 – 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом, часова затримка дорівнюватиме

$$\frac{1500 \cdot 3600}{71 \cdot 1000} = 76, \text{ с.}$$

Прийmemo часову затримку після корегування керуючих впливів на транспортну систему рівною 100 с (бажано брати кратною періоду світлофорних циклів на перехрестях). Дана часова затримка реалізується у блоці 10 (рис.2.16). Після часової затримки відбувається перехід до блоку 4 та знову проводиться оцінка ефективності роботи транспортної системи для нових керуючих впливів.

Якщо умова в блоці 4 виконується, це, згідно з прийнятим критерієм ефективності, говорить про зміну характеру руху автомобілів на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом з вільного на груповий. Це означає, що для запобігання насиченого транспортного потоку на цій ділянці потрібно частину автомобілів перед першим перехрестям спрямувати за об'їзним маршрутом. З цією метою у блоці 11 обчислюється нове значення керуючого впливу  $R$ , яке, згідно формулі розрахунку у блоці 11, зменшується пропорційно відносному відхиленню поточного значення інтенсивності транспортного потоку  $I_{\text{пот.пр}}$  від критичного.

Далі у блоці 12 перевіряється умова зменшення керуючого впливу  $R$  нижче значення 0,74, яке, за підсумками проведених раніше досліджень, є нижньою межею регулювання. Якщо умова виконується, у блоці 13 задається значення керуючого впливу  $R = 0,74$ , а якщо умова не виконується – він залишається незмінним.

Після зміни керуючого впливу  $R$  у блоці 14 перераховуються керуючі впливи  $R1$  та  $R2$ . Далі відбувається перехід до блоку 10 для реалізації часової затримки після корегування керуючих впливів на транспортну систему.

Нижче на рис.2.17 наведена схема моделі прийняття рішень досліджуваної транспортної системи, що реалізована в додатку Simulink на основі блок-схеми алгоритму формування керуючих впливів на систему (рис.2.16).

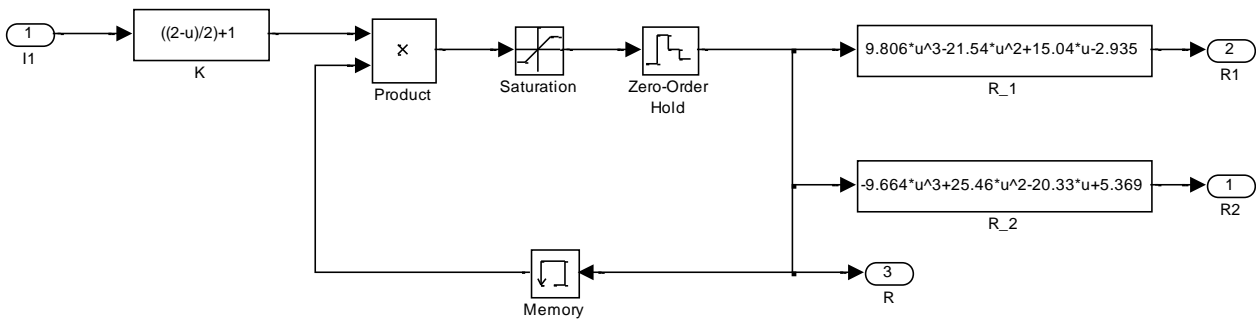


Рис.2.17. Схема моделі прийняття рішень досліджуваної транспортної системи, що реалізована у додатку Simulink

У моделі прийняття рішень на рис.2.17 обчислення нового значення керуючого впливу  $R$  (блоки 6 та 11 на рис.2.16) відбувається за допомогою блоків “К” та “Product”. Блок “Saturation” на рис.2.17 виконує функцію обмеження значення керуючого впливу  $R$  за мінімальним 0,74 та максимальним 0,9 рівнями (блоки 7, 8, 12 та 13 на рис.2.16). Затримка у часі 100 с, протягом якої керуючі впливи на транспортну систему залишаються незмінними (блок 10 на рис.2.16), реалізується на основі блоку “Zero-Order Hold”. Обчислення керуючих впливів  $R1$  та  $R2$  у функції керуючого впливу  $R$  за визначеними раніше ступеневими поліномами (блоки 3, 9 та 14 на рис.2.16) відбувається у блоках “R\_1” та “R\_2” (використовується блок “Fcn”). Для збереження значення керуючого впливу  $R$ , що мало місце на попередньому кроці моделювання (перший множник у формулі розрахунку нового значення  $R$ ), у зворотній зв’язок вставимо блок “Memory” (підрозділ “Discrete” розділу “Simulink”).

Схему моделі на рис.2.17 помістимо у підсистему з назвою “Decision Model”, яка буде виконувати функцію моделі прийняття рішень. Вхідним сигналом даної підсистеми є середня інтенсивність транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом  $I1$ , вихідними сигналами – керуючі впливи на досліджувану транспортну

систему  $R$ ,  $R1$  та  $R2$ . На рис.2.18 показано, як модель прийняття рішень підключається до моделі поведінки транспортної системи.

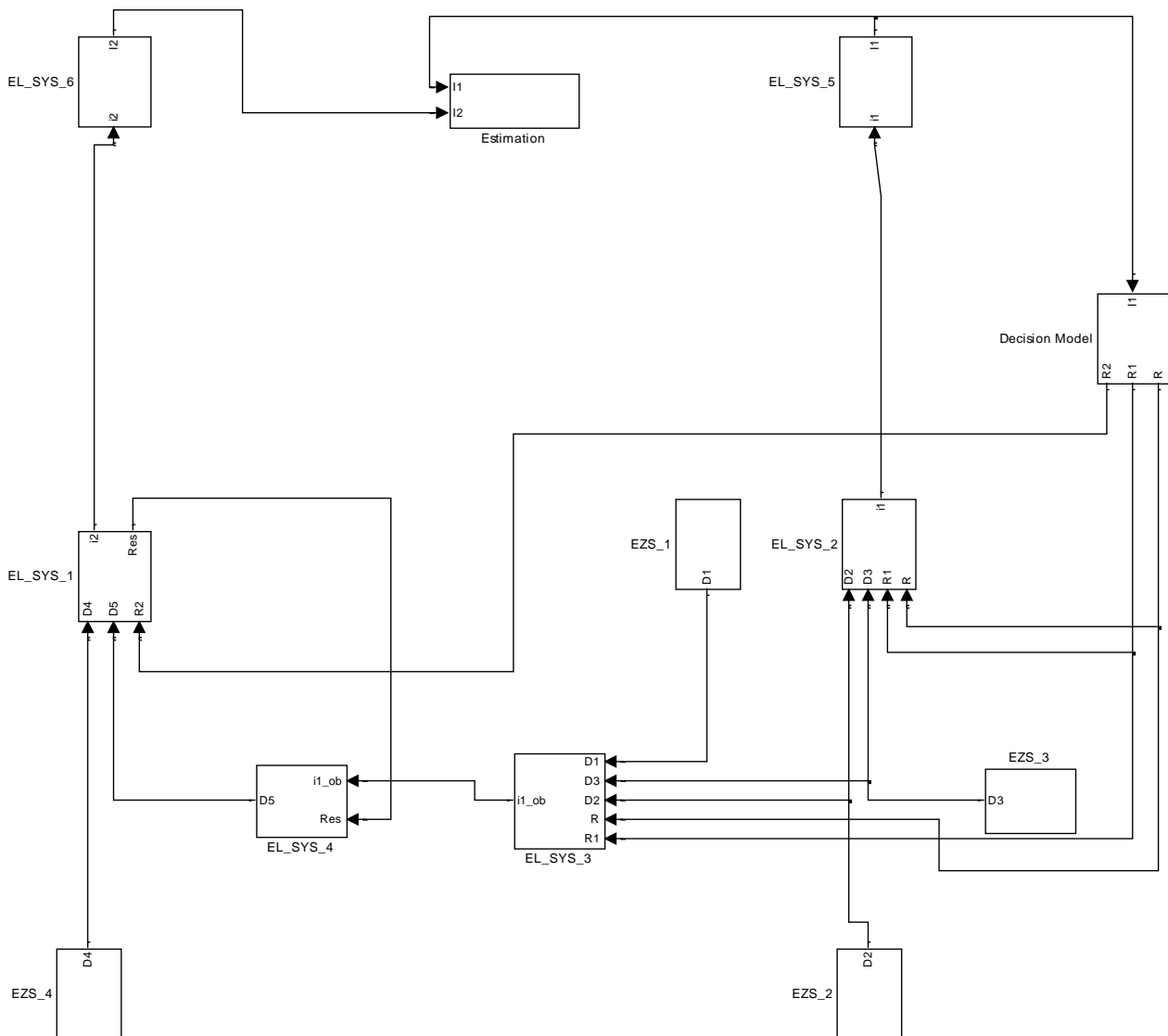


Рис.2.18. Схема моделі досліджуваної транспортної системи, що реалізована у додатку Simulink

Крім підсистеми “Decision Model” на рис.2.18 присутня підсистема “Estimation”, за допомогою якої проводиться аналіз ефективності роботи транспортної системи за критерієм, адаптованим для порівняльного аналізу різних стратегій керування системою. Цей критерій являє собою відносне

відхилення поточного значення інтенсивності транспортного потоку  $I_{nom.np}$  від критичного у сторону збільшення

$$K = \begin{cases} \frac{I_{nom} - I_{кр}}{I_{кр}} \cdot 100, & \text{якщо } I_{nom} > I_{кр}, \% \\ 0, & \text{якщо } I_{nom} \leq I_{кр}, \% \end{cases}$$

Схема моделі, що знаходиться усередині підсистеми “Estimation”, показана на рис.2.19.

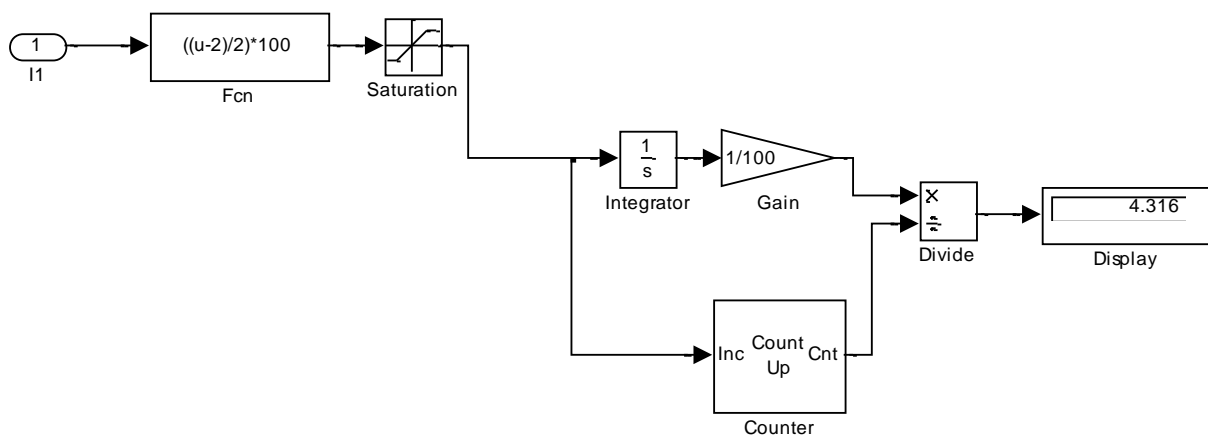


Рис.2.19. Схема моделі у додатку Simulink для обчислення критерію ефективності роботи досліджуваної транспортної системи

У моделі на рис.2.19 за допомогою блока “Fcn” обчислюється відносне відхилення поточного значення інтенсивності транспортного потоку  $I_{nom.np}$  від критичного. Блок “Saturation” на рис.2.19 виконує функцію обмеження значення критерію ефективності за мінімальним нульовим рівнем. За допомогою блоків “Integrator”, “Gain”, “Counter” та “Divide” здійснюється усереднення відхилення поточного значення інтенсивності транспортного потоку  $I_{nom.np}$  від критичного тільки за тими значеннями, які відрізняються від нуля. Для відображення усередненого за весь час моделювання відхилення

поточного значення інтенсивності транспортного потоку від критичного використовується блок “Display” (підрозділ “Sinks” розділу “Simulink”).

Блок “Counter” знаходиться у пункті “Switches and Counters” підрозділу “Signal Management” розділу “Signal Processing Blockset” бібліотеки блоків додатку Simulink. Для того, щоб рахувати кількість світлофорних циклів, на яких поточна інтенсивність транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом перевищує своє критичне значення, настроїмо блок “Counter” так, як показано на рис.2.20.

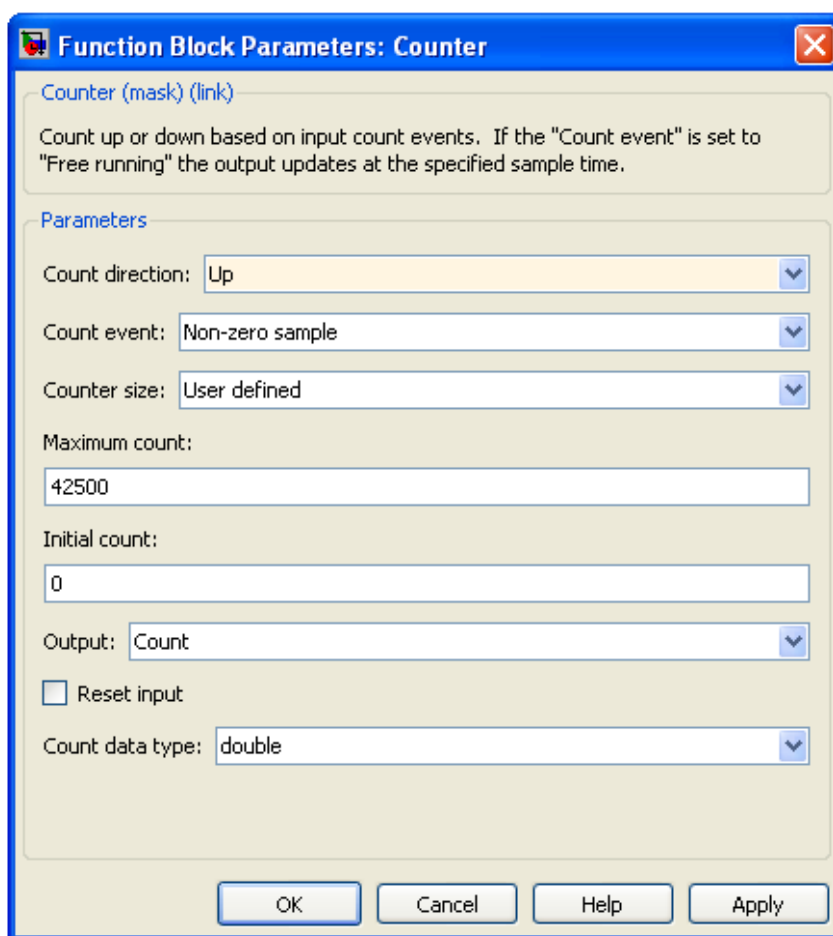


Рис.2.20. Графічне вікно настройок блоку “Counter” додатку Simulink

Проведемо дослідження поведінки керованої транспортної системи для випадку застосування запропонованої вище моделі прийняття рішень (рис.2.17).



Із рис.2.21 ми бачимо, що у часи пік у керованій транспортній системі спостерігається зменшення інтенсивності транспортного потоку  $I_{m.n.np.1500}$  відносно інтенсивності у некерованій системі, але при цьому інтенсивність  $I_{m.n.np.1500}$  продовжує періодично перевищувати своє критичне значення 2 од/с із відносним відхиленням, що сягає 9 % (рис.2.22). За допомогою підсистеми “Estimation” визначене середнє значення критерію ефективності  $K$  за час моделювання, яке для некерованої системи склало 4,32%, а для керованої – 3,06%. Тобто, після введення моделі прийняття рішень середнє значення критерію ефективності  $K$  зменшилося у 1,41 рази, що означає підвищення ефективності роботи транспортної системи.

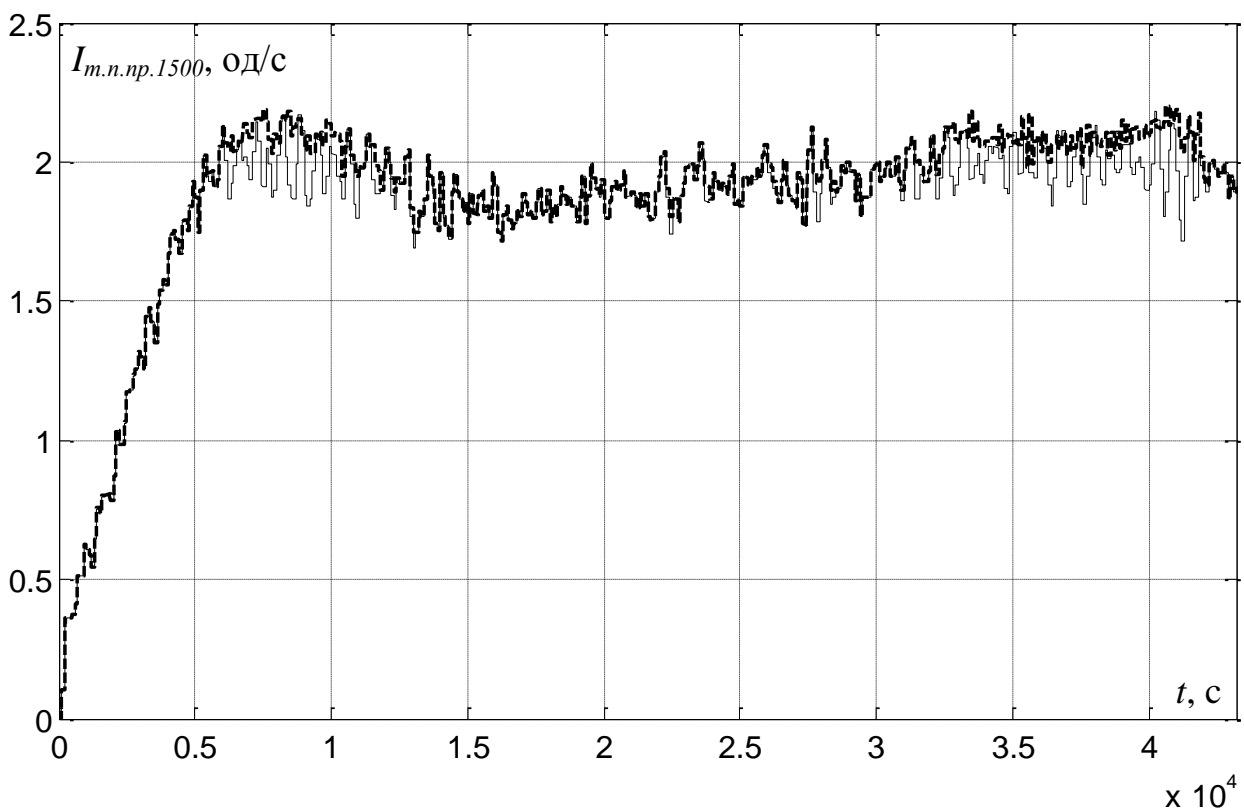


Рис.2.21. Зміна у часі середньої інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом: а – для некерованої системи (жирна пунктирна лінія); б – для керованої системи (тонка суцільна лінія)

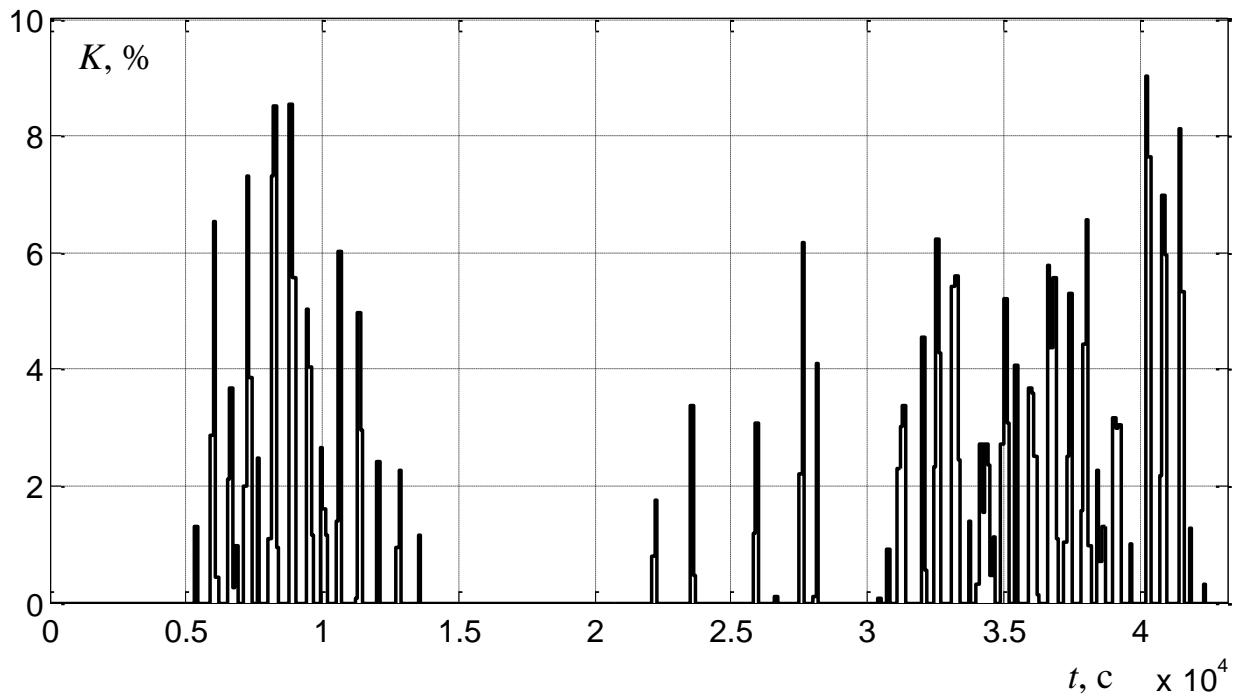


Рис.2.22. Зміна у часі відносного відхилення поточного значення інтенсивності транспортного потоку  $I_{т.п.1500}$  від критичного значення у сторону збільшення (критерію ефективності роботи транспортної системи)

Проведемо дослідження, як критерій ефективності роботи транспортної системи  $K$  залежить від часової затримки після корегування керуючих впливів на систему. При цьому значення часової затримки будемо змінювати з кроком 100 с, таким чином забезпечивши кратність затримки періоду світлофорних циклів на перехрестях.

Зазначимо, що зі збільшенням часової затримки після корегування керуючих впливів на систему оцінювати ефективність роботи системи ліпше не за поточним значенням інтенсивності транспортного потоку, а за її значенням, що усереднене за час затримки. З цією метою у модель прийняття рішень між блоками "П" та "К" (рис.2.17) додано підсистему "Moving Average", яка здійснює ковзне усереднення інтенсивності транспортного потоку. Вміст підсистеми "Moving Average" наведений на рис.2.23.

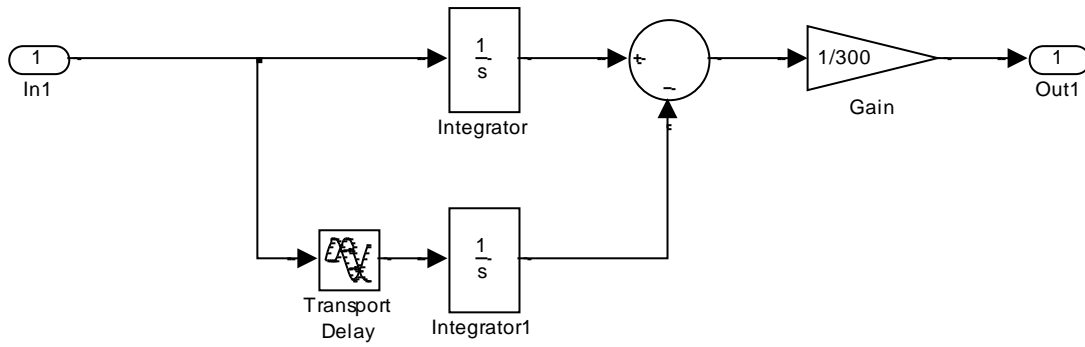


Рис.2.23. Схема моделі для реалізації ковзного усереднення інтенсивності транспортного потоку

Час, за який здійснюється ковзне усереднення інтенсивності, вводиться у блоки “Transport Delay” та “Gain” (рис.2.23).

Нижче показані результати моделювання поведінки транспортної системи для часової затримки після корегування керуючих впливів на систему 300 с.

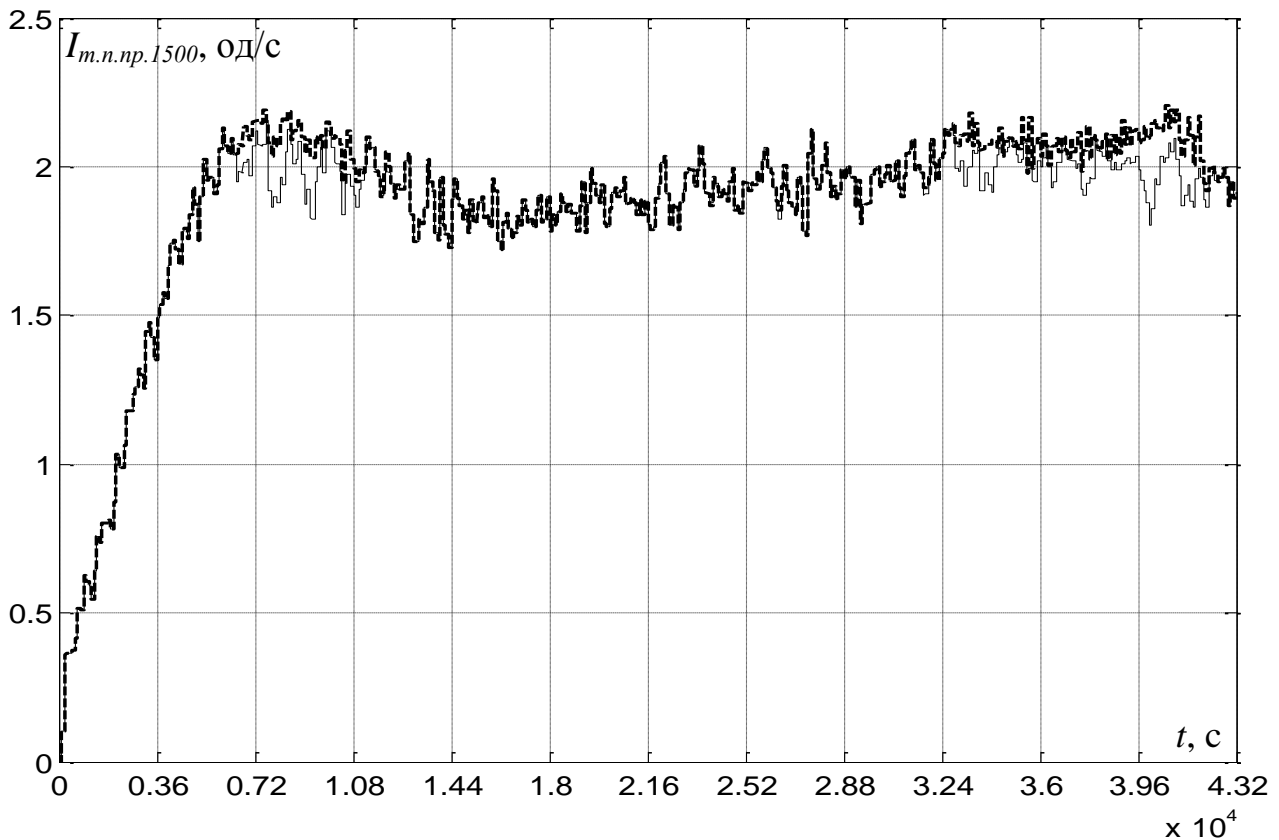


Рис.2.24. Зміна у часі середньої інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 м від першого перехрестя за прямим маршрутом: а – для некерованої системи (жирна пунктирна лінія); б – для керованої системи (тонка суцільна лінія)

Із рис.2.24 помітно, що збільшення часової затримки після корегування керуючих впливів на систему до 300 с призводить до зменшення частоти та амплітуди коливань інтенсивності  $I_{m.n.np.1500}$  навколо свого критичного значення 2 од/с у часи пік. Це підтверджує рис.2.25, на якому видно, що відносне відхилення інтенсивності  $I_{m.n.np.1500}$  від свого критичного значення наразі не перевищує 8 %.

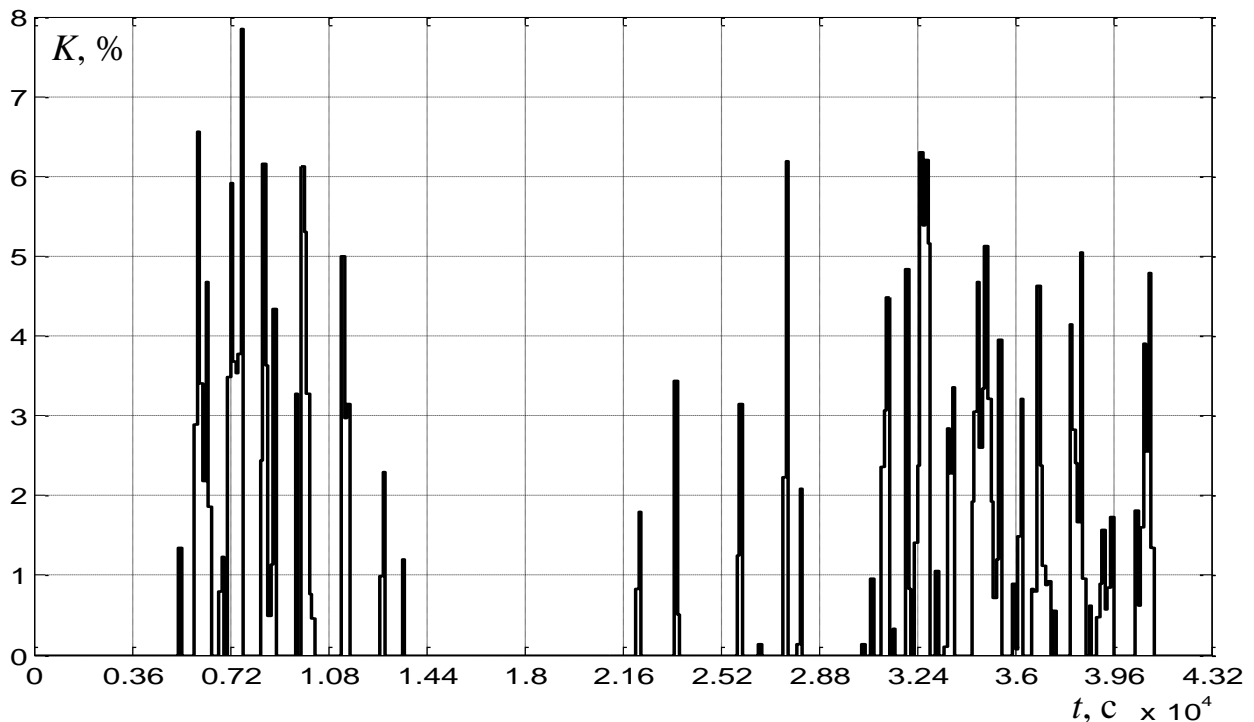


Рис.2.25. Зміна у часі відносного відхилення поточного значення інтенсивності транспортного потоку  $I_{m.n.np.1500}$  від критичного значення у сторону збільшення (критерію ефективності роботи транспортної системи)

За допомогою підсистеми “Estimation” визначене середнє значення критерію ефективності  $K$  за 12 годин (весь час моделювання) для випадку часової затримки керуючих впливів 300 с, яке склало 2,5%. Тобто, після збільшення часової затримки керуючих впливів до 300 с критерій ефективності  $K$  у порівнянні з некерованою системою зменшився у 1,73 рази, а у порівнянні з випадком часової затримки керуючих впливів 100 с – у 1,22 рази. Це означає,

що збільшення часової затримки керуючих впливів на систему до 300 с робить роботу транспортної системи ще більш ефективною.

Для випадку часової затримки керуючих впливів на систему 300 с зробимо аналіз транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об'їзним маршрутом.

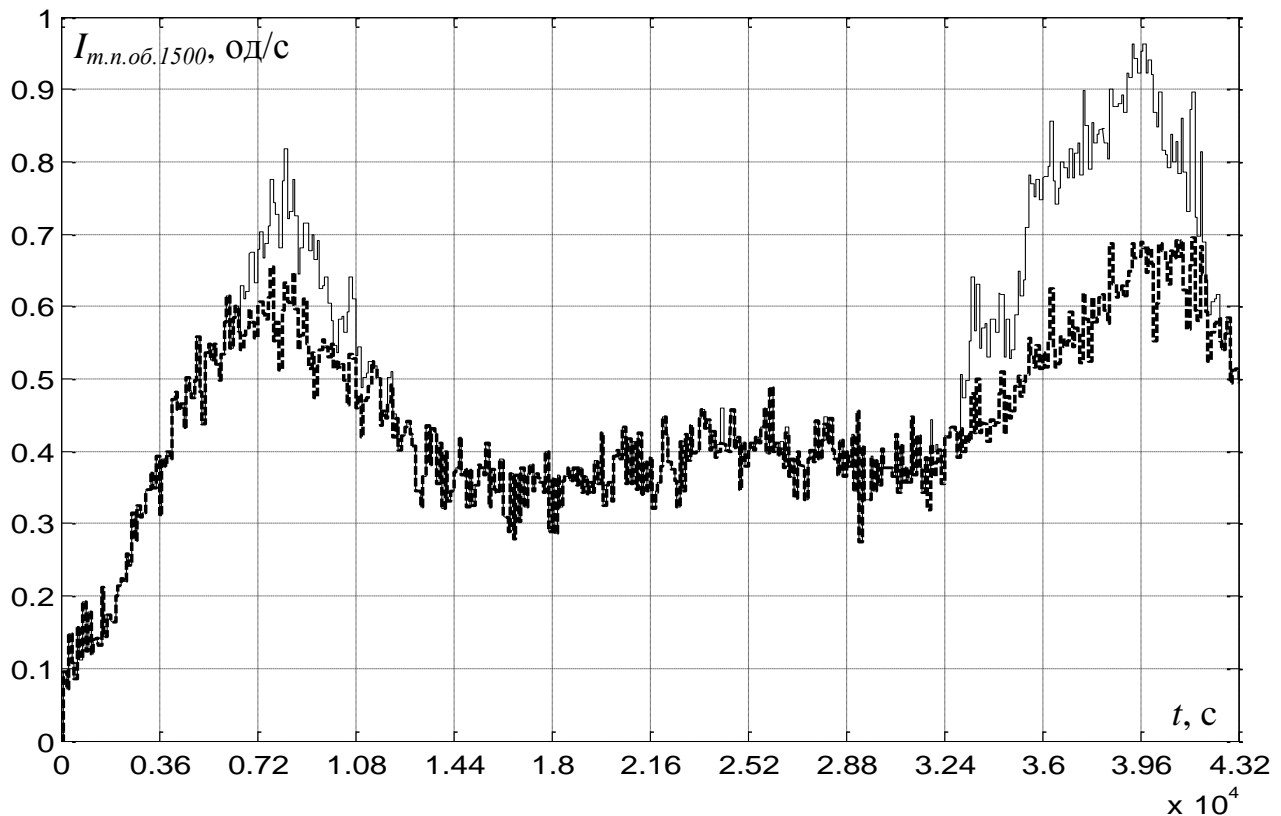


Рис.2.26. Зміна у часі середньої інтенсивності транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об'їзним маршрутом: а – для некерованої системи (жирна пунктирна лінія); б – для керованої системи (тонка суцільна лінія)

На рис.2.26 результат перерозподілу транспортних потоків за прямим та об'їзним маршрутами більш помітний – у часи пік для керованої системи спостерігається істотне підвищення інтенсивності транспортного потоку за об'їзним маршрутом, але при цьому інтенсивність не перевищує своє критичне значення за цим напрямом 1,4 од/с. Той факт, що перерозподіл транспортних

потоків за прямим та об'їзним маршрутами має місце в основному у часи-пік, підтверджує динаміка керуючого впливу на систему  $R$  (рис.2.27).

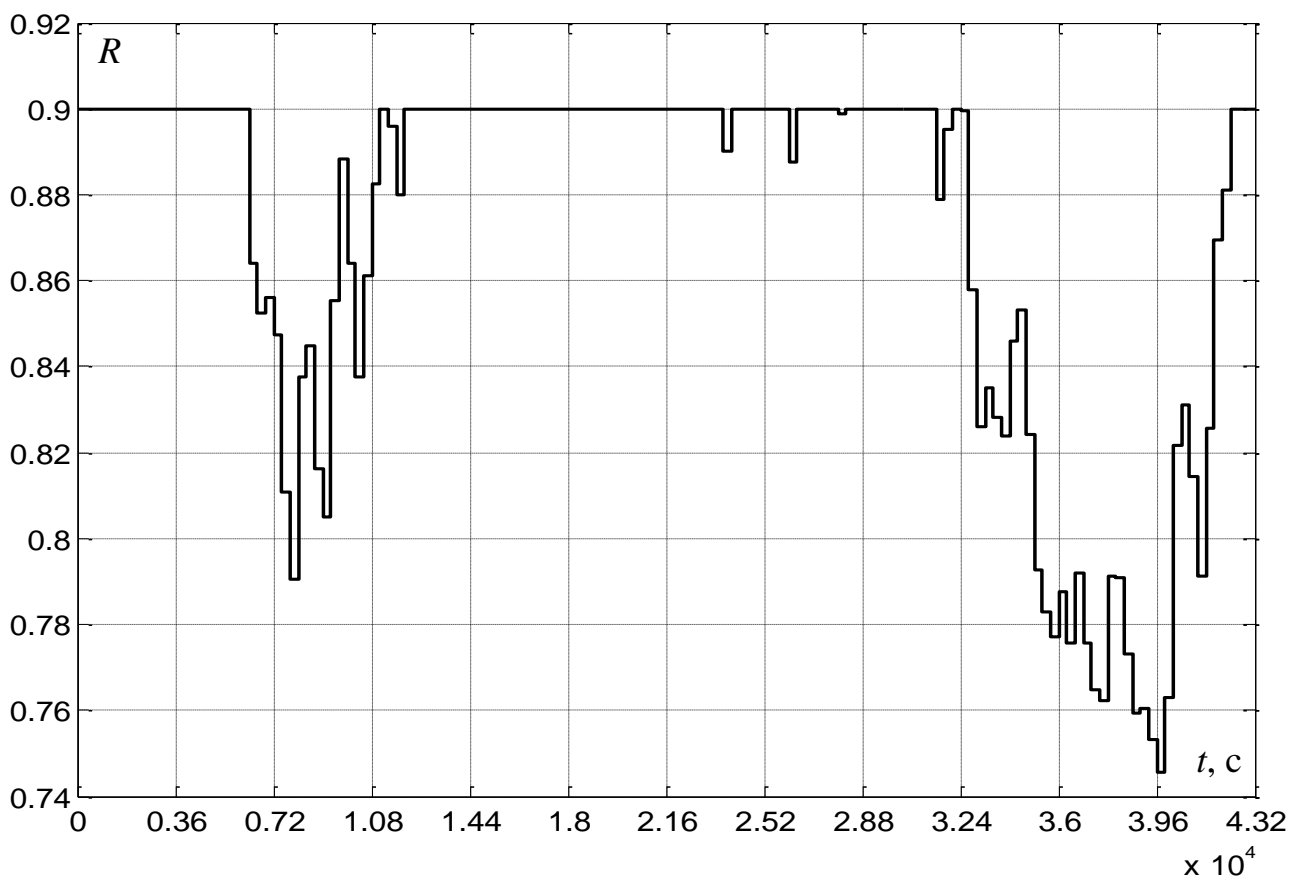


Рис.2.27. Зміна у часі керуючого впливу на транспортну систему  $R$

Із рис.2.27 ми бачимо, що зменшення керуючого впливу  $R$  на значну величину (до 0,79 вранці та до 0,75 ввечері) відбувається саме в часи пік. При цьому зміна у часі керуючого впливу  $R$  носить випадковий характер та визначається випадковим характером зміни у часі кількості автомобілів перед першим перехрестям у головному напрямі.

## Контрольні завдання

1. За результатами експериментальних замірів, що наведені у табл.2.4, визначити критерій ефективності роботи транспортної системи для прямого маршруту.

Табл.2.4. Експериментальні заміри середніх значень інтенсивності та просторової швидкості транспортного потоку на відстані 1500 метрів від першого перехрестя за прямим маршрутом

$V_{т.п.сер},$ км/Г	30	32	34	36	38	40	42	44
$I_{т.п.сер},$ од/с	2,35	2,34	2,3	2,23	2,14	2,03	1,89	1,74
$V_{т.п.сер},$ км/Г	46	48	50	52	54	56	58	60
$I_{т.п.сер},$ од/с	1,56	1,37	1,16	0,94	0,71	0,47	0,23	0,02

2. За результатами експериментальних замірів, що наведені у табл.2.5, визначити критерій ефективності роботи транспортної системи для об'їзного маршруту.

Табл.2.5. Експериментальні заміри середніх значень інтенсивності та просторової швидкості транспортного потоку на відстані 1500 метрів від другого перехрестя за об'їзним маршрутом

$V_{т.п.сер},$ км/Г	20	22	24	26	28	30	32	34
$I_{т.п.сер},$ од/с	1,47	1,52	1,55	1,55	1,52	1,47	1,4	1,31
$V_{т.п.сер},$ км/Г	36	38	40	42	44	46	48	50
$I_{т.п.сер},$ од/с	1,19	1,06	0,91	0,75	0,57	0,39	0,2	0,01

3. На основі визначених критеріїв ефективності роботи транспортної системи у додатку Simulink математичного пакету Matlab розробити модель прийняття рішень та з'єднати її з моделлю поведінки транспортної системи. Використовуючи модель поведінки транспортної системи разом із моделлю прийняття рішень, провести дослідження ефективності роботи транспортної системи для дорожніх умов, що представлені у табл.2.6. За результатами досліджень зробити висновки.

Табл.2.6. Вхідні параметри моделі поведінки транспортної системи, що визначаються дорожніми умовами на заданій ділянці міської транспортної схеми

<b>Номер варіанту</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
Відстань між I та II перехр., м	700	710	720	730	740	750	760
Середня швидкість т.п. між I та II перехр., км/г	40	41	42	43	44	45	46
Середня швидкість т.п. за I перехр., км/г	60	61	62	63	64	65	66
Середня швидкість т.п. за II перехр., км/г	50	51	52	53	54	55	56
Середня відстань між автомобілями в зоні перехресть, м	1,9	2	2,1	1,9	2	2,1	1,9
Середня довжина автомобіля в зоні I перехр., м	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5	4,5
Середня довжина автомобіля в зоні II перехр., м	4,7	4,8	4,9	5	4,5	4,6	4,7
Розподіл автомобілів за маршрутами руху для головного напрямку I перехр., %	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10
Розподіл автомобілів за маршрутами руху для конфліктного напрямку I перехр., %	70/30	71/29	72/28	73/27	74/26	75/25	76/24
Розподіл автомобілів за маршрутами руху для головного напрямку II перехр., %	85/15	85/15	86/14	86/14	87/13	87/13	88/12
<b>Номер варіанту</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
Відстань між I та II перехр., м	770	780	790	800	810	820	830
Середня швидкість т.п. між I та II перехр., км/г	47	48	49	50	51	52	53
Середня швидкість т.п. за I перехр., км/г	67	68	69	70	71	72	73
Середня швидкість т.п. за II перехр., км/г	57	58	59	60	61	52	53
Середня відстань між автомобілями в зоні перехресть, м	2	2,1	1,9	2	2,1	1,9	2
Середня довжина автомобіля в зоні I перехр., м	4,6	4,7	4,8	4,9	5	5,1	5,2



Середня довжина автомобіля в зоні II перехр., м	4,8	5	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9
Розподіл автомобілів за маршрутами руху для головного напрямку I перехр., %	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10
Розподіл автомобілів за маршрутами руху для конфліктного напрямку I перехр., %	77/23	78/22	79/21	80/20	81/19	82/18	83/17
Розподіл автомобілів за маршрутами руху для головного напрямку II перехр., %	88/12	89/11	89/11	90/10	91/9	92/8	93/7
<b>Номер варіанту</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>
Відстань між I та II перехр., м	840	850	860	870	880	890	900
Середня швидкість т.п. між I та II перехр., км/г	54	55	50	51	52	53	54
Середня швидкість т.п. за I перехр., км/г	65	66	67	68	69	70	71
Середня швидкість т.п. за II перехр., км/г	54	55	56	57	58	59	60
Середня відстань між автомобілями в зоні перехресть, м	2,1	1,9	2	2,1	1,9	2	2,1
Середня довжина автомобіля в зоні I перехр., м	4,6	4,7	4,8	4,9	5	5,1	5,2
Середня довжина автомобіля в зоні II перехр., м	5	4,5	4,9	4,6	4,7	4,8	5
Розподіл автомобілів за маршрутами руху для головного напрямку I перехр., %	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10
Розподіл автомобілів за маршрутами руху для конфліктного напрямку I перехр., %	77/23	78/22	79/21	80/20	81/19	82/18	83/17
Розподіл автомобілів за маршрутами руху для головного напрямку II перехр., %	88/12	89/11	89/11	90/10	91/9	92/8	93/7

4. На основі моделі поведінки транспортної системи та моделі прийняття рішень провести дослідження залежності критерію ефективності роботи транспортної системи від часової затримки після корегування керуючих впливів на систему. За результатами досліджень обрати значення часової затримки, коли спостерігається мінімальне значення критерію ефективності роботи транспортної системи.

## Висновки

1. За критерій ефективності роботи транспортної системи приймається умова перевищення поточною інтенсивністю транспортного потоку свого критичного значення, при якому порушується лінійна залежність між середніми

інтенсивністю і швидкістю транспортного потоку, що говорить про зміну характеру руху автомобілів з вільного на груповий. Обробка експериментальних даних показала, що для прямого маршруту критична інтенсивність транспортного потоку дорівнює 2 од/с, а для об'їзного маршруту – 1,4 од/с.

2. Дослідження показали, що для підтримки максимальної пропускної здатності перехресть у головному напрямі відношення основних тактів світлофорних циклів на перехрестях треба змінювати у функції відношення кількості автомобілів, що їдуть за головним та об'їзним маршрутами. Причому з високою точністю ці залежності описуються ступеневими поліномами третього порядку.

3. Обчислювальний експеримент на моделі транспортної системи показав, що після введення в систему моделі прийняття рішень середнє значення критерію ефективності роботи транспортної системи зменшилося у 1,41 рази, що означає підвищення ефективності роботи транспортної системи у такій самій пропорції.

4. Обчислювальний експеримент на моделі транспортної системи показав, що ефективність роботи транспортної системи залежить від часової затримки після корегування керуючих впливів на систему. Збільшення часової затримки у три рази дозволило зменшити середнє значення критерію ефективності роботи транспортної системи у 1,22 рази.

### 3. ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ НА ТРАНСПОРТНІ ОБ'ЄКТИ

#### 3.1. Створення пристрою керування транспортними об'єктами на основі теорії автоматів

В останній час пріоритетним напрямком розвитку транспортних технологій є широке інтегрування систем автоматизації в процеси керування як окремим транспортним об'єктом, так і транспортними системами. Наразі в програмах, що дозволяють проектувати та реалізовувати системи автоматизації на базі звичайних персональних комп'ютерів (scada-програми), використовують способи завдання пристроїв керування, які не потребують від користувача знання спеціальних мов програмування. Один з таких способів – це завдання пристрою керування у вигляді комбінаційної схеми із використанням теорії автоматів. Володіючи цим способом, фахівець здатен самостійно реалізовувати будь-які алгоритми керування транспортними об'єктами, поліпшуючи тим самим професійні навички використання систем автоматизації на транспортних підприємствах.

Автоматизовані системи керування нижнього рівня мають широко розповсюджену, класичну структуру, що представлена на рис.3.1.

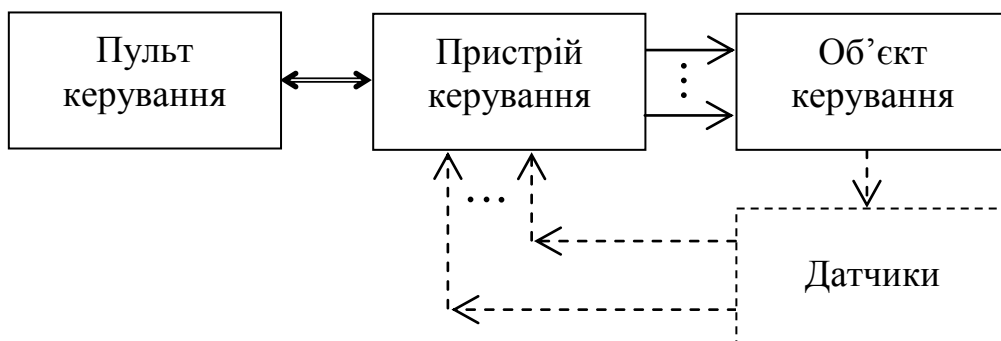


Рис.3.1. Структурна схема автоматизованої системи керування нижнього рівня

Призначення пристрою керування на рис.3.1 – формування керуючих сигналів на об'єкт керування (транспортний об'єкт) з ціллю забезпечення його ефективного функціонування. Якщо в системі при розрахунку керуючих сигналів (впливів) враховується стан об'єкту керування, то вводиться зворотній зв'язок через датчики (на рис.3.1 цей зв'язок показаний пунктирними лініями) та використовується принцип замкненого управління. У зворотному випадку має місце принцип розімкненого управління, коли керуючі сигнали залежать тільки від сигналів з пульта керування або формуються за жорсткою програмою.

Незалежно від принципу управління, керуючі сигнали формуються згідно закону керування, який описує зв'язок між керуючими сигналами і сигналами з датчиків та пульта керування (рис.3.1). Закон керування може бути заданий аналітично (через функції керування), графічно (через схеми пристрою керування) або у вигляді таблиці. В даному підрозділі вивчаються закони дискретного керування, коли всі вхідні та вихідні величини пристрою керування мають тільки два значення – «0» (означає вимкнення чогось або відсутність події, тобто сигналу з датчика) та «1» (ввімкнення або наявність сигналу з датчика чи з пульта керування). При цьому використовуються розповсюджені способи завдання законів дискретного керування – у вигляді комбінаційних схем, таблиць істинності або логічних функцій із застосуванням теорії автоматів. Слід зазначити, що незважаючи на відмінність користувальницьких інтерфейсів, ці способи завдання пристроїв керування є спільними для всіх scada-програм.

Структурна схема пристрою керування (ПК) показана на рис.3.2, де  $X$  та  $Y$  – позначення, відповідно, дискретних вхідних та вихідних величин;  $n$  – кількість вхідних величин;  $m$  – кількість вихідних величин.

Зауважимо, що у багатьох випадках для керування транспортними об'єктами застосовують пристрої керування без пам'яті, коли кожний вихідний сигнал  $Y$  дискретного пристрою керування дорівнює одиниці тільки за умови певних комбінацій вхідних сигналів  $X$  в поточний момент часу і не залежить

від значень вхідних сигналів в попередні моменти часу. При цьому для розробки та реалізації закону керування транспортним об'єктом використовують теорію автоматів.

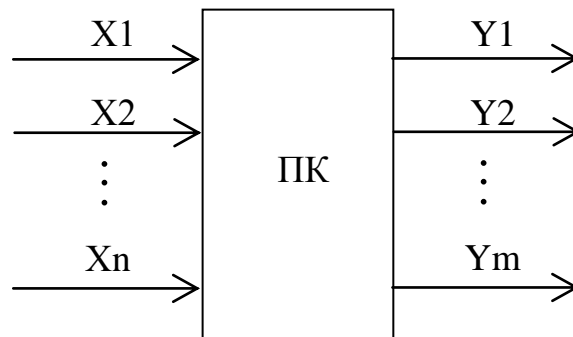


Рис.3.2. Структурна схема дискретного пристрою керування

В теорії автоматів для опису залежності вихідних величин дискретного пристрою керування від вхідних використовують базові операції булевої алгебри, такі як «Інверсія», «Диз'юнкція» та «Кон'юнкція».

1. **Інверсія («НІ»)** – це логічна операція над вхідною величиною  $X$ , результатом якої є “заперечення” величини  $X$ , коли вихідна величина  $Y$  дорівнює її зворотному значенню. Логічна функція, що описує аналітичний зв'язок між величинами  $Y$  та  $X$ , при цьому має вигляд:

$$Y = \bar{X} .$$

В таблицях істинності наводяться можливі комбінації вхідних величин пристрою керування та значення вихідних величин, що їм відповідають згідно закону керування. Для операції «Інверсія» таблиця істинності виглядає наступним чином.

Табл.3.1. Таблиця істинності для операції «Інверсія»

X	Y
0	1
1	0

2. **Диз'юнкція (“АБО”)** – це логічна операція над вхідними величинами X, результатом якої є логічне підсумовування значень вхідних величин, коли вихідна величина Y дорівнює одиниці за умови рівності одиниці хоча б однієї вхідної величини. Логічна функція, що описує аналітичний зв'язок між величинами Y та X, при цьому має вигляд:

$$Y = X1 \vee X2$$

Для операції «Диз'юнкція» таблиця істинності виглядає наступним чином.

Табл.3.2. Таблиця істинності для операції «Диз'юнкція»

X1	X2	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

3. **Кон'юнкція (“ТА”)** – це логічна операція над вхідними величинами X, результатом якої є логічне перемноження значень вхідних величин, коли вихідна величина Y дорівнює одиниці тільки за умови рівності одиниці всіх вхідних величин. Логічна функція, що описує аналітичний зв'язок між величинами Y та X, при цьому має вигляд:

$$Y = X1 \wedge X2$$

Для операції «Кон'юнкція» таблиця істинності виглядає наступним чином.

Табл.3.3. Таблиця істинності для операції «Кон'юнкція»

X1	X2	Y
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

В даному розділі при вивченні принципів функціонування автоматизованих систем управління на транспорті (АСУТ) на прикладі АСКДР використовується імітаційне моделювання, коли відбувається заміна реальних транспортних об'єктів на їх імітаційні моделі. Імітаційна модель транспортного об'єкту повторює деякі його властивості та поводить себе так само, як і реальний об'єкт при подачі тих чи інших керуючих сигналів. Для створення таких моделей залучене спеціальне програмне забезпечення – scada-програма «Genie» фірми «Advantech».

Програма «Genie» представляє собою програмний пакет для розробки прикладних систем для всіх видів автоматизації. Вона дозволяє на базі звичайних персональних комп'ютерів розробляти як пристрої керування у вигляді так званих стратегій, так і людино-машинний інтерфейс у вигляді віртуального пульта керування. В стратегіях, крім реалізації різних законів керування, також можна створювати імітаційні моделі реальних транспортних об'єктів. Таким чином, в програмі «Genie» можна керувати не реальним транспортним об'єктом, а його імітаційною моделлю, моделюючи тим самим роботу автоматизованої системи керування. Зазвичай такий підхід використовують для тестування й підтвердження працездатності розробленого закону керування.

Стратегія в програмі «Genie» реалізується в так званому редакторі задач («TASK»), а віртуальний пульт керування для відстеження за роботою моделей та імітування сигналів з пульта керування – в редакторі форм («DISP»). Редактор задач та редактор форм з'являються при створенні нового проекту в програмі «Genie» (рис.3.3). Для цього потрібно у головному меню вибрати пункт «Файл» та у ньому вибрати підпункт «Создать».

В програмі «Genie» у поточний момент активним може бути тільки одне вікно. На рис.3.3 це редактор задач «TASK1», тому саме для нього доступна бібліотека блоків даного редактора (рис.3.3). Редактор форм «DISP1» має свою бібліотеку блоків, яка стане доступною, коли ми зробимо активним вікно з назвою «DISP1».

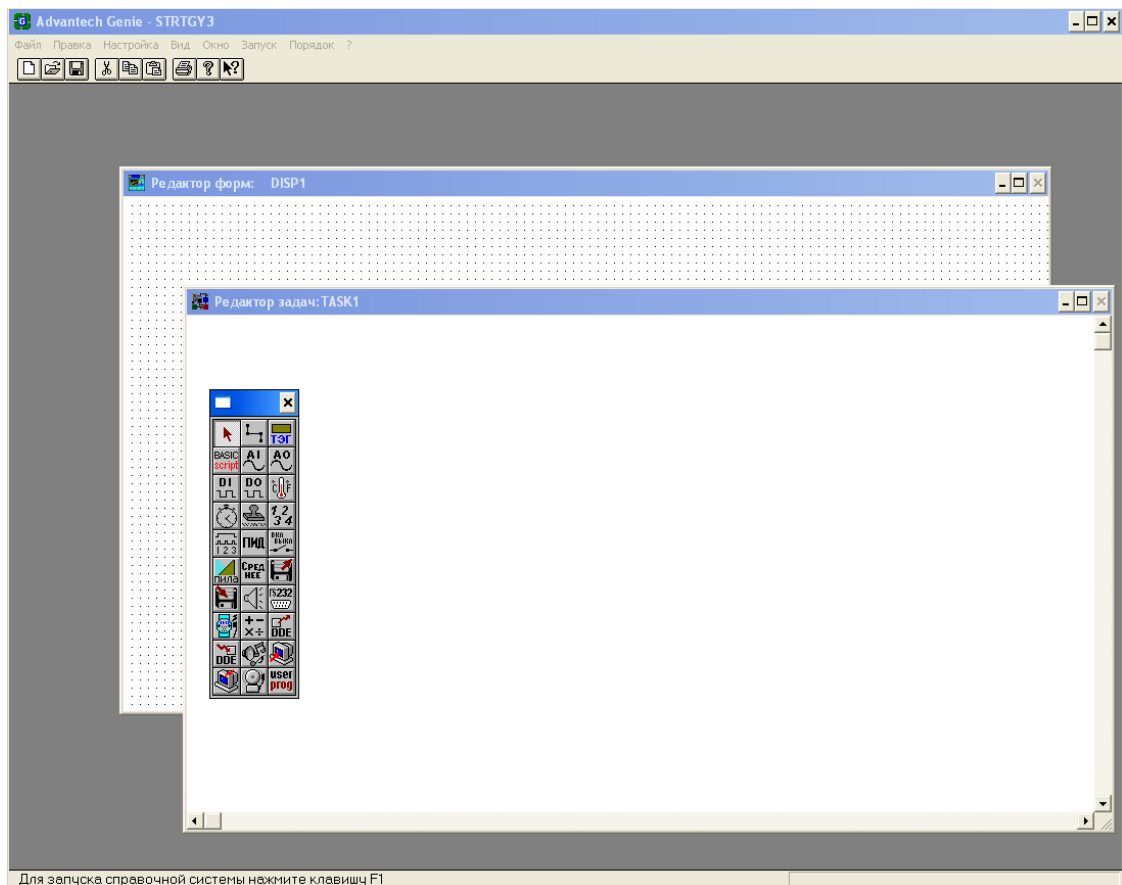


Рис.3.3. Користувальницька середина програми «Genie» фірми «Advantech»

Відмітимо, що меню настройок також є індивідуальним для редакторів задач та форм. Наприклад, щоб визвати меню настройок для редактора задач, треба зробити вікно «TASK1» активним, потім у головному меню вибрати пункт «Настройка» та підпункт «Параметры задачи». При цьому з'явиться вікно меню настройок редактора задач (рис.3.4).

Зазначимо, що у довідці програми «Genie» присутній детальний опис кожного пункту меню настройок редактора задач, але ми виділимо один з пунктів, який є важливим з точки зору моделювання процесів в АСУТ. В запусненій стратегії програми «Genie» всі операції, в тому числі оновлювання сигналів, виконуються тільки в певні моменти реального часу, між якими все знаходиться в “замороженому” стані. Часовий проміжок між цими моментами задається у пункті «Период опроса», який за замовчуванням дорівнює одній



секунді (рис.3.4). Але даний параметр потрібно встановлювати з оглядом на динаміку транспортних процесів, що моделюються. Якщо процес досить швидкий і за секунду, у зв'язку з цим, потрібно виконати декілька операцій, то, відповідно, період опитування повинен бути значно менше за одну секунду.

Параметры сканируемой задачи

Тэг: TASK1      Описание: [ ]

Период опроса (интервал времени между текущим и следующим циклами исполнения)

0 [ ] час(ов)    0 [ ] минут(а)    1 [ ] секунд(а)    0 [ ] миллисекунд(а)

Продолжительность выполнения задачи

Свободное исполнение (бесконечная продолжительность)

Исполнение с зависимостью от времени: 0 [ ] ч    0 [ ] мин    0 [ ] с

Исполнение с зависимостью от количества циклов: 0 [ ] цикл(ов)

Режим запуска задачи

Немедленный запуск

Пассивный запуск с активизацией по команде из сценария

Запуск с задержкой: 0 [ ] ч    0 [ ] мин    0 [ ] с

Запуск каждые сутки в заданное время:

час (0-23): 0 [ ]    мин: 0 [ ]    с: 0 [ ]

OK

Отмена

Рис.3.4. Меню настроек редактора задач программы «Genie»

Розглянемо приклад створення дискретного пристрою керування у програмі «Genie» для заданих залежностей трьох вихідних величин дискретного пристрою керування від трьох вхідних у вигляді логічних функцій (табл.3.4). При цьому розробимо таблицю істинності і комбінаційну схему пристрою керування та реалізуємо розроблену комбінаційну схему в середі scada-програми «Genie» із використанням логічних елементів, що виконують базові операції булевої алгебри. А також, перевіримо на основі імітаційного моделювання в середі scada-програми «Genie» відповідність реалізованої залежності вихідних величин від вхідних заданих залежностей.

Табл.3.4. Задана залежність вихідних величин Y дискретного пристрою керування від вхідних X

Y1	Y2	Y3
X2	$X2 \vee (X1 \wedge X3)$	$X1 \wedge X2 \wedge X3$

Існують загальні правила та певний порядок дій при переході з аналітичного способу завдання залежності величин Y від X до табличного. Насамперед виділяють можливі стани пристрою керування, кожний з яких зіставляється з певною комбінацією вхідних величин. Загальна кількість таких комбінацій становить  $2^n$ , де n – кількість вхідних величин пристрою керування. У нашому випадку кількість станів пристрою керування дорівнює  $2^3 = 8$ . Кожний стан – це окремий рядок в таблиці істинності, в той час, як стовпці відповідають вхідним (перша половина рядків) та вихідним (друга половина рядків) величинам пристрою керування.

При формуванні таблиці істинності в першій половині рядків наводяться можливі комбінації вхідних величин X пристрою керування, а у другій – значення вихідних величин згідно заданій аналітичній залежності Y від X (табл.3.4). Якщо якась комбінація вхідних величин X призводить до появи одиниці одночасно на двох виходах Y, то у другій половині відповідного рядка буде дві одиниці.

Дотримуючись вищенаведених правил завдання табличної форми дискретного закону керування, сформуємо таблицю істинності для заданої аналітичної залежності вихідних величин пристрою керування від вхідних.

Табл.3.5. Таблиця істинності дискретного пристрою керування

Стан ПК	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
I	0	0	0	0	0	0
II	1	0	0	0	0	0
III	0	1	0	1	1	0
IV	0	0	1	0	1	0
V	1	1	0	1	1	0
VI	1	0	1	0	0	1
VII	0	1	1	1	1	0
VIII	1	1	1	1	1	0

При переході від аналітичної форми опису комбінаційної логіки дискретного пристрою керування до графічної застосовують наступні загальні правила:

- вхідні та вихідні величини пристрою керування приймаються за дискретні сигнали;
- пристрій керування представляється у вигляді комбінаційної схеми, елементи якої здійснюють логічні операції над дискретними сигналами, такі як «НІ», «ТА», «АБО»;
- комбінаційну схему пристрою керування створюють поетапно – спочатку розробляють частину схеми, на виході якої формується вихідна величина  $Y_1$ , потім розробляється частина схеми для формування величини  $Y_2$  тощо;
- при графічному відображенні логічної функції спочатку реалізуються ті операції над вхідними сигналами, які в логічних функціях знаходяться в дужках.

На основі наведених правил в редакторі задач програми «Genie» розроблена комбінаційна схема дискретного пристрою керування (рис.3.5), в якому реалізується задана в аналітичному вигляді залежність вихідних величин від вхідних (табл.3.4).

Для перевірки правильності реалізації заданого алгоритму дискретного керування в редакторі форм програми «Genie» створений людино-машинний інтерфейс (віртуальний пульт керування), який представлений на рис.3.6. В ньому зміна вхідних сигналів пристрою керування імітується за допомогою кнопок із використанням тегів для введення сигналів у редактор задач. В свою чергу контроль за зміною вихідних величин пристрою керування виконується на основі світлових індикаторів. При цьому кожний світловий індикатор через меню його налаштувань віртуально зв'язується з певним блоком редактора задач, на виході якого формується відповідна вихідна величина  $Y$ .

На рис.3.6 показаний результат перевірки у вигляді людино-машинного інтерфейсу в редакторі форм для деяких комбінацій вхідних величин  $X$ .

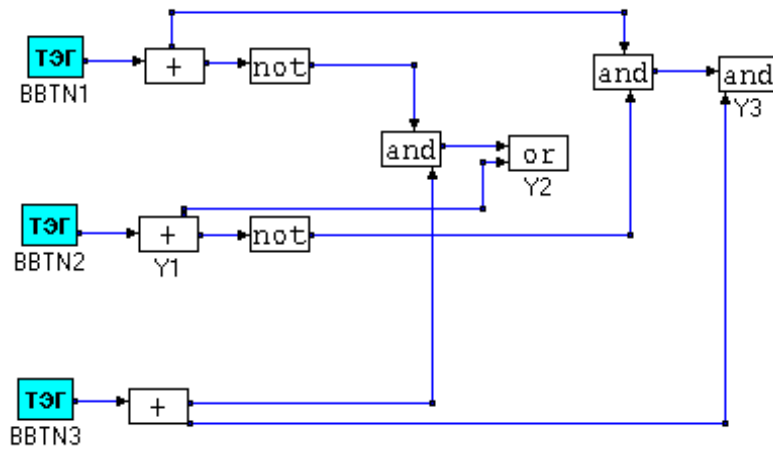


Рис.3.5. Комбінаційна схема дискретного пристрою керування, реалізована в редакторі задач програми «Genie»

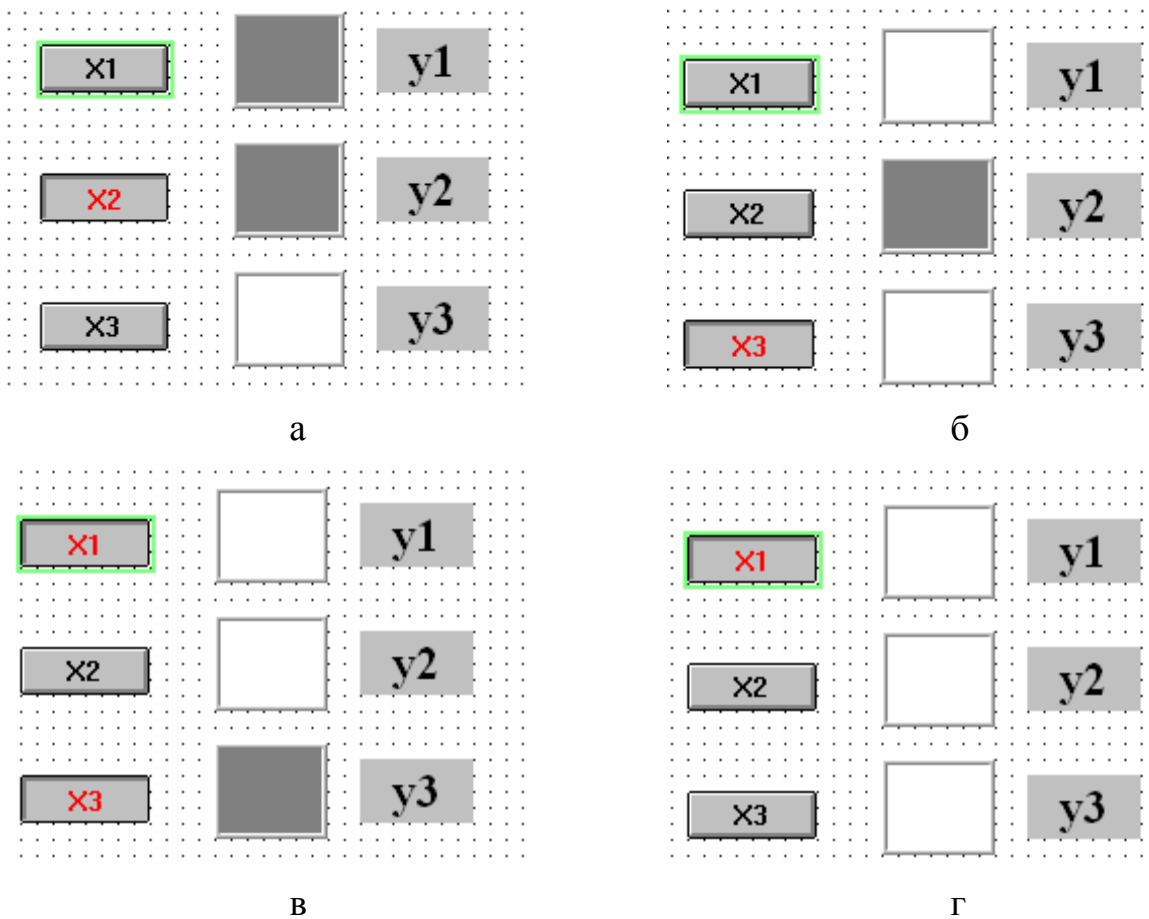


Рис.3.6. Результат імітаційного моделювання пристрою керування у вигляді людино-машинного інтерфейсу в редакторі форм для наступних комбінацій вхідних величин X: а – 0 1 0; б – 0 0 1; в – 1 0 1; г – 1 0 0

Світловий індикатор має сіре світло, якщо на виході блоку в редакторі задач, з яким він віртуально зв'язаний, присутня одиниця, та біле світло – якщо нуль. Як бачимо з рис.3.6, комбінації вихідних величин  $Y$  пристрою керування для різних поєднань вхідних величин  $X$  відповідають заданим логічним функціям (табл.3.4) та сформованій таблиці істинності (табл.3.5). Це підтверджує правильність синтезу логічної комбінаційної схеми дискретного пристрою керування, що реалізує задану аналітичну залежність вихідних величин  $Y$  від вхідних  $X$ .

### 3.2. Особливості реалізації алгоритму жорсткого однопрограмного керування транспортними потоками на перехрестях

Розглянемо особливості реалізації алгоритму жорсткого однопрограмного керування транспортними потоками на перехрестях на прикладі конкретної структури світлофорного циклу (рис.3.7).

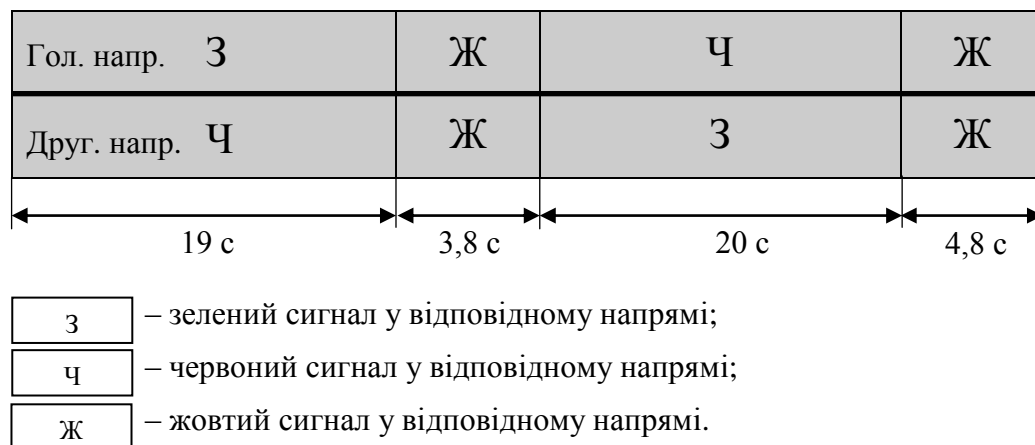


Рис.3.7. Структура світлофорного циклу на перехресті за умови жорсткого однопрограмного керування транспортними потоками

Протягом розробки дискретного пристрою керування для реалізації жорсткого однопрограмного керування транспортними потоками на перехресті

ми повинні обґрунтувати дискретні вхідні  $X$  і вихідні  $Y$  величини пристрою керування та встановити між ними залежність у вигляді логічних функцій та таблиці істинності. Далі на основі отриманих логічних функцій, використовуючи базові операції булевої алгебри, розробимо комбінаційну схему пристрою керування світлофорними об'єктами на перехресті з її реалізацією в редакторі задач програми «Genie». Також в редакторі форм створимо людино-машинний інтерфейс у вигляді спрощеної схеми перехрестя із розміщенням на ній моделей світлофорних об'єктів і на його основі перевіримо правильність роботи комбінаційної схеми дискретного пристрою керування світлофорами.

Коли застосовується алгоритм жорсткого однопрограмного керування світлофорними об'єктами, переключення їх світлових індикаторів відбувається через певні проміжки часу згідно жорстко заданій структурі світлофорного циклу. Тобто, має місце принцип розімкнутого керування без використання будь-яких датчиків для збирання інформації про рух транспорту на перехресті (рис.3.1). Отже головним елементом пристрою керування, за вихідним сигналом якого будуть формуватися керуючі сигнали на індикатори світлофорів, є таймер, що працює за принципом секундоміру. Але вихідна величина таймера – це неперервна величина, в той час, як на вхід пристрою керування комбінаційного типу повинні подаватися дискретні величини. Тому запропонована логічна комбінаційна схема (рис.3.8) для перетворення неперервної вихідної величини таймера на декілька дискретних величин, кількість яких дорівнює кількості тактів світлофорного циклу (для наведеного прикладу – чотири). Причому, згідно алгоритму перетворення, на першому такті одиниці дорівнює тільки перша дискретна величина (інші дорівнюють нулю), на другому – тільки друга і т. д.

Перша дискретна величина «Т1» є результатом порівняння вихідної величини таймера з тривалістю першого такту (19 с) та дорівнює одиниці, якщо вихідна величина таймера менше значення 19 (рис.3.8,а). Друга дискретна величина «Т2» стає рівною одиниці, коли потрапляє в діапазон від 19 до 22,8 с

(час другого такту). Це забезпечується одночасним виконанням двох умов (здійснення логічної операції «ТА») – вихідна величина таймера не менше 19 с та вихідна величина таймера менше 22,8 с. За аналогічним принципом формується третя дискретна величина «Т3» для діапазону від 22,8 до 42,8 с. Для четвертої дискретної величини «Т4» достатнє виконання однієї умови – вихідна величина таймера більше значення 42,8 с.

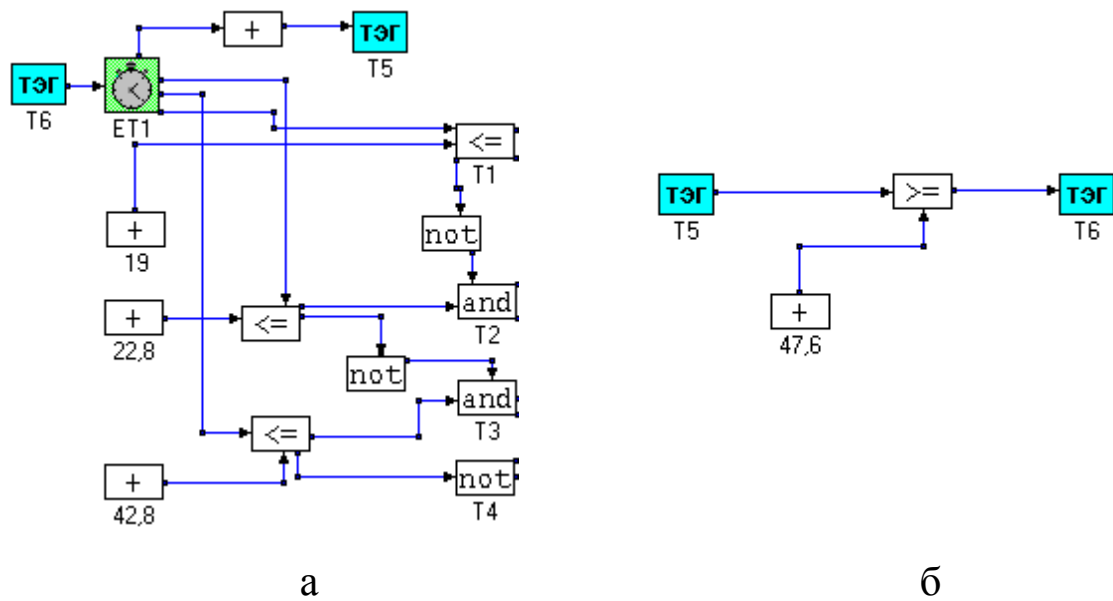


Рис.3.8. Логічна комбінаційна схема для перетворення неперервної вихідної величини таймера на сукупність дискретних величин

Після закінчення світлофорного циклу таймер потрібно скинути, для чого на його вхід протягом одного кроку моделювання подається одиниця. Сигнал скидання таймера формується у другій задачі (рис.3.8,б) шляхом порівняння вихідної величини таймера, що передається у другу задачу з першої через віртуальний тег «Т5», зі значенням 47,6 с (період світлофорного циклу). В результаті порівняння повинна формуватися одиниця, якщо вихідна величина таймера більше періоду світлофорного циклу. Сигнал скидання таймера передається до першої задачі із другої через віртуальний тег «Т6».

Позначимо керуючі сигнали на червоний, жовтий та зелений індикатори світлофора, що керує транспортним потоком у головному напрямку, відповідно, як «ЧГ», «ЖГ» та «ЗГ». Для світлових індикаторів світлофора, що керує транспортним потоком у другорядному напрямку, керуючі сигнали, відповідно, будуть «ЧД», «ЖД» та «ЗД».

З урахуванням заданої структури світлофорного циклу та перетворення неперервної вихідної величини таймера на чотири дискретні величини таблиця істинності пристрою керування світлофорами на перехресті буде виглядати наступним чином:

Табл.3.6. Таблиця істинності дискретного пристрою керування світлофорами за умови жорсткого однопрограмного керування

T1	T2	T3	T4	ЧГ	ЖГ	ЗГ	ЧД	ЖД	ЗД
1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
0	0	0	1	0	1	0	0	1	0

Наведемо також логічні функції, що описують жорсткий функціональний алгоритм керування світлофорними об'єктами на перехресті згідно заданій структурі світлофорного циклу:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ЧГ} = \text{T3} \\ \text{ЖГ} = \text{T2} \vee \text{T4} \\ \text{ЗГ} = \text{T1} \\ \text{ЧД} = \text{T1} \\ \text{ЖД} = \text{T2} \vee \text{T4} \\ \text{ЗД} = \text{T3} \end{array} \right. .$$

Розробимо в першому редакторі задач програми «Genie» на основі визначених вище логічних функцій комбінаційну схему дискретного пристрою



керування світлофорами (рис.3.9) як продовження логічної комбінаційної схеми для перетворення неперервної вихідної величини таймера на сукупність дискретних величин.

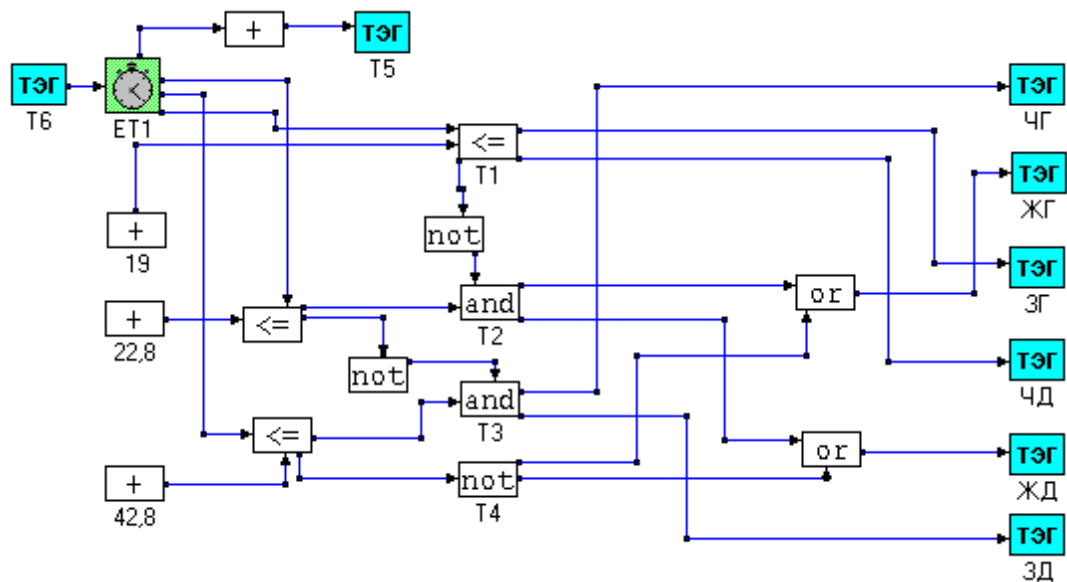


Рис.3.9. Комбінаційна схема дискретного пристрою керування світлофорами на перехресті згідно жорсткому однопрограмному алгоритму керування

Як бачимо з рис.3.9, виходи пристрою керування, на яких формуються керуючі сигнали «ЧГ», «ЗГ», «ЧД» та «ЗД», напряму з'єднані з одним із дискретних входів «Т1» або «Т3», оскільки у логічних функціях для цих сигналів в правих частинах присутня тільки одна вхідна величина «Т1» або «Т3». Водночас, згідно логічним функціям, керуючі сигнали «ЖГ» та «ЖД» є результатами виконання операції «АБО» над вхідними величинами «Т2» та «Т4».

Нижче представлений людино-машинний інтерфейс у вигляді спрощеної схеми перехрестя із розміщенням на ній моделей світлофорних об'єктів, розроблений в редакторі форм програми «Genie» (рис.3.10). Схема перехрестя накреслена за допомогою прямих ліній із використанням відповідного інструменту бібліотеки редактора форм. Головний напрямок руху транспорту на перехресті вказаний стрілкою. Модель кожного світлофорного об'єкта складається з трьох світлових індикаторів, які через локальні меню настроєні на

виходи відповідних блоків комбінаційної схеми пристрою керування в першому редакторі задач. Також через локальні меню світлові індикатори настроєні на відповідні кольори в пасивному та активному станах.

В цілях полегшення перевірки на правильність роботи комбінаційної схеми пристрою керування світлофорами до людино-машинного інтерфейсу (рис.3.10) також включені п'ять цифрових індикаторів для відображення неперервної вихідної величини таймера та чотирьох дискретних вхідних величин пристрою керування «Т1», «Т2», «Т3», та «Т4».

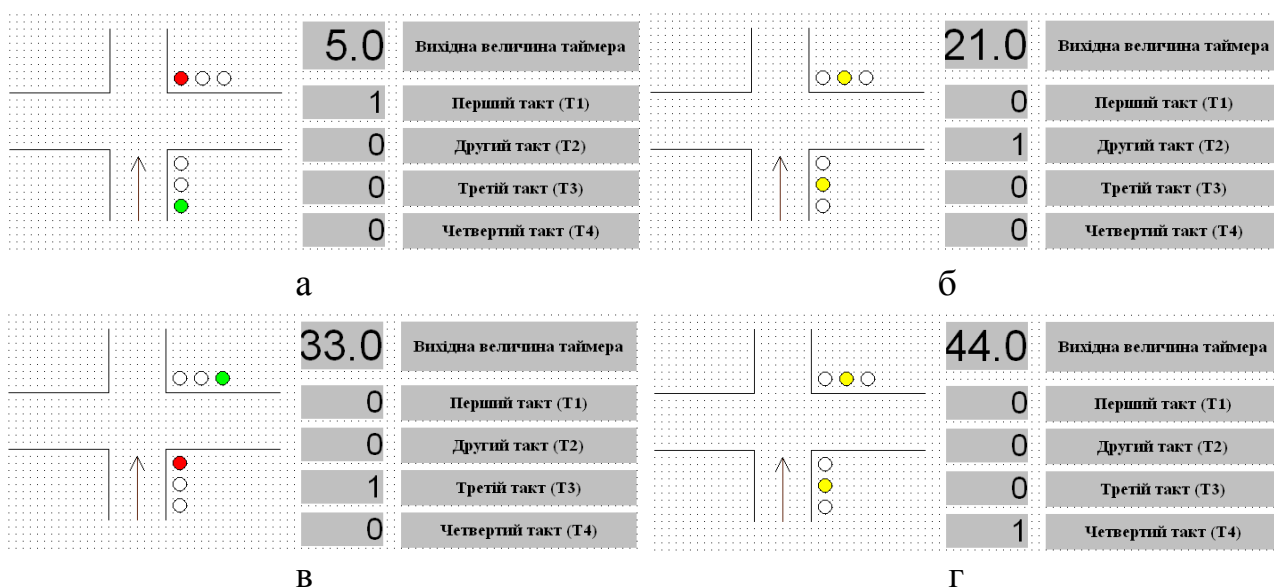


Рис.3.10. Людино-машинний інтерфейс для перевірки правильності роботи комбінаційної схеми дискретного пристрою керування світлофорами, розроблений в редакторі форм програми «Genie»

На рис.3.10 представлені чотири різні зображення людино-машинного інтерфейсу для кожного такту світлофорного циклу окремо. Наприклад, на 5 с триває перший такт світлофорного циклу (рис.3.10,а), для якого із чотирьох вхідних дискретних величин пристрою керування одиниці має дорівнювати тільки величина «Т1», а горіти повинні зелений індикатор світлофора у головному напрямку та червоний – у другорядному. Саме це і спостерігається на рис.3.10,а. Інші рисунки (рис.3.10,б,в,г) також підтверджують правильність

роботи логічної комбінаційної схеми дискретного пристрою керування світлофорами на перехресті, що реалізує задану структуру світлофорного циклу за алгоритмом жорсткого однопрограмного керування.

### 3.3. Особливості реалізації алгоритму координованого керування транспортними потоками на перехрестях «зелена хвиля»

Розглянемо особливості реалізації алгоритму координованого керування транспортними потоками «зелена хвиля» на двох перехрестях, за умови використання на кожному з них однакової структури світлофорного циклу, що зображена на рис.3.11.

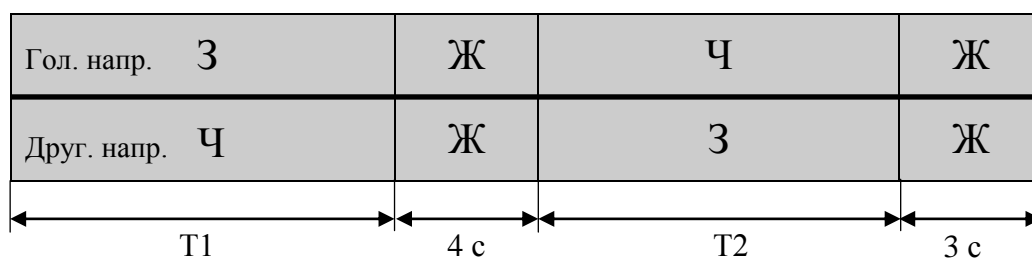


Рис.3.11. Структура світлофорного циклу, що задана для прикладу

Протягом розробки дискретного пристрою керування для реалізації алгоритму координованого керування транспортними потоками «зелена хвиля» на двох перехрестях ми повинні для заданих умов руху транспорту на перехрестях за допомогою графіку координації світлофорних сигналів визначити фазовий зсув між світлофорними циклами першого та другого перехрестя, а також тривалості їх основних тактів, при яких забезпечується «зелена хвиля», що дорівнює половині періоду світлофорного циклу першого перехрестя. Далі, з урахуванням визначених параметрів світлофорних циклів першого та другого перехрестя, розробимо комбінаційну схему пристрою координованого керування світлофорними об'єктами на двох перехрестях за

алгоритмом “зелена хвиля”. Також в редакторі форм програми «Genie» розробимо людино-машинний інтерфейс у вигляді спрощеної схеми перехресть та на його основі перевіримо правильність роботи комбінаційної схеми пристрою координованого керування світлофорами.

Умови руху транспорту на перехрестях: середня просторова швидкість транспортного потоку – 50 км/год. Відстань між перехрестями – 800 м. Ширина першого перехрестя у головному напрямку – 16 м. Ширина другого перехрестя у головному напрямку – 8 м. Припустимий діапазон зміни тривалості першого основного такту першого перехрестя – від 40 до 50 с. Припустимий діапазон зміни тривалості другого основного такту першого перехрестя – від 10 до 15 с. Припустимий діапазон зміни тривалості першого основного такту другого перехрестя – від 30 до 40 с. Припустимий діапазон зміни тривалості другого основного такту другого перехрестя – від 15 до 20 с.

Наведемо програму в математичному пакеті MathCad для побудови графіку координації світлофорних сигналів на двох перехрестях (за умови реалізації алгоритму “зелена хвиля”) і розрахунку на його основі фазового зсуву між світлофорними циклами першого та другого перехресть та тривалостей їх основних тактів.

Програма 3.1. Визначення параметрів світлофорних циклів для двох перехресть за умови реалізації алгоритму координованого керування світлофорами “зелена хвиля”

Вхідні дані:

середня просторова швидкість транспортного потоку :

$V := 50$  км / год

відстань між перехрестями:

$S := 800$  м

тривалості проміжних тактів у головному напрямку прийняти рівними 4 с:

$L_{pr\_gl} := 4$  с

тривалості проміжних тактів у другорядному напрямку прийняти рівними 3 с:

$L_{pr\_vt} := 3$  с

ширина першого перехрестя у головному напрямку:

$$H1 := 16 \quad \text{м}$$

ширина другого перехрестя у головному напрямку:

$$H2 := 8 \quad \text{м}$$

припустимий діапазон зміни тривалості першого основного такту першого перехрестя: від 40 до 50 с. На початковому етапі приймаємо:

$$L\_os\_1 := 45 \quad \text{с}$$

припустимий діапазон зміни тривалості другого основного такту першого перехрестя: від 10 до 15 с. На початковому етапі приймаємо:

$$L\_os\_2 := 13 \quad \text{с}$$

припустимий діапазон зміни тривалості першого основного такту другого перехрестя: від 30 до 40 с;

припустимий діапазон зміни тривалості другого основного такту другого перехрестя: від 15 до 20 с;

тривалість "зеленої хвилі" повинна дорівнювати половині періоду світлофорного циклу першого перехрестя.

Кут нахилу ліній сітки графіку координації світлофорних сигналів відповідає швидкості транспортного потоку, що має розмірність "метрів в секунду":

$$V := V \cdot \frac{1000}{3600} \quad V = 13.889 \quad \text{м/с}$$

Прийmemo крок сітки графіку координації світлофорних сигналів рівним половині періоду світлофорного циклу першого перехрестя (це є також тривалістю "зеленої хвилі"):

$$L\_hv := \frac{L\_os\_1 + L\_pr\_gl + L\_os\_2 + L\_pr\_vt}{2} \quad L\_hv = 32.5 \quad \text{с}$$

Введемо координати сітки графіку координації світлофорних сигналів по осям ординат та абсцис:

$$y(t, n) := V \cdot (t - n \cdot L\_hv)$$

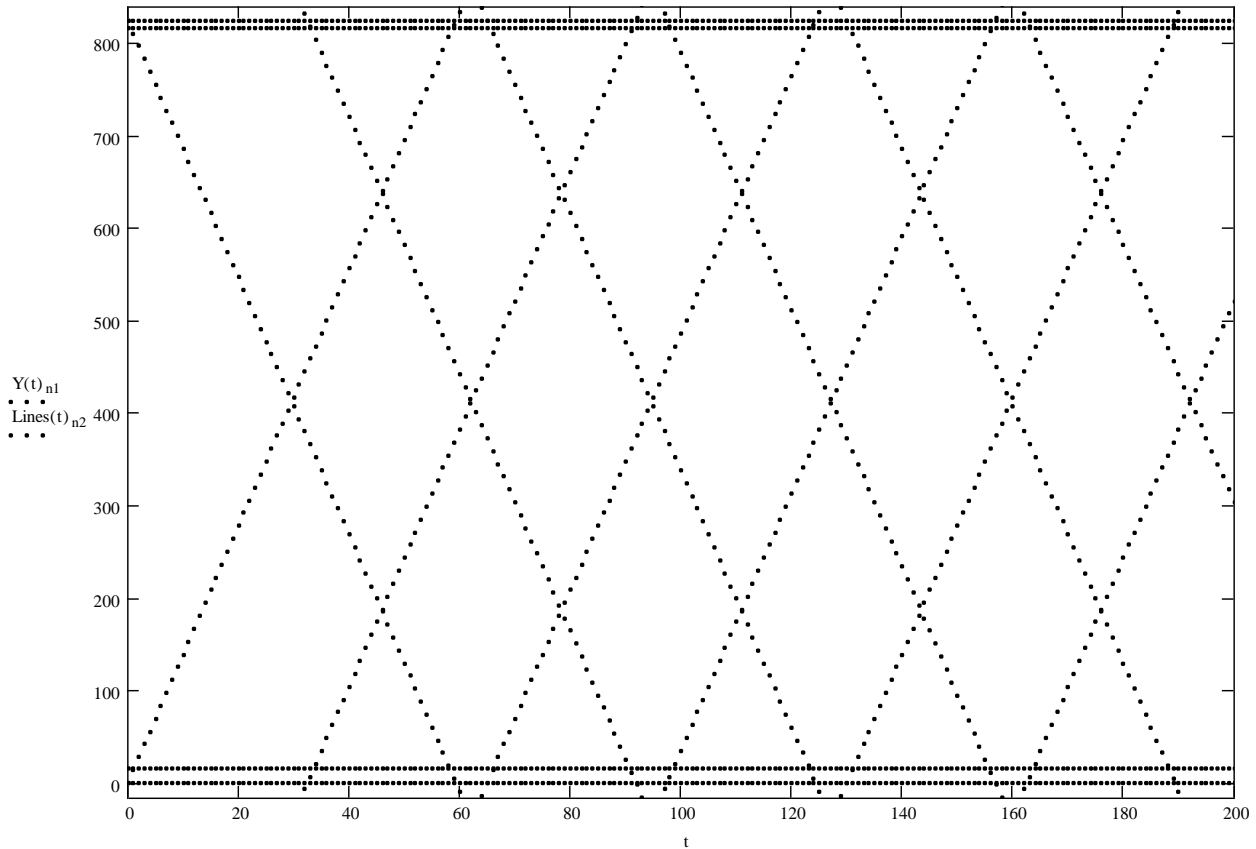
$$S\_Sum := H1 + S + H2$$

Кількість ліній сітки графіку координації світлофорних сигналів:

$$N := 12$$

$$\text{Lines}(t) := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. N \cdot 0.5 - 1 \\ \quad \text{Line}_i \leftarrow y(t + i \cdot L\_hv, i \cdot 2) \\ \quad \text{Line}_{i+N \cdot 0.5} \leftarrow S\_Sum - y(t + i \cdot L\_hv, i \cdot 2) \\ \text{Line} \end{cases} \quad Y(t) := \begin{pmatrix} 0 \\ H1 \\ H1 + S \\ H1 + S + H2 \end{pmatrix}$$

$t := 0..200$      $n1 := 0..3$      $n2 := 0..N - 1$



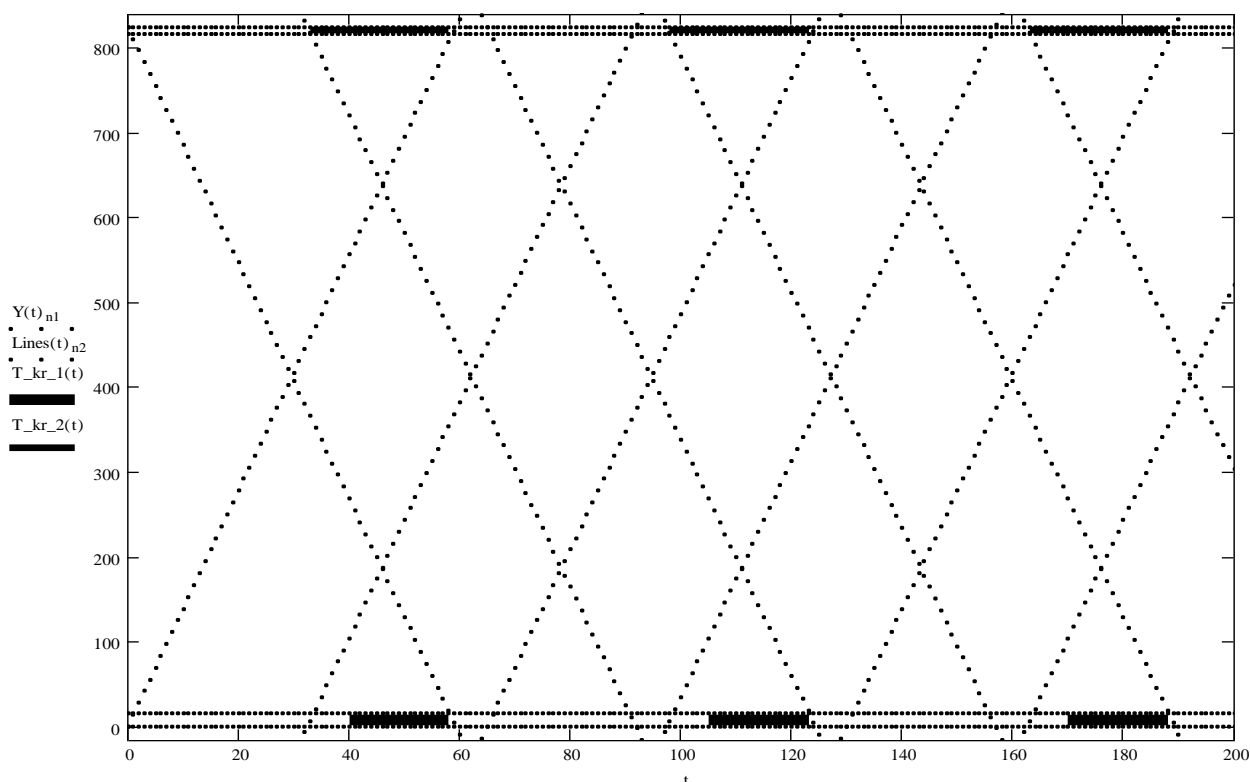
Покажемо на графіку координації світлофорних сигналів чорною заливкою такти світлофорних циклів, на яких в головному напрямку горить червоне та жовте світло. За умов створення "зеленої хвилі" дані такти повинні розташовуватись поза "зелених коридорів" на графіку координації світлофорних сигналів. Прийнемо "зеленими" непарні коридори. Тоді координати границь тактів із червоним та жовтим світлом у головному напрямку по осі абсцис, з урахуванням вимог до тривалостей тактів на першому та другому перехрестях, будуть наступними:

$$T_{kr\_1}(t) := \begin{cases} 0.5 \cdot H1 & \text{if } 40 \leq t \leq 58 \\ 0.5 \cdot H1 & \text{if } 40 + 2 \cdot L_{hv} \leq t \leq 58 + 2 \cdot L_{hv} \\ 0.5 \cdot H1 & \text{if } 40 + 4 \cdot L_{hv} \leq t \leq 58 + 4 \cdot L_{hv} \end{cases}$$

$$T_{kr\_2}(t) := \begin{cases} H1 + S + 0.5 \cdot H2 & \text{if } L_{hv} \leq t \leq 58 \\ H1 + S + 0.5 \cdot H2 & \text{if } L_{hv} + 2 \cdot L_{hv} \leq t \leq 58 + 2 \cdot L_{hv} \\ H1 + S + 0.5 \cdot H2 & \text{if } L_{hv} + 4 \cdot L_{hv} \leq t \leq 58 + 4 \cdot L_{hv} \end{cases}$$

де 58 - це час в секундах, через який перша границя першого "зеленого коридору" перетинає протилежне перехрестя;

40 - це мінімальне допустиме значення тривалості першого основного такту першого перехрестя згідно вимогам до його діапазону змін (в секундах).



Знаючи в результаті аналізу графіку координації світлофорних сигналів тривалості тактів, протягом яких горить червоне та жовте світло у головному напрямку, розрахуємо тривалості других основних тактів світлофорних циклів для першого та другого перехресть:

$$T_{kr\_1} := 58 - 40 - L_{pr\_gl} - L_{pr\_vt} \quad T_{kr\_1} = 11 \text{ c}$$

$$T_{kr\_2} := 58 - L_{hv} - L_{pr\_gl} - L_{pr\_vt} \quad T_{kr\_2} = 18.5 \text{ c}$$

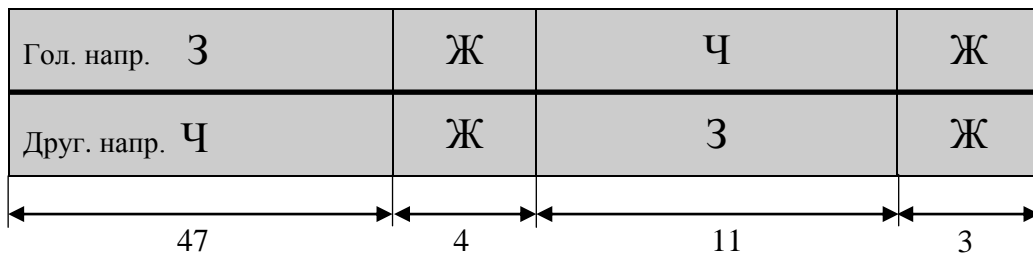
Відповідно, з урахуванням того, що період світлофорних циклів на всіх координовано регульованих перехрестях дорівнює подвійному коридору на графіку координації, тривалості перших основних тактів світлофорних циклів для першого та другого перехресть:

$$T_{zel\_1} := 2 \cdot L_{hv} - T_{kr\_1} - L_{pr\_gl} - L_{pr\_vt} \quad T_{zel\_1} = 47 \text{ c}$$

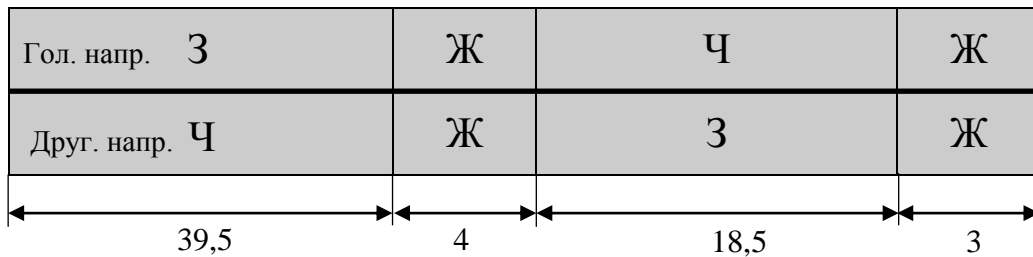
$$T_{zel\_2} := 2 \cdot L_{hv} - T_{kr\_2} - L_{pr\_gl} - L_{pr\_vt} \quad T_{zel\_2} = 39.5 \text{ c}$$

Розраховані тривалості основних тактів світлофорних циклів для першого та другого перехресть відповідають вимогам, висунутим до них у завданні до практичної роботи, щодо діапазону, в якому вони повинні знаходитись.

Отже, як результат виконання програми 3.1, для першого перехрестя маємо структуру світлофорного циклу наступного вигляду:



Відповідно, для другого перехрестя структура світлофорного циклу має такий вигляд:



Також на побудованому графіку координації світлофорних сигналів відзначимо незначний фазовий зсув між світлофорними циклами першого і другого перехресть, що приблизно дорівнює 3 с.

На основі визначених структур світлофорних циклів першого та другого перехресть та з урахуванням фазового зсуву між ними в програмі «Genie» розроблена комбінаційна схема дискретного пристрою координованого керування світлофорами (рис.3.12).

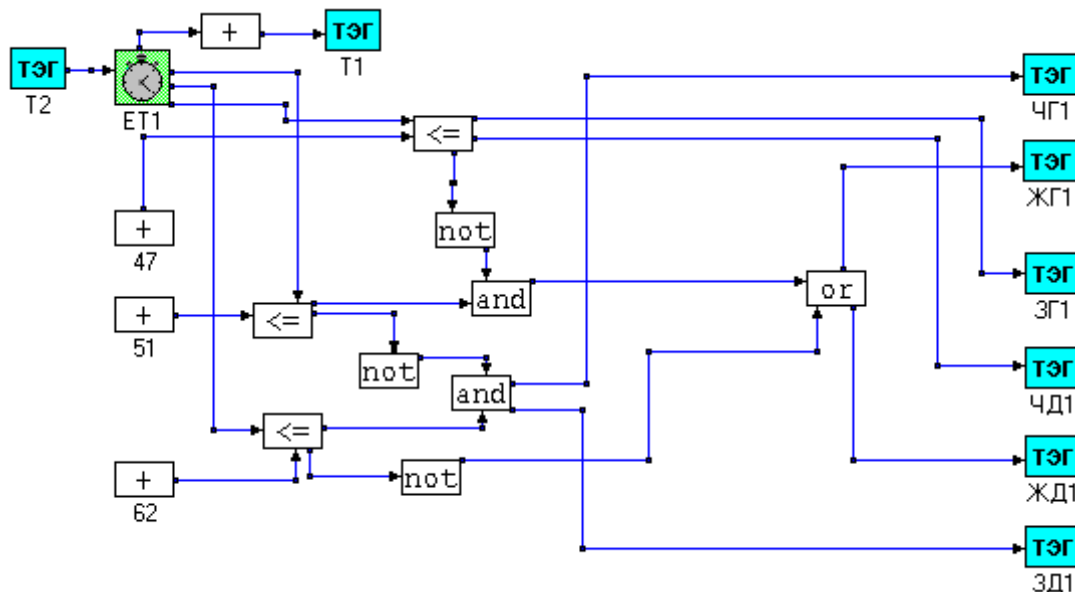


Рис.3.12. Перша частина комбінаційної схеми дискретного пристрою координованого керування світлофорами



Комбінаційна схема складається з двох частин, перша з яких виконує функцію керування світлофорами на першому перехресті, а друга – на другому. Перша частина комбінаційної схеми реалізована в першому редакторі задач за принципом, описаним у підрозділі 3.2, та представлена на рис.3.12.

Друга частина комбінаційної схеми дискретного пристрою координованого керування світлофорами реалізована в другому редакторі задач та показана на рис.3.13. Із-за однаковості структур світлофорних циклів для обох перехресть друга частина комбінаційної схеми майже повторює першу. Єдиним нововведенням є ділянка схеми на рис.3.13, що забезпечує затримку часу на 3 с (обведена пунктирною лінією). Причому для світлофорного циклу другого перехрестя використовується той самий таймер, що і для першого, вихідна величина якого для організації скидання таймера передається з першої задачі до другої за допомогою віртуального тега «T1».

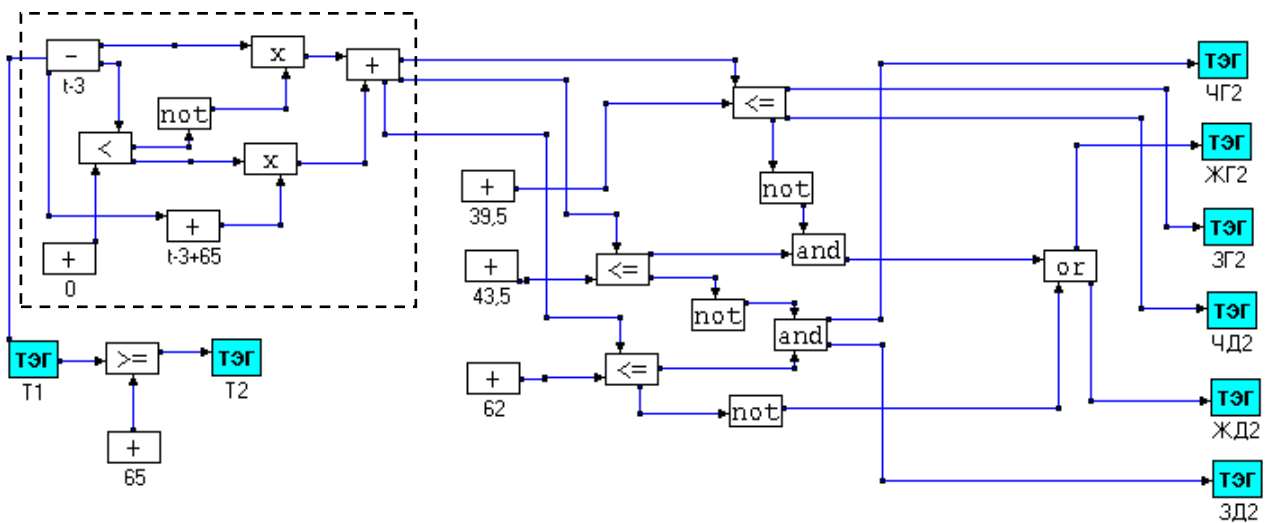


Рис.3.13. Друга частина комбінаційної схеми дискретного пристрою координованого керування світлофорами

Для перевірки правильності роботи комбінаційної схеми дискретного пристрою координованого керування світлофорами на двох перехрестях за алгоритмом “зелена хвиля” розроблений людино-машинний інтерфейс у вигляді спрощеної схеми перехресть із розміщенням на ній імітаційних моделей

світлофорних об'єктів, що керують транспортними потоками у головному та другорядному напрямках (рис.3.14).



Рис.3.14. Людино-машинний інтерфейс у вигляді спрощеної схеми перехресть із розміщенням на ній імітаційних моделей світлофорних об'єктів, реалізований в редакторі форм програми «Genie»

Людино-машинний інтерфейс на рис.3.14 зображений для моменту закриття “зеленої хвилі”, коли на другому перехресті вже наступив другий основний такт, а на першому триває остання секунда першого основного такту. Це видно за квадратними світловими індикаторами, що настроєні на дискретні вхідні величини пристрою координованого керування. Також на рис.3.14 видно, що поточний час світлофорного циклу другого перехрестя менше за поточний час світлофорного циклу першого перехрестя на 3 с. Переключення індикаторів світлофорів на другому перехресті відбувається саме за зміщеним часом. Це підтверджує рис.3.15 – перший проміжний такт на другому перехресті за структурою світлофорного циклу для даного перехрестя повинен бути між 39,5 та 43,5 с, що і має місце за зміщеним часом (за поточним часом для

світлофорного циклу першого перехрестя, що дорівнює 46 с, вже був би другий основний такт).

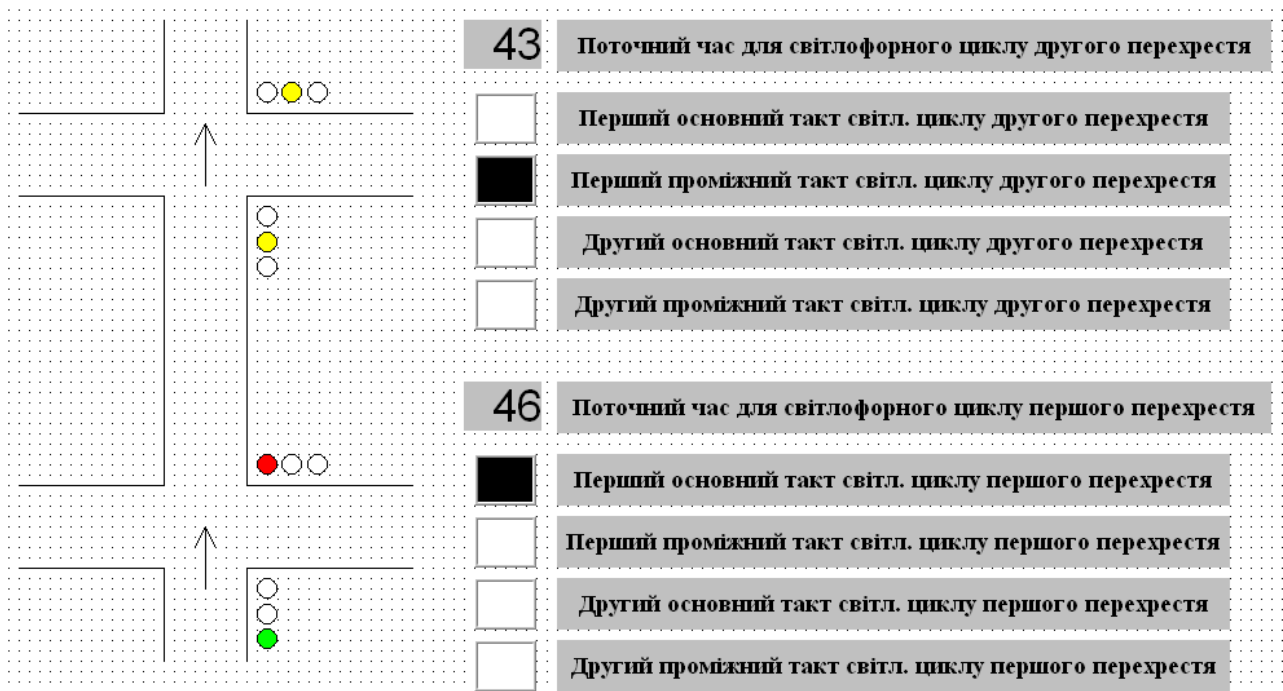


Рис.3.15. Людино-машинний інтерфейс у вигляді спрощеної схеми перехресть із розміщенням на ній імітаційних моделей світлофорних об'єктів, реалізований в редакторі форм програми «Genie»

Таким чином, в результаті аналізу роботи комбінаційної схеми дискретного пристрою координованого керування світлофорами на двох перехрестях на основі розробленого людино-машинного інтерфейсу у вигляді спрощеної схеми перехресть можна зробити висновок про те, що комбінаційна схема дійсно реалізує алгоритм “зелена хвиля” із параметрами світлофорних циклів перехресть, які визначені по графіку координації світлофорних сигналів.

## Контрольні завдання

1. Для заданих залежностей чотирьох вихідних величин дискретного пристрою керування від чотирьох вхідних у вигляді логічних функцій (табл.3.7) розробити таблицю істинності та комбінаційну схему. Реалізувати розроблену комбінаційну схему пристрою керування в середі scada-програми «Genie» із використанням логічних елементів, що виконують базові операції булевої алгебри. Перевірити на основі імітаційного моделювання в середі scada-програми «Genie» відповідність реалізованої залежності вихідних величин від вхідних заданих залежності.

Таблиця 3.7. Варіанти завдань до виконання контрольного завдання №1

№ Вар.	Вихідні величини пристрою керування			
	Y1	Y2	Y3	Y4
1	$(\bar{X}_1 \wedge X_3) \vee X_4$	$X_4 \vee (X_2 \wedge X_3)$	$(X_1 \wedge X_3) \vee (X_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge X_4)$	$(X_2 \wedge X_3) \vee X_1$
2	$(X_2 \wedge X_3 \wedge X_4) \vee (X_1 \wedge X_4)$	$(X_1 \wedge \bar{X}_4) \vee (X_2 \wedge X_3)$	$(X_2 \wedge X_3) \vee X_4$	$\bar{X}_1 \vee X_4$
3	$X_2 \vee (\bar{X}_3 \wedge X_4)$	$(\bar{X}_2 \wedge X_4) \vee (X_1 \wedge X_3)$	$(\bar{X}_1 \wedge X_2 \wedge X_3) \vee X_4$	$X_3 \vee (X_1 \wedge X_2)$
4	$(X_2 \wedge X_4) \vee \bar{X}_2$	$\bar{X}_2 \vee X_3$	$(X_1 \wedge X_2) \vee X_4$	$(X_2 \wedge X_3) \vee (X_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge X_3)$
5	$X_3 \vee \bar{X}_4$	$(X_2 \wedge \bar{X}_3 \wedge X_4) \vee X_1$	$X_3$	$(X_2 \wedge X_3) \vee (\bar{X}_1 \wedge X_4)$
6	$X_1$	$\bar{X}_3 \vee (X_1 \wedge X_4)$	$X_1 \vee X_3$	$(X_2 \wedge X_3 \wedge \bar{X}_4) \vee (X_1 \wedge X_4)$
7	$X_1 \vee (\bar{X}_3 \wedge X_4)$	$X_1$	$(X_2 \wedge X_3 \wedge X_4) \vee (\bar{X}_2 \wedge X_3)$	$X_2 \vee (X_1 \wedge X_3)$
8	$(X_3 \wedge X_4) \vee (X_2 \wedge X_4)$	$(X_1 \wedge X_3 \wedge X_4) \vee (X_2 \wedge \bar{X}_4)$	$(X_1 \wedge X_3) \vee X_3$	$\bar{X}_1 \vee X_2$
9	$(X_2 \wedge X_4) \vee \bar{X}_4$	$X_3 \vee (X_1 \wedge X_4)$	$(X_2 \wedge X_3) \vee (X_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge X_4)$	$(X_1 \wedge X_3 \wedge X_4) \vee X_2$
10	$(X_2 \wedge X_3 \wedge X_4) \vee (X_1 \wedge \bar{X}_4)$	$(X_1 \wedge X_2) \vee (X_3 \wedge \bar{X}_4)$	$(X_1 \wedge X_3) \vee X_2$	$\bar{X}_1 \vee X_3$
11	$X_1 \vee (\bar{X}_3 \wedge X_4)$	$(X_1 \wedge X_3) \vee (X_2 \wedge X_4)$	$(\bar{X}_1 \wedge X_2 \wedge X_3) \vee (X_2 \wedge X_4)$	$X_1 \vee (X_3 \wedge X_4)$
12	$(X_3 \wedge X_4) \vee (X_1 \wedge X_2)$	$X_3 \vee \bar{X}_4$	$(X_3 \wedge X_4) \vee X_1$	$(X_2 \wedge X_4) \vee (X_1 \wedge X_3 \wedge \bar{X}_4)$

13	$X1 \vee \overline{X4}$	$(X1 \wedge X3 \wedge X4) \vee X2$	$X2$	$(X1 \wedge X4) \vee (\overline{X1} \wedge X2)$
14	$X4$	$X3 \vee (X1 \wedge \overline{X2})$	$X1 \vee X3$	$(\overline{X1} \wedge X3 \wedge X4) \vee (X1 \wedge X2)$
15	$X3 \vee (X2 \wedge \overline{X4})$	$X4$	$(X1 \wedge X2 \wedge X3) \vee (X1 \wedge \overline{X4})$	$X3 \vee (X1 \wedge X2)$
16	$(X1 \wedge X3) \vee (X2 \wedge X4)$	$(X1 \wedge X3 \wedge \overline{X4}) \vee (X1 \wedge X2)$	$(X1 \wedge X2) \vee X4$	$\overline{X2} \vee X4$
17	$(X3 \wedge \overline{X4}) \vee X2$	$X2 \vee (X1 \wedge X4)$	$(\overline{X2} \wedge X3) \vee (X1 \wedge X3 \wedge X4)$	$(X1 \wedge X2 \wedge X3) \vee X4$
18	$(X2 \wedge X3 \wedge \overline{X4}) \vee (\overline{X2} \wedge X4)$	$(X3 \wedge X4) \vee (X2 \wedge \overline{X4})$	$(X1 \wedge X4) \vee X2$	$X2 \vee X3$
19	$X3 \vee (X2 \wedge X4)$	$(\overline{X2} \wedge X3) \vee (X3 \wedge X4)$	$(X1 \wedge X2 \wedge X4) \vee X3$	$\overline{X4} \vee (X1 \wedge X2)$
20	$(X3 \wedge X4) \vee (X2 \wedge \overline{X3})$	$X2 \vee X3$	$(X2 \wedge X4) \vee \overline{X4}$	$(X3 \wedge X4) \vee (X1 \wedge X2 \wedge X4)$
21	$\overline{X2} \vee X3$	$(\overline{X2} \wedge X3 \wedge X4) \vee (X1 \wedge X4)$	$X2$	$(X1 \wedge X3) \vee (\overline{X1} \wedge X4)$
22	$X4$	$\overline{X2} \vee (X2 \wedge X3)$	$X2 \vee X4$	$(X1 \wedge X2 \wedge X4) \vee (\overline{X3} \wedge X4)$
23	$\overline{X3} \vee (X3 \wedge X4)$	$X4$	$(X1 \wedge X2 \wedge X3) \vee (X1 \wedge \overline{X4})$	$X3 \vee (X1 \wedge X4)$
24	$(X1 \wedge X4) \vee (\overline{X2} \wedge X3)$	$(X2 \wedge X3 \wedge X4) \vee (X1 \wedge \overline{X4})$	$(X2 \wedge X3) \vee \overline{X2}$	$X1 \vee X4$
25	$X2 \vee X4$	$(X1 \wedge X2 \wedge X3) \vee (\overline{X2} \wedge X4)$	$X4$	$(\overline{X2} \wedge X4) \vee (X2 \wedge X3)$

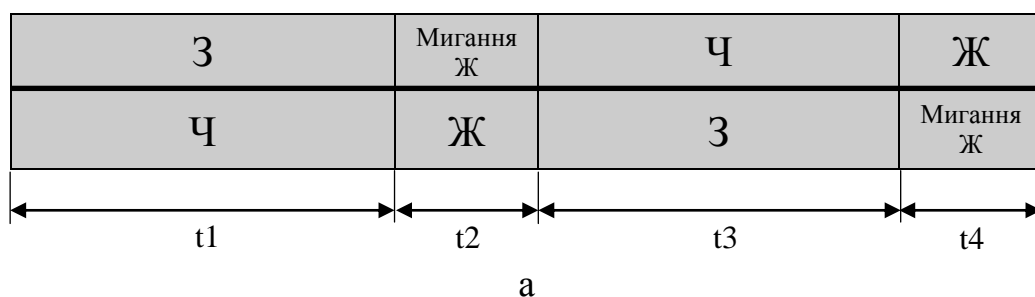
2. Для заданої структури світлофорного циклу (табл.3.8) за умови жорсткого однопрограмного керування транспортними потоками обґрунтувати дискретні вхідні  $X$  і вихідні  $Y$  величини пристрою керування світлофорними об'єктами на перехресті, та встановити між ними залежність у вигляді логічних функцій та таблиці істинності. На основі отриманих логічних функцій, використовуючи базові операції булевої алгебри, розробити комбінаційну схему пристрою керування світлофорними об'єктами на перехресті з її реалізацією в редакторі задач програми «Genie». В редакторі форм створити людино-машинний інтерфейс у вигляді спрощеної схеми перехрестя із розміщенням на ній моделей світлофорних об'єктів і на його основі перевірити

правильність роботи комбінаційної схеми дискретного пристрою керування світлофорами.

Таблиця 3.8. Варіанти завдань до виконання контрольного завдання №2

№ Вар.	Структура цикла (рис.3.16)	t1	t2	t3	t4	t5	t <sub>п</sub>
1	а	19	3,5	31	4,5	-	-
2	б	38	2,7	49	4,1	2,2	0,8
3	в	15	2,5	36	3,6	-	-
4	г	32	3,2	18	3,9	-	1,5
5	а	17	4,5	25	3,0	-	-
6	б	58	2,9	31	3,8	2,0	1,1
7	в	21	3,3	32	3,9	-	-
8	г	30	2,1	23	3,1	-	1,4
9	а	35	3,5	17	3,1	-	-
10	б	44	2,8	51	3,3	2,3	0,9
11	в	15	3,0	31	3,7	-	-
12	г	42	2,3	31	3,9	-	2,2
13	а	17	3,5	36	4,0	-	-
14	б	38	2,8	50	4,2	3,2	0,5
15	в	37	2,9	19	3,3	-	-
16	г	36	2,5	27	3,4	-	1,8
17	а	16	3,0	36	2,7	-	-
18	б	48	2,1	37	2,8	2,4	1,0
19	в	26	2,9	28	3,0	-	-
20	г	41	3,1	56	4,1	-	1,5
21	а	18	3,0	35	3,5	-	-
22	б	42	2,3	53	3,7	2,9	1,2
23	в	19	2,7	22	3,4	-	-
24	г	43	3,2	59	4,5	-	1,6
25	а	38	4,0	27	2,7	-	-

Нижче у якості вхідних даних для виконання контрольного завдання №2 також наведені різні варіанти структур світлофорного циклу (рис.3.16).



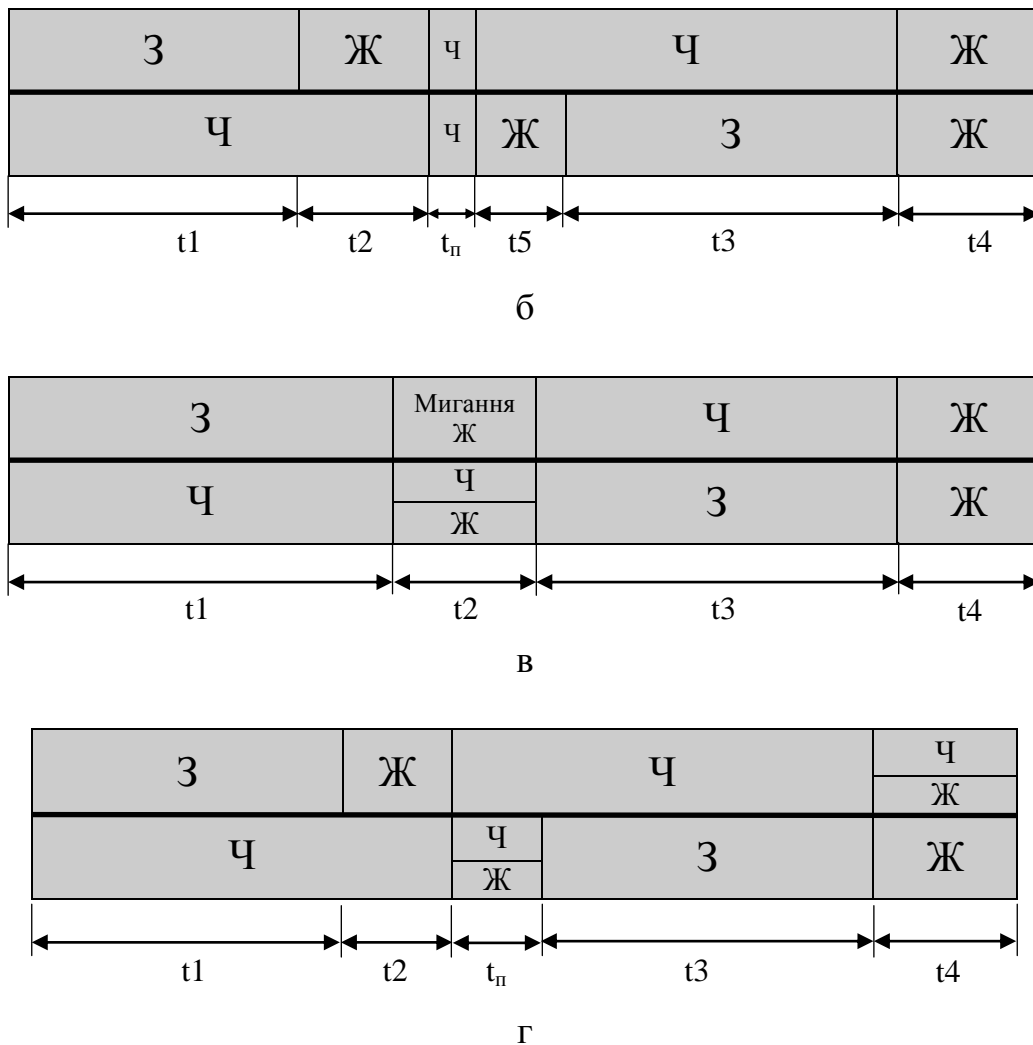


Рис.3.16. Варіанти структур світлофорного циклу за умови реалізації жорсткого однопрограмногo алгоритму керування світлофорами

3. Для заданих умов руху транспорту на перехрестях (табл.3.9.) за допомогою графіку координації світлофорних сигналів визначити фазовий зсув між світлофорними циклами першого та другого перехресть, а також тривалості їх основних тактів, при яких забезпечується “зелена хвиля”, що дорівнює половині періоду світлофорного циклу першого перехрестя. Для обох перехресть використовується однакова структура світлофорного циклу, що зображена на рис.3.17.

З урахуванням визначених параметрів світлофорних циклів першого та другого перехресть розробити комбінаційну схему пристрою координованого

керування світлофорними об'єктами на двох перехрестях за алгоритмом “зелена хвиля”. Розробити в редакторі форм програми «Genie» людино-машинний інтерфейс у вигляді спрощеної схеми перехресть та на його основі перевірити правильність роботи комбінаційної схеми пристрою координованого керування світлофорами.

Таблиця 3.9. Варіанти завдань до виконання контрольного завдання №3

№ Вар.	$V_{т.п.}$ , км/год	Діапазон зміни T1 на I перехр., с	Діапазон зміни T2 на I перехр., с	Діапазон зміни T1 на II перехр., с	Діапазон зміни T2 на II перехр., с	Відстань між перехр., м	Ширина дороги на I перехр., м	Ширина дороги на II перехр., м
1	40	35 ÷ 45	14 ÷ 25	45 ÷ 55	9 ÷ 19	720	20	14
2	45	45 ÷ 55	9 ÷ 19	35 ÷ 45	14 ÷ 25	790	25	10
3	30	35 ÷ 45	14 ÷ 25	45 ÷ 55	9 ÷ 19	530	30	16
4	35	30 ÷ 40	14 ÷ 25	40 ÷ 50	9 ÷ 19	550	24	11
5	50	37 ÷ 47	14 ÷ 25	47 ÷ 57	9 ÷ 19	950	16	10
6	55	48 ÷ 58	9 ÷ 19	38 ÷ 48	14 ÷ 25	1050	18	12
7	30	33 ÷ 43	14 ÷ 25	42 ÷ 52	9 ÷ 19	510	21	9
8	40	46 ÷ 56	9 ÷ 19	37 ÷ 47	14 ÷ 25	740	23	10
9	55	35 ÷ 45	14 ÷ 25	44 ÷ 54	9 ÷ 19	990	25	19
10	45	44 ÷ 54	9 ÷ 19	36 ÷ 46	14 ÷ 25	810	27	17
11	35	30 ÷ 40	14 ÷ 25	40 ÷ 50	9 ÷ 19	560	22	16
12	25	50 ÷ 60	9 ÷ 19	40 ÷ 55	9 ÷ 19	500	25	14
13	50	55 ÷ 65	9 ÷ 19	45 ÷ 57	9 ÷ 19	1100	34	9
14	25	41 ÷ 55	9 ÷ 19	50 ÷ 60	9 ÷ 19	510	20	11
15	30	47 ÷ 57	9 ÷ 19	38 ÷ 49	14 ÷ 25	580	22	13
16	35	35 ÷ 46	14 ÷ 25	44 ÷ 54	9 ÷ 19	630	26	15
17	40	44 ÷ 54	9 ÷ 19	35 ÷ 46	14 ÷ 25	720	26	14
18	45	37 ÷ 48	14 ÷ 25	46 ÷ 56	9 ÷ 19	840	28	12
19	50	33 ÷ 44	14 ÷ 25	42 ÷ 52	9 ÷ 19	860	30	16
20	55	45 ÷ 56	9 ÷ 19	35 ÷ 47	14 ÷ 25	1000	32	19
21	25	37 ÷ 49	14 ÷ 25	47 ÷ 57	9 ÷ 19	480	24	10
22	30	34 ÷ 46	14 ÷ 25	44 ÷ 55	9 ÷ 19	540	21	9
23	35	43 ÷ 54	9 ÷ 19	33 ÷ 45	14 ÷ 25	610	23	11
24	40	45 ÷ 57	9 ÷ 19	36 ÷ 47	14 ÷ 25	730	27	12
25	45	37 ÷ 48	14 ÷ 25	47 ÷ 58	9 ÷ 19	830	31	18



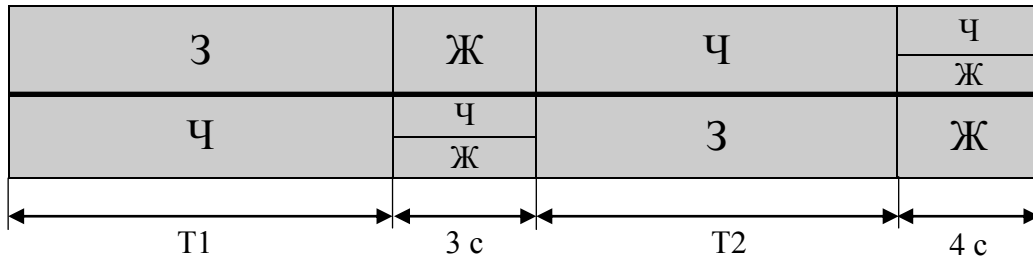


Рис.3.17. Задана структура світлофорного циклу

## Список літератури

1. Matlab в инженерных и научных расчетах / А. Ф. Дащенко, В. Х. Кириллов, Л. В. Коломиец, В. Ф. Оробей. — Одесса : Астропринт, 2003. — 212 с.
2. Иванов В. А. Теория дискретных систем автоматического регулирования / В. А. Иванов, А. С. Ющенко. — М. : Наука, 1983. — 336 с.
3. Черных И. В. Simulink : среда создания инженерных приложений / Черных И. В. — М. : Диалог-Мифи, 2003. — 496 с.
4. Дьяконов В. П. Matlab 6 / 6.1 / 6.5 и Simulink 4 / 5. Основы применения / Дьяконов В. П. — М. : Солон-Пресс, 2004. — 768 с.
5. Основы теории транспортных систем / Учебное пособие П. Ф. Горбачев, И. А. Дмитриев. — Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2002. — 202 с.
6. Очков В. Ф. Mathcad 14 для студентов и инженеров. — С.-Пб. : БХВ — Петербург, 2007. — 368 с.
7. Ожиганов А.А. Теория автоматов. Учебное пособие. — С.-Пб. : НИУ ИТМО, 2013. — 84 с.
8. Литвиненко В. П. Автоматизированные системы управления дорожным движением. Учебное пособие для вузов. — Мариуполь : Державний ВНЗ «ПДТУ», 2004. — 260 с.
9. Основы теории транспортных систем: учеб. пособие / А. Э. Горев; СПбГАСУ. — СПб., 2010. — 214 с.

*Навчальне видання*

**Таран** Ігор Олександрович

**Бубліков** Андрій Вікторович

**ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ  
КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ОБ'ЄКТАМИ  
НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ СИСТЕМ**

*Навчальний посібник*

Видано в редакції авторів

Підписано до друку 13.07.2016. Формат 30×42/4.  
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 8,1.  
Обл.-вид. арк. 8,1. Тираж 30 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано  
у Державному ВНЗ “Національний гірничий університет”.  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.