

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Комп'ютерне моделювання динаміки систем»
для магістрантів спеціальності
8.05020101 – комп'ютеризовані системи управління та автоматика

ЗАТВЕРДЖЕНО
кафедрою системотехніки.
Протокол № 11
від 20.03.2015 р.

Харків 2015

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Комп'ютерне моделювання динаміки систем» для магістрантів спеціальності 8.05020101 – комп'ютеризовані системи управління та автоматика / Упор. В.В. Безкоровайний. – Харків: ХНУРЕ, 2015. – 42 с.

Упорядник В.В. Безкоровайний.

Рецензент Є.І. Кучеренко, д-р техн. наук, професор, професор кафедри ІІІ.

ЗМІСТ

Загальні положення	4
1 Дослідження динаміки об'єктів за допомогою аналітичних моделей	5
2 Дослідження характеристик показникових запізнень імітаційних моделей динаміки	12
3 Ідентифікація показникових запізнень імітаційних моделей динаміки	17
4 Дослідження динаміки виробничо-збутової системи	22
Перелік посилань	29
Додаток А. Загальний опис і технологія роботи з пакетом програм <i>Vensim</i> ..	30

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

У процесах проектування, удосконалення чи керування переважної більшості технічних і організаційно-технічних об'єктів виникає необхідність встановлення їх динамічних властивостей. Для таких об'єктів характерною є контрінтуїтивна поведінка, що не дозволяє досліднику адекватно спрогнозувати їх динаміку. Виходом вважається використання комп'ютерного моделювання, що дозволяє істотно скоротити час прийняття рішень, підвищити їхню якість, спрогнозувати наслідки.

Лабораторний практикум орієнтовано на активну індивідуальну діяльність кожного студента. Виконання лабораторних робіт спрямоване на придбання студентами практичних навичок побудови моделей і дослідження динаміки процесів функціонування об'єктів методами математичного моделювання. Кожна робота передбачає створення, модернізацію або деталізацію запропонованої моделі, проведення експериментів з машинною моделлю, аналіз результатів моделювання.

Практикум передбачає використання студентами сучасної технології розв'язання задач моделювання із застосуванням комп'ютерних засобів, пакетів і систем моделювання. Тому при підготовці до виконання робіт варто вивчити особливості режимів роботи та застосування програмно-технічних засобів моделювання, що використовуються. З метою скорочення часу на оформлення звіту його загальні складові частини рекомендується виконувати в процесі підготовки до роботи.

Допуск до виконання лабораторної роботи можливий тільки після перевірки підготовленості студентів за контрольними питаннями і завданнями. Для уникнення помилок у процесі виконання роботи варто проводити аналіз поточних результатів за кожним з її етапів. Після закінчення експериментів необхідно провести детальний аналіз отриманих результатів, створити електронний або друкований варіант звіту і захистити його в ході заняття.

Перед виконанням лабораторних робіт студенти повинні пройти інструктаж з техніки безпеки. Її вимог, як і положень інструкцій з поведінки студентів у лабораторії, а також прийнятої в університеті технології користування обчислювальною технікою, необхідно суворо дотримуватись протягом усього лабораторного практикуму.

Методичні вказівки створені й оформлені на основі основних вимог [1] і рекомендацій [2] на основі методичних вказівок [3].

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

1.1 Мета роботи

Вивчення методів аналітичного моделювання динаміки об'єктів, що описуються системами звичайних диференціальних рівнянь. Набуття навичок дослідження об'єктів засобами комп'ютерного моделювання. Експериментальна оцінка точності визначення траєкторії руху об'єкта.

1.2 Вказівки з організації самостійної роботи

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно: ознайомитися з постановкою задачі дослідження моделей динаміки об'єктів, що подаються у змінних стану; з'ясувати суть процедури перетворення моделей задач, що описуються системами звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР), до форми Коші; ознайомитися з методами аналітичного, чисельного та якісного дослідження моделей динаміки у вигляді систем ЗДР; повторити методи обчислення власних значень і векторів матриць, а також технологію розв'язання наведених вище задач у середовищі пакета програм *MathCAD* або йому подібного.

З цією метою можуть бути використані лекції з відповідних тем, матеріал, вказаний у переліку посилань [4, с. 13–20; 5, с. 228–238; 6; 7, с. 133–137; 8, с. 279–284], а також матеріал цих методичних вказівок.

Практична частина підготовки до виконання роботи включає: складання у середовищі обраного чи рекомендованого пакета програм модуля для визначення власних значень і векторів матриці об'єкта, побудови графіків, що відображають модельні траєкторії, а також загальну частину звіту до лабораторної роботи.

1.2.1 Опис задачі

Модель динаміки об'єкта у формі Коші з початковими умовами $Z(t_0) = Z^{(0)}$ подається системою ЗДР виду

$$\dot{Z} = A Z(t) + B \delta(t) + \xi(t), \quad (1.1)$$

де $Z(t)$ – шукана вектор-функція координат (станів) об'єкта розмірністю

3;

A – матриця постійних коефіцієнтів розмірністю 3×3 ;

$B = [b_1, b_2, b_3]^T$ – вектор керувальних впливів;

$\delta(t)$ – функція, що реалізує закон керування;

$\xi(t)$ – вектор-функція збурюючих впливів;

$Z^{(0)}$ – вектор початкових умов.

Необхідно дослідити динаміку об'єкта на відрізок часу $0 \leq t \leq 10$. За початкові умови $Z(t_0)$ вибрати один із власних векторів матриці A (такий, що відповідає раціональному власному значенню, та має всі ненульові компоненти).

При цьому вважати, що об'єкт функціонує в умовах стабільної перешкоди, тобто $\xi(t) = [\xi_1, \xi_2, \xi_3]^T$, а функція, що реалізує закон керування, має вигляд $\delta_i(t) = e^{b_i t}$, де $b_i, i = \overline{1,3}$ – коефіцієнти функції керування.

У процесі виконання лабораторної роботи необхідно:

- визначити початкові умови задачі;
- вибрати значення кроку моделювання і визначити за методом Рунге-Кутта траєкторію вільного руху об'єкта;
- визначити траєкторію вільного руху об'єкта за аналітичним методом;
- оцінити точність розв'язку, отриманого за методом Рунге-Кутта;
- за методом Рунге-Кутта визначити траєкторію руху об'єкта в умовах дії перешкоди $\xi(t)$;
- підібрати значення параметрів керуючого впливу b_1, b_2, b_3 , що забезпечують зміну координат вектора станів у заданому діапазоні $z_i^- \leq z_i(t) \leq z_i^+$, $i = \overline{1, n}$, де z_i^- , z_i^+ – відповідно мінімальне і максимальне допустимі значення i -ї координати стану.

1.2.2 Вибір початкових умов

Початкові умови задачі $Z(t_0)$ вибираються співпадаючими з одним із власних векторів матриці A . Для визначення власних векторів матриці необхідно попередньо обчислити власні значення $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, що є коренями характеристичного рівняння

$$\det(A - \lambda E) = 0, \quad (1.2)$$

де E – одинична матриця.

Власні вектори $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(n)}$ матриці A є розв'язками систем лінійних алгебраїчних рівнянь, що мають вигляд

$$(A - \lambda_i \cdot E) \cdot X^{(i)} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.3)$$

і визначаються з точністю до постійного множника.

1.2.3 Визначення траєкторії руху об'єкта

Рух об'єкта, що описується рівнянням (1.1) під впливом збурення $\xi(t)$ і керування $B\delta(t)$ називається вимушеним. Рух об'єкта при відсутності збурення $\xi(t)$ і керування $B\delta(t)$ називають вільним.

Для визначення траєкторії руху об'єкта необхідно розв'язати систему ЗДР (1.1) з початковими умовами $Z(t_0) = Z(0)$. Для розв'язання задачі у роботі рекомендується використовувати чисельне інтегрування системи ЗДР за методом Рунге-Кутта 4-го порядку.

Досліджувана модель подана у вигляді $\dot{Z} = f(t, Z)$, де f – деяка вектор-функція. Інтервал дослідження розбивається на часткові відрізки $[t_k, t_{k+1}]$, $k = 1, 2, \dots, k^* - 1$ із кроком h . Стан об'єкта у момент часу t_{k+1} визначається виходячи зі стану у момент часу t_k

$$Z^{(k+1)} = Z^{(k)} + \Delta Z^{(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, k^* - 1, \quad (1.4)$$

де $\Delta Z^{(k)} = (\theta_1 + 2\theta_2 + 2\theta_3 + \theta_4) / 6$;

$\theta_1 = h f(t_k, Z^{(k)})$; $\theta_2 = h f(t_k + h/2, Z^{(k)} + \theta_1/2)$;

$\theta_3 = h f(t_k + h/2, Z^{(k)} + \theta_2/2)$; $\theta_4 = h f(t_k + h, Z^{(k)} + \theta_3)$.

Крок розв'язання h вибирається виходячи з заданого значення допустимої похибки ε з урахуванням співвідношення $\varepsilon \sim h^5$. Уточнення розміру кроку виконувати шляхом порівняння результатів розрахунку траєкторії зі звичайним і половинним його значенням.

Аналітичний розв'язок задачі (1.1) у прийнятих раніше позначеннях може бути поданий у вигляді

$$Z(t) = e^{At} \cdot Z(0+) + \int_0^t e^{(A(t-\tau))} \cdot B \cdot \delta(\tau) d\tau + \int_0^t e^{(A(t-\tau))} \cdot \xi(\tau) d\tau. \quad (1.5)$$

Траєкторія вільного руху визначається першим доданком виразу (1.5). Для початкових умов $Z(0)$, що збігаються із власним вектором $X^{(i)}$ вона має вигляд

$$z_{i\theta}(t) = z_i(t) = Z(0) \cdot e^{\lambda_i \cdot t}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1.6)$$

Для оцінки похибки використовувати співвідношення

$$\varepsilon = \max_i \max_k |z_i(t_k) - z_{i\theta}(t_k)|, \quad (1.7)$$

де $z_i(t_k)$, $z_{i\theta}(t_k)$ – відповідно значення i -ї координати об'єкта в момент часу t_k , отримані за чисельним і аналітичним методами.

Як критерій під час вибору параметрів керуючого впливу (якості керування) $B = [b_1, b_2, b_3]$ використовувати мінімум модуля різниці між точками траєкторій вільного та керованого рухів

$$\varepsilon^0 = \max_i \max_k |z_{i\theta}(t_k) - z_i(t_k)| \rightarrow \min_b. \quad (1.8)$$

1.3 Опис лабораторної установки

Як лабораторна установка використовується персональна ЕОМ типу *IBM PC*. Для визначення власних значень, власних векторів і траєкторій руху рекомендується використовувати один із пакетів програм *MathCAD*, *MatLAB* або їм подібний. Ресурсні вимоги до ЕОМ визначаються вимогами до розмірів необхідної пам'яті, що висуваються версією пакета програм для розв'язання обчислювальних задач.

1.4 Порядок виконання роботи

Одержати у викладача варіант завдання (табл. 1.1) і додаткові вихідні дані.

Таблиця 1.1 – Варіанти завдань

Варіант	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	ξ_1	ξ_2	ξ_3
1	0,3	0	0	-0,2	0,2	0	0,7	0,5	-0,2	0,2	0,2	0,2
2	-0,2	0,7	-0,3	0	0,4	-0,8	0	0	0,1	-0,2	0,2	-0,1
3	0,2	-0,3	0	0	0,3	0	0,6	-0,7	-0,2	0,2	-0,3	0,2
4	-0,3	0,7	0,5	0	0,3	0	0	-0,6	0,2	-0,1	-0,2	0,2
5	0,3	0	0	-0,2	0,2	0	0,7	0,5	-0,2	0,2	0,1	0,2
6	-0,2	0,7	-0,5	0	-0,4	0,8	0	0	0,3	0,2	-0,2	0,1
7	0,2	0,3	0	0	-0,3	0	0,6	-0,7	-0,2	0,2	0,2	-0,1
8	-0,3	0,7	0,6	0	0,1	0	0	0,3	0,2	0,1	0,1	-0,1
9	0,5	0	0	-0,4	0,2	-0,8	-0,7	0	-0,6	0,2	0,1	0,1
10	0,5	0	0	-0,4	0,2	-0,8	-0,7	0	-0,6	0,2	0,1	0,1
11	-0,5	0	0	-0,4	0,2	0,8	0,7	0	0,6	0,3	0,2	0,2
12	0,2	0,3	-0,5	0	0,4	-0,6	0	0	0,3	-0,2	0,1	-0,1
13	0,4	0,6	0	0	-0,3	0	0,7	-0,7	-0,2	-0,3	0,2	-0,3
14	-0,5	0,7	0,5	0	0,1	0	0	-0,6	0,2	-0,2	0,1	-0,2
15	0,5	0	0	-0,4	0,2	-0,8	0,6	0	-0,6	0,1	0,3	0,1
16	0,6	0	0,4	0,7	0,2	-0,8	0	0	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2
17	0,3	0	0	-0,2	0,2	0	0,7	0,5	-0,2	0,2	0,2	0,2
18	-0,4	0,7	-0,3	0	0,4	-0,8	0	0	0,1	-0,2	0,2	-0,1
19	0,2	-0,3	0	0	0,3	0	0,6	-0,7	-0,2	0,2	-0,3	0,2
20	-0,3	0,7	0,5	0	0,3	0	0	-0,6	0,2	-0,1	-0,2	0,2
21	0,3	0	0	-0,2	0,2	0	0,7	0,5	-0,2	0,2	0,1	0,2
22	-0,2	0,7	-0,5	0	-0,4	0,8	0	0	0,3	0,2	-0,2	0,1
23	0,2	0,3	0	0	-0,3	0	0,6	-0,7	-0,2	0,2	0,2	-0,1
24	-0,3	0,7	0,6	0	0,1	0	0	0,3	0,2	0,1	0,1	-0,1
25	0,5	0	0	-0,4	0,2	-0,8	-0,7	0	-0,6	0,2	0,1	0,1

Визначити за рівняннями (1.2) – (1.3) власні значення і власні вектори матриці об'єкта A .

Вибрати початкове значення кроку моделювання (розв'язання задачі) h .

Здійснити для початкових умов $Z(o)$, що співпадають з одним із власних векторів $X^{(1)}$, $X^{(2)}$, $X^{(3)}$, за формулою (1.4) визначення траєкторії вільного

руху об'єкта за методом Рунге-Кутта зі звичайним h і половинним $h/2$ кроком. При необхідності повторювати розрахунок зі зменшеним кроком до забезпечення належної точності. Приклад модуля для визначення траєкторії вільного руху об'єкта в середовищі пакета *MathCAD* наведений на рис. 1.1.

Визначити траєкторію вільного руху об'єкта за аналітичним методом (1.6).

Оцінити за формулою (1.7) точність чисельного розв'язання.

За методом Рунге-Кутта визначити траєкторію руху об'єкта в умовах дії збурення $\xi(t)$.

Експериментальним шляхом підібрати значення параметрів керуючого впливу b_1, b_2, b_3 , що забезпечують зміну координат вектора станів у заданих межах $z_i^- \leq z_i(t) \leq z_i^+, i = \overline{1, n}$.

Зробити висновки, оформити і захистити звіт про виконану роботу. Висновки повинні містити відомості про відповідність отриманих результатів теорії, аналіз залежності точності (похибки) моделювання траєкторії об'єкта від кроку інтегрування системи ЗДР, вигляд найкращої для заданого класу за критерієм (1.8) функції керування, результати особистих спостережень, що зібрані у ході виконання експериментів.

Результатами експериментів є значення векторів координат об'єкта $Z(t)$ на інтервалі моделювання для розглянутих випадків руху.

1.5 Зміст звіту

Звіт має містити:

- титульний аркуш;
- мету роботи;
- постановку і вихідні дані задачі;
- математичні співвідношення для обчислення й обчислені значення власних чисел і векторів матриці об'єкта A ;
- математичні співвідношення для визначення траєкторії руху об'єкта;
- таблиці зі значеннями координат об'єкта у залежності від часу;
- суміщені графіки траєкторій вільного руху, отримані чисельним і аналітичним методами;
- сумісні графіки траєкторій руху об'єкта при відсутності керування;
- сумісні графіки траєкторій керованого руху об'єкта;
- аналіз отриманих результатів і висновки по роботі.

ORIGIN≐1 $A_{1,1} := 0.3$ $A_{1,2} := 0$ $A_{1,3} := 0$
 $A_{2,1} := -0.2$ $A_{2,2} := 0.2$ $A_{2,3} := 0$
 $A_{3,1} := 0.7$ $A_{3,2} := 0.5$ $A_{3,3} := -0.2$

$\lambda := \text{eigenvals}(A)$ $\lambda = \begin{bmatrix} -0.2 \\ 0.2 \\ 0.3 \end{bmatrix}$ $X := \text{eigenvec}(A, 0.3)$ $X = \begin{bmatrix} 0.432 \\ -0.864 \\ -0.259 \end{bmatrix}$

$D(t, z) := \begin{bmatrix} A_{1,1} \cdot z_1 + A_{1,2} \cdot z_2 + A_{1,3} \cdot z_3 \\ A_{2,1} \cdot z_1 + A_{2,2} \cdot z_2 + A_{2,3} \cdot z_3 \\ A_{3,1} \cdot z_1 + A_{3,2} \cdot z_2 + A_{3,3} \cdot z_3 \end{bmatrix}$ $z := \begin{bmatrix} 0.432 \\ -0.864 \\ -0.259 \end{bmatrix}$

$Y := \text{rkfixed}(z, 0, 10, 100, D)$ $n := 0, 1.. 100$

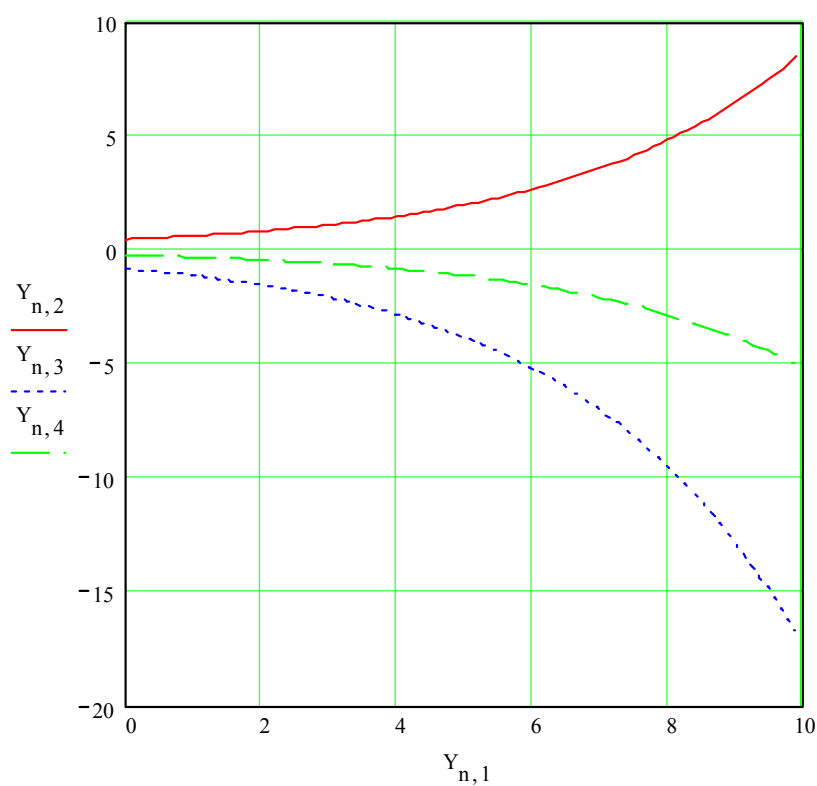


Рисунок 1.1 – Приклад модуля в середовищі пакета *MathCAD*
 для визначення власних векторів і траєкторії вільного руху об'єкта

1.6 Контрольні питання і завдання

1. Сформулюйте постановку задачі аналізу динаміки об'єкта.
2. З якою метою моделі динамічних об'єктів приводять до форми Коші?
3. Опишіть суть процедури перетворення вихідної системи ЗДР до форми Коші.
4. Як вибираються початкові умови для розв'язуваної задачі? Запишіть співвідношення, що використовуються для цього.
5. Назвіть методи розв'язання задачі аналізу динаміки об'єкта, дайте їхню стислу характеристику.
6. Запишіть аналітичний розв'язок для системи ЗДР, що має вигляд (1.1).
7. Який рух об'єкта називають вільним, вимушеним?
8. Запишіть аналітичний розв'язок рівняння вільного руху об'єкта для початкових умов, що співпадають з власним вектором матриці системи A .
9. Запишіть співвідношення для чисельного визначення точок траєкторії руху об'єкта $Z(t)$ за методом Рунге-Кутта.
10. Як визначається крок чисельного дослідження моделі об'єкта?

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКАЗНИКОВИХ ЗАПІЗНЕНЬ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ

2.1 Мета роботи

Вивчення методу комп'ютерного імітаційного моделювання динаміки об'єктів, набуття навичок розробки елементів динамічних моделей. Ознайомлення з пакетом візуального динамічного моделювання *Vensim*. Експериментальне дослідження неусталених реакцій показникових запізнень.

2.2 Вказівки з організації самостійної роботи

Лабораторна робота є першим етапом практичного освоєння методології імітаційного моделювання динаміки об'єктів. Її суть полягає у розробці моделей показникових запізнень і дослідженні їх реакцій на типові зовнішні впливи.

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно: ознайомитися з основними типами рівнянь імітаційних моделей динаміки і порядком їх розв'язання; визначеннями й основними характеристиками показникових за-

пізнень; вивчити системи рівнянь і діаграми потоків для запізнень першого і вищих порядків; ознайомитися з технологією роботи у середовищі пакета візуального динамічного моделювання *Vensim*.

З цією метою можуть бути використані лекції з відповідних тем, матеріал, вказаний у переліку посилань [4, с. 34 – 52; 9, с. 75–81], а також ці методичні вказівки. Стислий опис пакета візуального динамічного моделювання *Vensim* наведено у додатку А.

У ході практичної підготовки до роботи (позааудиторної самостійної роботи) необхідно скласти текст програми для моделювання неусталених реакцій запізнень першого, другого і третього порядків на імпульсну і стрибкоподібну зміни темпу вхідного потоку, а також заготовку звіту до лабораторної роботи (титульний аркуш, мета роботи, постановка задачі дослідження показникового запізнення, діаграми потоків і системи відповідних рівнянь).

Показникове запізнення 1-го порядку складається з рівня (що поглинає різницю темпів вхідного і вихідного потоків) і темпу вихідного потоку, що залежить від величини рівня і середнього запізнення (сталої). Модель показникового запізнення 1-го порядку зображується парою рівнянь, що мають вигляд

$$U.K = U.J + DT * (IN.JK - OUT.JK); \quad (2.1)$$

$$OUT.KL = U.K / PZ, \quad (2.2)$$

де U – рівень, що знаходиться у запізненні;

DT – крок моделювання (інтервал розв'язання рівнянь);

IN – темп вхідного потоку;

OUT – темп вихідного потоку;

PZ – стала запізнення.

Показникове запізнення 2-го порядку складається з двох послідовно з'єднаних запізнень 1-го порядку. Його модель може бути подана системою рівнянь:

$$U1.K = U1.J + DT * (IN.JK - F12.JK); \quad (2.3)$$

$$F12.KL = U1.K / (PZ / 2); \quad (2.4)$$

$$U2.K = U2.J + DT * (F12.JK - F23.JK); \quad (2.5)$$

$$OUT.KL = U2.K / (PZ / 2), \quad (2.6)$$

де $U1, U2$ – рівні, що знаходяться в запізненні;

DT – крок моделювання;

IN , $F12$, OUT – темпи вхідних і вихідних потоків;

PZ – стала запізнення.

Показникове запізнення 3-го порядку складається з трьох послідовно з'єднаних запізнь 1-го порядку (рис.2.1).

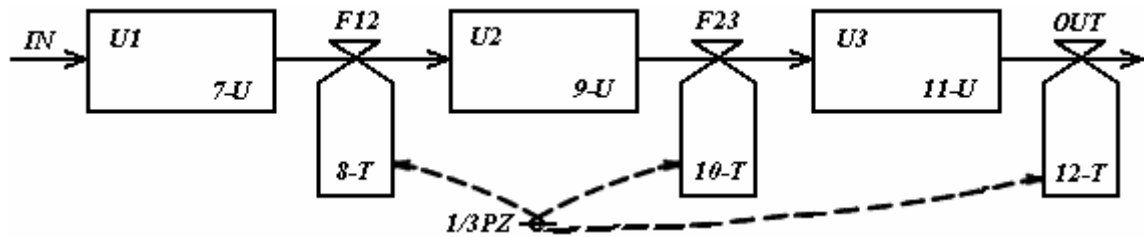


Рисунок 2.1 – Діаграма потоків показникового запізнення третього порядку

Модель показникового запізнення 3-го порядку може бути подана системою рівнянь:

$$U1.K = UZ1.J + DT * (IN.JK - F12.JK); \quad (2.7)$$

$$F12.KL = U1.K / (PZ / 3); \quad (2.8)$$

$$U2.K = UZ2.J + DT * (F12.JK - F23.JK); \quad (2.9)$$

$$F23.KL = UZ2.K / (PZ / 3); \quad (2.10)$$

$$U3.K = UZ3.J + DT * (F23.JK - OUT.JK); \quad (2.11)$$

$$OUT.KL = U3.K / (PZ / 3), \quad (2.12)$$

де $U1$, $U2$, $U3$ – рівні, що знаходяться в запізненні;

DT – крок моделювання;

IN , $F12$, $F23$, OUT – темпи вхідних і вихідних потоків ланок;

PZ – стала запізнення.

2.3 Опис лабораторної установки

Як лабораторна установка використовується персональна ЕОМ типу *IBM PC* з операційною системою *Windows-95* або з більш пізньою її версією. Для визначення неусталених реакцій запізнь (характеру змін вихідних потоків) використовується програма аналізу, підготовлена у ході самостійної роботи, написана однією з мов високого рівня і пакет візуального динамічного моделювання *Vensim*.

2.4 Порядок виконання роботи

Ознайомитися за допомогою викладача з особливостями і режимами роботи використовуваних комп'ютерних засобів.

Одержати у викладача варіант завдання (табл. 2.1) і додаткові вхідні дані.

Провести налагодження програми моделювання. З цією метою на вхід записання варто подати потік постійного темпу і домогтися одержання на виході потоку постійного темпу.

Для заданого варіанту вхідних даних провести аналіз неусталених реакцій показникових запізнень 1-го, 2-го і 3-го порядків. Інтервал дослідження 120 одиниць часу, видачу результатів проводити в 20-ти точках інтервалу.

Ознайомитися з меню, інструментами і технологією роботи у середовищі пакета візуального динамічного моделювання *Vensim*.

Створити моделі запізнень 1-го, 2-го і 3-го порядків у середовищі *Vensim*.

Для заданого варіанту вхідних даних провести у середовищі *Vensim* аналіз неусталених реакцій показникових запізнень 1-го, 2-го і 3-го порядків.

Зробити висновки: відносно характеру отриманих результатів; щодо їх відповідності теорії (або причинах можливої невідповідності); щодо відповідності результатів, отриманих за допомогою створеної програми й у середовищі пакету *Vensim*; про порядок записання, що найбільш адекватно описує процес транспортування товарів із заводського складу до мережі оптових баз; про доцільність використання пакету *Vensim* для розв'язання подібних задач.

Результатами експериментів є отримані значення темпів вихідних потоків із запізнень різних порядків як реакції на задані зміни темпів вхідних потоків.

2.5 Зміст звіту

Звіт має включати:

- титульний аркуш;
- мету роботи;
- постановку задачі;
- моделі запізнень (системи рівнянь для запізнень 1-го, 2-го та 3-го порядків);
- діаграму потоків для запізнення 3-го порядку;
- початкові умови: значення параметрів, рівнів і темпів;
- результати моделювання у вигляді таблиць і відповідні графіки;
- висновки по роботі.

Таблиця 2.1 – Варіанти завдань

Варіант	Початкове значення темпу вхідного потоку	Імпульс (тривалість / амплітуда)	Сходінка (амплітуда), %	<i>PZ</i>
1	220	2 / 350	– 50	25
2	300	3 / 350	75	30
3	100	2 / 450	– 60	40
4	250	1 / 300	45	55
5	400	3 / 450	– 55	35
6	350	2 / 450	60	55
7	300	1 / 250	45	50
8	350	2 / 320	55	45
9	350	2 / 380	50	20
10	280	3 / 450	– 70	40
11	100	2 / 300	70	50
12	150	3 / 400	– 50	40
13	300	5 / 450	35	35
14	200	3 / 500	– 20	45
15	350	2 / 350	50	35
16	220	3 / 400	– 50	25
17	300	2 / 350	75	40
18	100	2 / 450	60	50
19	250	1 / 300	– 45	35
20	400	2 / 350	55	40
21	350	2 / 250	– 60	45
22	300	1 / 300	– 65	55
23	350	2 / 300	– 45	35
24	300	2 / 400	50	40
25	280	3 / 250	– 70	60

2.6 Контрольні запитання

1. Що включає базова структура імітаційної моделі динаміки?
2. Мережі яких потоків найчастіше використовуються для зображення імітаційних моделей динаміки об'єктів ?
3. Назвіть і наведіть види основних рівнянь динамічних моделей, укажіть порядок їхнього розв'язання.
4. Наведіть позначення основних елементів діаграм потоків.
5. Назвіть види й основні характеристики показникових запізнень.
6. Як вибирається інтервал розв'язання рівнянь?
7. Наведіть системи рівнянь для моделей показникових запізнень 1-го, 2-го і 3-го порядку.
8. Нарисуйте діаграму потоків для показникового запізнення 3-го порядку.
9. Наведіть вид неусталених реакцій для запізнень 1-го, 2-го і 3-го порядку на ступінчастий вхідний вплив.
10. Наведіть вид неусталених реакцій для запізнень 1-го, 2-го і 3-го порядку на імпульсний вхідний вплив.

3 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПОКАЗНИКОВИХ ЗАПІЗНЕНЬ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ

3.1 Мета роботи

Вивчення методики побудови імітаційних моделей процесів, що протікають у динамічних системах, шляхом їхньої ідентифікації за методом найменших квадратів. Набуття навичок вибору ступеня і параметра моделі динаміки процесу у вигляді показникового запізнення. Експериментальне дослідження динаміки процесу за допомогою створеної моделі.

3.2 Вказівки з організації самостійної роботи

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно: вивчити постановку задачі побудови математичних моделей об'єктів методом ідентифікації; усвідомити суть основних задач, що розв'язуються у процесі ідентифікації; повторити матеріал попередньої лабораторної роботи, що присвячений мо-

делюванню показникових запізнень; ознайомитися з технологією моделювання у середовищі пакета візуального динамічного моделювання *Vensim*.

З цією метою можуть бути використані лекції з відповідних тем, матеріал, вказаний у переліку посилань [4, с. 26–28; 9, с.73, 75-81, 330-331], а також ці методичні вказівки. Опис пакета візуального динамічного моделювання *Vensim* наведено в додатку А.

У ході практичної підготовки до роботи (позааудиторної самостійної роботи) необхідно модифікувати текст програми, підготовленої для попередньої лабораторної роботи. Внесені у програму зміни повинні дозволити вирішувати задачу параметричної ідентифікації показникових запізнень від 1-го до 6-го порядків. Крім того варто зробити заготівку звіту до лабораторної роботи (титольний аркуш, мета роботи, постановка задачі ідентифікації показникового запізнення, діаграми потоків і системи відповідних рівнянь).

Об'єктом дослідження є процеси, що відбуваються у динамічних системах і можуть бути подані як моделі у вигляді запізнень різних порядків. Показникове запізнення 1-го порядку описується парою рівнянь (2.1) – (2.2). Показникове запізнення 2-го порядку описується системою рівнянь (2.3) – (2.6). Показникове запізнення 3-го порядку описується системою рівнянь (2.7) – (2.12). За аналогією можуть бути отримані системи рівнянь, що описують запізнення вищих порядків.

Задача параметричної ідентифікації запізнення розглядається у такій постановці. За результатами спостереження над вхідними $u(t)$ і вихідними $y(t)$ темпами потоків об'єкта необхідно вибрати оптимальні за мінімумом відхилень параметри показникового запізнення. Передбачається відсутність завад, як на вході, так і на виході об'єкта та моделі. Вихід моделі запізнення пов'язаний з її входом залежністю

$$y_m(t) = F_m[u_m(t), q_m, 0], \quad (3.1)$$

де F_m – оператор моделі запізнення, вид якого визначається відповідною системою рівнянь;

$u_m(t)$, $y_m(t)$ – відповідно вхідний і вихідний темпи (сигнали) моделі;

$q_m = [q_{m1}, q_{m2}]$ – вектор параметрів моделі (q_{m1} – порядок запізнення; q_{m2} – стала запізнення).

Темпи потоків на вході та виході системи спостерігаються у дискретні моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n і мають значення $u(t_1) = u_1, u(t_2) = u_2, \dots, u(t_n) = u_n$,

$y(t_1) = y_1, y(t_2) = y_2, \dots, y(t_n) = y_n$. Закон зміни темпу вхідного потоку для об'єкта $u(t)$ є екзогенною змінною і задається у вхідних даних. Темп вихідного потоку об'єкта $y(t)$ визначається у моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n , що відповідають запізненням в кожному з елементарних каналів, шляхом підсумовування їх зважених вихідних темпів потоків в усіх каналах (табл. 3.1). Вибір моделі здійснюється на множині показникових запізнень від 1-го до 6-го порядку. Як критерій близькості використовувати мінімум суми модулів відхилень для значень темпів вихідних потоків об'єкта і моделі

$$K = \sum_{i=1}^n |y(t_i) - y_m(t_i)| = \sum_{i=1}^n |y(t_i) - F_m[u_m(t_i), q_m, 0]| \rightarrow \min_{q_m}. \quad (3.2)$$

Розв'язанням задачі ідентифікації є найкращі значення параметрів моделі $q_M^0 = [q_{M1}^0, q_{M2}^0]$. Як початкове значення оцінки параметра q_{M2} використовувати середньозважене значення запізнень по всіх каналах. Вибір параметра q_{M1} здійснюється шляхом дослідження запізнень різних порядків.

Оцінку точності (похибки) моделі виконувати за співвідношенням

$$\varepsilon = \max_{ti} |y(t_i) - y_m(t_i)|. \quad (3.3)$$

Під час виконання роботи вважати, що вхідний потік у системі розподіляється по каналах рівномірно. Бажана точність (похибка) моделі $\varepsilon^* \leq 10$.

3.3 Опис лабораторної установки

Як лабораторна установка використовується персональна ЕОМ типу *IBM PC* з операційною системою *Windows-95* або з більш пізньою її версією. Для визначення параметрів моделі і її аналізу використовується програма аналізу, підготовлена у ході самостійної роботи, написана однією з мов високого рівня і пакет візуального динамічного моделювання *Vensim*. Ресурсні вимоги до ЕОМ визначаються вимогами до розмірів необхідної пам'яті, що висуваються версіями мови програмування та пакета *Vensim*.

3.4 Порядок виконання роботи

Ознайомитися за допомогою викладача з особливостями і режимами роботи комп'ютерних засобів, що використовуються під час виконання роботи, і пакета програм *Vensim*.

Одержати у викладача варіант завдання та додаткові вихідні дані для розв'язуваної задачі. Характеристики темпу вхідного потоку задані у табл. 2.1, а характеристики запізнень по каналах системи – з табл. 3.1.

Провести налагодження створеної програми параметричної ідентифікації запізнень.

Визначити для умов свого варіанту завдання значення темпу вихідного потоку об'єкта $y(t)$ у моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n .

Виконати попередній аналіз вихідних даних і визначити вигляд моделі F_m (початкове значення порядку моделі q_{m2}) і сталу запізнення q_{m1} . Як початкове значення q_{m1} доцільно обрати середньозважене значення запізнення по всіх каналах.

Визначити за допомогою створеної програми зміну темпу вихідного потоку моделі $y_m(t)$ і оцінити показник точності (похибку) моделі ε .

За необхідності ($\varepsilon > \varepsilon^*$) змінити параметри моделі q_{m1}, q_{m2} і повторно зробити розрахунок її точності (похибки) ε .

Для найкращої моделі (показникового запізнення порядку q_2^0 з постійною q_1^0) провести аналіз її неусталеної реакції на збурення, що передбачено варіантом завдання. Інтервал дослідження 120 одиниць часу, видачу результатів проводити у 20-ти точках інтервалу.

Здійснити визначення параметрів моделі за допомогою пакета *Vensim*.

Зробити висновки: щодо характеру отриманих результатів; щодо їхньої відповідності теорії (або причинах можливої невідповідності); щодо відповідності результатів, отриманих за допомогою створеної програми й у середовищі пакета *Vensim*; щодо порядку запізнення, що найбільш адекватно описує процес транспортування товарів із заводського складу до мережі оптових баз; щодо доцільності використання пакета *Vensim* для розв'язання подібних задач.

Оформити і захистити звіт про виконану роботу.

Результатами експериментів є значення параметрів моделі q_m і вихідний темп потоку $y_m(t)$, отриманий на моделі для заданого темпу вхідного потоку $u_m(t) = u(t)$.

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань (запізнення темпів потоків по каналах)

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25	12	5	14	15	5	15	25	13	8
2	20	25	11	21	9	5	10	15	6	14
3	15	15	10	5	11	10	5	20	15	5
4	8	5	15	25	21	12	21	17	24	15
5	24	20	6	11	5	15	25	35	45	25
6	14	13	24	8	6	40	13	24	20	5
7	2	8	14	25	17	30	16	7	4	11
8	14	25	11	21	9	20	5	1	10	5
9	8	10	15	12	4	10	12	12	21	6
10	10	20	18	25	15	20	10	5	11	10
11	25	12	15	14	3	5	11	20	23	8
12	14	15	11	9	4	13	5	6	10	5
13	5	10	5	12	4	5	12	16	21	8
14	10	25	30	25	5	15	10	5	7	15
15	5	15	10	5	7	15	10	5	20	15
16	15	5	15	25	13	8	12	21	17	24
17	25	20	6	11	7	24	15	25	35	45
18	5	40	13	24	20	13	24	8	21	14
19	30	8	14	35	17	16	7	4	27	2
20	20	25	11	21	9	5	10	15	6	14
21	38	15	10	35	11	12	5	10	5	25
22	10	15	15	11	21	12	21	27	21	25
23	21	23	16	11	15	15	25	35	45	15
24	14	3	20	8	16	40	13	10	20	9
25	13	8	14	35	17	30	16	7	5	19

3.5 Зміст звіту

Звіт має включати:

- титульний аркуш;
- мету роботи;

- постановку і вхідні дані задачі;
- таблиці зі значеннями вхідних $i(t)$, $u_m(t)$, і вихідних темпів об'єкта $y(t)$ і моделей запізнень різних порядків $y_m(t)$;
- суміщені графіки залежностей темпів вихідних потоків від вхідних для об'єкта $y(t)$ і моделей розглянутих порядків $y_m(t)$;
- результати розв'язання задачі у середовищі пакета *Vensim*;
- найкращі значення параметрів моделі q_{m1}^o і q_{m2}^o ;
- аналіз результатів і висновки по роботі.

3.6 Контрольні запитання і завдання

1. Нарисуйте та опишіть структурну схему процесу ідентифікації об'єкта.
2. Які вимоги висуваються до вхідних і вихідних сигналів у процесі активної ідентифікації динамічних об'єктів?
3. Сформулюйте постановку задачі ідентифікації, що розв'язується у цій лабораторній роботі.
4. Наведіть вид неусталених реакцій для запізнень 1-го, 2-го і 3-го порядків на ступінчастий вхідний сигнал.
5. Наведіть вид неусталених реакцій для запізнень 1-го, 2-го і 3-го порядків на імпульсний вхідний сигнал.
6. За яким критерієм розв'язується задача ідентифікації?
7. За яким показником визначається точність моделі?
8. Як визначається темп вихідного потоку об'єкта?
9. Яким чином визначається початкове значення сталої запізнення?
10. Як визначається найкраще значення порядку запізнення?

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВИРОБНИЧО-ЗБУТОВОЇ СИСТЕМИ

4.1 Мета роботи

Вивчення методу імітаційного моделювання складних об'єктів на прикладі аналізу динаміки виробничо-збутової системи (ВЗС). Набуття практичних навичок модифікації моделей і проведення машинних експериментів з використанням пакетів програм моделювання.

4.2 Вказівки з організації самостійної роботи

Як об'єкт дослідження використовується ВЗС виробів складної побутової техніки. Система складається з ланок виробництва, оптової і роздрібної торгівлі. Метою моделювання є вивчення перехідних процесів у роздрібній ланці (РЛ), що виникають у наслідок зміни потоку замовлень на товари від покупців. Основу моделі складають системи рівнянь, що описують динаміку перехідних процесів ВЗС із [4, 9]. З цих же моделей взяті значення параметрів і початкові значення всіх змінних, що описують рівні і темпи потоків.

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно: ознайомитися з описом системи, що моделюється; постановкою задачі моделювання; повторити основні види і форми рівнянь для динамічних моделей; проаналізувати систему рівнянь моделі роздрібної ланки ВЗС; повторити основні прийоми роботи у середовищі пакета *Vensim*. З цією метою можуть бути використані лекції з відповідних тем, матеріал, вказаний у переліку посилань [4, с. 57–63; 9, с. 123–139], а також ці методичні вказівки. Стислий опис пакета візуального динамічного моделювання *Vensim* наведено в додатку А. У ході практичної підготовки до лабораторної роботи (самостійної позааудиторної роботи) необхідно створити заготівку звіту (титульний аркуш, мета роботи, постановка задачі моделювання ВЗС, діаграма потоків і система відповідних рівнянь).

Система рівнянь для ланки роздрібної торгівлі має вигляд [4]:

$$(1-U): NZR.K = NZR.J + DT * (PZR.JK - OTR.JK); \quad (4.1)$$

$$(2-U): FZR.K = FZR.J + DT * (PTR.JK - OTR.JK), \quad (4.2)$$

де NZR – рівень невиконаних замовлень;

DT – крок моделювання;

PZR – темп потоку замовлень у РЛ;

OTR – темп потоку відвантаження товарів з РЛ;

FZR – рівень фактичних запасів у РЛ;

PTR – темп, надходження товарів до РЛ.

$$(3-V): POTR.K = NZR.K / ZZR.K; \quad (4.3)$$

$$(4-V): DOTR.K = FZR.K / DT; \quad (4.4)$$

$$(5-T): OTR.KL = POTR, \text{ якщо } POTR \leq DOTR, \\ OTR.KL = POTR, \text{ якщо } POTR > DOTR, \quad (4.5)$$

де *POTR* – передбачуваний (такий, що перевіряється) темп відвантаження товарів;

DOTR – допустимий темп відвантаження товарів;

ZZR – запізнення виконання замовлень у РЛ.

$$(6-V): ZZR.K = MZR + UZR * JZR.K / FZR.K; \quad (4.6)$$

$$(7-V): JZR.K = KPR * UPR.K; \quad (4.7)$$

$$(8-U): UPR.K = UPR.J + DT * 1/KUR * (PZR.JK - UPR.JK); \quad (4.8)$$

$$(9-T): TZR.KL = PZR.JK + (1/ZRZR) * ((JZR.K - FZR.K) + (JUZR.K - FUZR.K) + (NZR.K - NNZR.K)), \quad (4.9)$$

де *MZR* – мінімальне запізнення виконання замовлень у РЛ;

UZR – середнє запізнення виконання замовлень, що зв'язане з відсутністю на складі товарів деяких видів;

JZR – бажаний запас товарів у РЛ;

UPR – усереднений темп потоку замовлень у РЛ;

KUR – постійна усереднення для РЛ;

TZR – темп закупівель товарів РЛ;

ZRZR – запізнення регулювання запасів і заповнення каналів;

JUZR – бажаний рівень заповнення каналів;

FUZR – фактичний рівень заповнення каналів;

NNZR – нормальний рівень невиконаних замовлень.

$$(10-V): JUZR.K = UPR.K * (ZOZR + ZPZR + ZTTR + ZZO.K); \quad (4.10)$$

$$(11-V): FUZR = ZOR.R + ZPR.K + NZO.K + TOPR.K; \quad (4.11)$$

$$(12-V): NNZR.K = UPR.K * (MZR + UZR), \quad (4.12)$$

де *ZOZR* – запізнення оформлення замовлень у РЛ;

ZPZR – запізнення пересилання товарів із РЛ;

ZTTR – запізнення транспортування товарів у РЛ;

ZOO – замовлення, що знаходяться на стадії оформлення в оптовій ланці;

ZOR – замовлення, що знаходяться на стадії оформлення в РЛ;

ZPR – замовлення, що пересилаються з РЛ;

NZO – замовлення, що невиконані оптовою ланкою;

TOPR – товари, що відправлені до РЛ і знаходяться в дорозі.

$$(13-U): ZOR.K = ZOR.J + DT * (TZR.JK - ZVR.JK); \quad (4.13)$$

$$(14-T): ZVR.KL = FNZAP3 (TZR.JK, ZOZR); \quad (4.14)$$

$$(15-U): ZPR.K = ZPR.J + DT * (ZVR.JK - PZO.JK); \quad (4.15)$$

$$(16-T): PZO.KL = FNZAP3 (ZVR.JK, ZPZR); \quad (4.16)$$

$$(17-U): TOPR.K = TOPR.J + DT * (OTO.JK - PTR.JK); \quad (4.17)$$

$$(18-T): PTR.KL = FNZAP3 (OTO.JK, ZTTR), \quad (4.18)$$

де ZVR – темп видачі замовлень на закупівлю товарів;

PZO – потік замовлень до оптової ланки;

$FNZAP3$ – функція запізнення 3-го порядку;

PTR – темп надходження товарів до РЛ.

Система рівнянь (4.1) – (4.18) описує основні складові процесу функціонування роздрібною ланки. Діаграма потоків для ланки роздрібною торгівлі наведена на рис. 4.1.

Початкові значення змінних і параметрів варто прийняти такими ж, як і в моделі ВЗС, наведеній у [4, 9]. Інтервал моделювання складає 104 тижні, крок – 0,05 тижня, а сумарне запізнювання замовлень і товарів в оптовій ланці та ланці виробництва – 14,6 тижня.

Характеристиками, що підлягають аналізу є: рівень запасів FZR , рівень невиконаних замовлень NZR , темп відвантаження товарів OTR ; темп закупівель товарів роздрібною ланкою TZR .

4.3 Опис лабораторної установки

Як лабораторна установка використовується персональна ЕОМ типу *IBM PC* з операційною системою *Windows-95* або з більш пізньою її версією. Для визначення параметрів моделі і її аналізу використовується пакет візуального динамічного моделювання *Vensim* (або програма аналізу, підготовлена у ході самостійної роботи, написана однією з мов високого рівня). Ресурсні вимоги до ЕОМ визначаються вимогами до розмірів необхідної пам'яті, що висуваються версією пакета *Vensim* або мови програмування.

4.4 Порядок виконання роботи

Ознайомитися з особливостями і режимами роботи запропонованих комп'ютерних засобів і пакета програм аналізу динаміки систем.

Одержати у викладача варіант завдання (табл.4.1) і додаткові дані. Початкове значення темпу вхідного потоку PZR для всіх варіантів – 1000 одиниць за одиницю часу.

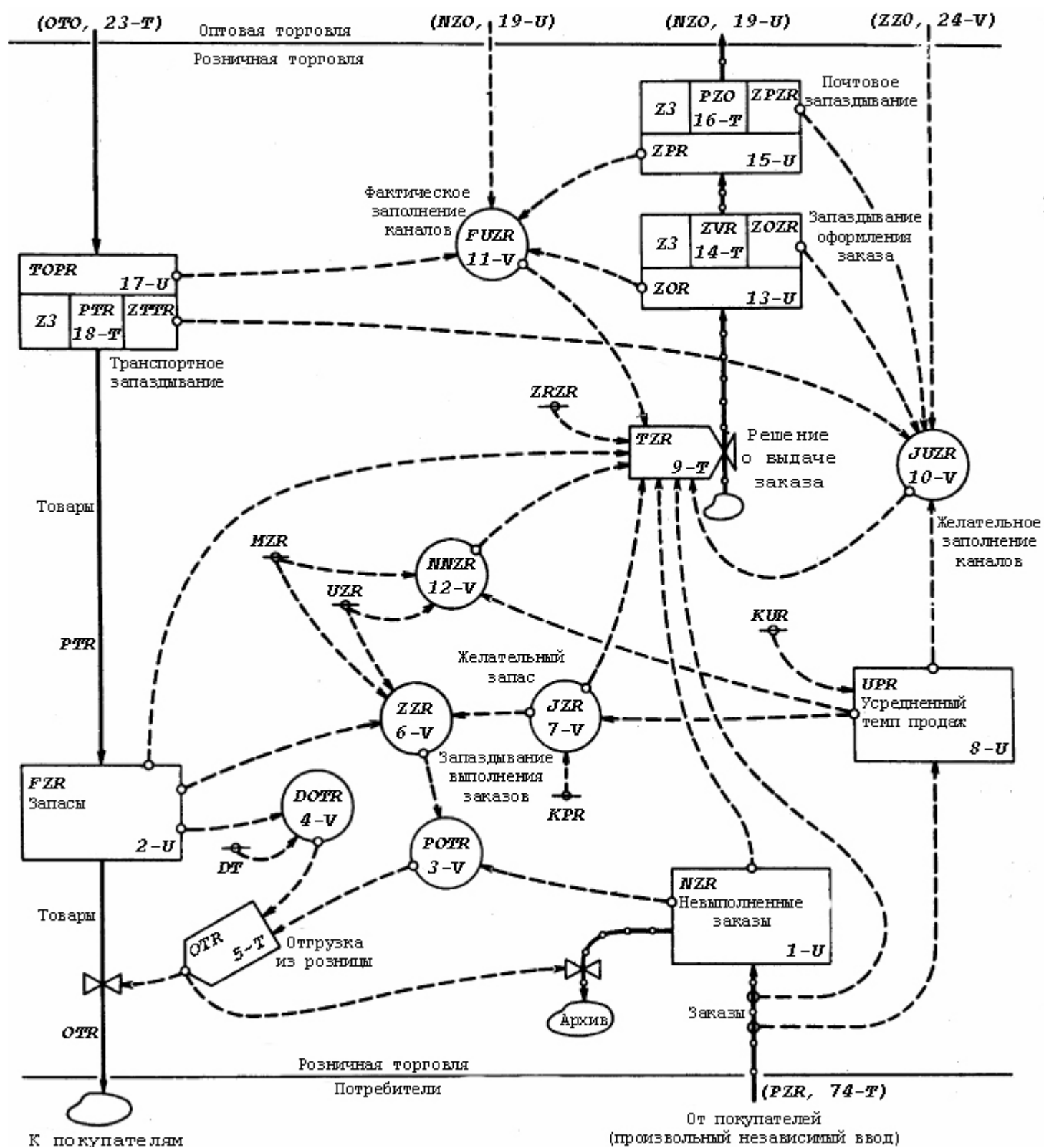


Рисунок 4.1 – Диаграмма потоков у ланці роздрівної торгівлі

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань

Варіант	Характер збурення		
	Вигляд	Амплітуда	Тривалість
1	Лінійне	+24	15
2	Гармонійне	± 15	22
3	Лінійне	+12	15
4	Ступінчасте	- 15	–
5	Ступінчасте	+28	–
6	Лінійне	- 25	12
7	Лінійне	+27	15
8	Гармонійне	± 15	12
9	Лінійне	- 35	20
10	Ступінчасте	- 15	–
11	Ступінчасте	- 10	–
12	Гармонійне	± 20	25
13	Ступінчасте	+10	–
14	Гармонійне	± 15	20
15	Лінійне	+10	25
16	Ступінчасте	- 25	–
17	Ступінчасте	+20	–
18	Гармонійне	± 12	15
19	Лінійне	- 20	25
20	Гармонійне	± 12	20
21	Лінійне	+20	15
22	Ступінчасте	+ 25	–
23	Ступінчасте	- 10	–
24	Гармонійне	± 20	25
25	Ступінчасте	- 25	–

Для перевірки правильності складання моделі провести моделювання динаміки процесів функціонування ВЗС при сталому темпі вхідного потоку.

Провести аналіз динаміки системи для заданої зміни потоку замовлень у роздрібну ланку *PZR*.

Запропонувати зміни в організаційній структурі і правилах прийняття рі-

шень, спрямовані на скорочення перехідного процесу (амплітуди і тривалості коливань).

Змінити значення відповідних параметрів моделі і виконати моделювання динаміки ВЗС з новими параметрами.

Провести аналіз отриманих результатів. Результатами експериментів є отримані варіанти динаміки рівнів та темпів ВЗС.

Зробити висновки по роботі.

Оформити і захистити звіт.

4.5 Зміст звіту

Звіт має включати:

- титульний аркуш;
- мету роботи;
- постановку задачі;
- діаграму потоків і систему рівнянь моделі РЛ;
- результати моделювання динаміки роздрібної ланки ВЗС для заданих значень її параметрів;
- результати моделювання динаміки роздрібної ланки ВЗС із поліпшеними значеннями її параметрів;
- графіки зміни досліджуваних характеристик роздрібної ланки ВЗС;
- порівняльні дані для розглянутих варіантів моделей;
- висновки по роботі: щодо відповідності характеру отриманих результатів теорії і контрольним результатам; щодо ефективності запропонованих заходів по стабілізації динаміки ВЗС; щодо доцільності використання методології динамічного моделювання для розв'язання подібних задач; щодо ефективності рекомендованого пакета програм моделювання.

4.6 Контрольні запитання і завдання

1. Опишіть структуру і технологію функціонування досліджуваного об'єкта.
2. Мережі яких видів використовуються для опису об'єкта, що моделюється?
3. Запишіть рівняння для визначення рівня запасів і рівня невиконаних замовлень у РЛ?
4. Як визначається усереднений темп потоку замовлень до РЛ?

5. Як визначається темп відвантаження товарів із РЛ?
6. Як визначається темп видачі замовлень із РЛ?
7. Як визначається бажане заповнення каналів забезпечення?
8. Опишіть діаграму потоків для ланки роздрібної торгівлі.
9. Які зміни у характері динаміки ВЗС відбудуться при обмеженні на темп випуску готової продукції?
10. Як впливає на характер перехідного процесу зменшення запізнення регулювання запасів і заповнення каналів?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки техніки. Структура і правила оформлення. – Чинний від 01.01.96.
2. Методичні вказівки щодо структури, змісту та оформлення навчально-методичної літератури / Упоряд.: П.С.Ковтун, І.О.Мілютченко, Б.П.Косіковська. – Харків: ХНУРЕ, 2002. – 60 с.
3. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисциплін "Динаміка систем, що управляються" для студентів спеціальності 7.091401 "Системи управління та автоматики" і "Динамічне моделювання" для студентів спеціальності 7.080402 "Інформаційні технології проектування" / Упор. В.В. Безкоровайний, О.В. Назаренко. – Харків: ХНУРЕ, 2004. – 40 с.
4. Конспект лекцій з дисципліни «Динамічне моделювання» для студентів спеціальностей 7.080402 – інформаційні технології проектування та 7.091401 – системи управління та автоматики / Упоряд. В.В. Безкоровайний. – Харків: ХНУРЕ, 2008. – 84 с.
5. Ляшенко, М.Я. Чисельні методи / М.Я. Ляшенко, М.С. Головань. – К.: Либідь, 1996. – 288 с.
6. Глушаков, С.В. Математическое моделирование: Учебный курс / С.В. Глушаков, И.А. Жакин, Т.С. Хачиров. – Харьков: Фолио, М.: АСТ, 2001. – 524 с.
7. Волков, Е.А. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
8. Калиткин, Н.Н. Численные методы: учеб. пособие / Н.Н. Калиткин. – СПб. БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.
9. Форрестер, Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика): Пер. с англ. / Дж. Форрестер – М.: Прогресс, 1971. – 340 с.

Додаток А

Загальний опис і технологія роботи з пакетом програм *Vensim*

Призначення оболонки. Оболонка *Vensim* призначена для автоматизації процесів формалізації динамічних об'єктів у вигляді потокових діаграм, створення моделей, проведення машинних експериментів і відображення результатів моделювання. Для успішної роботи в оболонці *Vensim* необхідно: бути ознайомленим з основами методології імітаційного моделювання динаміки об'єктів; мати формалізований опис об'єкта; установити на ЕОМ пакет *Vensim PLE*.

Пакет має простий і зручний інтерфейс (рис. А.1). Відмінності наборів доступних функцій визначаються особливостями конфігурації пакета.

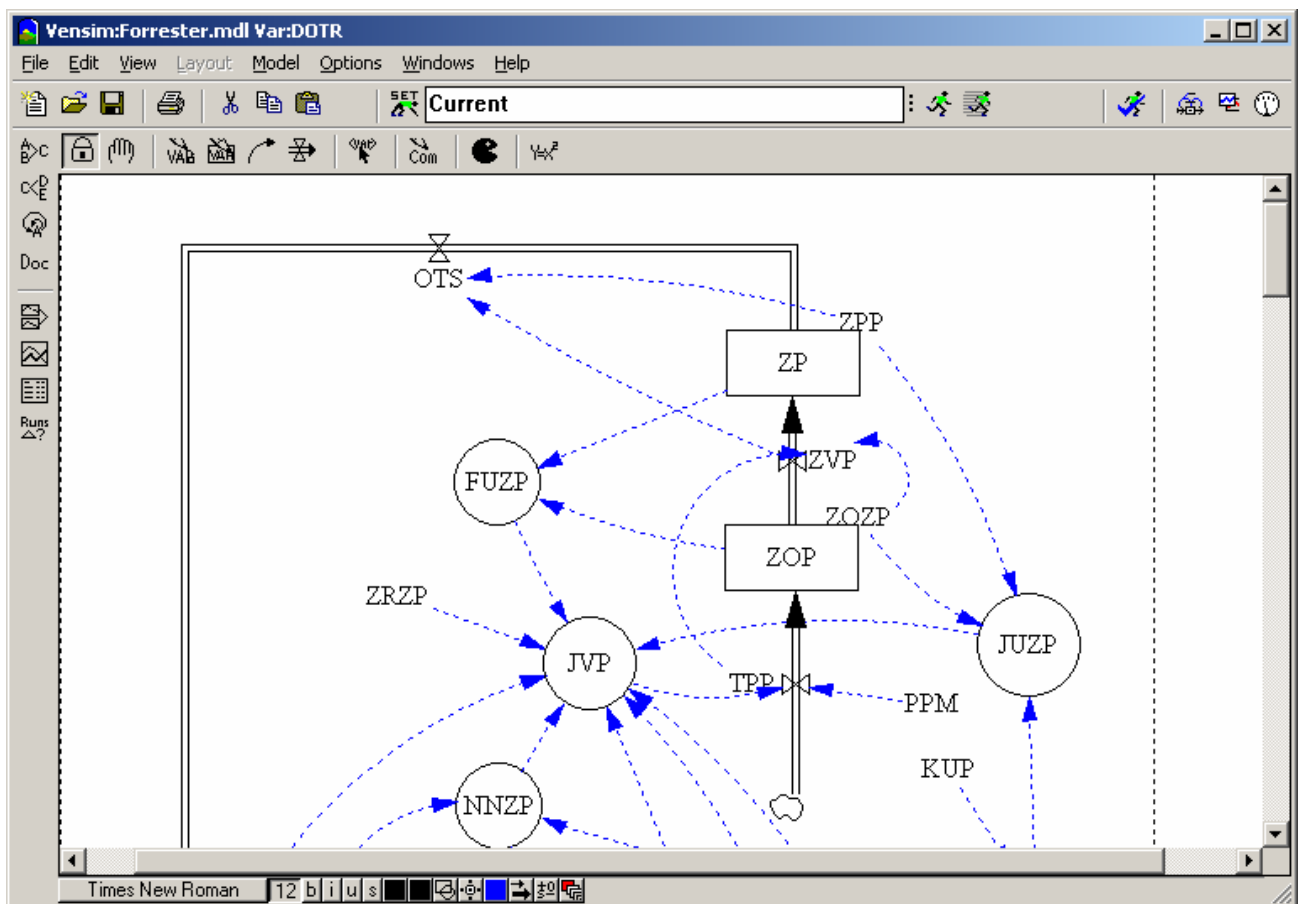


Рисунок А.1 – Робоче вікно оболонки *Vensim*

Основні функції оболонки. Функції оболонки *Vensim* за призначенням

розділяються на такі групи (рис. А.2):

- головне меню;
- додаткове меню;
- меню редагування моделі;
- меню моделювання;
- меню аналізу моделі.

Внизу екрану знаходяться піктограми доступу до функцій зміни графічних опцій.

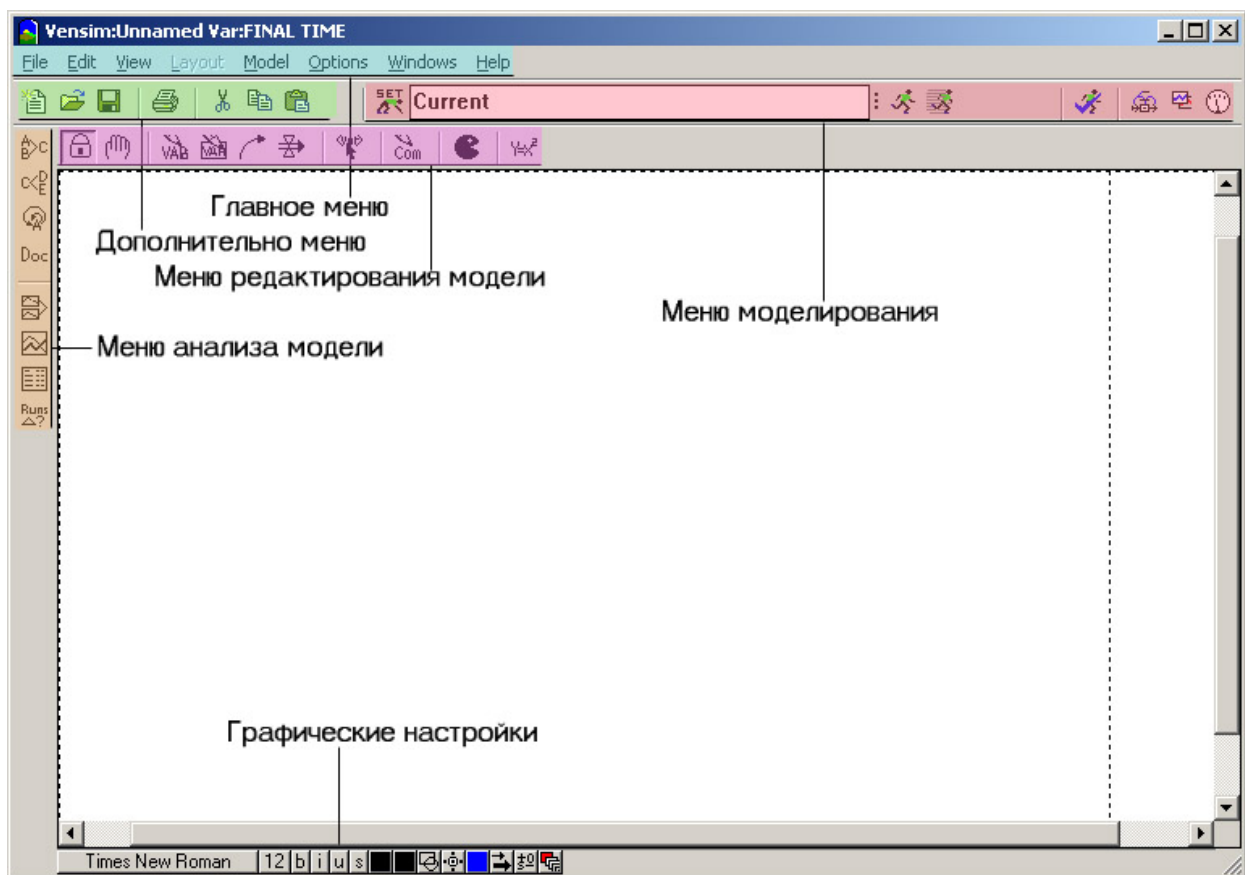


Рисунок А.2 – Меню оболочки *Vensim*

Головне меню знаходиться у верхній частині робочого вікна. Воно включає типові команди *Windows*-підтримуваних програм:

- **File** (Файл):
 - *New Model* – створити модель;
 - *Open Model...* – відкрити файл із моделлю;
 - *Close* – закрити файл із моделлю;
 - *Save* – зберегти;
 - *Save as* – зберегти з новим ім'ям;

- *Print* – направити до друку;
- *Print Options* – опції друку;
- *Exit* – вийти з оболонки;
- ***Edit*** (*Редагування*):
 - *Undo* – відмінити останню зміну;
 - *Redo* – повернути зміну;
 - *Copy* – копіювати фрагмент у буфер;
 - *Cut* – видалити (вирізати) фрагмент;
 - *Paste* – вставити фрагмент із буфера;
 - *Select all* – виділити (вибрати) все;
 - *Or select* – або вибрати: *Aux\Const\Data* (змінні \ константи \ дані); *Information Arrows* (інформаційні зв'язки); *Levels* (рівні); *Rates* (темпи);
 - *Find* – знайти;
 - *Find Workbench* – знайти поточний робочий елемент;
 - *Find Again* – знайти ще;
- ***View*** (*Вигляд*):
 - *Zoom* – змінити у масштабі: *Fit to Screen* (вмістити у видимій області); *Custom* (самостійний вибір);
 - *Show Behavior* – відобразити поводження;
 - *Font and Colors...* – шрифт і кольори;
 - *Refresh* – оновити;
- ***Layout*** (*Макет*):
 - *Size to Default* – розмір за замовчуванням;
 - *Size to LastSel* – розмір останнього вибору;
 - *Height to LastSel* – висота останнього вибору;
 - *Width to LastSel* – ширина останнього вибору;
 - *Center on LastSel* – розміщення у центрі останнього вибору;
 - *Left Align on LastSel* – вирівняти відносно лівого берега за типом останнього вибору;
 - *Right Align on LastSel* – вирівняти відносно правого берега за типом останнього вибору;
 - *Vertical on LastSel* – вертикальне відображення за типом останнього вибору;
 - *Horizontal Spacing* – горизонтальна розбивка;
 - *Vertical Spacing* – вертикальна розбивка;
- ***Model*** (*Модель*):
 - *Settings...* – параметри;

- *Check Model* – контроль моделі;
- *Units Check* – перевірка одиниць виміру;
- *Compare to...* – порівняння з іншою моделлю;
- *Simulate* – моделювати;
- *Start SyntheSim* – почати інтерактивне моделювання;
- *Reality Check* – перевірка істинності умов;
- *Stop Simulation* – зупинити моделювання;
- **Options** (Налаштування) (рис. А.3):

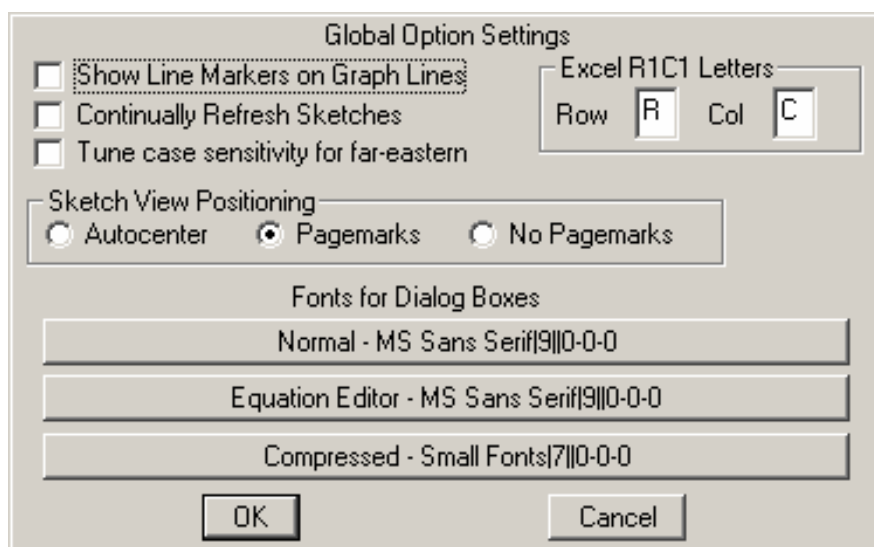


Рисунок А.3 – Вікно налаштувань

- **Windows** (Вікна):
 - *Control Panel* – панель контролю;
 - *Molecules* – молекули;
 - *Pop Output Forward* – вивести вікна відображень;
 - *Output Window List* – вивести вікно зі списком відображень;
 - *Close All Output* – закрити всі виведені відображення;
 - *Error History* – історія помилок;
 - *Selection History* – обрана історія;
 - *Pop Build Forward* – відображати вікна одне поза іншим;
 - *Keep Build Behind* – відображати вікна одне перед іншим;
 - *Model: Model-1* – назва моделі: *Model-1*;
- **Help** (Допомога):
 - *Vensim Manuals* – наставлення користувачеві;
 - *Readme Notes* – примітки для ознайомлення;

– *About Vensim* – про *Vensim*.

Додаткове меню містить піктограми функцій: створення нової моделі, відкриття, збереження і друк моделі, видалення і копіювання до буферу виділеного фрагмента, вставка фрагмента з буфера.

Меню редагування моделі містить піктограми таких функцій: локалізація і переміщення виділеного фрагмента; інструменти графічного відображення (додаткових змінних і параметрів); відображення змінних у рамках (рівнів); відображення стрілок інформаційних зв'язків; відображення потоків, прихованих змінних, коментарів; піктограма швидкого видалення компонент моделі; піктограма введення і корегування формул (рис. А.4).

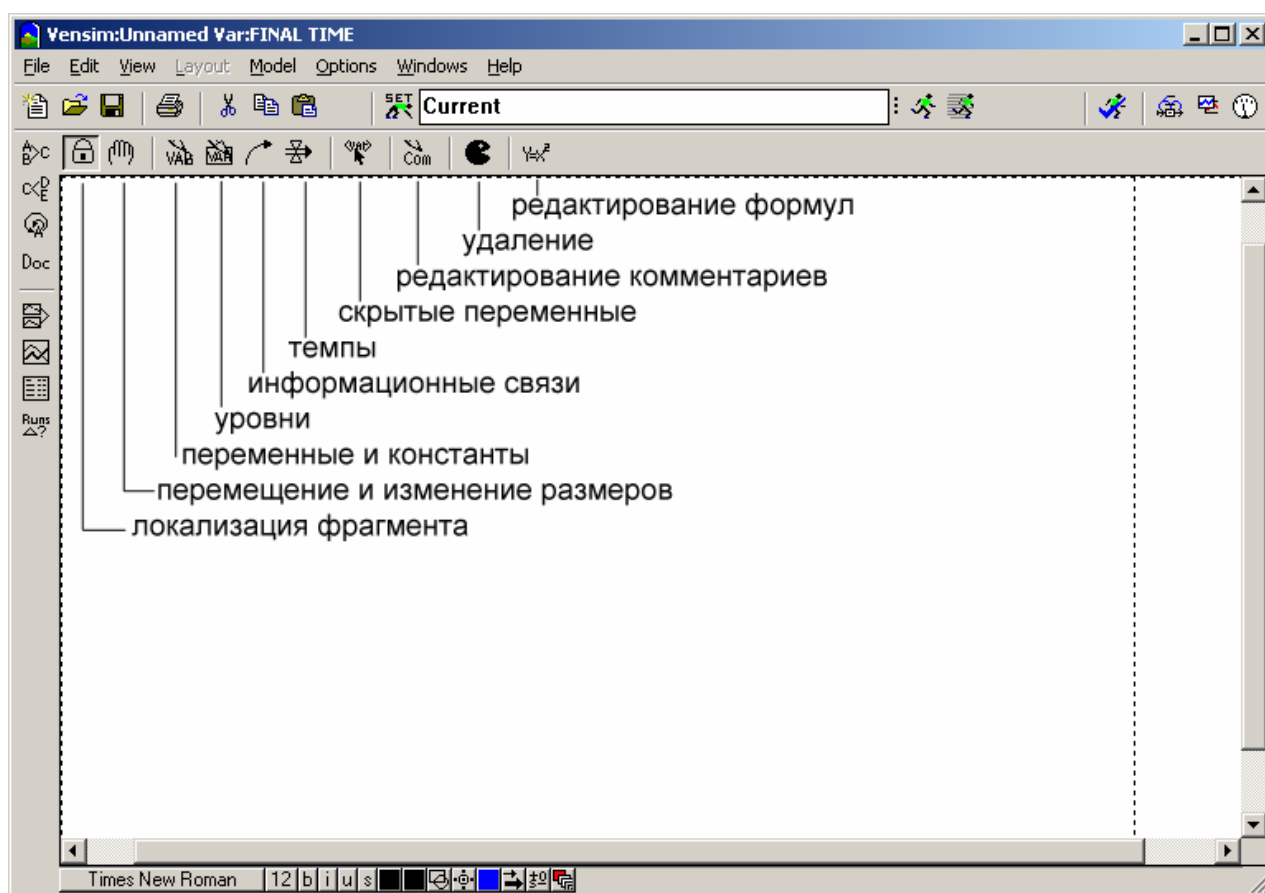


Рисунок А.4 – Меню редагування моделі

Меню моделювання містить піктограму налаштування моделі, назву файлу результатів моделювання, піктограму початку моделювання (симуляції), інтерактивного моделювання зі зміною параметрів, запуску моделі з перевіркою умов, створення вікна відображень, виведення на екран вікон відображень,

створення панелі контролю (рис. А.5).

Меню аналізу моделі складається з піктограм відображення: дерева вхідних змінних, дерева залежних змінних, рекурентних зв'язків змінних, документ-список змінних, графіки перехідних процесів для взаємозалежних змінних, графік перехідного процесу обраної змінної, таблиця екстремальних значень, виведення порівняльних даних моделей (рис. А.5).

Унизу робочого вікна розташовані *піктограми зміни настроювань*: тексту (тип шрифту, розмір, жирність, курсив, підкреслення, перекреслення, колір); контуру (колір, форма); стрілок (колір, вид, напрямок).

Послідовність створення моделі. Модель *Vensim* являє собою візуальне відображення діаграми у нотації динамічного моделювання і сукупність описів кожного елемента діаграми.

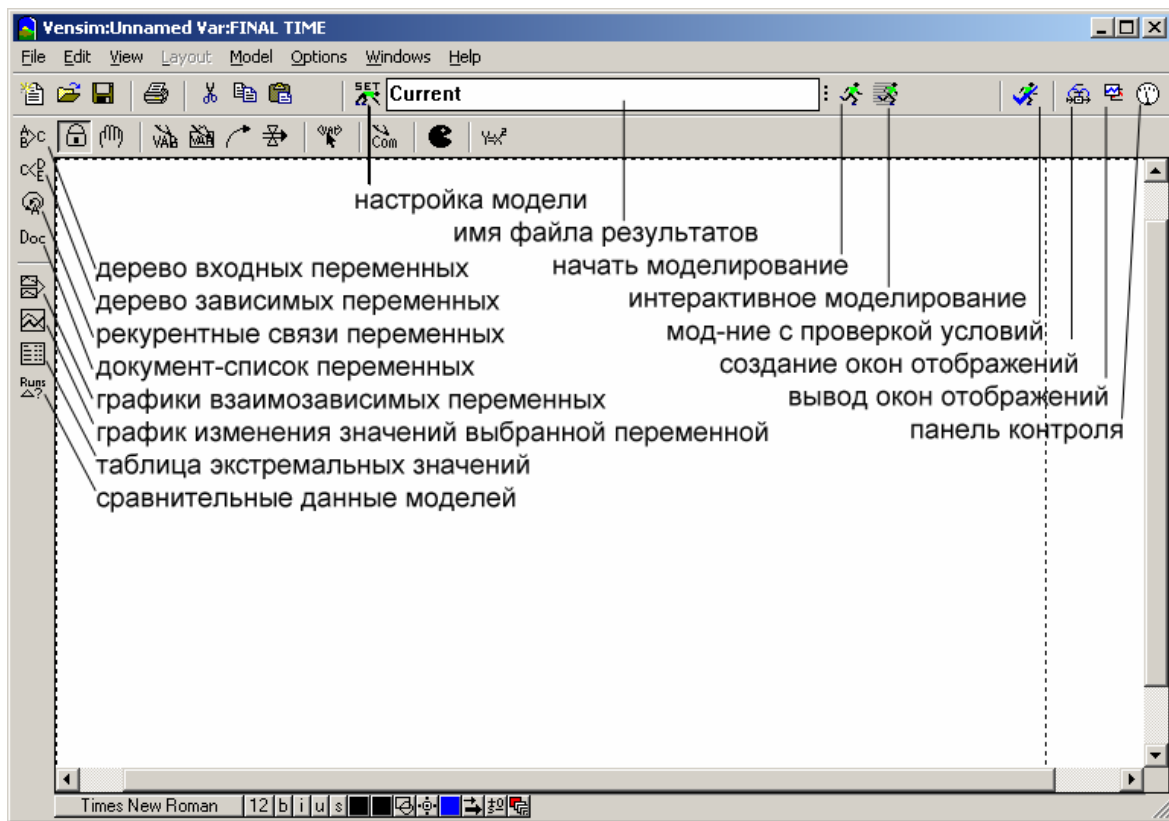


Рисунок А.5 – Меню моделювання й аналізу моделі

Спочатку роботи з новою моделлю¹ у вікні параметрів на закладці параметрів часу необхідно задати шкалу і параметри зміни часу (рис. А.6). У цьому


¹ Для відкриття вже створеної моделі необхідно завантажити файл *.mdl, що містить модель.

вікні можна також відобразити коментар до моделі, задати еквівалентні одиниці виміру, пароль. У ході роботи з моделлю всі параметри можуть бути змінені. Вікно параметрів моделі доступне через головне меню (**Model > Settings...**). Після натискання кнопки *Ok* стає доступною робота з моделлю у полі редагування діаграми.

Діаграма зображується у робочому вікні програми *Vensim*². Кожен символ діаграми має особливий зміст.

Основними компонентами діаграм динамічних моделей є рівні, темпи потоків і запізнення. Крім того, є додаткові, допоміжні змінні і константи.

Для розміщення на діаграмі символу **рівня** необхідно:

- вибрати відповідний інструмент (натиснути на піктограму );
- натиснути праву кнопку миші у місці бажаного розміщення символу на робочому полі;
- задати назву рівня³ і натиснути клавішу *Enter*.

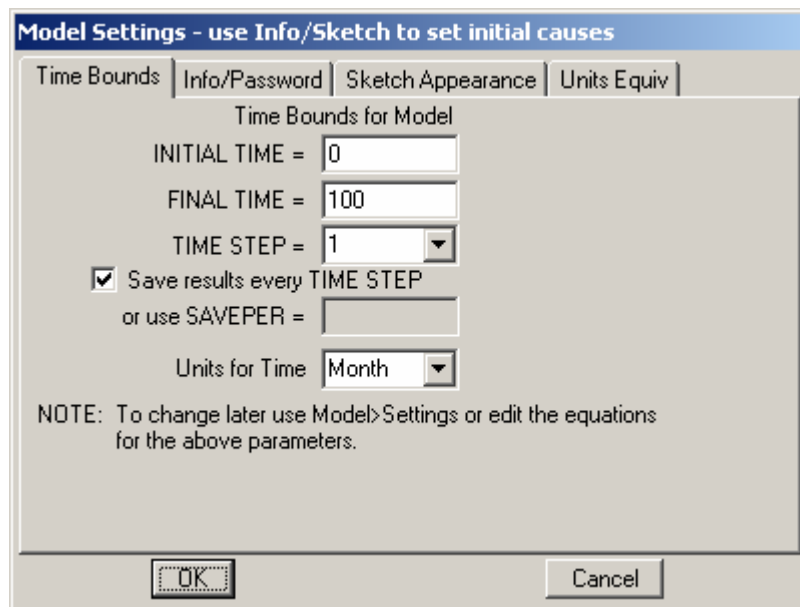



Рисунок А.6 – Вікно встановлення параметрів часу

Для розміщення на діаграмі символу **темпу потоку** необхідно:


- вибрати відповідний інструмент (натиснути на піктограму );
- натиснути праву кнопку миші в місці розміщення джерела потоку і натиснути ще раз у місці розміщення стоку;
- задати назву темпу потоку і натиснути клавішу *Enter*.

² На будь-якій стадії створення моделі доступна функція її збереження.


³ Рекомендується усім ідентифікаторам давати мнемонічні імена.


Запізнення третього порядку (що використовується найбільш часто) описується парою рівнянь – рівня одиниць потоку, що знаходяться у запізненні, та темпу запізнення. Відповідно воно відображається парою елементів на діаграмі – рівнем і темпом. Для розміщення на діаграмі символу **запізнення** необхідно:




- відобразити рівень, що знаходяться у запізненні одиниць потоку;
- відобразити темп запізнення таким чином, щоб його джерелом став вищевказаний рівень.

Допоміжні змінні і постійні (параметри) зазвичай позначають ідентифікаторами без рамки (піктограма ) , послідовність дій при цьому така ж, як і при відображенні символу рівня. Допоміжні і додаткові обчислюванні змінні зображують в особливій рамці (зазвичай круглій), використовуючи інструмент зображення рівнів і змінюючи форму рамки.


Інформаційні зв'язки на діаграмі представляються у вигляді стрілок. Для відображення *інформаційного зв'язку* між змінними необхідно:

- вибрати відповідний інструмент (натиснути на піктограму );
- клікнути мишею в місці розміщення символу вихідної змінної;
- клікнути ще раз у місці розміщення символу залежної змінної.

Щоб уникнути захаращення діаграми стрілками інформаційних зв'язків, будь-який ідентифікатор (рівня, темпу та ін.) може бути додатково відображений у будь-якій точці діаграми у вигляді прихованої змінної. Для цього необхідно скористатися відповідним інструментом (піктограма ) і вибрати потрібний ідентифікатор зі списку. Прихована змінна відображається в кутових дужках.

Інструмент переміщення, зміни розмірів і форм елементів діаграми має піктограму . Інструмент зміни ідентифікатора – . Інструмент видалення елемента або його фрагмента – .

Після завершення процесу створення діаграми існує лише візуальне зображення моделі. Кожен ідентифікатор відображає лише змінну аналітичної моделі, тому наступним етапом є визначення сукупності описів кожного ідентифікатора⁴.

Редагування формул. Опис ідентифікаторів здійснюється після вибору інструмента редагування формул (піктограма ) і вибору описуваної змінної (рис. А.7). Опис ідентифікатора складається з таких компонентів: ім'я; рівняння; тип; одиниці виміру; коментар; граничні значення; крок зміни.

⁴ Допускається паралельне створення діаграми із редагуванням формул.

Ім'ям може бути будь-який набір символів⁵. Для складання рівняння у редакторі формул передбачені математико-цифрові кнопки і закладки зі списками:

- а) вхідних змінних (за інформаційними зв'язками);
- б) функцій;
- в) додаткових функцій.

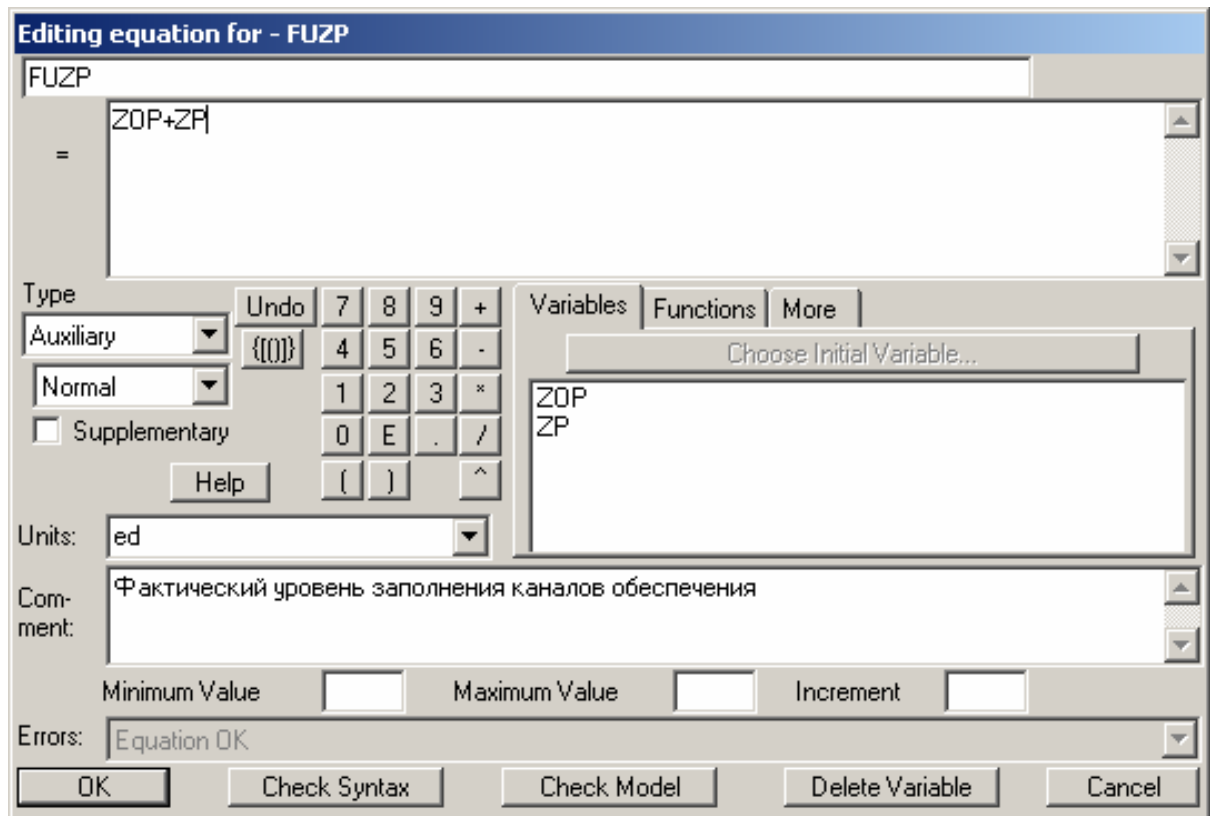


Рисунок А.7 – Вікно редактора формул

Тип задається набором із трьох параметрів:

- власне тип змінної (*Auxiliary* – допоміжна, *Constant* – константа, *Initial* – ініціалізуюча, *Level* – рівень, *Lookup* – шукана, *Reality Check* – для перевірки);
- тип рівняння змінної (*Normal* – нормальне, *with Initial* – з ініціалізацією, *with Lookup* – з пошуком);
- належність до додаткових змінних⁶ (*Supplementary*).

Одиниці виміру можна вибрати із запропонованих варіантів або задати

⁵ Ця версія пакета для імен ідентифікаторів не підтримує кирилицю.

⁶ Додаткові рівняння не обов'язкові, вони включаються до моделі на розсуд аналітика для виконання додаткових перетворень або розрахунків.

власні⁷. Коментарем є набір слів, що відображають суть змінної. Він буде подаватися на діаграмі у вигляді спливаючої підказки. Змінним можна задати межі змін (*Minimum Value* – мінімум, *Maximum Value* – максимум) і крок, якщо значення змінюється дискретно.

У вікні редактора формул розташовані кнопки перевірки синтаксичної правильності рівняння, загальної перевірки моделі, видалення змінної. Під час видалення змінної видаляються всі її потокові та інформаційні зв'язки.




Верифікація моделі. Для перевірки адекватності *Vensim*-моделі математичній моделі, необхідно здійснити її верифікацію:


- за потоками;
- за зв'язками змінних і синтаксисом рівнянь;
- за одиницями вимірів.

Оскільки *Vensim*-модель подається діаграмою потоків, то на першому етапі її верифікації необхідна перевірка правильності відображення поточкових зв'язків. Кожен потік повинен мати своє джерело і стік (зазвичай кількість джерел дорівнює кількості стоків). Потік без джерела буде виснажувати рівень до нуля, після чого і сам стане нульовим. Залишений без стоку потік буде нескінченно наповнювати рівень. При цьому можливі й замкнуті цикли потоків без джерел і стоків. Перевірка потоків здійснюється візуально.

Відповідність інформаційних і поточкових зв'язків заданим формулам, а також синтаксис рівнянь здійснюється автоматично через головне меню (**Model** > *Check Model*); перевірка одиниць виміру – **Model** > *Units Check*.



Крім того, можливо порівняти модель з іншою моделлю (**Model** > *Compare to...*).

Додатковими даними для верифікації можуть служити: дерево вхідних змінних (піктограма )^A, дерево залежних змінних ()^C, рекурентні зв'язки змінних (). У цьому випадку взаємозв'язок змінних аналізується як граф, вершинами якого є змінні, а дугами – інформаційні і потокові зв'язки діаграми. На екран надається відповідний підграф для обраної змінної.

Повна інформація щодо змінних моделі міститься у відповідному документі (піктограма  Doc).

Моделювання. Процес моделювання запускається через пункт **Model** головного меню або через меню *моделювання* (рис. А.1, А.8). Основні режими процесу моделювання:

⁷ Варто бути особливо уважним при визначенні одиниць виміру, що можуть порушити адекватність моделі.

- автономне моделювання (**Model>Simulate** або піктограма 
- інтерактивне моделювання (**Model>Start SyntheSim** або 

Під час запуску процесу моделювання необхідно задати ім'я для файлу результатів моделювання, що буде збережений із розширенням *.vdf.

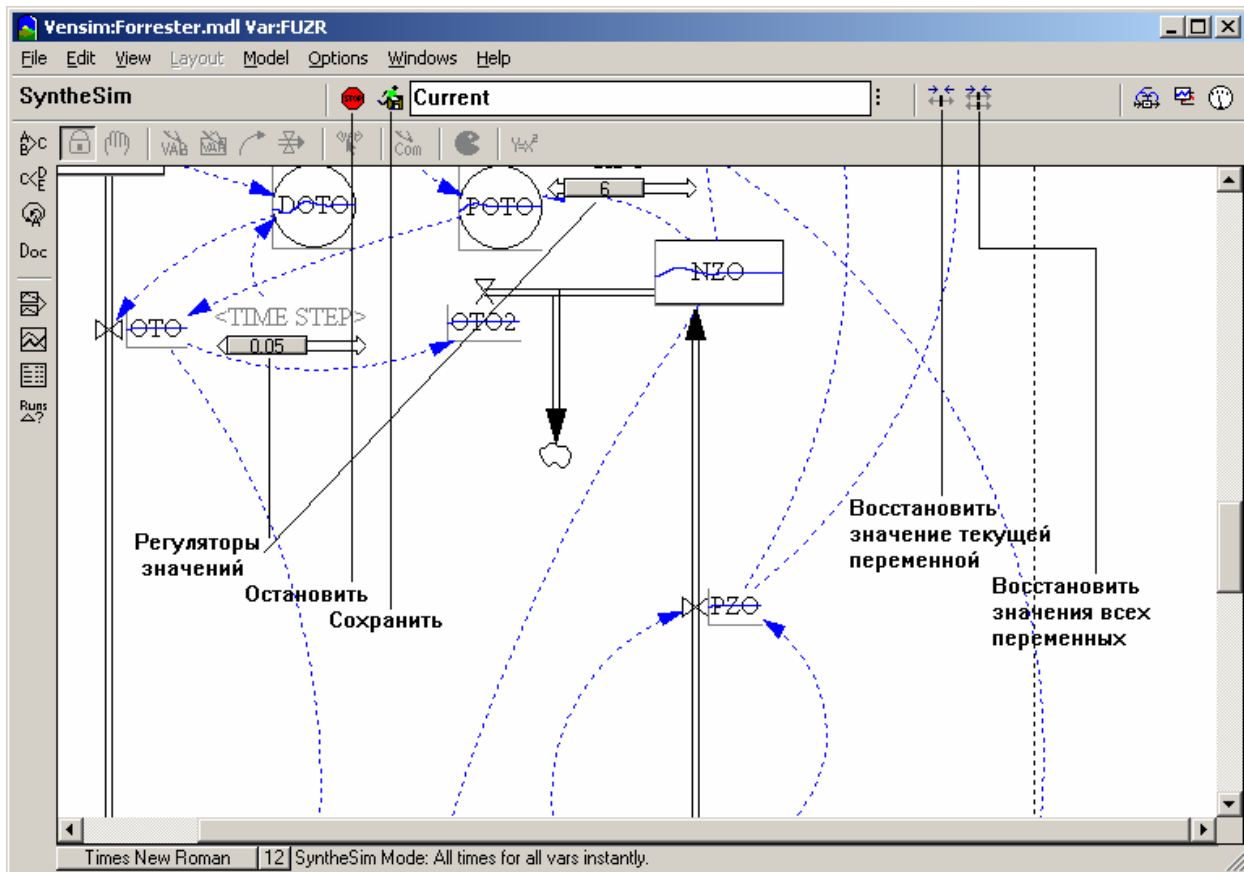






Рисунок А.8 – Робоче вікно для режиму інтерактивного моделювання

Інтерактивне моделювання дозволяє активно змінювати значення змінних і параметрів моделі, одержуючи при цьому графіки перехідних процесів для модифікованого варіанта моделі. Біля кожного ідентифікатора системи рівнянь розміщується регулятор (рис. А.8), переміщення якого за допомогою миші змінює значення змінної (параметра) моделі в межах допустимої її зміни. Можливим є також відновлення початкового значення поточної або усіх змінних. По завершенню процесу моделювання результати будуть збережені у заздалегідь визначеному файлі. Передбачається можливість збереження поточних результатів.

Вихідними даними моделі є графіки перехідних процесів, що відбуваються в системі. Для відображення цих графіків необхідно в меню *View* встановити

опцію *Show Behavior*. У цьому випадку, після наведення курсору на відповідний показник, на екрані буде відображено графік залежності обраної змінної. Відповідні графіки можуть бути відображені також шляхом натискання на піктограму .

За допомогою піктограми  можна одержати набір графіків, що відображають перехідний процес не тільки обраної змінної, але і усіх взаємозалежних з нею змінних. За результатами моделювання можуть бути сформовані таблиці екстремальних значень змінних (піктограма .

На графіках і у таблицях можуть бути подані не тільки дані щодо поточної моделі, але і дані щодо інших процесів, моделювання яких здійснювалося після останнього запуску *пакету* (за умови, що файли результатів були збережені з різними іменами). Інформацію щодо відмінності моделей можна отримати за допомогою піктограми .

Навчальне видання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисциплін «Комп'ютерне моделювання динаміки систем» для магістрантів спеціальності 8.05020101 – комп'ютеризовані системи управління та автоматика.

Упорядник БЕЗКОРОВАЙНИЙ Володимир Валентинович

Відповідальний випусковий І.В. Гребеннік

Редактор

Комп'ютерна верстка

План 2015, поз. ____

Підп. до друку __.__.15	Формат 60х84 1/16.	Спосіб друку – ризографія
Умов. друк. арк. ____	Облік.-вид. арк. ____	Тираж <u>30</u> прим.
Зам. № _____	Ціна договірна.	

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14.

Надруковано в учбово-виробничому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
61166, Харків, просп. Леніна, 14.