

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА «ТЕХНІЧНА КІБЕРНЕТИКА ім. проф. Р.В. Меркта»

КУРСОВА РОБОТА

за дисципліною «Моделювання систем»

за темою: «Дослідження динамічних систем з зосередженими параметрами»

Студентки : 3 курсу 2 групи
Напряму підготовки: 0501 —
Інформатика та обчислювальна техніка
Спеціальності: Комп'ютерні науки
Хмельницького Богдана Михайловича
Керівники:
проф. Челабчі В.М.
ст. викл. Челабчі В.В.

Національна шкала _____
Кількість балів: _____
Оцінка: ECTS _____

Члени комісії

(підпис)

(ПІБ)

(підпис)

(ПІБ)

| | |
|--|-----------|
| <u>1 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗВИЧАЙНОГО ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ.....</u> | <u>3</u> |
| <u>1.1 Вхідні дані для ідентифікації.....</u> | <u>3</u> |
| <u>1.2 Методика ідентифікації.....</u> | <u>4</u> |
| <u>2. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ.....</u> | <u>10</u> |
| <u>2.1 Постановка задачі.....</u> | <u>10</u> |
| <u>2.2 Приведення математичної моделі об'єкта до системи звичайних диференціальних рівнянь 1-го порядку.....</u> | <u>10</u> |
| <u>2.4 Рішення системи рівнянь (2.10) – (2.12) в середовищі Excel.....</u> | <u>11</u> |
| <u>2.5 Блок- схема алгоритму моделювання.....</u> | <u>13</u> |
| <u>2.6 Результати моделювання.....</u> | <u>14</u> |
| <u>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....</u> | <u>16</u> |
| <u>ДОДАТКИ.....</u> | <u>17</u> |
| <u>Модулі задачі моделювання.....</u> | <u>17</u> |
| <u>Модулі задачі моделювання програми.....</u> | <u>20</u> |

1 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗВИЧАЙНОГО ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ

1.1 Вхідні дані для ідентифікації

Таблиця 1.1 – Вхідні дані

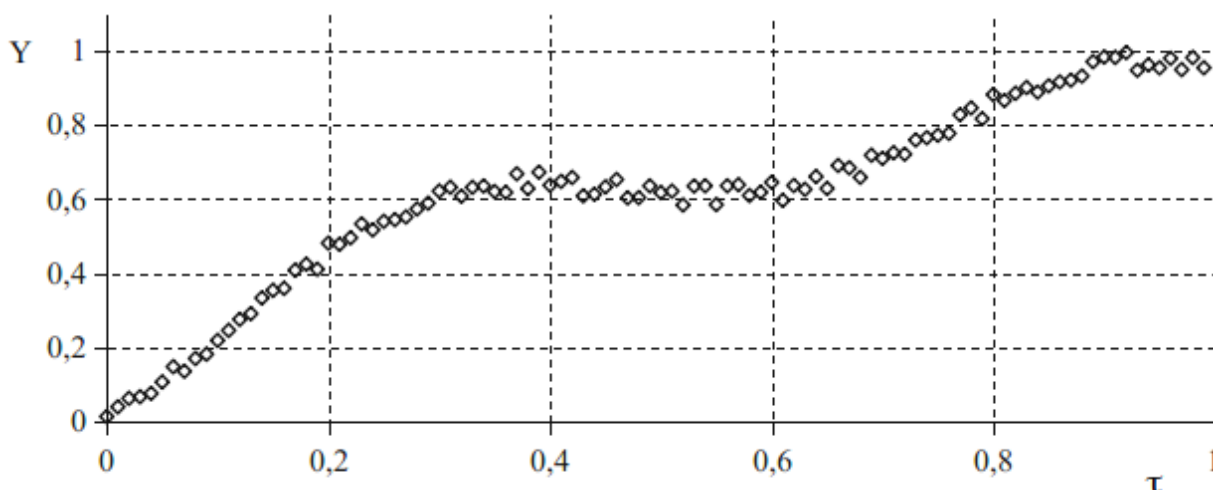
| i | τ | X | Y | i | τ | X | Y | i | τ | X | Y |
|----|--------|-----------|-----------|----|--------|-----------|-----------|-----|--------|-----------|-----------|
| 1 | 0 | 0,9934842 | 0,0128751 | 35 | 0,34 | 0,8756943 | 0,6348093 | 68 | 0,67 | 1,2148692 | 0,6837934 |
| 2 | 0,01 | 1,0438297 | 0,0390723 | 36 | 0,35 | 0,8354329 | 0,6198109 | 69 | 0,68 | 1,2608246 | 0,6581224 |
| 3 | 0,02 | 1,1120134 | 0,061946 | 37 | 0,36 | 0,7742955 | 0,6175001 | 70 | 0,69 | 1,3565532 | 0,717816 |
| 4 | 0,03 | 1,1490787 | 0,0663293 | 38 | 0,37 | 0,7145714 | 0,6677159 | 71 | 0,7 | 1,3861702 | 0,7092534 |
| 5 | 0,04 | 1,2141654 | 0,0754082 | 39 | 0,38 | 0,6828221 | 0,6279257 | 72 | 0,71 | 1,4113749 | 0,7243567 |
| 6 | 0,05 | 1,2678181 | 0,1060725 | 40 | 0,39 | 0,6112501 | 0,6719575 | 73 | 0,72 | 1,4647226 | 0,7207032 |
| 7 | 0,06 | 1,3088596 | 0,147335 | 41 | 0,4 | 0,6129789 | 0,637017 | 74 | 0,73 | 1,5148493 | 0,758949 |
| 8 | 0,07 | 1,344901 | 0,135163 | 42 | 0,41 | 0,5328054 | 0,6471863 | 75 | 0,74 | 1,5135084 | 0,7649856 |
| 9 | 0,08 | 1,385344 | 0,1694297 | 43 | 0,42 | 0,5189427 | 0,657786 | 76 | 0,75 | 1,5543831 | 0,7717154 |
| 10 | 0,09 | 1,4228938 | 0,1810277 | 44 | 0,43 | 0,5230714 | 0,6082972 | 77 | 0,76 | 1,5663128 | 0,7767003 |
| 11 | 0,1 | 1,4162514 | 0,2180981 | 45 | 0,44 | 0,4842224 | 0,6126317 | 78 | 0,77 | 1,5612172 | 0,8271883 |
| 12 | 0,11 | 1,4316632 | 0,2452469 | 46 | 0,45 | 0,4642 | 0,632321 | 79 | 0,78 | 1,6108615 | 0,8453968 |
| 13 | 0,12 | 1,4712354 | 0,2751409 | 47 | 0,46 | 0,4703599 | 0,6522161 | 80 | 0,79 | 1,5636514 | 0,8161368 |
| 14 | 0,13 | 1,5086873 | 0,2904362 | 48 | 0,47 | 0,4530446 | 0,6027852 | 81 | 0,8 | 1,5833649 | 0,8813449 |
| 15 | 0,14 | 1,5334193 | 0,3327938 | 49 | 0,48 | 0,4493303 | 0,6033549 | 82 | 0,81 | 1,5457953 | 0,8653572 |
| 16 | 0,15 | 1,5231336 | 0,353249 | 50 | 0,49 | 0,4690697 | 0,635196 | 83 | 0,82 | 1,5652519 | 0,8846871 |
| 17 | 0,16 | 1,5323827 | 0,3586452 | 51 | 0,5 | 0,4929819 | 0,6170002 | 84 | 0,83 | 1,5583237 | 0,90035 |
| 18 | 0,17 | 1,486268 | 0,40754 | 52 | 0,51 | 0,4665593 | 0,620838 | 85 | 0,84 | 1,5291522 | 0,8880562 |
| 19 | 0,18 | 1,4974666 | 0,4237042 | 53 | 0,52 | 0,5115354 | 0,5834973 | 86 | 0,85 | 1,4526734 | 0,904949 |
| 20 | 0,19 | 1,4884771 | 0,4102042 | 54 | 0,53 | 0,5394437 | 0,6346858 | 87 | 0,86 | 1,4508212 | 0,9155075 |
| 21 | 0,2 | 1,4882327 | 0,4807286 | 55 | 0,54 | 0,5706555 | 0,6352973 | 88 | 0,87 | 1,394016 | 0,9202061 |
| 22 | 0,21 | 1,4773056 | 0,4774635 | 56 | 0,55 | 0,6035223 | 0,5845371 | 89 | 0,88 | 1,3607146 | 0,9313118 |
| 23 | 0,22 | 1,4216215 | 0,4951218 | 57 | 0,56 | 0,6711091 | 0,6353207 | 90 | 0,89 | 1,3246109 | 0,9701761 |
| 24 | 0,23 | 1,3771712 | 0,5325666 | 58 | 0,57 | 0,6752865 | 0,6381873 | 91 | 0,9 | 1,2211365 | 0,9825104 |
| 25 | 0,24 | 1,3309465 | 0,5164106 | 59 | 0,58 | 0,731453 | 0,609213 | 92 | 0,91 | 1,1975895 | 0,9815123 |
| 26 | 0,25 | 1,2970678 | 0,5394506 | 60 | 0,59 | 0,7684832 | 0,6179366 | 93 | 0,92 | 1,1207907 | 0,9946604 |
| 27 | 0,26 | 1,2615024 | 0,5439639 | 61 | 0,6 | 0,8634238 | 0,6446232 | 94 | 0,93 | 1,0774258 | 0,9469516 |
| 28 | 0,27 | 1,2230219 | 0,5511926 | 62 | 0,61 | 0,8762356 | 0,5960279 | 95 | 0,94 | 1,0178259 | 0,9615718 |
| 29 | 0,28 | 1,1597515 | 0,572819 | 63 | 0,62 | 0,9264403 | 0,6361534 | 96 | 0,95 | 0,9694682 | 0,9534277 |
| 30 | 0,29 | 1,1157716 | 0,5884251 | 64 | 0,63 | 1,0174929 | 0,6257642 | 97 | 0,96 | 0,887914 | 0,9792212 |
| 31 | 0,3 | 1,0847763 | 0,6211321 | 65 | 0,64 | 1,0733256 | 0,6601372 | 98 | 0,97 | 0,8197896 | 0,9486557 |
| 32 | 0,31 | 1,0249699 | 0,631442 | 66 | 0,65 | 1,1304526 | 0,6280563 | 99 | 0,98 | 0,7821926 | 0,9811879 |
| 33 | 0,32 | 0,9606958 | 0,6072525 | 67 | 0,66 | 1,1675822 | 0,6901028 | 100 | 0,99 | 0,6952411 | 0,9536714 |
| 34 | 0,33 | 0,890458 | 0,6312751 | | | | | | | | |

де τ - значення безрозмірного часу;

X - значення впливу (в безрозмірному вигляді);

Y - значення реакції об'єкта (у безрозмірному вигляді).

Дані таблиці відображені на рис. 1.1.

Рисунок 1.1 – Залежність $Y=f(x)$

1.2 Методика ідентифікації

Проводиться ідентифікація звичайного лінійного диференціального рівняння (1.1)

$$A \cdot \frac{dY}{d\tau} + Y = k \cdot X \quad (1.1)$$

де τ - час,

$X(\tau)$ - вплив,

$Y(\tau)$ - реакція об'єкта.

Для розв'язання задачі ідентифікації найчастіше вибирається метод найменших квадратів з апроксимацією залежностей $X=f(\tau)$ і $Y=f(\tau)$ при якому:

- 1) проводиться апроксимація залежностей $X=f(\tau)$ і $Y=f(\tau)$ на відрізках осі часу гладкими функціями (поліномів невисоких ступенів);
- 2) для моментів часу шляхом диференціювання апроксимуючих функцій визначаються похідні $dX/d\tau$, $dY/d\tau$;
- 3) значення функцій і похідних підставляються в ідентифіцируемое рівняння і визначається сума квадратів нев'язок лівої і правої частин рівняння δ для всіх розглянутих моментів часу;
- 4) значення коефіцієнтів ідентифіцируемого диференціального рівняння визначаються шляхом мінімізації суми квадратів нев'язок лівої і правої частин рівняння.

Мінімізацію значення функціоналу δ можна проводити ітераційним шляхом використовуючи методи спуску, але зручніше формувати систему лінійних алгебраїчних рівнянь, яка розв'язується прямими методами.

Для проведення ідентифікації використовується метод апроксимації на суміжних ділянках. Апроксимація залежності $Y=f(t)$ здійснюється поліномами методом найменших квадратів.

$$Y(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_k \cdot t^k + \dots + a_{kn} \cdot t^{kn} = \sum_{k=0}^{kn} a_k \cdot t^k \quad (1.2)$$

$$Y'(t) = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot t + \dots + k \cdot a_k \cdot t^{k-1} + \dots + kn \cdot a_{kn} \cdot t^{kn-1} = \sum_{k=1}^{kn} k \cdot a_k \cdot t^{k-1}$$

де τ – незалежна змінна;

i – індекс моменту часу на осі основної незалежної змінної τ ;

$\Delta\tau$ - відрізок часу, на якому проводиться апроксимація;

$t = \tau - \tau_1$ - локальна (у межах nz відрізка) координата часу;

j – індекс моменту часу на допоміжній осі незалежної змінної t (в межах локального відрізка часу).

Вираз для суми квадратів нев'язок з усіх розглянутих зон має вигляд:

$$S = \sum_{j=1}^m (A \cdot Y'_j + Y_j - k \cdot X_j)^2 \quad (1.3)$$

где m – кількість розглянутих точок всій області визначення функції (включаючи всі виділені відрізки),

j – індекс точки.

Необхідною умовою мінімуму функції S є рівність нулю її частинних похідних:

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial k} = 0. \quad (1.4)$$

Підставивши вираз (1.3) (1.4) можна отримати систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) (1.5).

(1.5)

Розв'язавши систему лінійних алгебраїчних рівнянь (1.5) отримаємо значення A, k .

Проведення ідентифікації відображено в таблиці 1.2.

Оцінка якості ідентифікації рівняння (1.1) проводиться порівнянням заданих значень Y і відновлених значень Y_{ch} . Значення Y_{ch} отримані при чисельному розв'язку рівняння (1.1) методом трапецій. Апроксимація відображена на рис. 1.2.

$$Y = -29,123758 x^5 + 66,880196 x^4 - 49,538905 x^3 + 11,184526 x^2 + 1,4841424 x + 0,0109203$$

$$R^2 = 0.994276$$

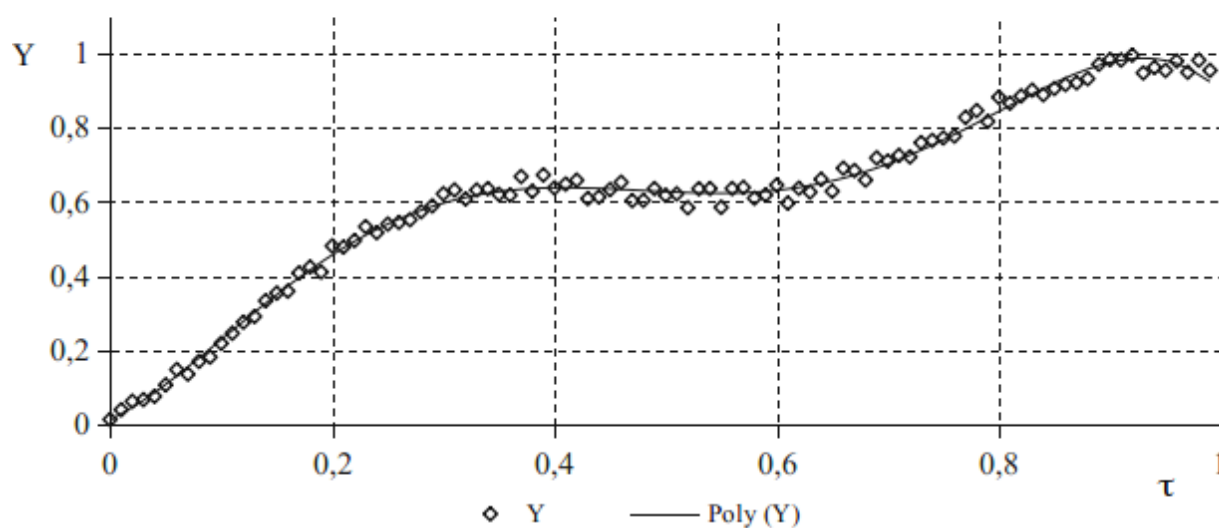


Рисунок 1.2 – Апроксимація

Оцінка якості ідентифікації наведена на рис.1.5.

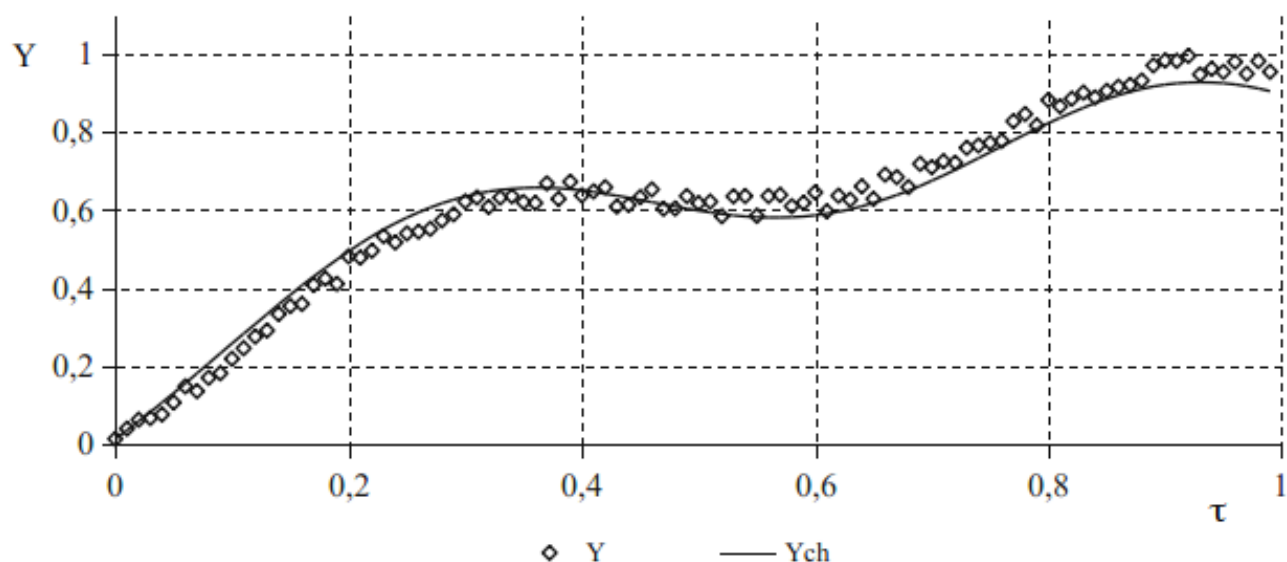


Рисунок 1.3 – Результати тестування

Таблиця 1.2 - Ідентифікація ОДР першого порядку

| i | τ | X | Y | Y' | (Y') ² | -X*Y' | X*X | -Y*Y' | X*Y | Ych |
|----|--------|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0 | 0,9935 | 0,0129 | 1,4841 | 2,2027 | -1,474 | 0,9870 | -0,019 | 0,0128 | 0,0129 |
| 2 | 0,01 | 1,0438 | 0,0391 | 1,6932 | 2,8671 | -1,767 | 1,0896 | -0,066 | 0,0408 | 0,0350 |
| 3 | 0,02 | 1,112 | 0,0619 | 1,8742 | 3,5126 | -2,084 | 1,2366 | -0,116 | 0,0689 | 0,0580 |
| 4 | 0,03 | 1,1491 | 0,0663 | 2,0286 | 4,1151 | -2,331 | 1,3204 | -0,135 | 0,0762 | 0,0815 |
| 5 | 0,04 | 1,2142 | 0,0754 | 2,1579 | 4,6564 | -2,62 | 1,4742 | -0,163 | 0,0916 | 0,1055 |
| 6 | 0,05 | 1,2678 | 0,1061 | 2,2636 | 5,1238 | -2,87 | 1,6074 | -0,24 | 0,1345 | 0,1302 |
| 7 | 0,06 | 1,3089 | 0,1473 | 2,3472 | 5,5092 | -3,072 | 1,7131 | -0,346 | 0,1928 | 0,1553 |
| 8 | 0,07 | 1,3449 | 0,1352 | 2,41 | 5,8082 | -3,241 | 1,8088 | -0,326 | 0,1818 | 0,1807 |
| 9 | 0,08 | 1,3853 | 0,1694 | 2,4535 | 6,0198 | -3,399 | 1,9192 | -0,416 | 0,2347 | 0,2062 |
| 10 | 0,09 | 1,4229 | 0,181 | 2,479 | 6,1456 | -3,527 | 2,0246 | -0,449 | 0,2576 | 0,2320 |
| 11 | 0,1 | 1,4163 | 0,2181 | 2,4878 | 6,1893 | -3,523 | 2,0058 | -0,543 | 0,3089 | 0,2574 |
| 12 | 0,11 | 1,4317 | 0,2452 | 2,4812 | 6,1565 | -3,552 | 2,0497 | -0,609 | 0,3511 | 0,2823 |
| 13 | 0,12 | 1,4712 | 0,2751 | 2,4604 | 6,0537 | -3,62 | 2,1645 | -0,677 | 0,4048 | 0,3071 |
| 14 | 0,13 | 1,5087 | 0,2904 | 2,4266 | 5,8886 | -3,661 | 2,2761 | -0,705 | 0,4382 | 0,3322 |
| 15 | 0,14 | 1,5334 | 0,3328 | 2,3811 | 5,6694 | -3,651 | 2,3514 | -0,792 | 0,5103 | 0,3573 |
| 16 | 0,15 | 1,5231 | 0,3532 | 2,3248 | 5,4046 | -3,541 | 2,3199 | -0,821 | 0,5380 | 0,3819 |
| 17 | 0,16 | 1,5324 | 0,3586 | 2,2589 | 5,1028 | -3,462 | 2,3482 | -0,81 | 0,5496 | 0,4059 |
| 18 | 0,17 | 1,4863 | 0,4075 | 2,1846 | 4,7723 | -3,247 | 2,2090 | -0,89 | 0,6057 | 0,4289 |
| 19 | 0,18 | 1,4975 | 0,4237 | 2,1027 | 4,4214 | -3,149 | 2,2424 | -0,891 | 0,6345 | 0,4509 |
| 20 | 0,19 | 1,4885 | 0,4102 | 2,0144 | 4,0576 | -2,998 | 2,2156 | -0,826 | 0,6106 | 0,4724 |
| 21 | 0,2 | 1,4882 | 0,4807 | 1,9205 | 3,6882 | -2,858 | 2,2148 | -0,923 | 0,7154 | 0,4932 |
| 22 | 0,21 | 1,4773 | 0,4775 | 1,822 | 3,3195 | -2,692 | 2,1824 | -0,87 | 0,7054 | 0,5134 |
| 23 | 0,22 | 1,4216 | 0,4951 | 1,7197 | 2,9575 | -2,445 | 2,0210 | -0,851 | 0,7039 | 0,5323 |
| 24 | 0,23 | 1,3772 | 0,5326 | 1,6146 | 2,607 | -2,224 | 1,8966 | -0,86 | 0,7334 | 0,5496 |

Продовження таблиці 1.2

| i | τ | X | Y | Y' | (Y') ² | -X*Y' | X*X | -Y*Y' | X*Y | Ych |
|----|--------|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 25 | 0,24 | 1,3309 | 0,5164 | 1,5075 | 2,2725 | -2,006 | 1,7714 | -0,778 | 0,6873 | 0,5655 |
| 26 | 0,25 | 1,2971 | 0,5395 | 1,399 | 1,9573 | -1,815 | 1,6824 | -0,755 | 0,6997 | 0,5800 |
| 27 | 0,26 | 1,2615 | 0,544 | 1,2901 | 1,6644 | -1,627 | 1,5914 | -0,702 | 0,6862 | 0,5935 |
| 28 | 0,27 | 1,223 | 0,5512 | 1,1814 | 1,3956 | -1,445 | 1,4958 | -0,651 | 0,6741 | 0,6058 |
| 29 | 0,28 | 1,1598 | 0,5728 | 1,0735 | 1,1524 | -1,245 | 1,3450 | -0,615 | 0,6643 | 0,6166 |
| 30 | 0,29 | 1,1158 | 0,5884 | 0,9671 | 0,9353 | -1,079 | 1,2449 | -0,569 | 0,6565 | 0,6260 |
| 31 | 0,3 | 1,0848 | 0,6211 | 0,8629 | 0,7446 | -0,936 | 1,1767 | -0,536 | 0,6738 | 0,6343 |
| 32 | 0,31 | 1,025 | 0,6314 | 0,7614 | 0,5797 | -0,78 | 1,0506 | -0,481 | 0,6472 | 0,6414 |
| 33 | 0,32 | 0,9607 | 0,6073 | 0,6631 | 0,4397 | -0,637 | 0,9229 | -0,403 | 0,5834 | 0,6470 |
| 34 | 0,33 | 0,8905 | 0,6313 | 0,5685 | 0,3232 | -0,506 | 0,7929 | -0,359 | 0,5621 | 0,6509 |
| 35 | 0,34 | 0,8757 | 0,6348 | 0,4782 | 0,2287 | -0,419 | 0,7668 | -0,304 | 0,5559 | 0,6538 |
| 36 | 0,35 | 0,8354 | 0,6198 | 0,3925 | 0,1541 | -0,328 | 0,6979 | -0,243 | 0,5178 | 0,6560 |
| 37 | 0,36 | 0,7743 | 0,6175 | 0,3119 | 0,0973 | -0,241 | 0,5995 | -0,193 | 0,4781 | 0,6570 |
| 38 | 0,37 | 0,7146 | 0,6677 | 0,2367 | 0,056 | -0,169 | 0,5106 | -0,158 | 0,4771 | 0,6567 |
| 39 | 0,38 | 0,6828 | 0,6279 | 0,1672 | 0,0279 | -0,114 | 0,4662 | -0,105 | 0,4288 | 0,6554 |
| 40 | 0,39 | 0,6113 | 0,672 | 0,1037 | 0,0108 | -0,063 | 0,3736 | -0,07 | 0,4107 | 0,6529 |
| 41 | 0,4 | 0,613 | 0,637 | 0,0466 | 0,0022 | -0,029 | 0,3757 | -0,03 | 0,3905 | 0,6498 |
| 42 | 0,41 | 0,5328 | 0,6472 | -0,004 | 2E-05 | 0,0022 | 0,2839 | 0,0026 | 0,3448 | 0,6458 |
| 43 | 0,42 | 0,5189 | 0,6578 | -0,048 | 0,0023 | 0,0249 | 0,2693 | 0,0316 | 0,3414 | 0,6409 |
| 44 | 0,43 | 0,5231 | 0,6083 | -0,085 | 0,0072 | 0,0445 | 0,2736 | 0,0517 | 0,3182 | 0,6361 |
| 45 | 0,44 | 0,4842 | 0,6126 | -0,115 | 0,0133 | 0,0557 | 0,2345 | 0,0705 | 0,2966 | 0,6310 |
| 46 | 0,45 | 0,4642 | 0,6323 | -0,138 | 0,0191 | 0,0641 | 0,2155 | 0,0873 | 0,2935 | 0,6253 |
| 47 | 0,46 | 0,4704 | 0,6522 | -0,154 | 0,0237 | 0,0724 | 0,2212 | 0,1004 | 0,3068 | 0,6197 |
| 48 | 0,47 | 0,453 | 0,6028 | -0,163 | 0,0265 | 0,0737 | 0,2052 | 0,0981 | 0,2731 | 0,6141 |
| 49 | 0,48 | 0,4493 | 0,6034 | -0,164 | 0,027 | 0,0739 | 0,2019 | 0,0992 | 0,2711 | 0,6083 |
| 50 | 0,49 | 0,4691 | 0,6352 | -0,159 | 0,0253 | 0,0746 | 0,2200 | 0,101 | 0,2980 | 0,6030 |
| 51 | 0,5 | 0,493 | 0,617 | -0,147 | 0,0215 | 0,0723 | 0,2430 | 0,0904 | 0,3042 | 0,5982 |
| 52 | 0,51 | 0,4666 | 0,6208 | -0,127 | 0,0162 | 0,0594 | 0,2177 | 0,0791 | 0,2897 | 0,5935 |
| 53 | 0,52 | 0,5115 | 0,5835 | -0,101 | 0,0103 | 0,0519 | 0,2617 | 0,0592 | 0,2985 | 0,5892 |
| 54 | 0,53 | 0,5394 | 0,6347 | -0,069 | 0,0048 | 0,0372 | 0,2910 | 0,0438 | 0,3424 | 0,5857 |
| 55 | 0,54 | 0,5707 | 0,6353 | -0,03 | 0,0009 | 0,0173 | 0,3256 | 0,0193 | 0,3625 | 0,5830 |
| 56 | 0,55 | 0,6035 | 0,5845 | 0,0143 | 0,0002 | -0,009 | 0,3642 | -0,008 | 0,3528 | 0,5811 |
| 57 | 0,56 | 0,6711 | 0,6353 | 0,0647 | 0,0042 | -0,043 | 0,4504 | -0,041 | 0,4264 | 0,5803 |
| 58 | 0,57 | 0,6753 | 0,6382 | 0,1204 | 0,0145 | -0,081 | 0,4560 | -0,077 | 0,4310 | 0,5804 |
| 59 | 0,58 | 0,7315 | 0,6092 | 0,1811 | 0,0328 | -0,132 | 0,5350 | -0,11 | 0,4456 | 0,5811 |
| 60 | 0,59 | 0,7685 | 0,6179 | 0,2464 | 0,0607 | -0,189 | 0,5906 | -0,152 | 0,4749 | 0,5828 |
| 61 | 0,6 | 0,8634 | 0,6446 | 0,3158 | 0,0998 | -0,273 | 0,7455 | -0,204 | 0,5566 | 0,5860 |
| 62 | 0,61 | 0,8762 | 0,596 | 0,389 | 0,1513 | -0,341 | 0,7678 | -0,232 | 0,5223 | 0,5902 |
| 63 | 0,62 | 0,9264 | 0,6362 | 0,4653 | 0,2165 | -0,431 | 0,8583 | -0,296 | 0,5894 | 0,5951 |

Продовження таблиці 1.2

| i | τ | X | Y | Y' | (Y') ² | -X*Y' | X*X | -Y*Y' | X*Y | Y _{ch} |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| 64 | 0,63 | 1,0175 | 0,6258 | 0,5442 | 0,2961 | -0,554 | 1,0353 | -0,341 | 0,6367 | 0,6013 |
| 65 | 0,64 | 1,0733 | 0,6601 | 0,6251 | 0,3908 | -0,671 | 1,1520 | -0,413 | 0,7085 | 0,6091 |
| 66 | 0,65 | 1,1305 | 0,6281 | 0,7075 | 0,5005 | -0,8 | 1,2779 | -0,444 | 0,7100 | 0,6179 |
| 67 | 0,66 | 1,1676 | 0,6901 | 0,7906 | 0,6251 | -0,923 | 1,3632 | -0,546 | 0,8058 | 0,6275 |
| 68 | 0,67 | 1,2149 | 0,6838 | 0,8739 | 0,7637 | -1,062 | 1,4759 | -0,598 | 0,8307 | 0,6378 |
| 69 | 0,68 | 1,2608 | 0,6581 | 0,9565 | 0,9149 | -1,206 | 1,5897 | -0,63 | 0,8298 | 0,6488 |
| 70 | 0,69 | 1,3566 | 0,7178 | 1,0378 | 1,077 | -1,408 | 1,8402 | -0,745 | 0,9738 | 0,6612 |
| 71 | 0,7 | 1,3862 | 0,7093 | 1,1168 | 1,2473 | -1,548 | 1,9215 | -0,792 | 0,9831 | 0,6746 |
| 72 | 0,71 | 1,4114 | 0,7244 | 1,1929 | 1,4231 | -1,684 | 1,9920 | -0,864 | 1,0223 | 0,6882 |
| 73 | 0,72 | 1,4647 | 0,7207 | 1,2652 | 1,6007 | -1,853 | 2,1454 | -0,912 | 1,0556 | 0,7024 |
| 74 | 0,73 | 1,5148 | 0,7589 | 1,3327 | 1,776 | -2,019 | 2,2948 | -1,011 | 1,1497 | 0,7174 |
| 75 | 0,74 | 1,5135 | 0,765 | 1,3945 | 1,9446 | -2,111 | 2,2907 | -1,067 | 1,1578 | 0,7325 |
| 76 | 0,75 | 1,5544 | 0,7717 | 1,4497 | 2,1015 | -2,253 | 2,4161 | -1,119 | 1,1995 | 0,7477 |
| 77 | 0,76 | 1,5663 | 0,7767 | 1,4972 | 2,2416 | -2,345 | 2,4533 | -1,163 | 1,2166 | 0,7631 |
| 78 | 0,77 | 1,5612 | 0,8272 | 1,5361 | 2,3596 | -2,398 | 2,4374 | -1,271 | 1,2914 | 0,7781 |
| 79 | 0,78 | 1,6109 | 0,8454 | 1,5652 | 2,45 | -2,521 | 2,5949 | -1,323 | 1,3618 | 0,7933 |
| 80 | 0,79 | 1,5637 | 0,8161 | 1,5835 | 2,5076 | -2,476 | 2,4450 | -1,292 | 1,2762 | 0,8081 |
| 81 | 0,8 | 1,5834 | 0,8813 | 1,5899 | 2,5277 | -2,517 | 2,5070 | -1,401 | 1,3955 | 0,8222 |
| 82 | 0,81 | 1,5458 | 0,8654 | 1,583 | 2,506 | -2,447 | 2,3895 | -1,37 | 1,3377 | 0,8358 |
| 83 | 0,82 | 1,5653 | 0,8847 | 1,5619 | 2,4394 | -2,445 | 2,4500 | -1,382 | 1,3848 | 0,8488 |
| 84 | 0,83 | 1,5583 | 0,9003 | 1,5251 | 2,3259 | -2,377 | 2,4284 | -1,373 | 1,4030 | 0,8616 |
| 85 | 0,84 | 1,5292 | 0,8881 | 1,4714 | 2,165 | -2,25 | 2,3383 | -1,307 | 1,3580 | 0,8737 |
| 86 | 0,85 | 1,4527 | 0,9049 | 1,3995 | 1,9587 | -2,033 | 2,1103 | -1,267 | 1,3146 | 0,8843 |
| 87 | 0,86 | 1,4508 | 0,9155 | 1,3081 | 1,7112 | -1,898 | 2,1049 | -1,198 | 1,3282 | 0,8938 |
| 88 | 0,87 | 1,394 | 0,9202 | 1,1958 | 1,43 | -1,667 | 1,9433 | -1,1 | 1,2828 | 0,9024 |
| 89 | 0,88 | 1,3607 | 0,9313 | 1,0611 | 1,126 | -1,444 | 1,8515 | -0,988 | 1,2672 | 0,9098 |
| 90 | 0,89 | 1,3246 | 0,9702 | 0,9027 | 0,8148 | -1,196 | 1,7546 | -0,876 | 1,2851 | 0,9162 |
| 91 | 0,9 | 1,2211 | 0,9825 | 0,7189 | 0,5168 | -0,878 | 1,4912 | -0,706 | 1,1998 | 0,9210 |
| 92 | 0,91 | 1,1976 | 0,9815 | 0,5084 | 0,2584 | -0,609 | 1,4342 | -0,499 | 1,1754 | 0,9242 |
| 93 | 0,92 | 1,1208 | 0,9947 | 0,2694 | 0,0726 | -0,302 | 1,2562 | -0,268 | 1,1148 | 0,9262 |
| 94 | 0,93 | 1,0774 | 0,947 | 0,0006 | 3E-07 | -0,001 | 1,1608 | -0,001 | 1,0203 | 0,9268 |
| 95 | 0,94 | 1,0178 | 0,9616 | -0,3 | 0,0899 | 0,3053 | 1,0360 | 0,2884 | 0,9787 | 0,9263 |
| 96 | 0,95 | 0,9695 | 0,9534 | -0,634 | 0,4015 | 0,6143 | 0,9399 | 0,6041 | 0,9243 | 0,9246 |
| 97 | 0,96 | 0,8879 | 0,9792 | -1,002 | 1,0046 | 0,8899 | 0,7884 | 0,9815 | 0,8695 | 0,9215 |
| 98 | 0,97 | 0,8198 | 0,9487 | -1,408 | 1,9814 | 1,1539 | 0,6721 | 1,3353 | 0,7777 | 0,9168 |
| 99 | 0,98 | 0,7822 | 0,9812 | -1,851 | 3,4277 | 1,4481 | 0,6118 | 1,8166 | 0,7675 | 0,9111 |
| 100 | 0,99 | 0,6952 | 0,9537 | -2,335 | 5,4542 | 1,6237 | 0,4834 | 2,2272 | 0,6630 | 0,9041 |
| | | | | | 181,5 | -129,1 | 135,25 | -41,49 | 67,092 | |
| | | | | | (Y') ² | -X*Y' | X*X | -Y*Y' | X*Y | |

Початкова матриці

| | |
|----------|----------|
| 181,500 | -129,084 |
| -129,084 | 135,252 |

Вектор правої частини

| |
|---------|
| -41,491 |
| 67,092 |

Зворотня матриця

| | |
|--------|--------|
| 0,0172 | 0,0164 |
| 0,0164 | 0,0230 |

Вектор рішення

| | |
|----|-------|
| A= | 0,387 |
| K= | 0,865 |

$$Y_{ch_i} = D1 \cdot Y_{ch_{i-1}} + D2 \cdot (X_{i-1} + X_i)$$

$$D1 = \frac{2 \cdot A - \Delta \tau}{2 \cdot A + \Delta \tau}, \quad D2 = \frac{k \cdot \Delta \tau}{2 \cdot A + \Delta \tau}$$

$$D1 = 0,9745 \quad D2 = 0,9745$$

2. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Постановка задачі.

Досліджується перехідний процес в системі, структура якої показана на рис. 2.1.

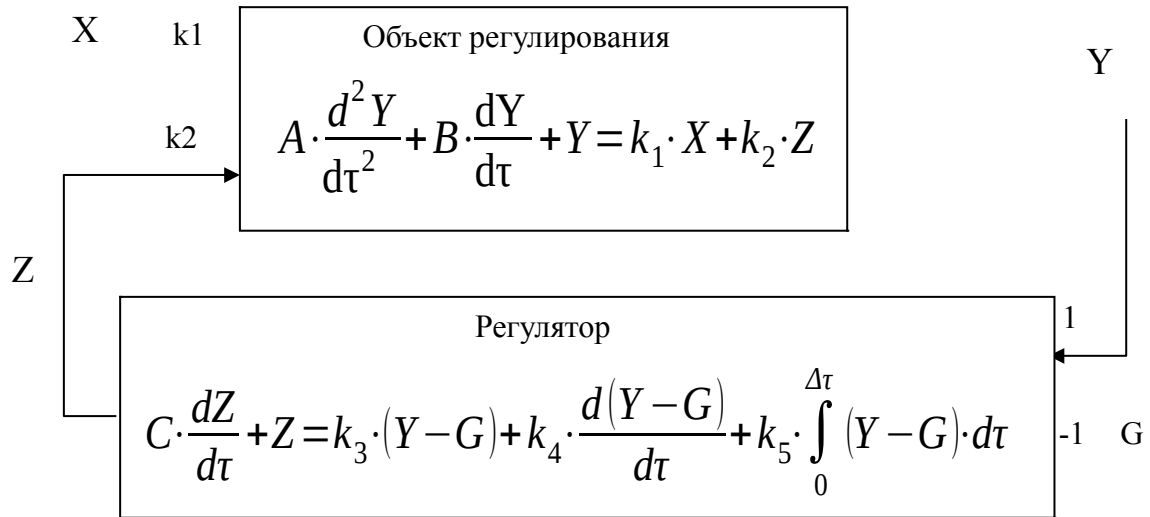


Рисунок 2.1 – Схема системи автоматичного регулювання (САР)

Система:

Математична модель об'єкта регулювання:

$$A \cdot \frac{d^2 Y}{d\tau^2} + B \cdot \frac{dY}{d\tau} + Y = k_1 \cdot X + k_2 \cdot Z \quad (2.1)$$

початкові умови: $\tau = 0 \quad Y = Y_0, \quad F = F_0 = Y'_0$.

регулятора: $C \cdot \frac{dZ}{d\tau} + Z = k_3 \cdot (Y - G) + k_4 \cdot \frac{d(Y - G)}{d\tau} + k_5 \cdot \int_0^{\Delta\tau} (Y - G) \cdot d\tau$ Математична модель

(2.2)

початкові умови: $\tau = 0 \quad Z = Z_0$.

2.2 Приведення математичної моделі об'єкта до системи звичайних диференціальних рівнянь 1-го порядку.

Вводиться нова змінна $F = dY/d\tau$.

В результаті отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} A \cdot \frac{dF}{d\tau} + B \cdot F + Y = k_1 \cdot X + k_2 \cdot Z & \text{початкові умови } \tau = 0, F = F_0 = Y'_0; \\ \frac{dY}{d\tau} = F & \text{початкові умови } \tau = 0, Y = Y_0; \\ C \cdot \frac{dZ}{d\tau} + Z = k_3 \cdot (Y - G) + k_4 \cdot \frac{d(Y - G)}{d\tau} + k_5 \cdot \int_0^{\Delta\tau} (Y - G) \cdot d\tau & \text{початкові умови } \tau = 0, Z = Z_0 \end{cases} \quad (2.3)$$

2.3 Запис кінцево-різницевих аналогів диференціальних рівнянь

Використовується явна різницева схема:

$$A \cdot \frac{d^2 Y}{d\tau^2} + B \cdot \frac{dY}{d\tau} + Y = k_1 \cdot X + k_2 \cdot Z \quad (2.4)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + \Delta\tau \cdot F_{i-1} \quad (2.5)$$

$$C \cdot \frac{Z_i - Z_{i-1}}{\Delta\tau} + Z_{i-1} = k_3 \cdot (Y_{i-1} - G_{i-1}) + k_4 \cdot \frac{(Y_i - Y_{i-1})}{\Delta\tau} - k_4 \cdot \frac{(G_i - G_{i-1})}{\Delta\tau} + k_5 \cdot \Delta\tau \cdot (Y_{i-1} - G_{i-1}) \quad (2.6)$$

Після перетворень:

$$F_i = F_{i-1} \cdot \left(\frac{A - B \cdot \Delta\tau}{A} \right) + \left(-\frac{\Delta\tau}{A} \right) \cdot Y_{i-1} + \frac{\Delta\tau \cdot k_1}{A} \cdot X_{i-1} + \frac{\Delta\tau \cdot k_2}{A} \cdot Z_{i-1} \quad (2.7)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + \Delta\tau \cdot F_{i-1} \quad (2.8)$$

$$Z_i = Z_{i-1} \cdot \left(\frac{C - \Delta\tau}{C} \right) + Y_i \cdot \left(\frac{(k_3 + k_4) \cdot \Delta\tau}{C} \right) + Y_{i-1} \cdot \left(\frac{(k_5 \cdot \Delta\tau - k_4) \cdot \Delta\tau}{C} \right) + G_i \cdot \left(-\frac{(k_3 + k_4) \cdot \Delta\tau}{C} \right) + G_{i-1} \cdot \left(\frac{(k_4 - k_5 \cdot \Delta\tau) \cdot \Delta\tau}{C} \right) \quad (2.9)$$

Після перетворень отримаємо в компактному запису:

$$F_i = F_{i-1} \cdot D1 + D2 \cdot Y_{i-1} + D3 \cdot X_{i-1} + D4 \cdot Z_{i-1} \quad (2.10)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + \Delta\tau \cdot F_{i-1} \quad (2.11)$$

$$Z_i = Z_{i-1} \cdot D5 + Y_i \cdot D6 + Y_{i-1} \cdot D7 + G_i \cdot D8 + G_{i-1} \cdot D9 \quad (2.12)$$

$$\text{де } D1 = \frac{A - B \cdot \Delta\tau}{A}, \quad D2 = -\frac{\Delta\tau}{A}, \quad D3 = \frac{\Delta\tau \cdot k_1}{A}, \quad D4 = \frac{\Delta\tau \cdot k_2}{A}, \quad D5 = \frac{C - \Delta\tau}{C}, \\ D6 = \frac{(k_3 + k_4) \cdot \Delta\tau}{C}, \quad D7 = \frac{(k_5 \cdot \Delta\tau - k_4) \cdot \Delta\tau}{C}, \quad D8 = -\frac{(k_3 + k_4) \cdot \Delta\tau}{C}, \quad D9 = \frac{(k_4 - k_5 \cdot \Delta\tau) \cdot \Delta\tau}{C}. \quad (2.13)$$

2.4 Рішення системи рівнянь (2.10) – (2.12) в середовищі Excel.

Таблиця 2.1 - Початкові дані.

| | | | | | | | |
|-----|-------|-----------------------------------|-----|-----|-------|-----|-------|
| A= | 2,186 | k3= | 1,5 | a0= | 2 | b0= | 1 |
| B= | 0,5 | k4= | 2 | a1= | -0,01 | b1= | -0,01 |
| k1= | 1,5 | k5= | 0 | a2= | 0,001 | b2= | 0 |
| k2= | -1 | Y ₀ = | 0,5 | a3= | 0 | | |
| C= | 0,5 | F ₀ =Y' ₀ = | 0,5 | a4= | 0 | | |
| Δτ= | 0,2 | Z ₀ = | 0 | | | | |

Таблиця 2.2 - Коефіцієнти для проведення моделювання системи.

| | | | | | |
|-----|-------|-----|-------|-----|------|
| D1= | 0,95 | D4= | -0,09 | D7= | -0,8 |
| D2= | -0,09 | D5= | 0,6 | D8= | -1,4 |
| D3= | 0,14 | D6= | 1,4 | D9= | 0,8 |

Таблиця 2.3 – Моделювання системи в середовищі Excel.

| i | τ | X | G | Y | F | Z |
|----|--------|-------|-------|--------|---------|---------|
| 0 | 0 | 2 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0 |
| 1 | 0,2 | 1,998 | 0,998 | 0,6 | 0,7059 | -0,1572 |
| 2 | 0,4 | 1,996 | 0,996 | 0,7412 | 0,9073 | -0,1327 |
| 3 | 0,6 | 1,994 | 0,994 | 0,9226 | 1,0840 | 0,0243 |
| 4 | 0,8 | 1,993 | 0,992 | 1,1394 | 1,2215 | 0,2781 |
| 5 | 1 | 1,991 | 0,990 | 1,3837 | 1,3094 | 0,6001 |
| 6 | 1,2 | 1,989 | 0,988 | 1,6456 | 1,3412 | 0,9658 |
| 7 | 1,4 | 1,988 | 0,986 | 1,9139 | 1,3140 | 1,3524 |
| 8 | 1,6 | 1,987 | 0,984 | 2,1767 | 1,2279 | 1,7388 |
| 9 | 1,8 | 1,985 | 0,982 | 2,4222 | 1,0861 | 2,1055 |
| 10 | 2 | 1,984 | 0,980 | 2,6394 | 0,8946 | 2,4343 |
| 11 | 2,2 | 1,983 | 0,978 | 2,8184 | 0,6618 | 2,7096 |
| 12 | 2,4 | 1,982 | 0,976 | 2,9507 | 0,3978 | 2,9180 |
| 13 | 2,6 | 1,981 | 0,974 | 3,0303 | 0,1147 | 3,0499 |
| 14 | 2,8 | 1,980 | 0,972 | 3,0532 | -0,1750 | 3,0986 |
| 15 | 3 | 1,979 | 0,970 | 3,0182 | -0,4581 | 3,0617 |
| 16 | 3,2 | 1,978 | 0,968 | 2,9266 | -0,7218 | 2,9405 |
| 17 | 3,4 | 1,978 | 0,966 | 2,7822 | -0,9541 | 2,7401 |
| 18 | 3,6 | 1,977 | 0,964 | 2,5914 | -1,1443 | 2,4694 |
| 19 | 3,8 | 1,976 | 0,962 | 2,3625 | -1,2837 | 2,1405 |
| 20 | 4 | 1,976 | 0,960 | 2,1058 | -1,3657 | 1,7680 |
| 21 | 4,2 | 1,976 | 0,958 | 1,8326 | -1,3865 | 1,3687 |
| 22 | 4,4 | 1,975 | 0,956 | 1,5554 | -1,3448 | 0,9606 |
| 23 | 4,6 | 1,975 | 0,954 | 1,2864 | -1,2424 | 0,5622 |
| 24 | 4,8 | 1,975 | 0,952 | 1,0379 | -1,0836 | 0,1917 |
| 25 | 5 | 1,975 | 0,950 | 0,8212 | -0,8755 | -0,1340 |
| 26 | 5,2 | 1,975 | 0,948 | 0,6461 | -0,6273 | -0,4001 |
| 27 | 5,4 | 1,975 | 0,946 | 0,5206 | -0,3500 | -0,5940 |
| 28 | 5,6 | 1,975 | 0,944 | 0,4506 | -0,0562 | -0,7068 |
| 29 | 5,8 | 1,976 | 0,942 | 0,4394 | 0,2409 | -0,7331 |
| 30 | 6 | 1,976 | 0,940 | 0,4876 | 0,5278 | -0,6712 |
| 31 | 6,2 | 1,976 | 0,938 | 0,5931 | 0,7917 | -0,5236 |
| 32 | 6,4 | 1,977 | 0,936 | 0,7515 | 1,0203 | -0,2966 |
| 33 | 6,6 | 1,978 | 0,934 | 0,9555 | 1,2034 | -0,0002 |
| 34 | 6,8 | 1,978 | 0,932 | 1,1962 | 1,3323 | 0,3525 |
| 35 | 7 | 1,979 | 0,930 | 1,4627 | 1,4011 | 0,7459 |
| 36 | 7,2 | 1,980 | 0,928 | 1,7429 | 1,4066 | 1,1622 |
| 37 | 7,4 | 1,981 | 0,926 | 2,0242 | 1,3481 | 1,5829 |

Продовження таблиці 2.3

| i | τ | X | G | Y | F | Z |
|----|--------|-------|-------|--------|---------|--------|
| 38 | 7,6 | 1,982 | 0,924 | 2,2938 | 1,2283 | 1,9890 |
| 39 | 7,8 | 1,983 | 0,922 | 2,5395 | 1,0522 | 2,3620 |
| 40 | 8 | 1,984 | 0,920 | 2,7499 | 0,8278 | 2,6851 |
| 41 | 8,2 | 1,985 | 0,918 | 2,9155 | 0,5649 | 2,9436 |
| 42 | 8,4 | 1,987 | 0,916 | 3,0285 | 0,2755 | 3,1256 |
| 43 | 8,6 | 1,988 | 0,914 | 3,0836 | -0,0275 | 3,2228 |
| 44 | 8,8 | 1,989 | 0,912 | 3,0781 | -0,3304 | 3,2305 |
| 45 | 9 | 1,991 | 0,910 | 3,0120 | -0,6195 | 3,1482 |
| 46 | 9,2 | 1,993 | 0,908 | 2,8881 | -0,8815 | 2,9795 |
| 47 | 9,4 | 1,994 | 0,906 | 2,7118 | -1,1045 | 2,7317 |
| 48 | 9,6 | 1,996 | 0,904 | 2,4909 | -1,2783 | 2,4160 |
| 49 | 9,8 | 1,998 | 0,902 | 2,2352 | -1,3949 | 2,0466 |

2.5 Блок-схема алгоритму моделювання

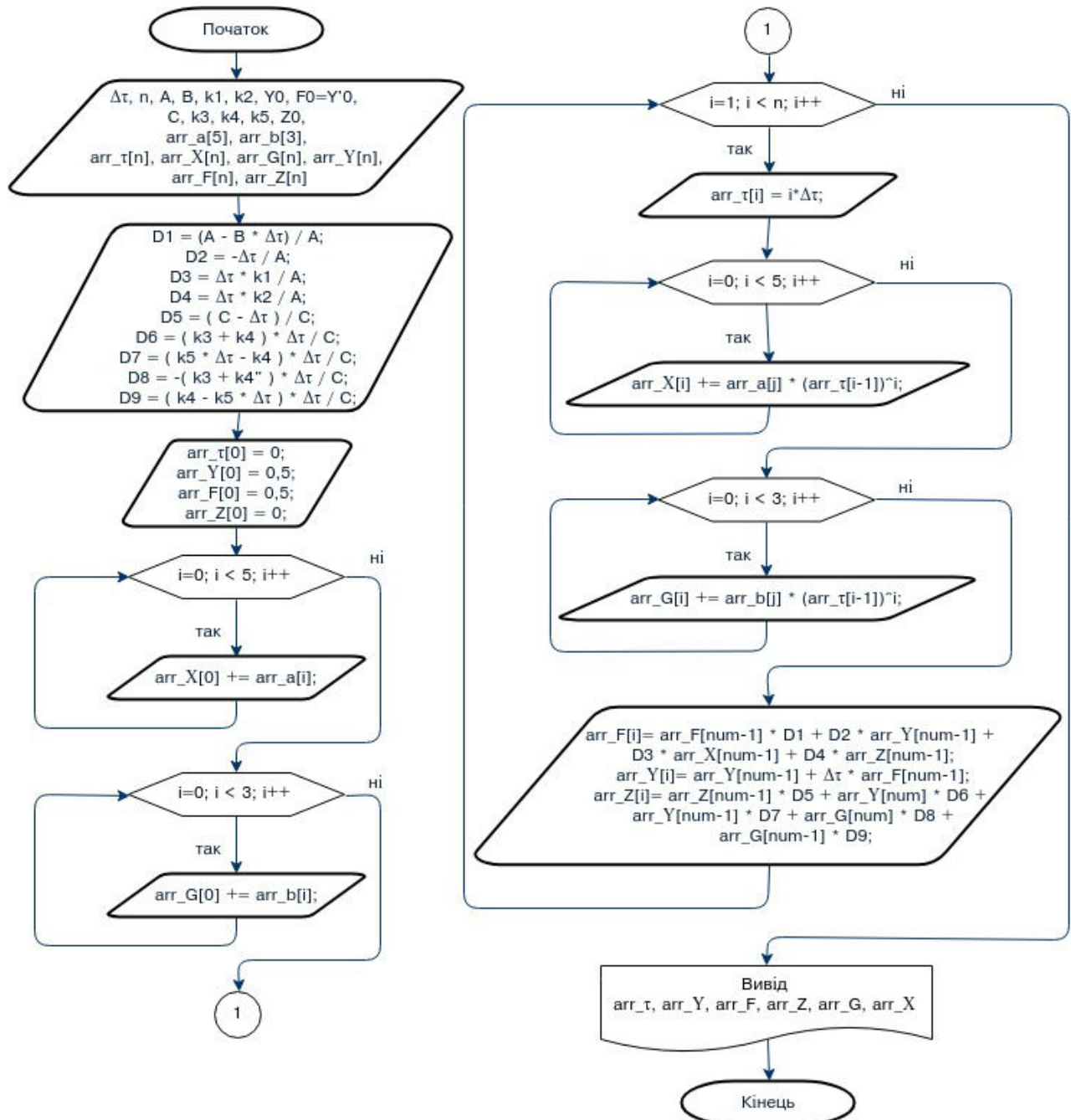


Рисунок 2.2 - Блок-схема процесса моделирования динамической системы явным методом

2.6 Результати моделювання.

Таблиця 2.4 - Результати моделювання в середовищі Qt

| i | τ | X | G | Y | F | Z |
|----|--------|-------|-------|--------|---------|---------|
| 0 | 0 | 2 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0 |
| 1 | 0,2 | 1,998 | 0,998 | 0,6 | 0,7059 | -0,1572 |
| 2 | 0,4 | 1,996 | 0,996 | 0,7412 | 0,9073 | -0,1327 |
| 3 | 0,6 | 1,994 | 0,994 | 0,9226 | 1,0840 | 0,0243 |
| 4 | 0,8 | 1,993 | 0,992 | 1,1394 | 1,2215 | 0,2781 |
| 5 | 1 | 1,991 | 0,990 | 1,3837 | 1,3094 | 0,6001 |
| 6 | 1,2 | 1,989 | 0,988 | 1,6456 | 1,3412 | 0,9658 |
| 7 | 1,4 | 1,988 | 0,986 | 1,9139 | 1,3140 | 1,3524 |
| 8 | 1,6 | 1,987 | 0,984 | 2,1767 | 1,2279 | 1,7388 |
| 9 | 1,8 | 1,985 | 0,982 | 2,4222 | 1,0861 | 2,1055 |
| 10 | 2 | 1,984 | 0,980 | 2,6394 | 0,8946 | 2,4343 |
| 11 | 2,2 | 1,983 | 0,978 | 2,8184 | 0,6618 | 2,7096 |
| 12 | 2,4 | 1,982 | 0,976 | 2,9507 | 0,3978 | 2,9180 |
| 13 | 2,6 | 1,981 | 0,974 | 3,0303 | 0,1147 | 3,0499 |
| 14 | 2,8 | 1,980 | 0,972 | 3,0532 | -0,1750 | 3,0986 |
| 15 | 3 | 1,979 | 0,970 | 3,0182 | -0,4581 | 3,0617 |
| 16 | 3,2 | 1,978 | 0,968 | 2,9266 | -0,7218 | 2,9405 |
| 17 | 3,4 | 1,978 | 0,966 | 2,7822 | -0,9541 | 2,7401 |
| 18 | 3,6 | 1,977 | 0,964 | 2,5914 | -1,1443 | 2,4694 |
| 19 | 3,8 | 1,976 | 0,962 | 2,3625 | -1,2837 | 2,1405 |
| 20 | 4 | 1,976 | 0,960 | 2,1058 | -1,3657 | 1,7680 |
| 21 | 4,2 | 1,976 | 0,958 | 1,8326 | -1,3865 | 1,3687 |
| 22 | 4,4 | 1,975 | 0,956 | 1,5554 | -1,3448 | 0,9606 |
| 23 | 4,6 | 1,975 | 0,954 | 1,2864 | -1,2424 | 0,5622 |
| 24 | 4,8 | 1,975 | 0,952 | 1,0379 | -1,0836 | 0,1917 |
| 25 | 5 | 1,975 | 0,950 | 0,8212 | -0,8755 | -0,1340 |
| 26 | 5,2 | 1,975 | 0,948 | 0,6461 | -0,6273 | -0,4001 |
| 27 | 5,4 | 1,975 | 0,946 | 0,5206 | -0,3500 | -0,5940 |
| 28 | 5,6 | 1,975 | 0,944 | 0,4506 | -0,0562 | -0,7068 |
| 29 | 5,8 | 1,976 | 0,942 | 0,4394 | 0,2409 | -0,7331 |
| 30 | 6 | 1,976 | 0,940 | 0,4876 | 0,5278 | -0,6712 |
| 31 | 6,2 | 1,976 | 0,938 | 0,5931 | 0,7917 | -0,5236 |
| 32 | 6,4 | 1,977 | 0,936 | 0,7515 | 1,0203 | -0,2966 |
| 33 | 6,6 | 1,978 | 0,934 | 0,9555 | 1,2034 | -0,0002 |
| 34 | 6,8 | 1,978 | 0,932 | 1,1962 | 1,3323 | 0,3525 |
| 35 | 7 | 1,979 | 0,930 | 1,4627 | 1,4011 | 0,7459 |
| 36 | 7,2 | 1,980 | 0,928 | 1,7429 | 1,4066 | 1,1622 |
| 37 | 7,4 | 1,981 | 0,926 | 2,0242 | 1,3481 | 1,5829 |
| 38 | 7,6 | 1,982 | 0,924 | 2,2938 | 1,2283 | 1,9890 |
| 39 | 7,8 | 1,983 | 0,922 | 2,5395 | 1,0522 | 2,3620 |
| 40 | 8 | 1,984 | 0,920 | 2,7499 | 0,8278 | 2,6851 |
| 41 | 8,2 | 1,985 | 0,918 | 2,9155 | 0,5649 | 2,9436 |
| 42 | 8,4 | 1,987 | 0,916 | 3,0285 | 0,2755 | 3,1256 |

Продовження таблиці 2.4

| i | τ | X | G | Y | F | Z |
|----|--------|-------|-------|--------|---------|--------|
| 43 | 8,6 | 1,988 | 0,914 | 3,0836 | -0,0275 | 3,2228 |
| 44 | 8,8 | 1,989 | 0,912 | 3,0781 | -0,3304 | 3,2305 |
| 45 | 9 | 1,991 | 0,910 | 3,0120 | -0,6195 | 3,1482 |
| 46 | 9,2 | 1,993 | 0,908 | 2,8881 | -0,8815 | 2,9795 |
| 47 | 9,4 | 1,994 | 0,906 | 2,7118 | -1,1045 | 2,7317 |
| 48 | 9,6 | 1,996 | 0,904 | 2,4909 | -1,2783 | 2,4160 |
| 49 | 9,8 | 1,998 | 0,902 | 2,2352 | -1,3949 | 2,0466 |

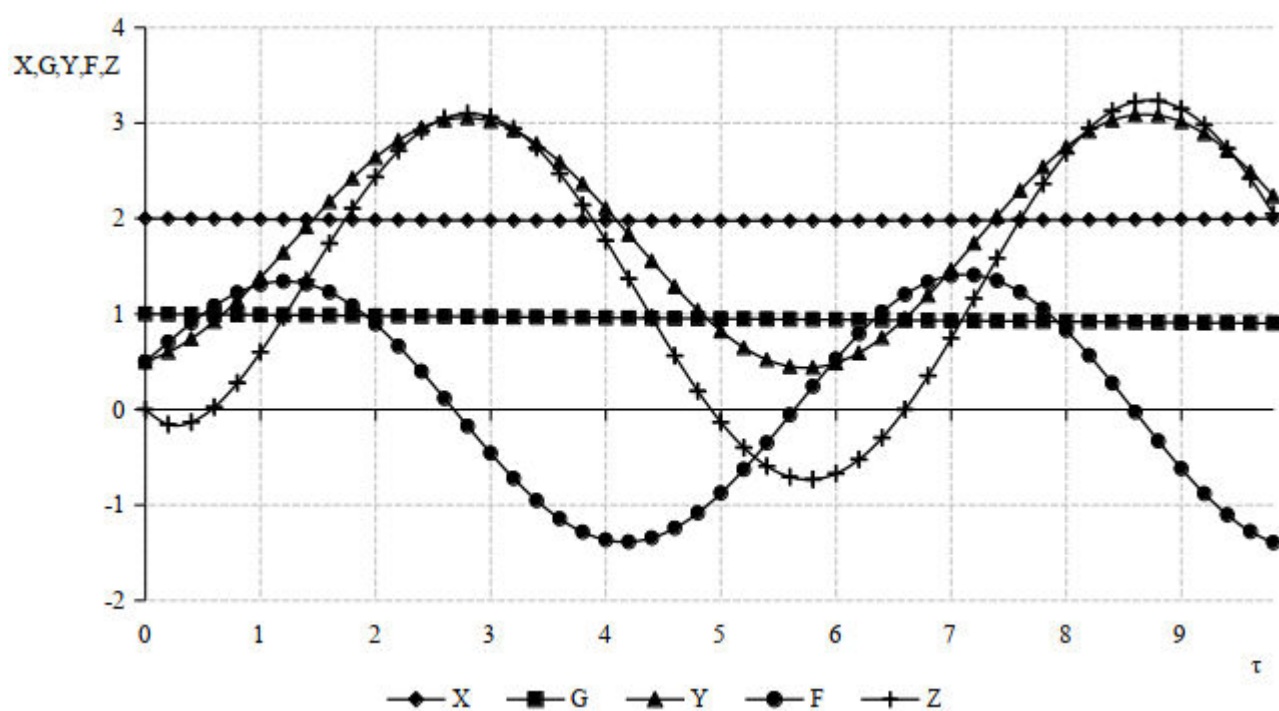


Рисунок 2.4 – Результати тестування

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания разработанные кафедрой “Техническая кибернетика” и электронные документы – методуказания к лабораторным работам по курсам “Численные методы” и “Моделирование систем”.
2. Алабужев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М., Шеховцов Б.А. Теория подобия и размерностей. Моделирование.-М.: Высшая школа. 1968.- 208 с.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов -13-е изд., исправленное.-М.: Наука. Гл.Ред. физ.-мат. лит.. 1986. -544 с.
4. Волков Е.А. Численные методы: Учебное пособие. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1982. - 256 с.
5. Вычислительная техника и программирование. Часть 3 «Основы алгоритмизации, программирования и решения инженерных и экономических задач на ЭВМ». Учебное пособие / Под общей редакцией проф. Меркта Р.В. - Одесса: ОГМУ.2001. -86 с.
6. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы (введение в теорию). Учебное пособие. - М: Наука. 1973.- 400 с.
7. Лебедев А.Н. Моделирование в научно-технических исследованиях. -М.: Радио и связь. 1989. -224 с.
8. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для втузов. - 2-е изд., перераб. и доп. -М.:Высш. шк.. 1988. -239 с.
9. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. - Томск: МП "Раско". 1991.-272 с.
10. Турчак Л.И. Основы численных методов: Учеб. Пособие. - М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат. лит.. 1987. - 320 с.

ДОДАТКИ

Модулі задачі моделювання.

Класс MainWindow:

```
MainWindow::MainWindow(QWidget *parent) :
    QMainWindow(parent),
    ui(new Ui::MainWindow)
{
    ui->setupUi(this);
    build();
}
MainWindow::~MainWindow()
{
    delete ui;
}
void MainWindow::build()
{
    subLayout1=0;
    subLayout1 = new QCPLayoutGrid;
    ui->graph_1->plotLayout()->addElement(1, 0, subLayout1);
    subLayout1->setMargins(QMargins(5, 0, 5, 5));
    //subLayout1->clear();
    subLayout1->addElement(0, 0, ui->graph_1->legend);
    //ui->graph_1->legend->setVisible(false);
    ui->graph_1->legend->setVisible(true);
    ui->graph_1->legend->setFillOrder(QCPLegend::foColumnsFirst);
    QColor none; none.setRgb(255,255,255);
    QPen p; p.setColor(none);
    ui->graph_1->legend->setBorderPen(p );
    model=0;
    valueChanged=false;
    headerName<<"i"<<"τ"<<"X"<<"G"<<"Y"<<"F"<<"Z"; //<<"ΔY2"<<"δY1"<<"δY2";
    //
    lebelObjName<<"Δτ"<<"n"<<"A"<<"B"<<"k1"<<"k2"<<"Y0"<<"F0=Y\ '0";
    lebelRegName<<"C"<<"k3"<<"k4"<<"k5"<<"Z0";
    lebelXName<<"a0"<<"a1"<<"a2"<<"a3"<<"a4";
    lebelGName<<"b0"<<"b1"<<"b2";
    colColumn=headerName.length()-1;
    //
    tableRate=new QTableView();
    tableRate->setFont(QFont("Arial",10,5000));
    tableRate->verticalHeader()->hide();
    tableRate->horizontalHeader()->hide();
    ui->verticalLayout_4->addWidget(tableRate);
    ui->verticalLayout_4->setAlignment(Qt::AlignLeft);
    ui->verticalLayout_2->setAlignment(Qt::AlignTop);
    ui->verticalLayout_3->setAlignment(Qt::AlignTop);
    for(int i=0; i<lebelObjName.length(); i++)//MyLineEdit починається с 0
    {
        QHBoxLayout *hLayout = new QHBoxLayout();
        QLabel *label = new QLabel(QString("%1=").arg(lebelObjName[i] ));
        MyLineEdit *line = new MyLineEdit(lebelObjName[i]);
        line->setFixedWidth(50);
        //
        linesObjValue.append(line);
        connect(line, SIGNAL(MySignal(MyLineEdit*))
, this, SLOT(lineChanged(MyLineEdit*) ));
        //
        hLayout->addWidget(label);
        hLayout->addWidget(line);
        hLayout->setAlignment(label,Qt::AlignLeft);
```

```

        hLayout->setAlignment(line,Qt::AlignLeft);
        ui->verticalLayout_2->addLayout(hLayout);
    }
    for(int i=0; i<lebelRegName.length(); i++)
    {
        QHBoxLayout *hLayout = new QHBoxLayout();
        QLabel *label = new QLabel(QString("%1=").arg(lebelRegName[i] ));
        MyLineEdit *line = new MyLineEdit(lebelRegName[i]);
        line->setFixedWidth(50);
        //
        linesRegValue.append(line);
        //labelForKompetent.append(label);
        connect(line, SIGNAL(MySignal(MyLineEdit*))
, this, SLOT(lineChanged(MyLineEdit*) ));
        //
        hLayout->addWidget(label);
        hLayout->addWidget(line);
        hLayout->setAlignment(label,Qt::AlignLeft);
        hLayout->setAlignment(line,Qt::AlignLeft);
        ui->verticalLayout_2->addLayout(hLayout);
    }
    for(int i=0; i<lebelXName.length(); i++)
    {
        QHBoxLayout *hLayout = new QHBoxLayout();
        QLabel *label = new QLabel(QString("%1=").arg(lebelXName[i] ));
        MyLineEdit *line = new MyLineEdit(lebelXName[i]);
        line->setFixedWidth(50);
        //
        linesXValue.append(line);
        //labelForKompetent.append(label);
        connect(line, SIGNAL(MySignal(MyLineEdit*))
, this, SLOT(lineChanged(MyLineEdit*) ));
        //
        hLayout->addWidget(label);
        hLayout->addWidget(line);
        hLayout->setAlignment(label,Qt::AlignLeft);
        hLayout->setAlignment(line,Qt::AlignLeft);
        ui->verticalLayout_3->addLayout(hLayout);
    }
    for(int i=0; i<lebelGName.length(); i++)
    {
        QHBoxLayout *hLayout = new QHBoxLayout();
        QLabel *label = new QLabel(QString("%1=").arg(lebelGName[i] ));
        MyLineEdit *line = new MyLineEdit(lebelGName[i]);
        line->setFixedWidth(50);
        //
        linesGValue.append(line);
        //labelForKompetent.append(label);
        connect(line, SIGNAL(MySignal(MyLineEdit*))
, this, SLOT(lineChanged(MyLineEdit*) ));
        //
        hLayout->addWidget(label);
        hLayout->addWidget(line);
        hLayout->setAlignment(label,Qt::AlignLeft);
        hLayout->setAlignment(line,Qt::AlignLeft);
        ui->verticalLayout_3->addLayout(hLayout);
    }
    linesObjValue[0]->setText("0.2");//"Δτ"
    linesObjValue[1]->setText("51");//"n"
    linesObjValue[2]->setText("2.186");//"A"
    linesObjValue[3]->setText("0.5");//"B"
    linesObjValue[4]->setText("1.5");//"k1"
    linesObjValue[5]->setText("-1");//"k2"
    linesObjValue[6]->setText("0.5");//"Y0"

```

```

linesObjValue[7]->setText("0.5");//"F0=Y\'0"
linesRegValue[0]->setText("0.5");//"C"
linesRegValue[1]->setText("1.5");//"k3"
linesRegValue[2]->setText("2");//"k4"
linesRegValue[3]->setText("0");//"k5"
linesRegValue[4]->setText("0");//"Z0"
linesXValue[0]->setText("2");//"a0"
linesXValue[1]->setText("-0.01");//"a1"
linesXValue[2]->setText("0.001");//"a2"
linesXValue[3]->setText("0");//"a3"
linesXValue[4]->setText("0");//"a4"
linesGValue[0]->setText("1");//"b0"
linesGValue[1]->setText("-0.01");//"b1"
linesGValue[2]->setText("0");//"b2"
//
rebuild();
}
void MainWindow::drawFirstG()
{
//headerName<<"i"<<"τ"<<"X"<<"G"<<"Y"<<"F"<<"Z";
ui->graph_1->clearGraphs();//очищаем все графики
ui->graph_1->addGraph();
ui->graph_1->addGraph();
ui->graph_1->addGraph();
ui->graph_1->addGraph();
ui->graph_1->addGraph();
//Говорим, что отрисовать нужно график по нашим двум массивам x и y
ui->graph_1->graph(0)->setData(valuesForTable[0], valuesForTable[1]);
ui->graph_1->graph(1)->setData(valuesForTable[0], valuesForTable[2]);
ui->graph_1->graph(2)->setData(valuesForTable[0], valuesForTable[3]);
ui->graph_1->graph(3)->setData(valuesForTable[0], valuesForTable[4]);
ui->graph_1->graph(4)->setData(valuesForTable[0], valuesForTable[5]);
//
ui->graph_1->graph(0)->setPen(QColor(0, 0, 0, 255));//задаем цвет точки
ui->graph_1->graph(1)->setPen(QColor(0, 0, 0, 255));
ui->graph_1->graph(2)->setPen(QColor(0, 0, 0, 255));
ui->graph_1->graph(3)->setPen(QColor(0, 0, 0, 255));
ui->graph_1->graph(4)->setPen(QColor(0, 0, 0, 255));
//формируем вид точек
ui->graph_1->graph(0)-
>setScatterStyle(QCPScatterStyle(QCPScatterStyle::ssDiamond, 8));
ui->graph_1->graph(1)-
>setScatterStyle(QCPScatterStyle(QCPScatterStyle::ssSquare, 5));
ui->graph_1->graph(2)-
>setScatterStyle(QCPScatterStyle(QCPScatterStyle::ssTriangle, 5));
ui->graph_1->graph(3)-
>setScatterStyle(QCPScatterStyle(QCPScatterStyle::ssDisc, 5));
ui->graph_1->graph(4)-
>setScatterStyle(QCPScatterStyle(QCPScatterStyle::ssPlus, 5));
//
ui->graph_1->graph(0)->setName(headerName[2]);
ui->graph_1->graph(1)->setName(headerName[3]);
ui->graph_1->graph(2)->setName(headerName[4]);
ui->graph_1->graph(3)->setName(headerName[5]);
ui->graph_1->graph(4)->setName(headerName[6]);
//Подписываем оси Oх и Oу
ui->graph_1->xAxis->setLabel("τ");
ui->graph_1->yAxis->setLabel("X, G, Y, F, Z");
int N=valuesForTable[0].size();
//Установим область, которая будет показываться на графике
ui->graph_1->xAxis->setRange(valuesForTable[0][0], valuesForTable[0][N-
1]);//Для оси Oх
double minY = valuesForTable[1][0], maxY = valuesForTable[1][0];
for (int i=1; i<N; i++)
{

```

```

        if (valuesForTable[1][i]<minY) minY = valuesForTable[1][i];
        if (valuesForTable[1][i]>maxY) maxY = valuesForTable[1][i];
        if (valuesForTable[2][i]<minY) minY = valuesForTable[2][i];
        if (valuesForTable[2][i]>maxY) maxY = valuesForTable[2][i];
        //
        if (valuesForTable[3][i]<minY) minY = valuesForTable[3][i];
        if (valuesForTable[3][i]>maxY) maxY = valuesForTable[3][i];
        if (valuesForTable[4][i]<minY) minY = valuesForTable[4][i];
        if (valuesForTable[4][i]>maxY) maxY = valuesForTable[4][i];
        if (valuesForTable[5][i]<minY) minY = valuesForTable[5][i];
        if (valuesForTable[5][i]>maxY) maxY = valuesForTable[5][i];
    }
    ui->graph_1->yAxis->setRange(minY -0.2, maxY +0.2);//Для оси Oy
    ui->graph_1->plotLayout()->setRowStretchFactor(1, 0.001);
    ui->graph_1->replot();
    ui->graph_1->setFixedHeight(350);
}
void MainWindow::rebuild()
{
    model = new QStandardItemModel;
    QStandardItem *item;
    for(int i=0; i<colRow; i++)//нумерация первого столбца//пересестить в
calculate()//не является названием столбца
    {
        rowName.append(QString().setNum(i) );
    }
    for (int i=0; i<colRow; i++)//номера строк
    {
        QString s = rowName[i];
        item = new QStandardItem(s);
        item->setFont(QFont("Arial",10,6500));
        item->setEditable(false);
        item->setSelectable(false);
        item->setBackground(QBrush(QColor(250,230,170)) );
        //
        model->setItem(i+1, 0, item);
    }
    for(int i=0; i<colColumn+1; i++)//названия столбцов
    {
        QString s = headerName[i];
        item = new QStandardItem(s);
        item->setFont(QFont("Arial",10,6500));
        item->setEditable(false);
        item->setSelectable(false);
        item->setBackground(QBrush(QColor(250,230,170)) );
        //
        model->setItem(0, i, item);
    }
    if(!valuesForTable.isEmpty())
    {
        for (int i=0; i<colRow; i++)
        {
            for(int j=0;j<colColumn; j++)
            {
                item=0;
                for(int col = 4; col >= 1; col--)
                {
                    int num = pow(10 ,col-1);
                    float number = valuesForTable[j][i] * num;
                    if( abs( number - int(number) ) > 0.1 )
                    {
                        item = new
QStandardItem(QString().setNum(valuesForTable[j][i], 'f', col));
                        break;
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        }
    }
    if(item == 0)
        item = new QTableWidgetItem(QString().setNum(valuesForTable[j]
[i], 'f', 0));
    item->setEditable(false);
    item->setFont(QFont("Arial", 10, 6500));
    model->setItem(i+1, j+1, item);
}
}
drawFirstG();
}
tableRate->setModel(model);
for(int i=0; i < colColumn+1; i++)//
{
    tableRate->horizontalHeader()-
>setSectionResizeMode(i, QHeaderView::ResizeToContents);
}
QSize size = getSize();//размер всей таблицы
tableRate->setFixedWidth(size.width()+15);//15 для скроллбара
tableRate->setMaximumHeight(size.height());
//tableRate->setFixedSize(getSize());
}
QSize MainWindow::getSize()
{
    QSize tableSize;
    int i=0;
    int height=0;
    int currentHeight=tableRate->rowHeight(i);
    while(currentHeight > 0)
    {
        height+=currentHeight;
        ++i;
        currentHeight=tableRate->rowHeight(i);
    }
    height+=i/2+1;
    i=0;
    int width=0;
    int currentWidth=tableRate->columnWidth(i);
    while(currentWidth > 0)
    {
        width+=currentWidth;
        ++i;
        currentWidth=tableRate->columnWidth(i);
    }
    width+=i/2+1;
    //width = tableCreterion->columnWidth(0)+20;
    tableSize.setHeight(height);
    tableSize.setWidth(width);
    return tableSize;
}
void MainWindow::calculate()
{
    colRow = UserValue["n"];//число строк
    double _D1 = (UserValue["A"] - UserValue["B"] * UserValue["Δτ"]) /
UserValue["A"];
    double _D2 = -UserValue["Δτ"] / UserValue["A"];
    double _D3 = UserValue["Δτ"] * UserValue["k1"] / UserValue["A"];
    double _D4 = UserValue["Δτ"] * UserValue["k2"] / UserValue["A"];
    double _D5 = ( UserValue["C"] - UserValue["Δτ"] ) / UserValue["C"];
    double _D6 = ( UserValue["k3"] + UserValue["k4"] ) * UserValue["Δτ"] /
UserValue["C"];
    double _D7 = ( UserValue["k5"] * UserValue["Δτ"] - UserValue["k4"] ) *
UserValue["Δτ"] / UserValue["C"];

```

```

double _D8 = -( UserValue["k3"] + UserValue["k4"] ) * UserValue["Δτ"] /
UserValue["C"];
double _D9 = ( UserValue["k4"] - UserValue["k5"] * UserValue["Δτ"] ) *
UserValue["Δτ"] / UserValue["C"];
qDebug() <<QString("D1 = %1").arg(_D1);
qDebug() <<QString("D2 = %1").arg(_D2);
qDebug() <<QString("D3 = %1").arg(_D3);
qDebug() <<QString("D4 = %1").arg(_D4);
qDebug() <<QString("D5 = %1").arg(_D5);
qDebug() <<QString("D6 = %1").arg(_D6);
qDebug() <<QString("D7 = %1").arg(_D7);
qDebug() <<QString("D8 = %1").arg(_D8);
qDebug() <<QString("D9 = %1").arg(_D9);
//headerName<<"i"<<"τ"<<"X"<<"G"<<"Y"<<"F"<<"Z";
double t=0;
QVector<double> _FiColumn;//столбцы таблицы
QVector<double> _YiColumn;
QVector<double> _ZiColumn;
QVector<double> _XColumn;
QVector<double> _GColumn;
QVector<double> _tiColumn;//время
double _X=0;
double _G=0;
_FiColumn.append( UserValue["F0=Y\ '0"] );//установка начальных значений
_YiColumn.append( UserValue["Y0"] );
_ZiColumn.append( UserValue["Z0"] );
for(int i=0; i<lebelXName.length(); i++)
    _X += UserValue[QString("a%1").arg(i) ] * pow(t, i);
_XColumn.append( _X );
for(int i=0; i<lebelGName.length(); i++)
    _G += UserValue[QString("b%1").arg(i) ] * pow(t, i);
_GColumn.append( _G );
_tiColumn.append(t);
t+=UserValue["Δτ"];
int num=1;
while( num<colRow )
{
    _X = 0;
    for(int i=0; i<lebelXName.length(); i++)
    {
        //QString s = QString("a%1").arg(i);
        _X += UserValue[QString("a%1").arg(i)] * pow(t, i);
    }
    _XColumn.append( _X );
    _G = 0;
    for(int i=0; i<lebelGName.length(); i++)
        _G += UserValue[QString("b%1").arg(i) ] * pow(t, i);
    _GColumn.append( _G );
    _FiColumn.append( _FiColumn[num-1] * _D1 + _D2 * _YiColumn[num-1] + _D3
* _XColumn[num-1] + _D4 * _ZiColumn[num-1] );
    _YiColumn.append( _YiColumn[num-1] + UserValue["Δτ"] * _FiColumn[num-
1] );
    _ZiColumn.append( _ZiColumn[num-1] * _D5 + _YiColumn[num] * _D6 +
_YiColumn[num-1] * _D7 + _GColumn[num] * _D8 + _GColumn[num-1] * _D9 );
    _tiColumn.append(t);
    t+=UserValue["Δτ"];
    num++;
}
valuesForTable.append(_tiColumn);//"τ"
valuesForTable.append(_XColumn);//"X"
valuesForTable.append(_GColumn);//"G"
valuesForTable.append(_YiColumn);//"Y"
valuesForTable.append(_FiColumn);//"F"
valuesForTable.append(_ZiColumn);//"Z"

```

```

}
void MainWindow::start()
{
    foreach (QVector<double> collon, valuesForTable)
    {
        collon.clear();
    }
    valuesForTable.clear();
    //
    if(isFull())//проверку сделать//ок
    {
        calculate();//заполнение ответов для построения
    }
    rebuild();
}
void MainWindow::lineChanged(MyLineEdit * lE)
{
    if(valueChanged)
        return;
    QString id = lE->getID();
    bool ok;
    float f=lE->text().toFloat(&ok);
    if(lE->text().length() > 0 && ok)
    {
        UserValue[id]=f;
    }
    else
    {
        UserValue.remove(id);
        valueChanged=true;
        lE->setText("");
        valueChanged=false;
    }
    start();
}
bool MainWindow::isFull()//ok
{
    int size = linesObjValue.size() + linesRegValue.size() +
               linesXValue.size() + linesGValue.size();
    if(UserValue.size() != size)
        return false;
    return true;
}

```


Інтерфейс розробленої програми.

