




ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

**МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ В АВТОМАТИЗОВАНИХ
СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ
ПРОЦЕСАМИ**

**методичні вказівки до виконання
лабораторних робіт**

Запоріжжя 2024



УДК 681.5(072)
М54

Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 8 від 12.07.2024 р)

Укладач

Мірошніченко В.І., канд. техн. наук, доцент.

М54 Методи оптимізації в автоматизованих системах управління технологічними процесами : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт / уклад. В. І. Мірошніченко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 68 с.

У методичних рекомендаціях наведено тематику лабораторних робіт, методичні пояснення щодо порядку та приклади їх виконання, критерії оцінювання, вимоги до оформлення звітів, питання для самоперевірки тощо.

УДК 681.5(072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Лабораторна робота №1. «Основи вирішення задач оптимізації в MATLAB»	5
1.1 Завдання	5
1.2 Хід роботи.....	5
1.2.1 Частина 1. Задача безумовної оптимізації.	5
1.2.2 Частина 2. Задача умовної оптимізації	11
1.2.3 Частина 3. Складена задача умовної оптимізації	16
1.3 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звіту	22
1.4 Питання для самоперевірки	23
1.5 Перелік рекомендованих джерел	24
2 Лабораторна робота №2. «Застосування методів одномірної оптимізації в задачах ідентифікації об'єктів управління»	25
2.1 Завдання	25
2.2 Хід роботи.....	25
2.2.1 Постановка задачі ідентифікації з використанням диференціального рівняння.....	25
2.2.2 Задача ідентифікації об'єкта з використанням квадратичного поліному.....	28
2.2.3 Аналіз результатів. Формулювання висновків.....	30
2.3 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів	30
2.4 Питання для самоперевірки.....	31
2.5 Перелік рекомендованих джерел	31
3 Лабораторна робота №3. «Аналіз ефективності застосування градієнтних методів та методів нульового порядку в задачах управління»	32
3.1 Завдання	32
3.2 Хід роботи.....	32
3.2.1 Задача оптимального параметричного синтезу ПІД-регулятора. Постановка задачі.....	32
3.2.2 Задача оптимального параметричного синтезу з використанням градієнтного методу другого порядку (Ньютона). Математична постановка задачі	33
3.2.3 Задача оптимального параметричного синтезу з використанням методу нульового порядку (Хука-Дживса). Математична постановка задачі	37
3.3 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів.....	42
3.4 Питання для самоперевірки.....	43
3.5 Перелік рекомендованих джерел	43
4 Лабораторна робота №4. «Стохастичні алгоритми оптимізації»	44
4.1 Завдання	44
4.2 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів	44
4.3 Питання для самоперевірки.....	45
4.4 Перелік рекомендованих джерел	45
Додаток А. Експериментальні дані кривої розгону об'єкта керування.....	46
Додаток Б. Параметри САР.....	65
Додаток В. Приклад титульного листа	67



ВСТУП

Метою виконання лабораторних роботи з дисципліни «Методи оптимізації в автоматизованих системах управління технологічними процесами» є закріплення здобувачами знань щодо постановки та формулювання задач оптимізації, щодо методів одномірної оптимізації, нульового порядку, а також градієнтних та стохастичних методів. В результаті виконання лабораторних робіт передбачається набуття здобувачами навичок: розв'язання задач оптимізації в MATLAB за допомогою проблемно-орієнтованого підходу, застосування методів одномірної оптимізації в задачах ідентифікації об'єктів управління, застосування градієнтних методів та методів нульового порядку в задачах управління, а також застосування методу частинок рою в MATLAB для розв'язання задач оптимізації.

Лабораторні роботи здобувачами виконуються за допомогою обчислювальної техніки, в середовищі MATLAB. Результатом виконання лабораторної роботи є оформлений за вимогами та зданий звіт. Максимальна кількість балів, яку здобувач може отримати за виконання кожної лабораторної роботи, – 10.



1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. «ОСНОВИ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ В MATLAB»

1.1 Завдання

Вирішення задач оптимізації відбувається в житті кожної людини щоденно. Наприклад, є багато способів дістатися місця призначення. Як визначити найшвидший маршрут? За допомогою GPS можна знайти найкоротший шлях, але на ньому може бути надто великий трафік. GPS визначить обмеження у вигляді інтенсивного трафіку і запропонує оптимізований маршрут. На шляху можуть зустрічатися інші обмеження, на кшталт обмеження максимальної швидкості руху.

Отже, задача оптимізації полягає в знаходженні мінімуму або максимуму певної функції, що характеризує кількість, яку бажано оптимізувати. При цьому наявні конкретні обмеження, при яких можливий розв'язок цієї задачі [1].

У цій лабораторній роботі розглянуто проблемно-орієнтований підхід (алгоритм) до розв'язання задач оптимізації, який полягає передбачає наступні кроки:

- формулювання задачі (проблеми) оптимізації,
- визначення незалежних та залежних змінних для цієї задачі,
- визначення цільової функції, яка включає ці змінні,
- додавання обмежень для можливого розв'язку,
- розв'язання задачі оптимізації.

Завдання цієї лабораторної роботи передбачає розв'язання трьох задач оптимізації:

1. Знаходження оптимального місця розташування для заводу, що передбачає мінімальну відстань від трьох складів одночасно.

2. Визначення оптимального складу здорового сніданку при мінімальній вартості складників.


3. Визначення оптимальної дози радіаційного опромінення для знищення ракових клітин в мозку людини.

1.2 Хід роботи

1.2.1 Частина 1. Задача безумовної оптимізації.

Постановка задачі розміщення

Наявні три склади. Слід знайти найкраще розташування для заводу, доставка товарів в склади з якої здійснюється дронами. Використання батареї дрону зумовлене відстанню між фабрикою та складом, чим далі знаходиться склад, тим більше заряду використовується. Отже слід мінімізувати загальну відстань між фабрикою та трьома складами, що буде відповідати мініальному використанню батареї.



Першим кроком вирішення задачі оптимізації в MATLAB є створення порожньої задачі оптимізації. Це є об'єктом, що містить усю інформацію щодо конкретної задачі оптимізації [2]. Для такої спрощеної задачі безумовної оптимізації, як ця, слід заповнити чотири поля:

1. Опис задачі;
2. Цільовий зміст задачі (мінімізація або максимізація);
3. Змінні, що стосуються задачі;
4. Цільова функція.

В цій частині ви дізнаєтеся більше про ці кроки, заповніте ці поля та знайдете оптимальний розв'язок.

Створення задачі оптимізації в MATLAB

Ви можете використовувати функцію `optimproblem` для створення задачі оптимізації.

```
prob = optimproblem("Description",... "My Optimization Problem");
```

Це створює порожню проблему оптимізації під назвою `prob` з міткою «My Optimization Problem». Мітка не впливає на обчислення, але може бути корисною для включення описової інформації про вашу проблему.

Створіть задачу оптимізації під назвою `prob` і додайте опис «Factory Location».

Ви можете скористатися функцією `show`, щоб відобразити вміст задачі оптимізації в зручному для читання вигляді.

```
show(prob)
```


Це може бути корисним, коли ви додаєте більше елементів до задачі оптимізації.

При відображенні поточного вмісту `prob` слід зауважити, що вихідні дані функції `show` вказують на відсутність проблеми. У цьому прикладі створена порожня задача оптимізації. Змінні оптимізації та цільову функцію до вмісту задачі слід додати в наступних розділах [2].

Визначення змінних задачі оптимізації

Після створення порожньої задачі оптимізації слід визначити змінні оптимізації. Це змінні – все, що може вплинути на вашу цільову функцію, тобто це те, що ви можете налаштувати, щоб знайти оптимальний розв'язок вашої проблеми оптимізації.

У випадку цієї задачі з урахуванням того, що для доставки продуктів будуть використовуватися дрони, які не мають таких обмежень, як наземний транспорт, і переміщуються по прямим траекторіям до місця призначення, слід визначити змінні наступним чином. Можна змінювати



розташування заводу на схід або на захід, також на північ або на південь. Отже є дві змінні оптимізації: координата x – вздовж напрямку схід/захід та координата y – вздовж напрямку північ/південь. Цільова функція записується із застосуванням цих змінних.

Їхня ідентифікація допоможе визначити, яку цільову функцію слід використовувати для цієї задачі оптимізації.

В MATLAB визначають змінні оптимізації за допомогою функції `optimvar`.

```
varname = optimvar("varname")
```

Це зберігає символічну змінну оптимізації під назвою `varname` у вашій робочій області. Функція `optimvar` вимагає імені змінної як свого першого аргументу. Щоб уникнути плутанини, бажано, щоб назва змінної збігалася з назвою змінної MATLAB [3].

Створіть символічну оптимізаційну змінну x , яка представлятиме x -координату вашої заводу. Назвіть змінну « x ».

Створіть символічну оптимізаційну змінну y , яка представлятиме координату y вашого заводу. Дайте змінній відповідне ім'я.

MATLAB автоматично збереже ваші змінні в задачі, як тільки ви використаєте їх для створення цільової функції.

Використовуйте функцію `show`, щоб переконатися, що ваша проблема оптимізації все ще порожня.

Визначення цільової функції оптимізації

Цільова функція є найважливішою частиною задачі оптимізації. Тому що вона залежить тільки від змінних оптимізації та являє собою кількість, яку необхідно оптимізувати [4].

Для прикладу розглянемо, як визначити найкраще розташування заводу з огляду на поставлену задачу, поки не застосовуючи методи оптимізації та інструментарій MATLAB. Припустимо перший випадок розташування заводу з певними координатами x та y . В результаті обчислення загальної відстані від заводу до усіх трьох складів для цього припущення отримаємо перший результат. Змінимо координати розташування заводу та знову обчислимо загальну відстань. Так можна робити декілька разів, і, порівнюючи отримані результати, обрати найкращий з точки зору вимог, тобто найменшу загальну відстань. Можна зауважити, що подібний процес вимагає великої кількості часу та значного об'єму розрахунків кожного разу. Але, якщо відомі значення функції для багатьох значень змінних, її можна представити у вигляді кривої поверхні, знайдення мінімуму якої є задачею, що розв'язується. Постає питання, як описати цю поверхню за допомогою функції?

Слід згадати, що цільова функція даної задачі оптимізації є загальна відстань від заводу до трьох складів. Спочатку треба обчислити відстані від заводу до кожного з складів. Розглядаючи шукані величини d_1 , d_2 , d_3 , як гіпотенузи прямокутних трикутників (див. рис. 1.1), можна обчислити їх за формулою:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (1.1)$$

а також загальну відстань:

$$D = \sum_{i=1}^3 d_i$$

Отже, цільова функція задана.

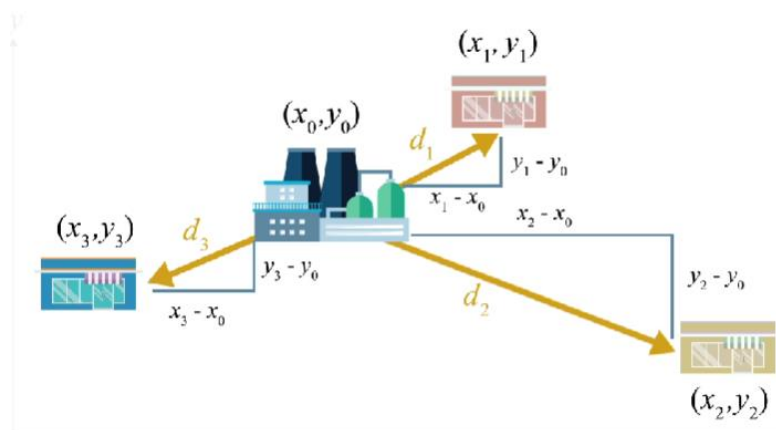


Рисунок 1.1 – Визначення відстаней до кожного з складів

Визначення цільової функції в MATLAB

Задані координати складів у вигляді масивів:

$X = [5 \ 40 \ 70];$

$Y = [20 \ 50 \ 15];$


Відстані між заводом та кожним складом розраховуються за формулою, аналогічною (1.1):

$$d = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2}$$

де x та y – змінні оптимізації, а X і Y — координати складів.

Виконання операцій MATLAB над змінними оптимізації створить вираз оптимізації.

Створіть вираз оптимізації для відстані між розташуванням фабрики (x, y) і розташуванням кожного з складів (X, Y) . Обов'язково використовуйте поелементне зведення у степінь $(.^)$ під час зведення у квадрат різниць між координатами x та y та збережіть результат у змінній d .



Змінна d — це масив виразів оптимізації 1×3 . Кожен елемент представляє відстань до одного з трьох складів.

Використовуйте d , щоб створити вираз оптимізації, який представляє загальну відстань між заводом і трьома складами. Назвіть новий вираз оптимізації $dTotal$.

Зверніть увагу, що будь-які змінні, які передаються цільовій функції, але не є символьними змінними оптимізації, як-от вектори позиції складу, відобразатимуться як `ExtraParams` на панелі виводу.

Ви можете зберігати оптимізаційні вирази в полі `Objective` задачі оптимізації за допомогою крапки.

prob.Objective = expression

Зберігайте загальну відстань доставки $dTotal$ у полі `Objective` задачі оптимізації.

Використовуйте функцію `show`, щоб відобразити поточну проблему оптимізації.

Цей код створює двовимірну контурну карту цільової функції, де колір відповідає загальній відстані доставки. Спробуйте скопіювати та вставити його в розділ подальшої практики.

```
xvec = linspace(0,75);  
yvec = linspace(0,75);  
[x,y] = meshgrid(xvec,yvec);  
distance = sqrt((x-X(1)).^2 + (y-Y(1)).^2)+...  
           sqrt((x-X(2)).^2 + (y-Y(2)).^2)+...  
           sqrt((x-X(3)).^2 + (y-Y(3)).^2);  
contourf(x,y,distance)  
ylabel("Y-Coordinate")  
xlabel("X-Coordinate")  
colorbar
```


Після вставлення коду натисніть «Run Section», щоб візуалізувати цільову функцію.

Спробуйте додати на графік місця розташування складів (X , Y), перш ніж рухатися далі [2].

Розв'язок задачі оптимізації

Різні типи задач оптимізації вимагають використання різних типів методів оптимізації (розв'язувачів). У цій задачі цільова функція є нелінійною, тому слід використовувати метод, який підходить для такої функції. На щастя, MATLAB вибере відповідний метод.

Методи для розв'язання задачі оптимізації, розроблені для обробки нелінійних цілей, вимагають надати початкове припущення, яке буде



використано як відправну точку для алгоритмічного пошуку оптимального рішення. Для кожної змінної оптимізації у задачі необхідно надати початкове припущення.

Синтаксис для надання вашого початкового припущення для кожної змінної такий:

```
initialGuess.varName1 = 10  
initialGuess.varName2 = 15  
initialGuess.varName3 = 2
```

Визначте початкову структуру припущень під назвою `initialGuess` для змінних оптимізації x і y . Ви можете вибрати будь-яке число від 0 до 500 для ваших початкових припущень.

Після визначення початкового припущення ви можете вирішити задачу оптимізації за допомогою функції `solve`.

```
[sol,optval] = solve(prob,x0)
```

Ця функція приймає задачу оптимізації та ваше початкове припущення x_0 як вхідні дані та повертає `sol` структури рішення, яка містить значення змінних оптимізації, які дають мінімум цільової функції. Він також повертає значення мети в `optval` рішення.

Скористайтеся функцією розв'язування, щоб знайти рішення проблеми розташування. Зберігайте виходи в `sol` і `optval`.

На панелі виводу зверніть увагу, що MATLAB використовував розв'язувач `fminunc` для пошуку рішення.

Оптимальні значення ваших змінних оптимізації зберігаються в структурі рішення `sol`, і доступ до них можна отримати за допомогою крапкової нотації `sol.varName1`, `sol.varName2` тощо.

Витягніть оптимальні значення x - та y -координат із структури розв'язку та збережіть їх у змінних `xOpt` та `yOpt` відповідно.

Розташування трьох складів було нанесено для вас за допомогою локальної функції `plotStores`. Ви можете відобразити оптимальне розташування вашого заводу за допомогою функції розсіювання. Щоб відобразити його на існуючому малюнку, використовуйте команди `hold on` та `hold off`:

```
hold on  
scatter(xData,yData)  
hold off
```

Побудуйте оптимальні координати x та y заводу на поточному малюнку.

Функцію `evaluate` можна використовувати для оцінки виразів оптимізації за вказаними значеннями. Наступний код обчислить вираз `dTotal` для загальної відстані доставки за оптимального рішення:

```
dTotalEval = evaluate(dTotal,sol)
```

Зауважте, що це дає вам мінімальне значення цільової функції та той самий результат, що й `optval`.

Крім того, ви можете знайти оптимальну відстань до кожного з складів окремо, оцінивши `d` у розв'язанні:

```
dEval = evaluate(d,sol)
```

Що ви помітили в сумі `dEval` і `dTotalEval` [2]?

1.2.2 Частина 2. Задача умовної оптимізації

Оскільки вищерозглянутий приклад розв'язувався як задача безумовної оптимізації, це означало, що значення змінних оптимізації могли бути нереалістичними або небажаними. Для того, щоб уникнути подібних явищ в будь-якій задачі оптимізації застосовують визначення обмежень на змінні оптимізації.

Існують п'ять основних типів обмежень (див. рис. 1.2):

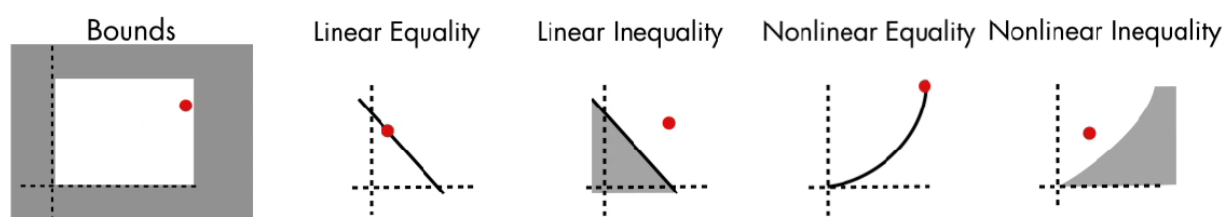



Рисунок 1.2 – Основні види обмежень змінних оптимізації

1. Граничні обмеження встановлюють мінімальне та максимальне значення, які може приймати змінні.
2. Лінійні рівності – змінні можуть приймати значення, які належать до заданої прямої.
3. Лінійні нерівності визначають області, де не можуть знаходитися значення змінних оптимізації.
4. Нелінійні рівності – аналогічні лінійним, але обмеження є у вигляді кривої.
5. Нелінійні нерівності – області недопустимих значень визначаються кривими [1].

Постановка задачі створення оптимального набору продуктів

В цій частині надаються дані про продукти харчування у вигляді таблиці з відповідними відомостями щодо назви, вартості, калорійності, вмісту вуглеводів, білків та вітаміну С в кожній порції конкретного виду продукту.

Мета – сконструювати найдешевший сніданок, який відповідає потребам дієти.



Для того, щоб знайти оптимальну кількість порцій для кожного інгредієнту сніданку, слід застосувати обмеження у вигляді лінійних рівностей та лінійних нерівностей.

Застосування обмежень робить розв'язок задачі оптимізації більш наближеним до реальності. Але необхідно бути обережним при додаванні декількох обмежень одночасно, оскільки є ризик занадто обмежити задачу, тобто може не бути розв'язку, який би задовольняв усім обмеженням.

В цій частині слід застосувати різні лінійні обмеження для того, щоб отримати реалістичний, оптимальний набір продуктів для сніданку [2].

Створення задачі оптимізації в MATLAB

Створіть оптимізаційну задачу з описом «An Optimal Breakfast». Призначте це змінній під назвою `prob`.

Визначення змінних задачі оптимізації

Слід визначити кількість порцій кожної страви в таблиці їжі, яка забезпечує найдешевший сніданок. Це означає, що необхідно мати 16 різних змінних оптимізації.

Замість визначення 16 окремих змінних можна створити єдиний вектор змінної оптимізації з 16 елементами. Загалом, вектор $N \times 1$ змінних оптимізації з нижньою межею можна визначити наступним чином

```
varname = optimvar("varname ",N,"Lower Bound", LowerBoundValue)
```

Створіть вектор 16×1 змінних оптимізації з іменем `servings`. Нижню межу слід задати рівною нулю, оскільки не можливо їсти від'ємну кількість їжі.

Визначення цільової функції оптимізації

Цільовою функцією для цієї задачі є загальна вартість кожного виду їжі, яка є добутком кількості порцій кожної страви та відповідної вартості на порцію.


Обчисліть загальну вартість кожного типу страви, помноживши стовпець `Price` таблиці `food` на оптимізовану змінну кількість порцій. Назвіть отриманий вираз оптимізації `C`. Обов'язково використовуйте поелементний оператор `*` під час виконання множення.

Збережіть суму всіх елементів у `C` у полі `Objective` задачі оптимізації.

Розв'яжіть задачу оптимізації та збережіть результат у змінних `sol` і `optval`. Зауважте, що оскільки цільова функція є лінійною відносно змінних оптимізації, вам не потрібно надавати початкове припущення.

Ви можете відобразити оптимальні порції для кожної страви, ввівши `sol.servings` у розділі «Further Practice». Зауважте, що оптимальна кількість порцій кожної страви виявилася нульовою! Це явно не має особливого сенсу насправді.

У цьому прикладі вам вдалося мінімізувати вартість сніданку. Вам не доведеться витратити гроші, але ви помрете з голоду! Ви повинні надати



більше інформації задачі оптимізації, щоб вона знала, що вам потрібна певна кількість калорій.

У наступному розділі ви включите деякі додаткові обмеження щодо ваших мінімальних потреб у харчуванні, що зробить результат більш практичним.

Визначення обмежень у вигляді лінійної рівності

Калорії є важливим аспектом щоденного раціону. Середньостатистичній людині рекомендується з'їдати близько 350 калорій на сніданок щодня.

Обчисліть кількість калорій, спожитих під час сніданку, помноживши стовпець «Calories» таблиці food на вектор оптимізації порцій. Назвіть отриманий вираз оптимізації cals. Під час множення обов'язково використовуйте оператор `*`.

Створіть вираз оптимізації для загальної кількості спожитих калорій шляхом підсумовування елементів cals. Назвіть цей вираз totalCals.

Обмеження у вигляді рівностей зберігається в полі Constraints задачі оптимізації. Оскільки до будь-якої задачі можна застосувати декілька обмежень, кожному обмеженню слід присвоїти унікальне ім'я.

Щоб зберегти обмеження рівності у задачі оптимізації, ви повинні встановити вираз оптимізації, що дорівнює бажаному числовому значенню:

prob.Constraints.Name = expression == value.

Встановіть вираз оптимізації totalCals рівним 350 і збережіть його в полі Constraints задачі оптимізації. Назвіть обмеження cals.

Розв'яжіть оптимізаційну задачу. Зберігайте перший і другий результат у змінних sol і optval відповідно. Пам'ятайте, що вам не потрібно надавати початкове припущення, оскільки цільова функція є лінійною.

Ви можете отримати доступ до оптимального набору змінних оптимізації за допомогою крапкового звернення:

sol.variableName

Зберігайте оптимальну кількість порцій у змінній optServings.

Щоб візуалізувати результати, ви можете створити гістограму за допомогою bar.


bar(x,y)

Скористайтеся bar, щоб створити гістограму зі стовпцем «Name» таблиці food як першим аргументом і optServings як другим аргументом.

Це здається дивним... MATLAB каже вам, що ви повинні з'їсти 4,5 печива на сніданок і більше нічого. Коли ви стикаєтеся з рішенням, яке здається вам дивним, ви можете перевірити, чи виконано ваше обмеження.

Ви можете використовувати функцію evaluate, щоб оцінити вираз оптимізації, який був включений у ваше обмеження в розв'язанні.

val = evaluate(expression,solution)



Оцініть вираз оптимізації `totalCals` у розв'язку `sol`, щоб переконатися, що обмеження рівності дотримано. Зберігайте результат у змінній `check`.

Це підтверджує, що 4,5 печива забезпечать рівно 350 калорій. Тож це має бути найдешевший 350-калорійний сніданок. Для підтвердження визначте калорії на долар кожної страви.

Обчисліть кількість витрачених калорій на долар, розділивши стовпець «Calories» на стовпець «Price». Збережіть результат у `caloriesPerDollar`. Потім скористайтеся `bar`, щоб створити гістограму зі стовпцем `Name` як першим аргументом і `caloriesPerDollar` як другим аргументом.

Алгоритм визнав шоколадне печиво «найбільшою віддачею за ваші гроші», оскільки кожна порція недорога і містить багато калорій. Іншими словами, він має найвище співвідношення калорій і вартості. Отже, хоча рішення здавалося дивним з практичної точки зору, алгоритм дав вам оптимальне рішення, яке ви просили.

Хоча це більш реалістична дієта порівняно з повною відсутністю їжі, їсти лише шоколадне печиво на сніданок може бути не найздоровішим вибором.

У наступному розділі ми накладемо додаткові харчові обмеження, які зроблять ваш вибір сніданку більш реалістичним.

Визначення обмежень у вигляді лінійних нерівностей

Вирішивши проблему оптимізації в її поточному стані, ви отримаєте сніданок, який містить рівно 350 калорій. Вам також може бути цікаво споживати принаймні 45 грамів вуглеводів.

Обмеження нерівності можна реалізувати так само, як і обмеження рівності, із заміною `==` (рівність) на `<=` (менше або дорівнює) або `>=` (більше або дорівнює).

prob.Constraints.name = expression <= value

або


prob.Constraints.name = expression >= value

Додайте обмеження, щоб загальна кількість вуглеводів, спожитих за сніданком, становила не менше 45 г.

Обчисліть вуглеводи, спожиті під час сніданку для кожної `food`, помноживши стовпець `Carbs` на `servings`, і збережіть результат у змінній під назвою `carbs`. Під час множення обов'язково використовуйте оператор `*`.

Обчисліть загальну кількість спожитих вуглеводів шляхом підсумовування елементів `carbs`. Збережіть результат у змінній під назвою `totalCarbs`.

Зберігайте `totalCarbs` у полі `Constraints` задачі оптимізації. Використовуйте оператор `>=` зі значенням 45. Назвіть обмеження `carbs`.



Розв'яжіть оптимізаційну задачу. Зберігайте вихідні дані в одній змінній `sol`.

Створіть гістограму зі стовпцем «Name» на горизонтальній осі та полем `servings` розв'язку `sol` на вертикальній осі.

Оцініть вираз `totalCarbs` при розв'язанні. Збережіть результат у змінній з іменем `optCarbs`

Виконайте кроки із завдань 1-4, щоб застосувати обмеження, що ви повинні споживати принаймні 15 грамів білка, повторно розв'яжіть задачу оптимізації та побудуйте результат.

Обчисліть загальну кількість білка, спожитого за сніданком, і збережіть його у виразі під назвою `totalProtein`.

Збережіть обмеження у задачі оптимізації та назвіть обмеження `Protein`.

Розв'яжіть задачу оптимізації та збережіть результат у `sol2`.

Створіть гістограму з назвами страв на горизонтальній осі та оптимальними порціями на вертикальній осі.

Оцініть обмеження білка в `sol2` і збережіть у змінній `optProtein`.

У деяких ситуаціях оптимальне рішення може не існувати через те, що одне або кілька обмежень не можуть бути виконані. У цьому випадку MATLAB повідомить, що йому не вдалося знайти рішення в рамках обмежень, які було визначено.

Змініть три обмеження, які ви раніше визначили в цьому прикладі, щоб побачити, що станеться, якщо рішення неможливо знайти.

Встановіть значення `totalCarbs` як менше або дорівнює 30 г і збережіть його в обмеженні вуглеводів.

Встановіть для параметра `totalProtein` значення більше або дорівнює 60 г і збережіть його в обмеженні білка.

Встановіть значення `totalVitaminC` більше або дорівнює 60 мг і збережіть його в обмеженні `vitaminC`.

Вирішіть нову задачу оптимізації. Зберігайте перший і другий вихід у змінних `sol4` і `optval` відповідно. Залиште крапку з комою, щоб відобразити результат.


Повторіть процес із попереднього завдання, щоб застосувати одне останнє обмеження: ви повинні споживати щонайменше 60 міліграмів вітаміну С.

Обчисліть загальну кількість вітаміну С, спожитого за сніданком, і збережіть його у виразі під назвою `totalVitaminC`.

Збережіть обмеження у задачі оптимізації та назвіть обмеження `vitaminC`.

Розв'яжіть задачу оптимізації та збережіть результат у `sol3`.

Створіть гістограму з назвами страв на горизонтальній осі та оптимальними порціями на вертикальній осі.



Оцініть обмеження вітаміну С у sol3 та збережіть у змінній optVitaminC.

Розкоментуйте код у розділі, виділивши код і клацнувши «Видалити символ панелі інструментів коментаря» в розділі «Код» на панелі інструментів.

Експериментуйте з різними значеннями обмежень за допомогою повзунків. Наприклад, який оптимальний сніданок для дієти з низьким вмістом вуглеводів і високим вмістом білка [2]?

1.2.3 Частина 3. Складена задача умовної оптимізації

Постановка задачі променевої терапії

Кожна третя клітина мозкової пухлини є злоякісною. Для їх знищення використовують променевою терапію, яка передбачає спрямування на пухлину двох пучків високого рівня випромінювання, розташованих перпендикулярно одне одному. Однак, промені проходять і через здорові клітини та органи, спричиняючи променеове ураження. Чим вищі дози радіації надходять до здорових клітин, тим більше їхнє пошкодження. Через те, що пухлина може бути будь-якої форми, використання тільки двох ідентичних променів випромінювання не завжди є ефективним. Замість цього, пучки розбивають на чотири промені відповідно, які мають різні інтенсивності і тому доставляють різну кількість радіації.

Перед лікуванням лікар створює сітку навколо ракової пухлини щоб краще визначити зону ураження. Кожен рядок та стовпець сітки буде мішенню для променів і лікар може налаштувати інтенсивність променів для того, щоб запобігти нанесенню шкоди здоровим клітинам наскільки це можливо.

Інтенсивність радіації знижується при проходженні променю крізь матеріал. Тому доставлена доза зменшується, чим далі промінь проходить через череп. Горизонтальні та вертикальні промені будуть мати комбінований вплив на комірки сітки. І в ідеалі уникати області здорових клітин та вражати ракові клітини.

В цьому прикладі метою є визначення оптимальних інтенсивностей для кожного променю таким чином, щоб кількість випромінювання, доставлена до пухлини, була достатньою для знищення ракових клітин та одночасно мінімізувати радіаційне ураження здорових клітин та спинного мозку.

Визначте оптимізаційну задачу, дайте їй опис " Radiation Therapy Optimization " та збережіть її в prob.

Визначте змінну оптимізації 8×1 для інтенсивності кожного променю та задайте нижню межу рівною нулю. Зберігайте змінні у векторі змінної оптимізації I.

Цільова функція будується шляхом множення інтенсивності кожного пучка на дозу, яку він доставляє кожній здоровій клітині або клітині

спинного мозку, а потім підсумовування, щоб отримати загальну суму. Кожна комірka реагує на інтенсивність променя відповідно до чисел у сітці (див. рис. 1.3). Чим більше матеріалу проходить промінь, тим меншу дозу він доставляє.

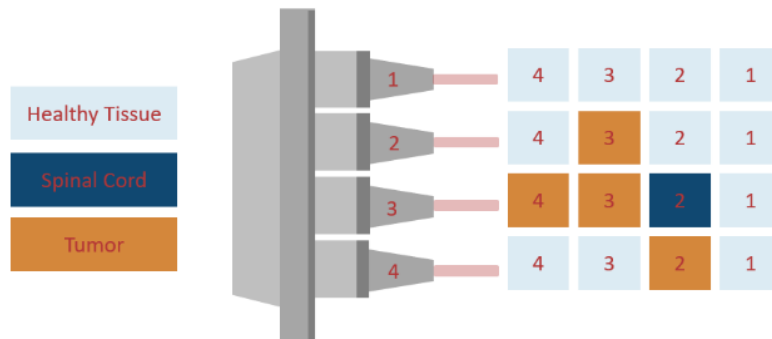


Рисунок 1.3 – Інтенсивність випромінювання, що надходить до клітин

Доза, яку доставляє промінь до будь-якої клітини, є добутком інтенсивності цього променя та значення, яке відображається в комірці (див. рис. 1.4).

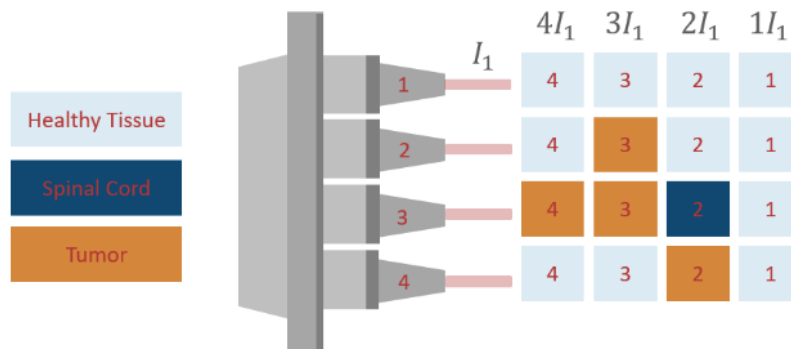


Рисунок 1.4 – Кількість радіації, що надходить до клітин від горизонтальних променів

Доза, що надходить до здорової тканини у верхньому рядку, обчислюється додаванням цих чотирьох членів. Перша клітинка отримує 4 одиниці, друга отримує 3 одиниці і так далі. Таким чином, загальна доза, що надходить у верхній рядок, у 10 разів перевищує інтенсивність пучка 1 (див. рис. 1.5).

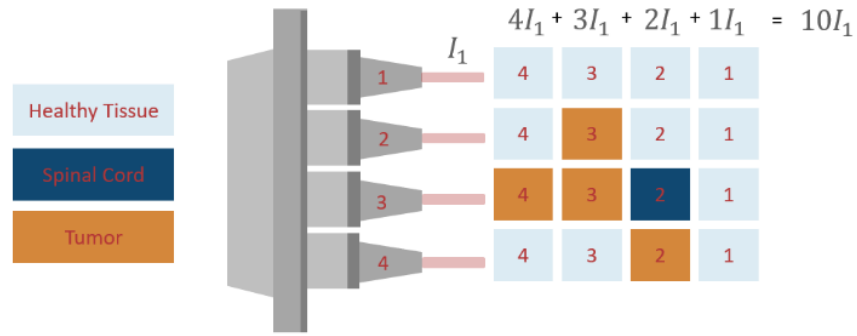


Рисунок 1.5 – Обчислення дози радіації для першого рядка сітки

Ось дозування, що подається до другого ряду. Знову ж таки, перша клітина отримує 4 одиниці, але друга клітина не включається в розрахунок, оскільки це не здорова тканина або матеріал спинного мозку. Третя клітинка отримує 2 одиниці, а четверта – 1 одиницю. Тоді загальна доза, що надходить до ряду, у 7 разів перевищує інтенсивність пучка 2 (див. рис.1.6).

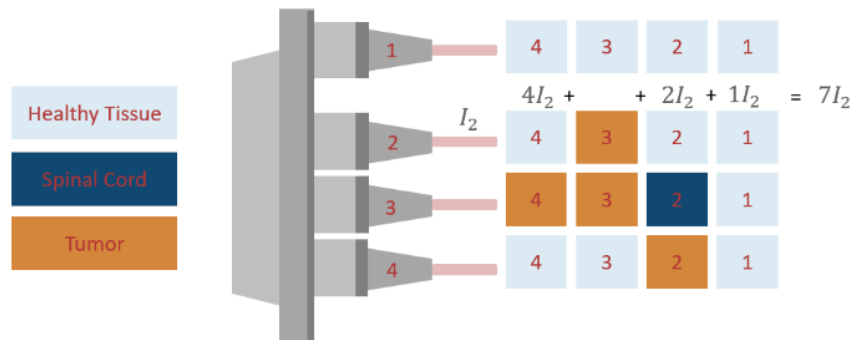


Рисунок 1.6 – Обчислення дози радіації для другого рядка сітки

Ось дозування, що доставляється до клітин третього ряду. Зауважте, що єдині дві клітини, які беруть участь у обчисленні, — це здорова клітина та клітина спинного мозку. Загальна доза, що надходить у цей рядок, у 3 рази перевищує інтенсивність пучка 3 (див. рис.1.7).

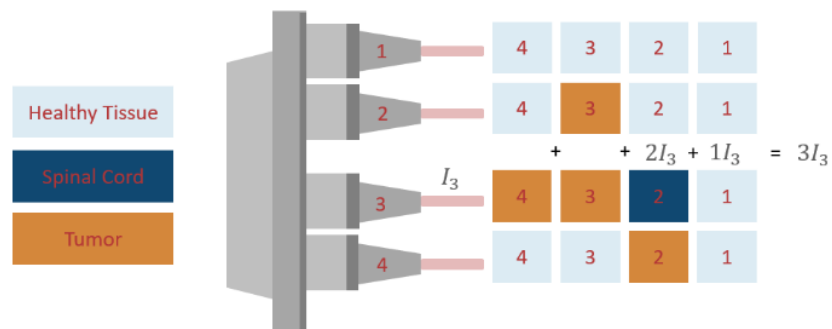


Рисунок 1.7 – Обчислення дози радіації для третього рядка сітки

Нарешті, ось дозування, що доставляється до четвертого ряду (див. рис. 1.8).

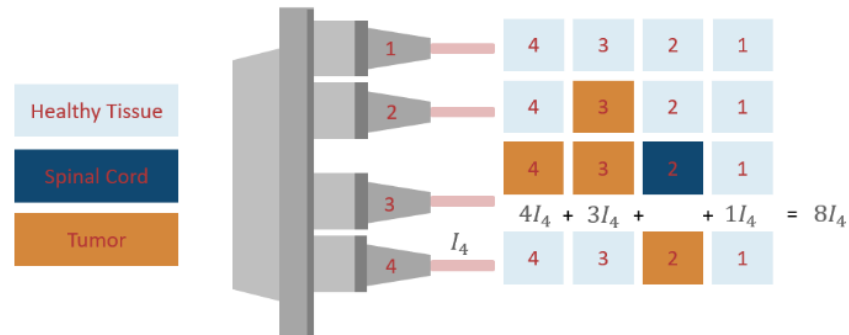


Рисунок 1.8 – Обчислення дози радіації для третього рядка сітки

Якщо слід створити масив, який містить загальну відповідь клітин для кожного рядка, можна помножити на інтенсивності, щоб отримати загальну дозу, доставлену здоровим клітинам у цьому рядку. Це лише половина цільової функції (див. рис. 1.9). Щоб створити цільову функцію повністю, необхідно повторити цей процес для всіх стовпців (промені 5-8).

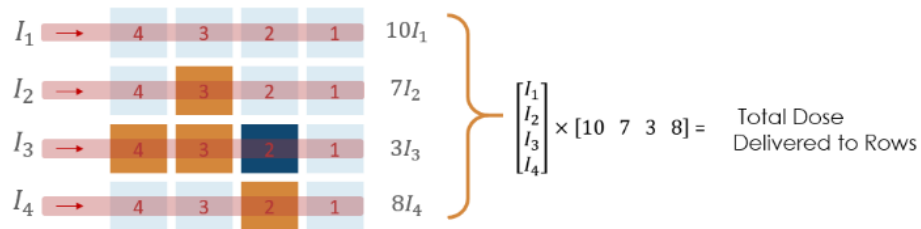


Рисунок 1.9 – Загальна доза, доставлена здоровим клітинам променями 1-4

Щоб створити цільову функцію повністю, необхідно повторити цей процес для всіх стовпців (промені 5-8) (див. рис. 1.10).

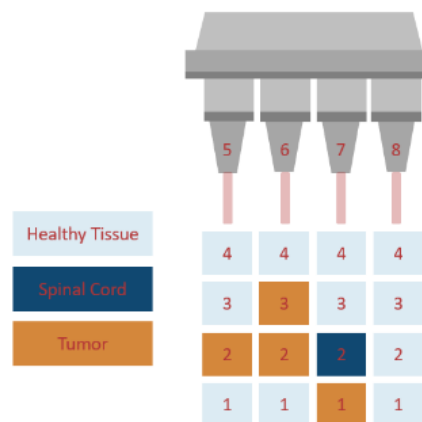


Рисунок 1.10 – Реакція комірок на випромінення вертикальних променів

Обчисліть загальну дозу опромінення, що надходить до здорової тканини та спинного мозку, дотримуючись наведених нижче кроків:

Зберігайте загальну відповідь клітин для здорових тканин і клітин спинного мозку в масиві d (1×8). Перші чотири елементи повинні відповідати відповіді клітин рядків (див. рис. 1.11). Останні чотири елементи відповідають реакції комірки стовпців. Вони отримуються додаванням чисел у світло- та темно-синіх клітинках у кожному стовпчику (див. рис. 1.10).

$$d = [10 \ 7 \ 3 \ 8 \quad \quad \quad]$$




Рисунок 1.11 – Масив, елементи якого є загальною реакцією комірок

Помножте відповідь клітини d на інтенсивність випромінювання I , щоб отримати загальну дозу випромінювання. Збережіть результат у змінній D .

Цільова функція – це сума всіх доз, що потрапили до здорових тканин і спинного мозку.

Оскільки визначено інтенсивність випромінювання як вектор-стовпець 8 на 1 , а відповіді клітинок — як вектор-рядок 1 на 8 , сума була виконана під час множення матриці.

$$D = [10 \ 7 \ 3 \ 8 \ 8 \ 5 \ 9 \ 10] \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix}$$

$$= 10I_1 + 7I_2 + 3I_3 + 8I_4 + 8I_5 + 5I_6 + 9I_7 + 10I_8$$

Збережіть загальну дозу опромінення D у полі Objective задачі оптимізації.

Спинний мозок не повинен отримувати дозу більше 5 одиниць. Це означає обмеження:

$$2I_3 + 2I_7 \leq 5,$$

де I_3 і I_7 – інтенсивності третього та сьомого променів відповідно (див. рис. 1.12).

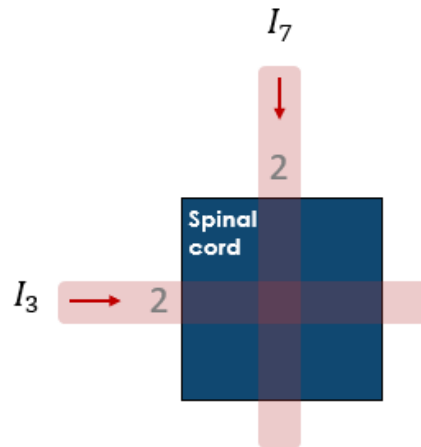


Рисунок 1.12 – Кількість доз, що отримує спинний мозок

Збережіть це обмеження нерівності у задачі оптимізації. Назвіть обмеження *spinal*.

Кожна пухлинна клітина повинна отримати досить смертельну дозу не менше 7 одиниць. Оскільки існує чотири пухлинні клітини, що містять раковий матеріал, це відповідає чотирьом обмеженням нерівності, як зазначено нижче (див. рис. 1.13).

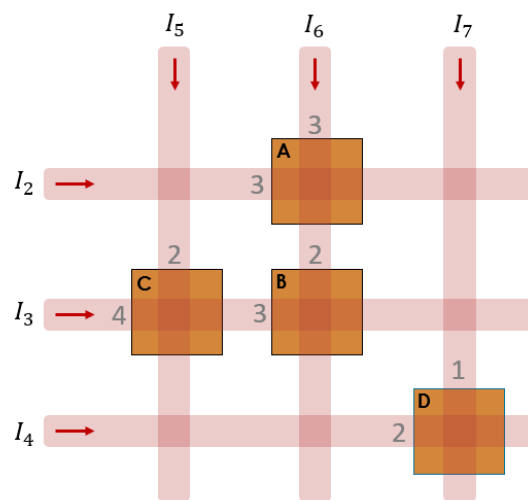


Рисунок 1.13 – Кількість доз, що отримують ракові клітини

Щоразу, коли два промені перетинаються на помаранчевій пухлинній клітині, має бути визначено обмеження. Кожне обмеження накладається на суму добутків пучків, що перетинаються, та доз, які представлені числами поруч із кожною пухлинною клітиною.


Обмеження:

$$A: 3I_2 + 3I_6 \geq 7$$

$$B: 3I_3 + 2I_6 \geq 7$$

$$C: 4I_3 + 2I_5 \geq 7$$

$$D: 2I_4 + I_7 \geq 7$$



Збережіть кожне з перерахованих вище обмежень у вашій задачі оптимізації. Назвіть обмеження A, B, C і D.

Розв'яжіть оптимізаційну задачу. Цього разу включіть лише один вихід і назвіть його sol. Пам'ятайте, оскільки це лінійна цільова функція, вам не потрібно включати початкове припущення.

Створіть гістограму оптимальної інтенсивності променів, що зберігається в sol.

Оцініть дозу, що доставляється в спинний мозок при оптимальному розчині:

Визначте вираз оптимізації для дози, що надходить до спинного мозку. Зверніть увагу, що ви можете використати той самий вираз із завдання 4.

Перевірте, чи задовольняє оптимальне рішення обмеження spinal. Збережіть результат у змінній з іменем check.

Зауважте, що оптимальна інтенсивність випромінювання дорівнює нулю для променів 1, 2, 7 і 8. Це пов'язано з тим, що вони стикаються з великою кількістю здорової тканини, яка є дуже чутливою до радіації.

Крім того, ми хотіли, щоб доза, що надходить у спинний мозок, була менше 5, і наш результат був 3,5, що навіть краще.

Тепер ви можете візуалізувати дози, доставлені до кожної клітини, використовуючи наступний код [2].

```
verticalBeamTable = [4 4 4 4; 3 3 3 3; 2 2 2 2; 1 1 1 1];  
horizontalBeamTable = [4 3 2 1; 4 3 2 1; 4 3 2 1; 4 3 2 1];
```

```
verticalIntensity = [0 2.33 0 0];  
horizontalIntensity = [0 0 1.75 3.5];
```

```
horizontalDose = horizontalBeamTable .* horizontalIntensity';  
verticalDose = verticalBeamTable .* verticalIntensity;
```

```
Doses = horizontalDose + verticalDose;
```

```
imagesc(Doses)  
hold on  
plot([.5 .5 1.5 1.5 2.5 2.5 3.5 3.5 2.5 2.5 0.5],...  
      [3.5 2.5 2.5 1.5 1.5 3.5 3.5 4.5 4.5 3.5 3.5], 'r-', "LineWidth",2)  
hold off  
colorbar
```

1.3 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звіту

Робота здобувачами виконується на практичних заняттях з використанням програмного забезпечення Matlab в межах освітнього курсу Optimization Onramp. В якості звіту може бути використаний сертифікат про проходження курсу, який видається освітньою платформою MathWorks за умови виконання курсу в повному обсязі.


Звіт має бути оформлений відповідно до вимог щодо оформлення технічної документації на аркушах формату А4 . До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета практичної роботи.
3. Постановка завдання відповідно варіанту.
4. Лістинг програми.
5. Результати роботи програми.
6. Висновки.

Кількість балів	Критерій оцінювання
10	Здобувач(ка) працював(ла) на практичних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій або Сертифікат інформальної освіти в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
9-8	Здобувач(ка) працював(ла) на практичних заняттях, частково виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
7-6	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, повністю виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
5-4	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, частково виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
3-2	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, частково виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали не в повному обсязі відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт (сертифікат) в Moodle


1.4 Питання для самоперевірки

1. Дайте визначення поняттям безумовної та умовної оптимізації.
2. Наведіть алгоритм розв'язання задачі оптимізації.
3. Як визначається задача оптимізації в MATLAB?

- 
4. Яким чином задають змінні задачі оптимізації в MATLAB?
 5. Яким чином задають обмеження задачі оптимізації в MATLAB?

1.5 Перелік рекомендованих джерел

1. Мовчан А., Степанець О. Методи статичної оптимізації : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 138 с.
2. Optimization Onramp : Self-Paced Online Courses. *MathWorks*. URL: <https://matlabacademy.mathworks.com/details/optimization-onramp/optim> (дата звернення: 02.12.2022).
3. Optimization Toolbox. Help Center. *MathWorks*. URL: https://www.mathworks.com/help/optim/index.html?s_tid=hc_product_card (дата звернення: 21.01.2023).
4. Григорків В., Григорків М. Оптимізаційні методи та моделі : підручник. Чернівці : Чернів. нац. ун-т, 2016. 400 с.



2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. «ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ОДНОМІРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ В ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ»

2.1 Завдання

Об'єкт управління можна описати лінійним диференціальним рівнянням зі сталими коефіцієнтами та запізненням. Аналогічним є представлення у вигляді інерційної ланки першого порядку із запізнення. Його ідентифікація може бути проведена в результаті аналізу перехідної характеристики шляхом визначення коефіцієнту підсилення та сталої часу.

Завдання цієї лабораторної роботи передбачає наступні етапи:

1. Визначення коефіцієнтів функції, яка є розв'язком диференціального рівняння при подачі на вхід стрибкоподібного впливу певної амплітуди та за знайдених значень апроксимує наявні експериментальні дані, варіанти яких наведені в додатку А, з мінімальною помилкою.

2. Визначення коефіцієнтів поліному, який апроксимує наявні експериментальні дані з мінімальною помилкою, та його використання для визначення параметрів об'єкту управління.

3. Порівняння отриманих результатів та формулювання висновків.

2.2 Хід роботи

2.2.1 Постановка задачі ідентифікації з використанням диференціального рівняння

Об'єкт управління представлений послідовним з'єднанням інерційної ланки першого порядку із ланкою запізнення.

Примітка: В нижченаведеній задачі аналізуються експериментальні дані без урахування даних під час транспортної затримки та при встановленні (дані відкидаються).

У спрощеному випадку перехідної характеристики на вхід подається стрибкоподібний вплив певної амплітуди, який можна описати за допомогою одиничної функції (Хевісайда), чие зображення по Лапласу дорівнює $x_{\text{вх}} = \frac{1}{p}$. За відомої передавальної функції $W(p) = \frac{K}{Tp+1}$, яка відома із операторної форми диференціального рівняння об'єкту, визначення аналітичної форми перехідної характеристики:



$$\begin{aligned}
h(\tau) &= L^{-1}\{h(p)\} = L^{-1}\left\{\frac{W(p)}{p}\right\} = L^{-1}\left\{\frac{K}{p(Tp+1)}\right\} = L^{-1}\left\{\frac{\frac{K}{T}}{p\left(p+\frac{1}{T}\right)}\right\} = \\
&= L^{-1}\left\{\frac{K}{T}\left(\frac{1}{p\left(p+\frac{1}{T}\right)}\right)\right\} = L^{-1}\left\{\frac{K}{T}\left(\frac{T}{p} - \frac{T}{p+\frac{1}{T}}\right)\right\} = \\
&= L^{-1}\left\{K\left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p+\frac{1}{T}}\right)\right\} = KL^{-1}\left\{\frac{1}{p} - \frac{1}{p+\frac{1}{T}}\right\} = \\
&= K\left(1(\tau) - e^{-\frac{\tau}{T}}\right) = K\left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right)
\end{aligned} \tag{2.1}$$

При аналізі кривої розгону, позаяк на вхід надходить вплив неединичної амплітуди, слід ліву частину попереднього рівняння домножити на амплітуду вхідного впливу, отже аналітична форма рівняння для визначення кривої розгону:

$$x_{\text{вих}}(\tau) = \Delta x_{\text{вх}} \cdot K \cdot (1 - e^{-\tau/T}) \tag{2.2}$$

Через наявність сталого значення $x_{\text{вих}0}$, яке мало місце на виході до початку експерименту, для формулювання слід до (2.2) додати відповідний коефіцієнт:

$$x_{\text{вих}}(\tau) = \Delta x_{\text{вх}} \cdot K \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}) + x_{\text{вих}0} \tag{2.3}$$

де K та T – шукані коефіцієнти для задачі ідентифікації об'єкта управління.

Задача ідентифікації об'єкта управління з використанням методів оптимізації полягає у визначенні таких коефіцієнтів апроксимуючої функції, за яких різниця між експериментальними даними та значеннями цієї функції у відповідних точках була б мінімальною [1]. Тобто слід мінімізувати суму квадратів різниць між експериментальними даними (табл. 2.1) та значеннями функції (2.2).

Таблиця 2.1 – Експериментальні дані

tdata	xdata	ydata
0	0	150
30	20	150
60	20	155
90	20	161
120	20	168
150	20	175

Продовження табл. 2.1

tdata	xdata	ydata
180	20	181
210	20	185
240	20	190
270	20	195
300	20	200
330	20	202
360	20	205
390	20	209
420	20	210
450	20	212
480	20	215
510	20	218
540	20	219
570	20	219
600	20	219

Вирішення задачі за допомогою MATLAB

1. Використання `fmincon()`

Для визначення коефіцієнтів апроксимації експериментальних даних (табл.1) функцією (2.3) слід використати розв'язувач `fmincon()`, оскільки на коефіцієнти K , T та $x_{\text{вих}0}$, які будуть представлені у задачі оптимізації як елементи масиву x слід накласти обмеження для коректного їх визначення [2]:

```
Lb = [1 1 1];  
ub = [1000 1000 1000];
```

Оскільки задача оптимізації нелінійна, необхідно задати початкові значення змінних:

```
x0 = [1 1 1];
```

Цільова функція оптимізації:

```
objfun = @(x) sum((ydata - x(1)*20*(1-exp(-tdata/x(2)))-x(3)).^2);
```

Розв'язок задачі оптимізації:

```
[x, fval] = fmincon(objfun, x0, [], [], [], [], Lb, ub, [], options)
```

```
K=x(1)
```

```
T=x(2)
```

```
shift=x(3)
```

Функція апроксимації:

```
yfit = K*20*(1-exp(-tdata/T))+shift;
```

Порівняльний графік:

```
plot(tdata, ydata, 'bo', tdata, yfit, 'r-')
```

2. Використання fminunc()

```
x0 = [35 46 100];
objfun = @(x) sum ((LR22.ydata-x(1)*20*(1-exp(-LR22.tdata/x(2)))-x(3)).^2);

options = optimoptions ('fminunc', 'Display', 'iter', 'Algorithm', 'quasi-
newton');
x=fminunc(objfun, x0,options);

K=x(1)
T=x(2)
shift=x(3)
yfit = K*20*(1-exp(-LR22.tdata/T))+shift;
plot(LR22.tdata, LR22.ydata, 'bo', LR22.tdata, yfit, 'r-')
```

3. Використання fminsearch()

```
x0 = [35 46 100];
objfun = @(x) sum ((LR22.ydata-x(1)*20*(1-exp(-LR22.tdata/x(2)))-x(3)).^2);

options = optimset ('Display', 'iter', 'PlotFcns', @optimplotfval);
x=fminsearch(objfun, x0,options);

K=x(1)
T=x(2)
shift=x(3)
yfit = K*20*(1-exp(-LR22.tdata/T))+shift;
plot(LR22.tdata, LR22.ydata, 'bo', LR22.tdata, yfit, 'r-')
```

2.2.2 Задача ідентифікації об'єкта з використанням квадратичного поліному

Знаходження коефіцієнтів поліному другого ступеня методом найменших квадратів

Коефіцієнти поліному визначаються за допомогою функції polyfit():
 $p = \text{polyfit}(tdata, ydata, 2)$

Значення полінома в точках експериментальних даних:
 $y_fit = \text{polyval}(p, tdata)$

Середньоквадратична помилка апроксимації експериментальних даних поліномом [3]:

```
mse = mean((ydata - y_fit).^2)
```

Порівняльний графік:

```
plot(tdata,ydata, 'bo', tdata,y_fit, 'r-')
```

Визначення параметрів ОР інженерним методом з використанням полінома

З використанням функцій Matlab числовим методом знайдемо першу та другу похідні експериментальних даних та побудуємо їхні графіки в залежності від часу:

```
y=diff(ydata)./30
```

```

y2=diff(y)./30
t=1:20;
t1=1:19;
figure2=figure();
subplot(1,2,1);
plot(t,y,'r-')
subplot(1,2,2);
plot(t1,y2,'g-')

```

Визначимо максимальне значення масиву перших похідних та індекс відповідного елементу:

```
[max_value, max_index]=max(y)
```

Визначимо час, що відповідає найбільшій швидкості зміни регульованого параметру:

```
tmax=tdata(max_index)
```

Визначимо коефіцієнти та побудуємо графік дотичної в точці максимальної швидкості зміни регульованого параметру:

```

k=p(1)*2*tmax+p(2)
b=y_fit(max_index)-k*tmax
dot=k*tdata+b
figure1=figure();
hold on
plot(tdata,ydata,'bo',tdata,y_fit,'r-',tdata,dot)

```

Визначимо час запізнення як відстань між початком відліку та точкою перетину дотичної з початковим значенням регульованого параметру:

```
tau=(ydata(1)-b)/k;
```

Для визначення сталої часу слід опустити перпендикуляр з точки перетину дотичної з новим сталим значенням регульованої величини.

Визначення сталої часу:

```

for i=2:20
    if (ydata(i+1)==ydata(i))&&(ydata(i-1)==ydata(i))
        index=i
    end
end

```

Визначення сталої часу OP:

```
T=(ydata(index)-b)/k-tau
```

Визначення коефіцієнту передачі OP:

```
K=(ydata(index)-ydata(1))/20
```

Побудова графіку апроксимуючої функції з використанням визначених коефіцієнтів.

```
yfit = K*20*(1-exp(-(tdata-tau)/T))+ydata(1);
plot(tdata,yfit, 'g-', tdata, dot)
hold off
```

2.2.3 Аналіз результатів. Формулювання висновків


Необхідно проаналізувати результати, отримані при використанні різних розв'язувачів та методів, та зробити висновки.

2.3 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Кількість балів	Критерій оцінювання
10	Здобувач(ка) працював(ла) на практичних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) роботу в повному обсязі за своїм варіантом та завантажив(ла) оформлений відповідно до вимог звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
9-8	Здобувач(ка) працював(ла) на практичних заняттях, виконав(ла) роботу в повному обсязі за своїм варіантом та завантажив(ла) оформлений відповідно до вимог звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття), але припустив(ла)ся незначних помилок в програмі
7-6	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, повністю виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
5-2	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, частково або з суттєвими помилками виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт (сертифікат) в Moodle

Звіт має бути оформлений відповідно до вимог щодо оформлення технічної документації на аркушах формату А4. До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета лабораторної роботи.
3. Постановка завдання відповідно варіанту.

- 
4. Математична постановка задачі.
 5. Лістинг програми.
 6. Результати роботи програми.
 7. Висновки.

2.4 Питання для самоперевірки

1. До якого типу задач оптимізації відноситься задача ідентифікації об'єкта керування з використанням диференціального рівняння?
2. Як організувати роботу з експериментальними (табличними) даними в MatLab?
3. Обґрунтуйте, чому можна не враховувати дані, що відносяться до часу запізнення об'єкта керування.
4. Чому при використанні розв'язувачів MatLab для вказаної в роботі задачі слід задавати початкові значення змінної оптимізації?
5. Поясніть призначення функції *polyfit()*

2.5 Перелік рекомендованих джерел

1. Мовчан А., Степанець О. Методи статичної оптимізації : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 138 с.
2. Optimization Toolbox. Help Center. *MathWorks*.
URL: https://www.mathworks.com/help/optim/index.html?s_tid=hc_product_card (дата звернення: 15.02.2023).
3. Григорків В., Григорків М. Оптимізаційні методи та моделі : підручник. Чернівці : Чернів. нац. ун-т, 2016. 400 с.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. «АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГРАДІЄНТНИХ МЕТОДІВ ТА МЕТОДІВ НУЛЬОВОГО ПОРЯДКУ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛІННЯ»

3.1 Завдання

Завданням цієї лабораторної роботи є ознайомлення з теоретичним підґрунтям та розробка програми в середовищі MATLAB, Optimization Tools, яка розв'язує задачу налаштування ПІД-регулятора за допомогою градієнтних методів та методів нульового порядку, а також оцінка ефективності вказаних методів.

Варіанти завдання наведені у додатку Б.

Завдання для отримання максимального балу: визначити помилки в програмному коді та обґрунтувати власну думку.

3.2 Хід роботи

3.2.1 Задача оптимального параметричного синтезу ПІД-регулятора. Постановка задачі

Система автоматичного регулювання (стабілізації) технологічним параметром (рис. 3.1) передбачає наявність об'єкту управління, що представлений інерційною ланкою першого порядку з коефіцієнтом передачі K та сталою часу T (3.1), та ПІД-регулятору з коефіцієнтами налаштування K_p , T_i , T_d (3.2).

Перехідна функція ОР:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} \quad (3.1)$$

Перехідна функція ПІД-регулятора:

$$W_p(s) = K_p(e(s) + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (3.2)$$

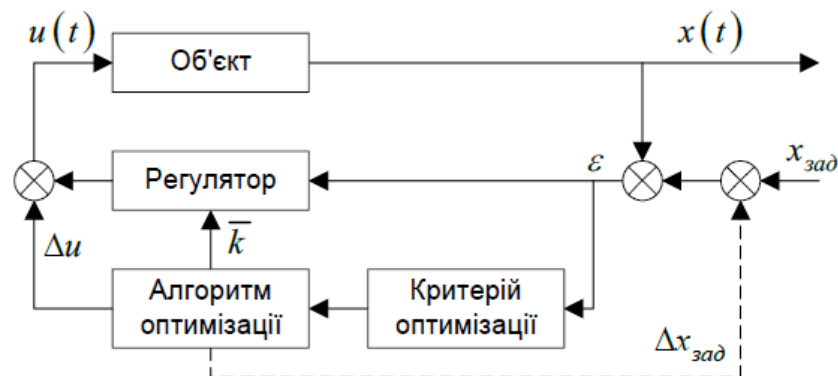


Рисунок 3.1 – Структурна схема одноконтурної САР стабілізації

Для визначення оптимальних значень коефіцієнтів регулятора на вхід системи подається стрибкоподібний вплив певної амплітуди. Сигнал розбалансу поступає на блок, що обчислює критерій оптимізації та передає одержану величину на блок, що реалізує алгоритм оптимізації.

Останній коригує параметри настройки регулятора, \vec{k} . Оптимізація продовжується доти, доки зміна значення критерію оптимальності не стає меншою за задану точність, що свідчить про досягнення екстремуму [1].

3.2.2 Задача оптимального параметричного синтезу з використанням градієнтного методу другого порядку (Ньютона). Математична постановка задачі

Цільова функція (залежність помилки регулювання від коефіцієнтів налаштування регулятора) є функцією трьох змінних і повинна бути мінімізована з використанням методу Ньютона.

Алгоритм градієнтного методу багатомірної оптимізації другого порядку (Ньютона) для мінімізації цільової функції має наступний вигляд:

$$\vec{u}_{k+1} = \vec{u}_k - [\nabla^2 f_0(\vec{u}_k)]^{-1} \nabla f_0(\vec{u}_k). \quad (3.3)$$

Тобто вектор, координати якого відповідають мінімуму цільової функції визначається за допомогою обчислення першого та другого градієнтів цільової функції [2].

Вирішення задачі за допомогою MATLAB

Для визначення коефіцієнтів налаштування ПІД-регулятора за допомогою методу Ньютона слід задати їхні початкові значення:

```
%Початкові значення коефіцієнтів регулятора  
Kp=1;  
Ki=0.5;  
Kd=0.1;
```

А також початкове значення температури в ОР, завдання та параметри ОР:

```
%Початкова температура в ОР та завдання  
Temp=20;  
Setpoint=200;  
old_Temp=0;
```

```
%Параметри ОР  
K=1;  
T=50;
```

```
%Помилка, інт.помилка  
Err=0;  
I_err=0;
```

Задаємо крок пошуку та максимальну кількість ітерацій:

```
Learning_rate=0.01;  
max_iter=100;
```

Реалізація пошуку:

```

for i=1:max_iter
    Err=Setpoint-Temp;
    I_err=I_err+Err;

    dE_dKp=-2*Err*Temp;
    dE_dKi=-2*Err*Temp;
    dE_dKd=-2*Err*(Temp-old_Temp);

    d2E_dKp2=2*Temp^2;
    d2E_dKi2=2*Temp^2;
    d2E_dKd2=2*(Temp-old_Temp)^2;

    Kp=Kp-Learning_rate*dE_dKp/d2E_dKp2;
    Ki=Ki-Learning_rate*dE_dKi/d2E_dKi2;
    Kd=Kd-Learning_rate*dE_dKd/d2E_dKd2;

    old_Temp=Temp;
    Temp=(Kp*Err+Ki*I_err+Kd*(Temp-old_Temp))/(T+1);
end

```

Виведення результатів:

```

fprintf('Kp=%2f\n',Kp);
fprintf('Ki=%2f\n',Ki);
fprintf('Kd=%2f\n',Kd);
fprintf('Eps=%2f\n',Temp-old_Temp);
fprintf('Err=%2f\n',Err);
fprintf('iter=%2f\n',i);

```

```

Kp=2.315976
Ki=1.815976
Kd=25.139125
Eps=0.175655
Err=4.474382
iter=100.000000

```

При аналізі отриманих результатів можна зробити висновок, що за 100 ітерацій алгоритм досяг точності (різниці між значеннями температури на сусідніх ітераціях) 0.175655 та при визначених коефіцієнтах налаштування регулятора статична помилка системи складає 4.474382.

Варто зауважити, що в вищенаведеному кодї обчислення обмежені лише кількістю ітерацій та отримані результати не є задовільними.

Тому слід додати обмеження для завершення пошуку після обчислення температури в об'єкті:

```

if abs(Err)<0.01
    break;
end

```

та змінити максимальну кількість ітерацій, наприклад, до 1000.

В результаті отримаємо наступні значення коефіцієнтів налаштування регулятора:

$$K_p=2.321494$$

$$K_i=1.821494$$

$$K_d=62.512901$$

$$Eps=0.000380$$

$$Err=0.009655$$

$$iter=253.000000$$

Перевірка отриманих результатів за допомогою моделі САР в Simulink та їхній аналіз із використанням PID Tuner

Побудуємо модель САР в Simulink (рис. 3.2)

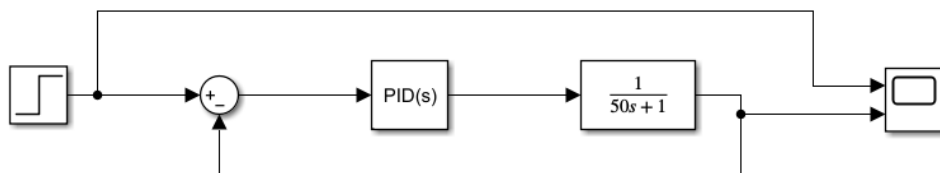


Рисунок 3.2 – Модель САР в Simulink

Встановимо параметри ОР та параметри регулятора, визначені за допомогою методу Ньютона (рис. 3.3):

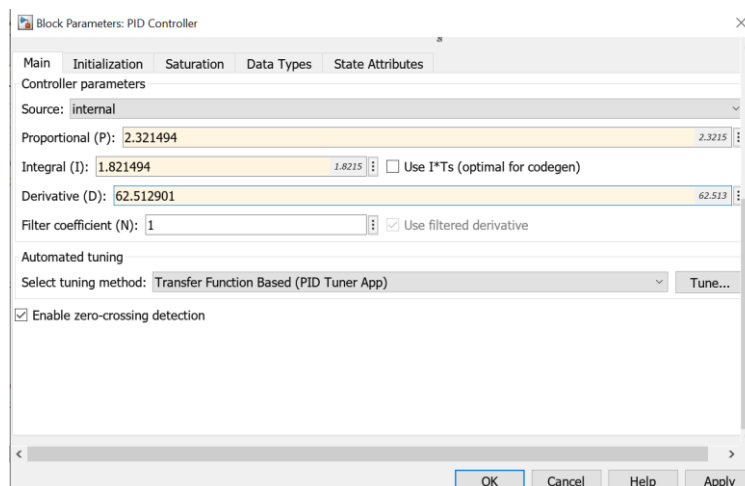


Рисунок 3.3 – Встановлення параметрів ПІД-регулятора

Отримаємо перехідний процес, зображений на рис. 3.4.

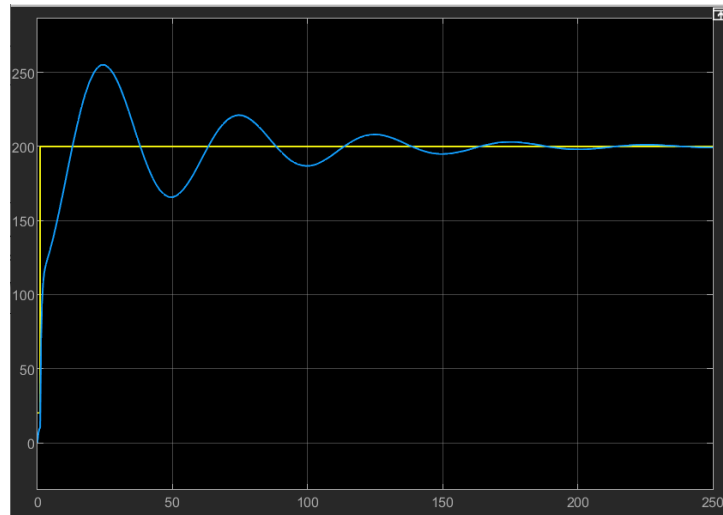


Рисунок 3.4 – Перехідний процес в САР з параметрами регулятора, визначеними методом Ньютона

Використаємо Tuner для автоматичного налаштування ПІД-регулятора, а також для порівняння показників якості перехідного процесу, отриманого з оптимальними за методом Ньютона коефіцієнтами налаштування (рис. 3.5) [3]:

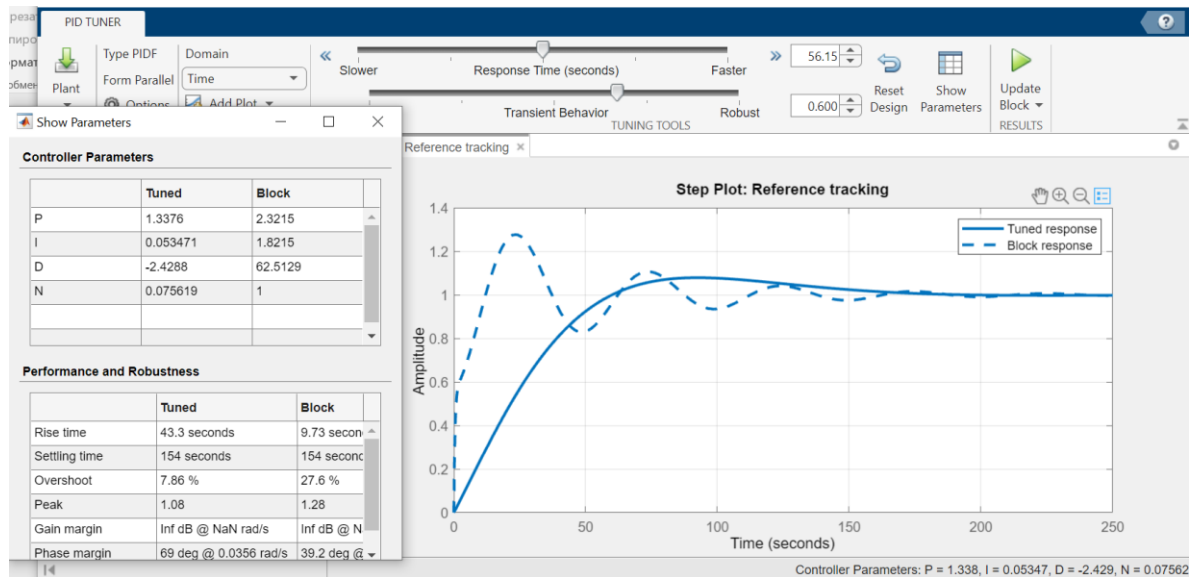


Рисунок 3.5 – Перехідні процеси в САР: з оптимальним регулятором та автоматично налаштованим.

Слід зауважити, що оцінка перехідного процесу, отриманого за оптимальних параметрів налаштування ПІД-регулятора, є орієнтовною, оскільки слід зважати на те, що блок PIDController в Simulink має відмінності у передавальній функції та наявності коефіцієнту для згладжування шумів похідної складової.

Отже з наведених результатів можна зробити висновок, що визначення коефіцієнтів за допомогою методу Ньютона може бути застосовано, коли до перехідного процесу в САР не застосовуються

жорсткі вимоги щодо недопущення коливань. У випадку з автоматичним налаштуванням має місце відсутність коливань, менша динамічна помилка, але довший час зростання регульованого параметру.

3.2.3 Задача оптимального параметричного синтезу з використанням методу нульового порядку (Хука-Дживса). Математична постановка задачі

Алгоритми пошуку мінімуму методом Хука-Дживса наведений на рис. 3.6, 3.7 [2].

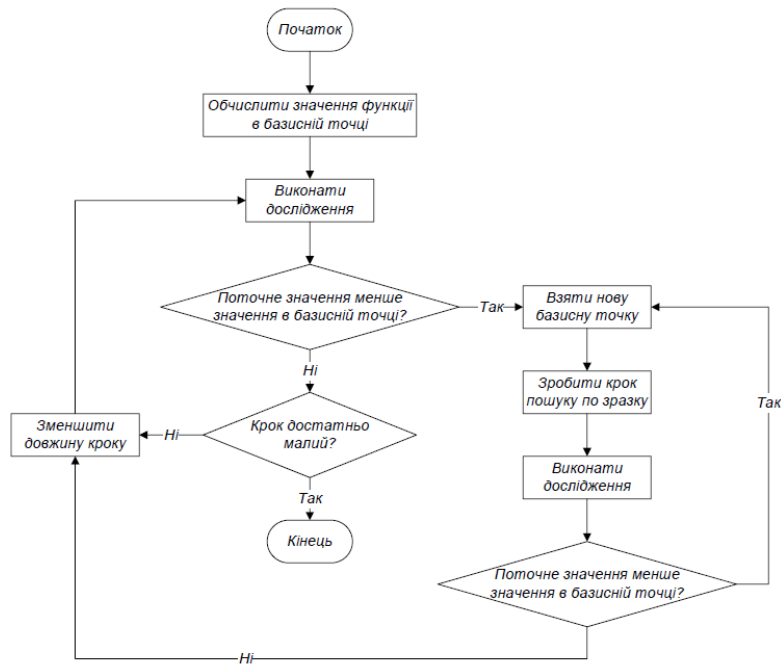


Рисунок 3.6 – Інформаційна схема методу Хука-Дживса

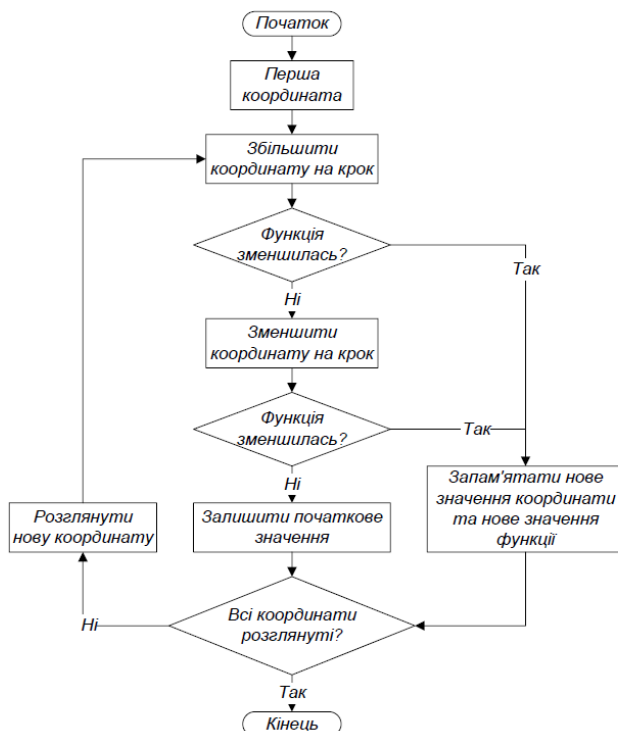


Рисунок 3.7 – Інформаційна схема пошуку дослідження

Вирішення задачі за допомогою MATLAB

Для визначення коефіцієнтів налаштування ПІД-регулятора за допомогою методу Хука-Дживса слід задати їхні початкові значення:

```
%Початкові значення коефіцієнтів регулятора  
Kp=1;  
Ki=0.5;  
Kd=0.1;
```

А також початкове значення температури в ОР, завдання та параметри ОР:

```
%Початкова температура в ОР та завдання  
Temp=20;  
Setpoint=200;  
old_Temp=0;
```

```
%Параметри ОР  
K=1;  
T=50;
```

```
%Помилка, інт.помилка  
Err=0;  
I_err=0;
```

Задаємо крок пошуку та максимальну кількість ітерацій:

```
max_iter = 1000;  
initial_step_size = 0.1; % Початковий розмір кроку у методі Хука-Дживса  
step_size = initial_step_size; % Поточний розмір кроку  
epsilon = 0.001; % Мале число для умови закінчення
```

Виведення результатів:

```
b = [Kp Ki Kd]; % Початкова базисна точка
```

```
for i = 1:max_iter
```

```
    Err = Setpoint - Temp;
```

```
    I_err = I_err + Err;
```

```
    f_b = abs(Err); % Значення функції f(X) у базисній точці b
```

```
    % Пошук навколо базисної точки b
```

```
    for j = 1:numel(b)
```

```
        e = zeros(size(b));
```

```
        e(j) = 1; % Одиничний вектор у напрямку j-ої змінної
```

```
        % Перевірка зміненого значення змінної
```

```
        b_plus = b + step_size * e;
```

```
        Temp_plus = (b_plus(1) * Err + b_plus(2) * I_err + b_plus(3) *  
(Temp - old_Temp)) / (T + 1);
```

```
        f_b_plus = abs(Setpoint - Temp_plus);
```

```
        % Перевірка зменшення значення функції
```

```
        if f_b_plus < f_b
```

```

    b = b_plus; % Оновлення базисної точки
    f_b = f_b_plus; % Оновлення значення функції
else
    % Перевірка зменшення значення функції з протилежним знаком
    b_minus = b - step_size * e;
    Temp_minus = (b_minus(1) * Err + b_minus(2) * I_err + b_minus(3)
* (Temp - old_Temp)) / (T + 1);
    f_b_minus = abs(Setpoint - Temp_minus);

    % Перевірка зменшення значення функції з протилежним знаком
    if f_b_minus < f_b
        b = b_minus; % Оновлення базисної точки
        f_b = f_b_minus; % Оновлення значення функції
    end
end
end

old_Temp = Temp;
Temp = (b(1)*Err+b(2)*I_err + b(3) * (Temp - old_Temp)) / (T + 1);

step_size = initial_step_size / 10^(i-1); % Зменшення розміру кроку
Обов'язковою умовою закінчення пошуку є виконання наступної
нерівності:
    if (step_size < epsilon)          break;
    end
end

```

Виведення результатів:

```

fprintf('Kp=%2f\n',Kp);
fprintf('Ki=%2f\n',Ki);
fprintf('Kd=%2f\n',Kd);
fprintf('Eps=%2f\n',Temp-old_Temp);
fprintf('Err=%2f\n',Err);
fprintf('iter=%2f\n',i);

```

```

Kp = 1.111000
Ki = 0.611000
Kd = 0.011000
Eps = 2.229177
Err = 189.063429
iter = 4.000000

```

Можна бачити, що для визначення коефіцієнтів регулятора методу достатньо 4 ітерацій, для досягнення необхідної мінімальної помилки можна застосувати наступну умову:

```

if (step_size < epsilon) && abs(Err)<0.01
    break;
end
end

```

В результаті можемо бачити такі ж значення коефіцієнтів регулятора, але суттєво більшу кількість ітерацій:

$K_p = 1.111111$
 $K_i = 0.611111$
 $K_d = 0.011111$
 $Eps = 0.000117$
 $Err = 0.009997$
 $iter = 839.000000$

Перевірка отриманих результатів за допомогою моделі CAP в Simulink та їхній аналіз із використанням PID Tuner

Побудуємо модель CAP в Simulink (рис. 3.8).

Задля порівняння результатів моделювання перехідних процесів в CAP з ПІД-регуляторами, налаштованими з використанням методу Ньютона та Хука-Дживса, відповідно, слід подати на входи однаковий сигнал завдання та відстежити зміни регульованого параметру на осцилографі [3].

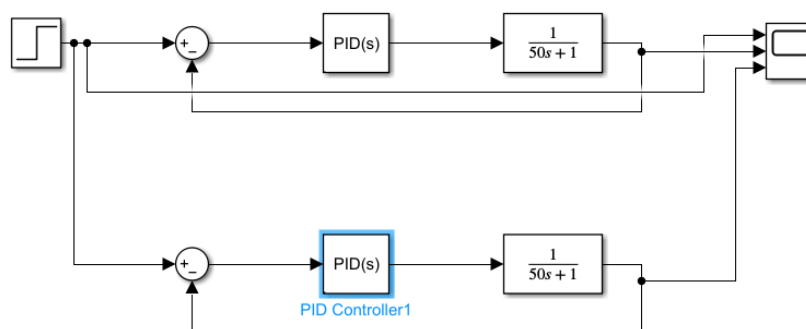


Рисунок 3.8 – Моделі CAP в Simulink

Встановимо параметри ОР та параметри регулятора, визначені за допомогою методу Хука-Дживса (рис. 3.9):

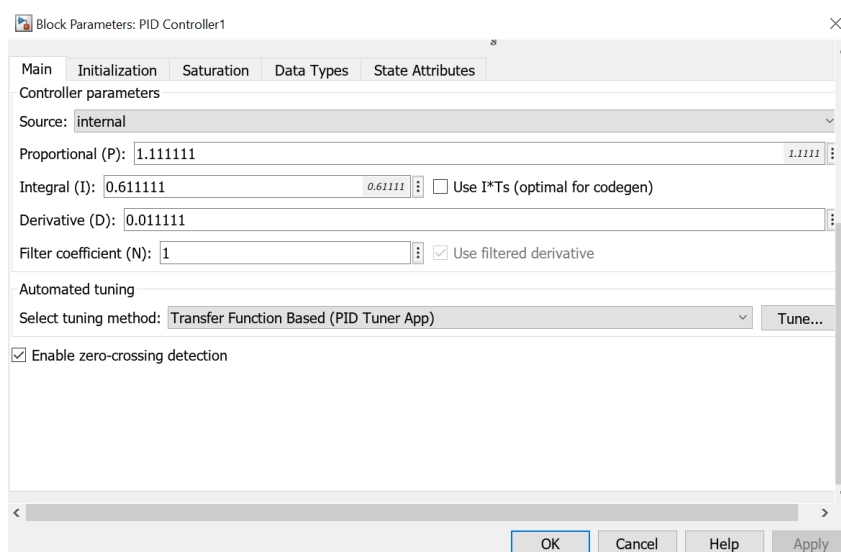


Рисунок 3.9 – Встановлення параметрів ПІД-регулятора

Використаємо Tuner для автоматичного налаштування ПІД-регулятора, а також для порівняння показників якості перехідного процесу, отриманого з оптимальними за методом Хука-Дживса коефіцієнтами налаштування (рис. 3.10):

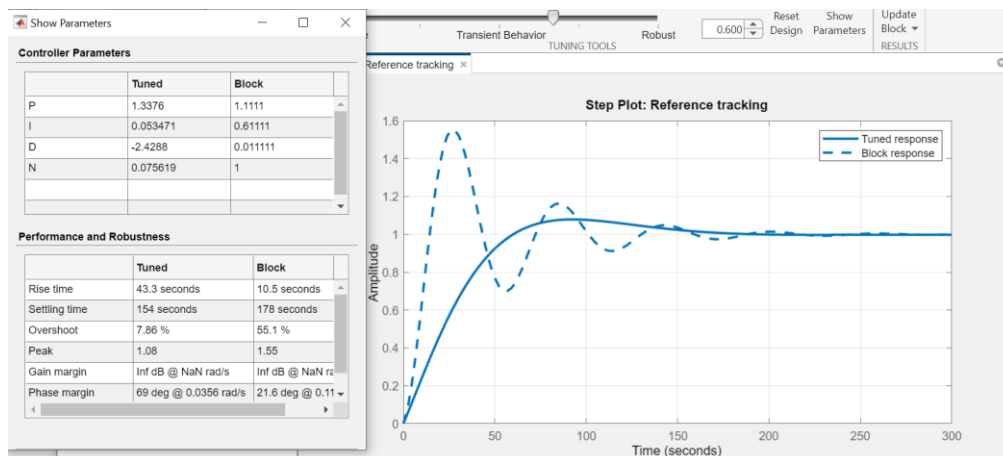


Рисунок 3.10 – Перехідні процеси в САР: з оптимальним регулятором та автоматично налаштованим

Слід зауважити, що оцінка перехідного процесу, отриманого за оптимальних параметрів налаштування ПІД-регулятора, є орієнтовною, оскільки слід зважати на те, що блок PIDController в Simulink має відмінності у передавальній функції та наявності коефіцієнту для згладжування шумів похідної складової.

Отже з наведених результатів можна зробити висновок, що визначення коефіцієнтів за допомогою методу Хука-Дживса, аналогічно методу Ньютона, може бути застосовано, коли до перехідного процесу в САР не застосовуються жорсткі вимоги щодо недопущення коливань. У випадку з автоматичним налаштуванням має місце відсутність коливань, менша динамічна помилка, але довший час зростання регульованого параметру. Отримаємо перехідні процеси, зображені на рис. 3.11.

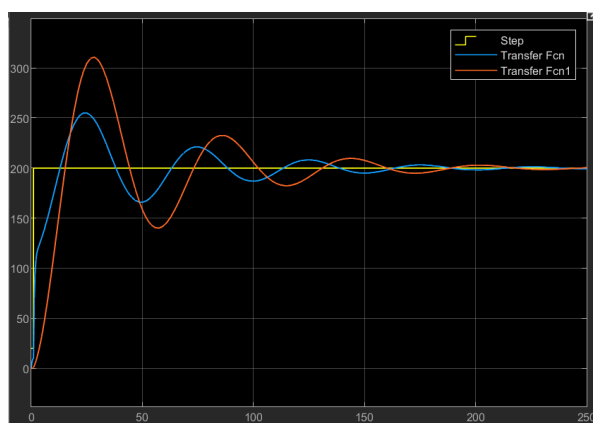


Рисунок 3.11 – Перехідні процес в САР з параметрами регулятора, визначеними методом Ньютона (блакитний) та Хука-Дживса (помаранчевий)


При порівнянні перехідних процесів (рис. 3.11) можна зробити висновок, що ПІД-регулятор з коефіцієнтами налаштування, визначеними за допомогою метода Ньютона, забезпечують кращі показники якості перехідного процесу, ніж у випадку використання методу Хука-Дживса. Варто зазначити, що методу Ньютона для визначення коефіцієнтів необхідна більша кількість ітерацій, ніж у випадку методу Хука-Дживса.

3.3 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Кількість балів	Критерій оцінювання
10	Здобувач(ка) працював(ла) на практичних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) роботу в повному обсязі (визначив(ла) усі наявні в коді помилки та обґрунтував(ла) свою думку) та завантажив(ла) оформлений відповідно до вимог звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
9-8	Здобувач(ка) працював(ла) на практичних заняттях, частково виконав(ла) роботу (визначив(ла) не усі наявні в коді помилки та/або недостатньо обґрунтував(ла) свою думку) та завантажив(ла) оформлений відповідно до вимог звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
7-6	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, повністю виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
5-2	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, частково або з суттєвими помилками виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт (сертифікат) в Moodle

Звіт має бути оформлений відповідно до вимог щодо оформлення технічної документації на аркушах формату А4 . До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета лабораторної роботи.

- 
3. Постановка завдання відповідно варіанту.
 4. Математична постановка задачі.
 5. Лістинг програми.
 6. Результати роботи програми.
 7. Висновки.

3.4 Питання для самоперевірки

1. Наведіть складові частини системи стабілізації, в якій передбачена оптимізація налаштувань регулятора.
2. Яка основна відмінність методів оптимізації другого та нульового порядків?
3. Наведіть алгоритм розв'язку задачі оптимізації налаштувань регулятора методом Ньютона.
4. Наведіть алгоритм розв'язку задачі оптимізації налаштувань регулятора методом Хука-Дживса.

3.5 Перелік рекомендованих джерел

1. Мовчан А., Степанець О. Методи статичної оптимізації : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 138 с.
2. Григорків В., Григорків М. Оптимізаційні методи та моделі : підручник. Чернівці : Чернів. нац. ун-т, 2016. 400 с.
3. Optimization Toolbox. Help Center. *MathWorks*.
URL: https://www.mathworks.com/help/optim/index.html?s_tid=hc_product_card (дата звернення: 20.02.2023).


4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. «СТОХАСТИЧНІ АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ»

4.1 Завдання

Завдання цієї лабораторної роботи передбачає опрацювання матеріалів курсу [Course: Optimization problems and algorithms \[2024\] | Udemy Business](#) на платформі інформальної освіти Udemy щодо стохастичних методів оптимізації, зокрема, методу частинок рою (Particle Swarm Optimisation - PSO), його застосування для вирішення одномірних задач оптимізації без та з обмеженнями, з безперервними та дискретними змінними, а також задач багатоцільової оптимізації та задач з невизначеністю [1].

4.2 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Кількість балів	Критерій оцінювання
10	Здобувач(ка) працював(ла) на практичних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання курсу в повному обсязі та завантажив(ла) звіт або Сертифікат інформальної освіти з файлами скриптів в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
9-8	Здобувач(ка) працював(ла) на практичних заняттях, виконав(ла) завдання курсу в повному обсязі та завантажив(ла) звіт або Сертифікат інформальної освіти з файлами скриптів в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
7-6	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, повністю виконав(ла) завдання курсу в повному обсязі та завантажив(ла) звіт або Сертифікат інформальної освіти в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
5-2	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, виконав(ла) завдання курсу частково та завантажив(ла) звіт або Сертифікат інформальної освіти в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт (сертифікат) в Moodle



Звіт має бути оформлений відповідно до вимог щодо оформлення технічної документації на аркушах формату А4. До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета лабораторної роботи.
3. Математична постановка задачі.
5. Лістинг програми.
6. Результати роботи програми.
7. Висновки.

4.3 Питання для самоперевірки

1. Що є головною перевагою методів стохастичної оптимізації?
2. До якого типу стохастичних методів відноситься PSO?
3. Як визначається соціальний інтелект у математичній моделі PSO?
4. Який контрольний параметр PSO зазвичай зменшується за лінійною залежністю?
5. Який діапазон передатної функції для випадку дискретної оптимізації з використанням PSO?
6. Як називається проекція множини оптимальних рішень по Парето в цільовий простір?

4.4 Перелік рекомендованих джерел

1. Mirjalili S. Optimization problems and algorithms : Course. *Udemy Business*. URL: <https://ua.udemy.com/course/optimisation/learn/lecture/8394030#overview> (дата звернення: ...).
2. Optimization Toolbox. Help Center. *MathWorks*. URL: https://www.mathworks.com/help/optim/index.html?s_tid=hc_product_card (дата звернення: ...).
3. Мовчан А., Степанець О. Методи статичної оптимізації : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 138 с.
4. Григорків В., Григорків М. Оптимізаційні методи та моделі : підручник. Чернівці : Чернів. нац. ун-т, 2016. 400 с.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ КРИВОЇ РОЗГОНУ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Таблиця А.1 – Варіант 1

с	Час, м ³ /год	Вихідна величина, м ³ /год	Час, с	Вихідна величина, м ³ /год
	0,0	205,5	186,0	472,3
	6,0	205,5	192,0	479,0
	12,0	205,6	198,0	481,5
	18,0	209,4	204,0	481,2
	24,0	219,5	210,0	479,7
	30,0	226,5	216,0	483,0
	36,0	244,1	222,0	483,9
	42,0	255,7	228,0	490,8
	48,0	267,7	234,0	493,9
	54,0	284,0	240,0	487,1
	60,0	302,9	246,0	493,7
	66,0	315,9	252,0	490,1
	72,0	329,0	258,0	496,4
	78,0	339,8	264,0	498,7
	84,0	357,6	270,0	496,8
	90,0	371,0	276,0	499,6
	96,0	373,4	282,0	495,7
	102,0	386,2	288,0	493,2
	108,0	396,9	294,0	501,6
	114,0	405,4	300,0	498,1
	120,0	418,2	306,0	498,5
	126,0	422,0	312,0	498,8
	132,0	429,1	318,0	499,1
	138,0	434,9	324,0	499,4
	144,0	441,8	330,0	499,7
	150,0	450,4	336,0	499,9
	156,0	451,8	342,0	500,1
	162,0	460,6	348,0	500,3
	168,0	459,5	354,0	500,5
	174,0	467,0	360,0	500,7
	180,0	466,2		

Таблиця А.2 – Варіант 2

с	Час, м ³ /год	Вихідна величина, м ³ /год	Час, с	Вихідна величина, м ³ /год
	0,0	212,1	248,0	585,3
	8,0	212,3	256,0	582,3
	16,0	220,9	264,0	591,5
	24,0	238,2	272,0	586,7
	32,0	256,7	280,0	584,6
	40,0	281,4	288,0	593,0
	48,0	306,2	296,0	591,0
	56,0	339,6	304,0	589,5
	64,0	358,2	312,0	597,6

с	Час, Вихідна величина,м ³ /год	Час, с	Вихідна величина,м ³ /год
72,0	381,0	320,0	598,7
80,0	401,0	328,0	600,5
88,0	419,0	336,0	598,3
96,0	433,4	344,0	600,8
104,0	454,0	352,0	596,9
112,0	462,9	360,0	603,3
120,0	484,7	368,0	601,0
128,0	498,6	376,0	605,9
136,0	503,1	384,0	600,3
144,0	513,7	392,0	601,1
152,0	518,8	400,0	603,3
160,0	532,0	408,0	603,7
168,0	538,6	416,0	604,0
176,0	546,4	424,0	604,3
184,0	553,1	432,0	604,6
192,0	561,7	440,0	604,8
200,0	559,6	448,0	605,0
208,0	563,0	456,0	605,2
216,0	569,0	464,0	605,4
224,0	569,3	472,0	605,6
232,0	569,4	480,0	605,7
240,0	581,7		

Таблиця А.3 – Варіант 3

с	Час, Вихідна величина,м ³ /год	Час, с	Вихідна величина,м ³ /год
0,0	287,9	279,0	813,0
9,0	287,9	288,0	824,1
18,0	297,9	297,0	830,5
27,0	320,6	306,0	826,5
36,0	354,5	315,0	840,0
45,0	384,3	324,0	840,8
54,0	411,7	333,0	836,5
63,0	461,2	342,0	837,9
72,0	484,5	351,0	842,2
81,0	514,9	360,0	843,2
90,0	547,7	369,0	843,9
99,0	578,9	378,0	837,7
108,0	598,1	387,0	839,7
117,0	626,7	396,0	840,9
126,0	654,6	405,0	858,9
135,0	661,3	414,0	848,0
144,0	691,3	423,0	841,8
153,0	705,6	432,0	851,0
162,0	713,7	441,0	855,4
171,0	732,4	450,0	853,2
180,0	752,4	459,0	853,8
189,0	751,0	468,0	854,2
198,0	769,9	477,0	854,6
207,0	768,6	486,0	855,0
216,0	781,6	495,0	855,4

225,0	789,3	504,0	855,7
234,0	796,3	513,0	856,0
243,0	806,8	522,0	856,2
252,0	800,2	531,0	856,4
261,0	805,5	540,0	856,6
270,0	810,5		

Таблиця А.4 – Варіант 4

Час, с	Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	135,9	248,0	338,0
8,0	135,9	256,0	339,1
16,0	137,5	264,0	336,8
24,0	143,3	272,0	338,3
32,0	155,0	280,0	343,3
40,0	161,9	288,0	340,3
48,0	175,4	296,0	346,8
56,0	183,7	304,0	343,6
64,0	197,0	312,0	342,0
72,0	212,1	320,0	342,6
80,0	218,6	328,0	344,2
88,0	229,6	336,0	348,7
96,0	240,9	344,0	345,2
104,0	248,9	352,0	349,4
112,0	259,6	360,0	346,7
120,0	267,3	368,0	345,7
128,0	278,0	376,0	349,0
136,0	282,8	384,0	346,4
144,0	292,7	392,0	348,4
152,0	297,1	400,0	350,4
160,0	303,8	408,0	350,7
168,0	306,1	416,0	350,9
176,0	312,6	424,0	351,1
184,0	311,5	432,0	351,3
192,0	316,9	440,0	351,5
200,0	323,0	448,0	351,6
208,0	320,4	456,0	351,8
216,0	324,8	464,0	351,9
224,0	330,0	472,0	352,0
232,0	334,0	480,0	352,1
240,0	332,6		

Таблиця А.5 – Варіант 5

Час, с	Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	256,1	124,0	635,4
4,0	256,1	128,0	643,0
8,0	256,1	132,0	641,5
12,0	256,1	136,0	653,6
16,0	258,0	140,0	660,0
20,0	270,7	144,0	664,7
24,0	272,4	148,0	663,3

Час, с	Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
28,0	290,7	152,0	671,5
32,0	305,0	156,0	676,5
36,0	318,4	160,0	687,5
40,0	342,0	164,0	689,9
44,0	367,5	168,0	691,5
48,0	385,3	172,0	686,6
52,0	395,5	176,0	701,2
56,0	412,4	180,0	696,2
60,0	434,1	184,0	694,3
64,0	457,0	188,0	703,3
68,0	473,9	192,0	697,7
72,0	490,3	196,0	699,2
76,0	508,0	200,0	705,1
80,0	513,0	204,0	706,5
84,0	525,1	208,0	707,8
88,0	547,7	212,0	708,9
92,0	564,0	216,0	710,0
96,0	566,6	220,0	710,9
100,0	584,6	224,0	711,8
104,0	597,1	228,0	712,6
108,0	598,3	232,0	713,4
112,0	608,5	236,0	714,0
116,0	624,7	240,0	714,7
120,0	622,8		

Таблиця А.6 – Варіант 6

Час, с	Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	232,3	155,0	550,6
5,0	232,3	160,0	553,4
10,0	233,4	165,0	555,6
15,0	240,0	170,0	559,8
20,0	250,6	175,0	563,0
25,0	268,1	180,0	570,7
30,0	277,3	185,0	573,9
35,0	300,5	190,0	576,9
40,0	318,8	195,0	574,7
45,0	339,0	200,0	571,9
50,0	346,3	205,0	579,0
55,0	365,5	210,0	582,5
60,0	387,3	215,0	572,7
65,0	400,3	220,0	584,9
70,0	419,3	225,0	576,9
75,0	432,6	230,0	580,5
80,0	440,6	235,0	578,3
85,0	455,2	240,0	582,3
90,0	466,2	245,0	584,3
95,0	478,4	250,0	585,1
100,0	488,4	255,0	585,7
105,0	494,8	260,0	586,3
110,0	496,5	265,0	586,8

115,0	511,1	270,0	587,3
120,0	520,4	275,0	587,7
125,0	526,3	280,0	588,1
130,0	523,8	285,0	588,4
135,0	532,6	290,0	588,8
140,0	543,0	295,0	589,1
145,0	549,5	300,0	589,4
150,0	547,6		

Таблиця А.7 – Варіант 7

Час, с	Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	316,0	124,0	820,6
4,0	316,0	128,0	819,8
8,0	316,0	132,0	832,7
12,0	316,0	136,0	840,8
16,0	322,3	140,0	847,5
20,0	327,1	144,0	864,0
24,0	331,5	148,0	875,2
28,0	353,9	152,0	868,0
32,0	385,6	156,0	874,2
36,0	409,3	160,0	890,9
40,0	419,6	164,0	894,7
44,0	450,7	168,0	884,2
48,0	469,7	172,0	895,3
52,0	508,1	176,0	908,1
56,0	517,5	180,0	897,4
60,0	539,8	184,0	908,4
64,0	573,3	188,0	904,1
68,0	600,6	192,0	906,3
72,0	615,0	196,0	921,7
76,0	644,4	200,0	916,3
80,0	655,8	204,0	918,3
84,0	679,4	208,0	920,2
88,0	691,8	212,0	921,9
92,0	707,7	216,0	923,5
96,0	730,5	220,0	925,0
100,0	749,3	224,0	926,3
104,0	764,5	228,0	927,5
108,0	765,6	232,0	928,6
112,0	783,3	236,0	929,6
116,0	805,3	240,0	930,6
120,0	811,8		

Таблиця А.8 – Варіант 8

Час, с	Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	387,8	124,0	921,4
4,0	387,8	128,0	937,7
8,0	387,8	132,0	956,3

Час, с	Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
12,0	387,9	136,0	964,7
16,0	401,6	140,0	966,5
20,0	402,8	144,0	982,8
24,0	410,5	148,0	970,2
28,0	443,9	152,0	989,8
32,0	452,6	156,0	990,4
36,0	477,9	160,0	1008,2
40,0	508,6	164,0	996,2
44,0	529,2	168,0	1010,5
48,0	560,7	172,0	1017,3
52,0	576,8	176,0	1014,3
56,0	620,7	180,0	1032,7
60,0	646,3	184,0	1020,4
64,0	670,3	188,0	1023,0
68,0	694,7	192,0	1025,8
72,0	714,1	196,0	1035,3
76,0	736,5	200,0	1038,1
80,0	744,8	204,0	1040,4
84,0	765,5	208,0	1042,6
88,0	790,1	212,0	1044,6
92,0	824,4	216,0	1046,4
96,0	821,8	220,0	1048,1
100,0	858,2	224,0	1049,7
104,0	874,0	228,0	1051,1
108,0	869,3	232,0	1052,4
112,0	890,2	236,0	1053,6
116,0	907,1	240,0	1054,7
120,0	910,2		

Таблиця А.9 – Варіант 9

Час, с	Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	182,2	93,0	461,4
3,0	182,2	96,0	473,6
6,0	182,2	99,0	477,2
9,0	182,2	102,0	473,4
12,0	186,9	105,0	478,2
15,0	188,6	108,0	489,3
18,0	190,1	111,0	488,9
21,0	200,0	114,0	496,1
24,0	213,7	117,0	499,3
27,0	224,2	120,0	503,8
30,0	243,2	123,0	505,5
33,0	255,9	126,0	506,2
36,0	267,1	129,0	517,5
39,0	276,7	132,0	509,1
42,0	293,7	135,0	519,2
45,0	301,9	138,0	524,2
48,0	322,7	141,0	521,9
51,0	325,7	144,0	523,7
54,0	337,3	147,0	525,8

57,0	354,2	150,0	526,6
60,0	369,5	153,0	528,1
63,0	379,3	156,0	529,5
66,0	383,6	159,0	530,8
69,0	403,9	162,0	531,9
72,0	410,0	165,0	533,0
75,0	413,0	168,0	534,0
78,0	424,2	171,0	535,0
81,0	430,7	174,0	535,8
84,0	440,0	177,0	536,6
87,0	446,3	180,0	537,3
90,0	449,2		

Таблиця А.10 – Варіант 10

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	286,5	217,0	706,6
7,0	286,5	224,0	717,0
14,0	288,4	231,0	714,8
21,0	298,2	238,0	716,0
28,0	314,6	245,0	716,6
35,0	335,5	252,0	729,8
42,0	354,7	259,0	729,9
49,0	385,7	266,0	738,2
56,0	407,0	273,0	732,2
63,0	430,5	280,0	739,0
70,0	446,8	287,0	734,5
77,0	475,2	294,0	737,3
84,0	504,9	301,0	742,5
91,0	520,8	308,0	745,7
98,0	532,1	315,0	744,5
105,0	557,6	322,0	746,5
112,0	574,1	329,0	747,9
119,0	585,6	336,0	745,0
126,0	595,1	343,0	748,0
133,0	619,8	350,0	747,2
140,0	626,4	357,0	747,8
147,0	634,8	364,0	748,4
154,0	654,8	371,0	749,0
161,0	660,5	378,0	749,5
168,0	673,3	385,0	749,9
175,0	678,0	392,0	750,4
182,0	677,8	399,0	750,7
189,0	695,4	406,0	751,1
196,0	690,1	413,0	751,4
203,0	706,8	420,0	751,7
210,0	702,7		

Таблиця А.11 – Варіант 11

Час, с	Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	199,0	279,0	545,8
9,0	199,0	288,0	542,2
18,0	202,7	297,0	540,3
27,0	214,2	306,0	543,2
36,0	235,2	315,0	546,3
45,0	251,5	324,0	551,3
54,0	269,9	333,0	556,4
63,0	294,3	342,0	550,2
72,0	310,9	351,0	554,5
81,0	331,7	360,0	554,4
90,0	358,7	369,0	551,6
99,0	373,7	378,0	561,9
108,0	387,1	387,0	561,7
117,0	406,3	396,0	562,8
126,0	423,0	405,0	557,1
135,0	435,8	414,0	562,8
144,0	443,7	423,0	566,7
153,0	458,5	432,0	566,9
162,0	465,3	441,0	566,0
171,0	474,6	450,0	562,1
180,0	481,0	459,0	562,4
189,0	491,1	468,0	562,8
198,0	503,5	477,0	563,0
207,0	504,5	486,0	563,3
216,0	516,8	495,0	563,6
225,0	522,3	504,0	563,8
234,0	527,8	513,0	564,0
243,0	529,5	522,0	564,1
252,0	524,8	531,0	564,3
261,0	527,8	540,0	564,4
270,0	533,2		

Таблиця А.12 – Варіант 12

Час, с	Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	238,8	248,0	632,7
8,0	239,0	256,0	632,4
16,0	248,5	264,0	642,8
24,0	267,7	272,0	638,2
32,0	296,5	280,0	645,0
40,0	316,2	288,0	644,3
48,0	352,1	296,0	645,2
56,0	379,2	304,0	643,5
64,0	402,0	312,0	645,1
72,0	417,0	320,0	644,6
80,0	451,9	328,0	655,5
88,0	459,9	336,0	650,5
96,0	481,2	344,0	657,5
104,0	499,9	352,0	647,1
112,0	514,9	360,0	655,6
120,0	527,9	368,0	652,8

128,0	540,3	376,0	661,2
136,0	555,8	384,0	649,2
144,0	565,7	392,0	660,2
152,0	574,3	400,0	655,4
160,0	584,2	408,0	655,7
168,0	590,4	416,0	656,0
176,0	590,6	424,0	656,2
184,0	605,8	432,0	656,5
192,0	606,3	440,0	656,7
200,0	614,5	448,0	656,9
208,0	622,2	456,0	657,0
216,0	618,1	464,0	657,2
224,0	622,2	472,0	657,3
232,0	632,1	480,0	657,5
240,0	636,2		

Таблиця А.13 – Варіант 13

Час, с	Вихідна величина, м3/год	Час, с	Вихідна величина, м3/год
0,0	265,9	217,0	639,9
7,0	265,9	224,0	641,0
14,0	266,3	231,0	645,7
21,0	272,3	238,0	653,2
28,0	284,6	245,0	649,6
35,0	299,3	252,0	654,3
42,0	318,1	259,0	654,7
49,0	330,2	266,0	656,6
56,0	363,0	273,0	662,1
63,0	382,4	280,0	657,1
70,0	398,3	287,0	668,6
77,0	416,1	294,0	668,9
84,0	438,3	301,0	663,7
91,0	456,1	308,0	669,1
98,0	473,1	315,0	669,7
105,0	490,0	322,0	666,7
112,0	510,0	329,0	671,9
119,0	524,5	336,0	676,7
126,0	529,7	343,0	667,5
133,0	540,9	350,0	673,3
140,0	557,6	357,0	674,0
147,0	568,4	364,0	674,6
154,0	574,9	371,0	675,1
161,0	584,5	378,0	675,6
168,0	596,2	385,0	676,0
175,0	598,6	392,0	676,4
182,0	615,6	399,0	676,8
189,0	622,2	406,0	677,1
196,0	626,3	413,0	677,4
203,0	627,5	420,0	677,7
210,0	628,6		

Таблиця А.14 – Варіант 14

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	217,2	186,0	530,2
6,0	217,2	192,0	532,1
12,0	218,1	198,0	542,8
18,0	224,5	204,0	546,3
24,0	233,8	210,0	542,3
30,0	249,2	216,0	545,8
36,0	267,6	222,0	545,9
42,0	279,8	228,0	551,8
48,0	295,2	234,0	550,8
54,0	314,4	240,0	557,0
60,0	334,8	246,0	559,5
66,0	349,2	252,0	555,4
72,0	367,4	258,0	560,1
78,0	385,2	264,0	554,5
84,0	396,2	270,0	563,0
90,0	417,2	276,0	562,2
96,0	427,9	282,0	565,6
102,0	440,6	288,0	558,5
108,0	452,4	294,0	567,8
114,0	454,8	300,0	564,0
120,0	474,7	306,0	564,5
126,0	474,1	312,0	565,0
132,0	487,6	318,0	565,5
138,0	489,8	324,0	565,9
144,0	504,2	330,0	566,2
150,0	506,4	336,0	566,6
156,0	515,5	342,0	566,9
162,0	520,8	348,0	567,2
168,0	526,1	354,0	567,4
174,0	523,6	360,0	567,7
180,0	534,2		

Таблиця А.15 – Варіант 15

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	144,5	155,0	383,6
5,0	144,5	160,0	390,6
10,0	144,6	165,0	386,1
15,0	147,4	170,0	389,4
20,0	156,0	175,0	393,7
25,0	164,2	180,0	401,2
30,0	173,5	185,0	395,8
35,0	185,3	190,0	396,5
40,0	199,9	195,0	405,4
45,0	208,7	200,0	407,5
50,0	219,5	205,0	405,6
55,0	235,1	210,0	404,6
60,0	247,6	215,0	410,9
65,0	255,2	220,0	410,5

70,0	271,0	225,0	409,2
75,0	282,6	230,0	411,8
80,0	288,7	235,0	413,5
85,0	301,8	240,0	410,2
90,0	308,0	245,0	417,4
95,0	316,3	250,0	413,5
100,0	326,9	255,0	414,1
105,0	330,4	260,0	414,6
110,0	340,1	265,0	415,0
115,0	346,9	270,0	415,5
120,0	349,3	275,0	415,9
125,0	357,2	280,0	416,2
130,0	367,0	285,0	416,6
135,0	372,7	290,0	416,8
140,0	372,1	295,0	417,1
145,0	379,0	300,0	417,4
150,0	376,0		

Таблиця А.16 – Варіант 16

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	229,4	186,0	562,2
6,0	229,4	192,0	566,9
12,0	230,1	198,0	572,7
18,0	236,5	204,0	579,1
24,0	245,9	210,0	573,5
30,0	267,7	216,0	586,7
36,0	280,5	222,0	588,8
42,0	304,1	228,0	584,7
48,0	321,6	234,0	581,3
54,0	334,4	240,0	586,6
60,0	357,4	246,0	586,1
66,0	380,8	252,0	590,2
72,0	394,4	258,0	588,5
78,0	410,7	264,0	591,4
84,0	421,0	270,0	597,3
90,0	438,8	276,0	595,4
96,0	455,5	282,0	592,5
102,0	474,8	288,0	597,4
108,0	476,4	294,0	599,1
114,0	497,6	300,0	596,9
120,0	507,3	306,0	597,3
126,0	509,8	312,0	597,7
132,0	521,1	318,0	598,1
138,0	524,2	324,0	598,5
144,0	528,4	330,0	598,8
150,0	538,7	336,0	599,0
156,0	542,4	342,0	599,3
162,0	551,5	348,0	599,5
168,0	556,3	354,0	599,7
174,0	566,2	360,0	599,9
180,0	567,2		

Таблиця А.17 – Варіант 17

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	245,0	155,0	602,7
5,0	245,0	160,0	602,8
10,0	245,0	165,0	608,4
15,0	246,1	170,0	613,1
20,0	255,7	175,0	620,0
25,0	257,1	180,0	618,1
30,0	276,4	185,0	632,0
35,0	284,9	190,0	638,9
40,0	298,6	195,0	641,1
45,0	320,2	200,0	633,7
50,0	330,6	205,0	636,9
55,0	355,0	210,0	639,8
60,0	372,7	215,0	654,0
65,0	390,2	220,0	655,7
70,0	402,4	225,0	646,6
75,0	424,7	230,0	657,2
80,0	442,6	235,0	659,1
85,0	459,7	240,0	660,8
90,0	463,0	245,0	656,0
95,0	478,1	250,0	659,5
100,0	490,8	255,0	660,7
105,0	504,1	260,0	661,9
110,0	523,6	265,0	662,9
115,0	528,4	270,0	663,8
120,0	547,5	275,0	664,7
125,0	552,1	280,0	665,5
130,0	559,3	285,0	666,2
135,0	572,1	290,0	666,9
140,0	578,2	295,0	667,5
145,0	587,5	300,0	668,1
150,0	599,4		

Таблиця А.18 – Варіант 18

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	325,9	93,0	776,7
3,0	325,9	96,0	785,3
6,0	325,9	99,0	794,1
9,0	327,9	102,0	793,0
12,0	332,1	105,0	796,5
15,0	351,5	108,0	805,3
18,0	357,0	111,0	807,1
21,0	383,0	114,0	814,1
24,0	402,7	117,0	812,6
27,0	434,3	120,0	821,0
30,0	455,4	123,0	825,9
33,0	478,9	126,0	837,2
36,0	487,8	129,0	831,0

39,0	506,2	132,0	829,2
42,0	539,7	135,0	830,1
45,0	552,5	138,0	842,9
48,0	569,1	141,0	840,1
51,0	597,3	144,0	837,7
54,0	609,7	147,0	849,6
57,0	641,0	150,0	848,6
60,0	654,8	153,0	850,1
63,0	666,7	156,0	851,5
66,0	686,4	159,0	852,7
69,0	694,6	162,0	853,8
72,0	710,0	165,0	854,9
75,0	723,6	168,0	855,8
78,0	738,2	171,0	856,7
81,0	739,7	174,0	857,5
84,0	751,3	177,0	858,3
87,0	757,6	180,0	858,9
90,0	774,7		

Таблиця А.19 – Варіант 19

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	206,5	248,0	476,0
8,0	206,5	256,0	476,0
16,0	210,0	264,0	480,2
24,0	219,5	272,0	486,5
32,0	229,6	280,0	489,8
40,0	249,6	288,0	489,5
48,0	267,0	296,0	488,8
56,0	280,3	304,0	489,1
64,0	295,6	312,0	490,4
72,0	310,0	320,0	490,6
80,0	331,2	328,0	487,7
88,0	346,8	336,0	494,8
96,0	358,6	344,0	491,7
104,0	374,0	352,0	489,8
112,0	385,7	360,0	495,4
120,0	390,8	368,0	495,9
128,0	401,3	376,0	495,7
136,0	406,7	384,0	493,0
144,0	419,8	392,0	496,3
152,0	430,3	400,0	497,7
160,0	437,6	408,0	498,1
168,0	439,7	416,0	498,4
176,0	441,8	424,0	498,7
184,0	449,1	432,0	498,9
192,0	454,2	440,0	499,2
200,0	458,9	448,0	499,4
208,0	459,7	456,0	499,6
216,0	467,5	464,0	499,8
224,0	473,9	472,0	499,9
232,0	467,9	480,0	500,1

240,0	475,1	
-------	-------	--

Таблиця А.20 – Варіант 20

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
	0,0		418,9
	4,0		418,9
	8,0		419,5
	12,0		429,8
	16,0		445,7
	20,0		477,9
	24,0		507,9
	28,0		543,9
	32,0		584,0
	36,0		627,4
	40,0		657,0
	44,0		705,0
	48,0		719,0
	52,0		758,5
	56,0		793,6
	60,0		823,5
	64,0		843,3
	68,0		881,1
	72,0		910,5
	76,0		929,4
	80,0		950,0
	84,0		972,6
	88,0		981,8
	92,0		1005,3
	96,0		1015,9
	100,0		1014,1
	104,0		1027,0
	108,0		1052,6
	112,0		1061,4
	116,0		1051,7
	120,0		1060,9
		124,0	1078,1
		128,0	1089,5
		132,0	1100,5
		136,0	1095,9
		140,0	1099,8
		144,0	1093,6
		148,0	1105,6
		152,0	1100,8
		156,0	1124,0
		160,0	1114,1
		164,0	1114,4
		168,0	1134,8
		172,0	1133,8
		176,0	1133,9
		180,0	1133,2
		184,0	1129,8
		188,0	1128,8
		192,0	1121,4
		196,0	1135,7
		200,0	1135,1
		204,0	1136,0
		208,0	1136,8
		212,0	1137,6
		216,0	1138,2
		220,0	1138,8
		224,0	1139,3
		228,0	1139,8
		232,0	1140,3
		236,0	1140,6
		240,0	1141,0

Таблиця А.21 – Варіант 21

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
	0,0		109,0
	8,0		109,0
	16,0		109,5
	24,0		113,3
	32,0		123,2
	40,0		126,0
	48,0		136,0
	56,0		147,5
	64,0		157,7
	72,0		171,0
	80,0		177,6
	88,0		193,1
		248,0	301,5
		256,0	301,5
		264,0	301,4
		272,0	306,6
		280,0	305,7
		288,0	309,5
		296,0	308,4
		304,0	310,9
		312,0	313,3
		320,0	311,8
		328,0	310,3
		336,0	314,4

96,0	202,8	344,0	315,8
104,0	211,0	352,0	317,3
112,0	219,8	360,0	313,7
120,0	229,5	368,0	315,5
128,0	236,2	376,0	316,7
136,0	245,0	384,0	314,4
144,0	249,1	392,0	314,9
152,0	255,8	400,0	316,9
160,0	263,9	408,0	317,1
168,0	267,4	416,0	317,4
176,0	272,6	424,0	317,6
184,0	276,2	432,0	317,9
192,0	281,5	440,0	318,0
200,0	282,0	448,0	318,2
208,0	286,1	456,0	318,4
216,0	288,8	464,0	318,5
224,0	295,3	472,0	318,7
232,0	294,6	480,0	318,8
240,0	301,0		

Таблиця А.22 – Варіант 22

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	272,3	186,0	755,6
6,0	272,3	192,0	752,7
12,0	273,2	198,0	757,4
18,0	282,0	204,0	773,9
24,0	295,0	210,0	765,1
30,0	323,5	216,0	773,3
36,0	351,3	222,0	781,3
42,0	375,9	228,0	774,0
48,0	388,6	234,0	781,8
54,0	420,0	240,0	792,5
60,0	455,4	246,0	785,2
66,0	469,1	252,0	793,6
72,0	498,2	258,0	783,6
78,0	531,2	264,0	797,1
84,0	541,6	270,0	793,9
90,0	568,3	276,0	787,3
96,0	589,3	282,0	790,2
102,0	608,0	288,0	796,5
108,0	632,8	294,0	803,1
114,0	646,5	300,0	796,9
120,0	655,6	306,0	797,6
126,0	674,0	312,0	798,2
132,0	673,2	318,0	798,8
138,0	700,0	324,0	799,4
144,0	696,4	330,0	799,8
150,0	715,0	336,0	800,3
156,0	726,6	342,0	800,7
162,0	727,4	348,0	801,0
168,0	742,8	354,0	801,3

174,0	744,8	360,0	801,6
180,0	742,8		

Таблиця А.23 – Варіант 23

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	111,4	124,0	264,1
4,0	111,4	128,0	264,5
8,0	111,4	132,0	267,3
12,0	111,4	136,0	273,6
16,0	112,7	140,0	274,6
20,0	113,2	144,0	279,6
24,0	118,3	148,0	277,0
28,0	123,3	152,0	281,7
32,0	129,3	156,0	282,3
36,0	137,8	160,0	285,8
40,0	142,8	164,0	287,0
44,0	148,2	168,0	287,0
48,0	154,4	172,0	293,8
52,0	163,0	176,0	293,2
56,0	166,8	180,0	294,9
60,0	178,1	184,0	293,2
64,0	187,2	188,0	300,0
68,0	193,2	192,0	299,7
72,0	199,2	196,0	297,4
76,0	203,2	200,0	299,7
80,0	209,5	204,0	300,6
84,0	219,1	208,0	301,4
88,0	224,8	212,0	302,1
92,0	231,0	216,0	302,8
96,0	232,7	220,0	303,4
100,0	238,5	224,0	304,0
104,0	244,8	228,0	304,5
108,0	250,6	232,0	305,0
112,0	253,6	236,0	305,5
116,0	253,3	240,0	305,9
120,0	261,8		

Таблиця А.24 – Варіант 24

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	145,6	155,0	354,3
5,0	145,6	160,0	358,0
10,0	145,6	165,0	366,8
15,0	145,9	170,0	362,8
20,0	147,7	175,0	371,8
25,0	154,4	180,0	375,0
30,0	160,1	185,0	373,6
35,0	166,1	190,0	375,3
40,0	176,5	195,0	377,9
45,0	187,1	200,0	378,9
50,0	202,4	205,0	383,0

55,0	205,6	210,0	379,9
60,0	218,2	215,0	387,0
65,0	234,4	220,0	382,9
70,0	237,2	225,0	388,2
75,0	248,8	230,0	384,2
80,0	257,7	235,0	388,1
85,0	272,0	240,0	386,1
90,0	279,6	245,0	390,2
95,0	290,7	250,0	391,1
100,0	293,7	255,0	391,7
105,0	303,3	260,0	392,3
110,0	314,0	265,0	392,9
115,0	315,2	270,0	393,3
120,0	326,2	275,0	393,8
125,0	328,1	280,0	394,2
130,0	337,4	285,0	394,6
135,0	338,6	290,0	394,9
140,0	342,8	295,0	395,2
145,0	345,2	300,0	395,5
150,0	352,3		

Таблиця А.25 – Варіант 25

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	251,0	217,0	697,6
7,0	251,0	224,0	707,9
14,0	251,3	231,0	707,9
21,0	258,1	238,0	717,7
28,0	279,1	245,0	718,5
35,0	289,4	252,0	731,0
42,0	311,9	259,0	729,5
49,0	333,0	266,0	723,5
56,0	369,3	273,0	738,6
63,0	380,1	280,0	727,1
70,0	411,6	287,0	732,8
77,0	440,1	294,0	730,0
84,0	458,9	301,0	738,8
91,0	477,9	308,0	732,8
98,0	501,7	315,0	737,5
105,0	527,6	322,0	738,7
112,0	540,1	329,0	743,7
119,0	560,4	336,0	749,1
126,0	587,7	343,0	737,3
133,0	591,5	350,0	746,1
140,0	606,7	357,0	746,7
147,0	620,1	364,0	747,3
154,0	634,3	371,0	747,9
161,0	644,5	378,0	748,4
168,0	658,7	385,0	748,8
175,0	663,6	392,0	749,2
182,0	667,9	399,0	749,5
189,0	685,3	406,0	749,9


196,0	693,3	413,0	750,2
203,0	688,1	420,0	750,4
210,0	691,7		

Таблиця А.26 – Варіант 26

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	208,9	217,0	591,7
7,0	208,9	224,0	588,1
14,0	213,6	231,0	591,8
21,0	226,7	238,0	602,4
28,0	247,3	245,0	598,2
35,0	259,8	252,0	601,7
42,0	286,2	259,0	601,6
49,0	318,0	266,0	608,8
56,0	341,4	273,0	599,1
63,0	363,1	280,0	599,9
70,0	386,4	287,0	607,1
77,0	404,2	294,0	603,3
84,0	415,2	301,0	612,2
91,0	443,1	308,0	607,4
98,0	459,8	315,0	610,5
105,0	470,9	322,0	613,0
112,0	477,2	329,0	608,2
119,0	490,6	336,0	612,9
126,0	509,2	343,0	616,7
133,0	517,4	350,0	615,1
140,0	531,1	357,0	615,6
147,0	531,2	364,0	616,0
154,0	536,2	371,0	616,4
161,0	553,0	378,0	616,7
168,0	557,4	385,0	617,1
175,0	555,3	392,0	617,3
182,0	572,6	399,0	617,6
189,0	568,1	406,0	617,9
196,0	577,9	413,0	618,1
203,0	581,8	420,0	618,3
210,0	580,3		

Таблиця А.27 – Варіант 27

с	Час, Вихідна величина,м3/год	Час, с	Вихідна величина,м3/год
0,0	262,2	279,0	664,7
9,0	262,2	288,0	670,9
18,0	266,3	297,0	675,3
27,0	279,3	306,0	679,8
36,0	295,3	315,0	677,6
45,0	318,6	324,0	680,3
54,0	340,6	333,0	675,8
63,0	371,1	342,0	688,0
72,0	394,2	351,0	692,0
81,0	416,2	360,0	680,8



90,0	448,9	369,0	687,3
99,0	466,5	378,0	689,8
108,0	484,4	387,0	690,4
117,0	496,5	396,0	698,1
126,0	517,2	405,0	695,1
135,0	532,3	414,0	696,9
144,0	555,8	423,0	701,0
153,0	568,7	432,0	701,1
162,0	581,7	441,0	697,0
171,0	594,1	450,0	695,6
180,0	603,5	459,0	696,0
189,0	602,8	468,0	696,5
198,0	617,8	477,0	696,9
207,0	621,3	486,0	697,2
216,0	635,0	495,0	697,5
225,0	640,1	504,0	697,8
234,0	640,2	513,0	698,1
243,0	656,3	522,0	698,3
252,0	657,7	531,0	698,5
261,0	662,2	540,0	698,7
270,0	666,2		

ПАРАМЕТРИ САР

Таблиця Б.1 – Параметри налаштування регулятора та об'єкта регулювання

№ вар.	Метод Ньютона	Метод Хука-Дживса	Параметри ОР
1	Kp=1.5; Ki=1; Kd=0.5;	Kp=1.5; Ki=1; Kd=0.5;	K=1; T=20;
2	Kp=1.3; Ki=0.6; Kd=0.5;	Kp=1.3; Ki=0.6; Kd=0.5;	K=1; T=40;
3	Kp=0.8; Ki=0.5; Kd=0.6;	Kp=0.8; Ki=0.5; Kd=0.6;	K=1; T=30;
4	Kp=1.1; Ki=1; Kd=0.6;	Kp=1.1; Ki=1; Kd=0.6;	K=1; T=50;
5	Kp=1.3; Ki=1; Kd=0.3;	Kp=1.3; Ki=1; Kd=0.3;	K=1; T=60;
6	Kp=1.1; Ki=0.9; Kd=0.6;	Kp=1.1; Ki=0.9; Kd=0.6;	K=1; T=20;
7	Kp=0.7; Ki=0.5; Kd=0.1;	Kp=0.7; Ki=0.5; Kd=0.1;	K=1; T=40;
8	Kp=1.1; Ki=0.5; Kd=0.6;	Kp=1.1; Ki=0.5; Kd=0.6;	K=1; T=30;
9	Kp=1.4; Ki=1; Kd=0.3;	Kp=1.4; Ki=1; Kd=0.3;	K=1; T=50;
10	Kp=1.2; Ki=0.6; Kd=0.3;	Kp=1.2; Ki=0.6; Kd=0.3;	K=1; T=30;
11	Kp=1; Ki=0.8; Kd=0.6;	Kp=1; Ki=0.8; Kd=0.6;	K=1; T=50;
12	Kp=1.4; Ki=1; Kd=1;	Kp=1.4; Ki=1; Kd=1;	K=1; T=20;
13	Kp=1.1; Ki=0.9; Kd=0.5;	Kp=1.1; Ki=0.9; Kd=0.5;	K=1; T=40;
14	Kp=1.5; Ki=1; Kd=0.5;	Kp=1.5; Ki=1; Kd=0.5;	K=1; T=20;
15	Kp=1.3; Ki=0.6; Kd=0.5;	Kp=1.3; Ki=0.6; Kd=0.5;	K=1; T=40;
16	Kp=0.8; Ki=0.5; Kd=0.6;	Kp=0.8; Ki=0.5; Kd=0.6;	K=1; T=30;
17	Kp=1.1; Ki=1;	Kp=1.1; Ki=1;	K=1; T=50;

№ вар.	Метод Ньютона	Метод Хука-Дживса	Параметри ОР
	Kd=0.6;	Kd=0.6;	
18	Kp=1.3; Ki=1; Kd=0.3;	Kp=1.3; Ki=1; Kd=0.3;	K=1; T=60;
19	Kp=1.1; Ki=0.9; Kd=0.6;	Kp=1.1; Ki=0.9; Kd=0.6;	K=1; T=20;
20	Kp=0.7; Ki=0.5; Kd=0.1;	Kp=0.7; Ki=0.5; Kd=0.1;	K=1; T=40;
21	Kp=1.1; Ki=0.5; Kd=0.6;	Kp=1.1; Ki=0.5; Kd=0.6;	K=1; T=30;
22	Kp=1.4; Ki=1; Kd=0.3;	Kp=1.4; Ki=1; Kd=0.3;	K=1; T=50;
23	Kp=1.2; Ki=0.6; Kd=0.3;	Kp=1.2; Ki=0.6; Kd=0.3;	K=1; T=30;
24	Kp=1; Ki=0.8; Kd=0.6;	Kp=1; Ki=0.8; Kd=0.6;	K=1; T=50;
25	Kp=1.4; Ki=1; Kd=1;	Kp=1.4; Ki=1; Kd=1;	K=1; T=20;
26	Kp=1.1; Ki=0.9; Kd=0.5;	Kp=1.1; Ki=0.9; Kd=0.5;	K=1; T=40;
27	Kp=0.7; Ki=0.6; Kd=0.1;	Kp=0.7; Ki=0.5; Kd=0.1;	K=1; T=30;



ДОДАТОК В.

ПРИКЛАД ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Кафедра АВЕРС

Лабораторна робота №_

з навчальної дисципліни

«МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ
УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ»

Варіант №_

Здобувача групи 174-ХХ-1м
Прізвище Ім'я По батькові

Керівник:
к.т.н., доцент
В.І. Мірошніченко

Кам'янське, 20ХХ



Навчально-методичне видання

Мірошніченко Вікторія Ігорівна

**МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ
УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

методичні вказівки до виконання лабораторних робіт

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції