

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**
Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра комп'ютерної інженерії

**Системи та методи візуалізації фізичних розрахунків на прикладі
дисперсії прямих об'ємних магнітостатичних хвиль в структурі метал-
діелектрик-ферит-діелектрик-метал**

Дипломна робота бакалавра студента 4 року навчання

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

ОНП «Комп'ютерна системи та мережі»

Дениса БАЛИМА

Науковий керівник

канд. фіз.-мат. наук Олексій НЕЧИПОРУК,

доцент кафедри кафедра квантової радіофізики

та наноелектроніки

Рецензент

канд. фіз.-мат. наук, асистент кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем

Михайло КОТОВ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедрою

Юрій БОЙКО

Ухвалено на засіданні кафедри “ _____ ” _____ 2022 р., протокол № _____

Київ - 2022

Реферат

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра: 41с., 17 рис., 3 табл., 3 додатки, 5 джерел.

Ключові слова: прямі об'ємні магнітостатичні хвилі, магнітостатичні хвилі в багат шарових структурах, дисперсійне співвідношення,

Розглянуто: теоретичні відомості щодо розрахунку прямих об'ємних магнітостатичних хвиль в в структурі метал-діелектрик-ферит-діелектрик-метал. Методи інтерпретації тексту формальної мови.

Зроблено: інтерпретатор для візуалізації математичних функцій, який може бути використаний для візуалізації дисперсії прямих об'ємних магнітостатичних хвиль в в структурі метал-діелектрик-ферит-діелектрик-метал. Порівняно розроблений інтерпретатор з системою Wolfram mathematica.

Зміст

Зміст	3
Вступ	5
1. Теоретичні дослідження	6
1.1 Розробка інтерпретатора	6
1.1.1 Алгоритм сортувальної станції	6
1.1.2 Абстрактне синтаксичне дерево	7
1.2 Візуалізація МСХ	7
1.2.1 МСХ в багатошарових структурах.....	7
1.2.2 Дисперсія МСХ в структурі метал-діелектрик-ферит-діелектрик-ферит-діелектрик-метал.....	8
1.2.3 МСХ в структурі метал-діелектрик-ферит-діелектрик-метал.....	15
1.2.4 Прямі об'ємні хвилі в структурі МДФДМ	16
2. Практична частина	19
2.1 Постановка задачі.....	19
2.2 Основна частина.....	19
2.2.1 Розробка програми.....	19
2.2.1.1 Загальна архітектура.....	19
2.2.1.2 Визначення синтаксису	20
2.2.1.3 Огляд модулів програми	22
2.3 Демонстрація роботи	25
2.3.1 Приклади.....	25

2.3.2 Використання програми інтерпретатору для побудови дисперсійного співвідношення ПОМСХ в структурі МДФДМ.....	33
2.3.3 Порівняння написаного інтерпретатору та системи Wolfram mathematica	35
Висновки	37
Список літератури	38
Додаток А.....	39
Додаток Б	40
Додаток В	41

Вступ

На даний момент для візуалізації фізичних розрахунків використовують математичні інтерпретатори, такі як Wolfram mathematica, GNU Octave. Ці інтерпретатори мають дуже потужний функціонал але разом з цим мають переускладнений синтаксис, який сильно відрізняється від синтаксису найпопулярніших мов програмування з імперативною парадигмою.

Ця робота має за мету створення програми, яка є інтерпретатором для мови з імперативним синтаксисом, який здатний візуалізувати задані користувачем математичні функції, та дослідження прямих об'ємних магнітостатичних хвиль та визначення дисперсійного відношення прямих об'ємних магнітостатичних хвиль в структурі метал-діелектрик-ферит-діелектрик-метал за допомогою розробленої програми.

1. Теоретичні дослідження

1.1 Розробка інтерпретатора

1.1.1 Алгоритм сортувальної станції

Для обробки коду та перетворення його в абстрактне синтаксичне дерево зручно використовувати алгоритм сортувальної станції. Даний алгоритм перетворює інфіксний математичний запис в постфіксний, який ще називають польський інверсний запис.

Для того щоб цей алгоритм перетворював не лише математичні записи а і код програми, треба розширити набір операторів, визначити їх нарність, пріоритет та асоціативність.

Алгоритм в псевдо коді:

Допоки є токени:

Прочитати токен

Якщо токен це число, додати до черги результату

Якщо токен це функція, додати до стеку операторів

Якщо токен це оператор o_1 , тоді

Доки на верху стеку оператор o_2 , і

або o_1 ліво-асоціативний і його пріоритет більший або дорівнює пріоритету o_2

або o_1 право-асоціативний і його пріоритет більший ніж у o_2 :

взяти з вершини стеку o_2 та додати його до черги результату.

Додати o_1 на стек.

Якщо токен це ліва дужка, додати її на стек.

Якщо токен це права дужка:

Допоки не зустрінеться ліва дужка, взяти оператори з вершини стека до черги на виході.

Взяти ліву дужку з вершини стеку, та нікуди її не додавати

Якщо токен на верхівці стеку — це токен функції, виштовхнути її до черги на виході.

Коли вже немає токенів на вході:

Доки стек не пустий:

взяти з вершини стеку токен та додати його до черги результату.

Вихід.

1.1.2 Абстрактне синтаксичне дерево

Абстрактне синтаксичне дерево – орієнтоване дерево, яке представляє абстрактну структуру тексту, написаного на формальній мові. Дерево називається абстрактним тому що воно не репрезентує всі токени, наявні в тексті. Наприклад групуючі дужки не представлені явно у вигляді окремої вершини, порядок заданий дужками відображається в структурі дерева. Таке дерево дуже легко будується при представленні коду у вигляді інверсного польського запису.

1.2 Візуалізація МСХ

1.2.1 МСХ в багат шарових структурах

Як правило, в експериментальних дослідженнях чи реальних приладах ми маємо справу не з ізольованим феритовим шаром, а з більш складними, тобто багат шаровими структурами. Такі структури містять окрім гіротропного феритового шару один чи більше шарів речовин, які можуть змінювати характеристики МСХ. Серед таких речовин можуть бути провідники, парамагнетика, напівпровідники, немагнітні діелектрики тощо.

Отже, багат шаровою будемо називати структуру, що містить окрім феритового шару один або декілька шарів речовин, які тим або іншим чином впливають на властивості МСХ. При дослідженні багат шарових структур

будемо вважати, що вони складаються з необмежених в площині шарів. Нас будуть цікавити власні МСХ багат шарових структур. Загальна схема розв'язку задачі про власні МСХ включає три етапи. На першому відшукуються розв'язки рівнянь Максвелла в магнітостатичному наближенні для кожного з шарів багат шарової структури. На другому етапі отримані розв'язки "зшиваються" на межах поділу з використанням електродинамічних граничних умов. На третьому етапі визначаються спектр і просторовий розподіл полів власних МСХ багат шарової системи.

1.2.2 Дисперсія МСХ в структурі метал-діелектрик-ферит-діелектрик-ферит-діелектрик-метал

При виведенні дисперсійного співвідношення для МСХ в структурі метал-діелектрик-ферит-діелектрик-ферит-діелектрик-метал (МДФДФДМ) будемо конкретизувати тільки вид тензора магнітної проникності кожного з шарів. Це дозволить використовувати отримані результати для аналізу різних за складом структур.

Розглянемо дотично намагнічену багат шарову структуру, яка розміщується між двома металевими підкладками і складається з монокристалічних феритових 2,4 і немагнітних діелектричних 1,3,5 шарів, що чергуються і мають необмежені розміри в площині YZ (рис.4.1).

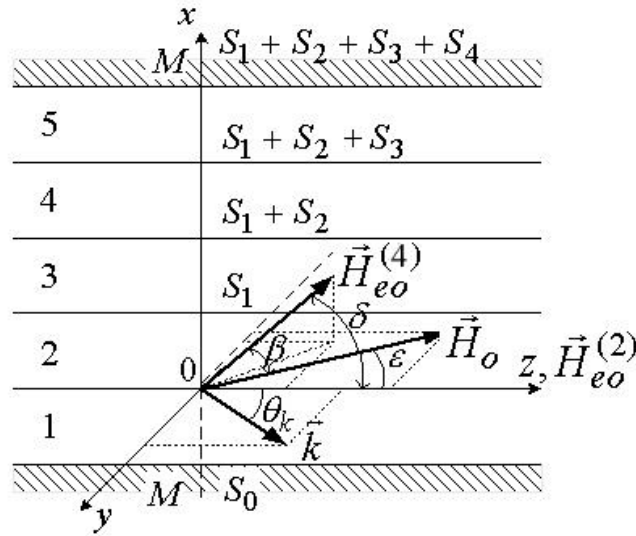


Рис 1.2.1. Багатошарова структура метал-діелектрик-ферит-діелектрик-ферит-діелектрик-метал: 1,3,5 – діелектричні прокладки, 2,4 – феритові шари, М – металеві екрани

Припустимо, що постійні ефективні магнітні поля напруженістю $\dot{H}_{e0}^{(2)}$ і $\dot{H}_{e0}^{(4)}$ феритових шарів у загальному випадку неколінеарні один одному і вектору зовнішнього постійного магнітного поля \dot{H}_0 . Вектор $\dot{H}_{e0}^{(2)}$ знаходиться у площині структури, тобто є копланарним до вектора \dot{H}_0 і утворює з ним кут ε . Напрямок $\dot{H}_{e0}^{(4)}$ може бути задано за допомогою двох кутів δ і β , а саме: δ - кут між векторами $\dot{H}_{e0}^{(4)}$ і $\dot{H}_{e0}^{(2)}$, β - кут між $\dot{H}_{e0}^{(4)}$ і площиною структури. Феритові шари мають довільні значення намагніченості насичення і констант магнітної кристалографічної анізотропії і можуть бути намагніченими не до стану насичення. Систему координат XYZ зв'яжемо з розглянутою багатошаровою структурою таким чином, щоб вісь Z збігалася з напрямком вектора напруженості $\dot{H}_{e0}^{(2)}$ першого феритового шару. Тоді вектор $\dot{H}_{e0}^{(4)}$ другого феритового шару буде складати з площиною YZ кут β . Вісь X системи координат є нормальною до площини структури.

Знайдемо розв'язок рівняння Уокера для кожного з шарів багатошарової структури; вони будуть відрізнятися внаслідок різного виду тензора магнітної проникності $\hat{\mu}$. Якщо відомо розв'язок рівняння Уокера з найбільш загальним виглядом тензора $\hat{\mu}$, то розв'язки в інших шарах можуть бути отриманими як окремі випадки цього відомого розв'язку.

В самому загальному вигляді тензор $\hat{\mu}$ має дев'ять компонент, які являють собою комплексні величини. Йому відповідає рівняння Уокера:

$$\mu_{11} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \mu_{22} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \mu_{33} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + (\mu_{12} + \mu_{21}) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} + (\mu_{13} + \mu_{31}) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial z} + (\mu_{23} + \mu_{32}) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial z} = 0. \quad (1.1)$$

Тензор магнітної проникності $\hat{\mu}$ може бути записаним у вигляді суми ермітового та антиермітового тензорів:

$$\hat{\mu} = \hat{\mu}^e + \hat{\mu}^{ae}, \quad (1.2)$$

для компонент яких виконуються співвідношення:

$$\hat{\mu}_{ij}^e = (\hat{\mu}_{ij}^e)^*, \quad \hat{\mu}_{ij}^{ae} = -(\hat{\mu}_{ij}^{ae})^*. \quad (1.3)$$

Якщо не враховується дисипація енергії в середовищі, антиермітова частина тензора магнітної проникності обертається в нуль, і тензор $\hat{\mu}$ є ермітовим. У випадку резонансного поглинання енергії поблизу максимуму резонансної кривої компоненти ермітової частини тензора $\hat{\mu}$ добре описуються виразом $\hat{\mu}_{ij}^e = \delta_{ij}$ (δ_{ij} - символ Кронеккера). З врахуванням співвідношення (1.3) рівняння Уокера (1.1) переходить в наступне

$$\mu_{11} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \mu_{22} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \mu_{33} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + 2\text{Re}\{\mu_{12}\} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} + 2\text{Re}\{\mu_{13}\} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial z} + 2\text{Re}\{\mu_{23}\} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial z} = 0 \quad (1.4)$$

за умови $\hat{\mu} = \hat{\mu}^e$ та в

$$\mu_{11} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \mu_{22} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \mu_{33} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + 2i\text{Im}\{\mu_{12}\} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} + 2i\text{Im}\{\mu_{13}\} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial z} + 2i\text{Im}\{\mu_{23}\} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial z} = 0 \quad (1.5)$$

при $\hat{\mu} = \hat{\mu}^{ae} + \hat{I}$, де \hat{I} - одиничний тензор.

Розв'язок рівняння (4.1) будемо шукати у вигляді неоднорідних плоских хвиль, які поширюються в площині структури під довільним кутом θ_k до напрямку вісі Z:

$$\Psi = (C_i e^{\kappa_1 x} + C_j e^{-\kappa_2 x}) e^{-ik \frac{y\xi + z}{(1+\xi^2)^{1/2}}}, \quad (1.6)$$

де C_i, C_j - довільні константи, а $\xi = k_y/k_z = \operatorname{tg}\theta_k$. Приймаючи $0 \leq \theta_k \leq \pi/2$, будемо розглядати хвилі з хвильовими векторами, що лежать у першому квадранті площини YZ.

Підстановка виразу (4.6) для магнітостатичного потенціалу в рівняння Уокера (1.1) дозволяє знайти значення сталих поширення хвиль κ_1 і κ_2 :

$$\kappa_1 = \kappa + v, \quad \kappa_2 = \kappa - v, \quad (1.7)$$

$$v = \frac{(\mu_{12} + \mu_{21})\xi + (\mu_{13} + \mu_{31})}{2\mu_{11}(1 + \xi^2)^{1/2}} ik, \quad (1.8)$$

$$\kappa = \sqrt{v^2 + \frac{\mu_{22}\xi^2 + \mu_{33} + (\mu_{23} + \mu_{32})\xi}{\mu_{11}(1 + \xi^2)} k^2}. \quad (1.9)$$

Дійсним величинам κ_1 і κ_2 відповідають поверхневі хвилі з експоненційним розподілом магнітостатичного потенціалу за товщиною шару. При уявних сталих поширення κ_1 і κ_2 магнітостатичний потенціал змінюється уздовж вісі X за періодичним законом, що відповідає об'ємній хвилі. У загальному випадку κ_1 і κ_2 є комплексними величинами, і, відповідно, розподіл магнітостатичного потенціалу за товщиною шару має характер осциляцій з амплітудою, що змінюється експоненційно.

Вирази (1.6)-(1.9) визначають розв'язок рівняння (1.1) відносно просторової частини магнітостатичного потенціалу при довільній орієнтації вісі гіротропії відносно обраної системи координат. Розв'язок для будь-якого з шарів структури можна отримати з виразів (1.6)-(1.9) у випадку, коли є відомим явний вигляд тензора магнітної проникності $\hat{\mu}$ для цього шару.

Будемо вважати, що магнітні властивості діелектричних шарів 1, 3 і 5 описуються одиничним тензором магнітної проникності $\hat{\mu}_{ij} = \delta_{ij}$. Тоді розв'язок відносно магнітостатичних потенціалів буде мати наступний вигляд:

$$\Psi_1 = (C_1 e^{kx} + C_2 e^{-kx}) e^{-ik \frac{y\zeta + z}{(1+\zeta^2)^{1/2}}}, \quad -s_0 < x < 0, \quad (1.10)$$

$$\Psi_3 = (C_5 e^{kx} + C_6 e^{-kx}) e^{-ik \frac{y\zeta + z}{(1+\zeta^2)^{1/2}}}, \quad s_1 < x < s_1 + s_2, \quad (1.11)$$

$$\Psi_5 = (C_9 e^{kx} + C_{10} e^{-kx}) e^{-ik \frac{y\zeta + z}{(1+\zeta^2)^{1/2}}}, \quad \sum_{i=1}^3 s_i < x < \sum_{i=1}^4 s_i. \quad (1.12)$$

Як було показано в п.1.1, у системі координат, одна з вісей якої збігається з вектором напруженості постійного ефективного магнітного поля в фериті, тензор $\hat{\mu}$ має найбільш простий вигляд. В нашому випадку тензор магнітної проникності феритового шару 2 може бути записаним у вигляді:

$$\hat{\mu}^{(2)} = \begin{bmatrix} \mu_{11}^{(2)} & -i\mu_{12}^{(2)} & 0 \\ i\mu_{12}^{(2)} & \mu_{22}^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33}^{(2)} \end{bmatrix}. \quad (1.13)$$

Розв'язок рівняння Уокера (1.1) з урахуванням виразів (1.6)-(1.9) і (1.13) в феритовому шарі 2 буде таким:

$$\Psi_2 = (C_3 e^{\kappa^{(2)}x} + C_4 e^{-\kappa^{(2)}x}) e^{-ik \frac{y\zeta + z}{(1+\zeta^2)^{1/2}}}, \quad 0 < x < s_1, \quad (1.14)$$

де

$$\kappa^{(2)} = k \sqrt{\frac{\mu_{22}^{(2)}\zeta^2 + \mu_{33}^{(2)}}{\mu_{11}^{(2)}(1+\zeta^2)}}. \quad (1.15)$$

У системі координат X'Y'Z', вісь Z' якої збігається за напрямком з вектором $\hat{H}_{e0}^{(4)}$ (рис.4.1), тензор магнітної проникності феритового шару 4 має вигляд, аналогічний до запису (1.13).

Розв'язок рівняння (1.1) відносно магнітостатичного потенціалу Ψ_4 у феритовому шарі 4 визначається виразами (1.6)-(1.9), в яких $C_i = C_7$, $C_j = C_8$, а μ_{ij} - компоненти тензора магнітної проникності цього шару в системі координат XYZ. Останні можуть бути знайдені в результаті перетворення тензора $\hat{\mu}^{(4)}$, яке зводиться до послідовних лівих поворотів системи X'Y'Z' на кут β навколо вісі Y' і на кут $\gamma = \arccos(\cos\delta/\cos\beta) + \varepsilon$ навколо вісі X':

$$\begin{aligned}
 \mu_{11} &= \mu_{11}^{(4)} t_{11}^2 + \mu_{22}^{(4)} t_{21}^2 + \mu_{33}^{(4)} t_{31}^2, \\
 \mu_{22} &= \mu_{11}^{(4)} t_{12}^2 + \mu_{22}^{(4)} t_{22}^2 + \mu_{33}^{(4)} t_{32}^2, \\
 \mu_{33} &= \mu_{11}^{(4)} t_{13}^2 + \mu_{22}^{(4)} t_{23}^2 + \mu_{33}^{(4)} t_{33}^2, \\
 \mu_{12} &= \mu_{11}^{(4)} t_{11} t_{12} + \mu_{22}^{(4)} t_{21} t_{22} - i\mu_{12}^{(4)} (t_{11} t_{22} - t_{12} t_{21}) + \mu_{33}^{(4)} t_{31} t_{32}, \\
 \mu_{13} &= \mu_{11}^{(4)} t_{11} t_{13} + \mu_{22}^{(4)} t_{21} t_{23} - i\mu_{12}^{(4)} (t_{11} t_{23} - t_{13} t_{21}) + \mu_{33}^{(4)} t_{31} t_{33}, \\
 \mu_{23} &= \mu_{11}^{(4)} t_{12} t_{13} + \mu_{22}^{(4)} t_{22} t_{23} - i\mu_{12}^{(4)} (t_{12} t_{23} - t_{22} t_{13}) + \mu_{33}^{(4)} t_{32} t_{33}.
 \end{aligned} \tag{1.16}$$

Компоненти μ_{21} , μ_{31} , μ_{32} обчислюються відповідно за виразами для μ_{12} , μ_{13} , μ_{23} після заміни $\mu_{12}^{(4)}$ на $-\mu_{12}^{(4)}$. Величини t_{ij} визначаються виразами:

$$\begin{aligned}
 t_{11} &= \cos \beta, \quad t_{12} = \sin \gamma \sin \beta, \quad t_{13} = -\cos \gamma \sin \beta, \quad t_{21} = 0, \quad t_{22} = \cos \gamma, \\
 t_{23} &= \sin \gamma, \quad t_{31} = \sin \beta, \quad t_{32} = -\sin \gamma \cos \beta, \quad t_{33} = \cos \gamma \cos \beta.
 \end{aligned} \tag{1.17}$$

Для отримання дисперсії і просторового розподілу полів власних МСХ багат шарової структури використовуємо відповідні електродинамічні граничні умови і "зшиємо" розв'язки на поверхнях поділу сусідніх шарів. Оскільки розглядаються металеві шари, що мають нескінченне значення провідності, то на поверхні металу нулю дорівнює нормальна складова магнітної індукції. Ця умова призводить до співвідношень

$$\left. \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} \right|_{x=-s_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Psi_5}{\partial x} \right|_{x=s_1+s_2+s_3+s_4} = 0. \tag{1.18}$$

На поверхнях поділу інших шарів мають місце умови, що вимагають неперервності тангенціальних складових напруженості і нормальних складових індукції магнітного поля МСХ. Ці умови записуються в такий спосіб:

при $x=0$:

$$\Psi_1 = \Psi_2, \quad \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} = \mu_{11}^{(2)} \frac{\partial \Psi_2}{\partial x} - i\mu_{12}^{(2)} \frac{\partial \Psi_2}{\partial y},$$

при $x=s$:

$$\Psi_2 = \Psi_3, \quad \frac{\partial \Psi_3}{\partial x} = \mu_{11}^{(2)} \frac{\partial \Psi_2}{\partial x} - i\mu_{12}^{(2)} \frac{\partial \Psi_2}{\partial y},$$

при $x=s_1+s_2$:

$$\Psi_3 = \Psi_4, \quad \frac{\partial \Psi_3}{\partial x} = \mu_{11} \frac{\partial \Psi_4}{\partial x} + \mu_{12} \frac{\partial \Psi_4}{\partial y} + \mu_{13} \frac{\partial \Psi_4}{\partial z},$$

при $x=s_1+s_2+s_3$:

$$\Psi_4 = \Psi_5, \quad \frac{\partial \Psi_5}{\partial x} = \mu_{11} \frac{\partial \Psi_4}{\partial x} + \mu_{12} \frac{\partial \Psi_4}{\partial y} + \mu_{13} \frac{\partial \Psi_4}{\partial z}. \quad (1.19)$$

Підстановка отриманих раніше виразів для магнітостатичних потенціалів у вирази для граничних умов (1.18),(1.19) приводить до однорідної системи алгебраїчних рівнянь відносно невідомих постійних коефіцієнтів C_i . Нетривіальний розв'язок цієї системи можливий у випадку рівності нулю її визначника. Така умова дає дисперсійне співвідношення для власних МСХ багат шарової структури, яке має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} & [A_2 e^{-\kappa^{(2)} s_1} - B_2 e^{\kappa^{(2)} s_1} - 2A_2 B_2 e^{-2ks_0} sh(\kappa^{(2)} s_1) \lambda \times \\ & \times [A_4 e^{2ks_4 - \kappa^{(4)} s_3} - B_4 e^{2ks_4 + \kappa^{(4)} s_3} - 2sh(\kappa^{(4)} s_3) \lambda e^{2ks_2} - \\ & - [A_2 e^{-2ks_0 + \kappa^{(2)} s_1} - B_2 e^{-2ks_0 - \kappa^{(2)} s_1} + 2sh(\kappa^{(2)} s_1) \lambda \times \\ & \times [A_4 e^{\kappa^{(4)} s_3} - B_4 e^{-\kappa^{(4)} s_3} + 2A_4 B_4 e^{2ks_4} sh(\kappa^{(4)} s_3) \lambda = 0 \end{aligned} \quad (1.20)$$

Тут прийнято такі позначення:

$$\begin{aligned} A_{2,4} &= \frac{\mu_+^{(2,4)} - 1}{\mu_+^{(2,4)} + 1}, \quad B_{2,4} = \frac{\mu_-^{(2,4)} - 1}{\mu_-^{(2,4)} + 1}, \quad \mu_{\pm}^{(2)} = \mu_{12}^{(2)} \frac{\xi}{(1+\xi^2)^{1/2}} \pm \mu_{11}^{(2)} \sqrt{\frac{\mu_{22}^{(2)} \xi^2 + \mu_{33}^{(2)}}{\mu_{11}^{(2)} (1+\xi^2)}}; \\ \mu_+^{(4)} &= \mu_{11} \frac{\kappa_1^{(4)}}{k} + i \frac{\mu_{12} \xi + \mu_{13}}{(1+\xi^2)^{1/2}}, \quad \mu_-^{(4)} = -\mu_{11} \frac{\kappa_2^{(4)}}{k} + i \frac{\mu_{12} \xi + \mu_{13}}{(1+\xi^2)^{1/2}}. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Величини сталих поширення $\kappa^{(4)}$, $\kappa_1^{(4)}$, $\kappa_2^{(4)}$ визначаються відповідно до формул (1.7)-(1.9); а компоненти тензора магнітної проникності μ_{ij} пов'язані з $\mu_{ij}^{(4)}$ за формулами перетворень (1.16)-(1.17).

Оскільки компоненти тензора магнітної проникності залежать від частоти, співвідношення (1.21) при заданих значеннях модуля хвильового вектора \dot{k} і вектора напруженості зовнішнього магнітного поля \dot{H}_0 являє собою трансцендентне рівняння щодо кругової частоти ω . Розв'язок його дозволяє знайти закон дисперсії МСХ. Розв'язуючи при відомому законі дисперсії систему рівнянь, що утворюється граничними умовами відносно коефіцієнтів C_i , можна записати всі коефіцієнти C_i через один з них і визначити магнітостатичні потенціали і напруженості полів у досліджуваній структурі.

Отримані результати можуть бути використані для аналізу будь-яких за складом багат шарових структур, в яких вісь гіротропії одного з шарів знаходиться у площині структури.

Продемонстрований метод виводу дисперсійного співвідношення МСХ не є єдиним. Використовується, наприклад, підхід, що базується на врахуванні коефіцієнтів відбиття МСХ на границях шарів.

1.2.3 МСХ в структурі метал-діелектрик-ферит-діелектрик-метал

Найбільш загальною структурою з одним феритовим шаром є структура метал-діелектрик-ферит-діелектрик-метал (МДФДМ). Будь-яку іншу структуру з одним феритовим шаром можна отримати із структури МДФДМ шляхом відповідних граничних переходів.

Дослідження екранованої структури з одним шаром фериту дозволяє найбільш яскраво продемонструвати вплив металевих підкладок на спектр різних

типів МСХ. Оскільки така структура є окремим випадком досліджуваної в попередньому пункті структури МДФДФДМ, для її аналізу можна використати загальне дисперсійне співвідношення (1.20).

1.2.4 Прямі об'ємні хвилі в структурі МДФДМ

Розглянемо прямі об'ємні хвилі в нормально намагніченій структурі МДФДМ. Для одержання відповідного дисперсійного співвідношення необхідно покласти кути δ і β рівними $\pi/2$ (див. рис. 4.1). Тоді відповідно до виразів (1.16),(1.17) маємо $\gamma = 0$, $t_{22} = t_{31} = 1$, $t_{13} = -1$, а інші коефіцієнти $t_{ij} = 0$; відповідно, тепер тензор магнітної проникності феритового шару 4 у системі координат XYZ набуває вигляду

$$\hat{\mu}^{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{22}^{(4)} & -i\mu_{12}^{(4)} \\ 0 & i\mu_{12}^{(4)} & \mu_{11}^{(4)} \end{bmatrix}. \quad (1.35)$$

Як і раніше, будемо розглядати намагнічений до насичення ізотропний ферит (тобто, $\mu_{33}^{(4)} = 1$, $\mu_{11}^{(4)} = \mu_{22}^{(4)} = \mu$) і хвилі, які поширюються уздовж вісі Y ($\xi \rightarrow \infty$). Підставляючи тензор магнітної проникності феритового шару (4.35) у вирази (4.9),(4.21) і враховуючи, що $\mu < 0$, отримаємо

$$\begin{aligned} v = 0, \quad \kappa = i\sqrt{-\mu}k, \quad \mu_{\pm} = \pm i\sqrt{-\mu}, \\ A = B^* = (-\mu - 1 + 2i\sqrt{-\mu}) / (1 - \mu), \quad AB = AA^* = BB^* = 1. \end{aligned} \quad (1.36)$$

Поклавши в загальному дисперсійному співвідношенні (1.20) $s_1 = s_2 = 0$ і використовуючи (1.35), приходимо до наступного дисперсійного співвідношення для ПОМСХ у структурі МДФДМ:

$$\begin{aligned} \left[2\sqrt{-\mu} + (\mu + 1) \operatorname{tg}(\sqrt{-\mu}ks_3) \right] e^{k(s_0+s_4)} - \left[2\sqrt{-\mu} - (\mu + 1) \operatorname{tg}(\sqrt{-\mu}ks_3) \right] e^{-k(s_0+s_4)} - \\ - 2(1 - \mu) \operatorname{tg}(\sqrt{-\mu}ks_3) \operatorname{ch}[k(s_0 - s_4)] = 0. \end{aligned} \quad (1.37)$$

Співвідношення (1.37) можна записати у вигляді:

$$(thks_0 + thks_4)\sqrt{-\mu} + (\mu + thks_0thks_2)tgks_3\sqrt{-\mu} = 0. \quad (1.38)$$

Як і у випадку зворотних об'ємних хвиль, внаслідок незалежності дисперсії (1.38) від компоненти тензора магнітної проникності μ_{12} і інваріантності щодо заміни $s_0 \rightarrow s_4$ і $s_4 \rightarrow s_0$ властивості ПОМСХ у несиметричній МДФДМ структурі зберігаються при зміні напрямку поширення хвиль на протилежний. Більш того, у структурі з ізотропним феритовим шаром прямі об'ємні хвилі також ізотропні. Зауважимо, що властивість ізотропності ПОМСХ має важливе практичне значення.

Здійснюючи в (4.38) граничний перехід при $s_0 \rightarrow \infty$, отримуємо дисперсійне співвідношення для ПОМСХ у структурі МДФ:

$$tg\sqrt{-\mu}ks_3 = -\frac{(1 + thks_0)\sqrt{-\mu}}{\mu + thks_0}, \quad (1.39)$$

звідки легко перейти до співвідношення в структурі МФ ($s_0 = 0$):

$$ks_3 = \frac{1}{\sqrt{-\mu}} \left(\text{arctg} \frac{1}{\sqrt{-\mu}} + n\pi \right), \quad n = 0, 1, \dots, \quad (1.40)$$

а також і в ізолюваному феритовому шарі ($s_0 \rightarrow \infty$):

$$tg\sqrt{-\mu}ks_3 = -\frac{2\sqrt{-\mu}}{1 + \mu}. \quad (1.41)$$

Порівнюючи дисперсійні співвідношення для основних мод ($n = 0$) в ізолюваному феритовому шарі і в структурі метал-ферит, приходимо до висновку, що одностороння металізація феритового шару призводить до зменшення вдвічі хвильового числа і відповідного збільшення фазової і групової швидкостей ПОМСХ.

Розташування металевих екранів відносного феритового шару визначає мінімальну частоту ПОМСХ, тобто діапазон їх існування. Дійсно, переходячи в дисперсійному співвідношенні (1.38) до границі при хвильових числах $k \rightarrow 0$, одержуємо довгохвильову межу спектра ПОМСХ

$$\omega_{k \rightarrow 0} = \sqrt{\omega_H \left(\omega_H + \frac{\omega_M}{s_0/s_3 + s_4/s_3 + 1} \right)}. \quad (1.42)$$

Нагадаємо також, що при нормальному намагнічуванні $\omega_H = \gamma(H_0 - 4\pi M)$.

Відповідно до виразу (1.42) при односторонній металізації (тобто, за умови $s_0 \rightarrow \infty$ або $s_4 \rightarrow \infty$) нижня межа спектра збігається з нижньою межею спектра ПОМСХ в ізольованому феритовому шарі. У випадку двосторонньої металізації при зменшенні s_0 і s_4 нижня межа спектра збільшується і сягає величини $\sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)}$ при суцільній металізації фериту, тобто, при $s_0 = s_4 = 0$. Це справедливо лише для найнижчої моди ПОМСХ ($n=0$). Нижня гранична частота інших мод дорівнює величині $\omega_{k \rightarrow 0} = \omega_H$ та не залежить від s_0 і s_4 . Вигляд спектральних залежностей ПОМСХ у структурі МДФДМ наведено на рис.1.2.

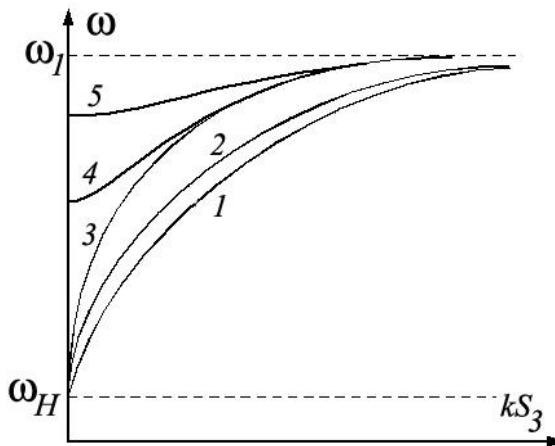


Рис.1.2.2. Дисперсія ПОМСХ в структурі МДФДМ при різних співвідношеннях товщин шарів s_0/s_3 та s_4/s_3 : крива 1 – випадок $(\infty; \infty)$, крива 2 - $(\infty; 1)$, крива 3 - $(\infty; 0)$, крива 4 - $(1; 0)$, крива 5 - $(0.1; 0)$.

2. Практична частина

2.1 Постановка задачі

Задачею практичної частини є написання програми яка є інтерпретатором для мови з імперативним синтаксисом, який здатний візуалізувати задані користувачем математичні функції, та візуалізація дисперсійного відношення ПОМСХ в структурі МДФДМ за допомогою отриманої програми.

2.2 Основна частина

2.2.1 Розробка програми

Для розробки програми було обрано мову C++, фреймворк Qt, та додаткова бібліотека QChart.

2.2.1.1 Загальна архітектура

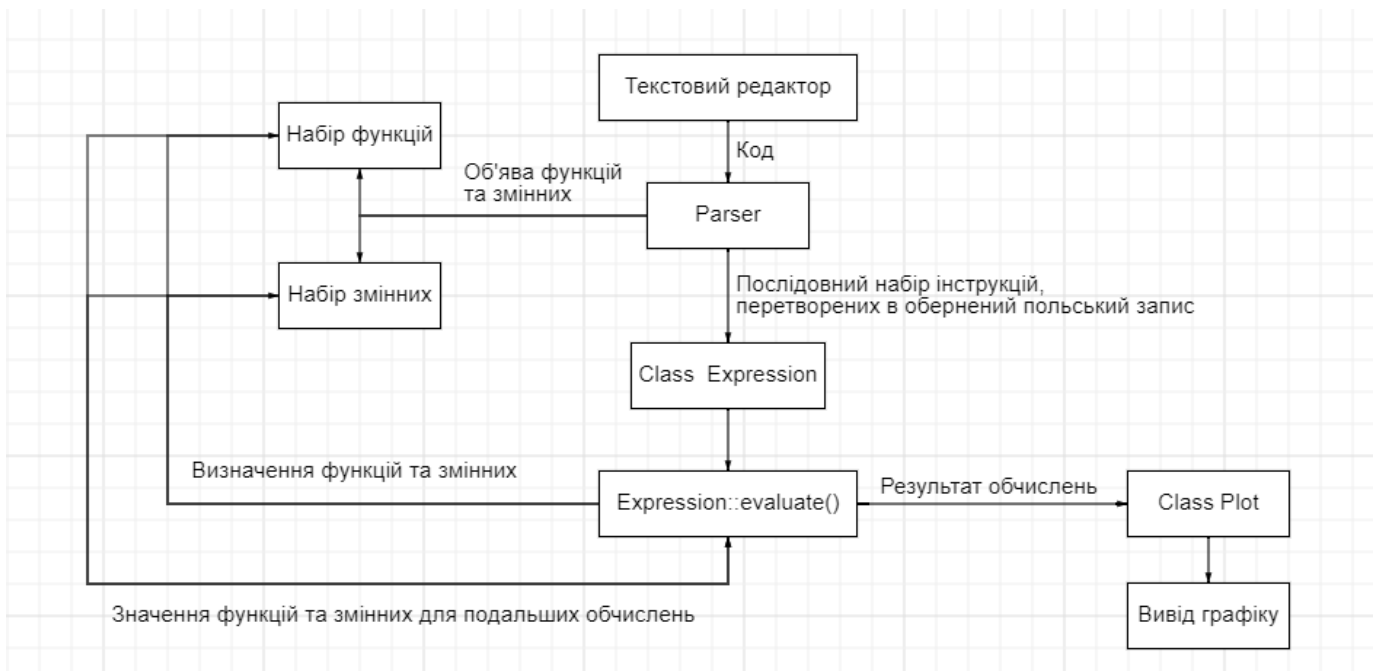


Рис.2.2.1.1.1 Загальна архітектура програми інтерпретатора

Код, написаний користувачем в текстовому редакторі програми, передається в модуль Parser, який перетворює код в обернений польський запис за допомогою алгоритму сортувальної станції, та додає до глобального набору функцій та змінних об'явлені користувачем функції та змінні. Далі з набору

інструкцій записаних в оберненому польському запису створюється дерево виразів. Клас Expression містить в собі токен, посилання на 2 гілки та масив параметрів для визначення функцій з більш ніж двома параметрами. Також цей клас має метод evaluate(), який повертає результат обрахунку створеного дерева виразів.

2.2.1.2 Визначення синтаксису

Позначимо доступний синтаксис:

Оператори:

Оператор	Опис	Пріоритет	Арність
+	Плюс	1	Бінарний
-	Мінус	1	Бінарний
*	Множення	2	Бінарний
/	Ділення	2	Бінарний
^	Зведення в ступінь	3	Унарний
=	Оператор присвоєння	4	Унарний

Термінатори:

Термінатор	Опис
,	Термінатор для переліку параметрів
;	Кінець виразу

Вбудовані функції:

Функція	Опис	Кількість аргументів	Параметри
Sin	Синус	1	Дійсне число

Cos	Косинус	1	Дійсне число
Min	Мінімум	2	2 Дійсних числа
Max	Максимум	2	2 Дійсних числа
Sqrt	Квадратний Корінь	1	Дійсне число
Plot	Будує графік згідно переданих параметрів	6	Функція яку будуємо, Мінімальне, Максимальне значення по осі ОХ та інкремент, Мінімальне, Максимальне значення по осі ОУ
Plot3D	Будує тривимірний графік згідно переданих параметрів	7	Функція яку будуємо, Мінімальне, Максимальне значення по осі ОХ та інкремент, Мінімальне, Максимальне значення по осі ОУ та інкремент
manipulated	При присвоєнні до змінної створює для змінної слайдер, яким можна керувати значення змінної	3	Мінімальне значення, максимальне значення, точність розрахунків(у кількості чисел після коми)

Для об'яви змінної використовується ключове слово **var**.

Приклад:

```
var x;  
var y = 10;
```

Рис 2.2.1.1.2 Приклад використання ключового слова var.

Для об'яви функції використовується ключове слово **func**.

Приклад:

```
func z(x);
func y(x) = x + x;
```

Рис 2.2.1.1.3 Приклад використання ключового слова func.

2.2.1.3 Огляд модулів програми

Модуль CommonTypes:

Містить в собі визначення загальних типів, які використовуються в більшості модулів програми.

Перелік визначених типів:

enum class Op – перелічувальний тип для операторів.

enum class Arity – перелічувальний тип для арності операторів.

enum class Associativity – перелічувальний тип для асоціативності операторів.

enum class VarType – перелічувальний тип для типів змінних.

enum class TokenType – перелічувальний тип для типів токенів.

struct Token – структура токена, яка включає в себе сам токен, у вигляді строки, тип токена, та притаманні токенам поля з перелічувальних типів, вказаних вище. Якщо поле є нерелевантним по відношенню до даного типу токена воно встановлюється в значення INVALID.

struct Variable – структура для збереження змінної. Містить в собі назву, тип, та значення змінної. Значення змінної зберігається в union .

class Expression – клас для виразу. Являє собою дерево. Містить в собі посилання на праву та ліву гілку, токен, та масив вказівників на вирази, які є параметрами для функцій. Цей масив необхідний для обробки функцій з більш ніж двома параметрами. (Див. Рис Б.1 – приклад побудованого дерева)

`struct Function` – структура для функції. Містить в собі назву функції, кількість параметрів та посилання на вираз, який є функцією.

`struct VariableManipulator` – структура, яка створюється для змінних, якими користувач захотів керувати за допомогою слайдерів, присвоївши змінній функцію `manipulated`.

`extern QVector<Function> Functions` – глобальний масив функцій.

`extern QVector<Variable> Variables` – глобальний масив змінних.

`extern QVector<VariableManipulator> VarManipulators` – глобальний масив маніпуляторів для змінних, керованих слайдером.

Модуль `Parser`:

Містить в собі набір функцій для обробки тексту та перетворення його в чергу токенів в оберненому польському записі.

Перелік функцій:

`Token readToken(QString& exprString)` – читає токен, визначає його тип та видаляє прочитане зі строки.

`QQueue<Token> parseTokens(QString& exprString)` – реалізовує алгоритм сортувальної станції для отриманих з `readToken()` токенів, та повертає чергу токенів в оберненому польському записі.

Перелік допоміжних внутрішніх функцій:

`isTerminator()` – визначає чи є символ одним з визначених термінаторів

`isDefinedFunction()` – визначає чи є строка однією з визначених функцій.

`isOp()` – визначає чи є символ одним з визначених операторів.

`isLeftParenthesis()` – визначає чи є символ лівою дужкою.

`isRightParenthesis()` – визначає чи є символ правою дужкою.

`readFirstChar()` – читає перший символ зі строки та видаляє його.

`addFunc()` – додає функцію до глобального списку функцій.

`addVar()` – додає змінну до глобального списку змінних.

`countParameters()` – рахує параметри функції та встановлює для даної функції значення кількості параметрів.

`void setPrecedence()` – встановлює пріоритет для токену.

`void setAssociativity()` – встановлює асоціативність для токену.

`void setAriety()` – встановлює арність для токену.

Модуль `Expression`:

Містить в собі опис класу `Expression`.

Перелік конструкторів:

`Expression()` – конструктор за замовченням

`Expression(QString& exprString)` – будує дерево з вхідного тексту

`Expression(QQueue<Parser::Token>& parsedTokens)` – будує дерево з черги токенів.

Перелік функцій-членів класу:

`evaluate()` – виконує операцію зазначену в виразі.

Модуль `Plot`:

Містить в собі опис класу `Plot` та `Plot3D`. Клас `Plot` включає в себе все необхідне для створення вікна з графіком та слайдерами, якщо такі були зазначені користувачем.

Має конструктор `Plot(Expression* funcExpression, double minX, double maxX, double increment, double minY, double maxY)`, який ініціалізує та створює вікно та слайдери. Також має функцію-слот `redrawPlot()`, яка прив'язується до зміни значення на слайдері та відповідно новому значенню перемальовує графік.

Клас `Plot3D` має всі ті ж можливості, але будує тривимірний графік.

Має конструктор `Plot3D(Expression* funcExpression, double minX, double maxX, double incrementX, double minZ, double maxZ, double incrementZ)`, який ініціалізує та створює вікно та слайдери. Також має функцію-слот `redrawPlot()`, яка прив'язується до зміни значення на слайдері та відповідно новому значенню

перемальовує графік. Координати називаються X та Z через те, що в бібліотеці Q3DSurface координата Y вважається координатою висоти.

Модуль FloatSlider:

Містить в собі клас SliderWidget, який є контейнером для слайдеру та позначки, яка відображає значення змінної встановлене слайдером.

Також містить клас FloatSlider, успадкований від визначеного в Qt класу QSlider. Цей клас потрібен для того щоб слайдер міг оперувати з числами з плаваючою комою.

Модуль Formatter:

Містить в собі клас Highlighter, успадкований від QSyntaxHighlighter. В цьому класі описане підсвічення синтаксису для текстового редактору.

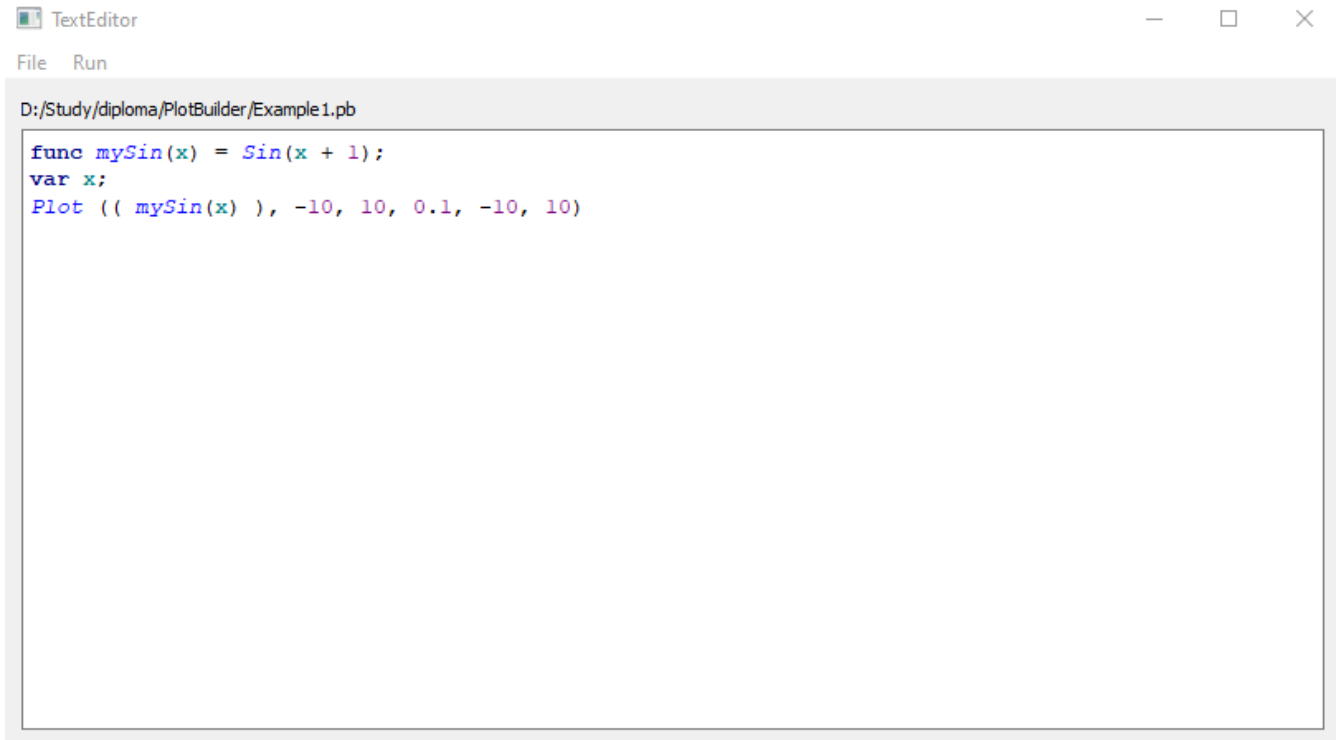
Модуль PlotBuilder:

Містить в собі клас PlotBuilder, який є основним вікном програми. Основне вікно є редактором тексту з можливістю відкрити, зберегти файл та запустити процес інтерпретації введеного в текстовому редакторі коду.

2.3 Демонстрація роботи

2.3.1 Приклади

Приклад 1 – Побудова простого двомірного графіку:

A screenshot of a TextEditor window. The title bar reads "TextEditor" and includes standard window controls (minimize, maximize, close). Below the title bar is a menu bar with "File" and "Run". The main text area shows the following code:

```
D:/Study/diploma/PlotBuilder/Example1.pb  
  
func mySin(x) = Sin(x + 1);  
var x;  
Plot (( mySin(x) ), -10, 10, 0.1, -10, 10)
```

Рис 2.3.1.1 Приклад програми №1.

В даному прикладі визначається функція $mySin(x)$ у вигляді синусу зі зміщенням вліво на один радіан. Об'являється змінна x для її використання у побудові графіку. Будується графік з параметрами: функція – $mySin(x)$, мінімальній $x = -10$, максимальній $x = 10$, інкремент $x = 0.1$, мінімальне значення для вісі $OY = -10$, максимальне значення для вісі $OY = 10$.

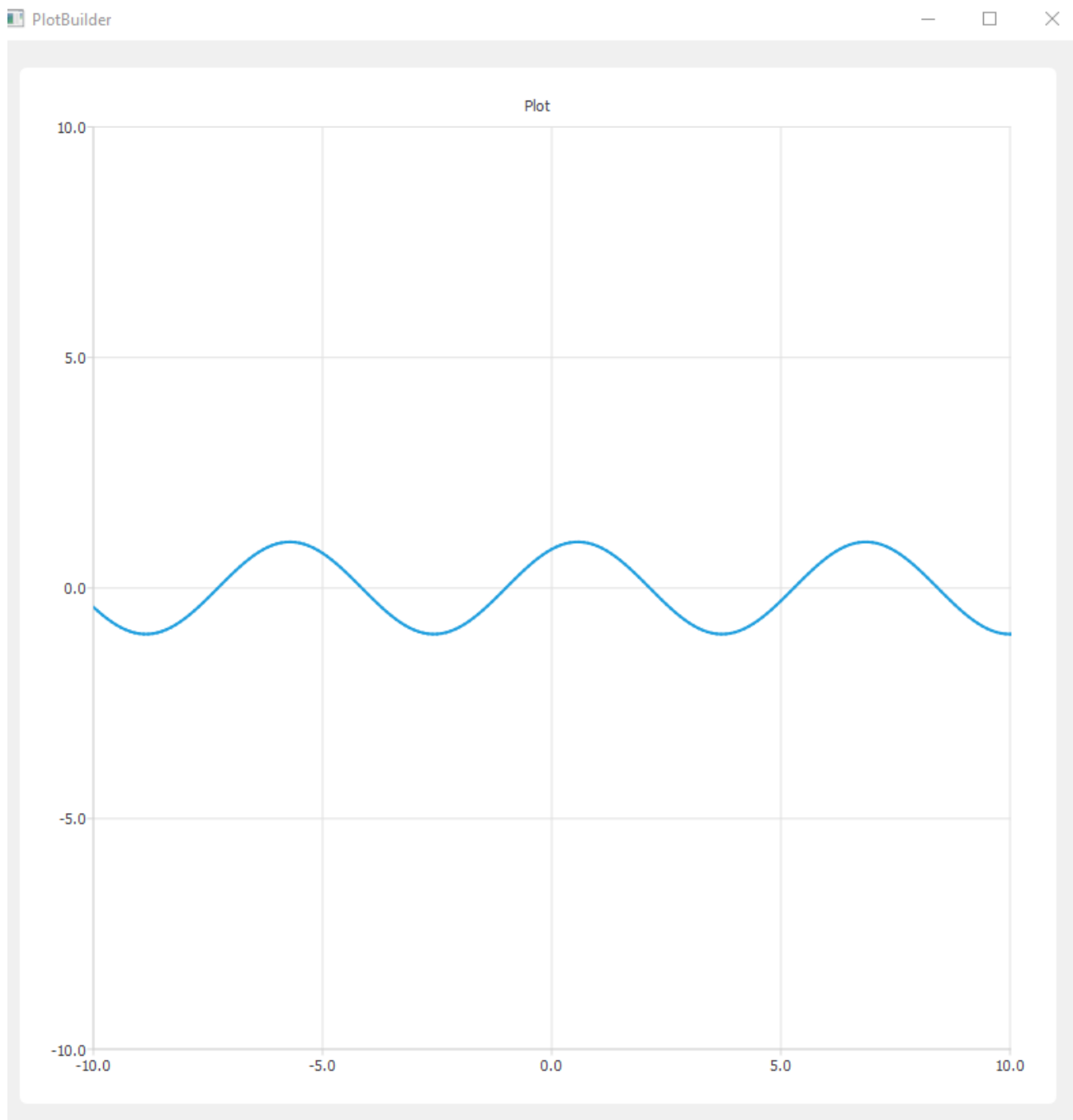
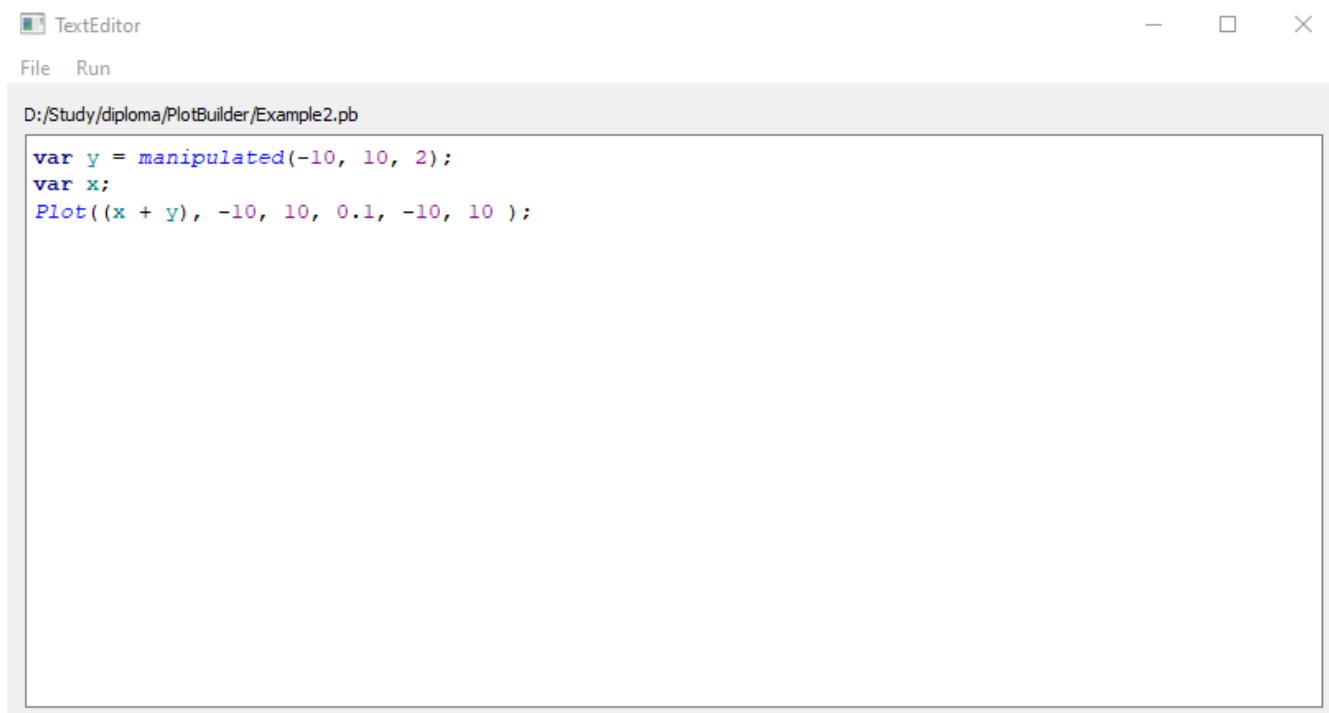


Рис 2.3.1.2 Результат виконання програми №1

Результатом інтерпретації коду з прикладу є побудований графік $\sin(x+1)$.

Приклад 2 – Побудова графіку, який може бути динамічно керований користувачем:



The image shows a screenshot of a TextEditor window. The title bar reads "TextEditor" and the menu bar contains "File" and "Run". The file path is "D:/Study/diploma/PlotBuilder/Example2.pb". The code in the editor is as follows:

```
var y = manipulated(-10, 10, 2);  
var x;  
Plot((x + y), -10, 10, 0.1, -10, 10 );
```

Рис 2.3.1.3 Приклад програми №2.

В даному прикладі змінна y визначається як змінювана слайдером з параметрами: мінімальне значення = -10, максимальне значення = 10, точність змінної = 2 цифри після коми. Об'являється змінна x для її використання у побудові графіку. Будується графік з параметрами: функція – $\sin(x)$, мінімальній $x = -10$, максимальній $x = 10$, інкремент $x = 0.1$, мінімальне значення для вісі $OY = -10$, максимальне значення для вісі $OY = 10$.

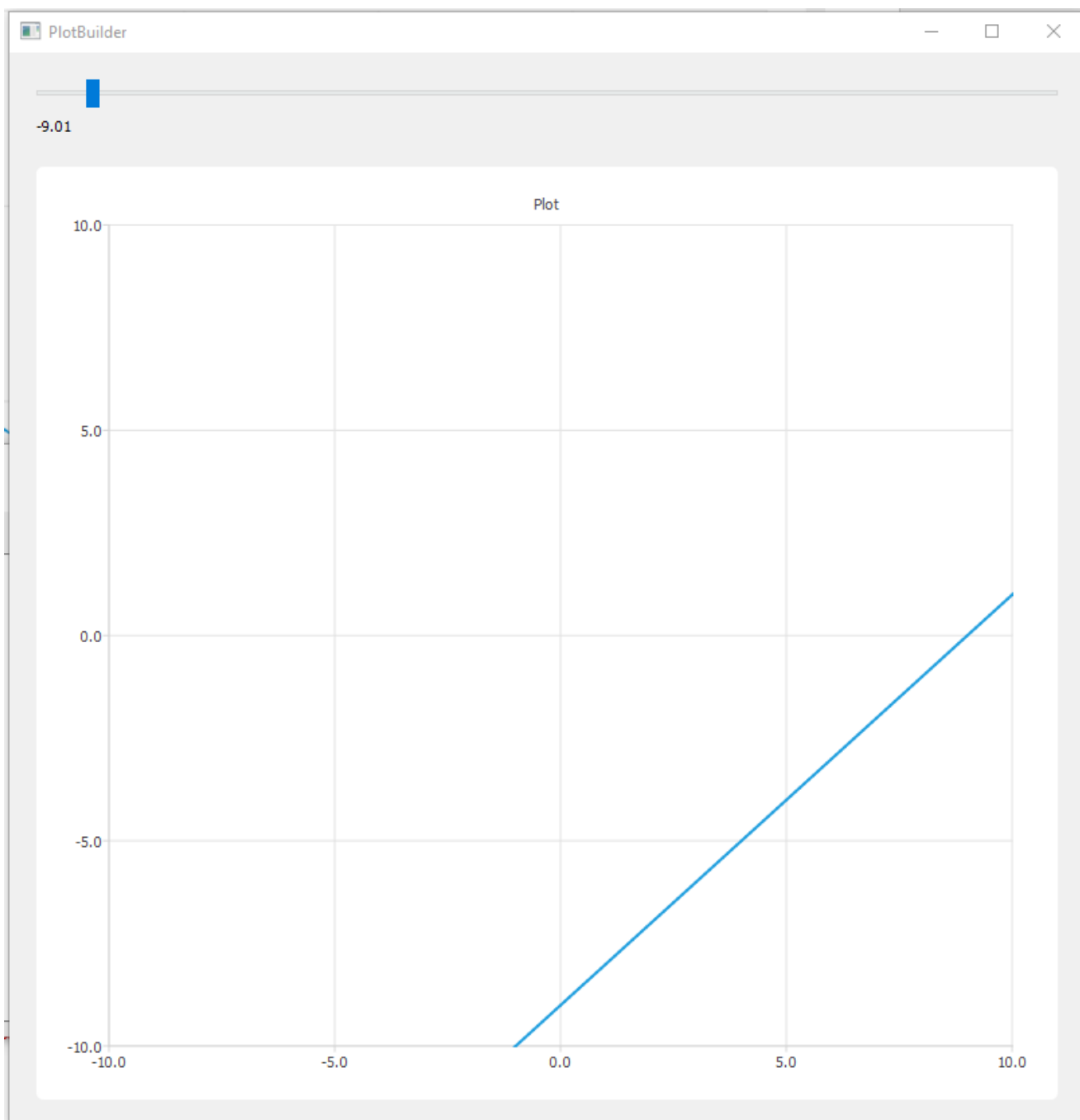


Рис 2.3.1.4 Результат виконання програми №2, змінній у встановлено значення - 9.01

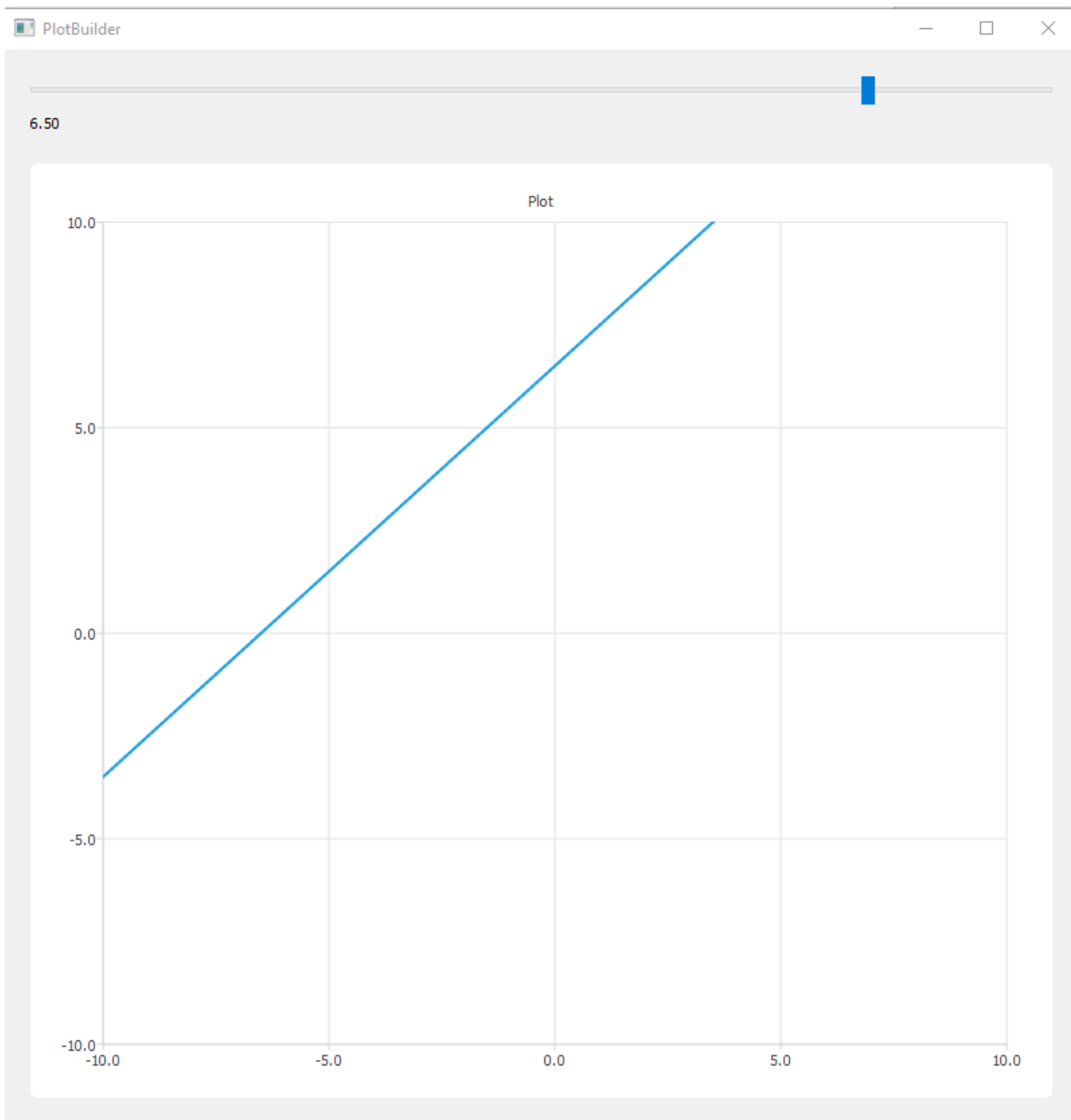
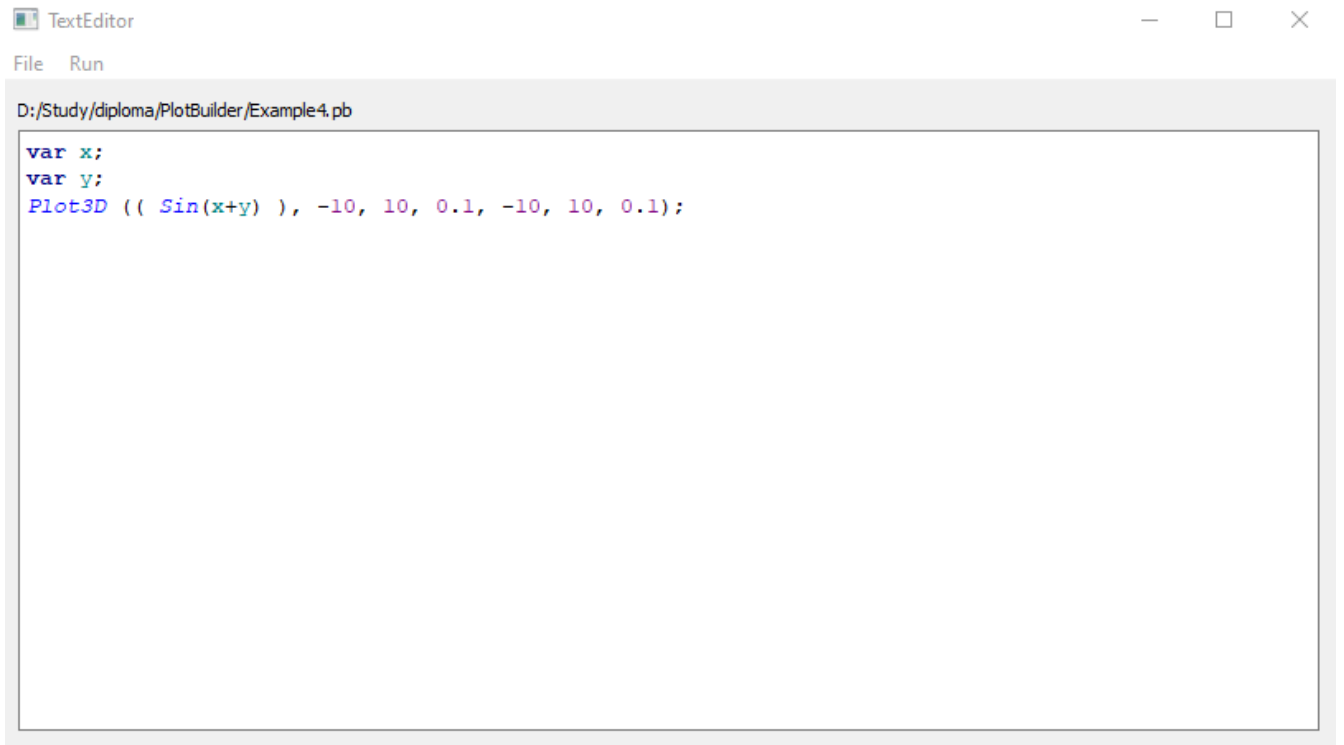


Рис 2.3.1.5 Результат виконання програми №2, змінній у встановлено значення 6.5
Результатом інтерпретації коду з прикладу є побудований графік $(x+y)$, де у динамічно змінюється користувачем за допомогою слайдери.

Приклад 3 – Побудова тривимірного графіку:



The image shows a screenshot of a TextEditor window. The title bar reads "TextEditor" and the menu bar contains "File" and "Run". The address bar shows the file path "D:/Study/diploma/PlotBuilder/Example4.pb". The main text area contains the following code:

```
var x;  
var y;  
Plot3D (( Sin(x+y) ), -10, 10, 0.1, -10, 10, 0.1);
```

Рис 2.3.1.1 Приклад програми №3.

В даному прикладі об'являються дві змінні x та y для їх використання у побудові графіку. Далі будується графік з параметрами: функція – $\text{Sin}(x+y)$, мінімальній $x = -10$, максимальній $x = 10$, інкремент $x = 0.1$, мінімальній $y = -10$, максимальній $y = 10$, інкремент $y = 0.1$.

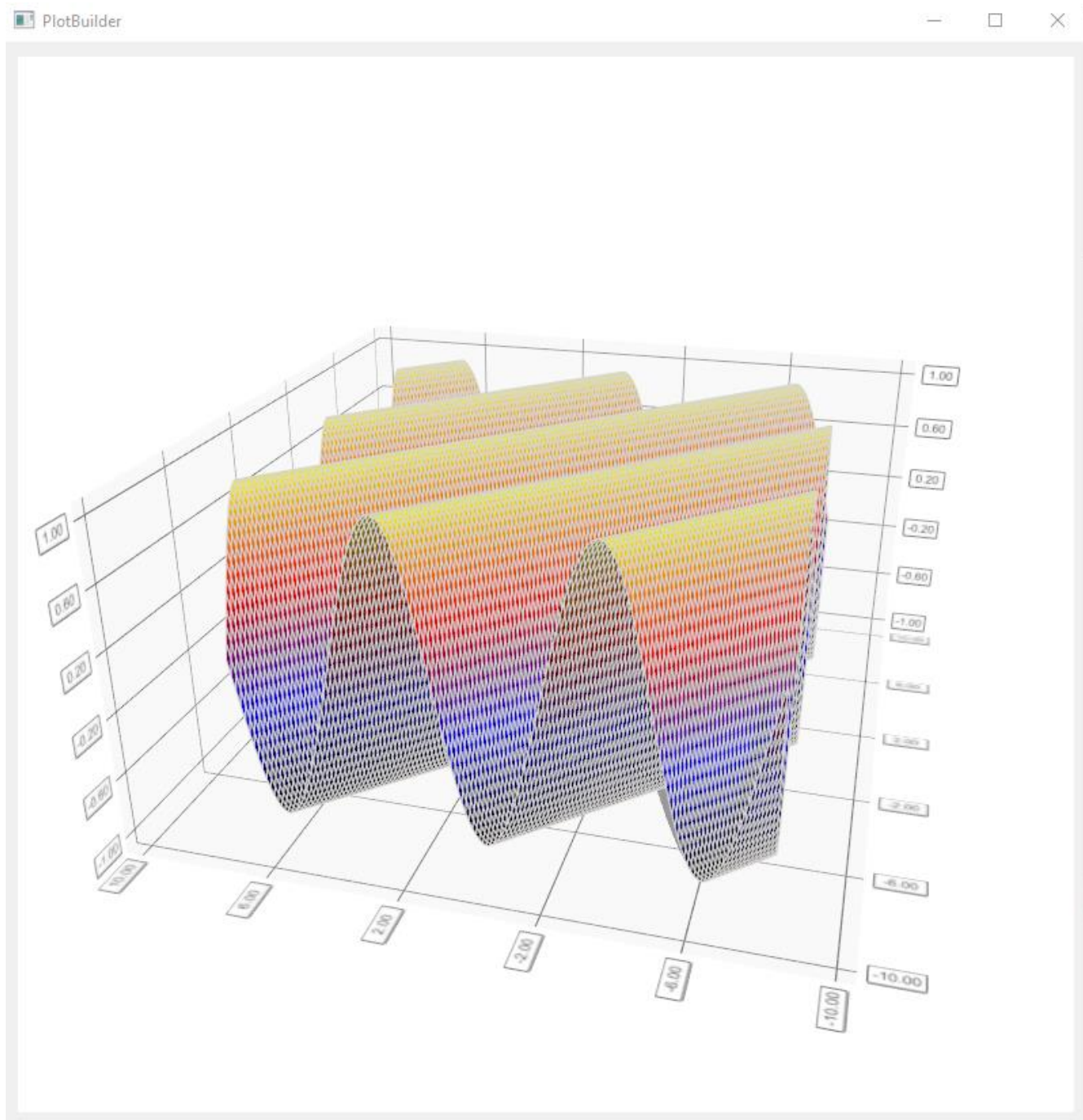


Рис 2.3.1.2 Результат виконання програми №3

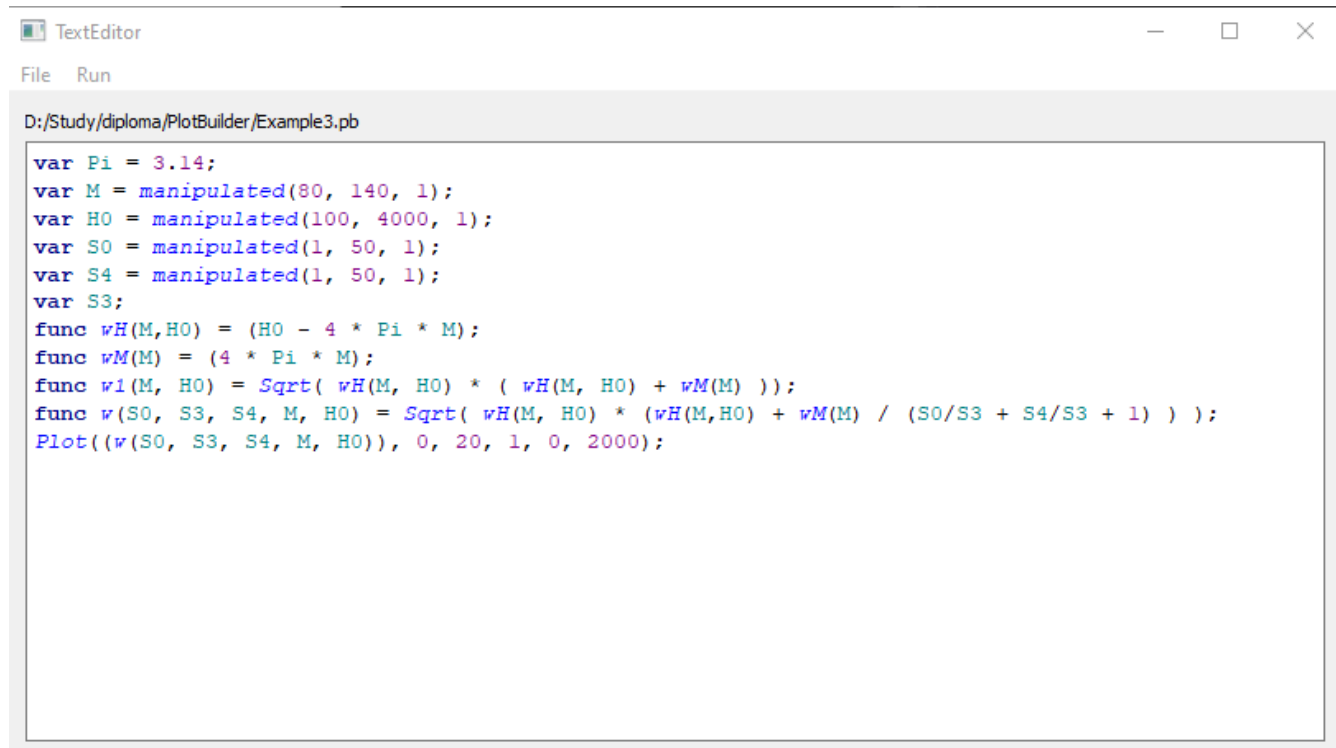
Результатом інтерпретації коду з прикладу є побудований графік $\sin(x+y)$.

2.3.2 Використання програми інтерпретатора для побудови дисперсійного співвідношення ПОМСХ в структурі МДФДМ

Спочатку треба визначити всі функції, які в подальшому будуть використовуватись для візуалізації. Такими функціями є:

$$\omega_M = \gamma 4\pi M ; \quad \omega_H = \gamma(H_0 - 4\pi M); \quad \omega_{k \rightarrow 0} = \sqrt{\omega_H \left(\omega_H + \frac{\omega_M}{s_0/s_3 + s_4/s_3 + 1} \right)};$$

Отримана програма для візуалізації дисперсійного співвідношення ПОМСХ в структурі МДФДМ:



```

D:/Study/diploma/PlotBuilder/Example3.pb
var Pi = 3.14;
var M = manipulated(80, 140, 1);
var H0 = manipulated(100, 4000, 1);
var S0 = manipulated(1, 50, 1);
var S4 = manipulated(1, 50, 1);
var S3;
func wH(M, H0) = (H0 - 4 * Pi * M);
func wM(M) = (4 * Pi * M);
func w1(M, H0) = Sqrt( wH(M, H0) * ( wH(M, H0) + wM(M) ) );
func w(S0, S3, S4, M, H0) = Sqrt( wH(M, H0) * (wH(M, H0) + wM(M) / (S0/S3 + S4/S3 + 1) ) );
Plot((w(S0, S3, S4, M, H0)), 0, 20, 1, 0, 2000);

```

Рис 2.3.2.1 програма з написаним кодом для візуалізації дисперсійного відношення ПОМСХ в структурі МДФДМ в розробленому інтерпретаторі.

Спробуємо обрахувати дисперсійне відношення для умов:

$$H_0 = 2 \text{ кЕ}, \quad 4\pi M = 1250 \text{ Гс}, \quad S_4 = 10 \text{ мкм}, \quad S_0 = 10 \text{ мкм}.$$

Результат роботи програми:

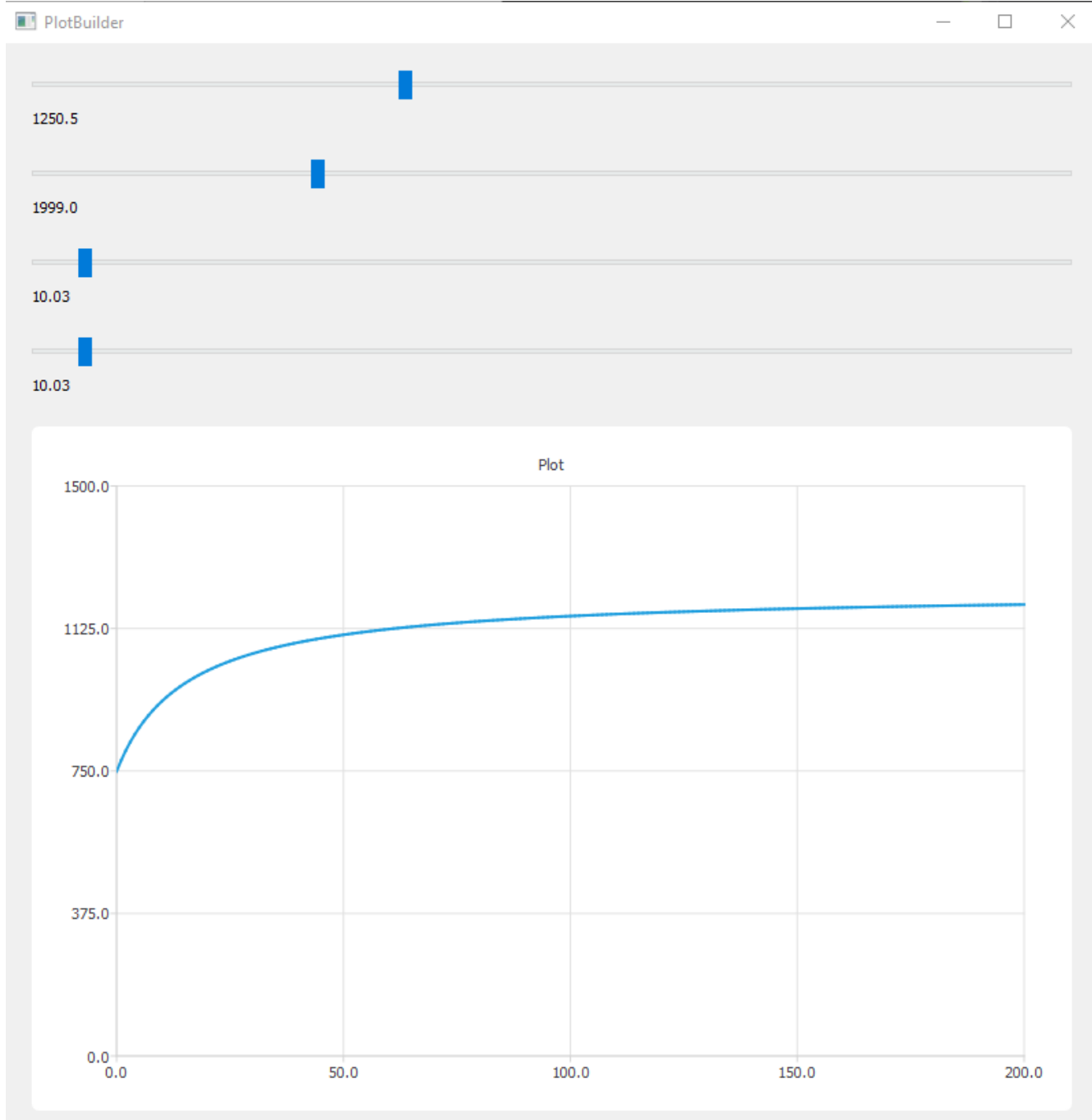
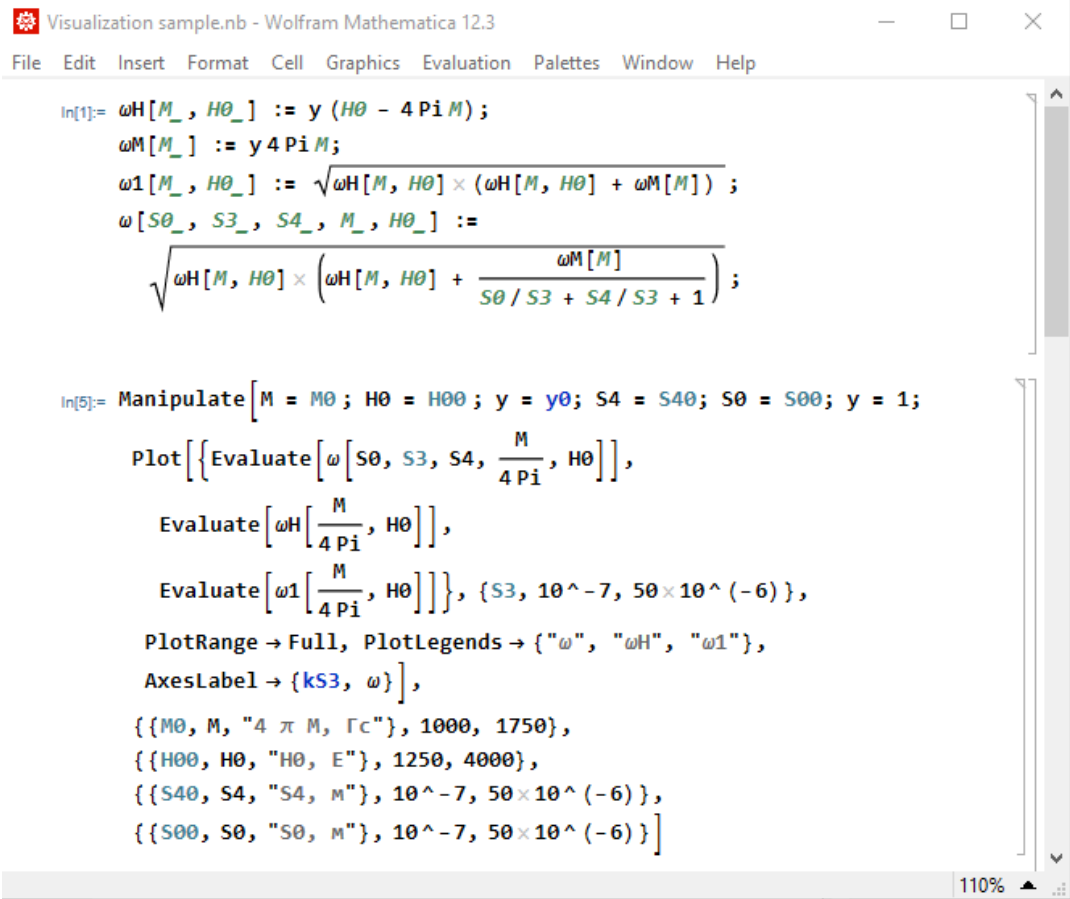


Рис 2.3.2.2 Результат роботи програми для візуалізації дисперсійного відношення ПОМСХ в структурі МДФДМ.

2.3.3 Порівняння написаного інтерпретатора та системи Wolfram mathematica

Напишемо програми для візуалізації дисперсійного відношення ПОМСХ в структурі МДФДМ.



```

Visualization sample.nb - Wolfram Mathematica 12.3
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help

In[1]:= ωH[M_, H0_] := y (H0 - 4 Pi M);
ωM[M_] := y 4 Pi M;
ω1[M_, H0_] := √(ωH[M, H0] × (ωH[M, H0] + ωM[M]));
ω[S0_, S3_, S4_, M_, H0_] :=
  √(ωH[M, H0] × (ωH[M, H0] +  $\frac{\omega M[M]}{S0 / S3 + S4 / S3 + 1}$ ));

In[5]:= Manipulate[M = M0; H0 = H00; y = y0; S4 = S40; S0 = S00; y = 1;
  Plot[{Evaluate[ω[S0, S3, S4,  $\frac{M}{4 Pi}$ , H0]],
    Evaluate[ωH[ $\frac{M}{4 Pi}$ , H0]],
    Evaluate[ω1[ $\frac{M}{4 Pi}$ , H0]]}, {S3, 10^-7, 50 × 10^-6},
  PlotRange → Full, PlotLegends → {"ω", "ωH", "ω1"},
  AxesLabel → {kS3, ω},
  {{M0, M, "4 π M, Гц"}, 1000, 1750},
  {{H00, H0, "H0, Е"}, 1250, 4000},
  {{S40, S4, "S4, м"}, 10^-7, 50 × 10^-6},
  {{S00, S0, "S0, м"}, 10^-7, 50 × 10^-6}]
  
```

Рис 2.3.3.1 Інтерфейс Wolfram mathematica з програмою для візуалізації дисперсійного відношення ПОМСХ в структурі МДФДМ.

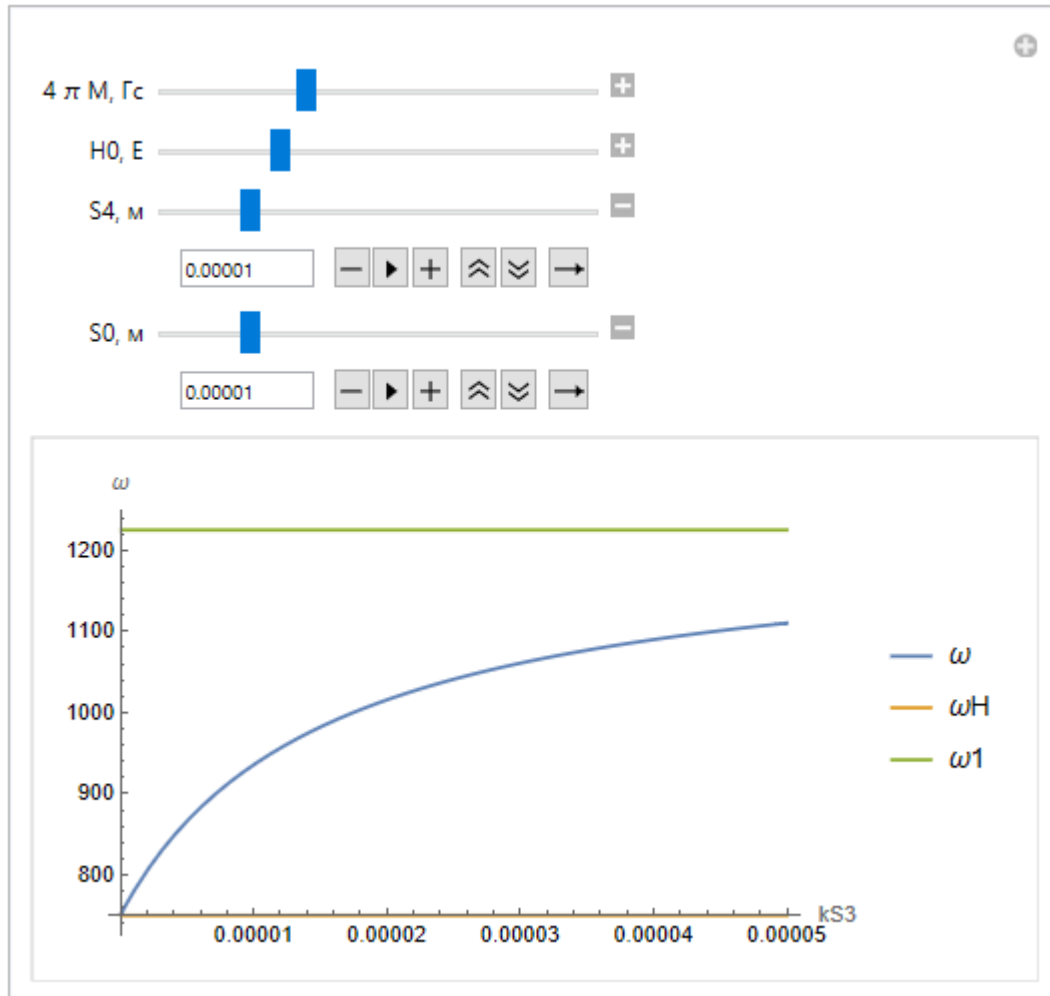


Рис 2.3.3.2 Результат виконання програми для візуалізації дисперсійного відношення ПОМСХ в структурі МДФДМ в системі Wolfram mathematica.

З отриманих результатів можна сказати, що система Wolfram mathematica набагато більш гнучка, має більше опцій для будування графіків та складніший синтаксис. Розроблений інтерпретатор має набагато менший функціонал навіть с точки зору побудови простих графіків, проте завдяки цьому його синтаксис набагато простіший та на розробку простих графіків витрачається набагато менше часу. З цього можна зробити висновок, що розроблений інтерпретатор найкраще підходить для швидкої побудови простих графіків.

Висновки

- 1.** Розроблено програму з текстовим редактором та інтерпретатором для побудови графіків. Ця програма має достатньо функцій для візуалізації дисперсійного відношення прямих об'ємних магнітостатичних хвиль в структурі метал-діелектрик-ферит-діелектрик-метал.
- 2.** Написано програму в системі Wolfram mathematica для візуалізації дисперсійного відношення прямих об'ємних магнітостатичних хвиль в структурі метал-діелектрик-ферит-діелектрик-метал та порівняно з розробленим інтерпретатором для побудови графіків. Розроблений інтерпретатор більше підходить для швидкої побудови графіків. Для складних задач краще використовувати Wolfram mathematica.

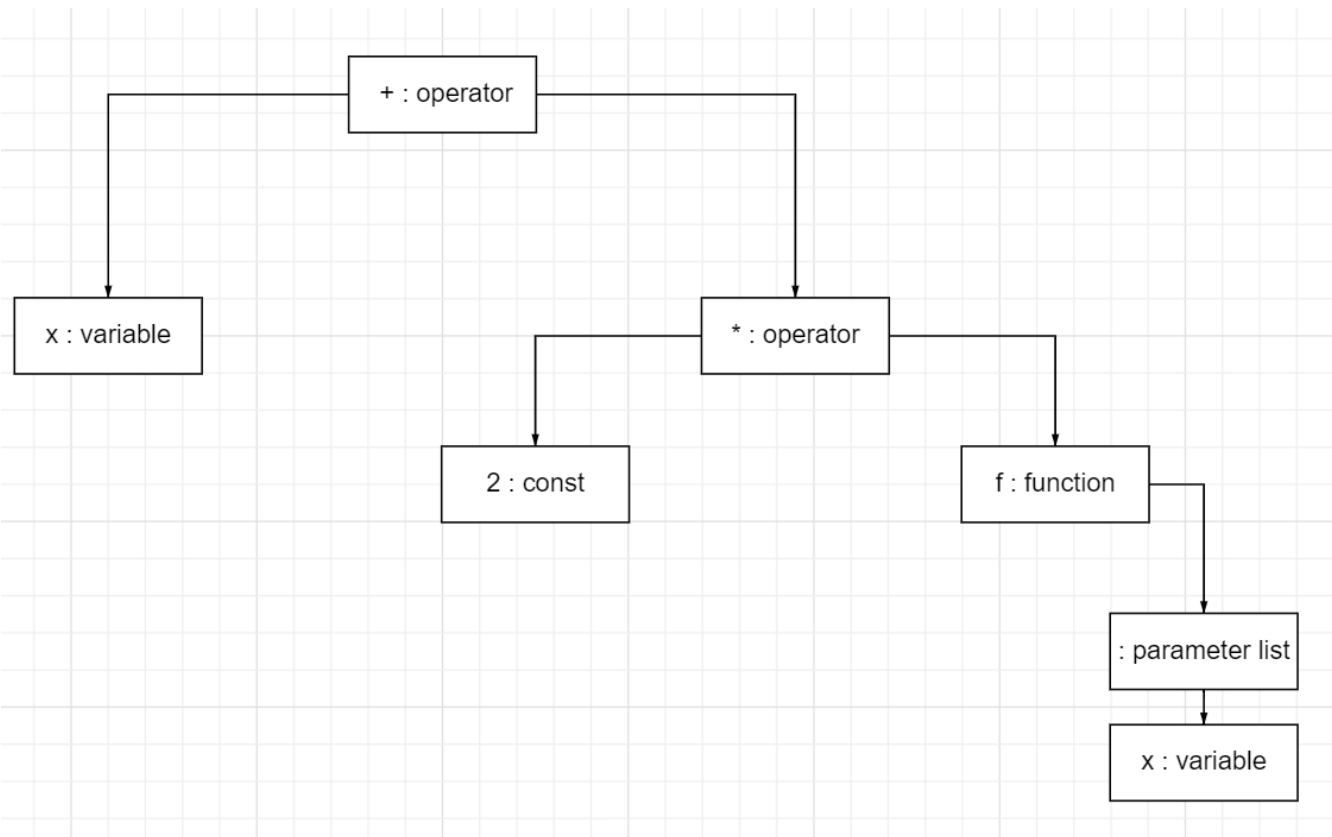
Список літератури

1. В. В. Данилов, І. В. Зависяк, О. Ю. Нечипорук. «Спін-хвильова електродинаміка» Київ – 2008, 352 с.
2. Нечипорук О.Ю., Зависяк І.В. Посібник до лабораторного практикуму з «Функціональної електроніки» для студентів радіофізичного факультету, частина 4, Київ -2010, 40 с.
3. В.Г. Шавров, В. И. Щеглов, «Магнитостатические и электромагнитные волны в сложных структурах.» ФИЗМАТЛИТ - 2017, 358 с.
4. Shunting yard algorithm [Електронний ресурс], Режим доступу:
URL:
5. Converting algebraic expressions into expression trees. [Електронний ресурс],
Режим доступу: URL:
<https://aidengrossman.com/Misc/Markdown/Converting%20algebraic%20expressions%20into%20expression%20trees.html>

Додаток А

Посилання на репозиторій GitLab з вихідним кодом: <https://gitlab.com/denysbalym/plotbuilder/>

Додаток Б

Приклад побудованого дерева для виразу $x + 2 * f(x)$ Рис Б.1 Приклад побудованого дерева для виразу $x + 2 * f(x)$.

Додаток В

Код програми для візуалізації дисперсійного відношення ПОМСХ в структурі МДФДМ.

```
 $\omega_H[M_, H0_] := y (H0 - 4 \text{ Pi } M);$ 
```

```
 $\omega_M[M_] := y 4 \text{ Pi } M;$ 
```

```
 $\omega_1[M_, H0_] := \text{Sqrt}[\omega_H[M, H0] (\omega_H[M, H0] + \omega_M[M])];$ 
```

```
 $\omega[S0_, S3_, S4_, M_, H0_] := \text{Sqrt}[\omega_H[M, H0] (\omega_H[M, H0] + \omega_M[M]/(S0/S3 + S4/S3 + 1))];$ 
```

```
Manipulate[M = M0 ; H0 = H00 ; y = y0; S4 = S40; S0 = S00;
```

```
Plot[{y = 1;
```

```
  Evaluate[\omega][S0, S3, S4, M/(4 Pi), H0]],
```

```
  Evaluate[\omega]H[M/(4 Pi), H0]],
```

```
  Evaluate[\omega]1[M/(4 Pi), H0]], {S3, 10^-7, 50 10^-6}},
```

```
PlotRange -> Full,
```

```
PlotLegends -> {"\omega", "\omega]H", "\omega]1"},
```

```
AxesLabel -> {kS3, \omega}],
```

```
{{M0, M, "4 \text{ Pi } M, Гс"}, 1000, 1750},
```

```
{{H00, H0, "H0, E"}, 1250, 4000},
```

```
{{S40, S4, "S4, м"}, 10^-7, 50 10^-6}},
```

```
{{S00, S0, "S0, м"}, 10^-7, 50 10^-6}]]
```