МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ,
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

________________ Шутко В.М.

"_____"____________ 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА

ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 171 «Електроніка»

ОПП «ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»

Тема: «Комп'ютерне моделювання процесів поширення електромагнітних полів штучного походження в атмосфері землі: лабораторний практикум»

Виконавець: студент, 404 група, Катушонок Федір Олександрович
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: доцент, Задорожний Олександр Сергійович
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Нормоконтролер: ____________________ ____________________
(підпис) (П.І.Б.)

Київ 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та Інтернету речей

Напрям (спеціальність ООП) 171 «Електроніка» «Електронні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Шутко В.М.
«_____»___травня__ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи (проекту)

Катушонка Федора Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема дипломної роботи (проекту): Комп'ютерне моделювання процесів поширення електромагнітних полів штучного походження в атмосфері землі: лабораторний практикум

затверджена наказом ректора від р. № /

2. Термін виконання роботи (проекту): з р.

3. Вихідні дані до роботи (проекту): Програмний комплекс

4. Зміст пояснювальної записки:

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: таблиці, графіки, рисунки, презентація результатів дипломної роботи в електронному вигляді

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Написання заява кваліфікаційної роботи	12.03.2021	Виконав
2	Ознайомлення та обґрунтування актуальності обраної теми	13.03.2021-01.05.02021	Виконав
3	Ознайомлення з загальними положеннями про дипломне проектування та оформлення	06.05.2021-07.05.2021	Виконав
4	Формулювання мети і завдання кваліфікаційної роботи	08.05.2021-09.05.2021	Виконав
5	Бібліографічний пошукза темою кваліфікаційної роботи	10.05.2021	Виконав
6	Аналіз існуючих моделей	11.05.2021-12.05.2021	Виконав
7	Написання вступу та загальних відомостей	12.05.2021-13.05.2021	Виконав
8	Обґрунтування вибору математичних моделей	14.05.2021	Виконав
9	Вибір та обґрунтування технологій та мови програмування для розробки	15.05.2021	Виконав
10	Розробка алгоритмів роботи математичних моделей	16.05.2021-20.05.2021	Виконав
11	Розробка лабораторного програмного комплексу	20.05.2021-31.05.2021	Виконав
12	Перевірка коректності роботи розробленого програмного комплексу	01.06.2021	Виконав
13	Оформлення роботи. Подання на	02.05.2021-	Виконав

	кафедру	10.05.2021	

7. Дата видачі завдання: “01“ квітня 2021 р.

Керівник дипломної роботи (проекту) ________________ Задорожний О.С.
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання ________________ Катушонок Ф.О.
(підпис випускника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту “Комп'ютерне моделювання процесів поширення електромагнітних полів штучного походження в атмосфері землі: лабораторний практикум” : сторінок − 58, рисунків − 44, таблиць − 7, джерел посилань − 26.

Мета роботи: розробка лабораторного програмного комплексу для моделювання процесів поширення електромагнітних полів штучного походження в атмосфері землі.

Об'єкт дослідження: Процес моделювання розповсюдження електромагнітних хвиль у атмосфері землі за допомогою програмного лабораторного комплексу.

Предмет дослідження: Програмний лабораторний комплекс для моделювання поширення електромагнітних хвиль у атмосфері землі

Проведена робота по розробці Програмний лабораторний комплекс для дослідження процесів поширення електромагнітних полів штучного походження в атмосфері землі.

Ключові слова: програмний лабораторний комплекс; програмування; стенд; напруженість електричного поля; лабораторний комплекс;розповсюдження радіохвиль; коефіцієнт спрямованої дії.

ЗМІСТ

Вступ……………………………………………………………..……………………

Розділ I Математичні моделі розповсюдження радіохвиль……………………

1.1. Особливості поширення радіохвиль у вільному просторі………………

1.2. Вплив земної поверхні на розповсюдження радіохвиль…………………

1.3. Математичні моделі розповсюдження радіохвиль в різних шарах земної атмосфери………………………………………………………………

1.4. Обгрунтуваня вибору математичних моделей для розробки програмного комплексу……………………………………………………………

1.5. Висновки до першого розділу…………………………………………

Розділ II Розробка віртуальних лабораторних робіт для дослідження розповсюдження радіохвиль…………………………………..………………

2.1. Обґрунтування вибору методу моделювання розповсюдження радіохвиль…………………………………………………………………

2.2. Розробка п'яти віртуальних лабораторних робіт………………………

2.2.1. Розповсюдження радіохвиль у вільному просторі……………

2.2.2. Дослідження зон Френеля………………………………………

2.2.3. Розповсюдження радіохвиль поблизу земної поверхні………

2.2.4. Розповсюдження радіохвиль у тропосфері……………………

2.2.5. Розповсюдження радіохвиль у іоносфері………………………

2.3. Оцінка результатів моделювання розповсюдження радіохвиль………

2.4. Висновки до другого розділу……………………………………………

Висновки…………………………………………………………………………

Список використаної літератури………………………………………………

Додатки…………………………………………………………………………

Кафедра ЕРМІТ				НАУ			
Виконав	Катушонок Ф.О.			Тема дипл. проекту	Літера	Аркуш	Аркушів
Керівник	Задорожний О.С.						
Консульт.							
Н-контр.	Сініцин Р.Б.						
Зав. каф.	Шутко В.М.				ЕС-404 171		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ЛПК – (Лабораторний програмний комплекс)

РХ – (Радіохвиля)

РРХ – (Розповсюдження радіохвиль)

КНД – (Коефіцієнт напрямленої дії)

КСХ – (Коефіцієнт стоячої хвилі)

ВСТУП

Актуальність теми.

За останні 30 років кількість радіосистем в світі дуже швидко зростає, що неодмінно призводить до виникнення проблем електромагнітної сумісності, де питання особливостей розповсюдження радіохвиль в просторі та ефектів, пов'язаних з поширенням радіохвиль, займають важливе місце. Практичне дослідження розповсюдження радіохвиль, як у вільному просторі, так і в земній атмосфері потребує відповідного спеціального обладнання та умов для проведення експериментів. Відсутність яких накладає суттєві обмеження при дослідження розповсюдження радіохвиль та явищ, які супроводжують цей процес. Раціонально користуватись вже відомими математичними моделями, що, для рекомендованих сценаріїв використання, дають достатньо точний результат. Однак деякі є досить громіздкими та складними як для розуміння так і для ручних розрахунків, що неодмінно диктує необхідність використання сучасних підходів для оптимізації процесу розрахунку. Таким чином сукупність згаданих факторів, а також загальна тенденція до переходу у цифровий формат, націлена на спрощення та зручність доступу до навчальних матеріалів, що стала ще більш актуальною в умовах світової пандемії, вимагають комплексних програмних рішень з моделювання розповсюдження радіохвиль в різних середовищах. Тому розробка програмного продукту на базі існуючих математичних моделей для дослідження та вивчення процесів поширення електромагнітних полів штучного походження в атмосфері землі є актуальною та важливою задачею.

Метою роботи є розробка лабораторного програмного комплексу для моделювання процесів поширення електромагнітних полів штучного походження в атмосфері землі. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні завдання:

- провести аналіз існуючих математичних моделей розповсюдження радіохвиль в атмосфері землі;
- обґрунтувати вибір математичних моделей розповсюдження радіохвиль в атмосфері землі для реалізації програмного комплексу;

- вибрати та обґрунтувати набір технологій, мову програмування задля створення необхідного програмного забезпечення;
- розробити алгоритми роботи математичних моделей на основі обраних технологій;
- розробити лабораторний програмний комплекс на основі створених алгоритмів та визначених методів моделювання;
- перевірити коректність роботи розробленого програмного комплексу.

Об'єктом роботи є процес моделювання розповсюдження електромагнітних хвиль у атмосфері землі за допомогою програмного лабораторного комплексу.

Предметом роботи є програмний лабораторний комплекс для моделювання поширення електромагнітних хвиль у атмосфері землі.

З метою досягнення поставлених завдань були використані такі **методи дослідження**: аналіз та узагальнення, метод комп'ютерного моделювання та перевірка результатів ручним обчисленням.

Наукова новизна отриманих результатів. В процесі проведених досліджень отримано такі нові результати:

- вперше розроблений оригінальний програмний продукт, що поєднує різні математичні моделі в одній програмі та дозволяє комплексно дослідити розповсюдження електромагнітних хвиль у атмосфері землі, з доступним та інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом.

- розроблений програмний продукт може використовуватися як при виконанні лабораторних робіт у комп'ютерному класі після встановлення так і в дистанційному режимі через мережу інтернет.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблений лабораторний програмний комплекс дозволяє автоматизувати та значно спростити процес розрахунку розповсюдження електромагнітного поля, як в вільному просторі, так і в атмосфері землі. А також дослідити особливості структури електромагнітного поля як у вільному просторі так і поблизу земної поверхні. Лабораторний програмний комплекс може бути використаний у якості лабораторних робіт з дисципліни «Розповсюдження радіохвиль».

Особистий внесок. Розроблені алгоритми роботи математичних моделей на основі обраної мови програмування та набору технологій, запрограмовані розрахунки параметрів електромагнітного поля на основі обраних математичних моделях, розроблений візуальний інтерфейс програми, створене повноцінне програмне забезпечення у вигляді інсталяційного пакету та веб-версії.

РОЗДІЛ 1 Математичні моделі розповсюдження радіохвиль

1.1 Особливості поширення радіохвиль у вільному просторі

Процес розповсюдження радіохвиль може бути дуже складним. Є багато способів проходження радіохвилі від точки передавача до точки приймача, це може бути як прямолінійна траєкторія, так і огинання опуклої поверхні Землі, відбиваючись від іоносфери. В цілому, на способи РРХ впливають довжина хвилі, освітленість Землі та інши фактори [1].

Вільним розповсюдженням радіохвиль називають такі радіохвилі, які розповсюджуються прямолінійно у однорідних середовищах. Тобто, їх швидкість є постійною. Як приклад, можна взяти зв’язок між космічними об’єктами, радіоастрономічні спостереження тощо.

На великих відстанях, хвилі, що випромінюютсья антеною, можна вважати плоскими. Щільність потоку електромагнітної енергії убуває із збільшенням відстані від джерела, що обмежує відстань, на якій може бути прийнятий сигнал передавача. При відсутності поглинання, дальність дії радіостанції:

$$r_{\text{д}} = 4\pi\sqrt{\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}}G_1G_2\lambda}$$

Де $P_{\text{с}} -$ потужність сигналу на вході приймача, $P_{\text{ш}} -$ потужність шумів, G_1 і G_2 $-$ КНД передавальної і приймальної антен відповідно [2].

Для розповсюдженні радіохвиль у вільному просторі, дистанція між двома антенами повинна бути значно більша ніж розмір антени. Дальня зона електромагнітної хвилі є самою істотною. Тобто, ми моделюємо випромінювальну антену як точкове джерело з малими фізичними розмірами. У такому випадку, енергія, що випромінюється всенапрямленою антеною, розповсюджується по поверхні сферию Це дозволяє нам проаналізувати вплив відстані на потужність приймального сигналу «див на рис. 1.1» [3].

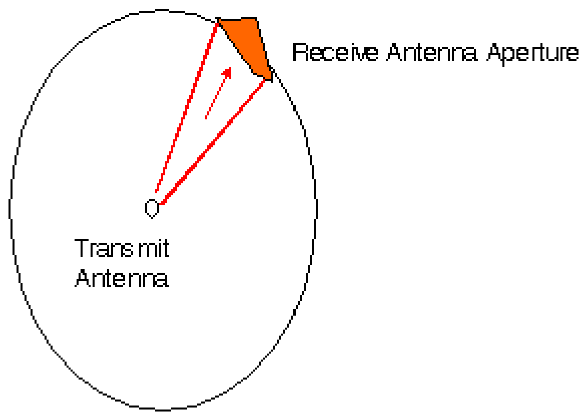

Рис. 1.1. Модель передаючої антени

Вільним простором можна вважати таке середовище, де діелектрична проникність становить 1. За допомогою аналізу розповсюдження радіохвиль можно у подальшому аналізувати та моделювати будь-який сценарій розпосвюдження радіохвиль. Типова схема складається з передавача та випромінюючої антени, і приймальної антени та приймача «див рис. 2.8.1».

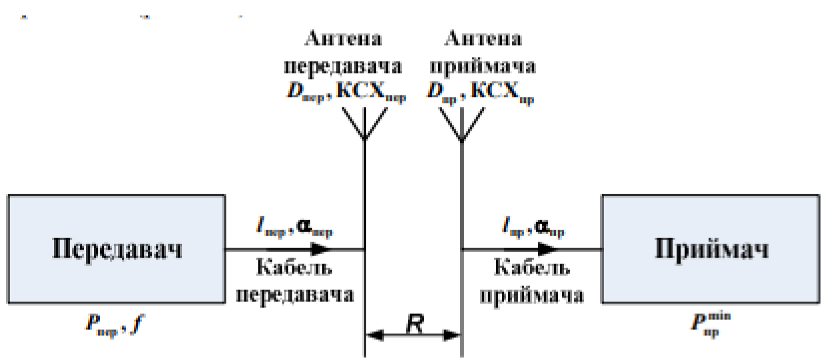

Рис. 2.8.1. Структура схеми радіолінії

Як видно з рисунку, передавач можна охарактеризувати частотою f і потужністю $P_{\text{пер}}$. Але, результуюча потужність випромінювання $P_{\text{випр}}$ буде дещо менше ніж потужність передавача. Це обумовлено тепловими втратами у лінії фідера і неідеальним узгодженням передавальної антени.

$$P_{\text{випр}} = P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}}$$

Де $\eta_{\text{пер}}$ – ККД передавача.

Одні з самих значних втрат трапляються саме у лінії фідера за рахунок теплових втрат, які можна охарактеризувати як погонне загасання α у $\frac{\text{дБ}}{\text{м}}$. Формула для розрахунку загасання буде мати такий вигляд:

$$A = 10^{-\frac{\alpha l}{10}}$$

Де l – довжина фідера.

Розподіл напруги вздовж лінії фідера для неідеально узгодженої антени утворюється накладанням падаючої і відбитої хвилі з амплітудами $U_{\text{пад}}$ і $U_{\text{відб}}$ відповідно «див рис. 2.8.2». Ця напруга змінюється вздовж усієї лінії, досягаючи мінімального (U_{min}) і максимального (U_{max}) значення напруги у точках, які зміщені на чверть довжини хвилі в лінії [15]. Ступінь узгодження антени з фідером можна охарактеризувати такими параметрами:

Коефіцієнт відбиття:

$$\Gamma = \frac{U_{\text{відб}}}{U_{\text{пад}}}$$

Коефіцієнт стоячої хвилі:

$$\text{КСХ} = \frac{U_{max}}{U_{min}}$$

Виразимо одну величино через іншу:

$$\Gamma = \frac{\text{КСХ} - 1}{\text{КСХ} + 1}$$

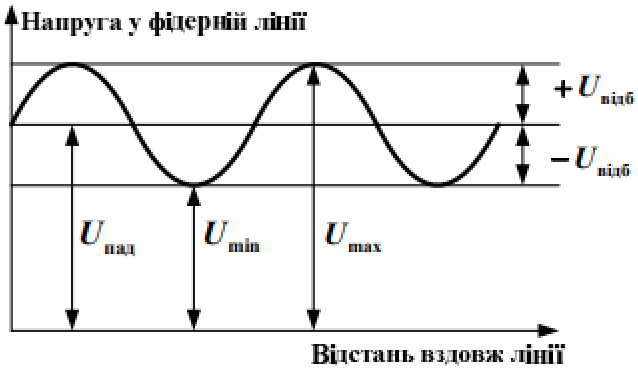

Рис. 2.8.2. Структура схеми радіолінії

Антену можна вважати узгодженою, коли $\text{КСХ} = 1, \Gamma = 0$, такі параметри відповідають ідеальному узгодженню. Найчастіше, нормальним узгодженням вважається $\text{КСХ} \leq 1.2 \div 1.5$. Таким чином, можна розрахувати ККД тракту передавача:

$$\eta = A(1 - \Gamma^2) = A(1 - \left(\frac{\text{КСХ} - 1}{\text{КСХ} + 1}\right)^2)$$

Якщо допустити, що антена є ізометричною, на відстані R від джерела модуль вектора Пойнтінга розраховується за формулою:

$$|\overline{\Pi_0}| = \frac{P_{\text{випр}}}{4\pi R^2}$$

Але, всеж таки реальна антена, зазвичай має спрямоване випромінювання, тобто завжди існує напрям, в якому випромінюється максимальна кількість енергії. Для цього, вводиться поняття коефіцієнту спрямованої дії (КСД) – це відношення щільності потоку потужності, що створюється в напрямку максимального випромінювання направленою антеною, до щільності потоку потужності ізотропної антени при однаковій випромінюваній потужності [16].

Таким чином, можна визначити щільність потоку потужності на відстані R у напрямі максимального випромінювання:

$$\Pi = \frac{P_{\text{пер}}\eta_{\text{пер}}D_{\text{пер}}}{4\pi R^2}$$

Також, щільність потоку потужності виражається діючими значеннями електричного поля $E_{\text{д}}$ і магнітного поля $H_{\text{д}}$, які пов’язані характеристичним опором вільного простору $Z_0 = 120\pi$ Ом [16]. Звідси:

$$E_{\text{Д}} = \frac{\sqrt{30P_{\text{пер}}\eta_{\text{пер}}D_{\text{пер}}}}{R}$$

Та аплітудне значення:

$$E_m = \frac{\sqrt{60P_{\text{пер}}\eta_{\text{пер}}D_{\text{пер}}}}{R}$$

Приймаючі антени зазвичай характеризують діючою довжиною $h_{\text{д}}$ або ефективною площею $S_{\text{еф}}$. Ефективна площа антени пов’язана з КСД $D_{\text{пр}}$ співвідношенням:

$$S_{\text{еф}} = \frac{\lambda^2}{4\pi}D_{\text{пр}}$$

Звідси, можно вивести формулу розрахунку потужності на вході приймача: $P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}}D_{\text{пер}}D_{\text{пр}}\eta_{\text{пер}}\eta_{\text{пр}}\lambda^2}{(4\pi R)^2}$

Приймач характеризується чутливістю $P_{\text{прм}}^{min}$. Цей параметр визначає мінімальну потужність на вході, при якій гарантується прийом сигналів із визначеною якістю. Знаючи цей параметр, можна розрахувати максимальну дальність зв‘язку:

$$R_{max} = \frac{\lambda}{4\pi}\sqrt{\frac{P_{\text{пер}}D_{\text{пер}}D_{\text{пр}}\eta_{\text{пер}}\eta_{\text{прм}}}{P_{\text{прм}}^{min}}}$$

Також, розглянемо питання визначення області простору, в якій проходить передача енергії радіохвиль. Дане питання дуже просто вирішується принципом Гюйгенса-Френеля «див на рис. 2. 9.1».

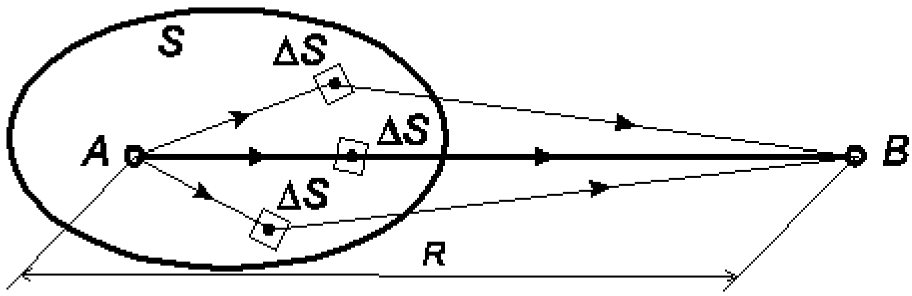

Рис. 2.9.1 Принцип Гюгенса-Френеля

Згідно цього принципа, кожна елементарна ділянка ΔS може бути джерелом вторинних сферичних хвиль. Тоді, векторна сума всіх полів вторинних джерел поверхні S буде визначати поле у точці B.

Процес формування поля в точці B можно розглянути для випадку дифракції радіохвилі на круглому отворі в нескінченному екрані. Припустимо, що точка випромінювання А і точка випромінювання В розташовані на відстані R одна від одної, і між ними розміщено нескінченно великий екран «див на рис. 2.9.2»

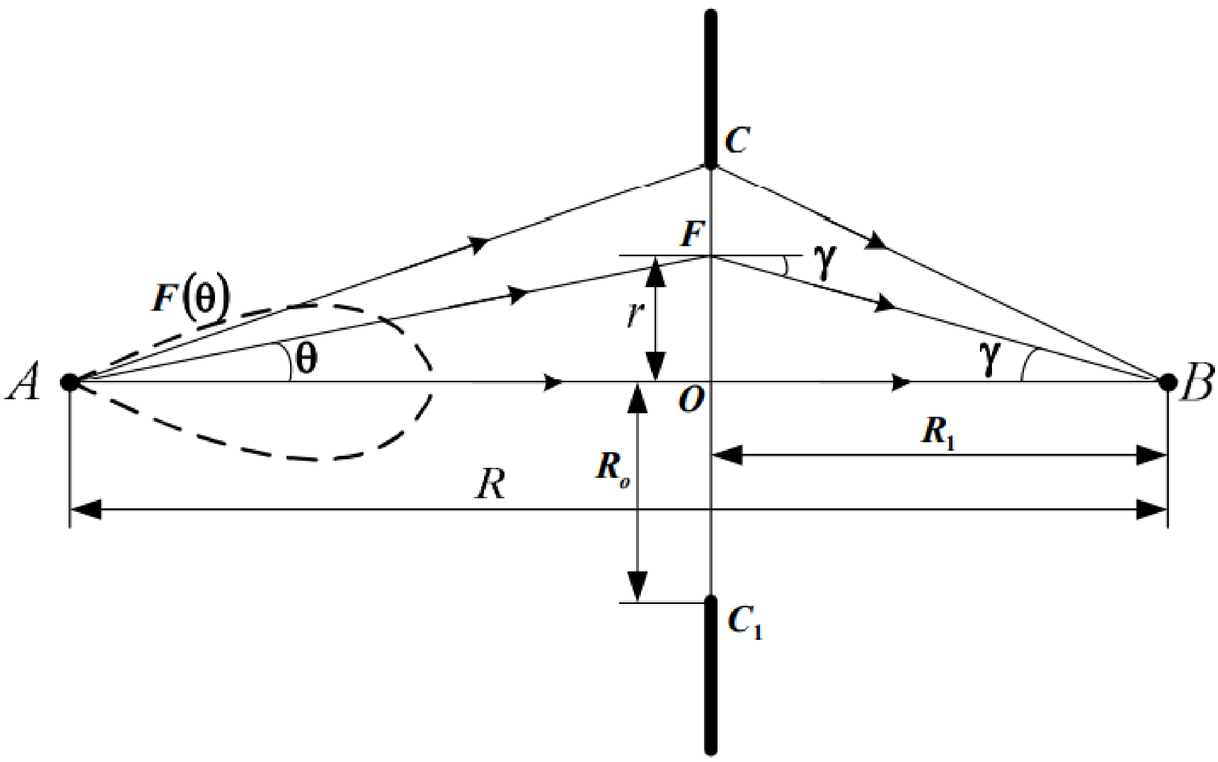

Рис. 2.9.2 Принцип Гюгенса-Френеля

Замкнена навколо точки A поверхня S утворена цим екраном і нескінченно віддаленою полусферою, що спирається на екран. При віддаленні від точки випромінювання напруженість електричного поля зменшується пропорційно відстані. Це означає, що вторинні джерела на нескінченно віддаленій полусфері не впоивають на формування поля в точці B. Суттевий вплив будуть створювати джерела, що лежать поблизу точки пересічення O прямої AB з площиною екрану. Якщо в екрані немає отвору, то його нескінченність і непрозорість для хвиль поле в точці B буде рівно 0. Якщо в екрані зробити невеликий круглий отвір площею ΔS з центром у точці O, то за рахунок випромінювання з його поверхні в точці B з'явиться напруженість поля ΔE_1. Збільшимо площу отвору до $2\Delta S$, тоді випромінювання з додаткової кільцевої поверхні дасть у точці B додаткову складову напруженості поля з амплітудою ΔE_2. За рахунок більшого шляху складова поля ΔE_2 відстає по фазі від ΔE_1 на $\Delta\varphi_1$. Збільшимо площу отвору до $3\Delta S$. Тоді у точці B з'явиться додаткова складова напруженості поля з амплітудою ΔE_3. Воня відстає по фазі від ΔE_2 на $\Delta\varphi_2$ і т.д. Таким чином, ми отримаємо векторну даіграму «див на рис. 2.9.3»

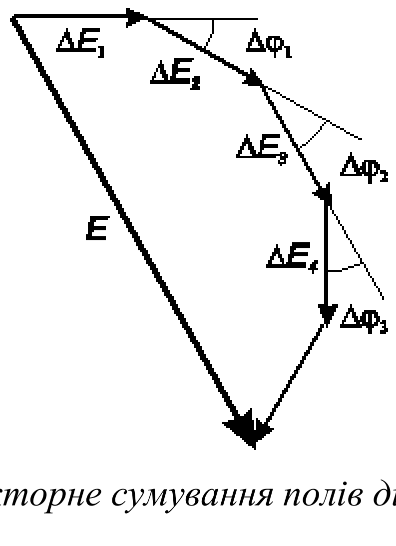

Рис. 2.9.3 Векторне сумування полів ділянок отвору

Розташовані у отворі на радіусі r вторинні джерела, мають таку комплексну амплітуду:

$$dE_S = F(\theta)\frac{\exp(-jk\sqrt{r^2+(R-R_1)^2})}{\sqrt{r^2+(R-R_1)^2}}$$

Також, вони створюють у точці В поле:

$$dE = dE_S\cos\gamma\frac{\exp(-jk\sqrt{r^2+R_1^2})}{\sqrt{r^2+R_1^2}}dS$$

Збільшення площі отвору призводить до збільшення напруженості поля в точці B. Амплітуда поле досягне максимуму при різниці шляхів в половину довжини хвилі, тобто коли $AFB - AB = \frac{\lambda}{2}$. У такому випадку, отвір стає першою зоною Френеля. Але при подальшому збільшенні опору амплітуда поля буде зменшуватись через протифазність полів, які створюються новими кільцевими вторинними джерелами. Мінімум амплітуди поля буде досягатись при $AFB - AB = \lambda$. Цей отвір буде відповідати другій зоні Френеля. Взагалом, можно вивести таке співвідношення:

$$AFB - AB = n\frac{\lambda}{2}$$

Непарні значення n будут охарактеризовувати максимуму, а парні значення – мінімуми. Таким чином, радіус n – ої зони Френеля:

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda R_1(R-R_1)}{R}}$$

І площа будь-якої зони Френеля:

$$S_n = \pi R_n^2 - \pi R_{n-1}^2 = \frac{\pi\lambda R_1(R-R_1)}{R}$$

Таким чином, залежність співвідношення напруженості поля E до напруженості поля за відсутності екрана E_0 від площі отвору S, віднесеної до площі першої зони Френеля S_1 «зображено на рис. 2.9.4».

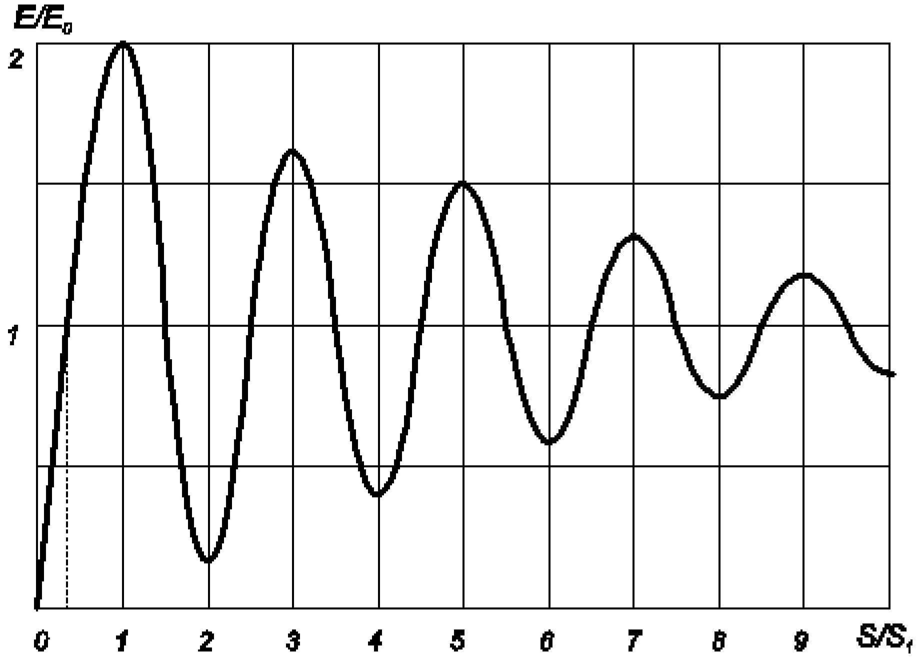

Рис. 2.9.4 Залежність відносної амплітуди поля від площі отвору

Вважається, що перша Френеля зона є суттєвою зоною на площині екрану. Радіус першої зони Френеля змінюється по мірі зсуву екрау вздовж лінії АВ. Максимум радіуса першої зони Френеля будет при розташуванні екрана всередині траси АВ. Різниця відстаней $AFB - AB$ постійна і дорівнює половині двожини хвилі, таким чином, радіус першої зони Френеля креслить еліпс з фокусами у точках А і В. Мінімальна зона буде при отворі екрану, який буде задовольняти умову $\frac{E}{E_0} = 1$. Межа цієї зони утворює більш витянутий еліпс з фокусами у тих самих точках. Таким чином, можна утворити еліпсоїди обертання, навколо осі АВ «зображено на рис. 2.9.5» [18].

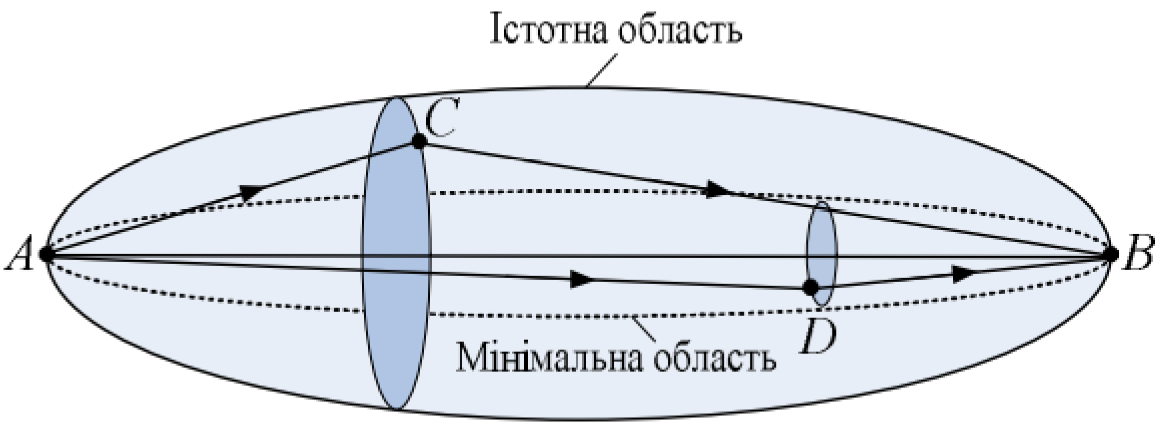

Рис. 2.9.5 Істотна і мінімальна область при поширенні радіохвиль

1.2 Вплив земної поверхні на розповсюдження радіохвиль

При певному розташуванні радіотраси, вплив земної поверхні може бути дуже істотним. Поверхнева хвиля досягає місця прийому, переміщуючись по поверхні землі, як показано на «рис. 1.2». Ця поверхнева хвиля може повторювати обриси як наслідок процесу дифракції. Коли поверхнева хвиля зустрічає об'єкт не перевищуючий її довжини хвилі, хвиля має тенденцію вигинатись чи огинати об'єкт. Чим менше будет розмір об'єкту, тим сильніше буде дифракційний вплив. Коли поверхнева хвиля проходить по Землі, вона викликає напруженість на Землі. Індукована напруга забирає енергію у поверхневої хвилі, тим самим послаблюючи хвилю по мірі її віддалення від передаючої антени. Щоб зменшити затухання, необхідно зменшити наведену напругу. Це робиться за допомогою вертикально поляризованих хвиль, які зводять до мінімуму ступінь контакту електричного поля хвилі з Землею. Коли поверхнева хвиля поляризована горизонтально, електричне поле хвилі паралельне поверхні Землі, і як наслідок, постійно з нею контактує.

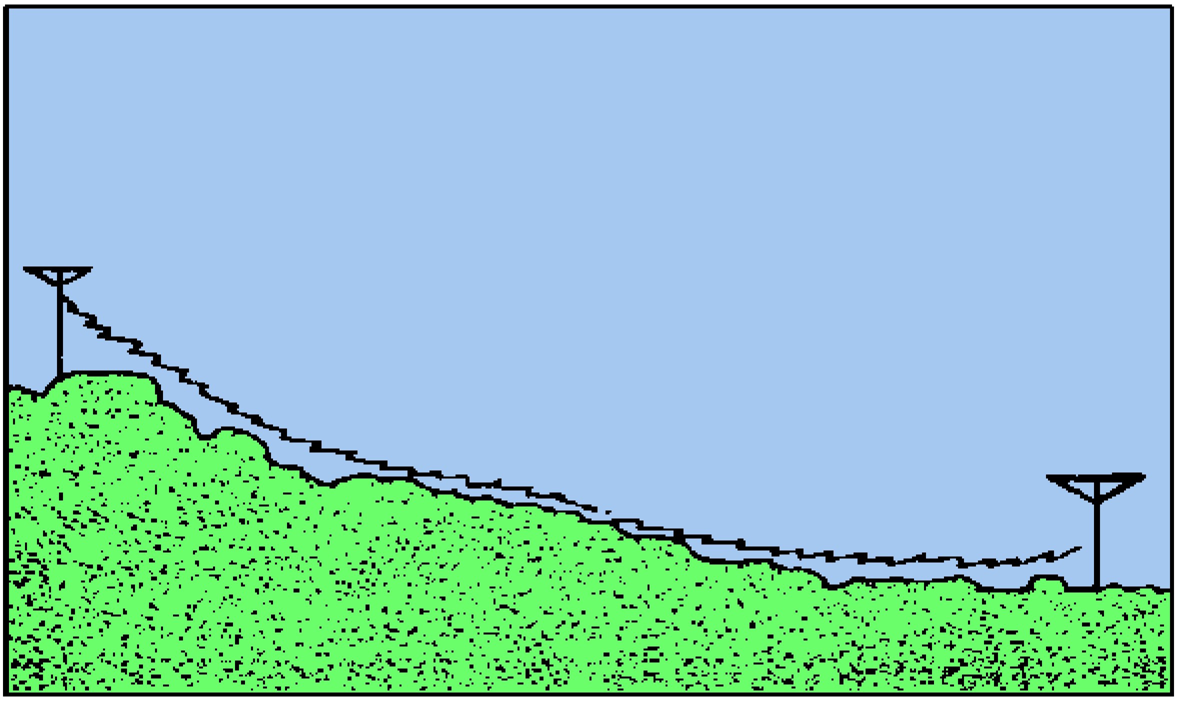

Рис. 1.2. Розповсюдження хвилі поблизу земної поверхні

Потім, хвиля повністю затухає на невеликій відстані від передаючої антени. З іншого боку, коли поверхнева хвиля вертикально поляризована, електричне поле вертикально по відношенню до Землі і просто проникає у поверхню Землі і виходить з неї. По цій причині, вертикальна поляризація значно перевагає горизонтальну поляризацію для розповсюдження поверхневих хвиль.

Поверхнева хвиля, що затухає внаслідок наведеної напруги, так же залежить від електричних властивостей місцевості, по якій розповсюджується хвиля. Краща поверхня – це поверхня з хорошою електропровідністю. Чим краще провідність, тим менше затухання [4].

Для низьких радіочастот наземні антени випромінюють електромагнітні хвилі, які рухаються вздовж поверхні Землі як у хвилеводі. Ослаблення поверхневих хвиль збільшується із збільшенням відстані, опору землі та частоти передачі. Ослаблення нижче за морську воду, яка має високу провідність, ніж за сушу, яка має низьку провідність. На частотах нижче 3 мегагерц поверхневі хвилі можуть поширюватися на дуже великі відстані. Діапазон від 100 км (близько 60 миль) при 3 мегагерцах до 10000 км (6000 миль) при 1 кілогерці не рідкість [5].

У більшості випадків, при розв’язанні задач по розрахунку радіотраси, приймальна та передавальні антени хнаїодяться відносно невисоко по відношенню до поверхні Землі. Таким чином, виникає необхідність брати до уваги вплив електромагнітного поля землі, її форму та рельєф. Як і будь-яке інше середовище, електрмоагнітні властивості земної поверхні можна охарактеризувати значенням діелектричної і магнітної проникності ε і μ відповідно, та питомою провідністю σ.

У переважній більшості випадків всі види земної поверхні вважаються немагнітним матеріалом, тобто їх значення магнітної проникності $\mu \approx 1$. Зазвичай, електричні параметри ґрунту визначаються їх вологонасиченістю [19]

Таблиця 3.1

Залежність питомого електричного опору від типу ґрунту

Type of Soil or water	**Typical Resistivity** (Ω / m)
Sea Water	2
Clay	40
Ground well and spring water	50
Clay and Sand mix	100
Shale, Slates, Sandstone	120
Peat, Loam and Mud	150
Lake and Brook Water	250
Sand	2000
Morane Gravel	3000
Ridge Gravel	15000
Solid granite	25000
Ice	100000

Основний вплив земної поверхні на розповсюдження радіохвиль – поява відбитої електромагнітної хвилі. Показником напрямку руху падаючої хвилі є вектор Пойнтінга $\overline{\Pi}_{пад}$. Її падіння під кутом θ до земної поврехні створює вібдиту хвилю з напрямком руху, що характеризує вектор Пойнтінга $\overline{\Pi}_{відб}$ «див на рис. 3.1».

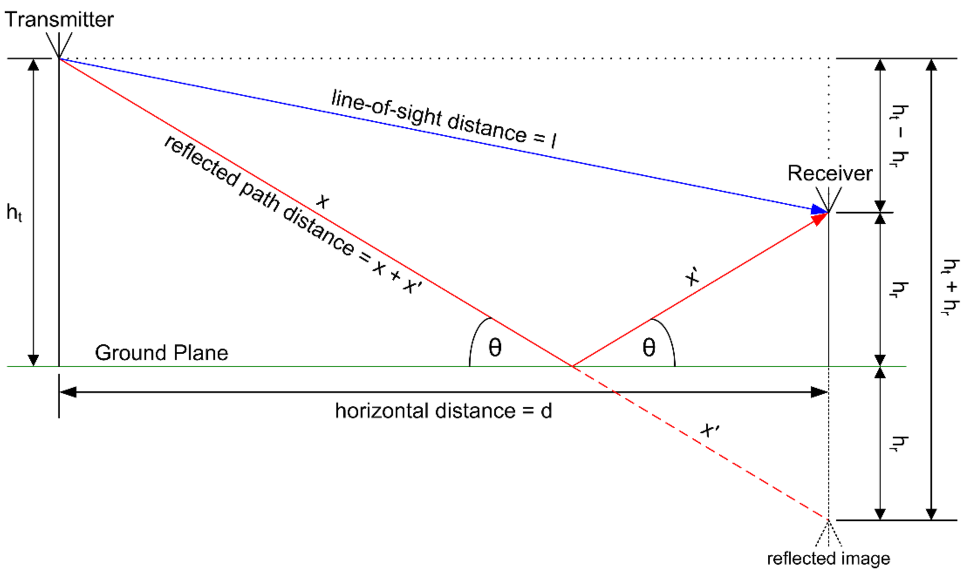

Рис. 3.1 Відбиття радіохвиль від земної поверхні

Для того щоб охарактеризувати відбиддя, вводиться коефіцієнт відбиття, що розраховується по формулі 3.1

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{E}_{\text{відб}}}{\dot{E}_{\text{пад}}} = \left|\dot{\Gamma}\right| e^{j\Phi} \tag{3.1}$$

На коефіцієнт відбиття впливає вид поляризації, горизонтальної чи вертикальної. Для горизонтальної поляризації:

$$\dot{\Gamma}_{\text{гор}}(\theta) = \frac{\sin\theta - \sqrt{(\varepsilon - j60\lambda\sigma) - \cos^2\theta}}{\sin\theta + \sqrt{(\varepsilon - j60\lambda\sigma) - \cos^2\theta}} \tag{3.2}$$

Для вертикальної:

$$\dot{\Gamma}_{\text{верт}}(\theta) = \frac{(\varepsilon - j60\lambda\sigma)\sin\theta - \sqrt{(\varepsilon - j60\lambda\sigma) - \cos^2\theta}}{(\varepsilon - j60\lambda\sigma)\sin\theta + \sqrt{(\varepsilon - j60\lambda\sigma) - \cos^2\theta}} \tag{3.3}$$

Залежність модуля горизонтального коефіцієнта відбиття $\left|\dot{\Gamma}_{\text{гор}}(\theta)\right|$ є монотонною, а модуля вертикального коефіцієнту відбиття $\left|\dot{\Gamma}_{\text{верт}}(\theta)\right|$ – немонотонною. Залежність досягає мінімуму при куті, що називається кут Брюстера [20].

Відбита хвиля проходить відстань, що рівна $x + x'$, і падає на поверхню під кутом θ, що рівний:

$$\theta = arctg(\frac{h_t + h_r}{l}) \tag{3.4}$$

Додатково, вводиться такий параметр як множник послаблення:

$$V = \sqrt{1 + R^2 + 2Rcos(\beta\Delta r - \Phi)} \tag{3.5}$$

Тут, R і Φ – модуль та аргумент комплексного коефіцієнта відбиття підстилаючої поверхні, $\beta -$коефіцієнта фази радіохвилі, і розраховується за формулою $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, Δr – різниця у відстані що пройшла пряма та відбита хвиля до кінцевої точки. Ця різниця розраховується за формулою: $\Delta r = 2h_t \cos(arctg(\frac{l}{h_t + h_r}))$.

Також, для моделювання розповсюдження радіохвиль біля поверхні Землі, бажано визначити розміри малої $L_{\text{м}}$ та великої $L_{\text{в}}$ осей еліпса перщої зони Френеля на відбиваючій поверхні

Значення $L_{\text{м}}$:

$$L_{\text{м}} = 2\sqrt{\frac{\lambda x x'}{l}} \tag{3.6}$$

З формули (3.6), значення $L_{\text{В}}$:

$$L_{\text{В}} = \frac{L_{\text{М}} l}{\sqrt{L_{\text{М}}^2 + l^2 (\frac{h_t + h_r}{l})}} \tag{3.7}$$

1.3 Математичні моделі розповсюдження радіохвиль в різних шарах земної атмосфери

При розповсюдженні радіохвиль над поверхнею Землі – вони поширюються в атмосфері. Будова атмосфери є багатошаровою, вона змінюється з висотою та змінює свої характеристики не тільки з ростом висоти, але й з зміною часу доби, пори року та погодних умов (тиску, вологості, температури і т.д.). У контексті даної лабораторної роботи, нас цікавить саме найнижчий шар атмосфери – тропосфера. Шар тропосфери закінчується на висоті до 15 км над поверхнею Землі. Вологість, температура і тиск зменшується з ростом висоти, також свою роль відіграє відсутність хмар на верхній межі тропосфери. При нормальних умовах, втрати на частотах до 30 МГц у тропосфері є незначним. Реальний вплив тропосфери на розповсюдження радіохвиль починається при частотах радіосигналу, значно вищих за 30 МГц [21].

Відносну діелектричну проникність тропосфери з урахуванням параметрів повітря можна розрахувати за формулою (4.1):

$$\varepsilon = 1 + \frac{a_1 p}{T} + \frac{a_2 \overline{\omega}}{T^2} \tag{4.1}$$

Де $p -$ тиск газу в мілібарах, $T -$ температура в градусах (у Кельвінах), $\overline{\omega}$ – абсолютна вологість повітря (у мілібарах). У формулі (4.1) параметри a_1 і a_2 є експериментально визначеними. Їх приблизне значення: $a_1 = 1.552 \cdot 10^{-4}$, $a_2 = 0.745$. Таким чином, можемо переписати вираз (4.1) таким чином:

$$\varepsilon = 1 + \frac{1.552 \cdot 10^{-4}}{T}\left(p + \frac{4810 \cdot \overline{\omega}}{T}\right) \tag{4.2}$$

Параметри $p, \overline{\omega}, T$ зазнають регулярних змін з висотою та погодними умовами, тому, напростіше виразити значення діелектричної проникності через залежність від висоти (4.3):

$$\varepsilon(h) = 1 + \Delta\varepsilon_0 \exp(\frac{gh}{\Delta\varepsilon_0}) \quad (4.3)$$

де $\Delta\varepsilon_0 = 1 - \varepsilon(0)$ – відхилення відносної діелектричної проникності від одиниці у самої поверхні Землі, тобто коли h можна вважати 0. Зазвичай, при розрахунках використовують поняття "стандартної радіоатмосфери", для якої $\Delta\varepsilon_0 = 5.78 \cdot 10^{-4}$ і $g = -7.85 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{м}}$.

Так як діелектрична проникність атмосфери плавно змінюється з висотою, траекторія радіохвилі стає трохи викривленою, це явище відомо як рефракція. Це явище можна спостерігати, якщо розглянути плоскошарову модель тропосфери «зображено на рис. 4.1»

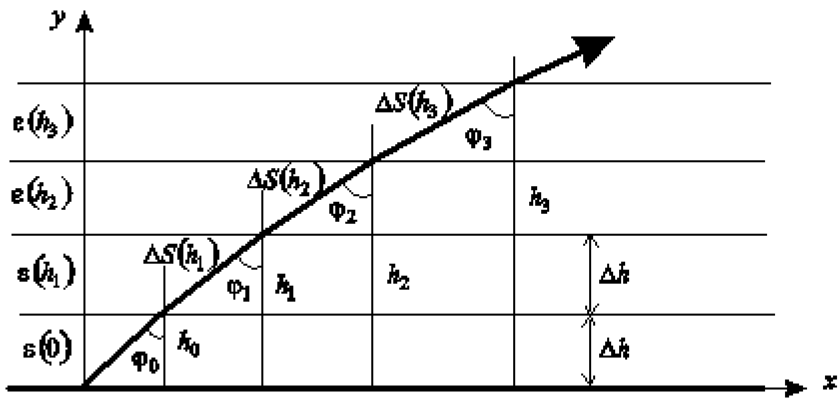

Рис. 4.1 Плоскошарова модель тропосфери

Як видно з графіку «рис. 4.1», тропосферу можна розбити за висотою на декілька значних шарів товщиною Δh. У цілях спрощення, в межах кожного такого шару, діелектричну проникність можна вважати постійною. Заломлення хвилі проходить саме при проходженні хвилі між шарами [22].

Згідно з обраною математичною моделлю розповсюдження радіохвиль у тропосфері, маємо кінцеву формулу для розрахунку довжини шляху всередині шару в залежності від висоти:

$$\Delta S(h) = \frac{\Delta h}{\cos\varphi(h)} = \frac{\Delta h}{\sqrt{1 - \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(h)} \sin^2\varphi_0}} \quad (4.4)$$

Є позитивна і негативна рефракція. Позитивна рефракція виникає коли траекторія хвилі вигинається у бік Землі, тобто діелектрична проникність падає з висотою (g < 0). Негативна рефракція – траекторія хвилі відхиляється від поверхні Землі, при зростанні діелектричної проникності з висотою (g > 0) [23].

Іоносфера – це шар верхньої атмосфери Землі, і простягається приблизно на висоті з 48 км до 965 км. Цей слой включає в себе термосферу і частини мезосфери і екзосфери. Іоносфера характерна тим, що вона досить сильно іонізується сонячною радіацією. Іоносфера грає суттєву роль у розповсюдженні радіохвиль [24].

Іоносфера має велику кількість вільних електронів та іонів, які з'являються в результаті іонізації. Зустріч позитивного іона з електроном утворює електрично нейтральну молекулу, що називається рекомбінацією, і вона стає тим інтенсивнішою, чим більша густина газу.

Електронна густина розподілена у внутрішній іоносфері, та має кілька характерних відносних максимумів. Такі максимуми називаються шарами D, E і F. Параметри цих шарів міняються в залежності від часу доби та сезонних змін. Шар D існує лише під впливом сонячної радіації тільки вдень, вночі він зникає. Тим часом, шар F влітку розділяється на 2 шари, F_1 та F_2.

Виходячи з обраної моделі розповсюдження радіохвиль, розподіл електронної щільності у шарі задається виразом:

$$N_e(h) = N_{\text{er}}\left(\frac{2z}{z_m} - \frac{z^2}{z_m^2}\right) \qquad (5.1)$$

Де $z = h - h_0, ; z_m = h_m - h_0; N_{\text{er}} -$ максимальна електронна густина в шарі $\left(\frac{1}{\text{м}^3}\right)$; $h -$ висота (м); $h_m -$ максимальна висота шару (м); h_0 – висота нижньої межі шару (м);

Таким чином, виходячи з виразу (5.1), N_e буде лежати у межах $h_0 < h < h_0 + 2z_m$, де z_m- напівтовщина шару. При виході за межі цього інтервалу, $N_e(h) = 0$.

Для нашої моделі, справедливими значеннями для шарів D, E, F, F_1, F_2 буду такі значеня, які наведено у «табл. 5.1»

Таблиця 5.1

Середні параметри параболічної моделі іоносферних шарів

Параметри шарів	h_0, км	z_m, км	N_{er}, 1/см^3
D день ніч	50 –	40 –	10^3 0
E день ніч	100 100	60 60	$5 \cdot 10^4$ $5 \cdot 10^3$
F, зима день ніч	200 205	90 100	10^6 $2{,}5 \cdot 10^5$
F_1, літо день ніч	160 –	80 –	$2{,}5 \cdot 10^5$ 0
F_2, літо день ніч	220 200	120 100	$5 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^5$

Для нашої обраної моделі, справедливи будуть наступні вирази:

$$\varepsilon = 1 - 80.8\frac{N_e}{f^2} \qquad (5.2)$$

Виходячи з формули (5.2), можна зробити висновок, що діелектрична проникність іоносфери є меншою за діелектричну проникність вакууму. Таке явище виникає по причині конвекційного струму, при якому електрони рухаються проти поля. Тобто, струм зсуву стає меншим на величину конвекційного струму. Також, діелектрична проникність досить сильно залежить від електронної концентрації та від частоти, так як в іоносфері присутнє явище дисперсії.

Отже, маємо кінцеву формулу для довжини шляху всередині шару:

$$\Delta S(h) = \frac{\Delta h}{\cos\varphi(h)} = \frac{\Delta h}{\sqrt{1 - \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(h)}\sin^2\varphi_0}} \qquad (5.3)$$

Для дослідження розповсюдження радіохвиль поблизу земної поверхні, використовуємо модель Окамуро Хата [6]. Формули цієї моделі спеціально підібрані для умов розповсюдженні радіохвиль у разноманітних територіальних задачах: місто, передмістя, сельска місцевість. Ця модель увійшла у склад рекомендацій ITU-R P. 528 для прогнозування напруженості поля в наземному сухопутному рухомому радіозв'язку [7]. Дана модель дає можливість виконувати розрахунки при наступних обмеженнях:

1. Частота сигнала: $f = 100 \dots 1500$ МГц
2. Дальність зв'язку $R = 1 \dots 100$ км
3. Висота підйому антени базової станції (БС) $h_{\text{БС}} = 20 \dots 200$ м
4. Висота підйому антени абонентської станції (АС) $h_{\text{АС}} = 1 \dots 10$ м

"Модель двох променів" застосовують при розрахунках радіорелейних ліній прямої видимості і каналів рухомого зв'язку. Для відстаней, котрі знаходяться у межах $\frac{18h_1h_2}{\lambda} < r < 0.8r_0$ відстань прямої видимості, залежність напруженості поля від відстані r наближається до зворотньо-квадратичної $\frac{1}{r^2}$ і визначається по формулі Введенського [8].

Для дослідження розповсюдження радіохвиль в топосфері, було обрано плоскошарову модель тропосфери. Основне математичне співвідношення цієї моделі: $\sqrt{\varepsilon(0)}\sin\varphi_0 = \sqrt{\varepsilon(h_1)}\sin\varphi_1 = \sqrt{\varepsilon(h_2)}\sin\varphi_2 = \sqrt{\varepsilon(h)}\sin\varphi(h)$. Звідси випливає така формула:

$$sin\varphi(h) = \sqrt{\frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(h)}}\sin\varphi_0$$

Для дослідження розповсюдження радіохвиль в іоносфері було обрано параболічну модель шару. Ця модель характерна тим, що розподіл електронної щільності $N_e(h)$ у шарі задається виразом:

$$N_e(h) = N_{\text{ег}}(\frac{2z}{z_m} - \frac{z^2}{z_m^2})$$

Також, була використана плоскошарова модель іоносфери, основне математичне співвідношення є аналогічним до плоскошарової моделі тропосфери, тобто: $\sqrt{\varepsilon(0)}\sin\varphi_0 = \sqrt{\varepsilon(h_1)}\sin\varphi_1 = \sqrt{\varepsilon(h_2)}\sin\varphi_2 = \sqrt{\varepsilon(h)}\sin\varphi(h)$

1.4 Обгрунтуваня вибору математичних моделей для розробки програмного комплексу

Набір математичних моделей для розповсюдження радіохвиль у вільному просторі, біля земної поверхні, у атмосфері та тропосфері, було обрано у зв'язку з простотою їх програмної реалізації. Обрані моделі поєднують у собі точність та наочність при їх моделюванні, а також їх можна задати у міру простими математичними формулами, такими, що їх можна реалізувати використовуючи тільки стандартні класи та методи стандартної бібліотеки мови програмування TypeScript стандарту ES6 [26].

1.5 Висновок до першого розділу

Згідно з завдання, було проведено аналіз існуючих математичних моделей розповсюдження радіохвиль в атмосфері землі. Також, було обрано і обґрунтовано вибір математичних моделей розповсюдження радіохвиль в атмосфері землі для реалізації програмного комплекса.

Проаналізувавши основні принципи розповсюдження радіохвиль у різних середовищах, а саме: розповсюдження радіохвилі у вільному просторі, розповсюдження радіохвиль поблизу земної поверхні, розповсюдження радіохвиль у тропосфері та іоносфери, було обрано найбільш зручні та наочні математичні моделі, для розрахунку усіх необхідних параметрів програмним методом. Таким чином, для розповсюдження радіохвиль поблизу земної поверхні, було обрано модель Окамура – Хата, що враховує усі найважливіші та необхідні параметри для розповсюдження радіохвиль. Для моделювання розповсюдження радіохвиль у тропосфері і іоносфері, було обрано плоскошарову модель тропосфери та іоносфери відповідно. Також, для деяких обчислень було обрано параболичну модель іоносфери.

РОЗДІЛ 2 Розробка віртуальних лабораторних робіт для дослідження розповсюдження радіохвиль

2.1 Обґрунтування вибору методу моделювання розповсюдження радіохвиль

Проаналізувавши методи моделювання лабораторних робіт по темам: " Розповсюдження радіохвиль у вільному просторі", " Дослідження зон Френеля", " Розповсюдження радіохвиль поблизу земної поверхні", "Розповсюдження радіохвиль у тропосфері", "Розповсюдження радіохвиль у іоносфері", було проаналізовано та обрано набір технологій, мови програмування та архітектуру програмного забезпечення.

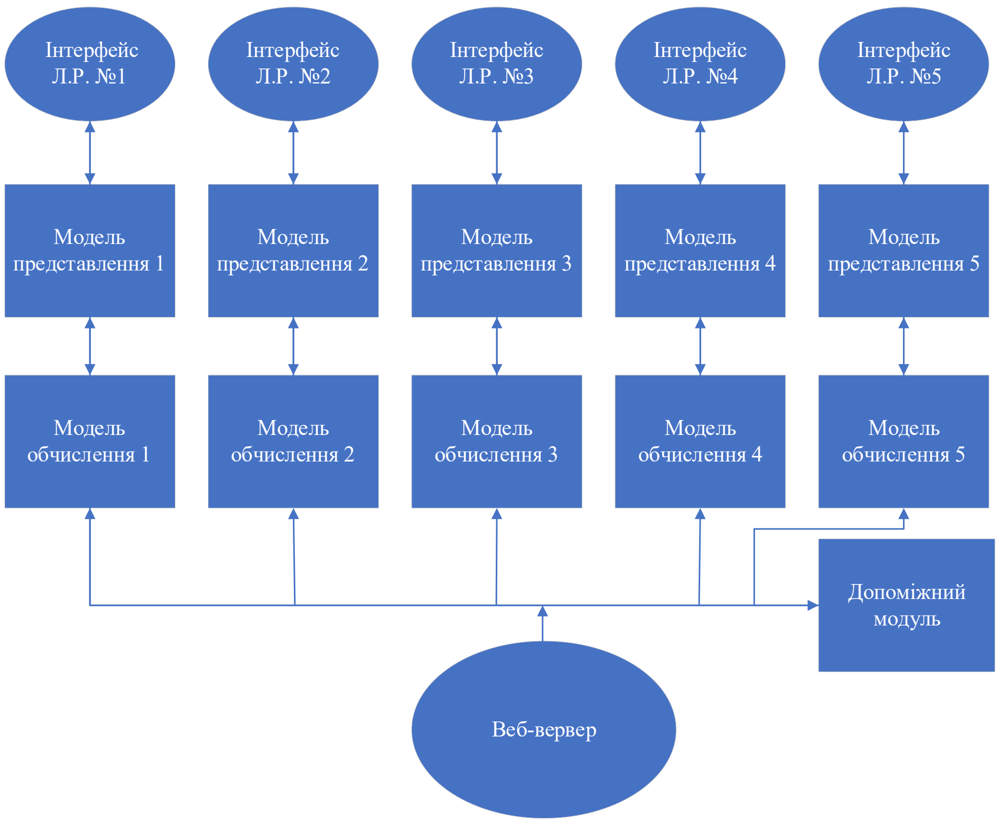

Рис. 2.1. Архітектура розробленого програмного комплексу

Кафедра ЕРТМІР					НАУ		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Виконав		Катушонок Ф.О.			**Розробка віртуальних лабораторних робіт для дослідження розповсюдження радіохвиль**	Літера	Аркуш	Акрушів
Керівник		Задорожний О.С.						
Консультант						404 171		
Н-контр.		Сініцин Р.Б.						
Зав. каф.		Шутко В.М.						

У якості архітектури програмного комплексу було обрано досить популярний шаблон MVVM (Model, View, View-Model) – тобто модель, представлення, модель-представлення. Застосування даного шаблону у розробленому комплексі можна побачити на «див рис. 2.1». Обраний шаблон допоміг зробити структуру програмного забезпечення менш мнонлітною, що пришвидшило розробку та дозволило з легкістю додавати новий функціонал до програмного комплексу [9].

У якості мови програмування було обрано строго типізовану мову програмування TypeScript, що після компіляції трансформується у JavaScript [10]. Така система типів у значній мірі зменшила кількість потенціальних проблем з кодом і захистило програмне забезпечення від непередбаченої поведінки [11].

Також, для швидкості та комфорту розробки було обрано технологію Angular 10, яка допомагає більш просто побудувати веб-додаток та чітко слідувати MVVM шаблону [12]. Додатково, було додано відтримку PWA (Progressive Web Application), технології, що дозволяє запускати веб сайт як повноцінну ПК програму [13].

2.2 Розробка п’яти віртуальних лабораторних робіт

Було розроблено програмний комплекс для моделювання 5 лабораторних робіт, для таких тем як: “ Розповсюдження радіохвиль у вільному просторі”, “ Дослідження зон Френеля”, “ Розповсюдження радіохвиль поблизу земної поверхні”, “Розповсюдження радіохвиль у тропосфері”, “Розповсюдження радіохвиль у іоносфері”.

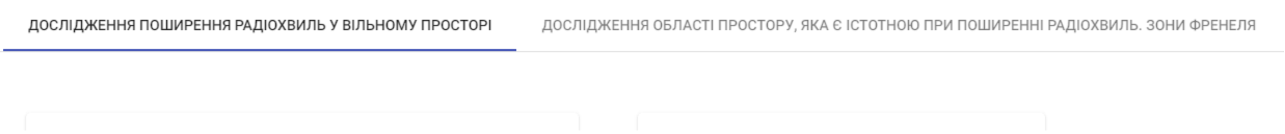

Рис. 2.2. Панель навігації по лабораторним роботам

Для переходу між лабораторними роботами було створено верхню навігаційну панель з 5 вкладками «зображено на рис. 2.2».

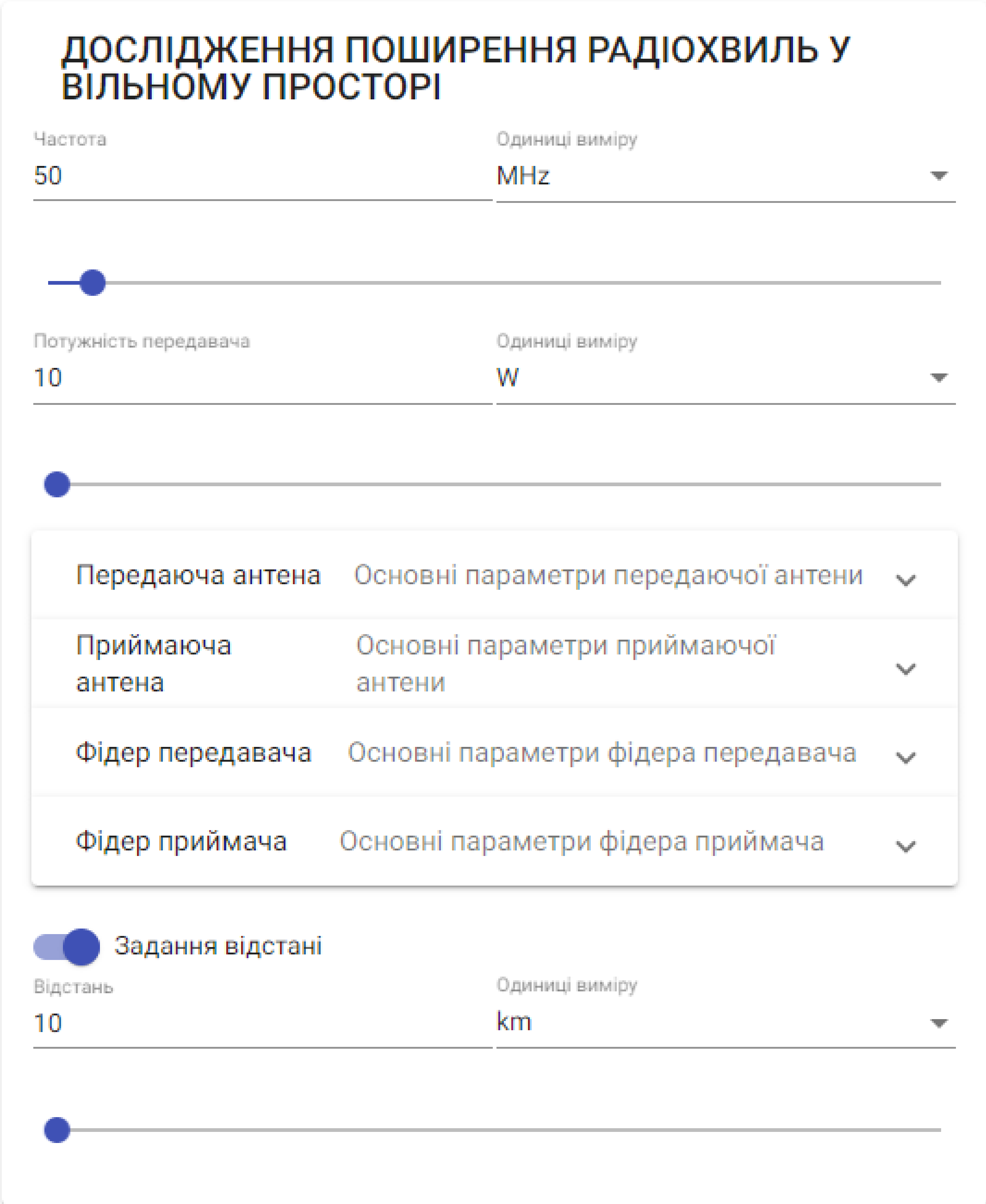

Рис. 2.3. Блок вводу вхідних даних

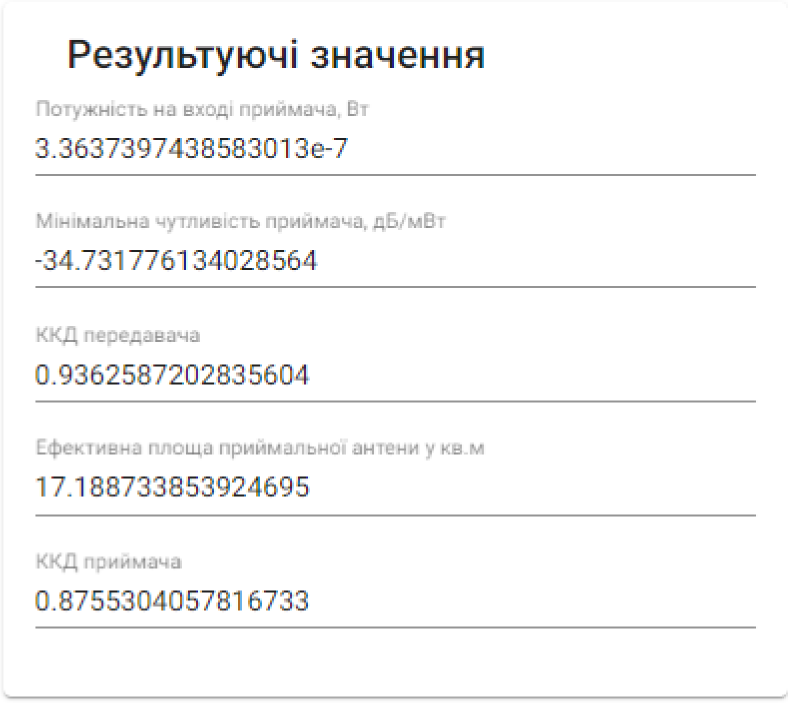

Рис. 2.4. Блок вихідних даних

Кожна лабораторна робота містить у собі блок вводу вхідних даних «див рис. 2.3» та блок вихідних даних (при необхідності) «див рис. 2.4». Кожна лабораторна робота містить в собі деякі початкові дані, які можно з легкістю змінити іншими даними або даними згідно з обраним варіантом лабораторної роботи.

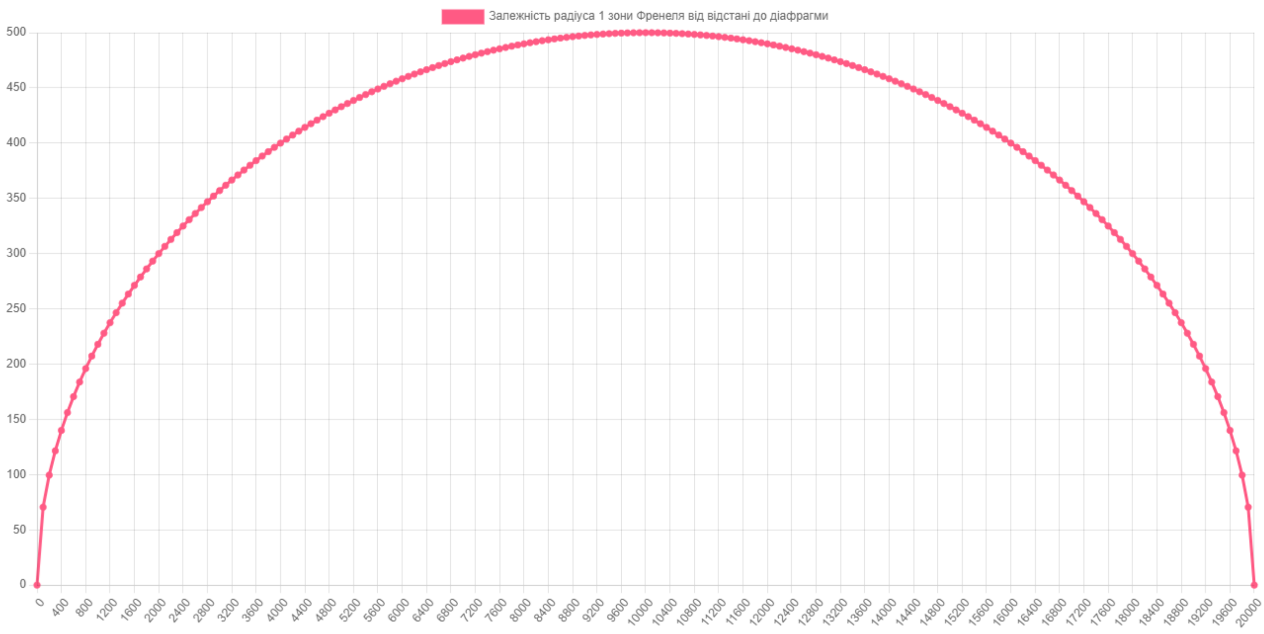

Рис. 2.5. Приклад графіку для лабораторної роботи

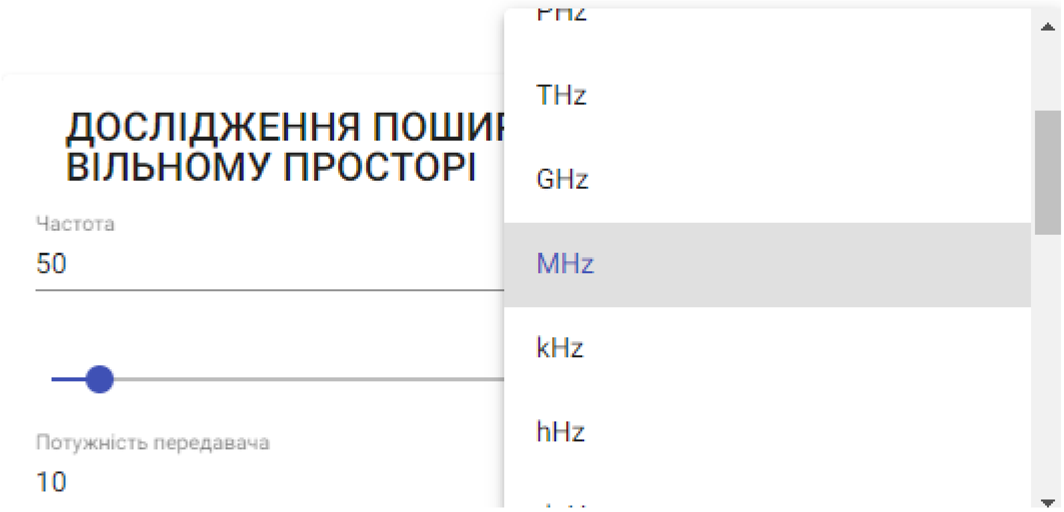

Рис. 2.6. Вибір одиниць виміру

Також, кожна лабораторна робота містить у собі один або декілька графіків, що будуються на основі вхідних даних та змінюються (тобто, перерисовуються) у реальному часі при зміні даних «див рис. 2.5». У більшості величин можна задавати одиниці виміру, для зручності вводу даних «зображено на рис. 2.6».

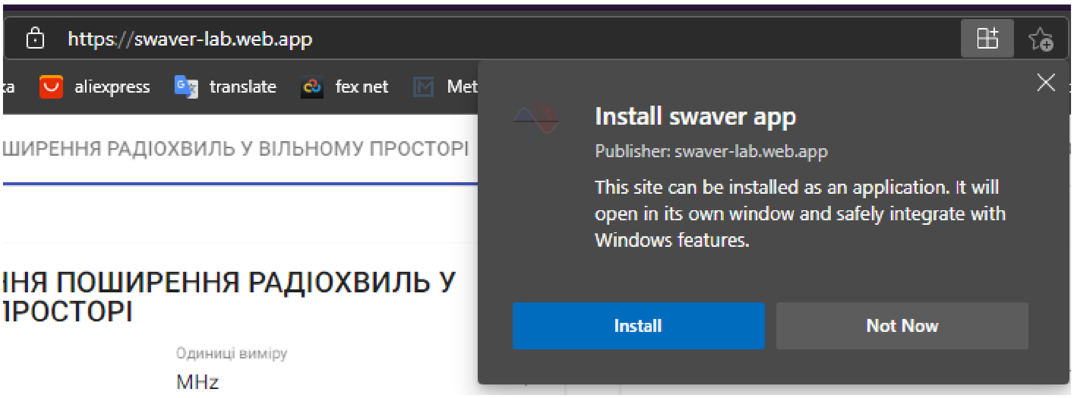

Рис. 2.7. Встановлення веб-додатку

При необхідності, можна встановити веб-додаток у якості ПК програми (при необхідності, для можливості працювати у програмі навіть у режимі без інтернету) «див рис. 2.7» [14].

2.2.1 Розповсюдження радіохвиль у вільному просторі

Мета даної лабораторної роботи полягає у дослідженні закономірності поширення радіохвиль у вільному просторі.

На «рис. 2.8.3» зображено інтерфейс програмного комплексу для лабораторної роботи по дослідженню розповсюдження радіохвиль у вільному просторі.

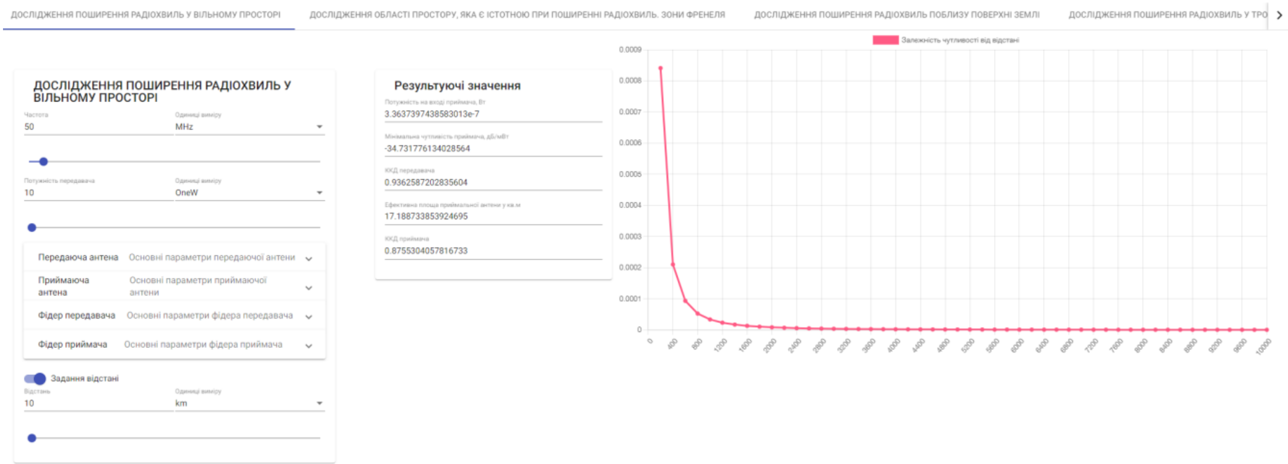

Рис. 2.8.3. Інтерфейс лабораторної установки для дослідження розповсюдження радіохвиль у вільному просторі

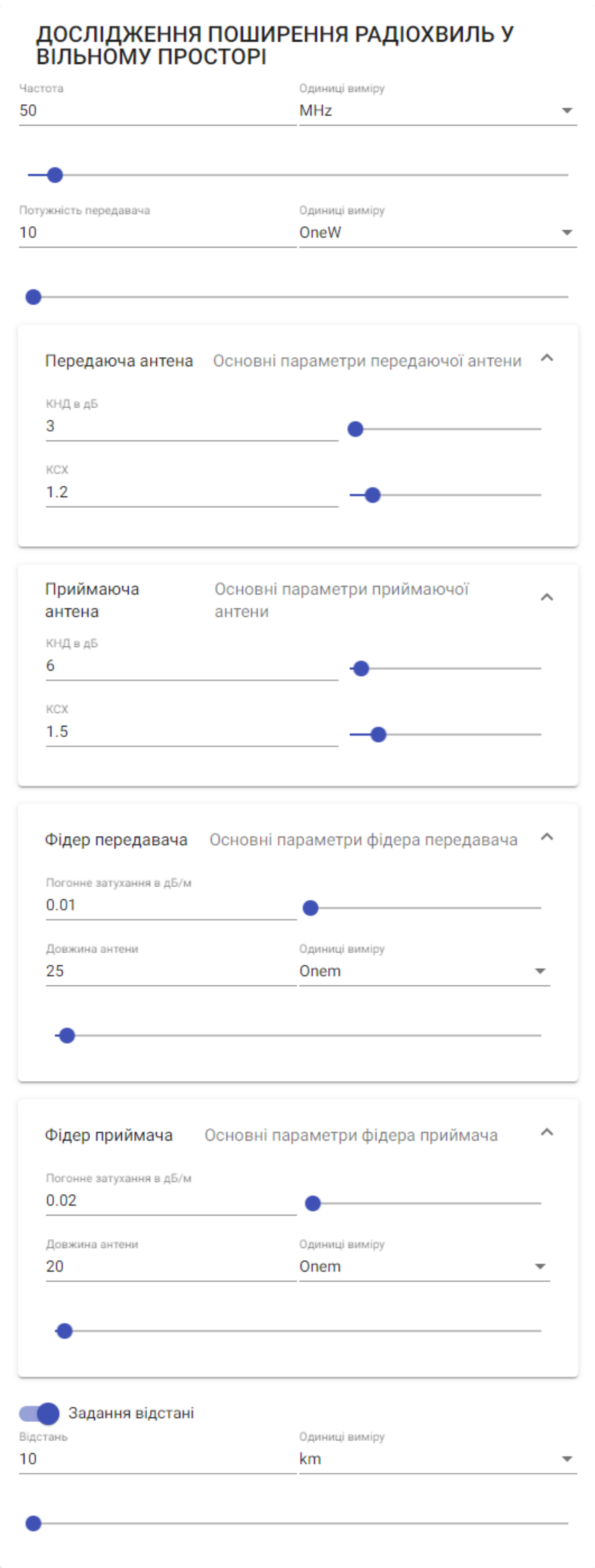

Рис. 2.8.4. Блок вводу даних

На «рис. 2.8.4» зображено блок вводу даних, де можно внести такі параметри як:

- Частота
- Потужність передавача
- КНД антени передавача
- КСХ передавача
- КНД приймача
- КСХ приймача
- Погонне затухання фідера передавача
- Довжина антени передавача
- Погонне затухання фідера приймача
- Довжина антени приймача
- Відстань (у режимі “Задання відстані”)
- Чутливість приймача (у режимі “Задання чутливості приймача”)

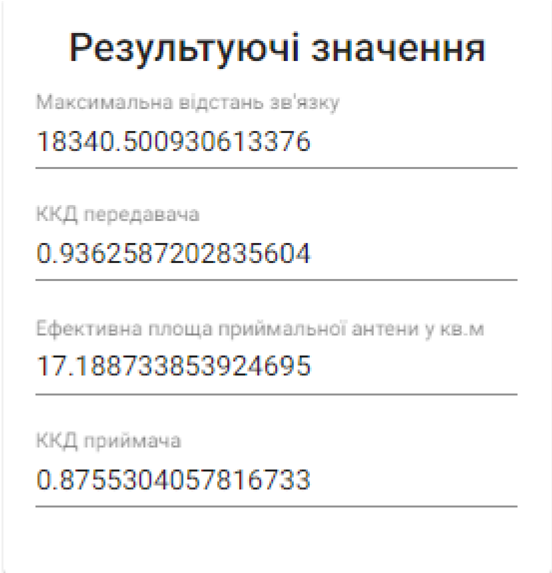

Рис. 2.8.5 а. Блок результуючих значень у режимі задання чутливості

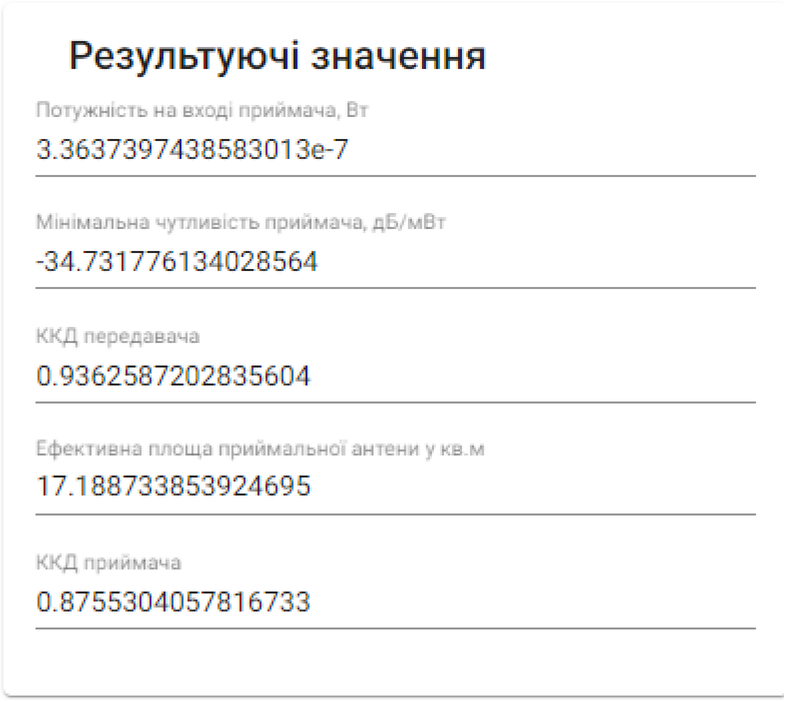

Рис. 2.8.5 б. Блок результуючих значень у режимі задання відстані

Також, на «рис. 2.8.5 а» і «рис. 2.8.5 б» зображено блок результуючих значень, за допомогою яких можна отримати такі параметри:

- Потужність на вході приймача
- Максимальна відстань зв’язку (у режимі “Задання чутливості приймача”)
- Мінімальна чутливість приймача (у режимі “Задання відстані”)
- ККД передавача
- Ефективна площа приймальної антени
- ККД приймача

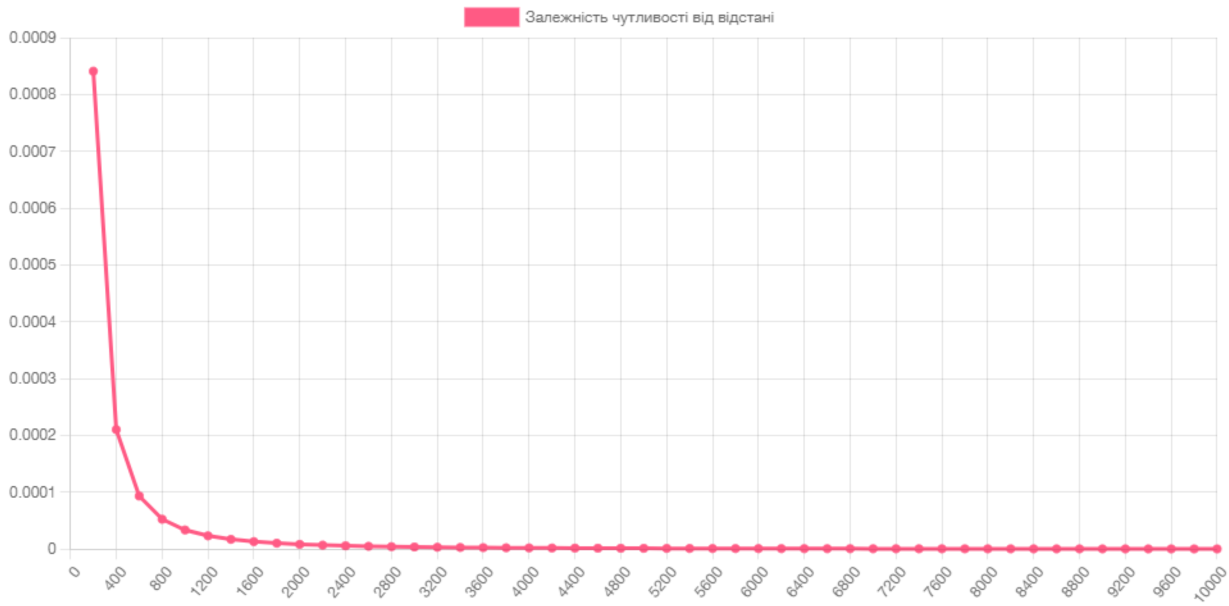

Рис. 2.8.6. Графік залежності мінімальної чутливості приймача від відстані

Також, програмний комплекс автоматично будує графік, що показує залежність мінімальної чутливості приймача від відстані між антенами «див на рис. 2.8.6» Конфігурація цього графіка показана на «рис. 2.8.7» [17].

```
private sensivityGraphConfig: ChartConfiguration = {
    type: 'line',
    data: {
      labels: this.TraceChartPoints.map(pnt => pnt.x),
      datasets: [{
        label: 'Залежність чутливості від відстані',
        backgroundColor: 'rgb(255, 90, 132)',
        borderColor: 'rgb(255, 90, 132)',
        data: this.TraceChartPoints.map(pnt => pnt.y)
      }]
    },
    options: {
      scales: {
        y: {
            beginAtZero: false,
        },
      },
      plugins: {
        tooltip: {
          enabled: true,
          callbacks: {
            label: (a) => {
              return `Висота: ${a.raw}`;
            }
          }
        }
      }
    }
  };
```

Рис. 2.8.7. Код конфігурації графіка

2.2.2 Дослідження зон Френеля

Мета даної лабораторної роботи полягає у вивченні особливості процесу розповсюдження радіохвиль та визначає область простору, в якій відбувається безпосередня передача енергії радіохвиль.

У розробленому програмному комплексі, розділ з даною лабораторної роботи має наступний вид «зображено на рис. 2.9.6»:

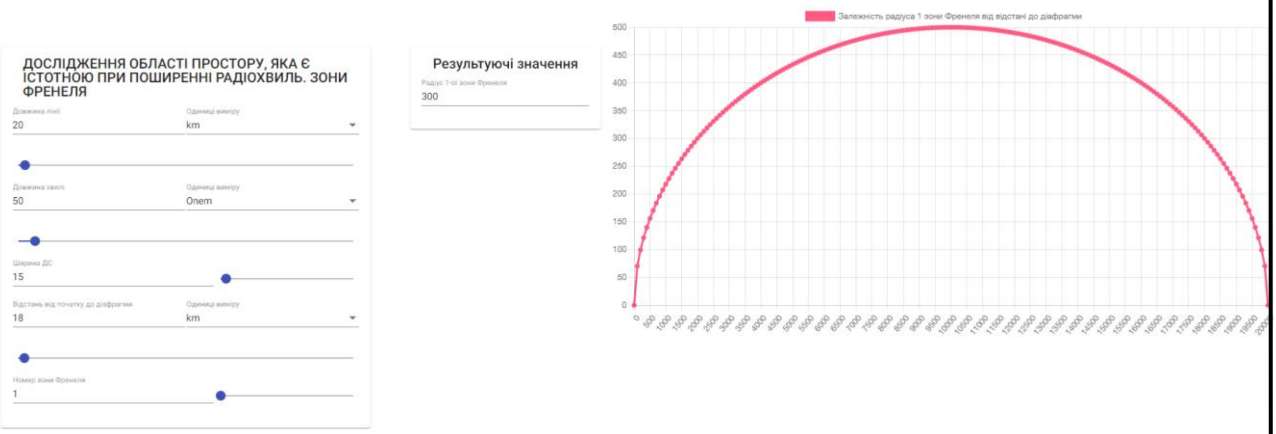

Рис. 2.9.6 Інтерфейс розділу лабораторного комплексу для дослідження зон Френеля

Даний розділ містить блок вводу даних «зображено на рис. 2.9.7»:

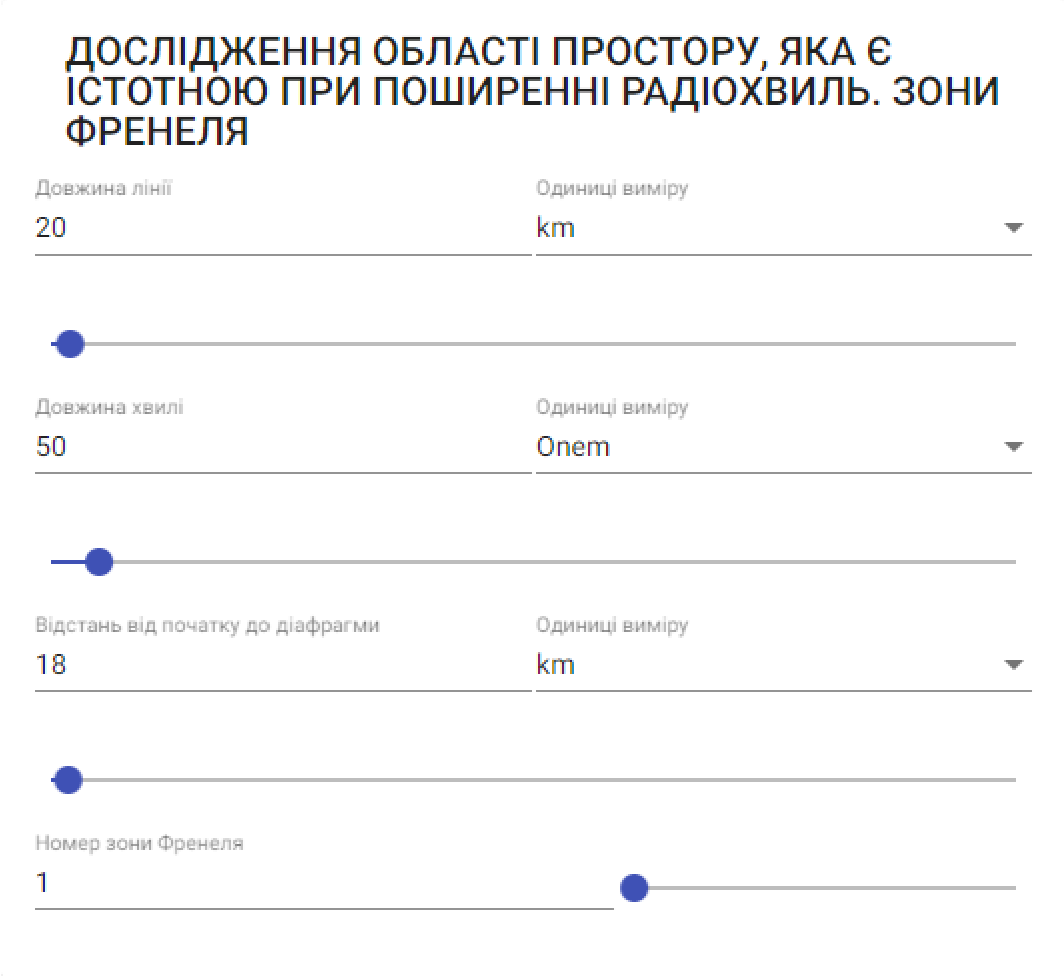

Рис. 2.9.7 Блок вводу даних

Даний блок дозволяє внести такі дані як:

- Довжина лінії

- Довжина хвилі
- Відстань від початку до діафрагми
- Номер зони Френеля

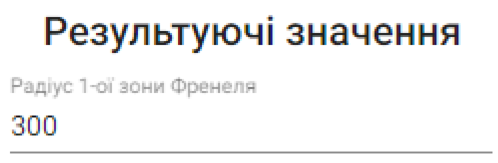

Рис. 2.9.8 Результуючий блок

Результуючий блок «зображено на рис. 2.9.8», він місить інформацію про радіус першої зони Френеля на основі даних з блоку вводу даних.

Також, поряд з результуючим блоком розташовано графік «див на рис. 2.9.9» що показує залежність радіуса першої зони Френеля від розташування екрану відносно початкової точки радіотраси на основі вхідних даних.

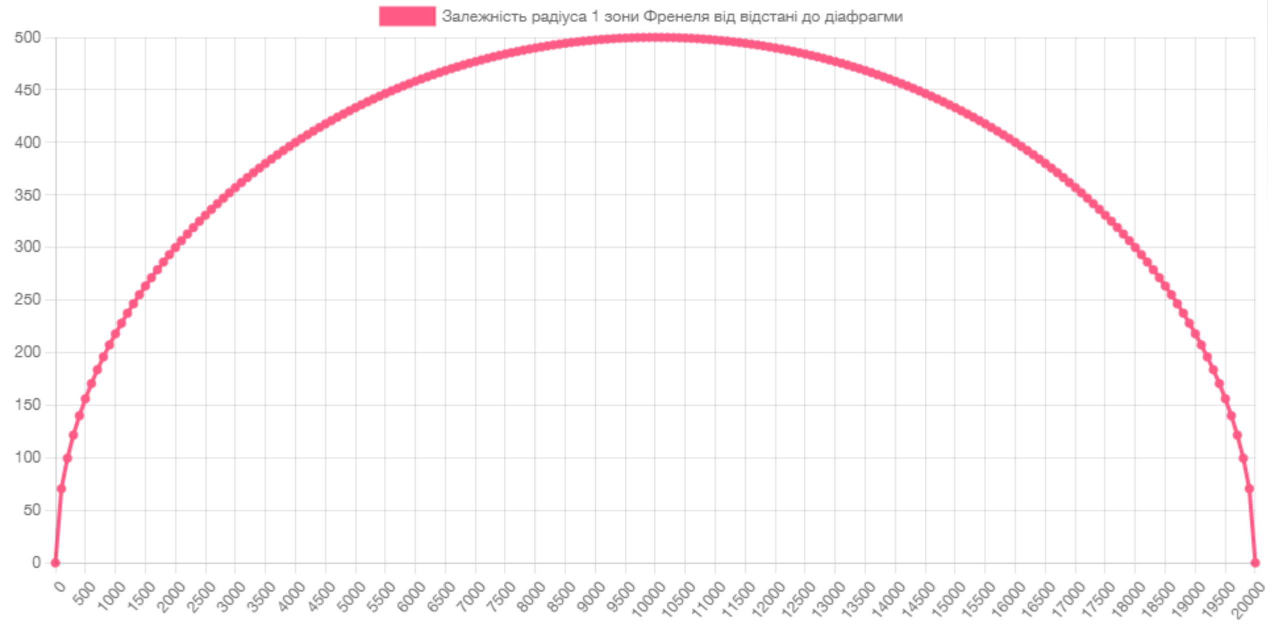

Рис. 2.9.9 Графік залежності радіуса першої зони Френеля від розташування екрана

Таким чином, даний розділ лабораторного комплексу дозволяє визначити залежність радіуса зони Френеля від параметрів радіотраси.

2.2.3 Розповсюдження радіохвиль поблизу земної поверхні

Метою даної лабораторної роботи є вивчення закономірності поширення радіохвиль поблизу поверхні Землі.

Інтерфейс даної лабораторної установки має вигляд «див на рис. 3.2»

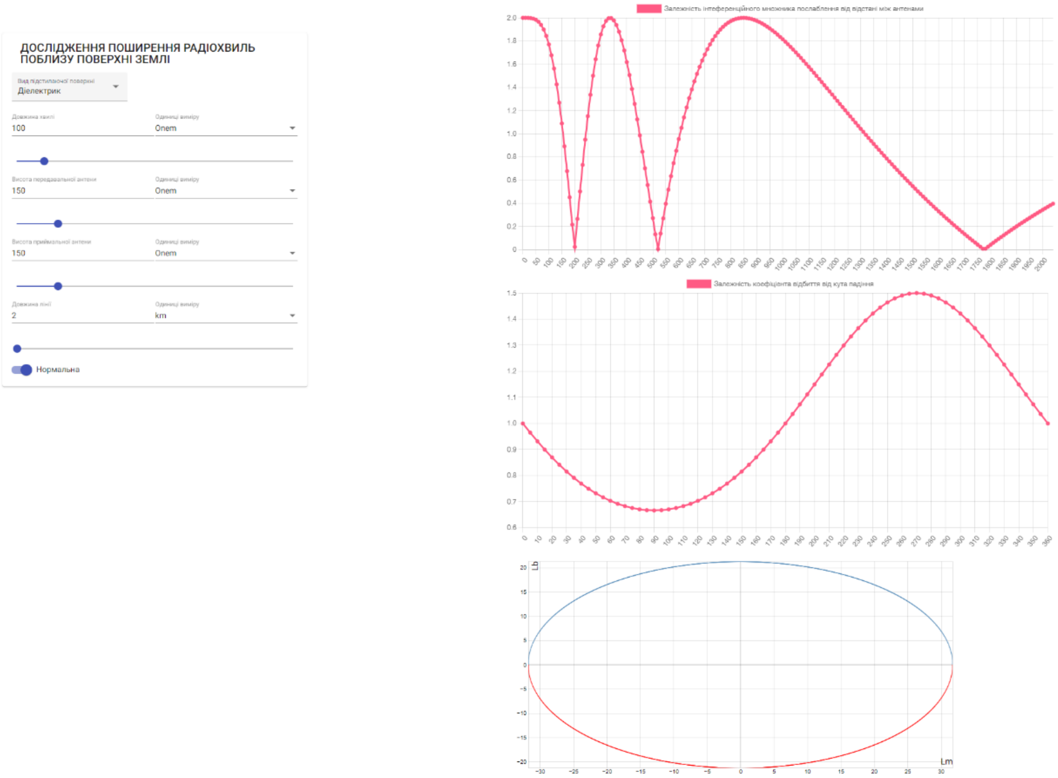

Рис. 3.2 Інтерфейс лабораторного програмного комплексу для лабораторної роботи по розповсюдженню радіохвиль поблизу земної поверхні

Блок вводу даних зображено на «рис. 3.3». У цьому блоці, ми маємо можливість задати:

- Вид підстелаючої поверхні
- Довжину хвилі
- Висоту передавальної антени
- Висоту приймальної антени
- Довжину лінії
- Вид поляризації: Нормальна (перпендикулярна, горизонтальна) чи паралельна (вертикальна)

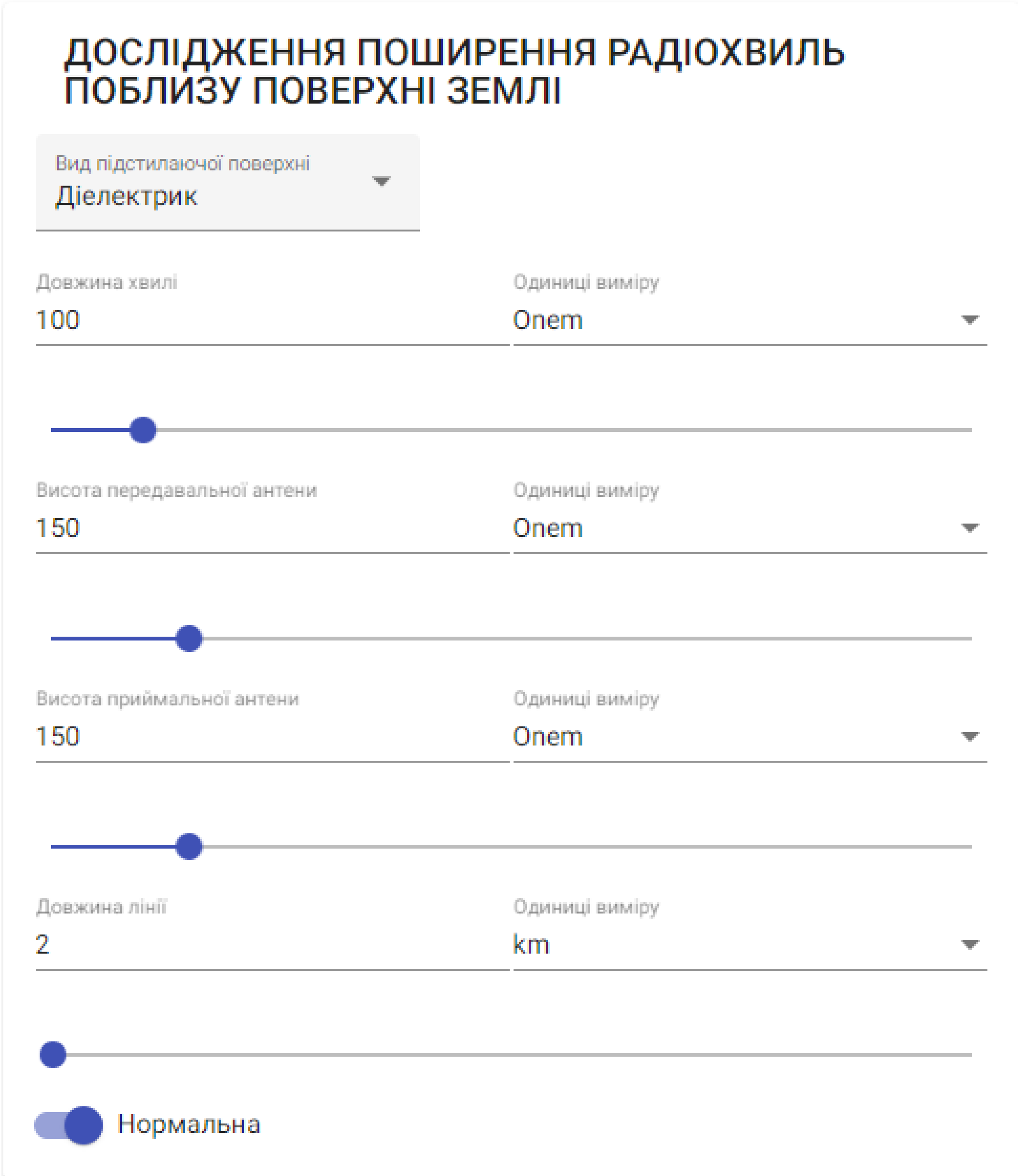

Рис. 3.3 Блок вводу даних

Поряд з блоком вводу даних, розташовано 3 графіки, що відображують такі залежності:

- Залежність інтерференційного множника послаблення від відстані між антенами «див на рис. 3.4»

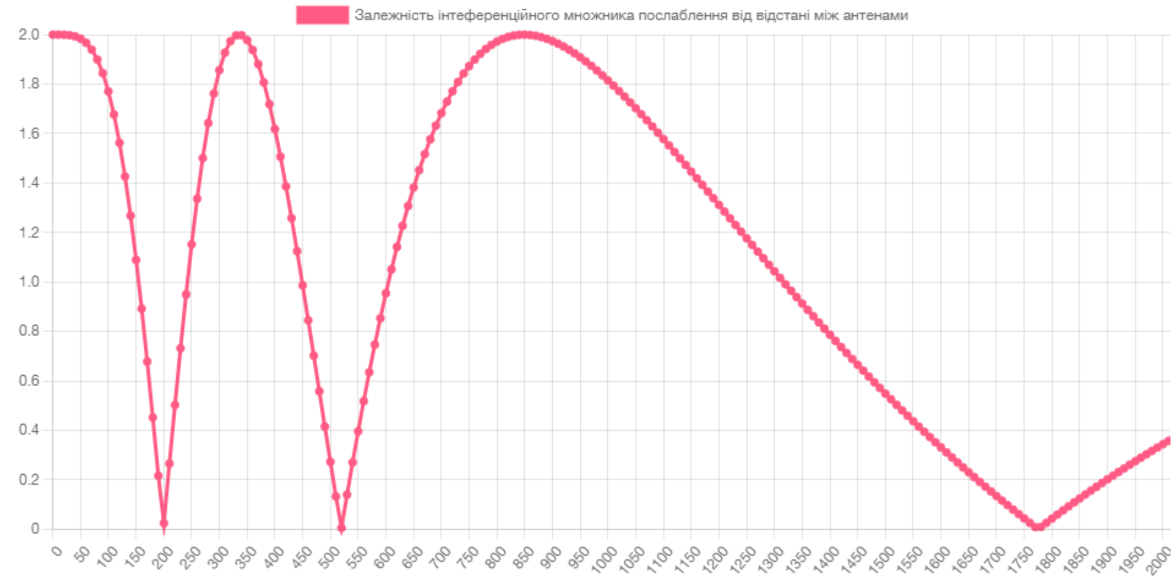

Рис. 3.4 Графік залежності інтерференційного множника послаблення від відстані між антенами

Графік цієї залежності має гармонічний характер, який змінюється від 0 до 2 по вертикалі (інтерференційного множника послаблення)

- Залежність коефіцієнта відбиття від кута падіння «див на рис. 3.5.1», «див на рис. 3.5.2» і «див на рис. 3.5.3»

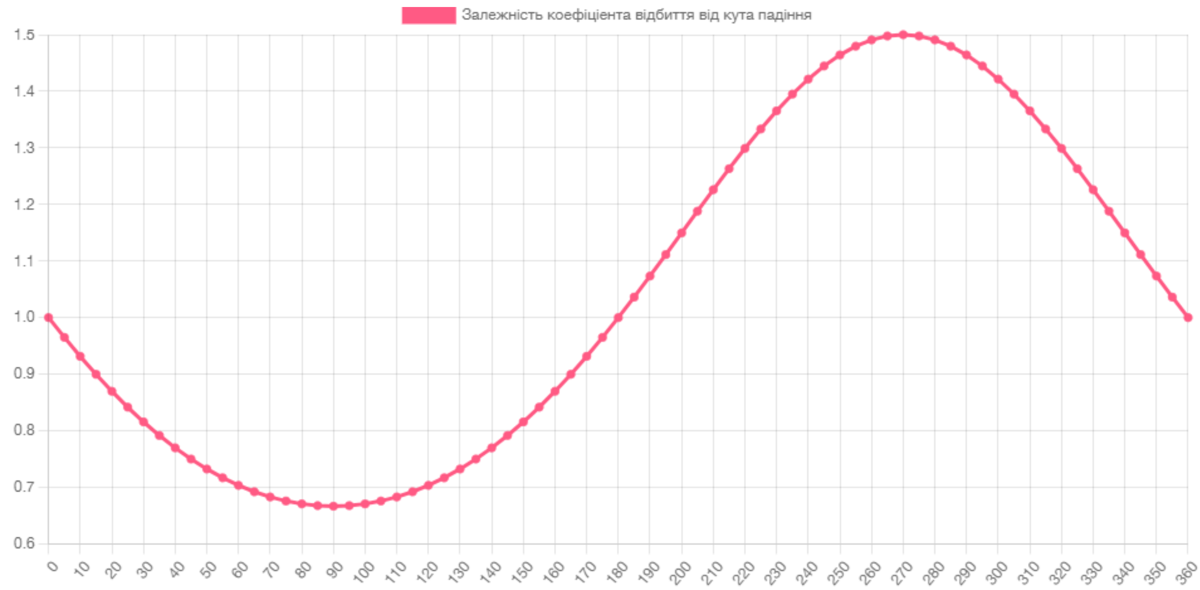

Рис. 3.5.1 Графік залежності коефіцієнта відбиття від кута падіння при нормальній поляризації

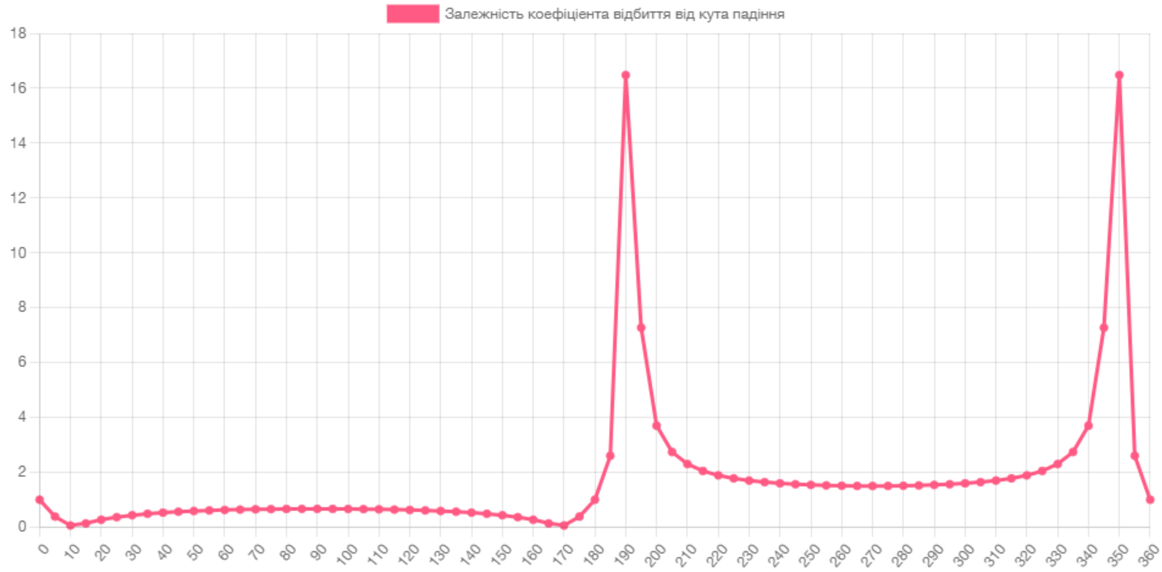

Рис. 3.5.2 Графік залежності коефіцієнта відбиття від кута падіння при паралельній поляризації

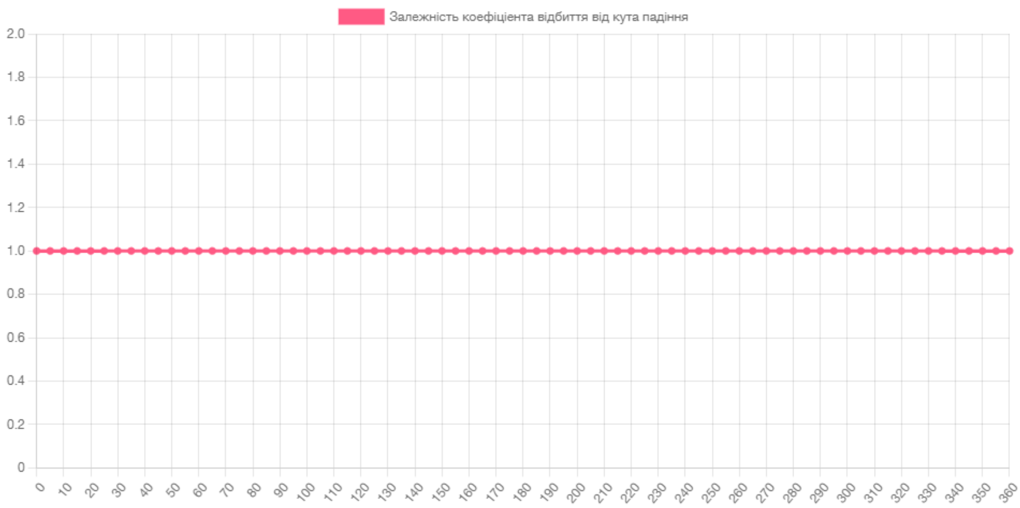

Рис. 3.5.3 Графік залежності коефіцієнта відбиття від кута падіння у випадку, коли підстилаюча поверхня – провідник

Як видно з графіків «рис. 3.5.1» і «рис. 3.5.2», коефіцієнт відбиття залежать від кута, під яким хвиля падає на підстилаючу поверхню. Для обох випадків, діелектрична проникність середовища бралась як для вологого ґрунту, тобто $\varepsilon = 25$. Згідно з графіком на «рис. 3.5.3», у випадку коли підстилаюча поверхня – провідник, модуль коефіцієнта відбиття завжди буде рівний 1.

- Розміри осей еліпса першої зони Френеля

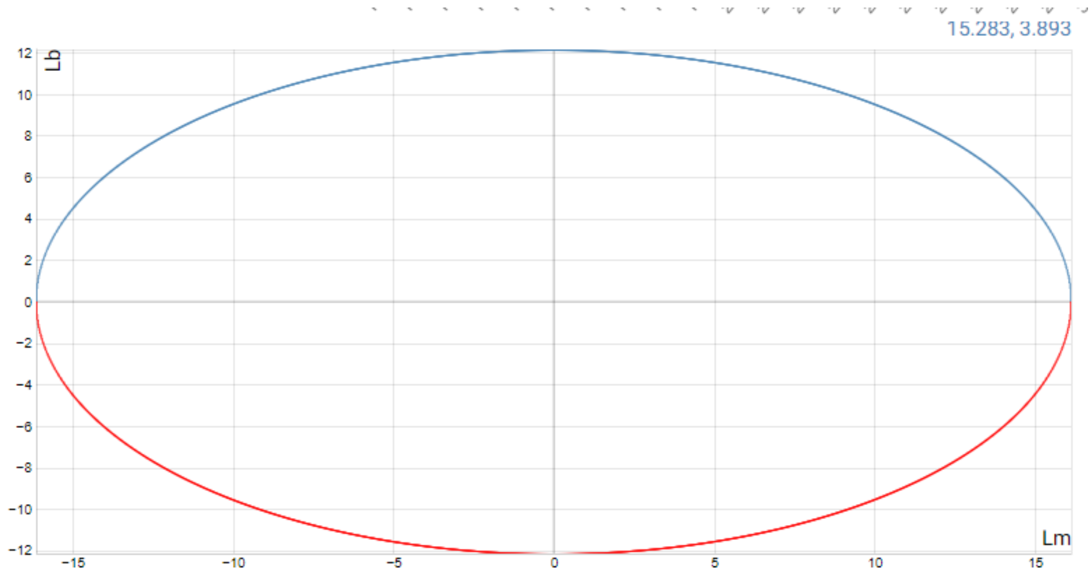

Рис. 3.6 Розміри осей еліпса першої зони Френеля

На графіку «рис. 3.6» вертикальна вісь відповідає великій осі еліпса, горизонтальна вісь – маленькій осі еліпса.

2.2.4 Розповсюдження радіохвиль у тропосфері

Метою даної роботи є вівчення електричних властивостей тропосфери і закономірності розповсюдження радіохвиль в ній.

Інтерфейс лабораторного комплексу для лабораторної роботи по дослідженню розповсюдження радіохвиль у тропосфері зображено на «рис. 4.2».

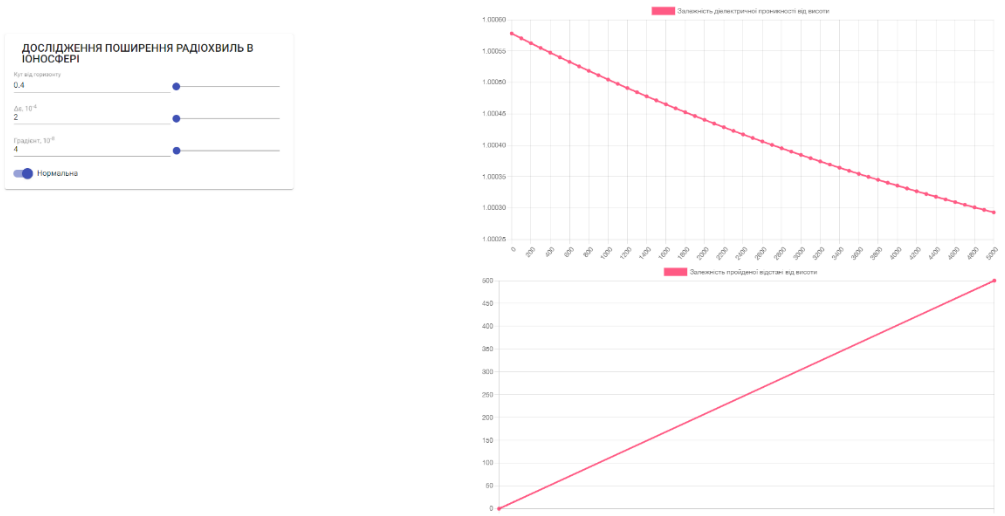

Рис. 4.2 Інтерфейс програмного комплексу

Блок вводу даних зображено на «рис. 4.3», і містить наступні вхідні параметри:

- Кут від горизонту

- Відхилення відносної діелектричної проникності (параметр працює, при довільному режимі)
- Вертикальний градієнт діелектричної проникності біля земної поверхні (параметр працює, при довільному режимі)
- Вибір режиму (довільний / нормальний)

Рис. 4.3 Інтерфейс блока вводу даних

Поряд з блоком вводу даних, розташовано 2 графіки, що змінюються у реальному часі, в залежності від вхідних даних:

- Графік залежності діелектричної проникності від висоти «див на рис. 4.4.1» і «див на рис. 4.4.2»

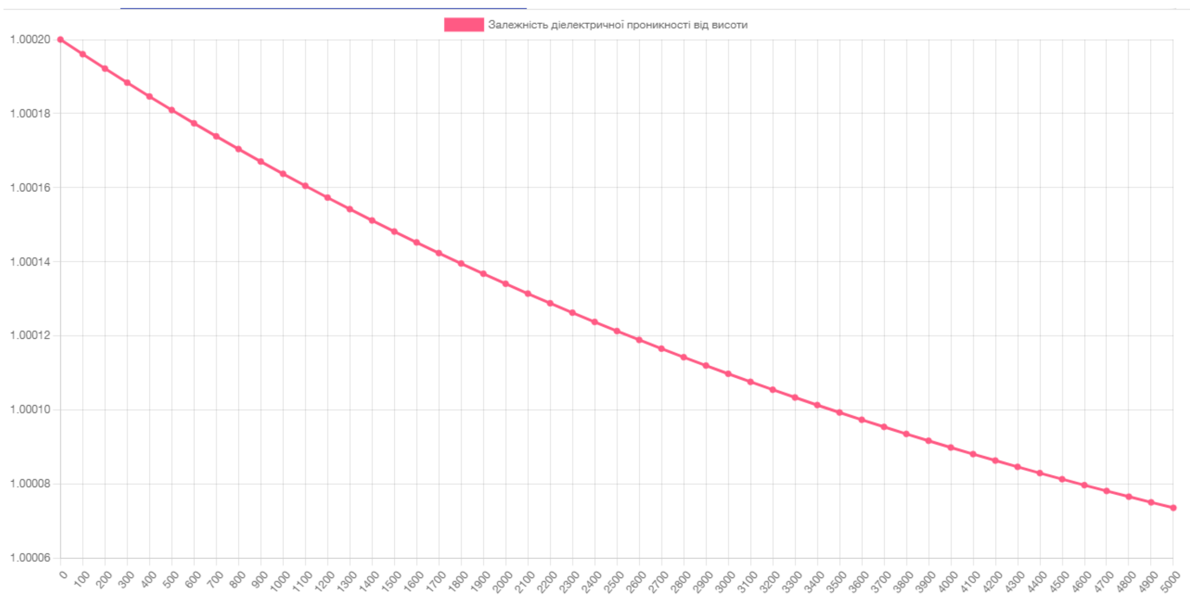

Рис. 4.4.1 Графік залежності діелектричної проникності від висоти при $g > 0$

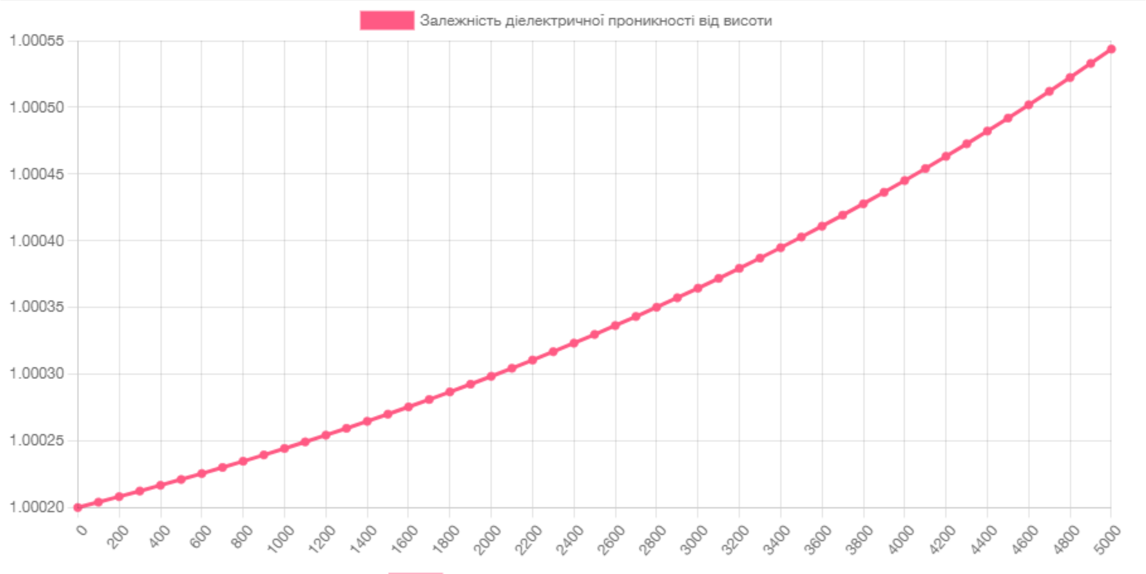

Рис. 4.4.1 Графік залежності діелектричної проникності від висоти при $g < 0$

- Графік залежності пройденої відстані від висоти «див на рис. 4.5»

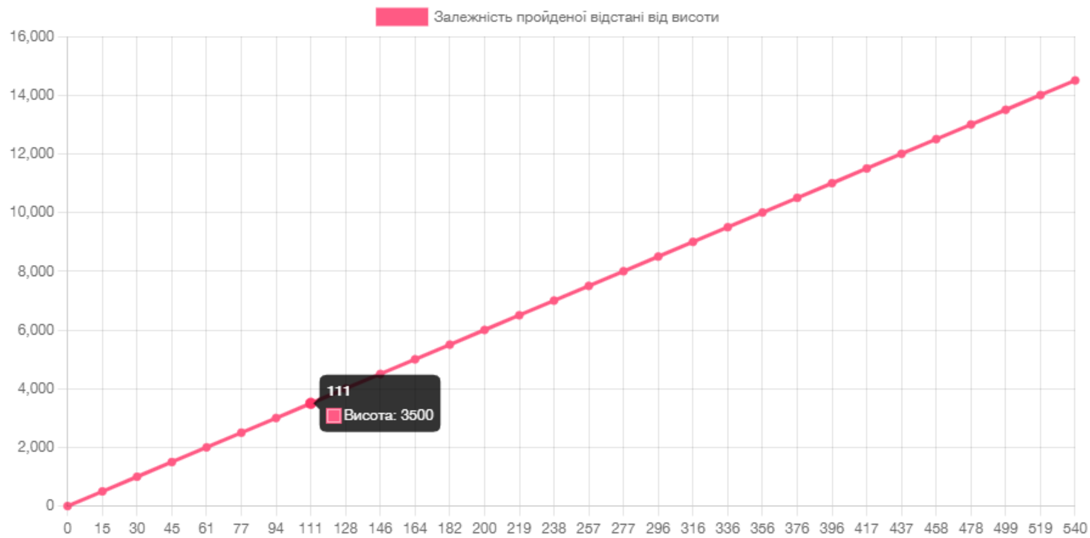

Рис. 4.5 Графік залежності пройденої відстані від висоти

2.2.5 Розповсюдження радіохвиль у іоносфері

Метою даної лабораторної роботи є вивчення побудови іоносфери та її вплив на особливості розповсюдження радіохвиль.

Для даної лабораторної роботи, інтерфейс розробленого програмного комплексу показано на «рис. 5.1».

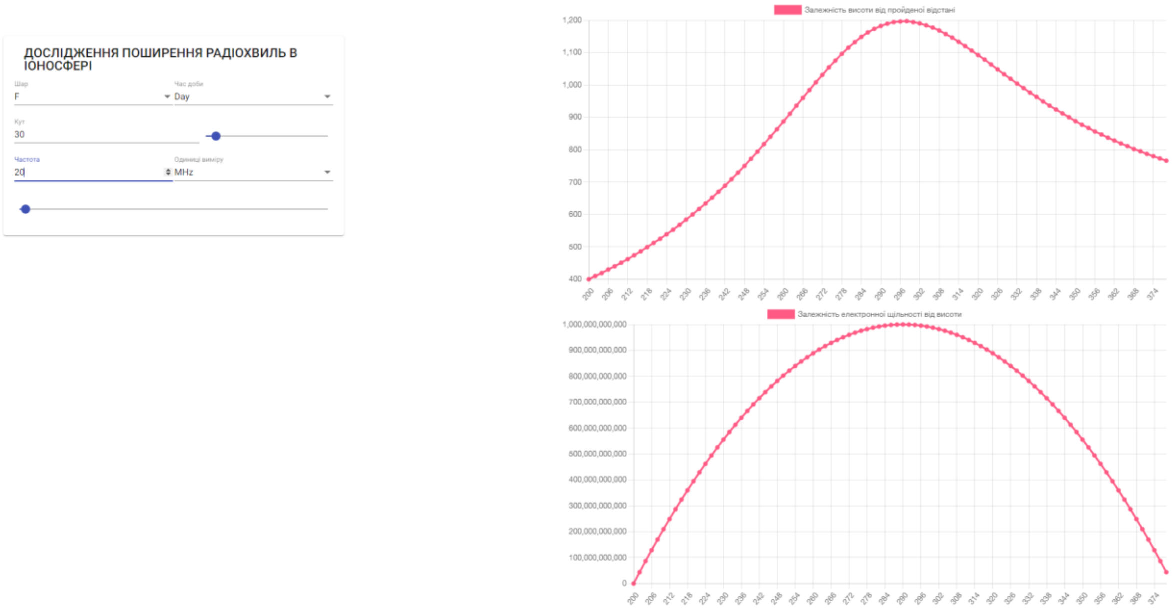

Рис. 5.1 Інтерфейс розробленого програмного комплексу для даної лабораторної роботи

Блок вводу даних, що показано на «рис. 5.2», містить такі поля для вводу даних:

- Вибір шару іоносфери та часу доби
- Кут до горизноту
- Частота радіохвилі

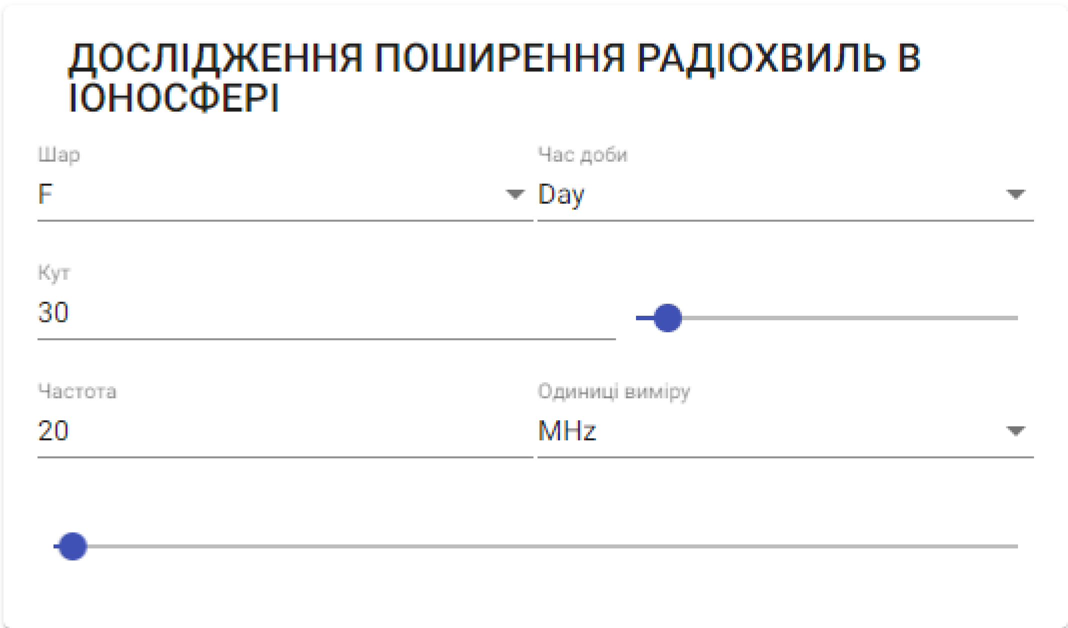

Рис. 5.2 Інтерфейс блока вводу даних

Також, маємо 2 результуючі графіки «зображено на рис. 5.3», «зображено на рис. 5.4».

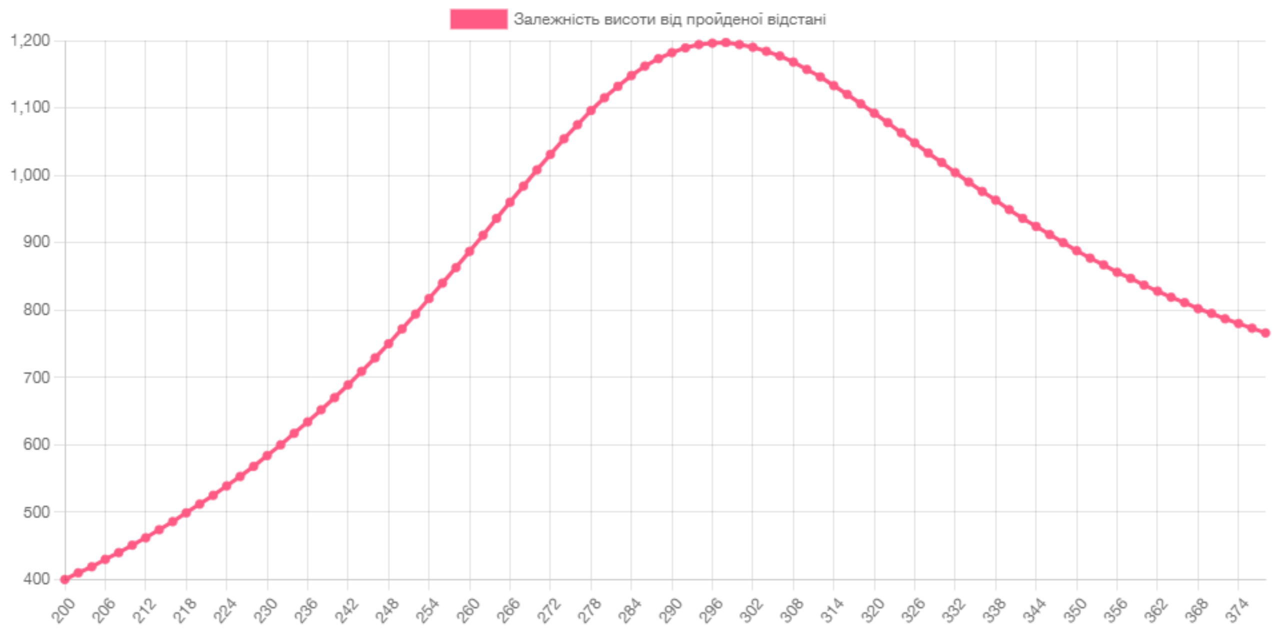

Рис. 5.3 Графік залежності висоти від пройденої відстані.

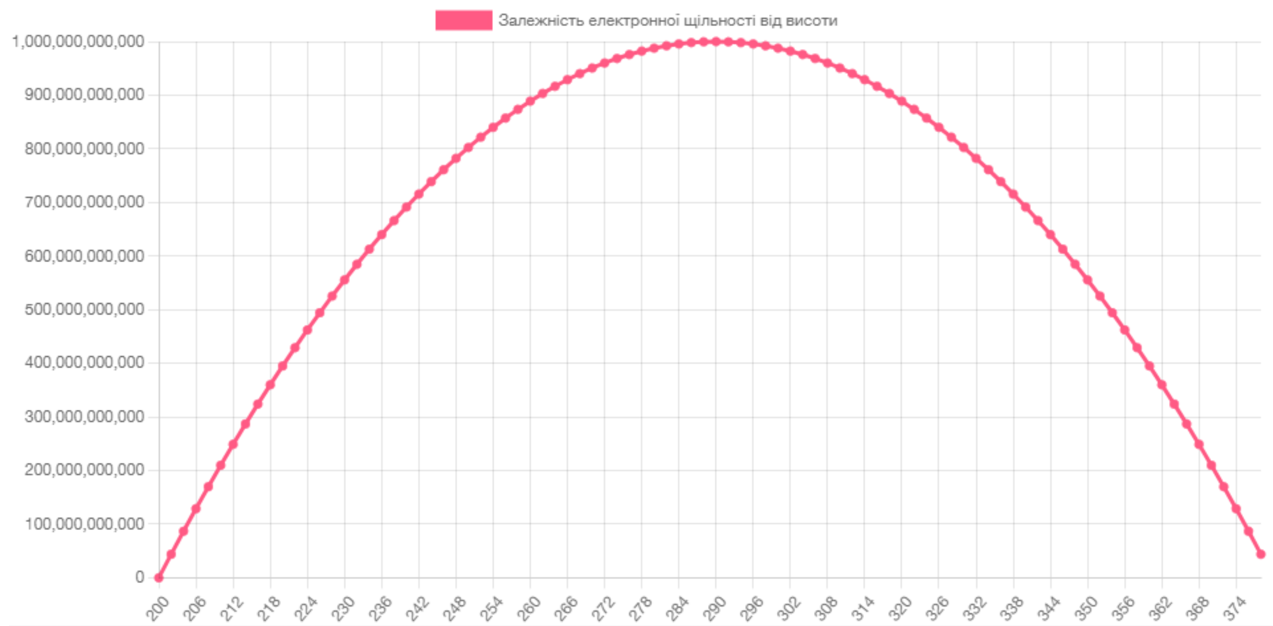

Рис. 5.4 Графік залежності електронної щільності від висоти.

Графік на «рис. 5.3» показує залежність висоти від пройденої відстані. На цю залежність впливають такі основні параметри як: шар, час доби, кут і частота. На даному графіку зображено випадок, коли хвилі відбивається від іоносфери, і повертається до поверхні Землі. Також, при деяких параметрах, а саме: Шар: F, час доби: День, кут: 30 градусів, частота: 17 МГц хвиля не буде відбиватись і вертатись на Землю «див на рис. 5.5»

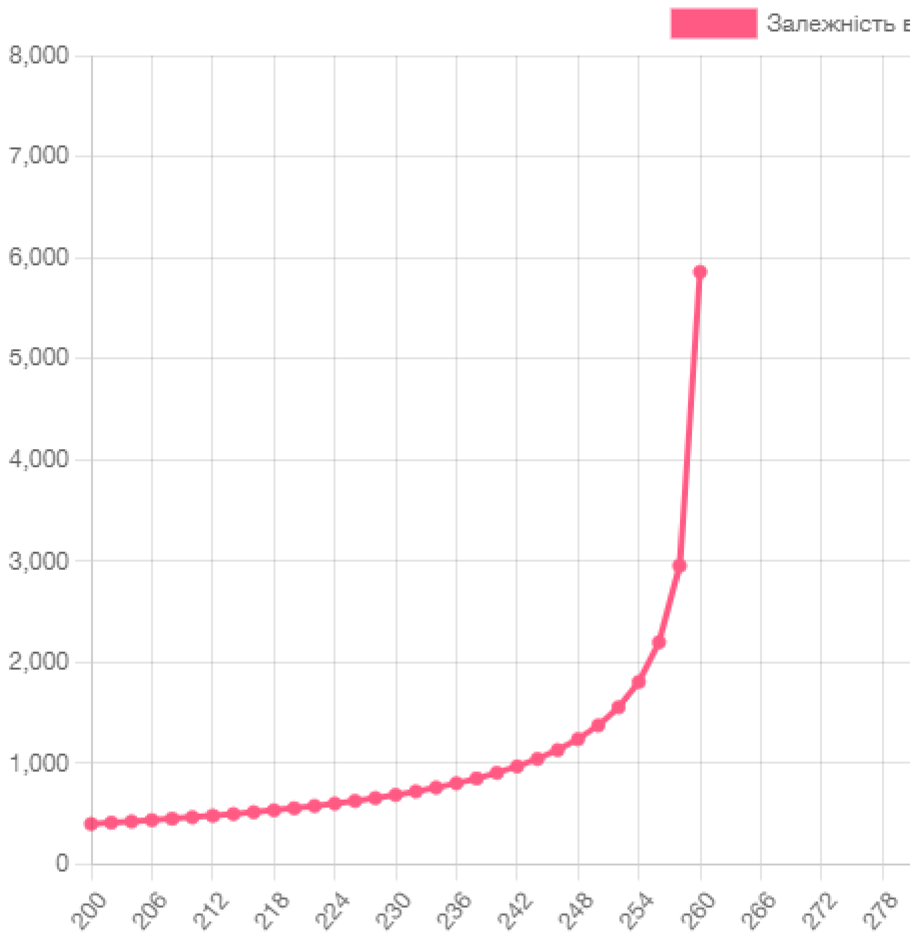

Рис. 5.5 Графік залежності висоти від пройденої відстані, коли хвиля не повертається до Землі.

2.3 Оцінка результатів моделювання розповсюдження радіохвиль

Після моделювання кожної лабораторної роботи, було отримано деякі результуючі значення. Для перевірки корректності отриманих результатів, можно скористатись ручним методом обчислення, та удостовіритись, що моделювання є точними, у рамках обраної моделі.

Розглянемо першу рабораторну роботу, де у нас присутні такі вихідні параметри, як:

- Частота
- Потужність передавача
- КНД антени передавача
- КСХ передавача
- КНД приймача

- КСХ приймача
- Погонне затухання фідера передавача
- Довжина антени передавача
- Погонне затухання фідера приймача
- Довжина антени приймача
- Відстань (у режимі "Задання відстані")
- Чутливість приймача (у режимі "Задання чутливості приймача")

Для перевірки результатів, візьмемо вхідні дані з «табл. 6.1»

Таблиця 6.1

Вхідні значення моделювання

Параметри	Значення
Частота (f, МГц)	50
Потужність передавача ($P_{\text{пер}}$, Вт)	10
КНД передавача ($D_{\text{пер}}$, дБ)	3
КСХ	1.2
КНД приймача ($D_{\text{пр}}$, дБ)	6
КСХ	1.5
Погонне затухання передавача, ($\alpha_{\text{пер}}, \frac{\text{дБ}}{\text{м}}$)	0.01
Довжина передаючої антени, ($l_{\text{пер}}$, м)	25
Погонне затухання приймача, ($\alpha_{\text{пр}}, \frac{\text{дБ}}{\text{м}}$)	0.02
Довжина приймаючої антени, ($l_{\text{пр}}$, м)	20
Відстань, (R, км)	10
Чутливість приймача, ($P_{\text{прм}}^{min}, \frac{\text{дБ}}{\text{мВт}}$)	-40

Розрахуємо такі вихідні параметри:

- Потужність на вході приймача
- Максимальна відстань зв'язку (у режимі "Задання чутливості приймача")
- Мінімальна чутливість приймача (у режимі "Задання відстані")
- ККД передавача
- Ефективна площа приймальної антени
- ККД приймача

Почнемо з потужності приймача, та ККД приймача і передавача. При вхідних параметрах, зазначених у «табл. 6.1», маємо потужність на вході приймача, що рівна $3.36 \cdot 10^{-7}$ Вт, ККД передавача 0.936 і ККД приймача 0.875

Перевіримо результат згідно з обраної моделі:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} D_{\text{пер}} D_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi R)^2} \tag{6.1}$$

$$\eta = A(1 - \Gamma^2) = A\left(1 - \left(\frac{\text{КСХ}-1}{\text{КСХ}+1}\right)^2\right) \tag{6.2}$$

$$A = 10^{-\frac{\alpha l}{10}} \tag{6.3}$$

Підставимо значення у формулу (6.1, 6.2 і 6.3):

$$A_{\text{пер}} = 10^{-\frac{\alpha_{\text{пер}} l_{\text{пер}}}{10}} = 10^{-\frac{0.01 \cdot 25}{10}} = 0.944$$

$$A_{\text{пр}} = 10^{-\frac{\alpha_{\text{пр}} l_{\text{пр}}}{10}} = 10^{-\frac{0.02 \cdot 20}{10}} = 0.912$$

$$\eta_{\text{пер}} = 0.944 \cdot \left(1 - \left(\frac{1.2 - 1}{1.2 + 1}\right)^2\right) = 0.936$$

$$\eta_{\text{пр}} = 0.912 \cdot \left(1 - \left(\frac{1.5 - 1}{1.5 + 1}\right)^2\right) = 0.8755$$

$$P_{\text{пр}} = \frac{10 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 0.936 \cdot 0.8755 \cdot \left(3 \cdot \frac{10^8}{50 \cdot 10^6}\right)^2}{(4 \cdot 3.14 \cdot 10000)^2} = 33.66 \cdot 10^{-8}$$

Отримані значення цілком точно співпадають зі значеннями, отриманими у програмному комплексі.

Тепер, перевіримо розрахунки ефективної площі приймальної антени. У програмному комплексі, було отримано значення 17.188 кв. м. Перевіримо це значення згідно з формулою (6.4):

$$S_{\text{еф}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_{\text{пр}} \tag{6.4}$$

Підставимо числові значення у формулу (6.4):

$$S_{\text{еф}} = \frac{\left(\frac{3 \cdot 10^8}{50 \cdot 10^6}\right)^2}{12.56} \cdot 6 \approx 17.2$$

Отримане значення збігається з програмно-розрахованим значенням, у межі допустимої похибки.

У режимі задання відстані, розрахуємо мінімальну чутливість приймача, що дорівнює $-34.73 \frac{\text{дБ}}{\text{мВт}}$ згідно зі значенням, отриманим у програмному комплексі, згідно з формулою (6.5):

$$P_{\text{прм}}^{min} = 10^{\left(\frac{P\left(\frac{\text{дБ}}{\text{мВт}}\right)}{10} - 3\right)} \tag{6.5}$$

Виконаємо перетворення і підставимо значення у формулу (6.5):

$$P = 10 \cdot \lg\left(P_{\text{прм}}^{min}\right) + 30 = 10 \cdot \lg(33.66 \cdot 10^{-8}) + 30 = -34.73 \frac{\text{дБ}}{\text{мВт}}$$

Отримане значення збігається зі значенням, отриманим у лабораторному комплексі.

Встановимо режим задання чутливості приймача, і перевіримо правильність розрахунку максимальної дальності зв'язку, що згідно з встановленими вхідними значеннями дорівнює $R_{max} = 18.34$ км

$$R_{max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{пер}} D_{\text{пер}} D_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{прм}}}{P_{\text{прм}}^{min}}} \tag{6.6}$$

Перевіримо це значення, підставивши у формулу (6.6) вхідні значення:

$$R_{max} = \frac{\left(\frac{3 \cdot 10^8}{50 \cdot 10^6}\right)}{12.56} \sqrt{\frac{10 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 0.936 \cdot 0.8755}{10^{\left(-\frac{40}{10} - 3\right)}}} = 18.32 \text{ км}$$

Отримане значення вписується у допустиме значення похибки, тобто, цілком справедливо сказати, що значення є достовірними.

Отже, всі отримані у програмному комплексі значення, є достовірними. Це перевірено ручним перерахунком, згідно з формулами обраної математичної моделі для розповсюдження радіохвиль у вільному просторі.

Розглянемо другу лабораторну роботу, де дослуджуються зони Френеля. Маємо такі вхідні параметри:

- Довжина лінії
- Довжина хвилі
- Відстань від початку до діафрагми
- Номер зони Френеля

Вихідним параметром є радіус певної зони Френеля, номер якої задається у вхідних параметрах. Перевіримо розрахунок 1 зони Френеля, спираючись на значення, наведених у «табл. 6.2»

Таблиця 6.2

Вхідні параметри для лабораторної роботи по дослідженню зон Френеля

Параметри	Значення
Довжина лінії (R, км)	20
Довжина хвилі (λ, м)	50
Відстань від початку радіотраси до діафрагми (R_1, км)	18
Номер зони Френеля	1

Маємо формулу для розрахунку радіуса заданої зони Френеля:

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda R_1(R-R_1)}{R}} \quad (6.7)$$

Де n – номер зони Френеля. У лабораторному комплексі, для 1 зони Френеля маємо таке значення радіусу: $R_{n1} = 300$ Підставимо у формулу (6.7) вхідні значення:

$$R_{n1} = \sqrt{\frac{50 \cdot 18000 \cdot 2000}{20000}} = 300 \text{ м}$$

Це значення повністю співпадає зі значенням, отриманим у лабораторному комплексі.

Отже, для даної рабораторної роботи, розраховані значення за допомогою програмного комплексу можна вважати справделивими, згідно з обраною моделлю.

Тепер, перевіримо коректність моделювання дл лабораторної роботи по дослідженню радіохвиль поблизу земної поверхні. Маємо такі вхідні дані:

- Вид підстелаючої поверхні
- Довжину хвилі
- Висоту передавальної антени
- Висоту приймальної антени
- Довжину лінії
- Вид поляризації: Нормальна (перпендикулярна, горизонтальна) чи паралельна (вертикальна)

Вхідні дані, можна побачити у «табл. 6.3»

Таблиця 6.3

Вхідні параметри для лабораторної роботи по дослідженню поширення радіохвиль поблизу поверхні Землі

Параметри	Значення
Вид підстилаючої поверхні	Діелектрик
Довжина хвилі (λ, м)	20
Висота передавальної антени (h_t, м)	150
Висота приймальної антени (h_r, м)	150
Довжина лінії (l, км)	1
Поляризація	Нормальна (горизонтальна)

Вихідними даними є 3 результучих графіки. Для перевірки достовірності результатів, буде доречним взяти точку на графіку, і зробити розрахунки на основі значень цієї точки.

Для початку, перевіримо залежність інтерференційного множника послаблення від відстані між антенами. Візьмемо точку першого графіку: (1000 м, 1.123). Тобто, антени розташовані на відстані 1000 м, а інтерференційний множник послаблення є рівним 1.12. Розрахуємо інтерференційний множник послаблення згідно формули (3.5):

$$V = \sqrt{1 + 1 + 2\cos(27.54 - 0)} = 1.13$$

Отримане значення вписується у допустиме значення похибки, тобто, значення є достовірним.

Також, перевіримо розрахунок модуль коефіцієнта відбиття, згідно з формулою (3.2), підставивши точку з графіку (90, 0.6666), тобто, при 90 градусів, отримуємо значення у 0.66:

$$\Gamma_{\text{гор}}(\theta) = \left|\frac{\sin 90 - \sqrt{25 - \cos^2 90}}{\sin 90 + \sqrt{25 - \cos^2 90}}\right| = 0.66$$

Отже, отримане значення повністю співпадає з розрахованим значенням.

Перевіримо довжини осей еліпса першної зони Френеля. Згідно з показником програмного комплексу, $L_m = 147.64$, $L_b = 260.26$

Підставимо значення у формули (3.6) і (3.7):

$$L_m = 2\sqrt{20 \cdot \frac{522 \cdot 522}{1000}} = 147.64$$

$$L_b = \frac{147.64 \cdot 10^3}{\sqrt{21797.57 + 300000}} = \frac{147640}{567.272} = 260.26$$

Отже, дані значення цілком і повністю співпадають з розрахованими.

Перевіримо лабораторну роботу по дослідженню поширенню радіохвиль у тропосфері.

Маємо такі вхідні параметри, значення яких зазначено у «табл. 6.4»:

- Кут від горизонту
- Відхилення відносної діелектричної проникності (параметр працює, при довільному режимі)
- Вертикальний градієнт діелектричної проникності біля земної поверхні (параметр працює, при довільному режимі)

  Вибір режиму (довільний / нормальний)

Талиця 6.4

Таблиця вхідних значень

Параметр	Значення
Кут від горизонту (θ, град)	0.4
Відхилення відносної діелектричної проникності ($\Delta\varepsilon, 10^{-4}$)	2
Вертикальний градієнт діелектричної проникності біля земної поверхні ($g, 10^{-8}$)	4

Перевіримо розрахунок діелектричної проникності. Згідно отриманого графіку, значення діелектричної проникності на висоті 1500 метрів становить 1.000471. Підставимо необхідні значення у формулу:

$$\varepsilon(h) = 1 + \Delta\varepsilon_0 \exp\left(\frac{gh}{\Delta\varepsilon_0}\right) = 1 + 5.78 \cdot 10^{-4} e^{-0.2037} = 1.000471$$

Отже, дане значення цілком співпадає з очікуваним.

Перевіримо розрахунок пройденої відстані за формулою (4.4), враховуючи що згідно з графіком, при висоті в 500м, пройдена відстань буде становити 152 км:

$$\Delta S = \frac{500}{\sqrt{1 - \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(h)} \sin^2 \varphi_0}} = \frac{500}{\sqrt{1 - 1.00003 \cdot \sin^2(90 - 0.4)}} = 152 \text{ км}$$

Отже, значення повністю збігаються з очікуваними.

Перевіримо лабораторну роботу по дослідженню поширенню радіохвиль у іоносфері.

Маємо такі вхідні параметри, значення яких зазначено у «табл. 6.5»:

- Вибір шару іоносфери та часу доби
- Кут до горизноту
- Частота радіохвилі

Талиця 6.5

Таблиця вхідних значень

Параметр	Значення
Шар	F
Час доби	День
Кут (θ, град)	30
Частота (f, МГц)	9.2

Перевіримо значення пройденої відстані в залежності від висоти. Візьмемо точку з висотою 210 км і пройденою відстанні 843 км. Підставимо значення у формулу (5.2 і 5.3):

$$\Delta S = \frac{210}{\sqrt{1 - \frac{1}{0.799}\sin^2 60}} = 842.8 \text{ км}$$

Отже, дане значення повністю сходиться. Тепер, перевіримо значення електронної концентрації, за формулою (5.1) Для висоти 210 км, це значення становить 209876543210.

$$N_e(210) = 10^6\left(\frac{20}{90} - \frac{100}{8100}\right) = 209876543209.876$$

Отримане значення цілком попадає у діапазон допустимої похибки.

2.4 Висновки до другого розділу

У даному розділі, було виконано усі поставлені завдання. Було обрано та обґрунтовано набір технологій, мову програмування задля створення необхідного програмного забезпечення. Це мова програмування TypeScript, разом з технологією для відрисовки веб-інтерфейсу Angular, системою контроля версій Git і хмаровою платформою Google Firebase для публікації веб-додатку. Було розроблено необхідні алгоритми роботи математичних моделей на основі обраних технологій. Було розроблено лабораторний комплекс, та розроблено всі необхідні розділи лабораторного комплексу, разом з засобами для відрисовки графіків. Також, було перевірено достовірність та оцінено точність лабораторного комплексу.

Розробивши даний лабораторний стенд, розібравши принципи його роботи і проаналізувавши результати моделювання у ньому, можна зробити висновки, що даний лабораторний стенд є дуже корисним та зручним, при дослідженні і моделюванні радіохвиль при їх поширенні біля земної поверхні, у вільному просторі, атмосфері і тропосфері. Для кожної з лабораторних робіт, розроблених у даній лабораторній роботі, було отримано робочу программну модель для обчисленні різних параметрів, згідно з обраними математичними моделями для кожної лабораторної роботи. Також, було перевірено результати та оцінено точність моделювання, згідно з обраною матеатичною моделлю поширення радіохвиль.

Висновки

Проаналізувавши список використаної літератури, було визначено та встановлено причини розробки програмного лабораторного комплексу. Перш за все, програмний комплекс, доступний як веб-версія, є дуже актуальним, особливо у випадку дистанційного навчання. Такий програмний комплекс дозволяє уникнути використання реальної апаратури, бо є досить точним згідно з математичними моделями розповсюдження радіохвиль, що було доказано у розділі оцінки результатів моделювання. Перш за все, обладнання по дослідженню характеристик радіотраси є досить складним, бо треба врахувати дуже багато параметрів, та врахувати неточність вимірювальної апаратури. Також, таке обладнання є досить дорогим, що ставить питання у сенсі його використання в якості лабораторного стенду. Як додаткова перевага, це досить сильно економить час, бо розроблений програмний комплекс дозволяє досить швидко та у реальному часі розрахувати основні параметри, та побудувати усі необхідні графіки з досить високою точністю. Таким чином, для кожної лабораторної роботи у цілях наочності було зроблено як мінімум по 1 графіку, так як графічне відображення тієї чи іншої залежності сприймається людиною у багато разів краще, ніж “сухі” числа та значення. Також, даний лабораторний комплекс є продуктом з відкритим кодом, тобто, при необхідності, можно досить просто написати та підключити свій модуль до програмного комплексу, у цілях розширення його функціоналу [25].

Неділоком такого розробленого комплексу є використання ідеалізованих моделей для програмного обчислення. У реальності, на вихідні параметри радіотраси будуть впливати набагато більше параметрів, будь то температура, вологість або сонячна радіація. Також, даний лабораторний комплекс не несе практичних навичків роботи з реальним обладнанням.

Під час виконання дипломної роботи, було виконано усі поставлені задачі. Перш за все, було проведено аналіз існуючих математичних моделей розповсюдження радіохвиль в атмосфері землі. Було обрано та порівняно декілька моделей, після чого було обрано певні математичні моделі, на основі їх позитивних та негативних якостей. Також, було обґрунтовано вибір цих моделей, описано їх основні переваги і їх доречність у використанні у даному програмному комплексі. Було обрано та обґрунтовано прогармну архітектуру, мову програмування та набір технологій для розробки програмного комплексу. Було обрано архітектуру MVVM – так як вона найбільше підходить то програмного забезпечення, яке повинно розраховувати параметри у реальному часі, так як вона дозволяє робити подвійну прив’язку даних. Мовою програмування стала мова TypeScript, так як вона добре інтегрується з технологією веб-інтерфейсу Angular, для реалізації шаблону MVVM. У якості ресурсу для публікації веб-додатку (платформа розміщення веб серверу) було обрано Google Firebase, яка дозволяє дуже швидко та безкоштовно розмістити додаток малого та середнього розмірів, з високим ступенем доступу. Також, було обрано і розроблено алгоритми роботи математичних моделей, задля їх подальшої реалізації на мові програмування TypeScript. Було розроблено такі алгоритми і обрано такі моделі, щоб їх реалізація була можлива без додаткових бібліотек, використовуючи тільки стандартині функції, що регламентується стандартом ES6 (EcmaScript 6). Було розроблено програмний комплекс, згідно завдання, у якому є можливість вводити дані, отримувати результати у числовій та графічній формі. Кожник графік можна проаналізувати по точкам, і отримувати значення однієї величини, в залежності від значення іншої величини. Лабораторний комплекс є дуже легким у використанні, так як його можно використати як веб-додаток, тобто не встановлюючи, або при наявності будь-якого сучасного браузера, такого як Mozilla, або браузери на основі відкритого проекту Chromium (Google Chrome, Microsoft Edge, Brave, LibreWolf) або мобільних браузерів, можна встановити веб-додаток як звичайне програмне забезпеченя, що буде завжди доступне користувачу, навіть у режимі доступу без інтернету. Обрані моделі, досить добре себе зарекомендували під час розробки програмного комплексу. У кінці, було проведено аналіз, перевірку та оцінку точності та достовіності результатів моделювання програмного комплексу. Згідно з аналізу, можно ще раз удостовіритись у коректності та доречності обраних математичних моделей, так як вони є досить точними, а отримані результати співпадають з очікуваними. Таким чином, можна з впевненістю сказати, що даний програмний комплекс цілком і повністю підходить для використання у навчальних закладах, особливо у якості застосунку у разі дистанційного навчання. А також, просто для дослідження розповсюдження радіохвиль згідно з популярними та робочими математичними моделями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Booksite.ru [Електронне джерело] – 2018. – Распространение радиоволн. - Режим доступу: https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/095/556.htm (дата звертання 23.05.2021). – Назва з екрана.
2. Zavantag.com [Електронне джерело] – 2018. – Антенно-Фідерні пристрої. – Режим доступу: https://uadoc.zavantag.com/text/997/index-10.html (дата звертання 23.05.2021). – Назва з екрана
3. Wireless Communication [Електронне джерело] – 1993. – Free Space Propagation. – Режим доступу: http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr03/fsl.htm (дата звертання 23.05.2021). – Назва з екрана
4. Integrated Publications [Електронне джерело] – 2007. - The effect of the earth's atmosphere on radio waves. – режим доступу: https://www.tpub.com/neets/book10/40c.htm (дата звертання 23.05.2021). – Назва з екрана
5. Britannica [Електронне джерело] – 2013. - Telecommunications media - Radio. – режим доступу: https://www.britannica.com/topic/telecommunications-media/Radio-transmission (дата звертання 23.05.2021). – Назва з екрана
6. Hata, M. Empirial fomula for propagation loss in land mobile radio services / M. Hata // IEEE Trans. Venicular Technology, 1980. – Vol.29, №3 – P.317-325.3
7. Recommendation ITU-R P.529-3. Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands.1999. – 25 p
8. Калинин, А.И Распростронение радиоволн и работа радиолиний / А.И.Калинин, Е.Л. Черенкова. – М. : Связь, 1971. – 439 с.

9. Вікіпедія [Електронне джерело] – 2021. - Model-View-ViewModel. – режим доступу: https://ua.wikipedia.org/wiki/Model-View-ViewModel (дата звертання 24.05.2021). – Назва з екрана
10. TypeScript [Електронне джерело] – 2021. - Typed JavaScript at Any Scale. – режим доступу: https://www.typescriptlang.org/ (дата звертання 24.05.2021). – Назва з екрана
11. AkiraYoungBlood [Електронне джерело] – 2019. - Undefined Behavior in JS. – режим доступу: https://www.akirayoungblood.com/reference/js-strange/ (дата звертання 24.05.2021). – Назва з екрана
12. Тяпк [Електронне джерело] – 2019. - Angular & MVVM / Тяпк. – режим доступу: https://tyapk.ru/blog/post/angular-mvvm (дата звертання 25.05.2021). – Назва з екрана
13. MDN Web Docs [Електронне джерело] – 2021. - Progressive web apps (PWAs) | MDN. – режим доступу: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Progressive_web_apps (дата звертання 25.05.2021). – Назва з екрана
14. SWaver [Електронне джерело] – 2021. - SWaver. – режим доступу: https://swaver-lab.web.app/ (дата звертання 25.05.2021). – Назва з екрана
15. Pandia [Електронне джерело] – 2006. - Лабораторная работа № ВИ-109. Распространение радиоволн в свободном пространстве. – режим доступу: https://pandia.ru/text/77/137/166.php (дата звертання 25.05.2021). – Назва з екрана
16. Пепа Ю.В., Щербина О.А., Нечипорук О.П. Поля і хвилі в системах технічного захисту інформації – видавництво НАУ, 2002 - №. 977-7 с.
17. GitHub [Електронне джерело] – 2021. - SWaver/firstlab.component.ts at master · CeSiumUA/SWaver. – режим доступу: https://github.com/CeSiumUA/SWaver/blob/master/src/app/labs/first/firstlab.component.ts (дата звертання 25.05.2021). – Назва з екрана
18. Pandia [Електронне джерело] – 2006. - Лабораторная работа № ВИ-110. Зоны Френеля. Существенная область распространения радиоволны. – режим

доступу: https://pandia.ru/text/77/137/167.php (дата звертання 25.05.2021). – Назва з екрана

19. AntennasByn [Електронне джерело] – 2009. - Measurement Of Soil Electrical Parameters At HF. – режим доступу: https://www.antennasbyn6lf.com/files/ground_parameter_measurements_2.pdf (дата звертання 25.05.2021). – Назва з екрана
20. Itu [Електронне джерело] – 1990. - Reflection from the surface of the Earth. – режим доступу: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.1008-1-1990-PDF-E.pdf (дата звертання 25.05.2021). – Назва з екрана
21. ElectronicsNotes [Електронне джерело] – 2016. - Radio Wave Propagation & Atmosphere. – режим доступу: https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/propagation-overview/atmosphere-atmospheric-effects-on-radio-propagation.php (дата звертання 26.05.2021). – Назва з екрана
22. Pandia [Електронне джерело] – 2006. - Лабораторная работа № ВИ-112. Распространение радиоволн в тропосфере. – режим доступу: https://pandia.ru/text/77/137/169.php (дата звертання 26.05.2021). – Назва з екрана
23. Itu [Електронне джерело] – 2015. - Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation. – режим доступу: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.834-7-201510-S!!PDF-E.pdf (дата звертання 01.01.2021). – Назва з екрана
24. Wikipedia [Електронне джерело] – 2021. - Ionosphere. – режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere (дата звертання 01.01.2021). – Назва з екрана
25. Github [Електронне джерело] – 2021. - CeSiumUA/SWaver: My Bachelor diploma project. The main goal of this project is to replace old soviet equipment in my university with light and fast set of digital programs to perform calculations in Wave Spreading and Information Security. – режим доступу:

https://github.com/CeSiumUA/SWaver (дата звертання 01.01.2021). – Назва з екрана

26. MDN Web Docs [Електронне джерело] – 2021. - Standard built-in objects. – режим доступу: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Reference/Global_Objects (дата звертання 01.01.2021). – Назва з екрана

Додаток А

Html код інтерфейсу

```
<!doctype html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="utf-8">
  <title>Swaver</title>
  <base href="/">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">
  <link rel="icon" type="image/x-icon" href="favicon.ico">
  <link rel="preconnect" href="https://fonts.gstatic.com">
  <link
href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Roboto:wght@300;400;500&amp;
display=swap" rel="stylesheet">
  <link href="https://fonts.googleapis.com/icon?family=Material+Icons"
rel="stylesheet">
  <link rel="manifest" href="manifest.webmanifest">
  <meta name="theme-color" content="#1976d2">
</head>
<body class="mat-typography">
  <app-root></app-root>
  <noscript>Please enable JavaScript to continue using this application.</noscript>
```

```
  <script>
    if (global === undefined) {
      var global = window;
    }
  </script>
</body>
</html>
```

Додаток Б

Html код інтерфейсу з розділами

```
<mat-tab-group [selectedIndex]="defaultTab" dynamicHeight>
  <mat-tab label="ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ
  У ВІЛЬНОМУ ПРОСТОРІ">
    <ng-template matTabContent>
      <firstlab-app></firstlab-app>
    </ng-template>
  </mat-tab>
  <mat-tab label="ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАСТІ ПРОСТОРУ, ЯКА Є
  ІСТОТНОЮ ПРИ ПОШИРЕННІ РАДІОХВИЛЬ.
  ЗОНИ ФРЕНЕЛЯ">
    <ng-template matTabContent>
      <secondlab-app></secondlab-app>
    </ng-template>
  </mat-tab>
  <mat-tab label="ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ
  ПОБЛИЗУ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ">
    <ng-template matTabContent>
      <app-thirdlab></app-thirdlab>
    </ng-template>
  </mat-tab>
  <mat-tab label="ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ
```

```
  У ТРОПОСФЕРІ">
    <ng-template matTabContent>
      <app-fourthlab></app-fourthlab>
    </ng-template>
  </mat-tab>
  <mat-tab label="ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ
  В ІОНОСФЕРІ">
    <ng-template matTabContent>
      <app-fifthlab></app-fifthlab>
    </ng-template>
  </mat-tab>
</mat-tab-group>
```

Додаток В

Модуль обчислень першої лабораторної роботи

```
export class FirstLabCalculation{
    public static CalculateEfficiency(linearAttenuation: number, length: number, swr: number): number{
        const A = Math.pow(10, (-1 * (linearAttenuation * length / 10)));
        const nu = A * (1 - Math.pow(((swr - 1) / (swr + 1)), 2));
        return nu;
    }
    public static CalculateRange(transmittingPower: number,
                                 transmitterDirectionalFactor: number,
                                 receiverDirectionalFactor: number,
                                 transmitterEfficiency: number,
                                 receiverEfficiency: number,
                                 waveLength: number,
                                 receiverSensitivity: number): number{
```

```
                    const powerTranslate = Math.pow(10, ((receiverSensitivity /
10) - 3));
                    const numerator = transmittingPower *
                     transmitterDirectionalFactor * receiverDirectionalFactor *
receiverEfficiency * transmitterEfficiency;
                    const maxRange = (waveLength / (4 * Math.PI)) *
Math.sqrt(numerator / powerTranslate);
                    return maxRange;
  }
  public static CalculateEffectiveReceiverSquare(waveLength: number,
receiverDirectionalFactor: number): number{
    const square = (Math.pow(waveLength, 2)/(4 * Math.PI)) *
receiverDirectionalFactor;
    return square;
  }
  public static CalculateReceiverInputPower(transmittingPower: number,
                        transmitterDirectionalFactor: number,
                        receiverDirectionalFactor: number,
                        transmitterEfficiency: number,
                        receiverEfficiency: number,
                        waveLength: number,
                        transmittingRange: number): number{
                         const numerator = transmittingPower *
                           transmitterDirectionalFactor *
                           receiverDirectionalFactor *
                           receiverEfficiency *
                           transmitterEfficiency *
                           Math.pow(waveLength, 2);
                         const denominator = Math.pow((4 * Math.PI *
transmittingRange), 2);
```

```
            const receiverPower = numerator / denominator;
            return receiverPower;
    }
    public static CalculateMinimalInputSensivity(receiverPower: number): number{
        const sensivity = 10 * Math.log10(receiverPower) + 30;
        return sensivity;
    }
}
```

Додаток Г

Модуль обчислень другої лабораторної роботи

```
export class SecondLabCalculation{
    public static CalculateFrenselZoneRadius(waveLength: number, r: number, r1: number, n: number = 1): number{
        const result = Math.sqrt((waveLength * r1 * (r - r1) * n)/(r));
        return result;
    }
}
```

Додаток Ґ

Модуль обчислень третьої лабораторної роботи

```
import { GraphPoint } from '../models/GraphPoint';
export class ThirdLabCalculation {
    public static CalculateAttenuationFactor(point: number, reflectionCoefficient: number,
        complexPhaseCoefficient: number, waveLength: number, traceDifference: number): GraphPoint{
        const phaseCoefficient: number = 2 * Math.PI / waveLength;
        return {
            x: point,
```

```
            y: Math.sqrt(1 + Math.pow(reflectionCoefficient, 2) + 2 *
            reflectionCoefficient * Math.cos(phaseCoefficient * traceDifference -
complexPhaseCoefficient))
        };
    }
}
```

Додаток Д

Модуль обичслень четвертої лабораторної роботи

```
import { GraphPoint } from '../models/GraphPoint';
export class FourthLabCalculation {
    public static CalculateRelativeDielectricPerneabilityGrapg(
        points: number[],
        delta: number = 5.78 * Math.pow(10, -4),
        gradient: number = -7.85 * Math.pow(10, -8)): GraphPoint[]{
            const pointsCollection: GraphPoint[] = points.map(pnt => {
                const pointOnGraph: GraphPoint = {
                    x: pnt,
                    y: this.CalculateRelativeDielectricPerneability(pnt, delta, gradient)
                };
                return pointOnGraph;
            });
            return pointsCollection;
    }
    private static CalculateRelativeDielectricPerneability(point: number, delta:
number = 5.78 * Math.pow(10, -4),
                                            gradient: number = -7.85 * Math.pow(10, -8)):
number{
                                                const exp = Math.exp(gradient * point /
delta);
```

```
                                        return 1 + delta * exp;
    }
    public static CalculateDistanceGraph(points: number[],
                                angle: number,
                                delta: number = 5.78 * Math.pow(10, -4),
                                gradient:   number   =   -7.85   *   Math.pow(10,   -8)):
GraphPoint[]{
                                  const  pointsCollection:  GraphPoint[]  =  points.map(pnt
=> {
                                    const pointOnGraph: GraphPoint = {
                                      y: pnt,
                                      x: this.CalculateDistance(pnt, angle, delta, gradient)
                                    };
                                    return pointOnGraph;
                                  });
                                  const                  filteredPointsCollection                  =
pointsCollection.filter(pnt => !Number.isNaN(pnt.x));
                                  return filteredPointsCollection;
                                }
    private  static  CalculateDistance(point:  number,  angle:  number,  delta:  number  =
5.78 * Math.pow(10, -4),
                              gradient: number = -7.85 * Math.pow(10, -8)): number{
                                    const angleRadians = (90 - angle) / (180 / Math.PI);
                                    const                  electricalRelation                  =
this.CalculateRelativeDielectricPerneability(0,        delta,        gradient)        /
this.CalculateRelativeDielectricPerneability(point, delta, gradient);
                                    const            electricalRelationToAngle            =
((electricalRelation)
                                    * Math.pow(Math.sin(angleRadians), 2));
                                    const s = (point) /
```

```
                    (Math.sqrt(1 -
                        electricalRelationToAngle));
                    return Math.round(s / 1000);
    }
}
```

Додаток Е

Модуль обчислення п’ятої лабораторної роботи

```
import { Layer } from 'src/models/Layer';
import { GraphPoint } from '../models/GraphPoint';
export class FifthLabCalculation{
    public static CalculateElectronsDensity(points: number[], layer: Layer): GraphPoint[]{
        return points.map(pnt => {
            const point: GraphPoint = {
                x: pnt,
                y: this.GetHeightDensity(pnt, layer)
            };
            return point;
        });
    }
    private static GetHeightDensity(point: number, layer: Layer): number{
        const density = layer.Ner * (((2 * (point - layer.h)) / layer.zm) -
            (Math.pow(point - layer.h, 2) / Math.pow(layer.zm, 2)));
        return Math.round(density);
    }
    public static CalculateTraceDistance(points: number[], layer: Layer, angle: number, frequency: number): GraphPoint[] {

        const graphPoints = points.map(pnt => {
```

```
            const point: GraphPoint = {
                x: pnt,
                y: this.GetDistance(pnt, layer, angle, frequency)
            }
            return point;
        });
        return graphPoints;
    }
    private static GetDistance(point: number, layer: Layer, angle: number, frequency: number): number{
        const electronsDensity = this.GetHeightDensity(point, layer);
        angle = (90 - angle) / (180 / Math.PI);
        const basicElectronsDensity = this.GetHeightDensity(layer.h, layer);
        const perneability = 1 - 80.8 * (electronsDensity/Math.pow(frequency, 2));
        const basicPerneability = 1 - 80.8 * (basicElectronsDensity / Math.pow(frequency, 2));
        const distance = point / Math.sqrt(1 - (basicPerneability / perneability) * Math.pow(Math.sin(angle), 2));
        return Math.round(distance);
    }
}
```