

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем
від _____ 2024 року, протокол № _____.
Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор
_____ Ігор АНІСІМОВ

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**«ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО
ПОТЕНЦІАЛУ РАДІОЛІНІЇ СУЧАСНИХ СУПУТНИКОВИХ
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ»**

Виконав:

студент 2-го курсу магістратури
денної форми навчання
спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка
ОНП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»
Зозуля Андрій Андрійович _____

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Жиров Геннадій Борисович _____

Рецензент:

доктор технічних наук, професор
Вишнівський Віктор Вікторович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ Андрій ЗОЗУЛЯ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 50 с., 2 табл., 24 рис., 2 дод. (10с.), 13 джерел.

РАДІОЛІНІЯ, РЕТРАНСЛЯТОР, БОРТОВА АНТЕНА, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ЗАПАС РАДІОЛІНІЇ, СУПУТНИКОВА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, КОСМІЧНИЙ АПАРАТ – НАЗЕМНА СТАНЦІЯ, ВТРАТИ У ВІЛЬНОМУ ПРОСТОРИ, ЗГАСАННЯ В АТМОСФЕРІ, ФРЕЙМВОРК Qt, ІНТЕГРАЦІЯ Qt C++.

Об'єкт дослідження – енергетичний запас радіолінії «КА – наземна станція».

Предмет дослідження – методи та алгоритми розрахунку енергетичного запасу РЛ «КА – наземна станція», з урахуванням факторів послаблення радіосигналу.

Методи – об'єктно-орієнтоване програмування. Для розробки проекту використані мова програмування C++ та фреймворк Qt.

Мета роботи – розробка програмного забезпечення для розрахунку енергетичного потенціалу радіолінії, яке реалізує розрахунок енергетичного запасу радіолінії «космічний апарат – наземна станція», з урахуванням факторів послаблення радіосигналу, які виникають за рахунок його проходження в Земному та космічному середовищах.

В роботі розроблено програмний застосунок визначення енергетичного запасу сучасних СІС з урахуванням багатьох природних факторів впливу на сигнал, який значно полегшує створення СІС на усіх стадіях проектування та розробки, задля планування ефективної передачі енергії, оптимізації споживання енергії, забезпечення стійкості передачі даних, визначення обмежень системи та ін.

Проаналізовано сучасний науково-методичний апарат розрахунку енергетичного запасу РЛ СІС та встановлена основна методика розрахунку для сучасного найпоширенішого діапазону частот (L, S, C, X, Ku, Ka).

Для розробки ПО було використано мову C++ та фреймворк Qt. Вибір обґрунтований ефективністю, багатофункціональністю Qt, його кросплатформністю та вбудованими алгоритмами криптозахисту застосунку.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 4 |
| ВСТУП..... | 5 |
| 1. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ПО РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАПАСУ РЛ..... | 8 |
| 1.1 Актуальність роботи | 8 |
| 1.2 Аналіз сучасного науково-методичного апарату розрахунку енергетичного запасу РЛ | 9 |
| 2. АНАЛІЗ ВПЛИВУ СЕРЕДОВИЩА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ НА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ РАДІОЛІНІЇ | 13 |
| 2.1 Визначення факторів впливу середовища на радіолінію | 13 |
| 2.2 Методика розрахунку еквівалентної шумової температури СІС | 14 |
| 2.3 Втрати в радіолінії | 17 |
| 2.4 Втрати у вільному просторі | 18 |
| 2.5 Втрати при помилковому наведенні антен | 18 |
| 2.6 Згасання в атмосфері | 18 |
| 2.7 Послаблення в хмарах | 19 |
| 2.8 Послаблення в дощі | 20 |
| 2.9 Послаблення в атмосферних газах..... | 21 |
| 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ..... | 23 |
| 3.1 Написання програми для розрахунку енергетичного запасу РЛ на підставі апарату сучасних СІС..... | 23 |
| 3.2 Реалізація графічного інтерфейсу користувача..... | 24 |
| 3.3 Реалізація головної обчислювальної функції програми..... | 28 |
| 3.4 Реалізація математичних функцій для розрахунку енергетичного запасу | 31 |
| 3.5 Аналіз використаних розрахунків | 37 |
| ВИСНОВКИ..... | 39 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ..... | 40 |
| ДОДАТОК А ПОВНИЙ ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ | 41 |
| ДОДАТОК Б ЗОВНІШНІЙ ВИГЛЯД ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ | 49 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДСА – діаграма спрямованості антени;

ЕІВП – еквівалентна ізотропна випромінювана потужність;

ЕМС – електромагнітна сумісність;

КА – космічний апарат;

МСЕ – міжнародний союз електрозв'язку;

МШП – мало шумливий підсилювач;

НВЧ – надвисокі частоти;

НС – наземна станція;

ПП – підсилювач потужності;

РЛ – радіолінія;

РПрД – радіопередавач;

РПрМ – радіоприймач;

РС – радіосигнал;

РХ – радіохвиля;

СІС – супутникова інформаційна система;

ЩПП – щільність потоку потужності;

ВСТУП

У сучасному світі супутникові інформаційні системи (СІС) стали невід’ємною складовою багатьох аспектів життя, забезпечуючи швидким, надійним та ефективним обміном інформацією на глобальному рівні, від телекомунікацій, навігації, метеорології до застосування в оборонній сфері. СІС із року в рік замінюють все більше наземних систем телекомунікацій через надзвичайну ефективність, та великий внесок у розвиток технологій всіма провідними країнами. Передумовами такого розвитку є перш за все їх глобальне застосування – супутникові системи забезпечують покриття всієї поверхні Землі, та у разі потреби можуть швидко передислоковуватись у місця наприклад, де сталось стихійне лихо, чи місця постраждалі в наслідок війни, замінюючи наземні комунікації такі, як Інтернет, телебачення, чи зв’язок. Також війна показала, що СІС відіграють велике значення у військових операціях, забезпечуючи розвідку, навігацію, зв’язок в реальному часі між військовими підрозділами, літаками, командними пунктами.

Так одна з провідних компаній StarLink, яка вивела вже в загальному 6000 супутників, які забезпечують віддаленим супутниковим інтернетом користувачів, опираючись на досвід їх застосування в нашій країні заявила, що буде розвивати цю систему, як технологічно так і нарощуванням обсягів виготовлення космічних апаратів.

Розробка таких систем є дуже складною технічною задачею і потребує багато часу, та прорахунків на усіх етапах розробки, від вибору орбіти, кутів прямого спостереження для різних регіонів, несучої частоти, потужності сигналу, до прорахунків підсилювачів, приймачів/передавачів, антен, у що ми вдаватись не будемо, а торкнемося однієї з головних тем при побудові – енергетичного запасу.

Створення СІС на усіх стадіях їх життєвого циклу вимагає проведення розрахунку енергетичного запасу радіоліній (РЛ). Це дозволяє на основі розрахунків втрат та спотворення сигналу оцінити, чи можливо забезпечити достовірне прийняття сигналу при попередніх заданих вимог до приймально/передавальних пристроїв, та проводити корекції по мірі проектування

у виборі наприклад частоти несучої хвилі, ширини смуги сигналу, чи навіть корегувати відстань супутника від поверхні Землі.

Енергетичний розрахунок радіолінії вкрай необхідний для завдання вимог до характеристик земних станцій і бортових ретрансляторів космічних апаратів (КА). Енергетичний розрахунок слугує також для оцінки електромагнітної сумісності (ЕМС) наземних і космічних радіослужб, завадозахищеності супутникових радіоліній і пропускної здатності мереж супутникового зв'язку [6].

На цей час при проектуванні новітніх СІС використовуються різні набори методів розрахунку енергетичного запасу, при цьому не завжди враховуються усі чинники, що впливають на енергетику РЛ, внаслідок чого виникають труднощі при співвідношенні одних розрахунків з іншими, що призводить до необхідності проведення додаткових перерахунків в подальших етапах, результати яких можуть значно відрізнятись від отриманих раніше.

При проектуванні РЛ Земля-космос для систем зв'язку необхідно враховувати ряд явищ. В неіонізованій атмосфері ці явища слід враховувати на всіх частотах, але критичними вони стають на частотах вище 5 ГГц і при низьких кутах місця. До цих явищ відносяться:

- поглинання в атмосферних газах; поглинання, розсіювання і деполаризація за рахунок гідрометеорів (крапель води і частинок льоду в опадах, хмарах і ін.);
- шум випромінювання від поглинаючого середовища;
- втрати сигналу через розбіжність променів антени земної станції, що викликано нормальною рефракцією в атмосфері;
- ослаблення, яке викликано місцевим навколишнім середовищем поблизу наземної станції (будови, дерева та ін.).

Аналіз останніх публікацій дозволяє зробити висновок, що на сьогоднішній час, відсутня загальноприйнята методика оцінки впливу втрат (атмосферних, поляризаційних та ін.), що виникають при поширенні радіосигналу.

Найбільш повно питання оцінки впливу атмосфери на сигнал міститься в рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ). [7-13]

Таким чином, розробка програмного забезпечення, для розрахунку енергетичного запасу РЛ «КА – наземна станція», з урахуванням факторів послаблення радіосигналу, які виникають за рахунок його проходження в Земному та космічному середовищах є актуальною науково-технічною задачею.

1. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ПО РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАПАСУ РЛ

1.1 Актуальність роботи

Розрахунок енергетичного запасу, вкрай необхідний для компенсації втрат прийому сигналу в СІС, через безліч несприятливих факторів, які призводять до зменшення дальності зв'язку (атмосферні явища такі як дощ, туман, сніг, неузгодженість антени передавача/приймача з антено-фідерним трактом, температурний дрейф чутливості приймача та вихідної потужності передавача і ін), на усіх етапах проектування.

На концептуальному етапі проектування роблять аналіз кількох варіантів створення обладнання з розрахунками енергетичного запасу для кожного.

На етапі розробки проектної документації проводиться детальний прорахунок обраного варіанту та коригування розрахунків за результатами експериментальних та земних випробувань дослідних зразків.

На етапі експлуатації проводиться аналіз та підтвердження проведених розрахунків для уточнення і коригування застосованої техніки розрахунків на основі отриманих статистичних даних.

На сьогоднішній час на підприємствах ракетно-космічної промисловості відсутня єдина методика прорахунку запасу з якомога повною оцінкою впливу втрат (атмосферних, поляризаційних і ін), що виникають при розповсюдженні сигналу. В свою чергу, найповніший розрахунок вже на початковій стадії проектування СІС, дозволить зменшити коригувальні вимоги до обладнання.

Кожного року «Міжнародним телекомунікаційним союзом» ІТУ висуваються вимоги до збільшення швидкості передачі інформації, що у свою чергу призводить до збільшення частотної смуги [5]. Враховуючи поточне частотне «навантаження», це призводить до збільшення значень частоти несучої хвилі. Кожний з діапазонів частот має свій набір втрат при розподілі сигналу, який потрібно враховувати при розрахунках. Детальні розрахунки необхідні не лише для сигналів з відомими частотами наприклад, як GPS, AIS, а також для ново-розроблених радіоліній.

Оцінка послаблення сигналу стає особливо актуальною у зв'язку з пошуком балансу між зменшенням потужності трансмітерів та збільшенням кількості інформаційного потоку.

Також аналіз відкритих джерел показав, що окрім єдиної методики обрахунку немає також програмного забезпечення, яке б дозволило спростити роботу інженерам, та заощадити час, перекладаючи розрахунки енергетичного запасу на потужності обчислювальних машин.

Отже кінцевою метою роботи є розробка такого застосунка з графічним інтерфейсом користувача за допомогою сучасного фреймворка Qt та мови програмування C++.

1.2 Аналіз сучасного науково-методичного апарату розрахунку енергетичного запасу РЛ

Для забезпечення передачі інформації з необхідною швидкістю і заданою ймовірністю бітової помилки необхідно проаналізувати фізичні процеси та провести розрахунок параметрів, які впливають на поширення радіосигналу на природних радіотрасах.

В роботі розглядається випадок передачі сигналів за траєкторією «КА- наземна станція».

КА рухається в космічному просторі по заданій орбіті, прийом сигналу ведеться станцією, яка може розташовуватися як безпосередньо на поверхні Землі, так і на деякій висоті над неї.

Виходячи з параметрів руху КА необхідно визначити максимальну і мінімальну дальності між КА і наземною станцією (НС), а також кут місця, під яким КА спостерігається НС.

Розрахунки слід проводити для усіх можливих граничних випадків - це дозволить визначити діапазон змін щільності потоку потужності (ЩПП) в створі приймальної антени, формуючи вимоги до динамічного діапазону радіоприймача [6].

При розрахунку втрат в атмосфері необхідно проаналізувати висоту розташування НС над рівнем моря і зробити висновок, яким чином впливає атмосфера Землі на параметри радіосигналу (РС).

Можливість прийому РС і доступність РЛ визначаються позитивним значенням енергетичного запасу, який розраховується як різниця між енергетичним потенціалом на вході приймального малошумливого підсилювача (МШП) і його чутливістю [1].

Розрахунок енергетичного потенціалу розпочинається з визначення величини еквівалентної ізотропної випромінюваної потужності (ЕІВП) КА та умов поширення РС.

На рис. 1.1 наведена структурна схема РЛ «КА-НС» і графічне надання рівня потужності РС.

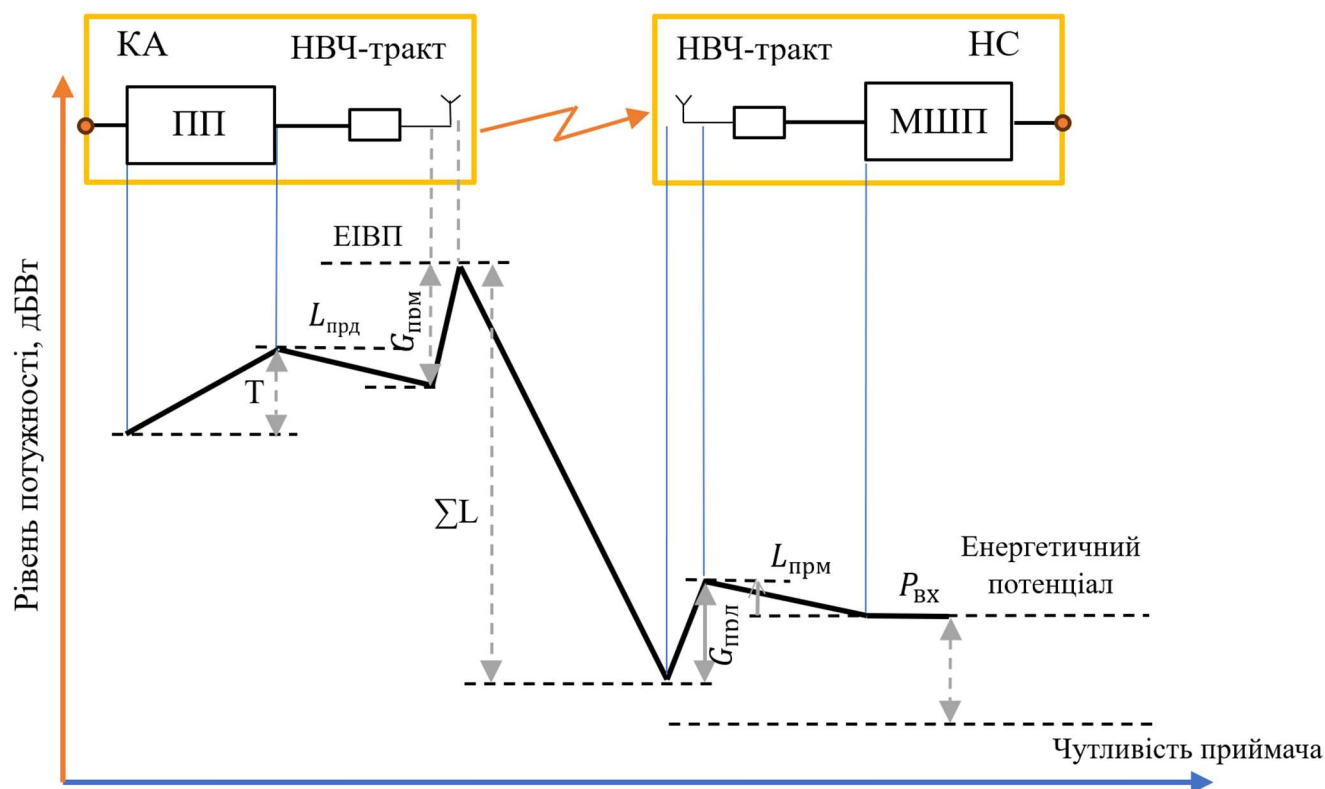


Рисунок 1.1 – структурна схема РЛ «КА-НС» і графічне надання рівня потужності РС.

Передача розпочинається з КА.

ЕІВП визначається в *дБВт* та розраховується як:

$$ЕІВП = G_{\text{прд}} + T - L_{\text{прд}}, \quad (\text{дБВт}) \quad (1.1)$$

де $G_{\text{ПРД}}$ - коефіцієнт підсилення передавальної антени, виражається в децибелах відносно ізотропного підсилення ДБi ;

T - величина потужності РС на виході підсилювача потужності (ПП), дБВт ;

$L_{\text{ПРД}}$ - втрати у НВЧ-тракті від виходу ПП до входу антени, дБ .

По мірі поширення РС в середовищі відбувається його згасання, яке викликане розсіюванням сигналу при віддаленні від радіопередавача (РПРД).

Надалі, РС поступає на приймальну антену станції з коефіцієнтом підсилення $G_{\text{ПРД}}$, яка зв'язана з радіоприймачем (РПРМ) хвилевідним трактом з втратами $L_{\text{ПРД}}$ [4].

Величина потужності РС $P_{\text{вх}}$ на вході МШП розраховується за формулою:

$$P_{\text{вх}} = \text{ЕІВП} - \sum L + G_{\text{ПРМ}} - L_{\text{ПРМ}}, (\text{дБВт}) \quad (1.2)$$

де $\sum L$ - величина сумарних втрат дБ ;

$G_{\text{ПРМ}}$ - коефіцієнт підсилення приймальної антени в дБ відносно ізотропної потужності дБi ;

$L_{\text{ПРМ}}$ - втрати в НВЧ-тракті від виходу антени до МШП (дБ).

Порівняння потужності РС на вході МШП із чутливістю приймача R_x визначає величину енергетичного запасу і доступності РЛ:

$$Z = P_{\text{вх}} - R_x, (\text{дБВт}) \quad (1.3)$$

Чутливість визначає мінімальний рівень потужності сигналу на вході РПРМ, при якій забезпечується прийом інформації з необхідною швидкістю і заданою ймовірністю бітової помилки.

У випадку, коли потужність сигналу на вході МШП менше чутливості РПРМ ($Z < 0$), то забезпечити прийом сигналу з необхідною достовірністю неможливо.

Якщо рівень потужності сигналу на вході МШП більше чутливості ($Z > 0$), то прийом забезпечується з необхідною достовірністю.

Чутливість приймача розраховується за формулою:

$$R_x = k + T_{\text{екв}} + B + \frac{C}{N}, \quad (\text{дБВт}) \quad (1.4)$$

де $k = -228,6 * 10^{-23}$ (дБВт/КГц) - стала Больцмана;

$T_{\text{екв}}$ - еквівалентна шумова температура системи, яка визначається в дБ відносно величини 1 К, дБК;

$\frac{C}{N}$ - необхідне відношення сигнал/шум (дБ);

B - ширина смуги сигналу, в дБ відносно величини 1 Гц, дБГц.

Розрахунок чутливості приймача по наведеній вище формулі показує зв'язок чутливості і необхідного відношення сигнал/шум на вході РПрМ. Як приклад: забезпечення меншої величини відношення сигнал/шум на вході МШП призводить до посилення вимог до радіоприймального пристрою (зниження втрат у НВЧ-тракті, зменшення коефіцієнта шуму приймального тракту і т.д) [1].

Відношення потужності РС до потужності шуму, перераховане до входу МШП, визначається формулою:

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{N_0} + R - B, \quad (\text{дБ}) \quad (1.5)$$

де $\frac{E_b}{N_0}$ - необхідне відношення енергії інформаційного біта до односторонньої спектральної щільності потужності шуму при заданій достовірності прийому і швидкості передачі інформації, дБ;

R - швидкість передачі інформації, яка виражається в децибелах відносно величини 1 біт/с, дБбіт/с.

Після підстановки отримаємо:

$$R_x = kT_{\text{екв}} + R + \frac{E_b}{N_0}, \quad (\text{дБВт}) \quad (1.6)$$

2. АНАЛІЗ ВПЛИВУ СЕРЕДОВИЩА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ НА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ РАДІОЛІНІЇ

2.1 Визначення факторів впливу середовища на радіолінію

Супутникова система зв'язку складається із двох ділянок: Земля-штучний супутник землі й штучний супутник - Земля.

Розрахунок її схожий на розрахунок радіорелейної системи прямої видимості, що має два інтервали.

Однак у супутникових системах необхідно враховувати особливості апаратурних відмінностей на цих ділянках, а також різних енергетичних потенціалів і шумів на цих ділянках.

Також при проектуванні ліній Земля-космос для систем зв'язку необхідно враховувати ряд негативних явищ викликаних середовищем в якому проходить радіосигнал, прикладом яких є послаблення в хмарах, послаблення в гідро метеорах, шумова температура космічних джерел та ін. У не іонізованій атмосфері ці явища слід враховувати на всіх частотах, але критичними вони стають на частотах вище 5 ГГц і при низьких кутах місця.

Найповніший та точний розрахунок, з урахуванням впливу земної поверхні і атмосфери, вже на стадії створення проекту дозволяє надалі усунути корекції вимог, які накладаються на бортову і наземну апаратуру.

Кожен з діапазонів частот має свій специфічний набір втрат по розповсюдженні сигналу, який необхідно враховувати при розрахунках.

На сьогоднішній день вирізняють наступні найбільш застосовані частотні діапазони несучої хвилі СІС [3]:

- L – діапазон. 1-2 ГГц. Навігаційні системи такі, як GPS;
- С – діапазон. 4-8 ГГц. Використовується для теле-мовлення та передачі даних;
- Х – діапазон. 8-12 ГГц. Зарезервований для військового використання.

- Ku – діапазон. 12-18 ГГц. Використовується для передачі телекомунікаційних послуг (телебачення, високошвидкісний Інтернет, мобільний зв'язок). Також застосовується у військових цілях для ведення розвідки, як і Ka діапазон;
- Ka – діапазон. 26-40 ГГц. Використовується для супутникового зв'язку, надання послуг з високошвидкісного Інтернету (групи супутників Starlink працюють саме в цьому діапазоні).

Слід розуміти, що із року в рік виходячи з вимог ІТУ, з'являються нові набори діапазонів частот, які активно застосовують компанії по розробці нових супутникових систем.

При вивченні рекомендацій Міжнародного союзу електрозв'язку були обрані найвпливовіші фактори послаблення РЛ за рахунок явищ атмосфери Землі на частоті несучої хвилі сигналу більше 1 ГГц, які перераховані в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 Явища послаблення в атмосфері

| Вид послаблення | Фактор впливу |
|--|--|
| Послаблення за рахунок хмарності [9] | На частотах 10 ГГц і вище, при збільшенні частот, послаблення стає усе більш важливим фактором, особливо для малих кутів місця |
| Поглинання, розсіювання і деполяризація за рахунок гідрометеорів (крапель води і часток льоду в опадах) [12] | Ці явища особливо помітні на частотах вище 5 ГГц |
| Послаблення РХ в атмосферних газах на похилих трасах [8] | Діапазон частот 1-1000 ГГц |

2.2 Методика розрахунку еквівалентної шумової температури СІС

При визначенні величини енергетичного запасу РЛ важливо визначити загальну потужність шумів, які створюються на вході приймального пристрою

різними джерелами – еквівалентну шумову температуру, яка розраховується за формулою [3]:

$$T_{\text{екв}} = T_A T_{\text{ПРМ}} + 290 * (1 - L_{\text{ПРМ}}) + (F - 1) * 290 \text{ (K)} \quad (2.1)$$

де T_A - шумова температура антени, K ; F - коефіцієнт шуму приймача;

$L_{\text{ПРМ}}$ - втрати у НВЧ-тракті від виходу антени до входу МШП.

Еквівалентна шумова температура для бортової антени (БА) може бути надана у вигляді складових

$$T_{\text{БА}} = T_{\text{атм}} + T_{\text{зем}} + 2cT_{\text{косм}}, \text{ (K)} \quad (2.2)$$

де $T_{\text{атм}}$ - шумова температура атмосфери, K ;

$T_{\text{зем}}$ - яскравісна температура Землі, K ;

$T_{\text{косм}}$ - яскравісна температура протяжних космічних джерел, K ; c - коефіцієнт, що враховує усереднений рівень бічних і задніх пелюсток діаграми спрямованості антени.

Еквівалентна шумова температура для наземної антени (НА) може бути представлена у вигляді складових:

$$T_{\text{НА}} = T_{\text{косм}} + T_{\text{атм}} + cT_{\text{вип.зем}} + T_{\text{обт}}, \text{ (K)} \quad (2.3)$$

де $T_{\text{обт}}$ - шумова температура за рахунок впливу обтічника НА, (K) ;

$T_{\text{вип. зем}}$ - шумова температура випромінювання Землі, (K) .

Радіовипромінювання земної атмосфери має тепловий характер і повною мірою обумовлене поглинанням сигналів в атмосфері. В силу термодинамічної рівноваги, атмосфера випромінює ту саму кількість енергії на даній частоті яку й поглинає.

Шумова температура атмосфери визначається за формулою:

$$T_{\text{атм}} = T_{\text{атм.сер}} (1 - 10^{(-A_r - A_c - A_g)/10}), (K) \quad (2.4)$$

де $T_{\text{атм.сер}}$ - середня термодинамічна температура атмосфери (K);

A_r - послаблення за рахунок гідрометеорів, (дБ);

A_c - послаблення в атмосферних газах, (дБ);

A_g - послаблення за рахунок хмарності, (дБ).

Шуми космічного походження визначаються в основному випромінюванням Галактики, Сонця і Місяця. При цьому усереднена температура шумів Галактики є дуже малою в діапазоні частот 6/4 ГГц і вище і не перевищує декількох градусів Кельвіна на частотах більше 2 ГГц при кутах місця 10 град.

В той же час випромінювання Сонця може повністю порушити зв'язок при попаданні в головну пелюстку ДСА.

Випромінювання місяця робить ще менший вплив, ніж шуми Галактики, оскільки його шумова температура на декілька порядків нижча шумової температури Сонця.

Коефіцієнт, що враховує інтегральний рівень бічних пелюсток ДСА, визначається за формулою [7]:

$$c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_0^{\Omega_{\text{бокi}}} G_{\text{бокi}}(\alpha, \theta) d\Omega / \int_0^{\Omega_{\text{гол}}} G(\alpha, \theta) d\Omega \quad (2.5)$$

де $G_{\text{бокi}}(\alpha, \theta)$ - коефіцієнт підсилення антени в межах задніх та бічних пелюсток;

$G(\alpha, \theta)$ - коефіцієнт підсилення антени в межах головної пелюстки.

Складова шумів антени від теплового випромінювання Землі $T_{\text{вип. зем}}$ при кутах нахилу антени від (5-7) град. до 90 град. обумовлена його прийомом бічними і задніми пелюстками ДС. За рахунок бічних пелюсток ДСА збільшення температури шумів антени НС можна приблизно оцінити за формулою:

$$cT_{\text{зем}} = 23 + 0,2(90^0 - \theta), (K) \quad (2.6)$$

де θ – кут місця приймальної антени, град.

Для БА слід приймати $T_{\text{зем}} = 290 K$. В деяких випадках антени НС укривають від дії опадів радіо прозорими обтічниками.

Втрати сигналу і відповідний приріст шумів зазвичай невеликі і можуть практично не враховуватися. Але під час інтенсивних дощів на поверхні обтічника виникає водяна плівка, яка являється причиною помітного поглинання РС і виникнення вторинних шумів.

2.3 Втрати в радіолінії

При поширенні радіохвиль (РХ) природними радіотрасами на характеристики РС впливає довкілля.

Окрім втрат у вільному просторі, РХ отримує додаткові втрати: втрати при розповсюдженні через атмосферу, втрати через помилки наведення антени, поляризаційні втрати (поляризаційними втратами ми нехтуємо на частотах вище 1 ГГц, бо втрати незначні), втрати на обтічнику антени та ін [7].

Загальні втрати в РЛ розраховуються за формулою:

$$\sum L = L_{\text{пр}} + A_t + L_{\text{поляр}} + L_{\text{навПРД}} + L_{\text{навПрМ}} + L_{\text{ін.втрати}} (\text{дБ}), (2.7)$$

де $L_{\text{пр}}$ - втрати у вільному просторі;

A_t - загальне сумарне послаблення РС в атмосфері;

$L_{\text{поляр}}$ - поляризаційні втрати,

$L_{\text{навПРД}}, L_{\text{навПрМ}}$ - втрати, викликані помилками наведення передавальної і приймальної антен;

$L_{\text{ін.втрати}}$ - інші втрати, викликані між символною інтерференцією, завадами сусіднього каналу, втратами, пов'язаними з обмеженням смуги (оскільки усі системи використовують ПРД фільтри для передачі енергії в обмежених смугах,

подібна фільтрація зменшує загальну кількість енергії на передачу, що призводить до послаблення РС).

2.4 Втрати у вільному просторі

Втрати у вільному просторі розраховуються згідно з формулою:

$$L_{\text{пр}} = \left(4\pi \frac{d_{\text{ПРД-ПрМ}}}{\lambda} \right)^2, \quad (2.8)$$

де $d_{\text{ПРД-ПрМ}}$ - дальність РЗ, м;

λ – довжина РХ, м.

2.5 Втрати при помилковому наведенні антен

Втрати, викликані помилкою наведення, обумовлені неточністю наведення антени і враховуються незалежно як для передавальної, так і для приймальної антен. Коефіцієнт підсилення антени розраховується в максимумі ДСА і зменшується з відступом від нього у відповідності з її характеристикою [2].

Відступ, який визначає зниження коефіцієнта підсилення антени - помилка кута наведення.

Втрати, викликані помилкою наведення, розраховуються за формулою:

$$L_{\text{нав}} = 12 * \left(\frac{APE}{BW} \right)^2, \quad (\text{дБ}) \quad (2.9)$$

де APE – помилка кута наведення, град;

BW - ширина ДСА за рівнем - 3дБ, град.

2.6 Згасання в атмосфері

При розповсюдженні РХ в земній атмосфері виникає послаблення напруженості поля за рахунок поглинання в газах, розсіяння і поглинання в гідро

метеорах (дощі, граді, снігу, тумані, хмарах), а також за рахунок поглинання в іонізованих шарах[7].

Основне поглинання РХ викликає кисень і водяна пара.

При розгляді впливу тропосфери на поширення РХ необхідно враховувати основні чинники: рефракцію РХ, перевипромінювання гідрометеорами тропосфери, послаблення газами і гідрометеорами і деполяризацію.

Також необхідно враховувати таке явище, як поглинання в іоносфері. Воно обумовлено зіткненнями вільних заряджених часток з нейтральними молекулами і атомами.

У процесі таких зіткнень енергія заряджених часток за рахунок виникнення впорядкованої швидкості при дії ЕМП, передається нейтральним молекулам і атомам, тобто мають місце теплові втрати.

Поглинання в іоносфері суттєво зменшується при збільшенні частоти f (обернено пропорційні до квадрата частоти) в наслідок інерційності заряджених часток.

Поглинання стає дуже малим на частотах вище 100-150 МГц, тобто його можна не враховувати в тих діапазонах частот, які застосовуються в сучасних системах зв'язку і мовлення з використанням космічних апаратів.

Усі перераховані явища мають залежність від частоти, географічного положення і кута місця.

Загальне сумарне послаблення РС в атмосфері обчислюється за формулою[8]:

$$A_t = A_g + ((A_r + A_c)^2 + A_s^2)^{1/2} \text{ (дБ)} \quad (2.10)$$

2.7 Послаблення в хмарах

Величину послаблення внаслідок впливу хмарності на похилих трасах розрахується за такою формулою [9]:

$$A_c = \frac{LK_l}{\sin \theta}, \text{ (дБ)} \quad (2.11)$$

де θ - кут місця;

L - статистика загального стовбчастого об'єму рідкої води над Країною;

K_l - коефіцієнт погонного послаблення.

2.8 Послаблення в дощі

Послаблення РС в гідрометеорах, в першу чергу обумовлене розсіянням електромагнітної енергії краплями води. Під впливом того, що кожна крапля стає вторинним джерелом випромінювання в різних напрямках, зменшується доля енергії, в точці прийому РС.

Друга причина послаблення напруженості поля в гідрометеорах - нерезонансне поглинання в краплях, яке залежить від їх кількості, електричних властивостей і частоти. Це явище є функцією частоти, кута місця і інтенсивності опадів.

Вплив дощу обчислюється наступним чином [13]:

$$A_r = A_{0,01} * \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655+0,033\ln(p)-0,045\ln(A_{0,01})-\beta(1-p)\sin\theta)}, \text{ (дБ)} \quad (2.12)$$

де $A_{0,01}$ - прогнозоване значення послаблення, дБ;

p - відсоток пори середнього року, %.

Відсоток пори середнього року, при якому проводиться розрахунок втрат в атмосфері, наприклад 0,01%, означає, що впродовж 99,99% часу року послаблення на РЛ не перевищуватиме розраховану величину і доступність РЛ складатиме 99,99% [13].

Прогнозоване значення послаблення $A_{0,01}$, яке перевищується впродовж 0,01% часу середнього року, визначається за наступною формулою:

$$A_{0,01} = \gamma_k L_e, \text{ (дБ)} \quad (2.13)$$

де γ_k - погонне послаблення, методика розрахунку наведена далі в даному розділі;

L_e - ефективна довжина траси, км (використання ефективної довжини замість реальної дозволяє врахувати нерівномірність розподілу дощу уздовж реальної траси)

Ефективна довжина траси обчислюється наступним чином:

$$L_B = Rk_{\text{тр}}(0,01), \quad (2.14)$$

де $k_{\text{тр}}(0,01) = 1 / [1 + (R/L_0)]$ - коефіцієнт укорочення траси;

$L_0 = 35e^{-0.015I_d(0.01)}$ - опорна відстань при $I_d \leq 100$ мм/год.

При $I_d > 100$ мм/год приймається $I_d = I_{\text{max}} = 100$ мм/год

Оцінка послаблення, що перевищується для інших відсотків пори середнього року в діапазоні від 0,001% до 5%, визначається перерахунком по значенню послаблення 0,01% пори середнього року.

2.9 Послаблення в атмосферних газах

Послаблення РС викликане явищем поглинання в атмосферних газах і залежить від частоти, кута місця, висоти над рівнем моря і щільності водяної пари.

Послаблення на трасі для систем зв'язку можна розрахувати, розділивши атмосферу на горизонтальні шари, що визначають профіль зміни таких параметрів, як тиск, температура і вологість уздовж траси [10].

Послаблення в атмосферних газах розраховується за наступною формулою:

$$A_g = \sum_{n=1}^k a_n \gamma_k, \quad (\text{дБ}) \quad (2.15)$$

де a_n - довжина ділянки траси в шарі, км;

γ_k - погонне послаблення.

Погонні втрати, в основному, складаються з втрат в атомах кисню і в молекулах води. Практично повна непрозорість атмосфери для радіохвиль спостерігається на частоті 118.74 ГГц (резонансне поглинання в атомах кисню), а на частотах більше 60 ГГц погонне загасання перевищує 15 дБ/км. Ослаблення в

водяних парах атмосфери залежить від їх концентрації і дуже велике у вологому теплому кліматі і особливо вносить свій внесок на частотах нижче 45 ГГц.

Для комп'ютерних розрахунків можна скористатися аналітичними виразами, наведеними нижче.

Погонні втрати в атомах кисню розраховується за формулою [10]:

$$\gamma_o = \left[7.1 \times 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.5} \right] f^2 10^{-3}, \quad (\text{дБ/км}) \quad (2.16)$$

де f – робоча частота, ГГц.

Формула справедлива для робочих частот нижче 57 ГГц, при нормальному атмосферному тиску і при температурі повітря +15 град. С⁰.

Погонні втрати в водяних парах (дБ/км) розраховуються за формулою [10]:

(2.17)

$$\gamma_w = \left[0.05 + 0.0021 \times \rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3} \right] f^2 \rho 10^{-4}$$

де ρ - концентрація водяної пари в атмосфері, г/м³ (зазвичай $\rho = 7.5$ г/м³).

Сумарні погонні втрати при температурі 15 град:

$$\gamma_k = \gamma_o + \gamma_w, \quad (\text{дБ/км}). \quad (2.18)$$

3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Написання програми для розрахунку енергетичного запасу РЛ на підставі апарату сучасних СІС

Програмне забезпечення для розрахунку енергетичного запасу РЛ СІС розроблено на мові програмування C++, з використанням сучасного фреймворку Qt, для реалізації графічного інтерфейсу користувача.

Вибір мови C++ для реалізації поставленої задачі обґрунтований наступними чинниками:

- простота реалізації;
- висока ефективність та швидкодія програмного коду. В нашому випадку буде виконуватися багато математичних розрахунків з використанням чисел з плаваючою комою.
- незначне та оптимальне використання ресурсів обчислювальної машини на яку буде портоване програмне забезпечення.

Програма реалізована з графічним інтерфейсом користувача, задля простоти та наочності вводу та виводу даних.

Вибір фреймворку Qt для реалізації поставленої задачі обґрунтований наступними чинниками:

- простота реалізації графічного інтерфейсу.
- Qt є об'єктно-орієнтованим.
- Qt дозволяє зробити платформу-незалежний програмний код.
- Qt не потребує великих ресурсів від обчислювальної машини для виконання коду програми.
- Має різноманітний набір вбудованих механізмів криптозахисту застосунку

Легкість та простота Qt обумовлена основною концепцією фреймворка – «теорія сигналів і слотів». Весь код GUI будується на принципі: з'явилась якась подія (тобто «сигнал», наприклад натиснули на кнопку), негайно обробити цю подію функцією обробником «слот», та видати результат обробки.

Також основним критерієм вибору даного фреймворку стало те, що він дозволяє зробити платформи-незалежний програмний код на мові C++ (бо виступає в якості обгортки для C++ та керує компіляцією коду), і дозволяє з легкістю імпортувати програму на різні платформи під управлінням різних операційних систем (Windows, Linux, Android та ін.).

Суттєвим фактором, при написанні програмного застосунку є його подальший захист від незаконного привласнення. В Qt є безліч механізмів та засобів таких, як використання цифрових підписів, шифрування даних, ліцензування та обмеження доступу. Оскільки в нас програма виконується локально на комп'ютері, без запитів на сервер, та передачі даних в мережі, нам достатньо буде вбудувати захист від зворотного проектування (Reverse Engineering). Для цього застосовується техніка обфускації коду, щоб ускладнити аналіз та модифікацію програмного забезпечення.

В Qt також легко можна застосувати шифрування важливих частин коду, чи конфігураційних файлів.

Розробка математичного блоку програми проводилася опираючись на запропоновані методи розрахунків параметрів РЛ наведених в другому розділі.

3.2 Реалізація графічного інтерфейсу користувача

Першим кроком при написанні застосунку було розроблено графічний інтерфейс користувача для зручного вводу та виводу даних.

Реалізовано наступну структуру полів рис. 3.1

Магістерська робота, студента Зозулі, розрахунок енергетичного запасу радіолінії "КА - НС" Пишіть здесь

| ВХІДНІ ДАНІ | ВИХІДНІ ДАНІ |
|--|---|
| <input type="text"/> Мбіт/с, пропускна здатність радіолінії <input type="text"/> дБ, відношення енергії інформаційного біта до односторонньої спектральної щільності потужності шуму <input type="text"/> дБ, ширина смуги сигналу | <input type="text"/> дБВт. енергетичний запас |
| <input type="text"/> ГГц, несуча частота сигналу <input type="text"/> Км, довжина радіолінії <input type="text"/> °, кут місця <input type="text"/> °, помилка кута наведення | <input type="text"/> дБВт, потужність радіосигналу <input type="text"/> дБВт, еквівалентна втропна випр. потужність <input type="text"/> дБВт, чутливість приймача |
| <input type="text"/> дБ, коефіцієнт підсилення передавальної антени космічного апарату <input type="text"/> дБ, втрати в НВЧ-тракті від виходу ПП до входу антени <input type="text"/> дБВт, потужність сигналу на виході підсилювача потужності | <input type="text"/> К, еквівалентна шумова температура СІС |
| <input type="text"/> дБ, коефіцієнт підсилення приймальної антени наземної станції <input type="text"/> дБ, втрати в НВЧ-тракті від виходу антени до підсилювача <input type="text"/> коефіцієнт шуму приймача <input type="text"/> ширина діаграми спрямованості антени за рівнем -3 дБ, град. <input type="text"/> дБ, втрати за рахунок фільтру обмеження смуги | <input type="text"/> дБ, загальні втрати в радіолінії <div style="margin-left: 20px;"> <input type="text"/> дБ, втрати у вільному просторі <input type="text"/> дБ, втрати помилок наведення антен <input type="text"/> дБ, загальне згасання в атмосфері <div style="margin-left: 20px;"> <input type="text"/> дБ, послаблення в хмарах <input type="text"/> дБ, послаблення в дощі <input type="text"/> дБ, послаблення в атмосферних газах </div> </div> |
| <input type="text"/> кг/м2, загальний стовпчастий об'єм рідкої води над країною | <input type="button" value="РОЗРАХУВАТИ"/> |

Рисунок 3.1 – Структура полів GUI програми

Розробка каркасу GUI відбувалася за допомогою конструктора в середовищі програмування Qt Creator.

Було реалізовано:

- зручний ввід даних за допомогою текстових полів в стовпці «ВХІДНІ ДАНІ» зображеного на рис. 3.1
- Зручне відображення вихідних даних в текстових полях в стовпці «ВИХІДНІ ДАНІ» зображеного на рис. 3.1
- Кнопка «РОЗРАХУВАТИ», при натисканні якої запускається алгоритм розрахунку енергетичного запасу РЛ.
- Створені надписи навпроти кожного з полів, для інформації про вхідний параметр, та величину.

Наступним кроком було реалізовано програмний блок запуску та закриття програми (рис. 3.2):

```

#include "mainwindow.h"

#include <QApplication>
#include <QLabel>

int main(int argc, char *argv[])
{
    QApplication a(argc, argv);
    MainWindow w;


    w.setMinimumHeight(749);
    w.setMaximumHeight(749);
    w.setMinimumWidth(1215);
    w.setMaximumWidth(1215);

    w.show();

    return a.exec();
}

```

Рисунок 3.2 – Блок запуску програми

Функцію `main` викликає операційна система (після відкриття виконуючого файлу програми `.exe`). В функції створюється об'єкт класу `MainWindow` (головне вікно програми), далі задаються розміри вікна та командою `show()` вікно починає відображатися в операційній системі. Як тільки користувач закриє програму натиснувши на кнопку , виконається функція `exec()`, яка звільнить усі виділені ресурси ПК для даної програми. При створенні об'єкту `w` класу `MainWindow` в його конструкторі полям для вводу та виводу даних призначається початковий текст, який є свого роду підказкою про тип вхідних та вихідних даних.

Призначення виконується через `id` графічних елементів та об'єкт `ui`, котрий містить опис всіх графічних елементів програми (рис. 3.3):

```

MainWindow::MainWindow(QWidget *parent)
    : QMainWindow(parent)
    , ui(new Ui::MainWindow)
{
    ui->setupUi(this);

    this->setWindowTitle("Розрахунок енергетичного запасу РЛ СІС, версія ПО 1.1");
    ui->lineEdit->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_2->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_10->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_9->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_8->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_4->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_3->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_6->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_14->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_15->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_5->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_16->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_11->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_13->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_12->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_17->setPlaceholderText("0.0");

    ui->lineEdit_7->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_20->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_18->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_19->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_21->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_22->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_25->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_23->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_24->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_27->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_28->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_26->setPlaceholderText("0.0");
}

```

Рисунок 3.3 – Призначення початкових значень текстовим полям

Далі прописані блокування для можливого редагування полів вихідних даних (рис. 3.4).

```

ui->lineEdit_7->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_20->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_18->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_19->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_21->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_22->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_25->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_23->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_24->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_27->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_28->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_26->setReadOnly(true);

```

Рисунок 3.4 – Блокування редагування вихідних значень

Після створення в конструкторі програмного середовища кнопки «РОЗРАХУВАТИ», їй була присвоєна подія (так званий «сигнал») по натисненню. Відповідно в якості обробника цієї події, обрана функція (так званий «слот» рис. 3.5):

```
private slots:  
void on_pushButton_clicked();|
```

Рисунок 3.5 – Функція «слот»

Дана функція в нашому коді буде ключовою, бо виконуватиме наступні задачі:

- Отримання даних від вхідних полів.
- Поступовий розрахунок параметрів математичної моделі із другого розділу.
- Вивід результату у вихідні поля.

В даному підрозділі була приведена частина реалізації GUI та надано короткий опис, для більш детального ознайомлення з реалізацією GUI – додаток А. Код програмного продукту.

Кінцевий зовнішній вигляд програми приведений в додатку Б. Зовнішній вигляд програмного продукту.

3.3 Реалізація головної обчислювальної функції програми

Функція `on_pushButton_clicked` викликається в якості реакції на подію по натисненню кнопки «РОЗРАХУВАТИ». Опис функції зроблений в класі `MainWindow`.

Першочергово в даній функції відбувається зчитування тексту з полів вхідних даних, подальше перетворення тексту в числа з плаваючою комою, та присвоєння внутрішнім змінним класу `MainWindow` рис. 3.6.

```

information_transfer_rate = (ui->lineEdit->text()).toDouble();
V_EN = (ui->lineEdit_2->text()).toDouble();
Gprd_A = (ui->lineEdit_10->text()).toDouble();
T_A = (ui->lineEdit_9->text()).toDouble();
Lprd_t = (ui->lineEdit_8->text()).toDouble();
Dspyt = (ui->lineEdit_4->text()).toDouble();
f_signal = (ui->lineEdit_3->text()).toDouble();
APE_L = (ui->lineEdit_6->text()).toDouble();
BW_L = (ui->lineEdit_14->text()).toDouble();
Lfiltru = (ui->lineEdit_15->text()).toDouble();
kut_spyt = (ui->lineEdit_5->text()).toDouble();
Ls = (ui->lineEdit_16->text()).toDouble();
Gprm_A = (ui->lineEdit_11->text()).toDouble();
Lprm_A = (ui->lineEdit_13->text()).toDouble();
F_R = (ui->lineEdit_12->text()).toDouble();
B = (ui->lineEdit_17->text()).toDouble();

```

Рисунок 3.6 – Ввід даних

Внутрішні змінні класу виступають в якості величин які необхідні для подальшого розрахунку енергетичного запасу РЛ.

Оголошення змінних та їх опис (рис. 3.7):

```

double information_transfer_rate = 0.0;
// Пропускна здатність радіолінії. Ввести с поля в Мбіт/с
double V_EN = 0;
/* необхідне відношення енергії інформаційного біта до односторонньої
 * спектральної щільності потужності шуму при заданій достовірності
 * прийому і швидкості передачі інформації, дБ;
*/
double Gprd_A = 0;
// Ввести с поля, коефіцієнт підсилення приймальної антени, дБ
double T_A = 0;
// Ввести с поля, величина потужності РС на виході підсилювача потужності (ПП), дБВт;
double Lprd_t = 0;
// Ввести с поля, втрати у НВЧ-тракті від виходу ПП до входу антени, дБ
double Dspyt = 0;
// Ввести с поля, довжину радіолінії, Км
double f_signal = 0;
// Ввести с поля, частота сигналу ГГц
double APE_L = 0;
// Ввести с поля, помилка кута наведення, град;
double BW_L = 0;
// Ввести с поля, ширина ДСА за рівнем - 3дБ, град.
double Lfiltru = 0;
// Ввести с поля, втрати за рахунок ПРД фільтру, дБ
double kut_spyt = 0;
// Ввести с поля, кут між вектором радіосигналу та поверхнею землі, град
double Ls = 0;
// Ввести с поля, статистика загального стовбчастого об'єму рідкої води над Країною кг/м2
double Gprm_A = 0;
// Ввести с поля, коефіцієнт підсилення приймальної антени (дБ)
double Lprm_A = 0;
// Ввести с поля, втрати в НВЧ-тракті від виходу антени до МШП (дБ)
double F_R = 0;
// Ввести с поля, коефіцієнт шуму приймача
double B = 0;
// Ширина смуги сигналу, яка визначається в дБ відносно величини 1 Гц, дБГц

```

Рисунок 3.7 – Опис змінних

Після того як змінні отримали вхідні дані, в функції `on_pushButton_clicked` розпочинається почерговий виклик функцій-формул для обчислення енергетичного запасу РЛ (рис. 3.8):

```
gamma = round(running_attenuation_gas(f_signal)*1000)/1000;
Ag = round(losses_in_atmospheric_gases(gamma, Dspyt)*1000)/1000;
Ar = round(relaxation_in_the_rain(gamma, Dspyt)*1000)/1000;
Lpr = round(losses_in_free_space(Dspyt, f_signal)*1000)/1000;
Lnav = round(loss_of_antenna_guidance_errors(APE_L, BW_L)*1000)/1000;
Ac = round(relaxation_in_the_clouds(Ls, kut_spyt, f_signal)*1000)/1000;
At = round(attenuation_in_the_atmosphere(Ag, Ar, Ac)*1000)/1000;
Lsum = round(sum_radio_link_loss(Lpr, At, Lnav, Lfiltru)*1000)/1000;
EIVP = round(calculationEIVP(Gprd_A, T_A, Lprd_t)*1000)/1000;
Pvx = round(radio_signal_power(EIVP, Lsum, Gprm_A, Lprm_A)*1000)/1000;
Tekv = round(equivalent_noise_temperature(kut_spyt, Lprm_A, F_R, Ar, Ac, Ag)*1000)/1000;
Rx = round(receiver_sensitivity(Tekv, (information_transfer_rate), V_EN, B)*1000)/1000;
resultZ = round(energy_reserve(Pvx, Rx)*1000)/1000;
```

Рисунок 3.8 – Обчислювальні формули енергетичного запасу

Опис даних функцій приведений далі в підрозділі 3.4

Результат виконання округлюється до третього знака після коми та присвоюється змінним для подальшого передавання проміжних значень обчислення іншим функціям. Остання функція яка викликається, вертає значення енергетичного запасу.

Варто зауважити, що округлення до третього знаку після коми не вносить значної похибки в розрахунок, оскільки ми оперуємо достатньо великими числами.

Пояснення що до змінних проміжних значень:

γ – погонне загасання, дБ/км.

A_g - послаблення РС викликане явищем поглинання в атмосферних газах, дБ.

A_r - послаблення РС в гідро метеорах, дБ.

L_{pr} - втрати у вільному просторі, дБ.

L_{nav} - втрати, викликані помилкою наведення, дБ.

A_c - послаблення внаслідок впливу хмарності, дБ.

A_t - загальне сумарне послаблення РС в атмосфері, дБ.

L_{sum} - загальні втрати в радіолінії, дБ.

EIVP - еквівалентна ізотропна випромінювальна потужність, дБВт.

P_{vx} - потужність радіосигналу, дБВт.

T_{ekv} - еквівалентна шумова температура СІС, К.

R_x - чутливість приймача, дБВт.

$resultZ$ - енергетичний запас, дБВт.

Наступним кроком, значення вище перерахованих змінних конвертується з типу число з плаваючою комою в текстовий рядок та виводяться в вихідні поля для відображення у вікні програми результатів розрахунку (рис. 3.9):.

```
temp = QString::number(resultZ);
ui->lineEdit_7->setText(temp);|
temp = QString::number(Pvx);
ui->lineEdit_20->setText(temp);
temp = QString::number(EIVP);
ui->lineEdit_18->setText(temp);
temp = QString::number(Rx);
ui->lineEdit_19->setText(temp);
temp = QString::number(Tekv);
ui->lineEdit_21->setText(temp);
temp = QString::number(Lsum);
ui->lineEdit_22->setText(temp);
temp = QString::number(Lpr);
ui->lineEdit_25->setText(temp);
temp = QString::number(Lnav);
ui->lineEdit_23->setText(temp);
temp = QString::number(At);
ui->lineEdit_24->setText(temp);
temp = QString::number(Ac);
ui->lineEdit_27->setText(temp);
temp = QString::number(Ar);
ui->lineEdit_28->setText(temp);
temp = QString::number(Ag);
ui->lineEdit_26->setText(temp);
```

Рисунок 3.9 – Приведення типів для виводу значень

3.4 Реалізація математичних функцій для розрахунку енергетичного запасу

Розрахунок енергетичного потенціалу розпочинається з визначення величини ЕІВП (рис. 3.10):

```
double MainWindow::calculationEIVP(double Gprd, double T, double Lprd)
{ // Gprd коефіцієнт підсилення передавальної антени (дБ)
  // T величина потужності радіосигналу на виході підсилювача (дБВт)
  // Lprd втрати у НВЧ-тракті від виходу ПП до входу антени, (дБ)
  double EIVP;
  EIVP = Gprd+T-Lprd;
  return EIVP; // (дБВт)
}
```

Рисунок 3.10 – Функція розрахунку EIVP

Величина потужності РС на вході МШП розраховується наступним чином (рис. 3.11):

```
double MainWindow::radio_signal_power(double EIVP, double Lsum, double Gprm, double Lprm)
{ // Lsum величина сумарних втрат (дБ)
  // Gprm коефіцієнт підсилення приймальної антени (дБ)
  // Lprm втрати в НВЧ-тракті від виходу антени до МШП (дБ)
  double Pvx;
  Pvx = EIVP - Lsum + Gprm - Lprm;
  return Pvx; // потужність радіосигналу (дБВт)
}
```

Рисунок 3.11 – Функція розрахунку потужності РС на вході МШП

Порівняння потужності РС на вході МШП із чутливістю приймача визначає величину енергетичного запасу (рис. 3.12):

```
double MainWindow::energy_reserve(double Pvx, double Rx)
{ // Rx – чутливість приймача
  // Pvx – потужність радіолінії на вході МШП
  double Z;
  Z = Pvx - Rx;
  return Z; // енергетичний запас (дБВт)
}
```

Рисунок 3.12 – Оцінка енергетичного запасу

Чутливість радіоприймача розраховується наступним чином (рис. 3.13):

```

double MainWindow::receiver_sensitivity(double Tekv, double R, double EN, double B_w)
{ // k - постійна Больцмана
  // Tekv еквівалентна шумова температура системи
  // E/N необхідне відношення енергії інформаційного біта
  // до односторонньої спектральної щільності потужності шуму
  // R - швидкість передачі інформації
  double Rx;
  double CN;

  double k = -228.6 * pow(10, -23);
  CN = EN*(log(R)-60)-B_w;
  Rx = k + Tekv + B_w + CN;
  return Rx; // Чутливість приймача (дБВт)
}

```

Рисунок 3.13 – Чутливість приймача

При визначенні величини енергетичного запасу РЛ важливо визначити загальну потужність шумів, які створюються на вході приймального пристрою різними джерелами (рис. 3.14):

```

double MainWindow::equivalent_noise_temperature(double kytA, double Lprm, double F, double Ar, double Ac, double Ag)
{ // Ar послаблення за рахунок гідрометеорів
  // Ac послаблення в атмосферних газах
  // Ag послаблення за рахунок хмарності
  // kytA кут місця приймальної антени
  // F коефіцієнт шуму приймача
  // Lprm втрати у НВЧ-тракті від виходу антени до входу МШП
  double Tekv;

  double Tkosm = 0.1; // Яскравісна температура протяжних космічних джерел, К
  double cTvz = (23 + 0.2*(90-kytA));
  double Tatms = 296.25; // Середня термодинамічна температура атмосфери
  double Tatm = Tatms*(1- pow(10, (-Ar-Ac-Ag)/10));
  double Tna = Tkosm+Tatm+cTvz; // Шумова температура антени, К
  Tekv = Tna*Lprm + 290*(1-Lprm)+(F-1)*290;
  return Tekv; // Еквівалентна шумова температура
}

```

Рисунок 3.14 – Розрахунок загальної потужності шумів

При поширенні радіохвиль (РХ) за природними радіотрасами на характеристики РС впливає довкілля.

Окрім втрат у вільному просторі, РХ отримує додаткові втрати: втрати при розповсюдженні через атмосферу, втрати через помилки наведення антени та ін.

Розрахунок загальних втрат приведений на рис. 3.15, втрат у вільному просторі рис. 3.16, втрат викликаних помилкою наведення рис. 3.17

```
double MainWindow::sum_radio_link_loss(double Lpr, double At, double Lnav, double Lfiltru)
{ // Lpr втрати у вільному просторі
  // At загальне сумарне послаблення РС в атмосфері
  // Lnav втрати, викликані помилками наведення передавальної і приймальної антен
  // Lfiltru втратами, пов'язаними з ПРД фільтром
  double Lsum;
  Lsum = Lpr + At + Lnav + Lfiltru;
  return Lsum; // Загальні втрати в РЛ
}
```

Рисунок 3.15 – Розрахунок загальних втрат

```
double MainWindow::losses_in_free_space(double Dprd, double f)
{ // f частота сигналу
  // Dprd дальність радіозв'язку
  double Lpr;

  double lam = 299792458 * (1/(f*100000));
  Lpr = pow(4*(3.14)*((Dprd)/lam), 2);
  return Lpr; // Втрати у вільному просторі
}
```

Рисунок 3.16 – Розрахунок втрат у вільному просторі

```
double MainWindow::loss_of_antenna_guidance_errors(double APE, double BW)
{ // помилка кута наведення
  // ширина ДСА
  double Lnav;
  Lnav = 12*pow((APE/BW), 2);
  return Lnav; // Втрати помилок наведення антен
}
```

Рисунок 3.17 – Розрахунок втрат викликаних помилкою наведення

Загальне сумарне послаблення РС в атмосфері, рис. 3.18:

```
double MainWindow::attenuation_in_the_atmosphere(double Ag, double Ar, double Ac)
{ // Ag послаблення в атмосферних газах
  // Ar послаблення в дощі
  // Ac послаблення в хмарах |
  double At;
  At = Ag+Ac+Ar;
  return At; // Загальне послаблення в атмосфері
}
```

Рисунок 3.18 – Функція обрахування втрат в атмосфері

Величина послаблення внаслідок впливу хмарності, рис. 3.19:

```
double MainWindow::relaxation_in_the_clouds(double L, double kut_spyt, double f)
{
    double K;
    double n;
    double E2;
    double E1;
    double e0, e1, e2;
    double fr, fs;
    double omega;
    double Ac;

    omega = 300/273.15;
    e0 = 77.66 + 103.3*(omega-1);
    e1 = 0.0671*e0;
    e2 = 3.52;

    fr = 20.20 - 146*(omega - 1) + 316*pow((omega-1), 2);
    fs = 39.8*fr;
    E2 = ((f*(e0-e1))/(1+pow((f/fr), 2))) + ((f*(e1-e2))/(1+pow((f/fs), 2)));
    E1 = (((e0-e1))/(1+pow((f/fr), 2))) + (((e1-e2))/(1+pow((f/fs), 2))) + e2;

    n = (2+E1)/ E2;
    K = ((0.819*(1.9479*pow(10, -4)*pow(f, 2.308) + 2.9424*pow(f, 0.7436) - 4.9451))/ (E2*(1+pow(n, 2))));
    Ac = (L*K) / sin(kut_spyt);
    return Ac;
}
```

Рисунок 3.19 – Розрахунок втрат внаслідок впливу хмарності

Функції обрахунку послаблення РС в гідрометеорах, атмосферних газах і погонного загасання приведені на рис. 3.20, рис 3.21 та рис 3.22 відповідно.

```
double MainWindow::relaxation_in_the_rain( double gam, double R)
{
    double Ar;
    double A0;
    double p = 0.01;
    double Re, Ktr, L0, I=100;

    L0 = 35*exp(-0.015*I);
    Ktr = 1/(1+(R/L0));
    Re = R*Ktr;

    A0 = gam*Re;
    Ar = A0 * pow(p/0.01, -(0.655+0.033*log(p) - 0.045*log(A0)));
    return Ar;
}
```

Рисунок 3.20 – Послаблення в гідрометеорах

```
double MainWindow::losses_in_atmospheric_gases(double gam, double R)
{
    double Ag;
    double Re, Ktr, L0, I=100;

    L0 = 35*exp(-0.015*I);
    Ktr = 1/(1+(R/L0));
    Re = R*Ktr;
    Ag = gam*Re;
    return Ag;
}
```

Рисунок 3.21 – Послаблення в атмосферних газах

```
double MainWindow::running_attenuation_gas(double f)
{
    double Y0;
    double Yw;

    Y0 = ((7.19*pow(10, -3) + (6.09/(f*f+0.227)) +
    (4.81/(pow(f-57, 2)+1.5)))*f*f*pow(10, -3));

    Yw = (0.05+0.0021*7.5+(3.6/(pow(f-22.2, 2)+8.5))+
    (10.6/(pow(f-183.3, 2)+9)))+(8.9/(pow(f-325.4, 2)+26.3))*f*f*7.5*pow(10, -4);
    return Y0+Yw;
}
```

Рисунок 3.22 – Функція обрахунку погонного загасання

Також в програмному кодї реалізована оцінка енергетичного запасу (рис. 3.23):

```
if(resultZ < 1)
    ui->label_19->setText("Забезпечити прийом сигналу з необхідною достовірністю неможливо!!!");
else if(resultZ >= 1)
    ui->label_19->setText("Прийом забезпечується з необхідною достовірністю");
```

Рисунок 3.23 – Оцінка доступності РЛ

У випадку, коли потужність сигналу на вході МШП менше чутливості РПрМ ($Z < 0$), то буде виводитися повідомлення що забезпечити прийом сигналу з необхідною достовірністю неможливо.

Якщо рівень потужності сигналу на вході МШП більше чутливості ($Z > 0$), то буде виводитися повідомлення що прийом забезпечується з необхідною достовірністю.

3.5 Аналіз використаних розрахунків

На базі дослідженої інформації та створеного програмного продукту ми можемо зробити висновки, що для розрахунку енергетичного запасу РЛ та побудови сучасних СІС є доцільним використання не всіх параметрів які були досліджені. Також слід зауважити що на частотах несучої хвилі більше 5 ГГц обов'язковим до розрахунку є втрати в атмосфері (послаблення в дощі, атмосферних газах, хмарах), бо викликають значну втрату потужності сигналу.

Поляризаційні втрати викликані ефектом Фарадея (обертання площини поляризації хвилі при проходженні через іоносферу), можна не враховувати, бо ефект на частотах від 2 ГГц дуже несуттєвий.

На основі досліджень була розроблена таблиця 3.1 - Доцільність використання параметрів для розрахунків.

Таблиця 3.1 Доцільність використання параметрів для розрахунків

| Параметр | Обов'язково/доцільно для розрахунку |
|---|-------------------------------------|
| Інформаційна швидкість передачі даних, (Мбіт/с) | обов'язково |
| Ширина смуги сигналу, (дБГц) | доцільно |
| Необхідне відношення $E_b / N_{0,необх}$ | обов'язково |
| Частота, ГГц | обов'язково |
| ЕІВП ПРД, (дБВт) | обов'язково |
| Коефіцієнт підсилення антени на передачу, (дБ) | доцільно |
| Втрати в НВЧ-тракті, (дБ) | доцільно |
| Потужність ПРД, (дБВт) | доцільно |
| Втрати наведення антени на передачу, (дБ) | обов'язково |
| Ширина ДСА, (град) | доцільно |
| Помилки кута наведення, (град) | доцільно |

Продовження таблиці 3.1

| Параметр | Обов'язково/доцільно для розрахунку |
|--|--|
| Втрати у вільному просторі, (дБ) | обов'язково |
| Дальність зв'язку, (км) | доцільно |
| Кут місця, (град) | обов'язково |
| Відсоток пори середнього року, (%). | обов'язково |
| Інтенсивність опадів | обов'язково |
| Втрати в атмосфері, (дБ) | обов'язково |
| Послаблення в дощі, (дБ) | обов'язково |
| Послаблення а атмосферних газах, (дБ) | обов'язково |
| Послаблення в хмарах, (дБ) | обов'язково |
| Втрати наведення приймальної антени, (дБ) | обов'язково |
| Ширина ДСА, (град) | доцільно |
| Помилка наведення антени, (град) | доцільно |
| Коефіцієнт підсилення приймальної антени, (дБі) | доцільно |
| Шумова температура системи, (дБК) | доцільно |
| Втрати в НВЧ-тракті, (дБ) | доцільно |
| Запас, (дБВт) | обов'язково |

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі було проаналізовано сучасний науково-методичний апарат розрахунку енергетичного запасу РЛ СІС та встановлена основна методика розрахунку для сучасного найпоширенішого діапазону частот (L, S, C, X, Ku, Ka і вище).

Були проаналізовані основні фактори впливу середовища на радіолінію в залежності від частоти несучої хвилі.

В роботі було показано, що РЛ з частотою більше 1 ГГц сильно залежить від гідрометрів, атмосферних газів та хмарності, адже вони можуть викликати значне погіршення зв'язку «космічний апарат – наземна станція». Розрахунки даних послаблень були включені в прорахунок загальних втрат радіосигналу.

Також аналіз показав необхідність враховувати особливості апаратурних відмінностей на цих ділянках, а також різних енергетичних потенціалів і шумів, таких як, втрати у вільному просторі, помилок наведення, загальної шумової температури антени та ін.

Найбільш повний та точний розрахунок з урахуванням впливу земної поверхні і атмосфери вже на стадії перед проекту дозволяє надалі усунути корекції вимог, які надаються до бортової і наземної апаратури, та проводити в подальшому корекції та компенсації параметрів вже працюючих систем.

На підставі вище вказаних матеріалів був реалізований програмний засіб для визначення енергетичного запасу РЛ СІС.

Особливістю даного програмного продукту є те що він може використовуватися для розрахунку РЛ на частотах від 1 ГГц.

Дане програмне забезпечення в перспективі дозволить спростити роботу інженерам ракетно-космічної галузі, та заощадити час, перекладаючи розрахунки енергетичного запасу на потужності обчислювальних машин.

Застосувавши фреймворк Qt, ми зробили застосунок, який може з легкістю при необхідності бути портованим на різні обчислювальні електронні засоби

Розробка програмного засобу відбувалася спираючись на рекомендації ІТУ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Скляр Б., Цифровий зв'язок. “Теоретичні основи і практичне застосування”, видавнича група “Вільямс”, 2003. 1104 с.
2. Марков Г. Т., Сазонов Д. М., “Антени”. Посібник для студентів радіотехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів, видавнича група “Енергія”, 1975. 523 с.
3. Кантора Л. Я., “Супутниковий зв'язок і мовлення”, видавнича група “Радіо і зв'язок”, 1988. 168 с.
4. Вишнівський В. В., Долгушин В. П., Тхоржевський В. І., “Методика ескізного проектування радіолокаційних станцій”, навчальний посібник, видавничо-поліграфічний центр “Київський національний університет ім. Т. Шевченка” 2005, 29 с.
5. Слободянюк П. В., Благодарний В. Г., Ступак В.С., “Довідник з радіомоніторингу”, видавництво “Аспект-Поліграф”, Ніжин, 2008, 588 с.
6. Слободянюк П. В., Благодарний В. Г., “Радіомоніторинг: вчора, сьогодні, завтра”, видавництво “Аір-Поліграф”, Прилуки, 2010, 352 с.
7. ITU-R Recommendations. P.618-13. “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems”, Geneva, 2017.
8. ITU-R Recommendations. P.676-11 “Attenuation by atmospheric gases, Geneva”, 2016.
9. ITU-R Recommendations. P.840-5 “Attenuation due to clouds and fog”, Geneva, 2017.
10. ITU-R Recommendations. P.838-3 “Модель погонного послаблення в дощі, використовувана в методах прогнозування”, Женева, 2005.
11. ITU-R Recommendations. P.835-6 “Reference standard atmospheres, Geneva”, 2017.
12. ITU-R Recommendations. P.453-13 “The radio refractive index: its formula and refractivity data”, Geneva, 2017.
13. ITU-R Recommendations. P.839-4 “Модель висоти шарів дощу, використовувана в методах прогнозування”, (1992-1997-1999-2001-2013).

ДОДАТОК А

ПОВНИЙ ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ

Файл main.cpp

```

#include "mainwindow.h"

#include <QApplication>
#include <QLabel>

int main(int argc, char *argv[])
{
    QApplication a(argc, argv);
    MainWindow w;

    w.setMinimumHeight(749);
    w.setMaximumHeight(749);
    w.setMinimumWidth(1215);
    w.setMaximumWidth(1215);

    w.show();

    return a.exec();
}

```

Файл mainWindow.h

```

#ifndef MAINWINDOW_H
#define MAINWINDOW_H

#include <QMainWindow>

QT_BEGIN_NAMESPACE
namespace Ui { class MainWindow; }
QT_END_NAMESPACE

class MainWindow : public QMainWindow
{
    Q_OBJECT

public:
    MainWindow(QWidget *parent = nullptr);
    ~MainWindow();

    double information_transfer_rate = 0.0;
    // Пропускна здатність радіолінії. Ввести с поля в Мбіт/с
    double V_EN = 0;
    /* необхідне відношення енергії інформаційного біта до односторонньої
     * спектральної щільності потужності шуму при заданій достовірності
     * прийому і швидкості передачі інформації, дБ;
     */
    double Gprd_A = 0;
    // Ввести с поля, коефіцієнт підсилення приймальної антени, дБ
    double T_A = 0;

```

```

// Ввести с поля, величина потужності РС на виході підсилювача потужності
(ПП), дБВт;
double Lprd_t = 0;
// Ввести с поля, втрати у НВЧ-тракті від виходу ПП до входу антени, дБ
double Dspyt = 0;
// Ввести с поля, довжину радіолінії, Км
double f_signal = 0;
// Ввести с поля, частота сигналу ГГц
double APE_L = 0;
// Ввести с поля, помилка кута наведення, град;
double BW_L = 0;
// Ввести с поля, ширина ДСА за рівнем - 3дБ, град.
double Lfiltru = 0;
// Ввести с поля, втрати за рахунок ПРД фільтру, дБ
double kut_spyt = 0;
// Ввести с поля, кут між вектором радіосигналу та поверхнею землі, град
double Ls = 0;
// Ввести с поля, статистика загального стовбчастого об'єму рідкої води над
Країною кг/м2
double Gprm_A = 0;
// Ввести с поля, коефіцієнт підсилення приймальної антени (дБ)
double Lprm_A = 0;
// Ввести с поля, втрати в НВЧ-тракті від виходу антени до МШП (дБ)
double F_R = 0;
// Ввести с поля, коефіцієнт шуму приймача
double B = 0;
// Ширина смуги сигналу, яка визначається в дБ відносно величини 1 Гц, дБГц

double energy_reserve(double Pvx, double Rx);
// Формула (3) Величина енергетичного запасу і доступності РЛ

void stock_check(double Z);
// Перевірка на наявність енергетичного запасу

double radio_signal_power(double EIVP, double Lsum, double Gprm, double Lprm);
// Формула (2) Розрахунок потужності радіосигналу

double calculationEIVP(double Gprd, double T, double Lprd);
// Формула (1) Визначення величини еквівалентної ізотропної випромінюваної
потужності

double receiver_sensitivity(double Tekv, double R, double EN, double B_w);
// Формула (6) Розрахунок чутливості приймача

double equivalent_noise_temperature(double kyTA, double Lprm, double F, double
Ar, double Ac, double Ag);
// Формула (7) Розрахунок еквівалентної шумової температури СІС

double sum_radio_link_loss(double Lpr, double At, double Lnav, double
Lfiltru);
// Формула (13) Розрахунок загальних втрат в радіолінії

double losses_in_free_space(double Dprd, double f);
// Розрахунок втрат у вільному просторі

double loss_of_antenna_guidance_errors(double APE, double BW);
// Розрахунок втрат помилок наведення антен

double attenuation_in_the_atmosphere(double Ag, double Ar, double Ac);
// Формула (17) Розрахунок загального згасання в атмосфері

double relaxation_in_the_clouds(double L, double kut_spyt, double f);
// Розрахунок послаблення в хмарах

```

```

double relaxation_in_the_rain( double gam, double R);
// Розрахунок послаблення в дощі

double losses_in_atmospheric_gases(double gam, double R);
// Розрахунок послаблення в атмосферних газах

double running_attenuation_gas(double f);
// Розрахунок погонного загасання

private slots:
void on_pushButton_clicked();

private:
    Ui::MainWindow *ui;
};
#endif // MAINWINDOW_H

```

Файл mainWindow.cpp

```

#include "mainwindow.h"
#include "ui_mainwindow.h"
#include "cmath"

MainWindow::MainWindow(QWidget *parent)
    : QMainWindow(parent)
    , ui(new Ui::MainWindow)
{
    ui->setupUi(this);

    this->setWindowTitle("Розрахунок енергетичного запасу РЛ СІС");
    ui->lineEdit->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_2->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_10->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_9->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_8->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_4->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_3->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_6->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_14->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_15->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_5->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_16->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_11->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_13->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_12->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_17->setPlaceholderText("0.0");

    ui->lineEdit_7->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_20->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_18->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_19->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_21->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_22->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_25->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_23->setPlaceholderText("0.0");
    ui->lineEdit_24->setPlaceholderText("0.0");

```

```

ui->lineEdit_27->setPlaceholderText("0.0");
ui->lineEdit_28->setPlaceholderText("0.0");
ui->lineEdit_26->setPlaceholderText("0.0");

ui->lineEdit_7->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_20->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_18->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_19->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_21->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_22->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_25->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_23->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_24->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_27->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_28->setReadOnly(true);
ui->lineEdit_26->setReadOnly(true);

ui->label_19->setText("Для коректної роботи програми необхідно заповнити \nусі
вхідні дані та натиснути кнопку \"РОЗРАХУВАТИ\" ");
}

MainWindow::~MainWindow()
{
    delete ui;
}

void MainWindow::on_pushButton_clicked()
{
    information_transfer_rate = (ui->lineEdit->text()).toDouble();
    V_EN = (ui->lineEdit_2->text()).toDouble();
    Gprd_A = (ui->lineEdit_10->text()).toDouble();
    T_A = (ui->lineEdit_9->text()).toDouble();
    Lprd_t = (ui->lineEdit_8->text()).toDouble();
    Dspyt = (ui->lineEdit_4->text()).toDouble();
    f_signal = (ui->lineEdit_3->text()).toDouble();
    APE_L = (ui->lineEdit_6->text()).toDouble();
    BW_L = (ui->lineEdit_14->text()).toDouble();
    Lfiltru = (ui->lineEdit_15->text()).toDouble();
    kut_spyt = (ui->lineEdit_5->text()).toDouble();
    Ls = (ui->lineEdit_16->text()).toDouble();
    Gprm_A = (ui->lineEdit_11->text()).toDouble();
    Lprm_A = (ui->lineEdit_13->text()).toDouble();
    F_R = (ui->lineEdit_12->text()).toDouble();
    B = (ui->lineEdit_17->text()).toDouble();
    QString temp;

    double gamma = round(running_attenuation_gas(f_signal)*1000)/1000;
    double Ag = round(losses_in_atmospheric_gases(gamma, Dspyt)*1000)/1000;
    double Ar = round(relaxation_in_the_rain(gamma, Dspyt)*1000)/1000;
    double Lpr = round(losses_in_free_space(Dspyt, f_signal)*1000)/1000;
    double Lnav = round(loss_of_antenna_guidance_errors(APE_L, BW_L)*1000)/1000;
    double Ac = round(relaxation_in_the_clouds(Ls, kut_spyt,
f_signal)*1000)/1000;
    double At = round(attenuation_in_the_atmosphere(Ag, Ar, Ac)*1000)/1000;
    double Lsum = round(sum_radio_link_loss(Lpr, At, Lnav, Lfiltru)*1000)/1000;
    double EIVP = round(calculationEIVP(Gprd_A, T_A, Lprd_t)*1000)/1000;
    double Pvx = round(radio_signal_power(EIVP, Lsum, Gprm_A, Lprm_A)*1000)/1000;
    double Tekv = round(equivalent_noise_temperature(kut_spyt, Lprm_A, F_R, Ar,
Ac, Ag)*1000)/1000;

```

```

    double Rx = round(receiver_sensitivity(Tekv,
(information_transfer_rate),V_EN, B)*1000)/1000;
    double resultZ = round(energy_reserve(Pvx, Rx)*1000)/1000;

    temp = QString::number(resultZ);
    ui->lineEdit_7->setText(temp);
    temp = QString::number(Pvx);
    ui->lineEdit_20->setText(temp);
    temp = QString::number(EIVP);
    ui->lineEdit_18->setText(temp);
    temp = QString::number(Rx);
    ui->lineEdit_19->setText(temp);
    temp = QString::number(Tekv);
    ui->lineEdit_21->setText(temp);
    temp = QString::number(Lsum);
    ui->lineEdit_22->setText(temp);
    temp = QString::number(Lpr);
    ui->lineEdit_25->setText(temp);
    temp = QString::number(Lnav);
    ui->lineEdit_23->setText(temp);
    temp = QString::number(At);
    ui->lineEdit_24->setText(temp);
    temp = QString::number(Ac);
    ui->lineEdit_27->setText(temp);
    temp = QString::number(Ar);
    ui->lineEdit_28->setText(temp);
    temp = QString::number(Ag);
    ui->lineEdit_26->setText(temp);

    if(resultZ < 1)
        ui->label_19->setText("Забезпечити прийом сигналу з необхідною
достовірністю неможливо!!!");
    else if(resultZ >= 1)
        ui->label_19->setText("Прийом забезпечується з необхідною
достовірністю");
}

double MainWindow::energy_reserve(double Pvx, double Rx)
{ // Rx - чутливість приймача
  // Pvx - потужність радіолінії на вході МШП
  double Z;
  Z = Pvx - Rx;
  return Z; // енергетичний запас (дБВт)
}

void MainWindow::stock_check(double Z)
{
  if(Z < 1)
    "забезпечити прийом сигналу з необхідною достовірністю неможливо!!!";
  else if(Z >= 1)
    "прийом забезпечується з необхідною достовірністю";
}

double MainWindow::radio_signal_power(double EIVP, double Lsum, double Gprm,
double Lprm)
{ // Lsum величина сумарних втрат (дБ)
  // Gprm коефіцієнт підсилення приймальної антени (дБ)
  // Lprm втрати в НВЧ-тракті від виходу антени до МШП (дБ)
  double Pvx;
  Pvx = EIVP - Lsum + Gprm - Lprm;
  return Pvx; // потужність радіосигналу (дБВт)
}

```

```

double MainWindow::calculationEIVP(double Gprd, double T, double Lprd)
{ // Gprd коефіцієнт підсилення передавальної антени (дБ)
  // T величина потужності радіосигналу на виході підсилювача (дБВт)
  // Lprd втрати у НВЧ-тракті від виходу ПП до входу антени, (дБ)
  double EIVP;
  EIVP = Gprd+T-Lprd;
  return EIVP; // (дБВт)
}

double MainWindow::receiver_sensitivity(double Tekv, double R, double EN, double
B_w)
{ // k - постійна Больцмана
  // Tekv еквівалентна шумова температура системи
  // E/N необхідне відношення енергії інформаційного біта
  // до односторонньої спектральної щільності потужності шуму
  // R - швидкість передачі інформації
  double Rx;
  double CN;

  double k = -228.6 * pow(10, -23);
  CN = EN+(log(R)-60)-B_w;
  Rx = k + Tekv + B_w + CN;
  return Rx; // Чутливість приймача (дБВт)
}

double MainWindow::equivalent_noise_temperature(double kytA, double Lprm, double
F, double Ar, double Ac, double Ag)
{ // Ar послаблення за рахунок гідрометеорів
  // Ac послаблення в атмосферних газах
  // Ag послаблення за рахунок хмарності
  // kytA кут місця приймальної антени
  // F коефіцієнт шуму приймача
  // Lprm втрати у НВЧ-тракті від виходу антени до входу МШП
  double Tekv;

  double Tkosm = 0.1; // Яскравісна температура протяжних космічних джерел, К
  double cT vz = (23 + 0.2*(90-kytA));
  double Tatms = 296.25; // Середня термодинамічна температура атмосфери
  double Tatm = Tatms*(1- pow(10, (-Ar-Ac-Ag)/10));
  double Tna = Tkosm+Tatm+cT vz;// Шумова температура антени, К
  Tekv = Tna*Lprm + 290*(1-Lprm)+(F-1)*290;
  return Tekv; // Еквівалентна шумова температура
}

double MainWindow::sum_radio_link_loss(double Lpr, double At, double Lnav, double
Lfiltru)
{ // Lpr втрати у вільному просторі
  // At загальне сумарне послаблення РС в атмосфері
  // Lnav втрати, викликані помилками наведення передавальної і приймальної антен
  // Lfiltru втратами, пов'язаними з ПРД фільтром
  double Lsum;
  Lsum = Lpr + At + Lnav + Lfiltru;
  return Lsum; // Загальні втрати в РЛ
}

double MainWindow::losses_in_free_space(double Dprd, double f)
{ // f частота сигналу
  // Dprd дальність радіозв'язку
  double Lpr;

  double lam = 299792458 * (1/(f*100000));
  Lpr = pow(4*(3.14)*((Dprd)/lam), 2);
  return Lpr; // Втрати у вільному просторі
}

```

```

}

double MainWindow::loss_of_antenna_guidance_errors(double APE, double BW)
{ // помилка кута наведення
  // ширина ДСА
  double Lnav;
  Lnav = 12*pow((APE/BW), 2);
  return Lnav; // Втрати помилок наведення антен
}

double MainWindow::attenuation_in_the_atmosphere(double Ag, double Ar, double Ac)
{ // Ag послаблення в атмосферних газах
  // Ar послаблення в дощі
  // Ac послаблення в хмарах
  double At;
  At = Ag+Ac+Ar;
  return At; // Загальне послаблення в атмосфері
}

double MainWindow::relaxation_in_the_clouds(double L, double kut_spyt, double f)
{
  double K;
  double n;
  double E2;
  double E1;
  double e0, e1, e2;
  double fr, fs;
  double omega;
  double Ac;

  omega = 300/273.15;
  e0 = 77.66 + 103.3*(omega-1);
  e1 = 0.0671*e0;
  e2 = 3.52;

  fr = 20.20 - 146*(omega - 1) + 316*pow((omega-1), 2);
  fs = 39.8*fr;
  E2 = ((f*(e0-e1))/(1+pow((f/fr), 2))) + ((f*(e1-e2))/(1+pow((f/fs), 2)));
  E1 = ((e0-e1))/(1+pow((f/fr), 2)) + ((e1-e2))/(1+pow((f/fs), 2)) + e2;

  n = (2+E1) / E2;
  K = ((0.819*(1.9479*pow(10, -4)*pow(f, 2.308) + 2.9424*pow(f, 0.7436) -
4.9451)) / (E2*(1+pow(n, 2))));
  Ac = (L*K) / sin(kut_spyt);
  return Ac;
}

double MainWindow::relaxation_in_the_rain( double gam, double R)
{
  double Ar;
  double A0;
  double p = 0.01;
  double Re, Ktr, L0, I=100;

  L0 = 35*exp(-0.015*I);
  Ktr = 1/(1+(R/L0));
  Re = R*Ktr;

  A0 = gam*Re;
  Ar = A0 * pow(p/0.01, -(0.655+0.033*log(p) - 0.045*log(A0)));
  return Ar;
}

```

```

double MainWindow::losses_in_atmospheric_gases(double gam, double R)
{
    double Ag;
    double Re, Ktr, L0, I=100;

    L0 = 35*exp(-0.015*I);
    Ktr = 1/(1+(R/L0));
    Re = R*Ktr;
    Ag = gam*Re;
    return Ag;
}

double MainWindow::running_attenuation_gas(double f)
{
    double Y0;
    double Yw;

    Y0 = ((7.19*pow(10, -3) + (6.09/(f*f+0.227)) + (4.81/(pow(f-57,
2)+1.5)))*f*f*pow(10, -3));

    Yw = (0.05+0.0021*7.5+(3.6/(pow(f-22.2, 2)+8.5))+10.6/(pow(f-183.3,
2)+9))+8.9/(pow(f-325.4, 2)+26.3))*f*f*7.5*pow(10, -4);
    return Y0+Yw;
}

```

Файл mag_robota.qbs

```

import qbs.FileInfo

QtApplication {
    Depends { name: "Qt.widgets" }

    // The following define makes your compiler emit warnings if you use
    // any Qt feature that has been marked deprecated (the exact warnings
    // depend on your compiler). Please consult the documentation of the
    // deprecated API in order to know how to port your code away from it.
    // You can also make your code fail to compile if it uses deprecated APIs.
    // In order to do so, uncomment the second entry in the list.
    // You can also select to disable deprecated APIs only up to a certain version
of Qt.
    cpp.defines: [
        "QT_DEPRECATED_WARNINGS",
        /* "QT_DISABLE_DEPRECATED_BEFORE=0x060000" */ // disables all the APIs
deprecated before Qt 6.0.0
    ]

    files: [
        "main.cpp",
        "mainwindow.cpp",
        "mainwindow.h",
        "mainwindow.ui",
        "myapp.rc",
    ]
    consoleApplication: false

    install: true
    installDir: qbs.targetOS.contains("qnx") ? FileInfo.joinPaths("/tmp", name,
"bin") : base
}

```

ДОДАТОК Б

ЗОВНІШНІЙ ВИГЛЯД ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ

Розрахунок енергетичного запасу РЛ СІС, версія ПО 1
Магістерська робота, студента Зозулі, розрахунок енергетичного запасу радіолінії "КА - НС"

| ВХІДНІ ДАНІ | ВИХІДНІ ДАНІ |
|--|---|
| <input type="text" value="0.0"/> Мбіт/с, пропускна здатність радіолінії <input type="text" value="0.0"/> дБ, відношення енергії інформаційного біта до односторонньої спектральної щільності потужності шуму <input type="text" value="0.0"/> дБ, ширина смуги сигналу | <input type="text" value="0.0"/> дБВт. енергетичний запас Для коректної роботи програми необхідно заповнити усі вхідні дані та натиснути кнопку "РОЗРАХУВАТИ" |
| <input type="text" value="0.0"/> ГГц, несуча частота сигналу <input type="text" value="0.0"/> Км, довжина радіолінії <input type="text" value="0.0"/> °, кут місця <input type="text" value="0.0"/> °, помилка кута наведення | <input type="text" value="0.0"/> дБВт, потужність радіосигналу <input type="text" value="0.0"/> дБВт, еквівалентна ізотропна випр. потужність <input type="text" value="0.0"/> дБВт, чутливість приймача |
| <input type="text" value="0.0"/> дБ, коефіцієнт підсилення передавальної антени космічного апарату <input type="text" value="0.0"/> дБ, втрати у НВЧ-тракті від виходу ПП до входу антени <input type="text" value="0.0"/> дБВт, потужність сигналу на виході підсилювача потужності | <input type="text" value="0.0"/> К, еквівалентна шумова температура СІС |
| <input type="text" value="0.0"/> дБ, коефіцієнт підсилення приймальної антени наземної станції <input type="text" value="0.0"/> дБ, втрати в НВЧ-тракті від виходу антени до підсилювача <input type="text" value="0.0"/> коефіцієнт шуму приймача <input type="text" value="0.0"/> ширина діаграми спрямованості антени за рівнем -3 дБ, град. <input type="text" value="0.0"/> дБ, втрати за рахунок фільтру обмеження смуги | <input type="text" value="0.0"/> дБ, загальні втрати в радіолінії <ul style="list-style-type: none"> <input type="text" value="0.0"/> дБ, втрати у вільному просторі <input type="text" value="0.0"/> дБ, втрати помилок наведення антен <input type="text" value="0.0"/> дБ, загальне згасання в атмосфері <ul style="list-style-type: none"> <input type="text" value="0.0"/> дБ, послаблення в хмарах <input type="text" value="0.0"/> дБ, послаблення в дощі <input type="text" value="0.0"/> дБ, послаблення в атмосферних газах |
| <input type="text" value="0.0"/> кг/м2, загальний стовпчастий об'єм рідкої води над країною | <input type="button" value="РОЗРАХУВАТИ"/> |

Розрахунок енергетичного запасу РЛ СІС, версія ПО 1
Магістерська робота, студента Зозулі, розрахунок енергетичного запасу радіолінії "КА - НС"

| ВХІДНІ ДАНІ | ВИХІДНІ ДАНІ |
|--|--|
| <input type="text" value="1500"/> Мбіт/с, пропускна здатність радіолінії <input type="text" value="1000"/> дБ, відношення енергії інформаційного біта до односторонньої спектральної щільності потужності шуму <input type="text" value="100"/> дБ, ширина смуги сигналу | <input type="text" value="-243.553"/> дБВт. енергетичний запас Забезпечити прийом сигналу з необхідною достовірністю неможливо!!! |
| <input type="text" value="20"/> ГГц, несуча частота сигналу <input type="text" value="100"/> Км, довжина радіолінії <input type="text" value="80"/> °, кут місця <input type="text" value="6"/> °, помилка кута наведення | <input type="text" value="625.798"/> дБВт, потужність радіосигналу <input type="text" value="457"/> дБВт, еквівалентна ізотропна випр. потужність <input type="text" value="869.351"/> дБВт, чутливість приймача |
| <input type="text" value="200"/> дБ, коефіцієнт підсилення передавальної антени космічного апарату <input type="text" value="43"/> дБ, втрати у НВЧ-тракті від виходу ПП до входу антени <input type="text" value="300"/> дБВт, потужність сигналу на виході підсилювача потужності | <input type="text" value="1630.65"/> К, еквівалентна шумова температура СІС |
| <input type="text" value="300"/> дБ, коефіцієнт підсилення приймальної антени наземної станції <input type="text" value="9"/> дБ, втрати в НВЧ-тракті від виходу антени до підсилювача <input type="text" value="5"/> коефіцієнт шуму приймача <input type="text" value="3"/> ширина діаграми спрямованості антени за рівнем -3 дБ, град. <input type="text" value="5"/> дБ, втрати за рахунок фільтру обмеження смуги | <input type="text" value="122.202"/> дБ, загальні втрати в радіолінії <ul style="list-style-type: none"> <input type="text" value="70.21"/> дБ, втрати у вільному просторі <input type="text" value="48"/> дБ, втрати помилок наведення антен <input type="text" value="1.008"/> дБ, загальне згасання в атмосфері <ul style="list-style-type: none"> <input type="text" value="2.616"/> дБ, послаблення в хмарах <input type="text" value="0.804"/> дБ, послаблення в дощі <input type="text" value="0.804"/> дБ, послаблення в атмосферних газах |
| <input type="text" value="45"/> кг/м2, загальний стовпчастий об'єм рідкої води над країною | <input type="button" value="РОЗРАХУВАТИ"/> |

Розрахунок енергетичного запасу РЛ СІС, версія ПО 1
 Магістерська робота, студента Зозулі, розрахунок енергетичного запасу радіолінії "КА - НС"

| ВХІДНІ ДАНІ | ВИХІДНІ ДАНІ |
|--|---|
| <input type="text" value="1000"/> Мбіт/с, пропускна здатність радіолінії <input type="text" value="1000"/> дБ, відношення енергії інформаційного біта до односторонньої спектральної щільності потужності шуму <input type="text" value="100"/> дБ, ширина смуги сигналу | <input type="text" value="1866.02"/> дБВт. енергетичний запас Прийом забезпечується з необхідною достовірністю |
| <input type="text" value="11"/> ГГц, несуча частота сигналу <input type="text" value="300"/> Км, довжина радіолінії <input type="text" value="75"/> °, кут місця <input type="text" value="5"/> °, помилка кута наведення | <input type="text" value="41.717"/> дБВт, потужність радіосигналу <input type="text" value="157"/> дБВт, еквівалентна ізотропна випр. потужність <input type="text" value="1824.31"/> дБВт, чутливість приймача |
| <input type="text" value="100"/> дБ, коефіцієнт підсилення передавальної антени космічного апарату <input type="text" value="43"/> дБ, втрати у НВЧ-тракті від виходу ПП до входу антени <input type="text" value="100"/> дБВт, потужність сигналу на виході підсилювача потужності | <input type="text" value="3824.31"/> К, еквівалентна шумова температура СІС |
| <input type="text" value="120"/> дБ, коефіцієнт підсилення приймальної антени наземної станції <input type="text" value="9"/> дБ, втрати в НВЧ-тракті від виходу антени до підсилювача <input type="text" value="5"/> коефіцієнт шуму приймача <input type="text" value="3"/> ширина діаграми спрямованості антени за рівнем -3 дБ, град. <input type="text" value="5"/> дБ, втрати за рахунок фільтру обмеження смуги | <input type="text" value="226.283"/> дБ, загальні втрати в радіолінії 191.146 дБ, втрати у вільному просторі 33.333 дБ, втрати помилок наведення антен 3.196 дБ, загальне згасання в атмосфері 3.44 дБ, послаблення в хмарах 0.122 дБ, послаблення в дощі 0.122 дБ, послаблення в атмосферних газах |
| <input type="text" value="50"/> кг/м2, загальний стовпчастий об'єм рідкої води над країною | <input type="button" value="РОЗРАХУВАТИ"/> |