DOI 10.20535/2411-1031.2024.12.1.306278
УДК 621.396

ЮРІЙ ГІЧКО,
ЮРІЙ ГОЛОВІН,
СЕРГІЙ МАЗОР,
ТЕТЯНА ХРАНОВСЬКА

РОЗРОБКА ОПРОМІНЮВАЧА ПАРАБОЛІЧНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ СТАНЦІЇ ТРОПОСФЕРНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Існуючі в даний час тропосферні станції через велику енергозатратність та обмежену можливість формування сигналів і радіорелейні станції також через обмежену дальність зв'язку вимагають нових технологічних рішень. Одним із таких рішень пропонується створення тропосферно-радіорелейної станції з повністю переробленим радіообладнанням. Інститутом спеціального зв'язку та захисту інформації спільно з науково-дослідницьким Інститутом була розроблена схема такої станції, яка була досліджена в натурних випробуваннях на реальній тропосферній радіолінії завдовжки 155 км. Участь наших фахівців полягала у розробці двох антенних пристроїв.

Проведений детальний аналіз сучасного стану з розроблення станцій тропосферного зв'язку у світі та розглянуті можливості модернізації існуючих станцій, наприклад Р-423-М. За результатами аналізу запропоновано не проведення модернізації, а розробка тропосферних станцій зв'язку нового покоління.

Згідно з прийнятою концепцією побудови станції її передавальна та приймальна частини були розроблені у вигляді двох окремих блоків (зовнішнього та внутрішнього). Зовнішній блок для проведення натурних випробувань був розташований на антені, що давало можливість максимально скоротити втрати сигналів в антенно-фідерних трактах. Складові частини внутрішніх блоків розташовувались в закритому кузові автомобіля. Це забезпечувало додаткові зручності для оператора, а також зменшувало вимоги до кліматичних умов.

До складу антенного блока передавача входять подільник потужності, блок підсилювачів потужності (вісім підсилювачів потужності по 10 Вт кожний), антена двохзеркальна параболична з гіперболоїдним малим дзеркалом та восьмиелементним опромінювачем з рупорів, що можуть заживлюватися таким чином, що вихідна хвиля буде лінійною або кругової поляризації.

Ключові слова: тропосферний зв'язок, ультракороткохвильовий зв'язок, спеціальний зв'язок, параболічна антена, рупорний опромінювач, діаграма спрямованості.

Постановка проблеми. Недоцільність модернізації наявних станції Р-423-М полягає в тому, що в ній використано неефективний антено-фідерний пристрій і передавач з потужністю 1,5 кВт, побудований з використанням клістронів, який крім низького коефіцієнту корисної дії має великі нелінійні спотворення амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик. Методи обробки сигналів, що зараз використовуються, не є сучасними та мало ефективні, реалізовані на застарілій елементній базі, а тому апаратура обробки сигналів також потребує корінної переробки. Ці та інші недоліки не дозволяють збільшити швидкість передавання інформації, зменшити потужність передавача, підвищити рівень протидії технічним розвідкам і таке інше [1], [2].

Метою статті є розгляд можливості створення параболічної антени з високоефективним опромінювачем.

© Ю. Гічко, Ю. Головін, С. Мазор, Т. Храновська, 2024

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ході виконання науково дослідної роботи (НДР) «Міраж» спільно з Державним науково-дослідним інститутом технологій кібербезпеки та захисту інформації було проведено:

– пошук і експериментальне дослідження ефективної структури сигналу і оптимальних методів його обробки;

– експериментальні дослідження сучасних антен, антенно-фідерних пристроїв і підсилювачів потужності для отримання необхідної ефективної ізотропно-випромінювальної потужності (ЕІВП).

Ці дослідження забезпечили:

– можливість зменшення потужності передавача;

– організацію завадостійкого тропосферного зв'язку на трасах протяжністю 100-200 км в оперативно-стратегічній, оперативній та оперативно-тактичній ланках управління [2];

– збільшену можливість приймання/передавання інформації.

Результати досліджень підтвердили теоретичні розрахунки щодо можливості створення новітніх станцій тропосферного зв'язку, до яких пред'являються нові технічні вимоги:

Експериментальний зразок станції тропосферного зв'язку нового покоління забезпечив:

– організацію зв'язку на трасах протяжністю 150-200 км (на одному інтервалі) зі швидкістю приймання/передавання інформації не менше 2,048 Мбіт/с;

– можливість створення багатоінтервальної лінії тропосферного зв'язку з інтервалами 150-200 км в оперативно-стратегічній, оперативній та оперативно-тактичній ланках управління;

– приймання/передавання цифрової інформації зі швидкістю не менше 2,048 Мбіт/с при ЕІВП передавального пристрою на один інтервал не більше 56 дБВт при діаметрі параболічної антени не більше 1,5 м;

– вірогідність помилки при швидкості приймання/передавання цифрової інформації 2,048 Мбіт/с та на відстані одного інтервалу не гірше 10^{-4}.

При виконанні науково-дослідної роботи були запропоновані схеми передавальної та приймальної частин тропосферної радіостанції. Для забезпечення енергетики радіолінії були проведені розрахунки, які показали, що приймальні та передавальні антени повинні мати коефіцієнт підсилення більше ніж 34 дБ.

З функціональної схеми, що представлена на рисунках 1 та 2 видно, що приймальні та передавальні частини пропонуємої станції майже повністю перероблені.

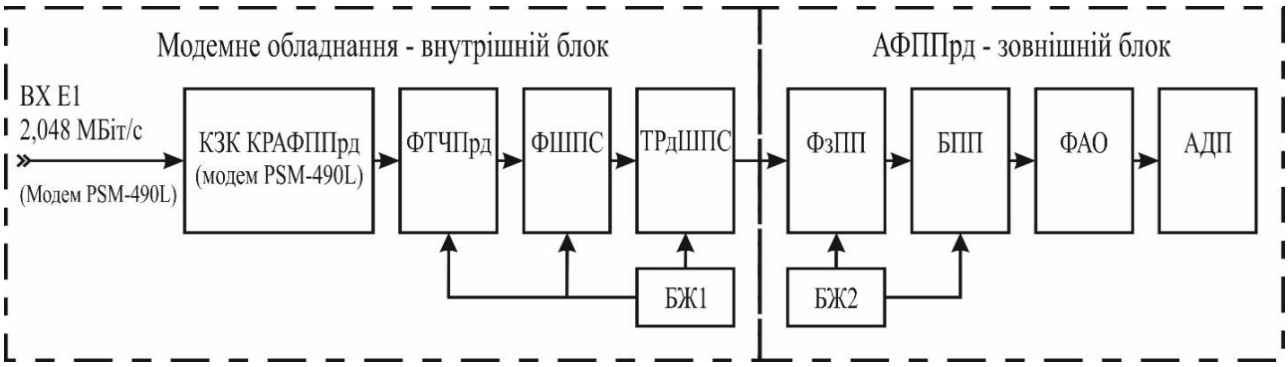


Рисунок 1 − Функціональна схема передавальної частини тропосферної радіостанції

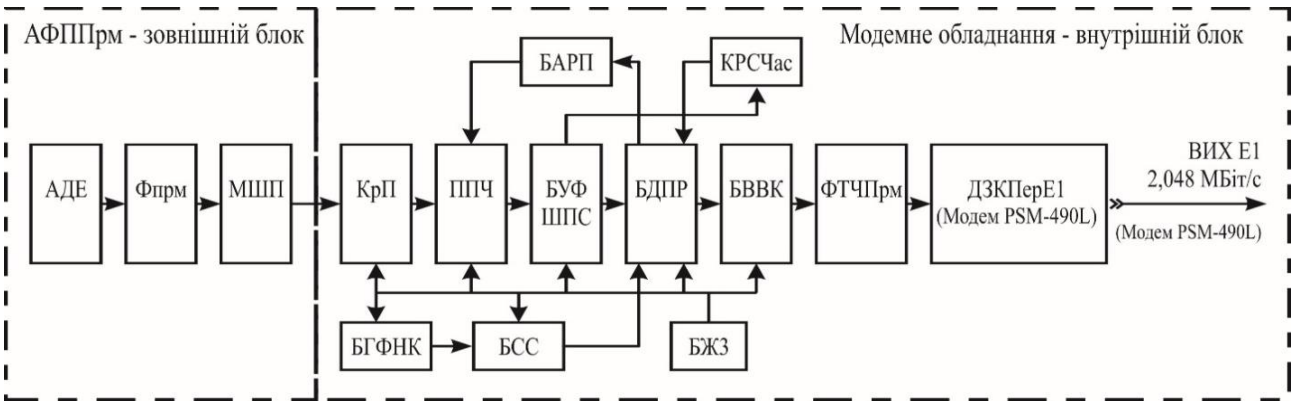


Рисунок 2 − Функціональна схема приймальної частини тропосферної радіостанції

Зміст умовних позначень (рис. 1, 2) наведений у таблиці 1.

Таблиця 1 – Умовні позначення функціональної схеми тропосферної радіостанції

АФППрд	антенно-фідерний пристрій передавача
АФППрм	антенно-фідерний пристрій приймача
КЗККРПрдЧС	кодер згорткового коду і контролер роботи передавальної частини станції
ФТЧПрд	формувач тактових частот передавача
ФШПС	формувач шумоподібного сигналу (ШПС)
ТРдШПС	транспондер шумоподібного сигналу
ФзПП	фазовий подільник потужностіна вісім виходів
БПП	блок з 8 десятиватних підсилювачів потужності
ФАО	8-елементний фазований антенний опромінювач
АДП	антена дзеркальна параболічна
АДЕ	антена дводзеркальна з малим еліптичним дзеркалом
ФПрм	фільтр смуговий приймача
МШП	малошумливий підсилювач надвисоких частот
КрП	конвертор-перетворювач – (4500 ± 45) МГц
ППЧ	підсилювач проміжної частоти
БУФШПС	блок узгоджених фільтрів ШПС
БДПРіш	блок детектування та прийняття рішення
БАРП	блок автоматичного регулювання підсилення
БВЗК	блок відновлення згорткового коду
ДЗКПерЕ1	декодер згорткового коду та перетворення у вихідний потік Е1
БЖ 1, 2, 3	блоки живлення
БСС	блок виділення сигналу синхронізації приймача
КРПрмЧС	контролер роботи приймальної частини макету станції
КРСЧас	контролер рівня сигналу в часі для управління БДПРіш
БГФНК	блок гребінчастого фільтру – накопичувач
ФТЧПрм	формувач тактових частот приймачах

Виклад основного матеріалу досліджень. Для отримання необхідної енергетики було розглянуто можливість використання параболічного дзеркала від радіорелейної станції Р-414 та розробка багатоелементного опромінювача, що представляє собою решітку, яка складається з двох груп лінійних симетричних вібраторів (СВ). Антена з такими опромінювачами буде живитися вісьмома підсилювачами потужністю по 10 Вт кожний. Таке рішення пов’язано з

тим, що це значно ефективніше та економічніше, ніж використання одного підсилювача для отримання необхідної ЕІВП. Але при цьому необхідне специфічне технічне рішення для відповідних опромінювачів. В кожній групі СВ передбачається використовувати по чотири СВ, що розміщені паралельно над екраном. Групи можна орієнтувати паралельно (рис. 3), або ортогонально одна до одної (рис. 4). При цьому живлення СВ в групах є синфазним. Якщо до груп вібраторів на рис. 4 подати живлення з зсувом фаз $\pi/2$, то можна отримати хвилю кругової поляризації [3].

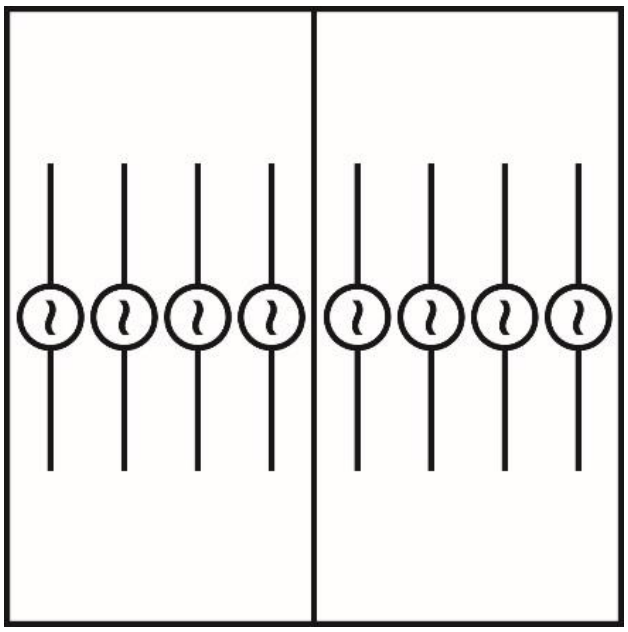


Рисунок 3 − Паралельно розташовані групи вібраторів

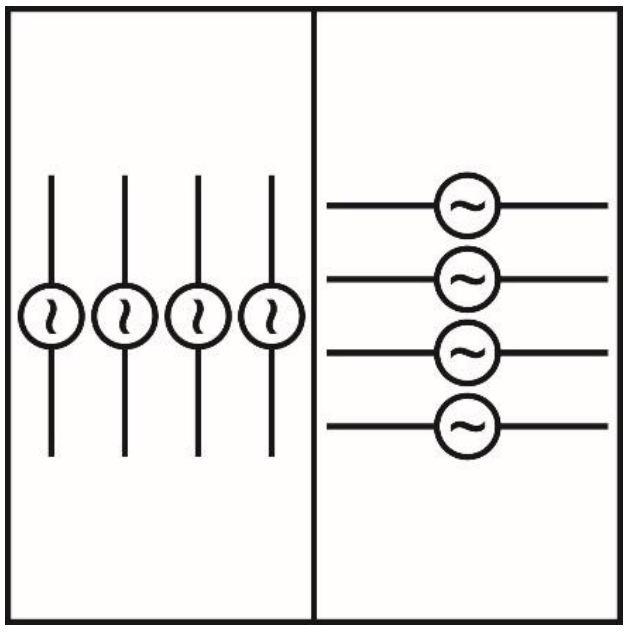


Рисунок 3 − Ортогонально розташовані групи вібраторів

При розробці опромінювачів досліджувалась можливість застосування СВ довжиною $0,75\lambda$ (λ − довжина хвилі) над плоским екраном.

При цьому досліджувались залежність випромінювання від розподілу струму вздовж вібратора, а також співвідношення між горизонтальними та вертикальними частинами вібраторів (з врахуванням екранів, над якими вони розташовані). Звісно, що площина струмів на вібраторах визначає їх можливості створювати потужність випромінювання. Струми, що спрямовані в протилежних напрямках створюють поля, які компенсують одне одного. Також співвідношення горизонтальних і вертикальних частин вібраторів впливають на вхідні опори вібраторів. Випромінюючі частини вібраторів мають площини струмів в 2 рази більше відносно чвертьхвильових вібраторів, що застосуються в вібраторних опромінювачах, наприклад, в радіорелейних станціях Р-414 (див. рис. 5).

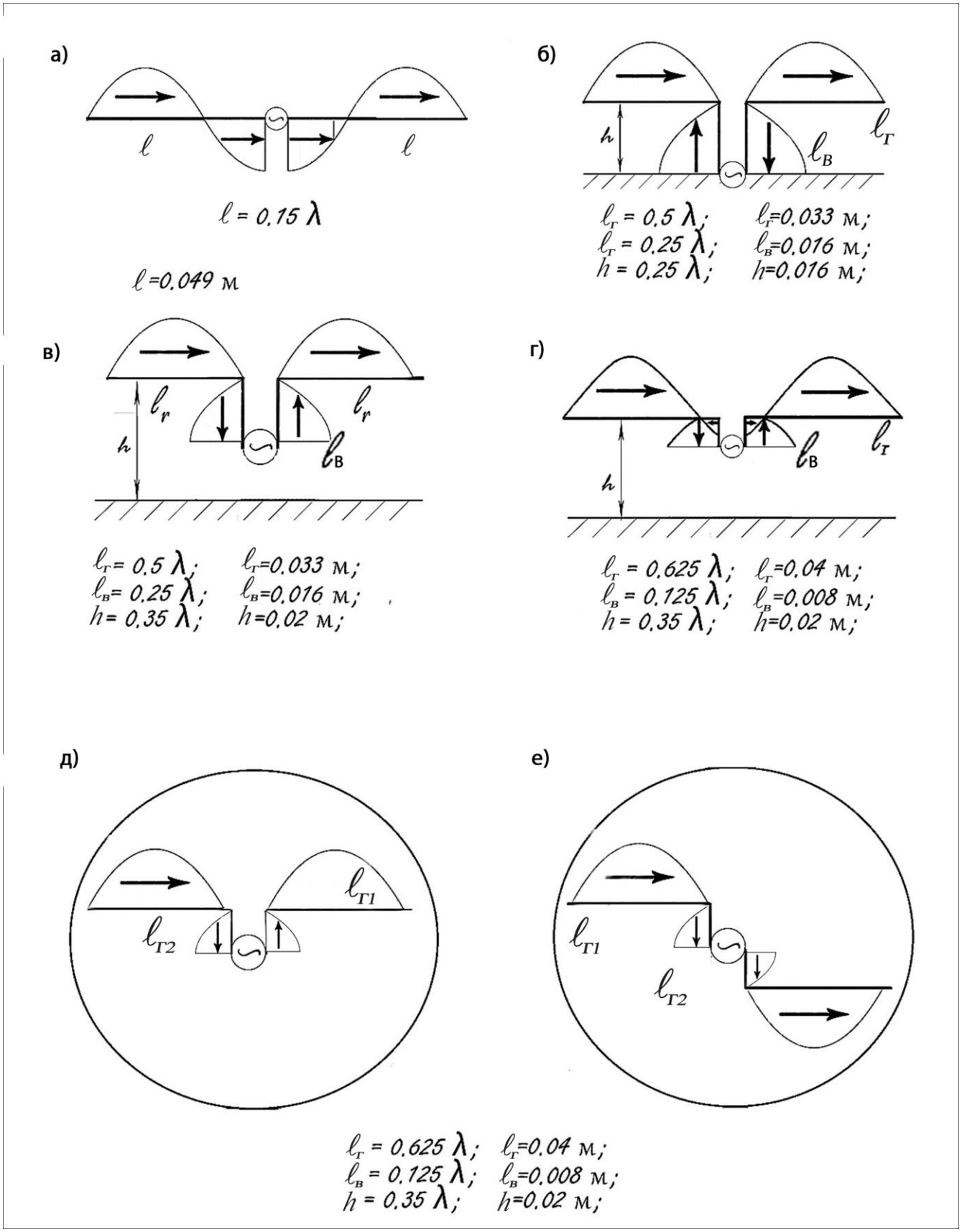
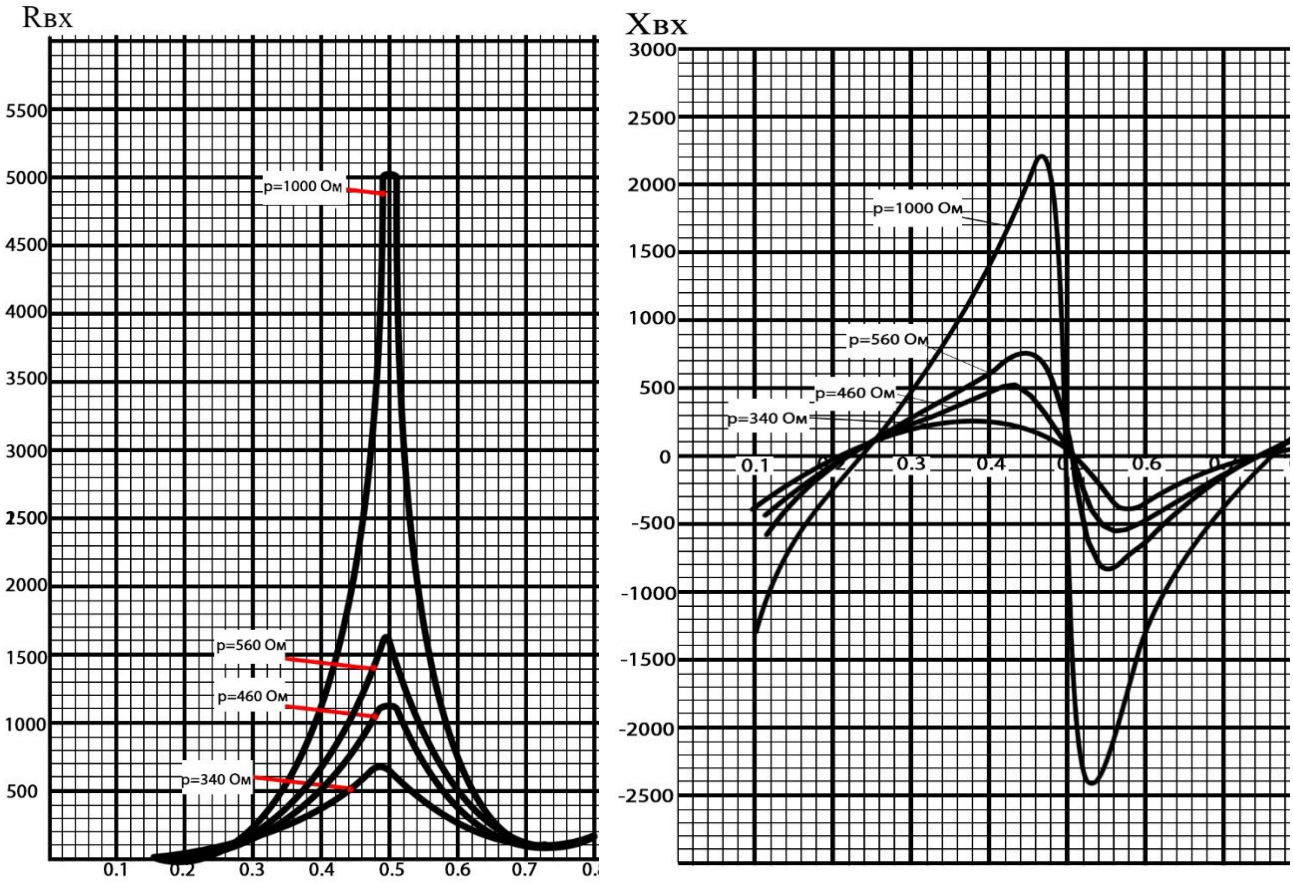


Рисунок 5 − Варіанти форм та розташування вібраторів довжиною $0,75\lambda$

Принципи дії опромінювачів пояснюється на рисунку 6.



Активний вхідний опір Реактивний вхідний опір

Рисунок 6 – Хвильовий опір симетричних вібраторів в залежності від l/λ

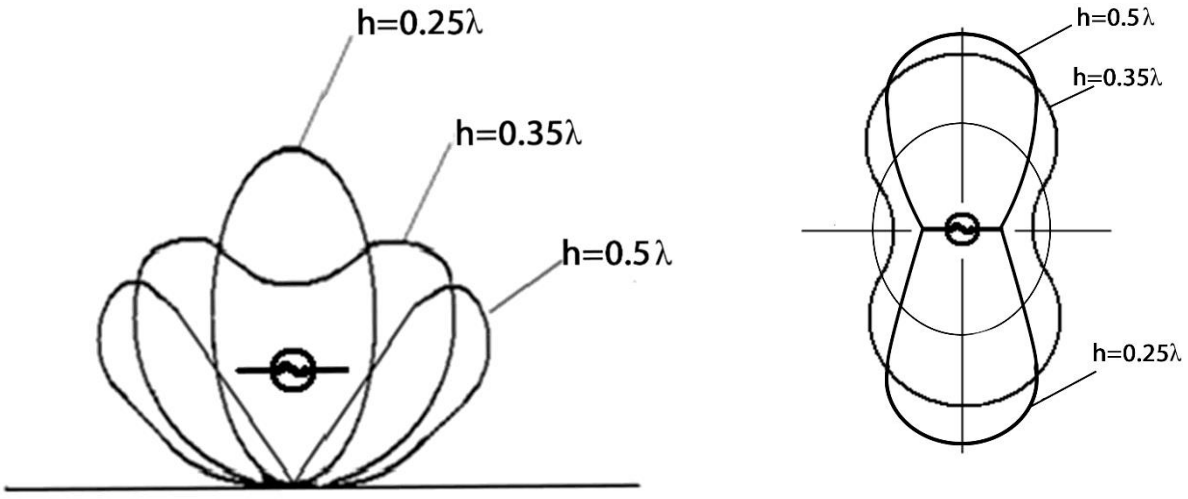
На рисунку 6 зображено активний та реактивний вхідний опір СВ в залежності від відношення l/λ, де l є довжиною плеча СВ. Видно, що точки $l/\lambda = 0,25$ та $l/\lambda = 0,75$ є резонансними точками, тобто в цих точках вхідний реактивний опір дорівнює нулю, а активний опір може бути рівним приблизно 75 Ом. Вибрана форма вібраторів виключає вплив паралельних струмів. На рисунку 4 показано розподіл струмів по симетричному вібратору. Таким чином, через вибір форми плечей вібраторів, при їх загальній довжині $0,75 \cdot l/\lambda$, усувається розвал діаграми спрямованості (ДС). В таких умовах вхідний опір СВ, що розташований над екраном, залежить не тільки від відношення l/λ, але й від відстані між ним та екраном. Коефіцієнт підсилення антени (G) СВ залежить як від відношення h/λ, так і від відношення $l_г/\lambda$, де $l_г$ – горизонтальна складова частини плеча вібратора, яка розташована паралельно відносно екрану. Виходячи з формули (1) для розрахунку характеристики спрямованості симетричного вібратора, необхідна його діаграма спрямованості з врахуванням розміщення вібраторів на певній висоті h над екраном:

$$f(\theta,\varphi) = \frac{\cos(kl\cos\theta\sin\varphi) - \cos kl)}{\sqrt{1-\cos^2\theta\sin^2\varphi}} \sin(\mathrm{khsin}\,\theta). \qquad (1)$$

Відповідно до цієї формули можна розраховувати ДС горизонтального СВ на потрібній висоті h над екраном в залежності від кута від перпендикуляру до екрану (θ) та кута від перпендикуляру до вібратора в площині екрану (φ). Опромінювач розміщується в фокальній площині параболічного дзеркала, що пов’язано з конструктивними особливостями обраної параболічної антени зі складу радіорелейної станції Р-414 діаметром 1,5 м. Центр дзеркала

запропонованої антени затіняється, а тому немає сенсу його опромінювати та відповідно до кривої $h = 0,35\lambda$ (рис. 7), відстань h від вібратора над екраном є сенс вибрати $h = 0,35\lambda$. Конструкції одного СВ над екраном та груп з двох СВ показані на рисунках 10 та 11. Геометрію та розташування вібраторів було можливо змінювати з метою досліджень.

Вібратори, у яких горизонтальні частини $l_г$ дорівнюють $0,5\lambda$, легше узгоджуються, а від вібраторів довжиною $0,625\lambda$ можливе отримання найбільшого підсилення. Для досліджень були виготовлені вібратори з різною змінною геометрією, які були встановлені над екраном.



Вертикальна площина Горизонтальна площина

Рисунок 7 − Залежність ДН від висоти підйому СВ над екраном

Виходячи з того, що висота розміщення горизонтальної частини вібратора над екраном визначає потрібну ДС, було обрано величину $h = 0,35\lambda$. Потрібний вхідний опір вібратора 50 Ом визначається вихідним опором підсилювача та хвильовим опором кабелю живлення. Підсилення вібратора буде визначатися величиною горизонтальної частини плеча $l_г$ та його відстанню від екрану h. Попередні розрахунки цих величин проведено згідно графікам, що представлені на рисунку 7. Потрібно врахувати, що хоча G визначається величиною $l_г$, вхідний опір СВ буде залежати від всієї довжини плеча вібратора l, яку ми розрахували за допомогою графіків для визначення власних (див. рис. 6) і наведених опорів (див. рис. 8, 9).

Ці графіки (рис. 8, 9) дозволяють визначити активний та реактивний опір вібраторів. За методом дзеркального зображення вплив екрана враховується за допомогою ефекту створення відбиття уявного (дзеркального) зображення. Тобто ми визначаємо вплив наведеного активного та реактивного опору дзеркального зображення вібратора на реальний, враховуючи kl:

$$kl = 360° \frac{l}{\lambda} \text{ (Рис. 8);}$$

$$kh = 360° \frac{h}{\lambda} \text{ (Рис. 9).}$$

На основі проведених попередніх розрахунків було виготовлено експериментальні макети (див. рис. 10, 11), в яких є можливість зміни відстані між провідниками, які живлять вібратор, розмір та розміщення лінії живлення над екраном, місця згину плечей вібратора та їх поворот над екраном. Також макет дає можливість дослідити два вібратора при зміні орієнтації опромінювачів відносно один до одного і відстані між ними. Змінюючи фазовий зсув між вібраторами на $\pi/2$, за рахунок різниці в довжинах кабелів живлення та

встановлюючи їх ортогонально, можливо отримати та дослідити хвилю кругової поляризації ортогонально розташованих симетричних вібраторів (див. рис. 11б) .

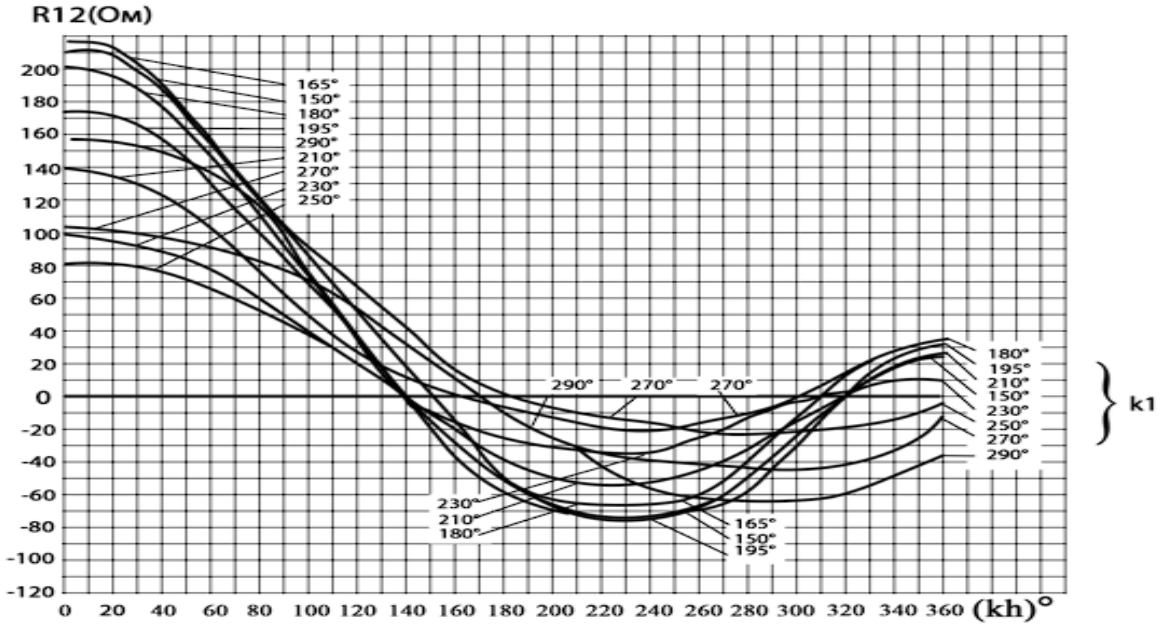


Рисунок 8 – Наведені опори дзеркально відображеного вібратора на реальний вібратор (активна складова)

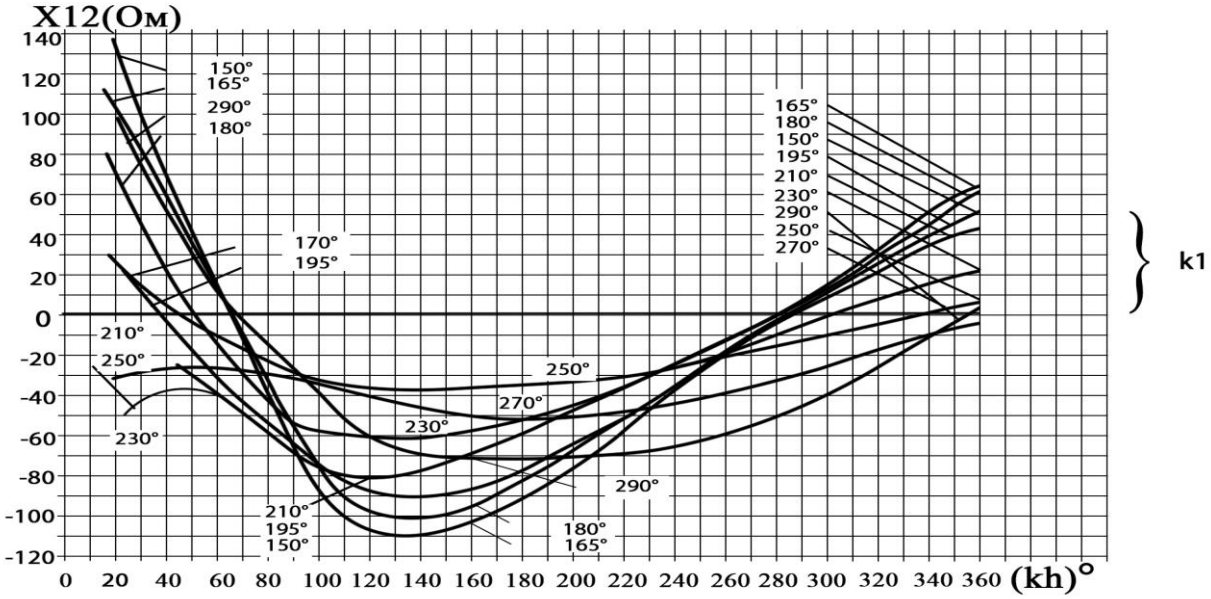


Рисунок 9 – Наведені опори дзеркально відображеного вібратора на реальний вібратор (реактивна складова

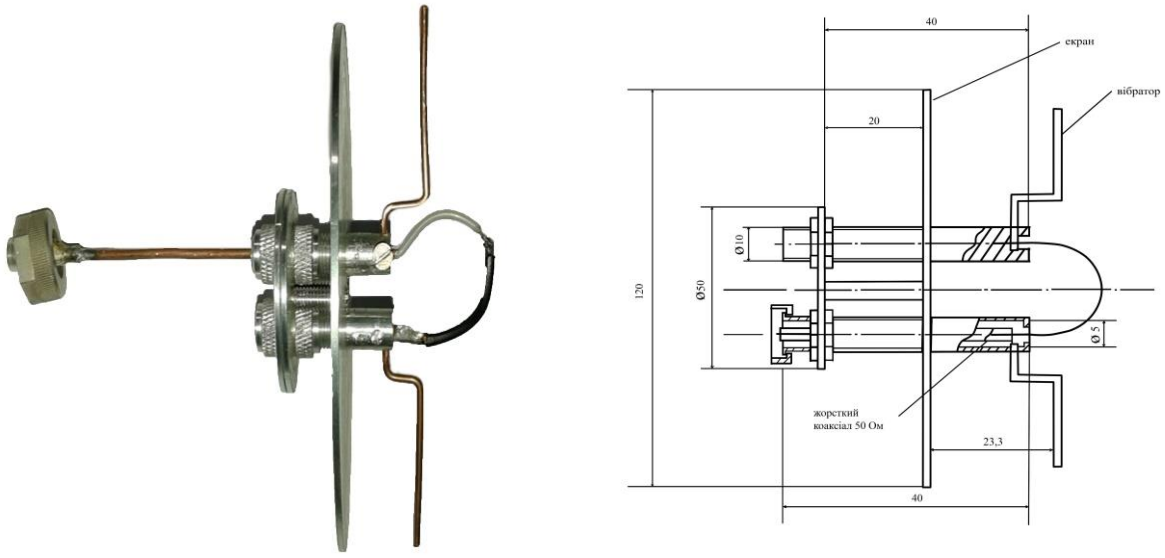
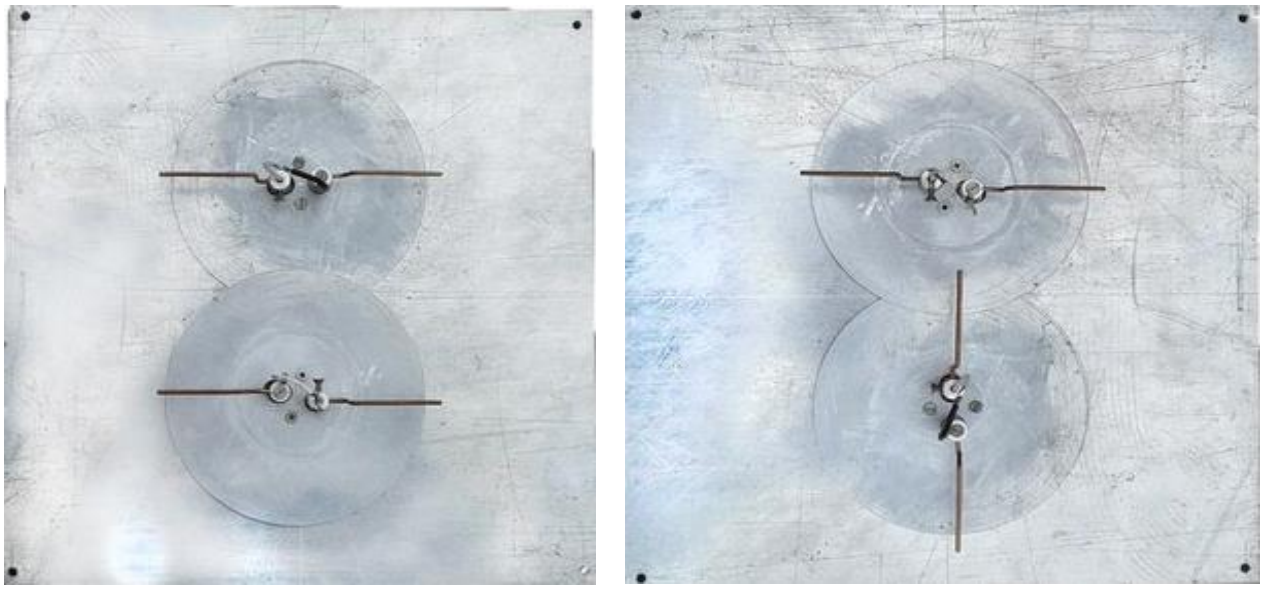


Рисунок 10 – Приклад конструкції СВ довжиною $0,75\lambda$ над екраном



а) б)

Рисунок 11 – Розташування симетричних вібраторів (паралельно розташованих (а) та ортогонально розташованих (б)

Електричні властивості одного та двух СВ були досліджені за допомогою вимірювача комплексних коефіцієнтів передачі Р2-58. Налаштування окремого СВ попередньо проводилося на основі мінімального коефіцієнту стоячої хвилі (КСХ), а потім по максимальному коефіцієнту підсилення G в діапазоні заданих нами частот. В першому випадку пристрій перебуває в режимі порівняння падаючих та відбитих хвиль. На рисунку 12 в схемі живлення було задіяно чвертьхвильовий трансформатор 50/25 Ом для живлення решітки з двох вібраторів.

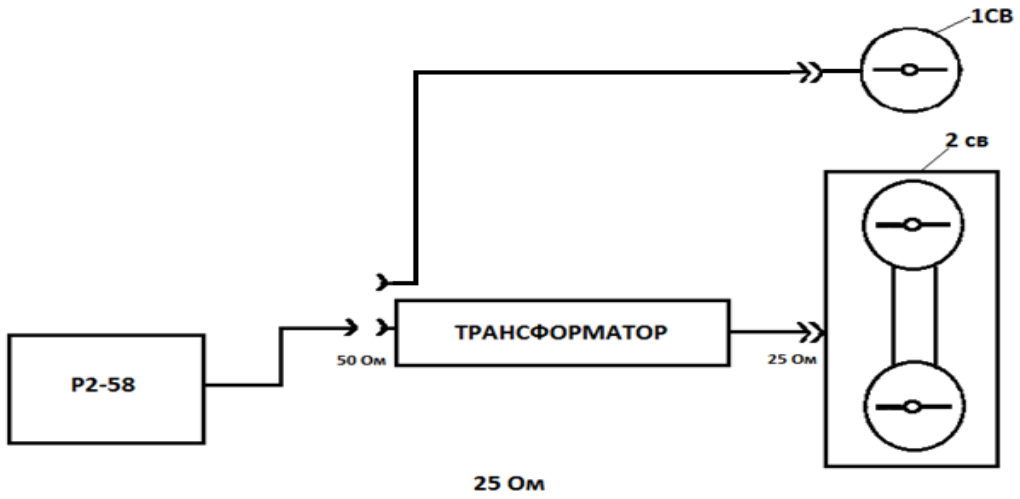


Рисунок 12 – Установка для вимірювання КСХ

На рисунку 13 зображено схему виміру зовнішніх характеристик [4], ДС і коефіцієнту підсилення (G). При цьому прилад переводиться в режим виміру затухання в лінії, що в даному випадку складається з двох антен і простору між ними. Антена, що досліджувалася, встановлювалася на передавальний кінець радіолінії, тобто підключалась до генератора, а приймальна антена була представлена півхвильовим вібратором над екраном, піднятим на висоту $\lambda/4$. Такий вібратор має у 20% діапазону частот підсилення приблизно 5 дБ. Вимірювання проводилися методом антени, що обертається (в нашому випадку передавальна). Приймальна антена підключалась до покажчика рівня пристрою Р2-58. З такою же антеною порівнювалась вимірювальна антена, в якості якої застосовувалась антена з одного та двох СВ над екраном.

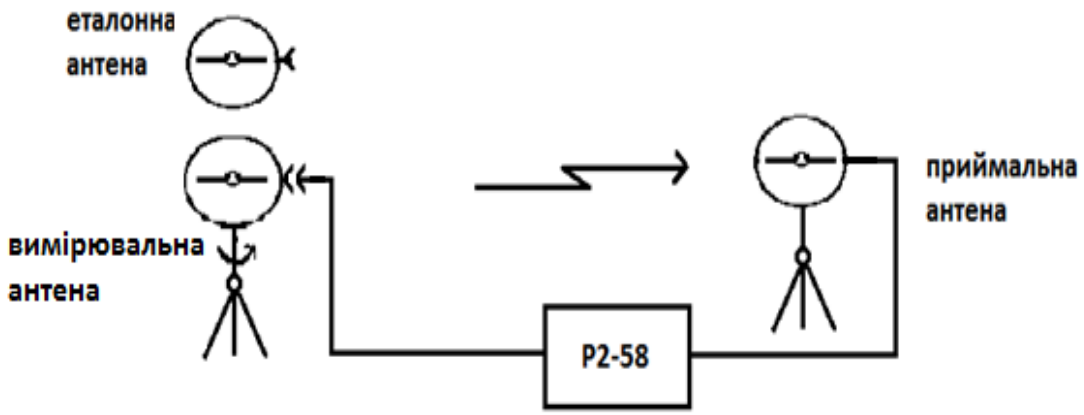


Рисунок 13 – Схема виміру зовнішніх характеристик

Конструкції приймального та еталонного вібраторів зображено на рисунку 14.

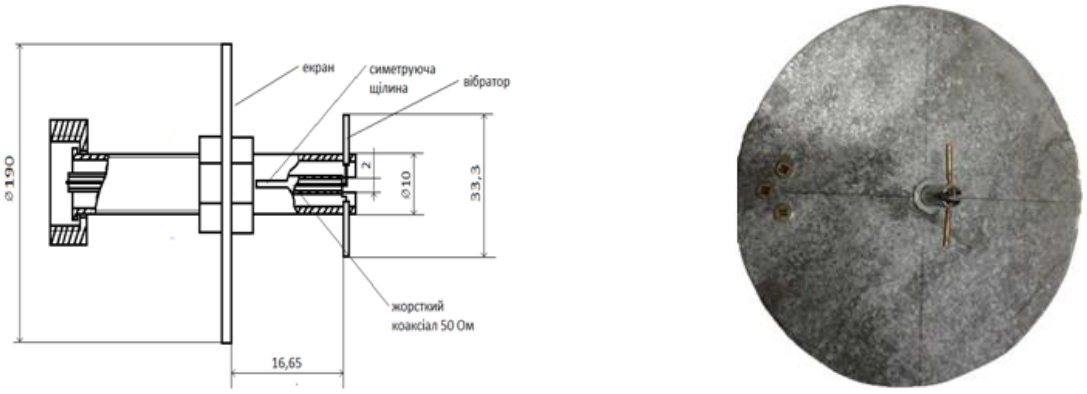


Рисунок 14 – Конструкції еталонного та приймального вібраторів

В процесі підготовки експерименту було виготовлено два таких вібратори. Еталонна антена налаштовувалась та її підсилення визначалося за допомогою калібрувального вимірювального рупору П6-23 в камері без відлуння ПАТ «Радар». Електричні характеристики еталонного СВ, приймальної антени та антени у вигляді двох паралельних вібраторів представлені на рисунку 15. Інші виміри проводилися в лабораторії Українського Державного центру радіочастот. На рисунках 16-18 представлені коефіцієнти підсилення (G) та ДС в вертикальних H та E площинах.

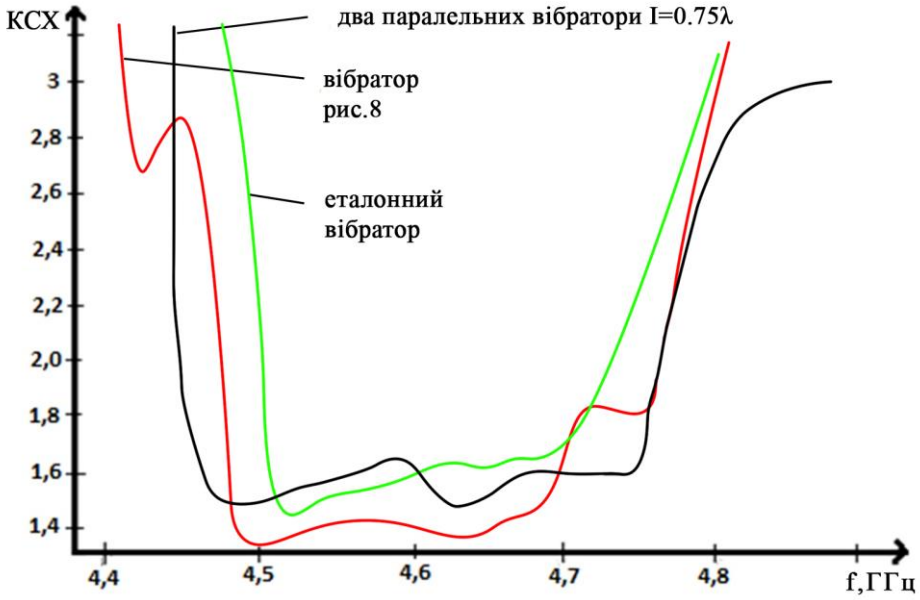


Рисунок 15 – Результати вимірювання КСХ

На рисунку 16 представлені порівняльні результати вимірювання коефіцієнтів підсилення еталонного вібратора, досліджуваного вібратора та двох паралельних вібраторів.

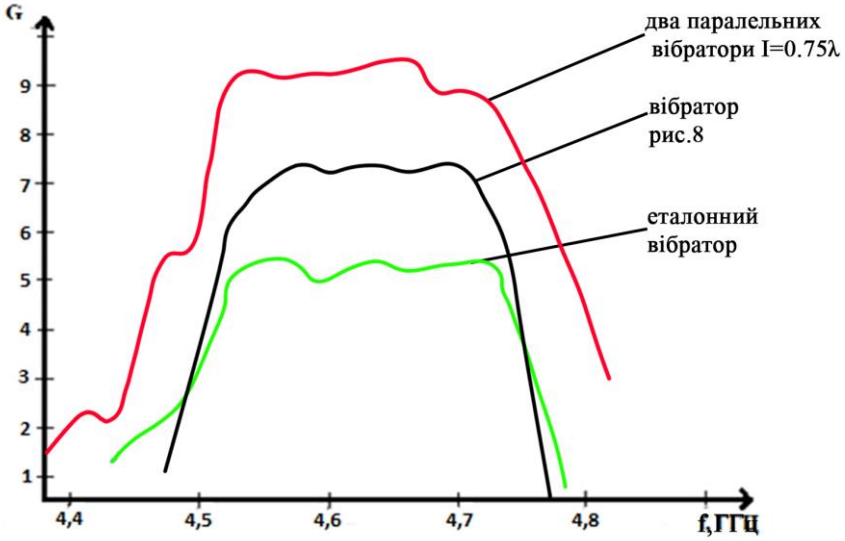


Рисунок 16 – Результати вимірювання коефіцієнтів підсилення

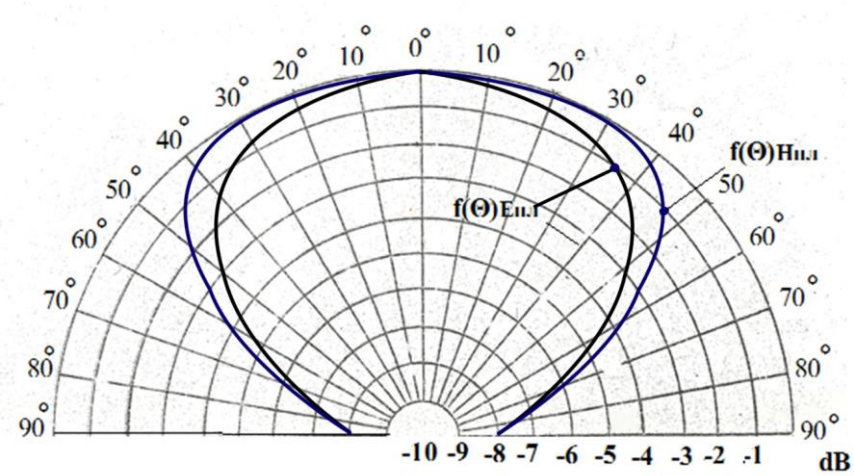


Рисунок 17 – ДС еталонної та приймальної антен в вертикальній площині (ширина ДС в площині E дорівнює $100°$, а в площині H – $113°$)

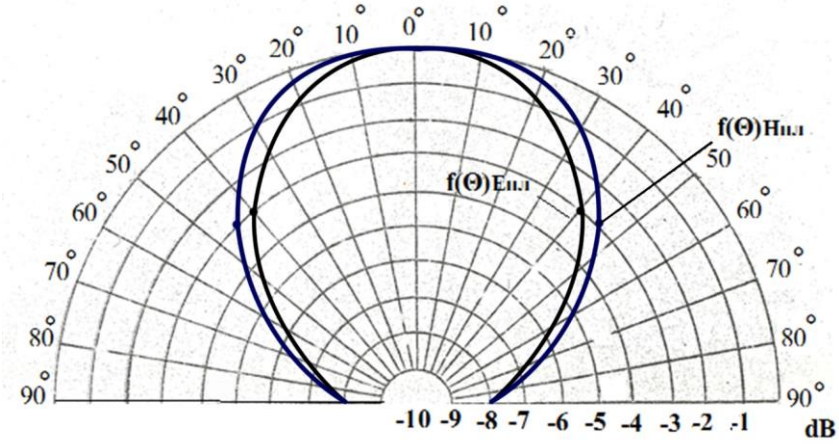


Рисунок 18 – ДС СВ, зображених на сchис.4 в вертикальній площині (ширина ДС в площині E дорівнює $80°$, а в площині H – $93°$)

Розрахунки й налаштування опромінювачів є попередніми. Як згадувалось раніше, передбачається, що буде далі досліджена робота двох четвірок опромінювачів. При

остаточному відпрацюванні конструкції необхідно буде враховувати ряд факторів, таких як: реакція дзеркала, взаємний вплив вібраторів і груп вібраторів, діаметрів вібраторів, хвильовий опір живлячих ліній, вплив екрану на опромінювачі та інше.

При виконанні наступного етапу окрім розроблення конструкторської документації та виготовлення елементів опромінювачів, планується розробити методику налаштування та виконати надзвичайно складне та трудомістке налаштування як окремих опромінювачів, так і антени в цілому.

Виготовлені вібратори були налаштовані на даному етапі для того, щоб можна було відстежити основні тенденції зміни електричних характеристик плечей вібраторів, вигнутих над екраном. Основним результатом можна вважати отримання елемента решітки. Попередні розрахунки дозволяють визначити, які виготовлені вібратори є сенс обирати в якості опромінювачів.

Висновки. Спеціалістами Інституту Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" та Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації було розроблено та досліджено макет тропосферної станції, який із запропонованими технічними рішеннями дозволив при споживаній потужності 200 Вт (замість колишньої 1,5 кВт) передати потік $E1$ на відстані 155 кілометрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Т.М.Наритник, В.М.Почерняєв, та В.С. Повхліб, *Цифрові радіорелейні та тропосферні лінії зв'язку (основи розрахунку): навч. посіб*. Одеса, Україна: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2019.

[2] О.В. Вакуленко, та Б.А. Ніколаєнко, *Станція радіорелейна широкосмугова СРШ-5000 (станція радіорелейна Р-402)*. Київ, Україна: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.

[3] В.П. Манойлов, та П.П. Мартинчук, *Методи розрахунку та вимірювання параметрів і характеристик антен НВЧ.* Житомир, Україна: ПП "Рута", 2021.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2024

REFERENCE

[1] T.M. Narytnyk, V.M. Pocherniaev, and V.S. Povglib, *Digital radio relay and tropospheric communication lines*. Odesa, Ukraine: ONAC, 2019.

[2] O.V. Vakulenko, and B. A. Nikolayenko, *SRSH-5000 broadband radio relay station (R-402 radio relay station)*. Kyiv, Ukraine: ISZZI KPI named after Igor Sikorsky, 2019.

[3] V.P. Manoilov, and P.P. Martynchuk *Methods of calculation and measurement of parameters and characteristics of microwave antennas*. Zhytomyr, Ukraine: PE "Ruta", 2021.

YURII HICHKO,
YURIY GOLOVIN,
SERHII MAZOR,
TETYANA KHRANOVSKA

DEVELOPMENT OF PARABOLIC ANTENNA IRRADIATOR FOR TROPOSPHERIC COMMUNICATION STATION

The currently existing tropospheric stations, due to high energy consumption and limited signal formation capabilities, and radio relay stations, also due to limited communication range, require new technological solutions. One such solution proposed is the creation of a tropospheric-radio relay station with completely redesigned radio equipment. The Institute of Special Communications and Information Protection, in collaboration with a research institute, developed a scheme for such a

station, which was tested in field trials on a real tropospheric radio line with a length of 155 km. Our specialists were involved in the development of two antenna devices.

A detailed analysis of the current state of tropospheric communication station development in the world was conducted, and the possibilities of modernizing existing stations, such as the R-423-M, were considered. Based on the results of the analysis, it was proposed not to conduct modernization, but rather to develop a new generation of tropospheric communication stations.

According to the accepted station construction concept, its transmitting and receiving parts were developed as two separate units (external and internal). The external unit for conducting field trials was located on the antenna, allowing for the maximum reduction of signal losses in the antenna-feeder paths. The components of the internal units were housed in the closed body of a vehicle. This provided additional convenience for the operator and reduced the requirements for climatic conditions.

The antenna block of the transmitter includes a power divider, a power amplifier block (eight power amplifiers of 10 W each), a two-mirror parabolic antenna with a hyperboloid small mirror, and an eight-element horn feed that can be powered in such a way that the output wave will be either linear or circular polarization.

Keywords: tropospheric radio communication, ultrashort waves, antenna system, parabolic antenna, irradiator, horn, radiation pattern.

Гічко Юрій Геннадійович, аспірант, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна, ORCID https://orcid.org/0009-0004-3147-6092, gichko@gmail.com.

Головін Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент спеціальної кафедри № 3, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна, ORCID https://orcid.org/0000-0002-8361-0060, yrgol59@gmail.com.

Мазор Сергій Юрійович, кандидат технічних наук, доцент спеціальної кафедри № 3, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна, ORCID https://orcid.org/0009-0003-2103-4883, mazorsk@gmail.com.

Храновська Тетяна Василівна, старший викладач спеціальної кафедри № 3, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна, ORCID https://orcid.org/0009-0007-7873-4919, tanyakhranovskaya@gmail.com.

Hichko Yurii, postgraduate student, Institute of special communications and information security of National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Golovin Yuriy, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the special academic department No. 3, Institute of special communications and information security of National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Mazor Serhii, candidate of technical sciences, associate professor of the special academic department No. 3, Institute of special communications and information security of National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Khranovska Tetyana, senior lecturer of the special academic department No. 3, Institute of special communications and information security of National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.