

УДК 621.396.6

ВІБРАТОРНА АНТЕННА РЕШІТКА ДЛЯ МОБІЛЬНОЇ ЦИФРОВОЇ ІОНОСФЕРНОЇ СТАНЦІЇ

DOI 10 36994 / 2788- 5518- 2022-02-04-05

Почерняєв В.М., д.т.н., проф. Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Київ, Україна. vpochernyaev@gmail.com

Магомедова М.С., Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна. kkz.praktika@ukr.net

Анотація: У статті розроблено і досліджується конструкція вібраторної антенної решітки для мобільної цифрової іоносферної станції. При виборі типу антени для мобільної цифрової іоносферної станції взято до уваги такі основні характеристики, як широкосмуговість, коефіцієнт корисної дії, ефективність прийому при малих кутах місця, надійність і простота конструкції. Показано два варіанти конструкції вібраторної антенної решітки для мобільної цифрової іоносферної станції. Вибрано варіант конструкції антенної решітки з горизонтальними вібраторами. В якості коаксіального кабелю запропоновано конструкцію, в якій внутрішній провідник має прорізи, що забезпечують широкосмуговість антено-фідерного тракту. У конструкції вібраторної антенної решітки використовується понад 20 телескопічних стрижнів замість звичайних сталевих дротів стандартної конструкції. Положенням шунта в конструкції антенної решітки, що грає роль металевого ізолятора, вдається домогтися задовільних імпедансних характеристик у широкій смузі частот. Наведено графіки залежності коефіцієнта корисної дії від кута місця для вертикального та горизонтального вібраторів. Зазначено, що у вібраторної антенної решітки декаметрового діапазону хвиль доцільно використовувати укорочені вібратори. Вібраторні антенну решітку досліджено матричним методом. Якщо уявити кожену циліндричну антенну решітку як багатополіусник, то розроблена вібраторна антенна решітка є каскадне з'єднання двох багатополіусників. Досліджено широкосмугове узгодження активних навантажень за допомогою узгоджувального трансформатора. Еквівалентна схема такого узгоджувального трансформатора враховує індуктивність розсіювання та ємності первинної та вторинної обмоток, а також ємність зв'язку між ними. Наведено графіки залежності параметру максимально-плоскої та чебишевської характеристик від значень максимального коефіцієнта відбиття та залежності максимального коефіцієнта відбиття від поточної частоти.

Ключові слова: вібраторна антенна решітка, мобільна цифрова іоносферна станція, діаграма спрямованості, коефіцієнт спрямованої дії, коефіцієнт корисної дії, багатополіусник.

VIBRATORY ANTENNA REMAINDER FOR MOBILE DIGITAL IONOSPHERIC STATION

Vitaly Pochernyaev, Dr.habil., Prof. State University of Intellectual Technologies and Communications, Kyiv, Ukraine. vpochernyaev@gmail.com

Marija Mahomedova, Kyiv Professional College of Communications, Kyiv, Ukraine. kkz.praktika@ukr.net

Abstract: The article develops and investigates the design of a vibrating antenna array for a mobile digital ionospheric station. When choosing the type of antenna for a mobile digital ionospheric station, such basic characteristics as broadband, efficiency, reception efficiency at small angles, reliability and design simplicity are taken into account. Two options for the design of a vibrating antenna array for a mobile digital ionospheric station are shown. The variant of the design of the antenna array with horizontal vibrators was selected. A design of coaxial cable in which the inner conductor has slots that ensure broadband antenna-feeder path is proposed. The design of the vibrating antenna array uses more than 20 telescopic rods instead of the usual steel wires of standard construction. The position of the shunt in the design of the antenna array, which play the role of a metal insulator, manages to achieve satisfactory impedance characteristics in a wide frequency band. Graphs of the dependence of the coefficient of effective action from the angle of location for vertical and horizontal vibrators are given. It is noted that it is advisable to use shortened vibrators in the vibrating antenna array of the decameter waves range. Vibrating antenna arrays were investigated by the matrix method. If you imagine each cylindrical antenna array as a multipole, then the developed vibrating antenna array is a cascade connection of two multipoles. Broadband matching of active loads using a matching transformer was investigated. The equivalent circuit of such a matching transformer takes into account the dissipation inductance and capacitance of the

primary and secondary windings, as well as the coupling capacitance between them. Graphs of the dependence of the maximum-flat and Chebyshev parameters from the values of the maximum reflection coefficient and the dependence of the maximum reflection coefficient from the current frequency are given.

Key words: *vibrating antenna array, mobile digital ionospheric station, directional diagram, coefficient of directional action, coefficient of useful action, multipole.*

Вступ

Використання високонправлених антенних решіток в діапазоні декаметрових хвиль дозволяє суттєво підвищити надійність та стійкість зв'язку в цьому діапазоні, зменшивши рівень замирання сигналу на трасі іоносферного зв'язку.

Один із перспективних шляхів розвитку радіорозвідки, радіоелектронного подавлення, локації та зв'язку заснований на процесі нелінійної взаємодії потужного електромагнітного випромінювання діапазону УКХ з іоносферою Землі. Технічною реалізацією цього напрямку є створення мобільної цифрової іоносферної станції зв'язку, що використовує ефект штучної іоносферної неоднорідності (ШІН) [1]. Горизонтальний розмір ШІН визначається шириною діаграми спрямованості (ДС) антени, а вертикальний – потужністю нагріву та фоновими умовами на висоті нагріву. Для цього іоносферні станції повинні бути обладнані антенними ґратами з високим коефіцієнт спрямованої дії (КСД) та ДС із низьким рівнем бічних пелюсток. Крім цього, антенна решітка для роботи в дуплексному режимі на прийомі повинна забезпечувати сектор кутів $5^\circ \dots 25^\circ$ при дальностях понад 1000 км.

Така станція є станцією подвійного призначення і може використовуватись:

- у військових конфліктах і бойових діях;
- в умовах надзвичайних ситуацій, як при екологічних і техногенних катастрофах, так і при протидії загрозі тероризму;
- в інтересах трансляції TV програм на території, що тимчасово окуповані.

У ході бойових дій така мобільна цифрова іоносферна станція (МЦІС) може виконувати такі завдання:

- організація передачі циркулярних повідомлень на великі території, у тому числі на території, які не підконтрольні нашим військовим формуванням;
- встановлення радіозв'язку з N -кореспондентами без залучення ресурсів супутникового зв'язку (оренди каналів або стовбурів штучних супутників Землі, що не належать державі);
- постановка завад на великих територіях радіовипромінюючим засобам різного призначення та організація системи радіоелектронного подавлення;
- збирання розвідданих від радіозасобів, розміщених на великих відстанях один від одного;
- передача необхідних даних диверсійно-розвідувальним групам, розподілених на значних за віддаленістю ділянках місцевості.

При виборі типу антени для МЦІС береться до уваги широкосмуговість, коефіцієнт корисної дії (ККД), ефективність прийому при малих кутах місця, надійність і простота конструкції.

Метою роботи є розробка антенної решітки для МЦІС.

Виконання досліджень

Для МЦІС пропонується використовувати вібраторну антенну решітку, конструкція якої показана на рис 1.

Антенна решітка складається із двох циліндричних вібраторів, розташованих на двовісному причепі. На щоглі кріпляться шунти у вигляді металевих ізоляторів. Вібратори у вигляді металевих дротів діаметром декількох міліметрів кріпляться до двох кінців щогли через шунти. Утворюється циліндрична вібраторна антенна решітка, що складається з двох таких циліндрів. Кількість вібраторів для діапазону ~ 10 МГц становить 12...16 дротів. До точки з'єднання вібраторів підводиться коаксіальний кабель. З метою забезпечення широкосмугової роботи антенної решітки внутрішній провідник коаксіального кабелю має чотири прорізи, як показано на рис.2.

Конструкція дозволяє вібраторам складатися для зручності транспортування решітки антени в мобільному варіанті станції.

Широкополосність вібратора, тобто слабка зміна його імпедансу в широкому інтервалі частот забезпечується стандартним способом - застосуванням багатодротяної конструкції великого діаметра (типу диполя Надененка). Зазначимо, що використання вертикального вібратора веде до зниження ККД через втрати в ґрунті. Ці втрати можна значно знизити розміщенням під антеною

решіткою металевого екрану, як показано на рис.3. Однак це суттєво ускладнить конструкцію мобільного варіанта антенної системи, тому досліджуємо вібраторну антенну решітку, показану на рис.1.

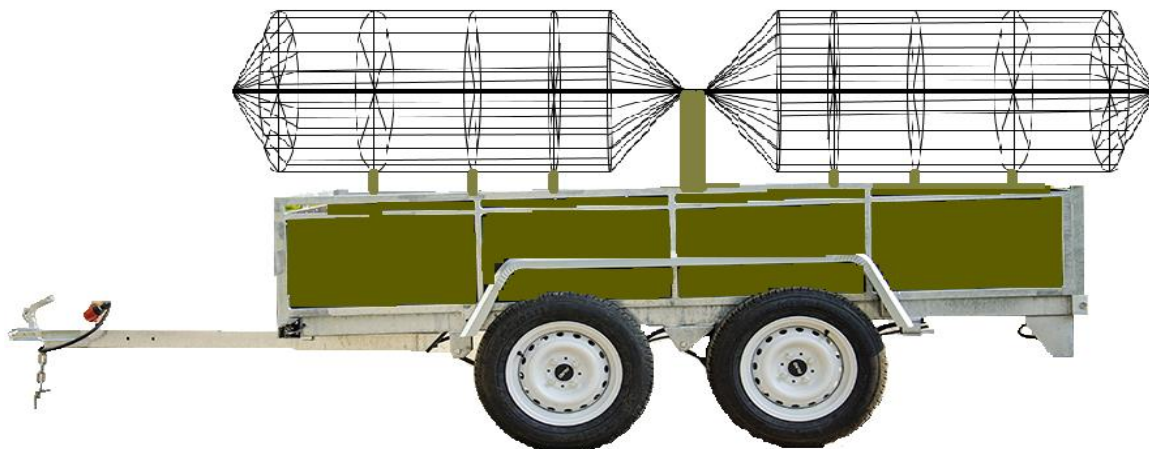


Рис.1. Конструкція вібраторної антенної решітки для МЦІС (варіант 1)

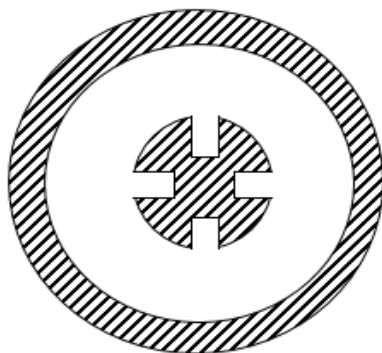


Рис.2. Поперечний переріз коаксіального кабелю антено-фідерного тракту МЦІС

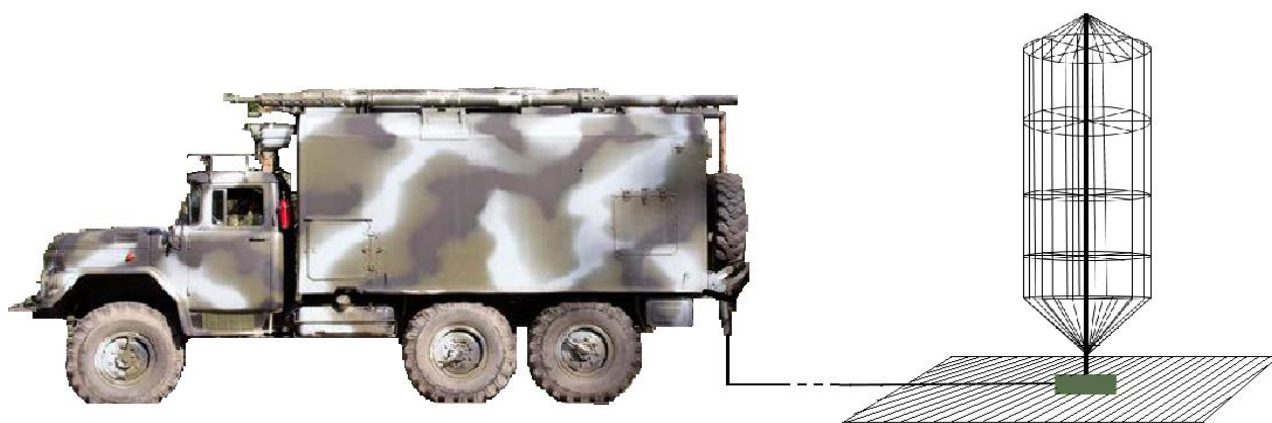


Рис.3. Конструкція вібраторної антенної решітки для МЦІС (варіант 2)

Крім того, підвищені втрати при застосуванні вертикального вібратора пов'язані з малою ефективною висотою його підвісу над поверхнею ґрунту. Наприклад, якщо висота вертикального вібратора 6,5м, то це відповідає відношенням $h/\lambda = 0,075$ на частоті 10 МГц та $\frac{h}{\lambda} = 0,2$ на частоті 25 МГц.

При дуже малих кутах місця на низьких частотах ККД антени із горизонтальних вібраторів вищі, ніж із вертикальних. Наприклад, на частоті 5МГц при куті місця $\varphi_0 = 5^\circ$ ККД горизонтального вібратора приблизно на 10% вище, ніж у вертикального вібратора. Також зі зростанням частоти

використання горизонтальних вібраторів дозволяє отримати істотно менше втрати за рахунок впливу ґрунту.

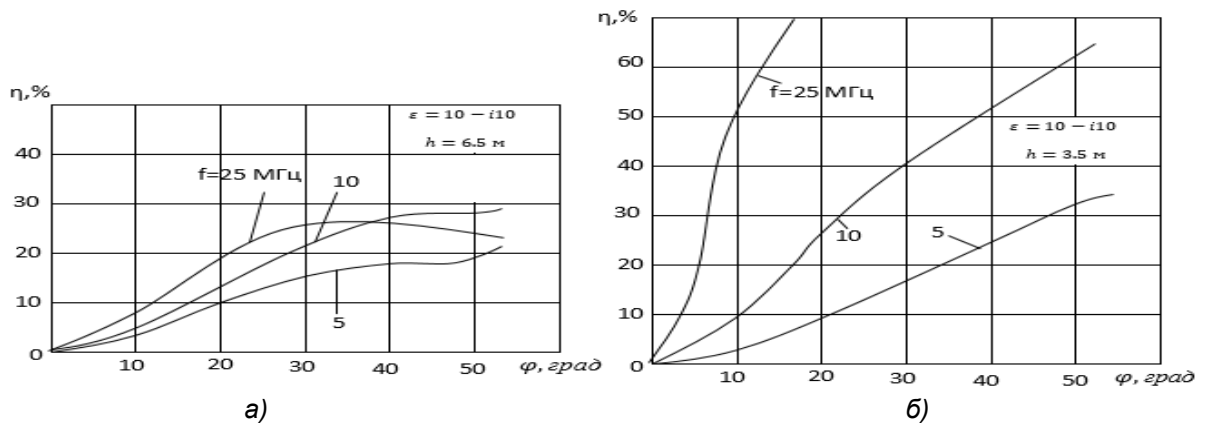


Рис.4. Графіки залежності ККД від кута місця

На рис. 4а наведено залежності η (ККД) від кута місця φ_0 для вертикального вібратора: крива 1 – для частоти 5 МГц, крива 2 – для частоти 10 МГц та крива 3 – для частоти 25 МГц. Розмір $L \gg \lambda$ відповідає середнім параметрам ґрунту $\varepsilon' = 10 - i10$. На рис. 4б наведено аналогічні залежності для горизонтального вібратора. Порівняння даних рис.4 показує, що при малих кутах місця ККД антени з горизонтальних вібраторів вище, ніж із вертикальних вібраторів.

У конструкції антенної решітки на рис.1 використовується понад 20 телескопічних стрижнів замість звичайних сталевих дротів діаметром 8 мм стандартної конструкції. Положення шунта, що грає роль металевого ізолятора, вдається домогтися оптимізації імпедансних характеристик у широкій смузі частот.

У вібратора ДС описується наступним виразом:

$$f(\theta) = 4j \sin \theta \sum_{n=1}^M \frac{I_n}{I_1} \cos[(2n-1) \sin \theta], \quad (1)$$

де θ - напрямок головного пелюстка ДС; I_1, I_n – гармоніки струму. Опір випромінювання вібратора запишемо так:

$$R_{\Sigma} = 60 \int_0^{\pi} f(\theta) f^*(\theta) \sin \theta d\theta. \quad (2)$$

Якщо втрати потужності в поверхневому опорі Z вібратора відсутні, то опір випромінювання знаходиться за формулою:

$$R_{\Sigma} = \operatorname{Re} Z_a - \sum_{n=1}^N |I_n|^2 \operatorname{Re} Z_n. \quad (3)$$

Використовуючи формули (2) та (3) отримаємо вираз для КСД та ККД:

$$D = 30 (kl_d)^2 / R_{\Sigma}, \quad (4)$$

$$\eta_a = R_{\Sigma} / \operatorname{Re} Z_a, \quad (5)$$

де D - КСД; η_a - ККД; Z_a - вхідний опір; k – хвильове число; l_d – діюча довжина вібратора.

Формули (1), (4), (5) описують основні електричні характеристики вібратора, що досліджується.

Зазначимо, що як випромінювач вібраторної антенної решітки метрового діапазонів хвиль доцільно використовувати укорочені вібратори. Відомо, що із зменшенням електричної довжини активна складова R_a вхідного опору вібратора падає пропорційно квадрату довжини $(l/\lambda)^2$, а реактивна X_a ємнісний характер і збільшується (за модулем) пропорційно λ/l . Узгодження вібратора зводиться до компенсації великого реактивного опору вібратора та трансформації активного опору кілька разів.

Оцінимо залежність вхідного опору $Z_a = R_a + jX_a$ короткого вібратора від величини індуктивного опору X_i . Зі збільшенням X_i від нуля у бік великих позитивних значень реактивна частина вхідного опору X_a переходить з області негативних в область позитивних значень через точку послідовного резонансу X_{i1} , в якій $X_a = 0$. При подальшому збільшенні X_i величина X_a зростає, і в точці X_{i2} спостерігається паралельний резонанс, де X_a стрибком переходить в ємнісну область і далі, асимптотично наближається до реактивного опору вібратора. Значення X_{i1} та X_{i2} залежать від z_L / l : з наближенням z_L / l до 1 величини X_{i1} та X_{i2} зміщуються у бік великих значень, одночасно з цим зменшується різниця величин $X_{i2} - X_{i1}$. Залежність активної складової R_a має вигляд резонансної кривої і досягає максимуму в точці паралельного резонансу. Підбором скорочувальної реактивності X_H можна компенсувати реактивну складову вхідного опору вібратора X_a і підвищити його активну складову.

З практичної точки зору найбільш цікавим є випадок, коли в плече вібратора включено навантаження $X_H = X_{H1}$, що відповідає послідовному резонансу вхідного опору. Вхідний опір є сумою збільшеного опору випромінювання і опору, зумовленого втратами в реактивності, що вкорочує. Остання складова опору не є точно опором скорочувальної реактивності, оскільки струм у точці розміщення навантаження відрізняється від струму збудження. У меншому ступені збільшення вхідного опору R_a залежить від радіусу вібратора. Так, зміна a/λ у 3 рази (від 0,001 до 0,003) призводять до зниження R_a приблизно на 20% при $Q=100$ та на 10% при $Q=250$ для $l/\lambda = 0,05$.

Для більшого значення R_a можна рекомендувати вибрати значення $z_L / l = 0,7 \dots 0,8$, де спостерігається істотне зростання R_a , а η_a ще незначно падає. Зменшення розмірів l/λ та a/λ , а також зменшення величини Q призводить до зниження ККД вібратора. Реально досяжна величина ККД вібратора з $l/\lambda = 0,05$ при застосуванні реактивності, що скорочує, з величиною $Q=250$ становить 35-40%. Смуга пропускання скорочувальних навантажених вібраторів оцінюється за такою формулою:

$$2\Delta f/f_0 = k^3 l^3 / 6 \left(\ln \frac{l}{a} - 1 \right) + 1/Q, \quad (6)$$

де a – радіус вібратора. Аналіз формули (6) свідчить про те, що зменшення відношення l/λ та a/λ призводить до звуження смуги пропускання вібраторів, а укорочення вібраторів призводить до розширення смуги пропускання.

Вібраторні антенні решітки досліджуємо матричним методом. Якщо уявити кожен вібратор як багатополісник (залежить від числа стрижнів в циліндрі), то антенна решітка (рис.1) є каскадне з'єднання двох багатополісників.

Нехай $[S_1]$ та $[S_2]$ - матриці розсіювання двох багатополісників, що описують дві циліндричні вібраторні антенні решітки на рис.1, з'єднаних каскадно (рис.5), а $[S]$ - матриця розсіювання всього з'єднання.

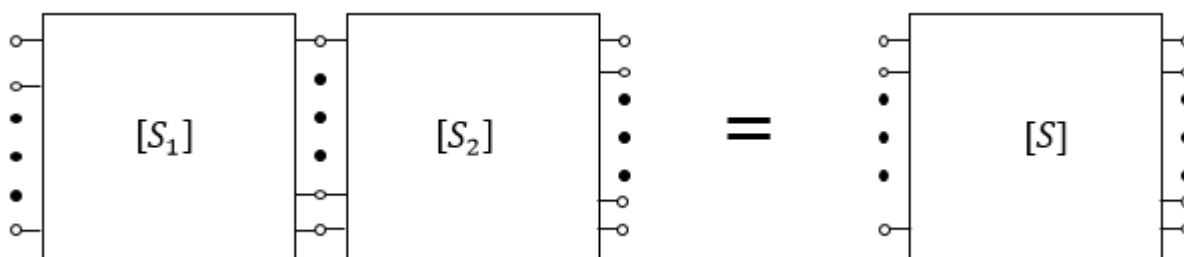


Рис.5. Каскадне з'єднання багатополісників.

Представимо $[S_1]$ і $[S_2]$ у блочному вигляді, розбивши матриці на клітинки:

$$[S_1] = \left[\begin{array}{c|c} [R_1] & [T_1]_t \\ \hline - & - \\ \hline [T_1] & [R'_1] \end{array} \right], \quad [S_2] = \left[\begin{array}{c|c} [R_2] & [T_2]_t \\ \hline - & - \\ \hline [T_2] & [R'_2] \end{array} \right],$$

Матрицю $[S]$ також зручно уявити в блочному вигляді, розділивши її на клітинки, що відносяться до першого або другого багатополюсника:

$$[S] = \left[\begin{array}{c|c} [R] & [T]_t \\ \hline - & - \\ \hline [T] & [R'] \end{array} \right]. \quad (7)$$

Блоки матриці $[S]$ пов'язані з блоками матриць $[S_1]$ та $[S_2]$ наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} [R] &= [R_1] + [T_1]_t \{[E] - [R_2][R'_1]\}^{-1} [R_2][T_1], \\ [T] &= [T_2] \{[E] - [R'_1][R_2]\}^{-1} [T_1], \\ [R'] &= [R_2] + [T_2] \{[E] - [R'_1][R_2]\}^{-1} [R'_1][T_2]_t. \end{aligned} \quad (8)$$

Підставляючи вирази (8) в (7) отримаємо розгорнутий вираз для матриці $[S]$.

Тут $[E]$ - одинична матриця, порядок якої дорівнює числу з'єднань багатополюсників.

Системі випромінювачів поставимо у відповідність еквівалентний багатополюсник, який характеризуватиметься матрицею розсіювання $[S]$. В якості входу каскадного з'єднання виберемо реально існуючі входи вібраторів антенної решітки. Тоді блок матриці розсіювання повністю визначатиметься матрицею опорів [2].

Ефективне функціонування вібраторної антенної решітки в широкій смузі частот потребує відповідного узгоджувального пристрою. Формування заданого амплітудно-фазового розподілу в багатоеlementних антенних решітках також вимагає узгоджувальних пристроїв, що працюють у широкій смузі частот. Одним із прикладів такого узгоджувального пристрою може бути схема, що представлена на рис.6. Така схема узгоджувального пристрою відрізняється не лише широкою смугою робочих частот, а й простотою конструкції.

Зазначимо, що формування необхідного амплітудно-фазового розподілу та в антенних решітках досягається шляхом використання відповідних узгоджувальних елементів. В якості таких елементів в діапазоні декаметрових та метрових хвиль використовуються узгоджувальні трансформатори або гібридні суматори.

Розглянемо завдання широкопasmового узгодження двох активних навантажень за допомогою трансформатора. Еквівалентна схема такого узгоджувального трансформатора враховує індуктивність розсіювання та ємності первинної та вторинної обмоток, а також ємність зв'язку між ними.

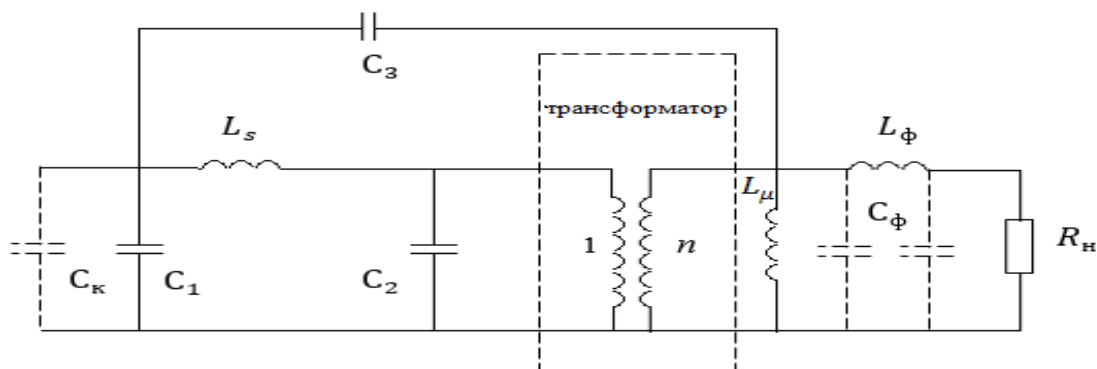


Рис.6. Схема узгоджувального трансформатора

Схема на рис.6 з достатньою для практики точністю моделює властивості як звичайних трансформаторів, так і деякі типи трансформаторів типу довгої лінії при параметрах схеми, що не залежать від частоти [3].

Пристаюючи до аналізу схеми рис.6, введемо позначення: Γ – вхідний коефіцієнт відбиття при навантаженні трансформатора провідністю, що дорівнює внутрішній провідності генератора; ρ – хвильовий опір трансформатора; $\rho = \sqrt{L_s/C}$, де L_s – індуктивність розсіювання; C – власна ємність, яка дорівнює $C_1 + C_2 + C_3(n-1)^2$; $\alpha = R_n/\rho$ – коефіцієнт навантаження; f_c – частота зрізу, яка дорівнює $R_n/4\pi L_\mu$, L_μ – індуктивність намагнічування обмотки; χ – поточна частота. Крім того, позначимо $m_1 = \frac{C_1}{C}$; $m_2 = \frac{C_2}{C}$; $m_3 = \frac{C_3}{C}$.

Умови, при яких забезпечується максимально широка смуга частот. Для цього випадку маємо:

$$\begin{aligned} m_1 &= 0,5[1 + 2m_3(n-1)], \\ m_2 &= 0,5[1 - 2nm_3(n-1)]. \end{aligned}$$

На рис.7 та 8 наведено залежності величини α від значень максимального коефіцієнта відбиття $|\Gamma_m|$ та $|\Gamma_m|$ від x_m , ці залежності побудовані при $nm_3 = \text{const}$ для максимально гладкої ($\alpha=1$) та чебишевської ($\alpha < 1$) характеристик, причому виграш у смузі пропускання, що дається застосуванням останньої, лежить у межах 1,6 ... 1,9. Ці залежності зручно використовувати під час розрахунку трансформаторів.

Практично значення m_1 , m_2 і m_3 можуть залежно від конструкції та схеми змінюватися в дуже широких межах. Якщо $C_1 = k$, $C_3 = k(n-1)$, $C = kn^3$ (C наведено до первинної обмотки, k – коефіцієнт пропорційності) і використовуючи рівність $m_1 + m_2 + m_3(n-1)^2 = 1$, отримаємо:

$$\begin{aligned} M_1 &= 1/n^3; \\ M_2 &= 3(n-1)/n^2; \\ M_3 &= (n-1)/n^3. \end{aligned} \tag{9}$$

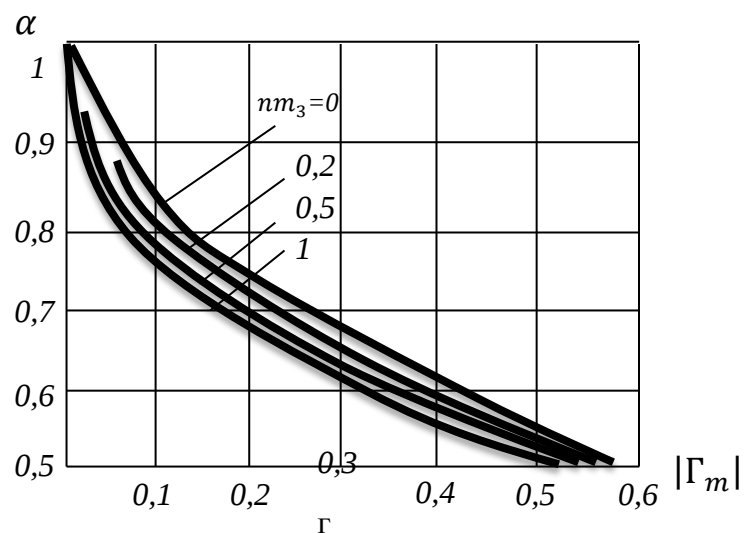
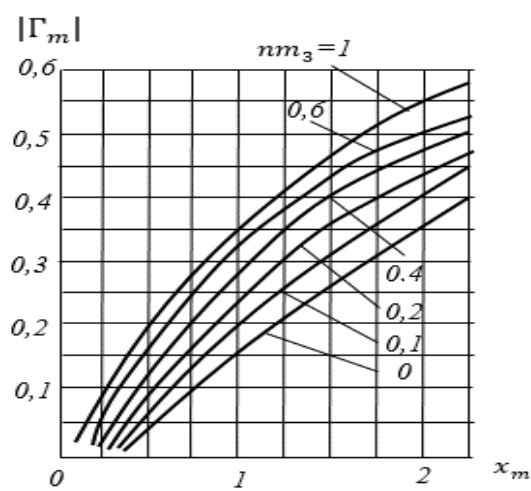
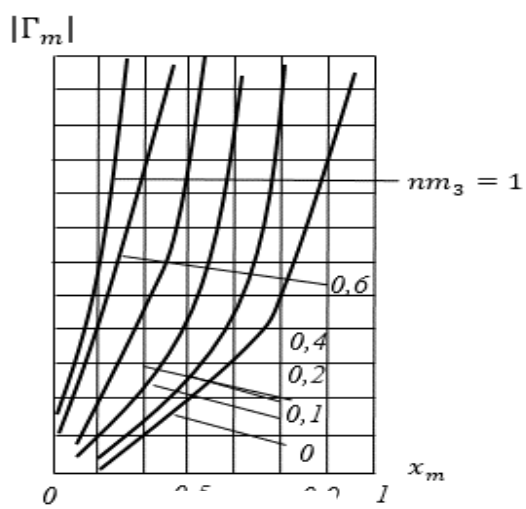


Рис.7. Графік залежності величини α від значень максимального коефіцієнта відбиття



a)



б)

Рис.8. Графік залежності максимального коефіцієнта відбиття від значень x_m

Відзначимо, що формули (9) для M_1 , M_2 , M_3 являються наближеними. Широкопasmовий узгоджувальний трансформатор може застосовуватися в вібраторній антенній решітці, що досліджується.

Висновки

Зазначимо, що досліджена конструкція вібраторної антенної решітки для МЦІС дозволяє реалізувати достатні для практики високі значення КСД та ККД, що відповідає результатам роботи [3]. Використання горизонтальних решіток має ширину променя приблизно $\sqrt{2\lambda/L}$, де L – довжина антени. Горизонтальна конструкція антенної решітки має порівняно слабку залежність ширини променя від довжини хвилі, пропорційну $\sqrt{\lambda}$ та відрізняється високою стійкістю електричних параметрів. Горизонтальна поляризація вібраторної антенної решітки декаметрових хвиль істотно ефективніша порівняно з вертикальною поляризацією для кутів місця $\varphi_0 < 10^\circ$.

Література

- 1.Почерняев В.М., Магомедова М.С., Сивкова Н.М. Ионосферный зв'язок з використанням штучних іонізованих неоднорідностей. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2022. №2 (68). С.124-128.
- 2.Магомедова М.С., Почерняев В.М. Широкопasmовий узгоджувальний трансформатор для антенної системи іоносферної станції зв'язку. *Scientific trends and trends in the context of globalization: матеріали IV міжнарод. наук.-прак. конф. (Умео, Швеція 19-20 серпня, 2022р.)*.Швеція,2022.С.359-363.
- 3.Воскресенский Д.И. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток. Москва: Радио и связь, 1994.412с.

References

1. Pochernyaev V.M., Mahomedova M.S., Sivkova N.M. Ionosfernyi zviazok z vykorystanniam shtuchnykh ionizovanykh neodnorodnostei. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku [Ionospheric communication using artificial ionized inhomogeneities. Control, navigation and communication systems]*, 2022. №2 (68). pp.124-128. [in Ukrainian].
- 2.Mahomedova M.S., Pochernyaev V.M. Shyrokosmuhovyi uzghodzhuvalnyi transformator dlia antennoi systemy ionosfernoi stantsii zviazku. *Scientific trends and trends in the context of globalization: materialy IV mizhnarod. nauk.-prak. konf. (Umeo, Shvetsiia 19-20 serpnia, 2022r.) [Broadband matching transformer for the antenna system of the ionospheric communication station. Scientific trends and trends in the context of globalization: materials IV International. science-practice conf. (Umeå, Sweden, August 19-20, 2022)]*. Shvetsiia,2022.pp.359-363. [in Sweden].
3. Voskresenskyi D.Y. *Antenny i ustrojstva SVCh. Proektirovanie fazirovannykh antennoy reshetok [Antennas and microwave devices. Design of phased array antennas]*. Moskva: Radio i svyaz, 1994.412p. [in Russian].