

УДК 621.396.67

## МЕТОД СИНТЕЗУ ВІБРАТОРНИХ АНТЕН З РЕАКТИВНИМИ ВСТАВКАМИ

DOI 10.36994 / 2788-5518-2023-01-05-07

**Сайко В.Г.** д.т.н., проф. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна. vgsaiko@gmail.com

**Ільїнов М.Д.** к.т.н., доц. Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна. ilinov1948@ukr.net

**Нестеренко І.К.** к.т.н., с.н.с. Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна. igor.nester@ukr.net

**Анотація:** Запропонований новий підхід для дослідження електродинамічних властивостей виділеного класу періодично навантажених структур (вібраторних антен з ємнісними вставками), який відрізняється відносною простотою і достатньою точністю і дозволяє отримати рішення в аналітичному вигляді, що дає можливість уникнути труднощів, що виникають при чисельному розв'язанні задачі. В той же час отримані таким чином рішення можуть бути використані в ітераційних методах чисельного аналізу електромагнітних властивостей періодично навантажених структур та антенних пристроїв, що містять ці структури. Наводиться розв'язок задачі поширення електромагнітної енергії в однорідній двохzew'язної лінії передачі з реактивними включеннями. Її рішення дозволило встановити нові закономірності, а також по-новому підійти до розрахунку вібраторних антен з ємнісними вставками. Проведені дослідження діапазонних властивостей антен з ємнісними вставками дозволили встановити три крайніх випадку розподілу в них струму: експоненціальне, синусоїдальне і лінійне, отримати вирази для розрахунку внутрішніх і зовнішніх характеристик таких антен, виявити залежності їх електричних характеристик від геометричних розмірів і сформулювати рекомендації щодо раціонального вибору величин ємнісних ставок і місць їх включення. Розроблено метод розрахунку вібраторних антен з ємнісними вставками, сутність якої полягає в раціональному використанні дисперсійних властивостей таких структур в частотній області для створення широкосмугових антен с вставками. Для забезпечення роботи радіо засобів спеціального призначення виготовлені та досліджені зразки вібраторних антен з двома, трьома ємнісними вставками. Результати випробувань таких антен показали, що їх коефіцієнт посилення на частотах, близьких до критичної, в два та більше разів перевищує коефіцієнт посилення четверть хвильового випромінювача і, отже, коефіцієнт корисної дії розроблених антен також зріс.

**Ключові слова:** вібраторна антена з ємнісними вставками, дисперсія, однорідна лінія передачі, метод розрахунку вібраторних антен з ємнісними вставками.

## SYNTHESIS METHOD OF VIBRATOR ANTENNAS WITH REACTIVE INSERTS

**Volodymyr Saiko**, Dr.habil., Prof. Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine. vgsaiko@gmail.com

**Mykhailo Ilyinov**, Ph.D., associate professor Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes of Krut, Kyiv, Ukraine. ilinov1948@ukr.net.....

**Igor Nesterenko**, Ph.D., SSR.. Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes of Krut, Kyiv, Ukraine. igor.nester@ukr.net.....

**Abstract:** A new approach is proposed for investigating the electromagnetic properties of a specific class of periodically loaded structures (vibrator antennas with capacitive inserts), which is characterized by relative simplicity and sufficient accuracy. It allows obtaining analytical solutions, thus avoiding the difficulties associated with numerical solutions. At the same time, the obtained solutions can be used in iterative methods for numerical analysis of electromagnetic properties of periodically loaded structures and antenna devices containing these structures. The solution of the problem of electromagnetic energy propagation in a uniform two-conductor transmission line with reactive inclusions is presented. Its solution has revealed new regularities and provided a fresh perspective on the calculation of vibrator antennas with capacitive inserts. Studies on the frequency characteristics of antennas with capacitive inserts have identified three extreme cases of current distribution: exponential, sinusoidal, and linear. Expressions for calculating internal and external characteristics of such antennas have been derived, and dependencies of their electrical characteristics on geometric dimensions have been established. Recommendations for the rational selection of capacitance values and their locations have been formulated. A calculation method for vibrator antennas with capacitive inserts has been developed, which involves the rational use of dispersion properties of such structures in the frequency domain to create wideband

antennas with inserts. For the operation of specialized radio equipment, samples of vibrator antennas with two or three capacitive inserts have been manufactured and studied. The results of testing such antennas have shown that their gain at frequencies close to the critical value exceeds the gain of a quarter-wavelength radiator by two or more times, thus increasing the overall efficiency of the developed antennas.

**Keywords:** vibrator antenna with capacitive inserts, dispersion, uniform transmission line, calculation method for vibrator antennas with capacitive inserts.

### Вступ

Аналіз математичних підходів до розрахунку широкосмугових вібраторних антен з ємнісними вклученнями (далі ВАВ) показує, що строгі методи розрахунку, через важкість рішення оптимізаційної задачі за вхідним опором і діаграмою спрямованості, не дозволяють окреслити границі пошуку варіюваних параметрів антен, від яких залежить ефективність процесу оптимізації [1-3]. Крім того, чисельні рішення задач синтезу імпедансних структур, як правило, призводять до необхідності досліджувати погано зумовлені системи лінійних рівнянь алгебраїчних високого порядку, вирішення яких, як і раніше, становить одну зі складних проблем чисельних методів в електродинаміці [4-6]. Методи, засновані на аналогії з довгою лінією, мають низьку точність отриманих результатів, що позбавляє сенсу чисельної оптимізації. Через зазначені причини такі підходи не дозволяють наочно виявляти характер впливу всіх параметрів ВАВ: величин і координат вклучення вставок, довжини і радіусу провідника антени. Відсутність розуміння фізичного явища, що призводить до зміни розподілу струму уздовж лінійного вібратора, призводить до того, що в більшості відомих публікацій даються в основному експериментальні дані або ж визначаються закони, що забезпечують синфазний розподіл струму уздовж антени в необхідному діапазоні частот. З цієї причини представляє інтерес розрахунок параметрів вібраторної антени з ємнісними вставками на основі фізичного осмислення задачі [7-10].

### Виконання досліджень

В якості вихідного приймається допущення, що ємнісні вставки вклучені безперервно по всій довжині антени. Таке припущення вважається справедливим при досить великій кількості ємнісних вставок на ділянці лінії, порівнянню з довжиною хвилі. Для уточнення меж застосовності допущення, досліджуємо властивості зазначених електродинамічних систем [7].

Уявімо з'єднання відрізків лінії передачі з вклученими в них реактивними у вигляді каскадного з'єднання 4-полюсниками (рис. 1).

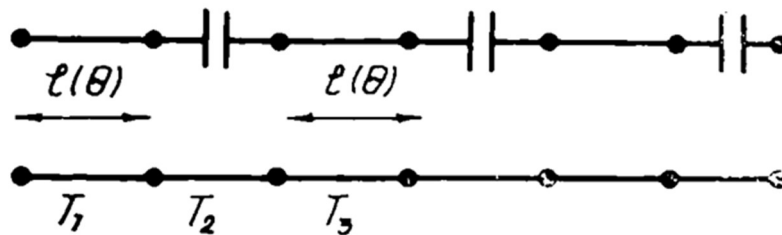


Рис.1 З'єднання відрізків лінії передачі з вклученими в них реактивними вставками

Перший 4-полюсник – відрізок однорідної двохзв'язної лінії довжиною  $l$ , характеризується матрицею передачі:

$$T_1 = \begin{Bmatrix} e^{j\theta} & 0 \\ 0 & e^{-j\theta} \end{Bmatrix}, \quad j\theta = j\omega\sqrt{[L_0 C_0] * l}.$$

Наступна за ним послідовно вклучена ємність характеризується матрицею:

$$T_2 = \begin{Bmatrix} 1 + z^\wedge/2 & -z^\wedge/2 \\ z^\wedge/2 & 1 - z^\wedge/2 \end{Bmatrix}.$$

де  $z^\wedge = z/p = 1/j\omega C_{b_0}\sqrt{[L_0/C_0]}$ ;  $C_b$  – ємність включення.

Потім включений відрізок однорідної лінії, який характеризується матрицею  $T_3 = T_1$ , далі включено кілька аналогічних з'єднань 4-полісників.

Матриця передачі  $T$  двох каскадно-включених 4-полісників, кожен з яких характеризується матрицею  $T_4 = T_1T_2T_3$ :

$$T = T_4T_4 =$$

$$= \begin{vmatrix} (1 + z^\wedge/2)e^{j4\theta} - z^\wedge/4 & -z^\wedge/2[(1 + z^\wedge/2)e^{j2\theta} + (1 - z^\wedge/2)e^{-j2\theta}] \\ z^\wedge/2[(1 + z^\wedge/2)e^{j2\theta} + (1 - z^\wedge/2)e^{-j2\theta}] & (1 + z^\wedge/2)^2 e^{-j4\theta} = z^\wedge/4 \end{vmatrix}$$

Умови рівності одиниці коефіцієнта передачі:

$$t_{2e^{j\theta}} = |z^\wedge/2[(1 + z^\wedge/2)e^{j2\theta} + (1 - z^\wedge/2)e^{-j2\theta}]|^2 = 0.$$

Практичний інтерес для дослідження представляє рівність нулю другої співмножники. Після його перетворення отримаємо

$$2\theta = \arctg 2\omega C_b \sqrt{[L_0 C_0]} \quad (1)$$

Залежність (1) показує: якщо ємнісні вставки встановлені на відстанях, рівних або більших чверті довжини робочої хвилі ( $l \geq \lambda/4$ ), коефіцієнт передачі  $t_{21}$  носитиме резонансний характер. Такі структури з нулями на частотах, що визначаються виведеною рівністю, добре відомі.

Якщо прийняти довжину відрізків лінії, що з'єднують реактивності, на порядок меншими чверті довжини хвилі, то значення тангенса можна замінити значенням його аргументу. Отримаємо:

$$C_0 l = C_b \quad (2)$$

З виразу (2) видно, що в разі, якщо ємнісні реактивності встановлені на відстанях, менших, ніж довжина робочої хвилі, і кожна ємність по своїй величині дорівнює сумарній розподіленій ємності відрізка сполучної лінії  $l$ , коефіцієнт передачі такої структури незалежно від робочої частоти дорівнює одиниці.

Залежності (1), (2) дозволяють зробити висновок: якщо включити рівномірно по всій довжині ємності дискретно або ємності розподіленого характеру на відстанях, рівних або менше однієї восьмої довжини хвилі, то така структура буде представляти однорідну лінію передачі. Розглянемо для неї рішення задачі поширення електромагнітної енергії.

З точки зору теорії довгих ліній кожна ділянка такої однорідної лінії з ємнісними включеннями володіє індуктивністю  $L_0$ , ємністю  $C_0$ , активним опором  $R_0$ , провідністю  $G_0$  і ємністю  $C_\epsilon$ , включену в лінію послідовно. Еквівалентна схема такої лінії зображена на рис. 2.

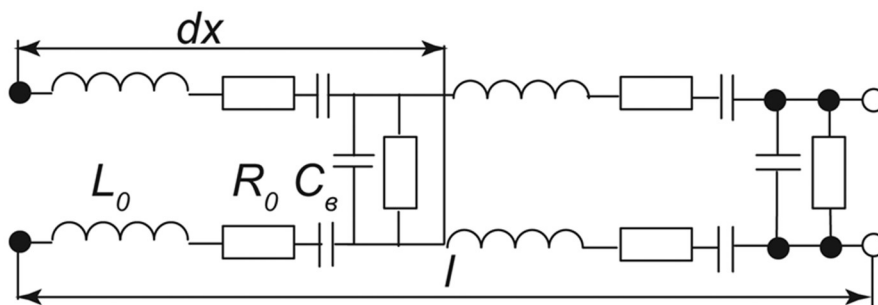


Рис. 2 Еквівалентна схема з'єднання відрізків лінії передачі з включеними в них реактивними вставками

Шляхом вирішення телеграфних рівнянь можна показати, що коефіцієнт поширення і коефіцієнт фази будуть визначатися виразами:

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{[L_0C_0]}\sqrt{[1 - (\omega_{кр}/\omega)^2]}; \beta = \beta_0\sqrt{[1 - (\omega_{кр}/\omega)^2]},$$

де  $\omega_{кр} = 1/\sqrt{[L_0C_0]}$ ;  $\beta_0$  – коефіцієнт фази двухпровідної лінії без втрат і без ємнісних вставок.

З отриманих виразів видно, що в даній структурі двухзв'язної лінії з послідовно включеними ємнісними вставками фазова швидкість залежить від частоти, тобто в ній проявляється явище дисперсії, подібне дисперсії в хвилеводі. Доречно зауважити, що відомі радіочастотні лінії передачі електромагнітної енергії, що містять два струмонесучі провідники, розташованих паралельно один одному, хоча б в один з яких послідовно включені однакові ємності (1), мають властивості смуго-пропускаючих фільтрів, тобто не володіють дисперсійними властивостями.

Діапазон робочих частот, в якому будуть активно проявлятися дисперсійні властивості, складе до  $4\omega_{min}$  т.е.  $\omega_{min}/\omega_{max} = C_0/C_B = 1 \dots 0.25$ .

Наведені результати дозволили по-новому пояснити багато раніше відомих результатів (2, 3) і підійти до розрахунку вібраторних антен з нових позицій.

Прийmemo, що несиметричний вібратор отриманий з відрізка розглянутої однорідної двухзв'язної лінії з ємнісними включеннями і складається з окремих відрізків циліндричного провідника  $\Delta l \ll \lambda/4$  суміжні торці яких утворюють ємнісні вставки.

Традиційно розглядатимемо несиметричний вібратор з циліндричних проводів загальною довжиною  $l$  і діаметром  $2a$ . Радіус проводу настільки малий у порівнянні з його довжиною, що виконується умова  $2 \ln 2l/a \gg 1$ .

Розподіл струму в несиметричному вібраторі з ємнісними вставками матиме залежність:

$$I(z) = I_m \sin \beta(l - |z|), \quad (3)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт фази хвилі струму (напруги) в лінії з ємнісними включеннями.

З формули (3) випливає, що постійна поширення  $\gamma$  в залежності від співвідношення робочої довжини хвилі до критичної довжини хвилі лінії  $\lambda/\lambda_{кр}$  може бути дійсною, уявною і рівною нулю.

На частотах, вище критичної, розподіл струму вздовж вібратора підпорядковується синусоїдальному закону. Однак якщо в вібраторі без реактивних включень ця залежність однозначно визначалася тільки співвідношенням робочої довжини хвилі і власної довжини вібратора, то для вібратора з ємнісними вставками вона ще залежить від співвідношення робочої і критичної довжини хвилі. На частотах, нижче критичної, хвилі струму не можуть поширюватись вздовж вібратора. Це пояснюється тим, що амплітуда струму зменшується від початку до кінців вібратора по експоненціальному закону з постійною фазою і відповідно енергія не може поширюватися уздовж вібратора.

Для практики представляє інтерес дослідження розподілу струму з ємнісними вставками на частотах, близьких до критичної. На частотах  $\omega_{кр} \lesssim \omega_{раб}$  величина постійної поширення стає малою і формула (3) набуде вигляду  $I(z) = I_A(1 - |z|/l)$ .

Для області  $\omega_{кр} \gtrsim \omega_{раб}$ , аналогічно міркуючи, приходимо також до лінійного розподілу струму  $I(z) = I_A \operatorname{sh} \beta(1 - |z|)/\operatorname{sh} \beta l = I_A(1 - |z|/l)$ .

Для уточнення результату в критичних умовах слід підійти до тих самих висновків, але з іншого боку.

Для цього визначимо діючу довжину несиметричного вібратора з ємнісними вставками в трьох крайніх випадках.

Коли співвідношення  $\lambda/\lambda_{кр} < 1$ , діюча довжина вібратора буде визначатися

$$l_g = 1/\sin \beta \int_0^l \sin \beta(l - |z|) dz = 1/\beta(\operatorname{tg} \beta l/2)$$

На частотах, близьких до критичної  $\lambda/\lambda_{кр} \lesssim 1$ ,  $l_g = l/2$ , тобто діюча довжина вібратора буде рівною половині його геометричної довжини. Діюча довжина вібратора при  $\lambda/\lambda_{кр} < 1$  буде змінюватися зі зростанням частоти значно повільніше, ніж у звичайного вібратора. Цим пояснюються широкосмугові властивості таких вібраторів.

На частотах, нижче критичної, діюча довжина:

$$l_g = 1/\text{sh } \beta l \int_0^l \text{sh } \beta(l - |z|) dz = 1/\beta \text{sh } \beta l (\text{ch } \beta l - 1).$$

При  $\lambda/\lambda_{кр} \gtrsim 1$   $l_g = l/2$ .

Таким чином, апроксимація струму вздовж вібратора з ємнісними включеннями синусоїдальним та експоненціальним законами дає в критичних умовах однакові кількісні і якісні результати. Звідси можна зробити висновок, що струм вздовж вібратора з включеннями, працюючого на частоті, близькій до критичної, за фазою не змінюється, а за амплітудою змінюється практично по лінійному закону. Фізично це явище пояснюється тим, що довжина хвилі в вібраторі з включеннями при роботі на частоті, близькій до критичної, прямує до нескінченності, і вібратор буде працювати в режимі великого подовження.

Відповідно можливі три крайні випадки розподілу струму вздовж вібратора:

$\gamma$  – дійсна, якщо  $\lambda/\lambda_{кр} > 1$  – експоненціальний розподіл струму;

$\gamma$  – уявна, якщо  $\lambda/\lambda_{кр} > 1$  – синусоїдальний розподіл струму;

$\gamma$  – дорівнює нулю, якщо  $\lambda/\lambda_{кр} = 0$  – лінійний розподіл струму.

Виходячи з того, що для антен типу, що розглядаються, характерні три крайні випадки розподілу струму, формули для розрахунку зміни діаграми спрямованості  $f(\theta)$ , опору випромінювання  $R_{\Sigma n}$ , вхідного опору  $R_A$  і  $X_A$  і коефіцієнту напруженої дії (КНД)  $D$  в цих областях наведені [7-10].

Результати обчислення діаграми спрямованості, опору випромінювання і КНД при синусоїдальному та експоненціальному розподілу струму представлені на рис. 3 а,б та рис. 4 а,б відповідно.

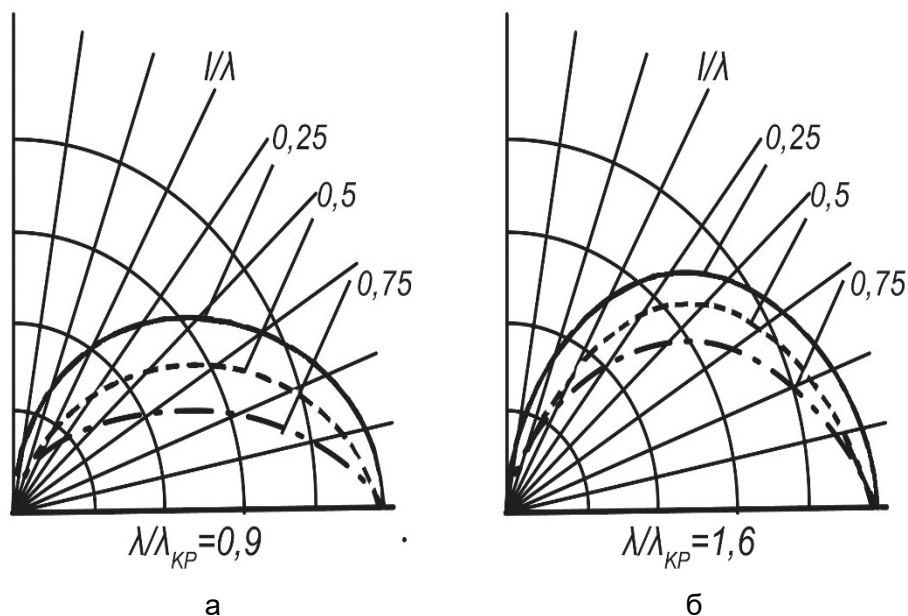


Рис. 3 Діаграми спрямованості при синусоїдальному та експоненціальному розподілу струму

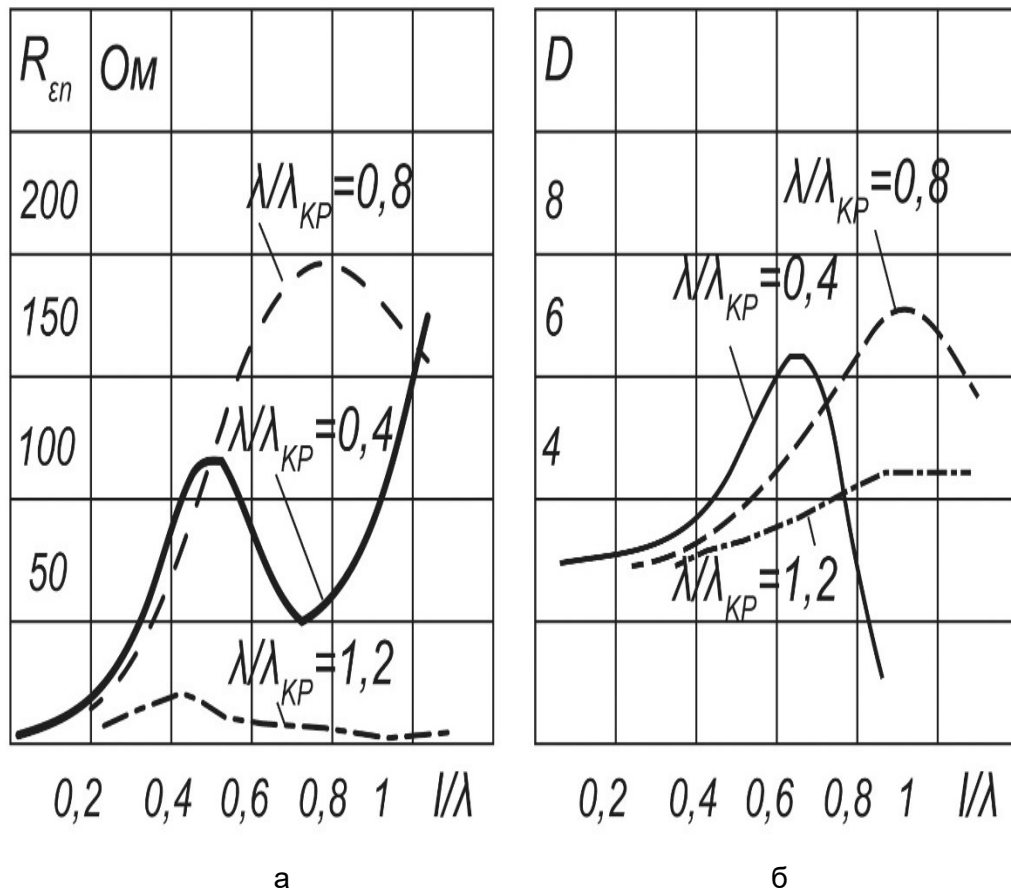


Рис. 4 Залежності опору випромінювання і КНД при синусоїдальному та експоненціальному розподілі струму

З графіків слідує, що направлені властивості вібраторної антени по мірі зростання  $\lambda/\lambda_{\text{кр}} (\omega_{\text{раб}} > \omega_{\text{кр}})$  збільшуються. Але при  $\lambda/\lambda_{\text{кр}} \gg 1$  опір випромінювання стає малим. Низьке значення опору випромінювання антени ускладнює боротьбу за її високий КПД, так як в порівнянні з опором  $R_{\Sigma A}$  стають відчутні будь-які втрати в проводах, ізоляторах, оточуючих антену предметах і на землі. При цьому втрати і випромінювання оточуючих предметів можуть спотворити діаграму спрямованості. Низький КПД антени з ємнісними вставками при експоненціальному розподілі струму являється тенденцією, негативною для проектування таких антен. Однак якщо робоча частота більше, але близька до критичної ( $\omega_{\text{раб}} \gtrsim \omega_{\text{кр}}$ ), то відбувається зростання  $R_{\Sigma A}$ , КНД, розширюються діапазонні властивості і збільшується ефективність антени. Це являється позитивною тенденцією при проектуванні штирових антен для рухомих об'єктів зв'язку.

Таким чином, можна зробити висновок про наявність деякої оптимальної області значень  $\lambda/\lambda_{\text{кр}}$ , яку доцільно використовувати при побудові вібраторних антен з ємнісними вставками.

Результати, отримані в попередньому параграфі, дозволяють зробити висновок про можливість створення вібраторної антени, що працює в широкій смузі частот (3-4 октави). Така антена є вібратор з ємнісними вставками, кожне з плечей, якій містить безліч послідовно розташованих секцій і з'єднують їх ємності включення, розташовані між ними.

Конструктивні параметри її повинні мати такі наступні обмеження [8,9]:

1. Вібратор повинен бути системою дисперсійною, тобто в ньому включені ємності вставки  $C_{\text{в}}$ , рівні або більше розподіленої ємності кожної секції  $C_0$ , тобто  $C_{\text{в}} \geq C_0$ . Це обмеження забезпечує отримання квазісинусоїдального розподілу струму уздовж вібратора, тобто забезпечення максимально можливої діючої довжини антени.

2. Довжина кожної секції  $lc$  повинна бути коротше однієї восьмої довжини робочої хвилі, тобто:

$$lc \leq \lambda_{max}/8.$$

Умова визначає вибір необхідної кількості секцій та ємнісних вставок. Виконання його призводить до зникнення в квазірозподіленій системі резонансних властивостей, тобто така антена буде частотно-незалежною. Іншими словами, така антена буде мати аналогічні властивості однорідної лінії передачі електромагнітної енергії з включеними в неї послідовно зосереджені ємностями.

3. Погонні параметри секції ( $L_o$ ,  $C_o$ ) і ємності вставки ( $C_e$ ) обрані так, що вібратор працює на частоті, близькій або рівній критичній частоті вібратора, яка визначається залежністю:

$$\omega_{кр} = 1/\sqrt{L_o C_B}$$

4. Загальна довжина антени  $l$  повинна бути обрано рівною:

$$l = 3/4 * \lambda_{min},$$

де  $\lambda_{min}$  - мінімальна робоча довжина хвилі,  $\lambda_{кр}$  - критична довжина хвилі:

$$\Lambda_{min} = \frac{\lambda_{min}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{min}}{\lambda_{кр}}\right)^2}};$$

Зупинимось на двох останніх обмеженнях, що визначають умови забезпечення збереження однолепескової діаграми спрямованості вібраторної антени з ємнісними вставками. Прийнято, що довжина плеча антени вибирається з міркувань збереження діаграми в площині вібратора у вигляді одного пелюстка (тобто бажано отримати діаграму спрямованості неізрезану). Для антен з ємнісними включеннями електрична довжина змінюється відповідно до зміни частоти з урахуванням дисперсійних властивостей системи. З цієї точки зору для збереження однопелюскової діаграми спрямованості необхідно виконати наступні дві умови. Перша умова може бути представлено, як умова пропорційній залежності мінімальної частоти від величини індуктивності секції вібратора і ємності включення:

$$\omega_{min} = \omega_{кр} = 1/\sqrt{L_o C_B}$$

Виконання цього співвідношення забезпечить отримання на нижніх частотах коефіцієнта посилення антен не гірше, ніж коефіцієнт посилення на нижніх частотах вібраторної антени без ємнісних включень. Друга умова, з урахуванням дисперсійних властивостей системи можна записати, як умова рівності довжини антени з ємнісними включеннями трьом чвертям довжини мінімальної робочої хвилі. При цьому замість довжини хвилі у вільному просторі слід брати фазову довжину хвилі в дисперсійній лінії з ємнісними включеннями:

$$l = 3/4 \Lambda_{min} = 3/4 * \lambda_{min} / \sqrt{1 - (\lambda_{min}/\lambda_{кр})^2}$$

Дане співвідношення визначає мінімальну довжину хвилі, при якій діаграма спрямованості залишається не порізаною. На більш коротких хвилях в діаграмі спрямованості з'являться провали. Кількість ємнісних вставок визначають два обмеження [8,9]:

- довжина кожної секції антени повинна бути коротше  $\lambda_{max} / 8$ ;
- критична частота дорівнює:

$$\omega_{кр} = 1 / \sqrt{L_o C_B} \quad \text{при } C_B = C_o.$$

Перше обмеження визначає необхідну мінімальну кількість ємнісних вставок, при якому антена буде мати властивості дисперсійної системи передачі електромагнітної енергії. Така структура випромінювача має широкопasmові властивості. При подальшому зменшенні кількості ємнісних вставок антена буде представляти систему з резонансними властивості.

Друге обмеження визначає максимальну кількість ємнісних вставок для отримання необхідного значення критичної частоти в заданому діапазоні частот.

Іншими словами, перша умова накладає обмеження знизу, а друге - зверху на необхідну кількість ємнісних вставок для реалізації діапазонних властивостей антен.

Виходячи з вищевказаних умов відкриваються два принципово різних шляхи конструювання антен з ємнісними вставками, вибір яких повинен визначатися її конкретним призначенням. Можна, не змінюючи геометричної довжини антени, домогтися (за допомогою зміни  $\lambda_{кр}$ ) поліпшення діапазонних властивостей антени. Або, не змінюючи критичну довжину хвилі  $\lambda_{кр}$ , змінювати геометричну довжину антени, домагатися розширення її діапазонних властивостей і поліпшення деяких електричних характеристик. Можливий також розрахунок антен з ємнісними вставками, заснований на комбінації цих шляхів.

При конструюванні першим шляхом, з метою збільшення діапазонних властивостей вібраторних антен з ємнісними вставками, доцільно зрушувати вправо критичну частоту у порівнянні з необхідної мінімальної частотою робочого діапазону  $f_{min}$ . Тоді мінімальна частота  $f_{min}$  буде визначатися нерівністю:

$$f_{min} < 1 / \sqrt{L_o C_B}.$$

Вхідний реактивний опір ємнісного характеру в частотній області  $f_{min} \dots f_{max}$  можна компенсувати узгоджувальною індуктивністю, підключеної до основи антени:

$$\omega_{кр} / \omega_{max} = C_o / C_B = 1 \dots 0,25 \text{ -- } \omega_{max} \leq 4 \omega_{кр}.$$

Такий шлях розробки антен для збільшення їх діапазонних властивостей дозволяє збільшити верхню межу діапазону антени при заданій іншій її довжині. Це впливає з того, що дисперсійні властивості вібратора проявляються активно при співвідношенні ємності секції та ємності включення 0,25 ... 1, тобто діапазон робочих частот, в якому буде виконуватися вищевикладене, складе до  $4\omega_{кр}$ .

Отже, змінюючи  $\omega_{кр}$ , можна збільшити максимальну частоту, на якій зберігається однопелюсткова ДН. Вищевикладені міркування є новими і дозволяють підійти до проектування антенних пристроїв з нових позицій.

Мета експерименту полягала в дослідженні діапазонних властивостей вібраторних антен з ємнісними вставками УКХ діапазону, що використовуються для рухомих комплексів радіозв'язку нового покоління спеціального призначення. Відповідно до цільового використання вібраторних антен з ємнісними вставками необхідно було отримати необхідні параметри вібраторів і перевірити працездатність їх у цілому згідно з технічним завданням.

Експериментальне дослідження виконувалося у Запорізькому науково-дослідному інституті радіозв'язку (ЗНДІРЗ) з вивчення електричних характеристик таких антен.

Відповідно до поставленої мети були розроблені і досліджені декілька варіантів штирьових антен з ємнісними вставками, кожне з плечей яких складалося з окремих секцій, з'єднані між собою послідовно через ємнісні зв'язку.

Вимірювання електричних характеристик проводилося на полігоні ЗНДІРЗ при установці досліджуваних зразків в центрі металевого листа розміром 2,5×2,5 м на висоті 1,7 м від поверхні землі та на поверхні даху кузова рухомого комплексу радіозв'язку спеціального призначення.

Дослідницька робота проводилася в польових умовах, де у діапазоні частот вимірювалися основні характеристики штирьових антен АШ-3М з ємнісними вставками: вхідний опір та



коефіцієнт біжучої хвилі на вході антени. Вимірювання зводилися за допомогою вимірювача комплексних опорів.

Вимірювання відносного коефіцієнта підсилення досліджуваних антен проводилося шляхом порівняння їх випромінювання з випромінюванням чверть хвильового штиря при однакових поданих на них потужностях.

При визначенні параметрів використовувалися методи вимірювань, наведені в інструкціях до відповідних приладу і відомі з науково-технічної літератури.

Виходячи з отриманих закономірностей, були теоретично розраховані в залежності від довжини секції антени і товщини вібратора та досліджені шість типів антен з ємнісними вставками. При експериментальних дослідженнях розглянуто вплив зміни відстані між ємнісними вставками на діапазонні властивості в смузі робочих частот 30...100 МГц для двох макетів вібраторних антен з двома ( $L = 3$  м), трьома ( $L = 3$  м) ємнісними вставками. Зміни дисперсійних властивостей представлені на рис. 5 [11-14].

В якості вихідних даних при розробці використані не тільки вимоги до електричних характеристик і параметрів антен, але в окремих випадках і технологічні вимоги (наприклад, вибір типу випромінювача і ємнісних вставок, умови з'єднання антен з збудливим фідером).

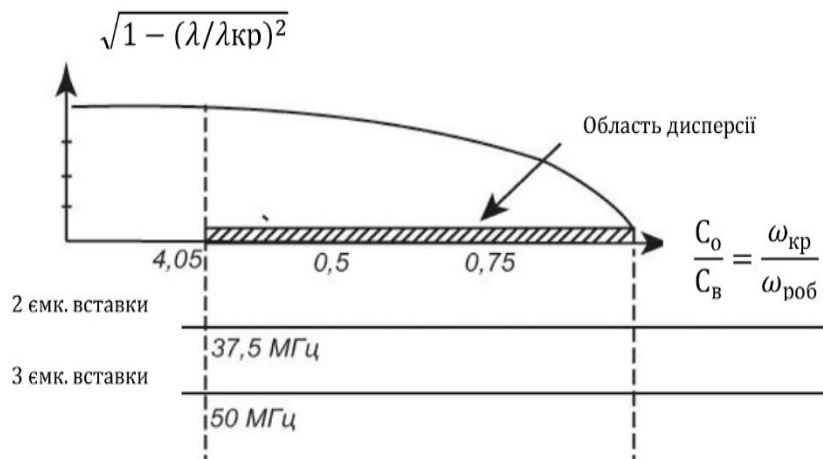


Рис. 5. Характер дисперсійних властивостей антен з ємнісними вставками

Ємнісні вставки представляли собою циліндричні конденсатори, розміщені рівномірно по всій довжині антени, замість з'єднання сталевих колін. В якості діелектрика використовувався текстоліт. Вібратори з двома ємнісними вставками ( $C_1 = 7...9$  пФ,  $C_2 = 10...18$  пФ) і трьома ємнісними вставками ( $C_1 = 7...8$  пФ,  $C_2 = 10...12$  пФ,  $C_3 = 11...13$  пФ) встановлювалися в центрі металевих листів розміром  $2,5 \times 2,5$  м на висоті 1,7 м від поверхні землі і підключалися до вимірювального приладу комплексних опорів через індуктивність 0,23 мГн.

Результати експериментальних досліджень: КСХ; відносного коефіцієнта підсилення ( $G_A$ ) штирьових антен двох типів представлені на рис. 6. (а, б).

У процесі проведення вимірювань розроблений і четвертьхвильовий випромінювачі почерзі встановлювалися в центрі металевих листів. Коефіцієнт посилення піддослідних антен з урахуванням ступені узгодження (КСВ) показаний на рис. 6.б.

Графічні залежності результатів порівняльного аналізу експериментальних і теоретичних залежностей, отриманих методами чисельного інтегрування на основі розробленої методики розрахунку параметрів несиметричної (симетричної) антени з ємнісними вставками та оцінка її електричних характеристик, призводить до незначних розбіжностей і допустимі для практики [11-14].

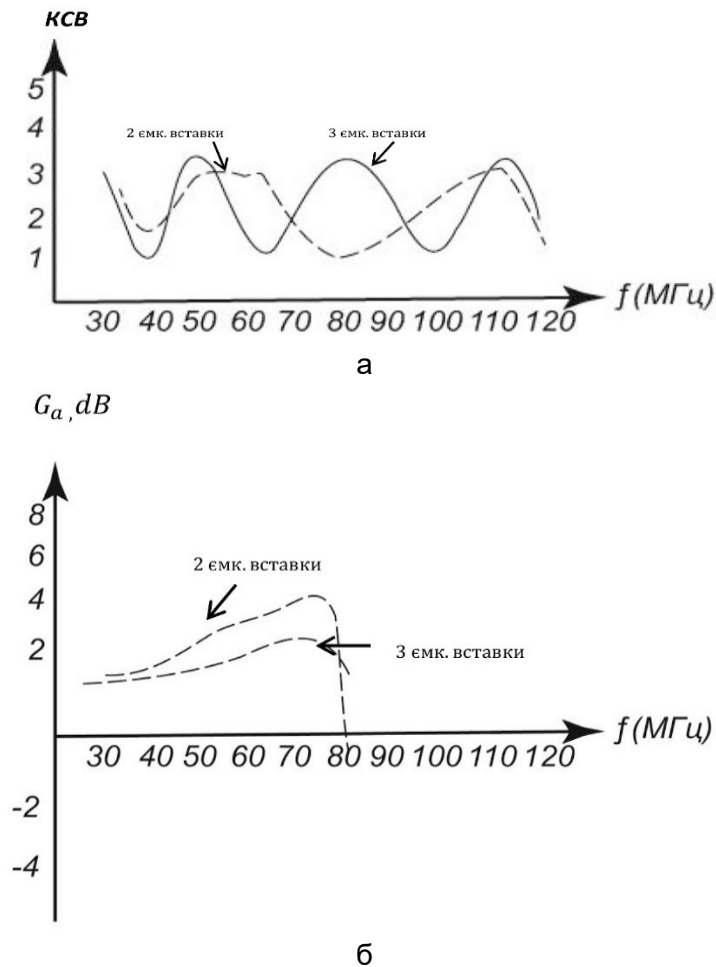


Рис. 6. Результати експериментального дослідження діапазонних властивостей електричних параметрів розроблених антенних пристроїв при установці випромінювачів на даху мобільного вузла радіозв'язку: а) коефіцієнта стоячої хвилі; б) коефіцієнта підсилення

## Висновки

1. Запропоновано новий підхід до розуміння фізичних процесів, що сприяють поліпшенню діапазонних властивостей штирьових антен з ємнісними вставками. Наводиться розв'язок задачі поширення електромагнітної енергії в однорідній двохзв'язної лінії передачі з реактивними включеннями. Її рішення дозволило встановити нові закономірності, а також по-новому підійти до розрахунку вібраторних антен з ємнісними вставками. Рішення проведено з використанням апарату теорії лінії передачі і дозволило виявити наявність критичної частоти (довжини хвилі) і дисперсії електромагнітних хвиль в двохзв'язних лініях передачі з включеннями.

2. Проведені дослідження діапазонних властивостей антен з ємнісними вставками дозволили встановити три крайніх випадку розподілу в них струму: експоненціальне, синусоїдальне і лінійне, отримати вирази для розрахунку внутрішніх і зовнішніх характеристик таких антен, виявити залежності їх електричних характеристик від геометричних розмірів і сформулювати рекомендації щодо раціонального вибору величин ємнісних ставок і місць їх включення.

3. Розроблено метод розрахунку вібраторних антен з ємнісними вставками, сутність якої полягає в раціональному використанні дисперсійних властивостей таких структур в частотній області для створення широкосмугових антен з вставками.

4. Запропоновано нові конструкції антен з ємнісними вставками, ряд з яких впроваджений у виробництво і експлуатацію при установці на спеціальних приземних об'єктах, що забезпечують їх радіозв'язок з мобільними комплексами радіозв'язку нового покоління спеціального призначення. Результати випробувань таких антен показали, що їх коефіцієнт посилення на частотах, близьких до критичної, в два та більше разів перевищує коефіцієнт посилення четверть

хвильового випромінювача і, отже, коефіцієнт корисної дії розроблених антен також зріс. Випробування вібраторних антен з ємнісними вставками проводилися на випробувальному полігоні Запорізькому науково-дослідному інституті радіозв'язку.

### Література

1. Маттей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1972. Т.2. 496с.
2. Овсяников В.В. Вибраторные антенны с реактивными нагрузками. М.: Радио и связь, 1985. 120с.
3. Левин Б.М., Яковлев А.Д. Антенна с нагрузками как импедансный вибратор с применимым импедансом. *Радиотехника и электроника*. Москва, 1985. Вып. 1. С. 25-33.
4. Сайко В.Г., Артемьев В.А., Ильинов М.Д., Федяев В.Е. Вибраторные антенны с реактивными включениями. *Зарубежная радиоэлектроника*. Москва, 1991. №11. С.105-108.
5. Сайко В.Г., Артемьев А.В., Федяев В.Е. Состояние и перспективы развития вибраторных антенн с реактивными вставками. *Изв. вузов Радиоэлектроника*. Киев, 1993. № 5. С. 17-28.
6. Сайко В.Г. Аналитический обзор состояния развития штыревых антенн с реактивными вставками. *Зв'язок*. Киев, 1996. № 2. С.42-36.
7. Сайко В.Г. Расчет параметров вибраторной антенны с емкостными вставками. *Изв. вузов Радиоэлектроника*. Киев, 1991. № 1. С. 17-22.
8. Сайко В.Г. Методика расчета вибраторной антенны с емкостными вставками. *Изв. вузов Радиоэлектроника*. Киев, 1992. № 7. С. 19-25.
9. Сайко В.Г., Мазор С.Ю. Методика расчета проволочных антенн с реактивными вставками. *Научно-методический сборник*. Киев, НИЦ при КВВИУС. 1991. №2. С. 14-21.
10. Сайко В.Г., Мазор С.Ю. Диапазонные свойства штыревых антенн с реактивными вставками. *Научно-методический сборник*. Киев, НИЦ при КВВИУС. 1991. №2. С. 5-13.
11. Сайко В.Г. Широкополосные УКВ антенны с включениями для подвижных объектов. *Техника средств связи. сер. ТРС*. Воронеж, 1990. Вып.7. С. 146-150.
12. Сайко В.Г. Низькопрофільні антени для мереж мобільного зв'язку. *Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті*: Матеріали докладів 6-ї наукової конференції, м. Київ, ДУТ, 05-06 листопада 2009. Київ. 2009. с. С.263.
13. Сайко В.Г., Ильинов М.Д. Широкополосные малогабаритные антенны УКВ диапазона. *Зарубежная радиоэлектроника*. Москва, 1990. № 2. С. 54-60.
14. Сайко В.Г., Ильинов М.Д. Современное состояние исследований малогабаритных антенн. *Зарубежная радиоэлектроника*. Москва, 1990. № 5. С. 82-87.

### References

1. Matvey G.L., Yang L., Jones E.M.T. Filters SVCh, soglashuyushchie tsepi i tsepi svyazi. M.: Svyaz', 1972. T. 2. 496s.
2. Ovsyanikov V.V. Vibratornye anteny s reaktivnymi nagruzkami. M.: Radio i svyaz', 1985. 120s.
3. Levin B.M., Yakovlev A.D. Antenna s nagruzkami kak impedansnyy vibrator s primenimym impedansom. *Radiotekhnika i elektronika*. Moskva, 1985. Vyp. 1. S. 25-33.
4. Sayko V.G., Artemyev V.A., Ilyinov M.D., Fedayev V.E. Vibratornye anteny s reaktivnymi vklucheniymi. *Zarubezhnaya radioelektronika*. Moskva, 1991. №11. S.105-108.
5. Sayko V.G., Artemyev A.V., Fedayev V.E. Sostoyanie i perspektivy razvitiya vibratornykh anten s reaktivnymi vstavkami. *Izv. vuzov Radioelektronika*. Kiev, 1993. № 5. S. 17-28.
6. Sayko V.G. Analiticheskiy obzor sostoyaniya razvitiya shtyrevykh anten s reaktivnymi vstavkami. *Zv'yazok*. Kiev, 1996. № 2. S.42-36.
7. Sayko V.G. Raschet parametrov vibratornoy anteny s emkostnymi vstavkami. *Izv. vuzov Radioelektronika*. Kiev, 1991. № 1. S. 17-22.
8. Sayko V.G. Metodika rascheta vibratornoy anteny s emkostnymi vstavkami. *Izv. vuzov Radioelektronika*. Kiev, 1992. № 7. S. 19-25.
9. Sayko V.G., Mazor S.Yu. Metodika rascheta provolochnykh anten s reaktivnymi vstavkami. *Nauchno-metodicheskiy sbornik*. Kiev, NITS pri KVVIUS. 1991. №2. S. 14-21.
10. Sayko V.G., Mazor S.Yu. Diapazonnye svoystva shtyrevykh anten s reaktivnymi vstavkami. *Nauchno-metodicheskiy sbornik*. Kiev, NITS pri KVVIUS. 1991. №2. S. 5-13.
11. Sayko V.G. Shirokopolosnye UKV anteny s vklucheniymi dlya podvizhnykh ob"ektov. *Tekhnika sredstv svyazi. ser. TRS*. Voronezh, 1990. Vyp.7. S. 146-150.
12. Sayko V.G. Nizkoprofilni anteni dlya merezh mobilnogo zv'yazku. *Suchasni tendentsii rozvitku tekhnologii v infokomunikatsiyakh ta osviti*: Materiali dokladiv 6-i naukovoi konferentsii, m. Kiiv, DUT, 05-06 listopada 2009. Kiiv. 2009. S.263
13. Sayko V.G., Ilyinov M.D. Shirokopolosnye malogabaritnye anteny UKV diapazona. *Zarubezhnaya radioelektronika*. Moskva, 1990. № 2. S. 54-60.
14. Sayko V.G., Ilyinov M.D. Sovremennoe sostoyanie issledovaniy malogabaritnykh anten. *Zarubezhnaya radioelektronika*. Moskva, 1990. № 5. S. 82-87.