

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ КОМПОНУВАННЯ ТА ПОХИБОК ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ШИРОКОСМУГОВОЇ РУПОРНОЇ АНТЕНИ НА ЇЇ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

У статті подано результати дослідження основних варіантів компонування двогребеневої рупорної антени, які відрізняються способами кріплення елементів: болтове з'єднання (заклепки) та паяння (зварювання). Проаналізовано вплив неточностей виготовлення окремих елементів антени (похибки геометричних розмірів хвилеводу і розкриву рупора, похибки розміщення провідника живлення, відмінності діелектричної проникності ізолювального матеріалу від розрахованої тощо) і в їх з'єднанні між собою (ширина щілин між пластинами розкриву рупора, відстань між гребенями в точці збудження) на основні характеристики антени (коефіцієнт стоячої хвилі за напругою, коефіцієнт підсилення, діаграма спрямованості). Дослідження проводилися з використанням програмних середовищ автоматизованого проектування, моделювання та оптимізації тривимірних електромагнітних систем ANTENNA MAGUS та CST STUDIO SUITE. Встановлено, що в разі однакової точності виготовлення елементів широкосмугової рупорної антени розглянуті варіанти компонування забезпечують близькі за значенням технічні характеристики. Дослідження похибок виготовлення елементів антени та їх з'єднання між собою показали, що найбільший вплив на характеристики антени мають поздовжні розміри хвилеводу, відстань між гребенями в точці збудження, місце розміщення та діаметр провідника живлення, а також діелектричні характеристики ізолювального матеріалу. Встановлено, що зміна окремих розмірів антени на 10% може призводити до суттєвого погіршення її узгодженості. Обґрунтовано систему допусків на розміри та з'єднання елементів антени, дотримання яких забезпечить відповідність характеристик виготовленого зразка отриманим у процесі моделювання та оптимізації з використанням спеціалізованих програмних засобів.

Ключові слова: двогребенева рупорна антена; широкосмуговість; моделювання; компонування; похибки; хвилевід; характеристика; параметр; допуск.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасними тенденціями розвитку радіотехнічних та телекомунікаційних засобів є розширення діапазону робочих частот та застосування широкосмугових радіосигналів із складними видами модуляції. Для приймання та передавання таких сигналів необхідно використовувати широкосмугові антени з високим коефіцієнтом перекриття за частотою та доброю узгодженістю з лінією живлення. У діапазоні сантиметрових хвиль це можуть бути рупорні антени зі складною формою поперечного перерізу [1]. У літературі запропоновано низку методик розрахунку конструктивних розмірів та параметрів таких видів антен, а також результатів їх оптимізації з використанням спеціалізованого програмного забезпечення CST STUDIO SUITE, ALTAIR FEKO, ANSOFT HFSS тощо [1–10]. Типові конструкції рупорних антен зі складною формою поперечного перерізу застосовуються в діапазоні від 0,6 ГГц до 30 ГГц та забезпечують коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН) менше 2.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [2–6] запропоновано різні конструкції ширококутових рупорних антен зі складною формою поперечного перерізу з робочим діапазоном від 0,6 ГГц до 30 ГГц, які відрізняються типом системи живлення, наявністю та матеріалом бокових стінок розкриву. Для покращення характеристик антен доцільно в розкритті рупора застосувати лінзу спеціальної форми [7–8]. У [10] подано результати дослідження двогребеневої рупорної антени, виготовленої з використанням сучасних технологій тривимірного друку та струмопровідної фарби. Однак у наявних у відкритому доступі роботах мало уваги приділяється дослідженню впливу конструктивних рішень компонування та похибок виготовлення елементів ширококутової рупорної антени на її технічні характеристики.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є дослідження впливу різних схем компонування ширококутових рупорних антен, похибок у розмірах елементів та неточностей їх з'єднання між собою на технічні характеристики антен.

Нехай розглядається конструкція рупорної антени зі складною формою поперечного перерізу, яка має два гребені та металеві бокові стінки. Така антена є ширококутовою, має лінійну поляризацію, низький рівень бічних та задньої пелюсток, високий коефіцієнт корисної дії, порівняно малий вплив сторонніх предметів (елементи кріплення, блоки з апаратурою тощо) на її технічні характеристики. На відміну від конструкцій без бокових стінок або з металевими стержнями, антена з металевими боковими стінками має значно кращий коефіцієнт підсилення (КП) в нижній частині робочого діапазону [6].

Конструктивні розміри двогребеневої рупорної антени були розраховані для частотного діапазону 2–15 ГГц відповідно до відомих методик [1–7]. Профілі гребенів отримані на основі кривої Безье третього порядку [3]. Завданням дослідження було створення програмних моделей антени, побудованих за різними схемами компонування, та визначення впливу схем компонування, похибок виготовлення і з'єднання елементів антени на її технічні характеристики.

Виклад основного матеріалу. Дослідження програмних моделей антени реалізовано з використанням пакета програм CST STUDIO SUITE, який є набором інструментів для проектування, моделювання та оптимізації тривимірних електромагнітних систем і використовується передовими технологічними й інжиніринговими компаніями провідних держав світу [11].

Проведені дослідження склалися з таких етапів:

розробки базової програмної моделі двогребеневої рупорної антени, задання її конструктивних розмірів та визначення основних характеристик;

створення програмної моделі двогребеневої рупорної антени, виконаної з окремих елементів із використанням технології спаювання (зварювання), та визначення її основних параметрів і характеристик;

створення програмної моделі двогребеневої рупорної антени, виготовленої з окремих елементів із використанням технології болтового (заклепкового) з'єднання, та визначення її основних параметрів і характеристик;

дослідження зміни основних параметрів та характеристик антени з урахуванням похибок у розмірах елементів і неточностей їх з'єднання між собою.

Для створення і параметризації базової програмної моделі двогребеневої рупорної антени сантиметрового діапазону хвиль використано спеціалізоване програмне забезпечення автоматизованого проектування антен ANTENNA MAGUS, що дозволяє створювати стандартну параметризовану тривимірну (3D) модель антени відповідно до заданих її технічних характеристик [12]. Процес формування базової програмної моделі включає:

задання специфікації антени відповідно до її параметрів, основними з яких є діапазон робочих частот 2–15 ГГц та коефіцієнт підсилення 12 дБ;

вибір конструкції двогребеневої рупорної антени з металевими боковими стінками;

розрахунок розмірів 3D моделі антени;

попереднє оцінювання параметрів та характеристик отриманої моделі;

експорт 3D моделі антени в спеціалізований файл програми CST MICROWAVE STUDIO.

Зовнішній вигляд та конструктивні розміри отриманої базової моделі зображено на рис. 1, а її основні технічні характеристики – на рис. 2.

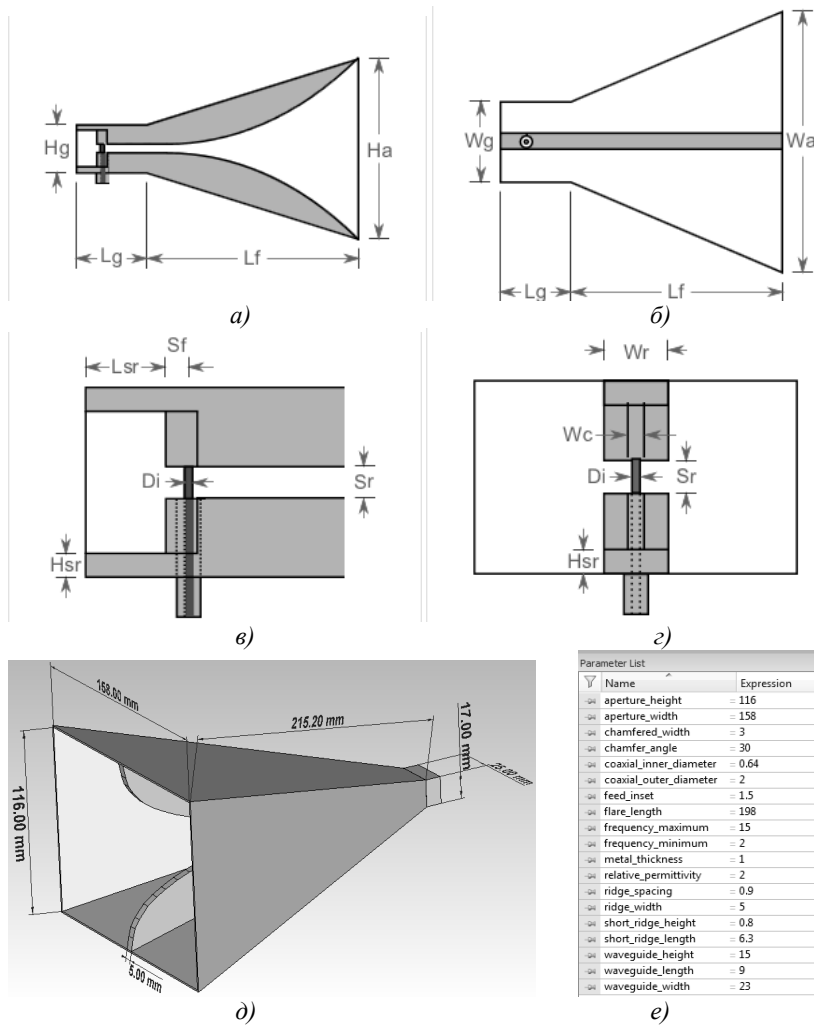


Рис. 1. Конструктивні розміри та програмна модель двогребеневої рупорної антени:
 а) загальний вигляд збоку; б) загальний вигляд зверху; в) вигляд схеми живлення збоку;
 г) вигляд схеми живлення ззаду; д) вигляд програмної моделі CST MICROWAVE STUDIO;
 е) параметри програмної моделі

На рис. 1 застосовано такі позначення конструктивних розмірів: H_g – висота хвилеводу; W_g – ширина хвилеводу; L_g – довжина хвилеводу; H_a – висота розкриву; W_a – ширина розкриву; L_a – довжина рупора; S_r – відстань між гребенями; W_r – ширина гребенів; H_{sr} – висота короткої ділянки гребеня; L_{sr} – довжина короткої ділянки гребеня; W_r – ширина фаски гребеня; D_i – діаметр провідника живлення; S_f – відстань від центра провідника живлення до кінця гребеня.

Схема живлення антени зображена на рис. 1в, г. Провідник живлення входить посередині широкої стінки хвилеводу, проходить через один із гребенів та з'єднується з іншим гребенем. Нижній гребінь ізолюваний від провідника живлення діелектриком, що має діелектричну проникність ϵ .

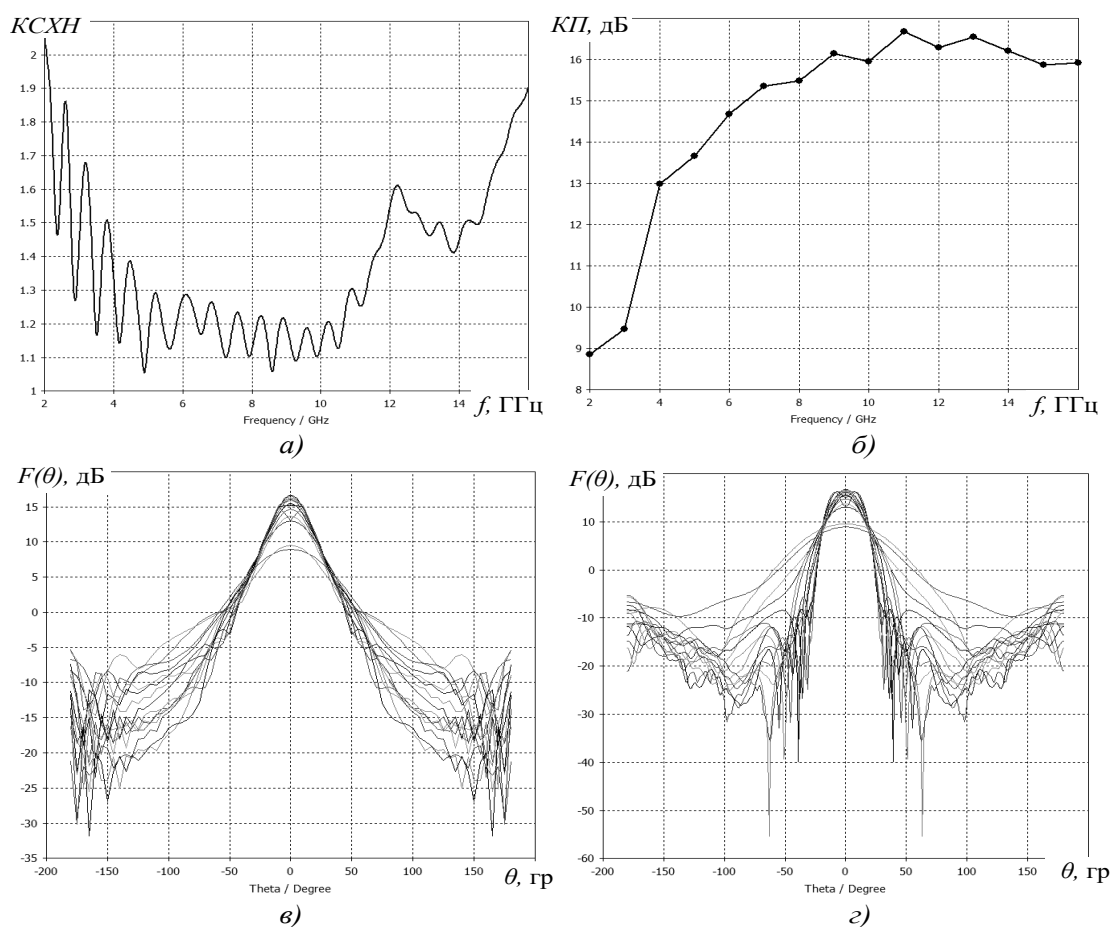


Рис. 2. Характеристики двогребеневої рупорної антени:
 а) КСХН; б) КП; в) ДС у площині E; г) ДС в площині H

Аналіз характеристик базової моделі двогребеневої рупорної антени (рис. 2) показує відповідність їх відомим результатам [1–9], що підтверджує достовірність проведених розрахунків та адекватність розробленої програмної моделі.

У рамках першого завдання досліджень проаналізовано два можливі варіанти компоновання елементів антени, які відрізняються між собою способом з'єднання кутів елементів розкриву. Перший варіант передбачає з'єднання поверхней, що утворюють розкриття, за допомогою припою (зварювання), другий – з'єднання механічним способом (використанням болтових кріплень або заклепок). Для вказаних варіантів компоновань створено програмні моделі, зовнішній вигляд яких зображено на рис. 3–4.

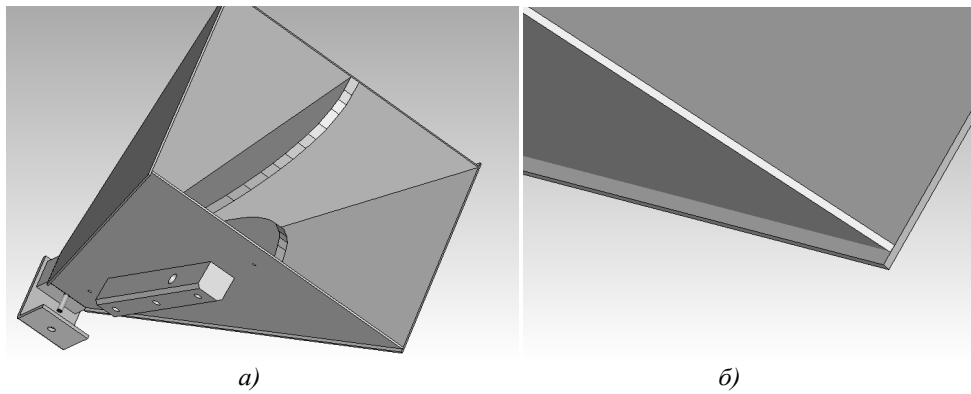


Рис. 3. Програмна модель антени за схемою компоунвання з використанням технології спаювання: а) загальний вигляд; б) з'єднання нижньої та бокової пластин розкриву

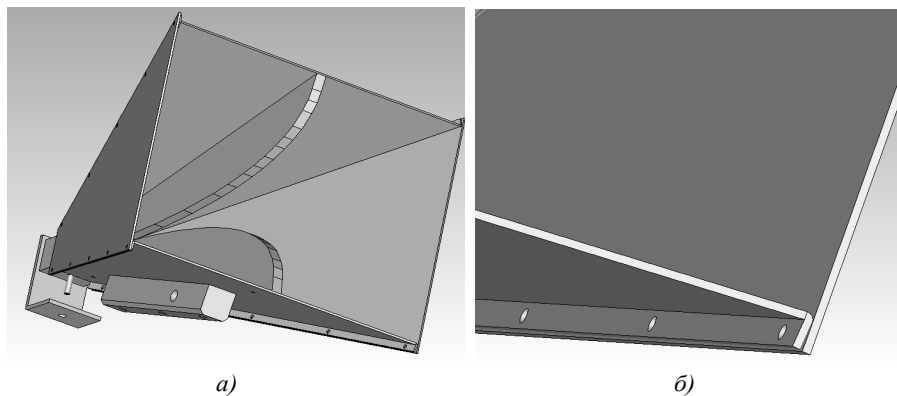


Рис. 4. Програмна модель антени за схемою компоунвання з використанням технології болтового з'єднання: а) загальний вигляд; б) з'єднання нижньої та бокової пластин

Програмні моделі антени мають можливість автоматичного масштабування в разі зміни розмірів рупора, а до їх конструктивних розмірів додано низку параметрів, які належать до елементів вказаних конструктивних рішень. За результатами досліджень розроблених моделей отримано залежності КСХН, КП, ширини діаграми спрямованості (ШДС) у площині E та H від частоти (рис. 5). Для порівняння на рис. 5 також зображено вказані характеристики для базової моделі антени.

Із рис. 5 видно, що розглянуті варіанти компоунвання забезпечують близькі за значенням технічні характеристики. Так, КСХН змінюється в діапазоні $\pm 0,01$, а КП у діапазоні $\pm 0,04$ дБ. Можна зробити висновок, що за однакової точності виготовлення елементів ширококутної рупорної антени досліджені схеми компоунвання забезпечують близькі за значенням технічні характеристики.

У ході дослідження впливу неточностей у виготовленні елементів антени та їх з'єднанні між собою вносилися похибки в такі конструктивні розміри та параметри програмної моделі:

- геометричні розміри хвилеводу і розкриву рупора;
- положення провідника живлення та відстань між гребенями в точці збудження;
- діаметр провідника живлення;
- діелектричну проникність ізолювального матеріалу;
- ширину щілин між пластинами розкриву рупора.

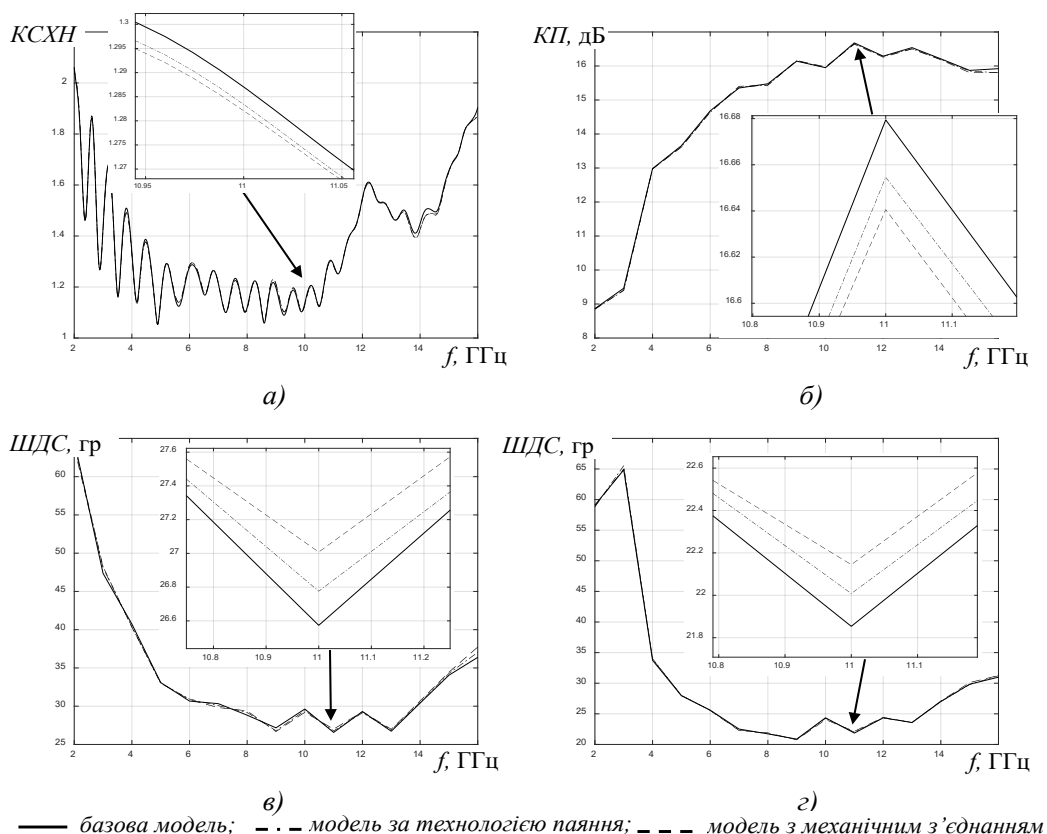


Рис. 5. Характеристики антени, отримані для різних схем компонування:
 а) КСХН; б) КП; в) ШДС в площині Е; з) ШДС в площині Н

Оскільки наявність вказаних похибок у виготовленні антени має найбільший вплив на її характеристики узгодженості, то в ході дослідження проаналізовано лише зміну КСХН у діапазоні робочих частот.

Для дослідження впливу похибок у геометричних розмірах хвилеводу на характеристики антени змінювалися ширина W_g (похибка ± 2 мм), висота H_g (похибка ± 2 мм) та довжина L_g (похибка ± 3 мм) хвилеводу і визначалися залежності КСХН від частоти. Отримані графіки зображено на рис. 6.

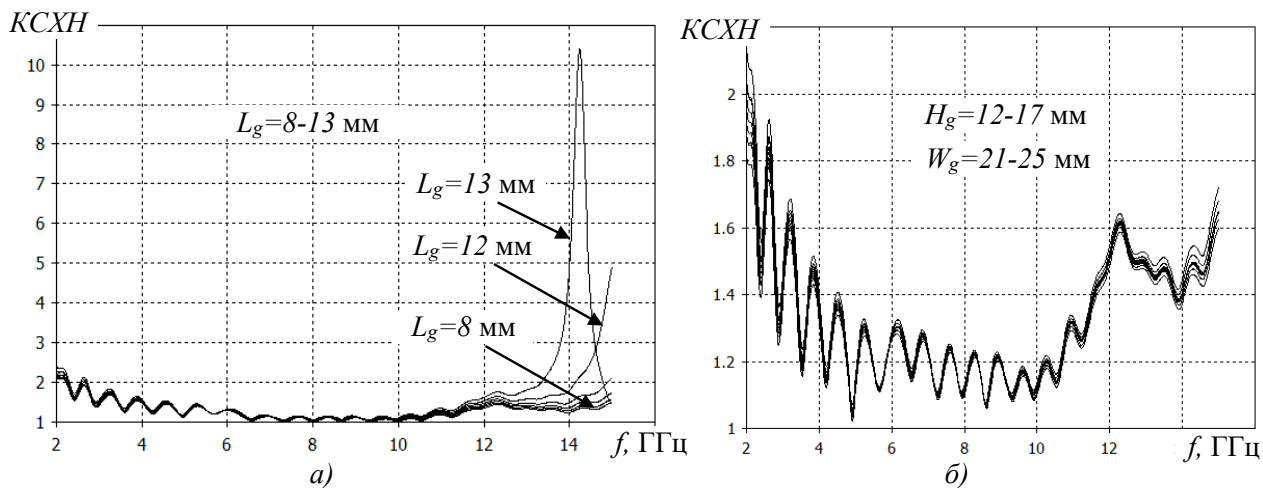


Рис. 6. Залежності КСХН від частоти: а) для різних довжин хвилеводу; б) для різних висоти та ширини хвилеводу

З рис. 6б випливає, що збільшення чи зменшення поперечних розмірів хвилеводу на 2 мм (8–13%) не призводить до суттєвої зміни КСХН, тому отримані графічні залежності практично зливаються в одну. Зміна ж поздовжніх розмірів (рис. 6а) негативно впливає на узгодженість антени, особливо на частотах вище 13 ГГц, де КСХН підвищується більш ніж у 6 разів.

Для дослідження впливу похибок у системі збудження рупора на характеристики антени змінювалися:

відстань від провідника збудження до кінця хвилеводу S_f (похибка $\pm 0,2$ мм);

відстань між гребенями в точці збудження S_r (похибка $\pm 0,1$ мм);

діаметр провідника збудження D_i (похибка $\pm 0,1$ мм);

діелектрична проникність ізолювального матеріалу ε (похибка $\pm 0,8$).

Отримані залежності КСХН від частоти для різних значень параметрів S_f та S_r наведено на рис. 7.

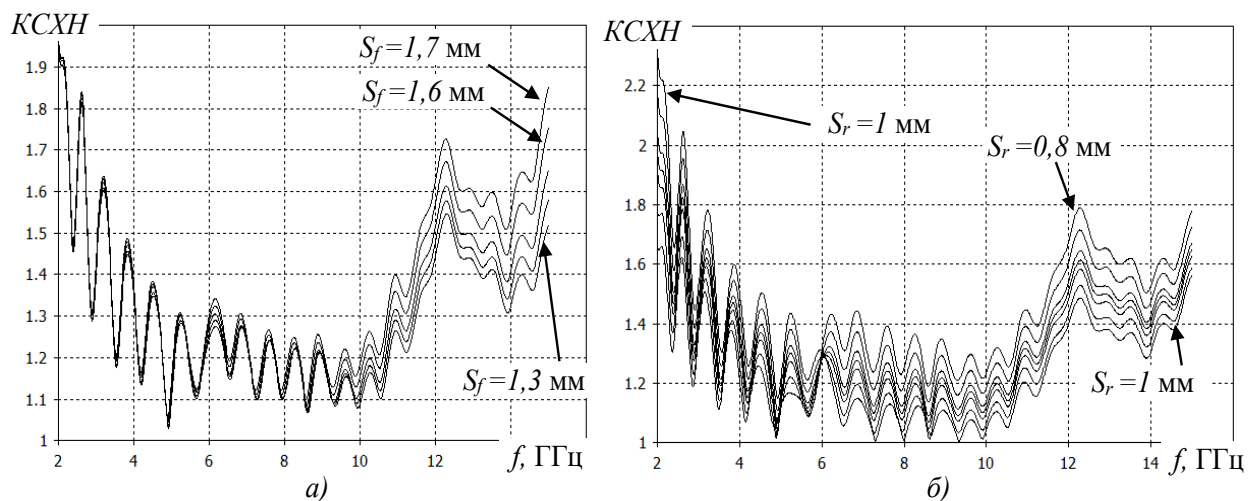


Рис. 7. Залежності КСХН від частоти:

а) для відстані до центра провідника збудження;

б) для відстані між гребенями в точці збудження

З рис. 7 випливає, що похибки у виготовленні елементів системи збудження призводять до зміни КСХН рупорної антени. Величина вказаних змін КСХН знаходиться в межах 20% та залежить від робочої частоти. Так, збільшення розміру S_r на 0,1 мм (9%) зменшує КСХН на 10% для частот вище 6 ГГц та підвищує його до 15% для частот нижче 6 ГГц. Тому для забезпечення розрахункових параметрів рупорної антени під час виготовлення її елементів живлення допуски на розміри мають бути мінімальними (менше 0,1 мм).

Вплив похибок значень діелектричної проникності ізолювального матеріалу та діаметра провідника збудження на максимальне $КСХН_{max}$ та середнє $КСХН_{mean}$ значення у робочій смузі антени зображено на рис. 8.

На рис. 8а видно, що зміна діелектричної проникності з 2 до 3 призводить до підвищення максимального значення КСХН на 23%, а зміна діаметра центрального провідника на 0,1 мм – до підвищення максимального значення КСХН на 21%.

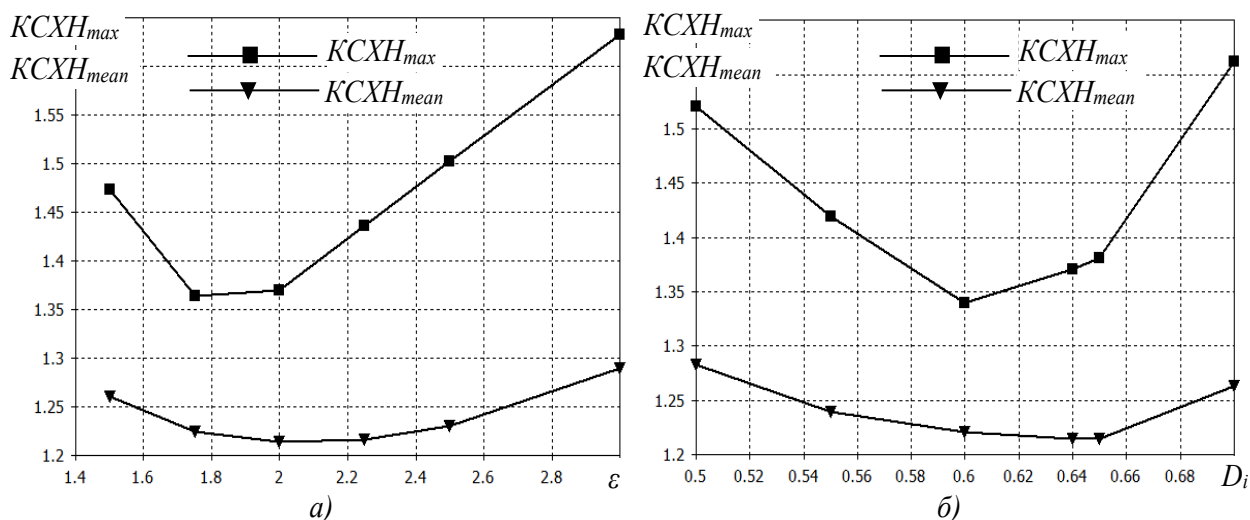


Рис. 8. Залежності максимального та середнього КСХН від частоти:
 а) для діелектричної проникності ізолювального матеріалу;
 б) для діаметра провідника збудження

На рис. 9 зображено залежності КСХН від ширини щілин w_s , що можуть виникати в місцях кріплення металевих поверхонь, які утворюють розкритт рупора. Ширина щілин w_s змінювалася від 0 до 0,4 мм із кроком 0,1 мм.

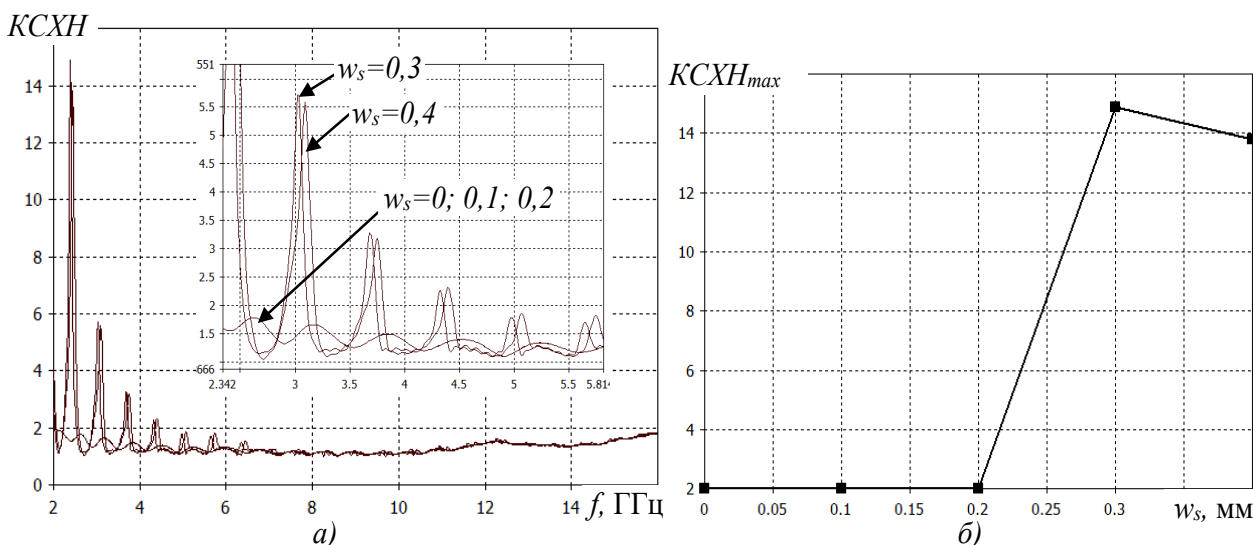


Рис. 9. Залежності:
 а) КСХН від частоти для різних значень w_s ;
 б) максимального КСХН у смузі 2–15 ГГц від w_s

З рис. 9 видно, що в разі ширини щілин від 0,3 мм у розкритті рупора виникають резонансні явища і КСХН підвищується більше ніж в 7 разів (до 15), особливо це характерно для частот нижче 6 ГГц.

Якщо щілини між поверхнями рупора заповнити припоєм, наприклад, оловом, як це показано на рис. 10, то резонансні явища зникають, а значення КСХН практично не змінюється (рис. 11).

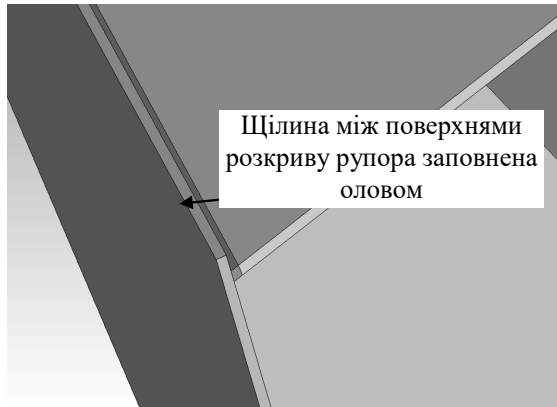


Рис. 10. Зовнішній вигляд щілини заповненої оловом

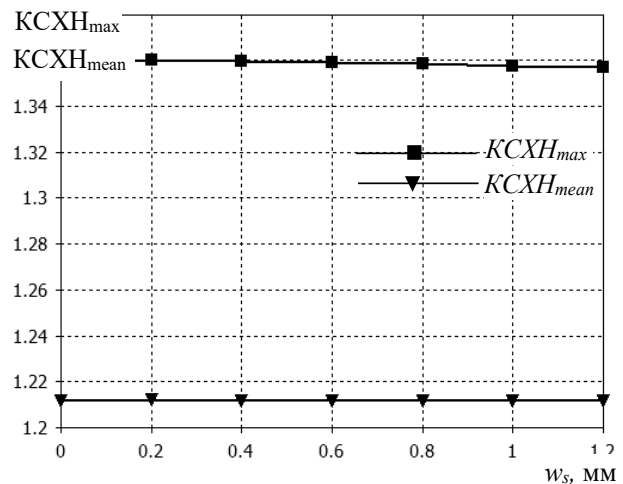


Рис. 11. Залежності середнього та максимального КСХН у смузі робочих частот від ширини щілини, заповненої оловом

Дослідження впливу похибок висоти та ширини розкриву рупора на КСХН показали, що похибки в межах 10% не призводять до його критичного зростання, а максимальне значення КСХН змінюється не більше ніж на 0,17, що відповідає, згідно з виразами (1) та (2), втратам менше ніж 2% енергії сигналу або зниженню коефіцієнта підсилення менше ніж на 0,08 дБ [12]:

$$PL(\%) = \left(\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right)^2 \cdot 100; \quad (1)$$

$$ML = -10 \log \left(1 - \left(\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right)^2 \right), \quad (2)$$

де $VSWR$ – КСХН;

PL (%) – втрати потужності сигналу у відсотках;

ML – втрати потужності сигналу в децибелах.

Враховуючи отримані результати, можна зробити висновок, що для забезпечення заданих параметрів та характеристик антени під час її виготовлення необхідно дотримуватися встановлених розмірів, а допуски не повинні перевищувати таких показників:

- розміри розкриву рупора – 5 мм (5%);
- ширина, довжина та висота хвилеводу живлення – 1 мм (6%);
- відстань розміщення провідника збудження – 0,1 мм (6%);
- відстань між гребенями – 0,1 мм (9%);
- діаметр провідника збудження – 0,05 мм (7%);
- діелектрична проникність ізолювального матеріалу – 0,2 (10%);
- ширина щілини між поверхнями рупора – 0,3 мм.

Висновки. У разі однакової точності виготовлення елементів широкопasmової рупорної антени розглянуті варіанти компоновання забезпечують близькі за значенням

технічні характеристики. Дослідження похибок виготовлення елементів антени показали, що найбільший вплив на її характеристики мають поздовжні розміри хвилеводу, відстань між гребенями, місце розміщення та діаметр провідника живлення, діелектричні характеристики ізолювального матеріалу. Так, збільшення зміщення провідника живлення вздовж широкої стінки хвилеводу на 0,5 мм та похибка встановлення гребенів 0,2 мм призводять до збільшення КСХН на 30%. Ширина щілин між поверхнями розкриття рупора до 0,3 мм суттєво не впливає на його КСХН, однак у разі більшого її значення виникають резонансні явища, а максимальне значення КСХН перевищує 14, середнє ж значення КП падає. Якщо вказані щілини заповнити металом, наприклад, оловом, то резонансні частоти зникають, а значення КСХН практично не змінюється. Обґрунтовано систему допусків на розміри основних елементів двогребеневої рупорної антени, дотримання яких забезпечить відповідність характеристик виготовленої антени отриманим у процесі моделювання та оптимізації з використанням спеціалізованих програмних засобів. Подальші роботи в даному напрямку доцільно спрямувати на дослідження впливу конструкцій систем живлення рупорної антени та способів кріплення гребенів усередині хвилеводу на технічні характеристики антени.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Манойлов В. П., Павлюк В. В., Ставісюк Р. Л. Ширококуглові рупорні антени зі складною формою поперечного перерізу : монографія. Житомир, 2016. 212 с.
2. Jacobs D., Odendaal J. W., Joubert J. An Improved Design for a 1–18 GHz Double-Ridged Guide Horn Antenna. Pretoria, 2009. 9 p.
3. Куроптев П. Д., Левяков В. В., Фатеев А. В. Широкополосная рупорная антенна диапазона 0,8–30 ГГц // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Доклады ТУСУРа. 2016. Т. 19, № 2. С. 23–27.
4. Bruns C. Analysis and Simulation of a 1–18 GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna // IEEE TRANS. ON EC. 2003. Vol. 45, №. 1. P. 55-60.
5. Galvan-Tejada G. M., Peyrot-Solis M. A., Aguiar H. J. Ultra Wideband Antennas: Design, Methodologies, and Performance. CRC Press, 2015. 295 p.
6. Azimi M. A., Arazm F., Mohassel J. R. Design and optimization of a new 1–18 GHz double ridged guide horn antenna // Journal of Electromagnetic Wave and Applications. 2007. Vol. 21, № 4. P. 501–506.
7. Jarvis D. A., Rao T. C. Design of double-ridged rectangular wave guide of arbitrary aspect ratio and ridge height. Microw. Antenna Propagat // IEE Proc. 2000. Vol. 147. P. 31–34.
8. Ultra wideband double ridged horn with rectangular aperture / F. F. Dubrovka, G. A. Yena, P. Y. Stepanenko, V. M. Tereschenko // International Conference on Antenna Theory and Techniques. Seuastopol, 2003. P. 590–593.
9. Дубровка Ф. Ф., Сушко О. Ю. Ультраширококугвова рупорна антена діапазону частот 1–20 ГГц з низьким рівнем бічного випромінювання // Вісник Нац. техн. ун-ту України “КПІ”. Серія – Радиотехніка. Радиоапаратобудування. Київ, 2010. № 41. С. 68–73.
10. Additive manufacturing of a dual-ridged horn antenna / B. Majumdar, D. Baer, S. Chakraborty and other // Progress in electromagnetics research letters. Sydney, 2016. Vol. 9. P. 109–114.
11. CST STUDIO SUITE Electromagnetic and Multiphysics Simulation Software. URL: <https://www.cst.com/products/csts2> (last accessed: 21.11.2019).

12. Antenna Magus. The leading antenna design tool. URL: www.antennamagus.com (last accessed: 21.11.2019).

Подано 30.12.2019

А. А. Нагорнюк, Ю. А. Колос

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ КОМПОНОВКИ И ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШИРОКОПОЛОСНОЙ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ НА ЕЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В статье представлены результаты исследования основных вариантов компоновки рупорной антенны с двумя гребнями, которые отличаются способами крепления элементов: болтовое соединение (заклепки) и пайка (сварка). Проанализировано влияние неточностей изготовления отдельных элементов антенны (погрешности геометрических размеров волновода и апертуры рупора, погрешности размещения проводника питания, различия диэлектрической проницаемости изолирующего материала от рассчитанной и другие) и в их соединении между собой (ширина щелей между пластинами апертуры рупора, расстояние между гребнями в точке возбуждения) на основные характеристики антенны (коэффициент стоячей волны по напряжению, коэффициент усиления, диаграмма направленности). Исследования проводились с использованием программных сред автоматизированного проектирования, моделирования и оптимизации трехмерных электромагнитных систем ANTENNA MAGUS и CST STUDIO SUITE. Установлено, что при одинаковой точности изготовления составляющих элементов широкополосной рупорной антенны рассмотренные варианты компоновки обеспечивают близкие по значению технические характеристики. Исследование погрешностей изготовления элементов антенны и их соединения между собой показали, что наибольшее влияние на характеристики антенны имеют продольные размеры волновода, расстояние между гребнями в точке возбуждения, место размещения и диаметр проводника питания, а также диэлектрические характеристики изолирующего материала. Установлено, что изменение отдельных размеров антенны на 10% может приводить к существенному ухудшению ее согласованности. Обоснована система допусков на размеры и соединения элементов антенны, соблюдение которых обеспечит соответствие характеристик изготовленного образца полученным в процессе моделирования и оптимизации с использованием специализированных программных средств.

Ключевые слова: рупорная антенна; широкополосность; моделирование; компоновка; погрешности; волновод; характеристика; параметр; допуск.

О. А. Nahorniuk, Y. O. Kolos

INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE ARRANGEMENT DECISIONS AND MANUFACTURING ERRORS OF ELEMENTS OF THE WIDEBAND HORN ANTENNA ON ITS TECHNICAL CHARACTERISTICS

The results of the research of the main releases of arrangement of horn antenna with two ridges, which differ in the ways of fixing the elements: bolt connection (rivets) and soldering (welding), are presented in the article. The influence of inaccuracies in the manufacture of particular antenna elements (errors in the geometric dimensions of the waveguide and the horn aperture, errors in the location of the feed pin, differences in the relative permittivity of the

insulating material from the calculated one and others) and their interconnections (the width of the slots between the horn aperture plates, the distance between the ridges at the feeding point) on the main antenna characteristics (voltage standing-wave ratio, gain, radiation pattern). The researches were carried out using software environments for computer-aided designing, modeling and optimizing three-dimensional electromagnetic systems ANTENNA MAGUS and CST STUDIO SUITE. It has been found that with the same accuracy of manufacturing the constituent elements of a wideband horn antenna, the considered releases of arrangement provide similar technical characteristics. The research of manufacturing errors of the antenna elements and their interconnections showed that the longitudinal waveguide dimensions, the distance between the ridges at the point of excitation, the location and diameter of the feed pin, and also the dielectric characteristics of the insulating material have the greatest influence on the characteristics of the antenna. It has been established that a change in particular antenna sizes by 10% can lead to a significant deterioration in its matching.

The system of tolerances for the sizes and connections of antenna elements, the adherence of which will ensure the conformity of the characteristics of the manufactured example to those obtained in the process of modeling and optimization using specialized software, is justified.

Keywords: *horn antenna; wideband; modeling; arrangement; inaccuracies; waveguide; characteristic; parameter; tolerance.*