

І.Н.Прудіус, д.т.н., проф.; Є.І.Яковенко, к.т.н., доц.; В.Д.Голинський, к.т.н., доц. – НУ „Львівська політехніка”, Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗБУДЖУВАЧІВ НА ВЛАСНІ ЧАСТОТИ ТА СТРУКТУРИ ПОЛЯ РІЗНИХ МОД У ЦИЛІНДРИЧНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРНИХ ВИПРОМІНЮВАЧАХ

Numerical simulations influence feed structures on Eigenmode and field patterns for lower modes of cylindrical dielectric resonance radiator are presented.

Вступ. Впровадження об'ємних діелектричних резонаторів (ОДР) у схеми НВЧ фільтрів та резонансних підсилювачів дозволило підвищити їх селективність, а у випадку автогенераторів – збільшити стабільність частоти та покращити енергетичні характеристики [1-3]. Раніше вважали, що ці застосування ОДР є основними і піддавали сумніву можливість використання ОДР для випромінювання електромагнітних хвиль через високу концентрацію поля в об'ємі ОДР і відповідно малі поля розсіяння. Однак останні дані вказали на перспективність побудови антен на основі ОДР за умови, що їх діелектрична проникність є помірною ($\epsilon \leq 40$) [4]. Застосування ОДР в якості випромінювачів дозволило вирішити такі проблеми антенної техніки, як мікромініатюризація та зменшення втрат у сантиметровому та міліметровому діапазонах хвиль. За останнім параметром випромінювачі на ОДР мають перевагу перед друкованими антенами, особливо на вищих частотах вказаних діапазонів.

Один зі шляхів побудови малогабаритних адаптивних антенних решіток полягає у застосуванні діелектричних резонаторних випромінювачів (ДРВ) з діаграмою спрямованості, близькою до ізотропної, що працюють у достатньо широкій смузі частот. Вирішення цієї проблеми є неможливим без визначення частот власних коливань ОДР для різних типів коливань (мод), а також відповідних їм структур поля, що було зроблено у роботах [1-4]. Однак при цьому розглядалися частоти власних коливань та їх структури для резонаторів у вільному просторі, або у півпросторі над металеву плоскою поверхнею. Оскільки збуджувач ДРВ знаходиться у ближньому полі випромінювача, то його впливом як на частоти власних коливань, так і їх структури поля не можна нехтувати. Тому предметом дослідження у даній роботі і було визначення величини такого впливу.

Умови моделювання та його результати. При конструктивному виконанні ДРВ найчастіше використовують прості геометричні форми: циліндр, призму, сферу (рис.1). Однак з метою надання специфічних властивостей резонаторам, наприклад, для розрідження спектру власних коливань можуть використовуватися і складніші форми резонаторів: хрестоподібні, Т-подібні, кільцеві, сегментні та інші [1].

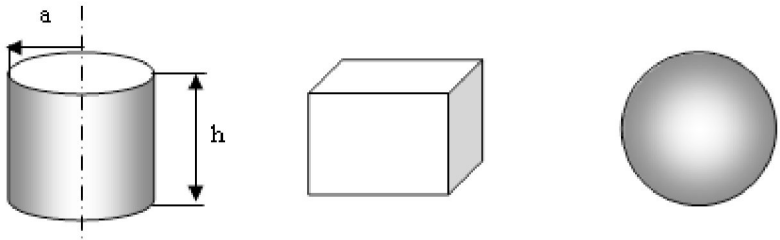


Рис.1. Поширені форми діелектричних резонаторних випромінювачів

За даними [2,3] тільки у випадку сферичних резонаторів задачу аналізу ДРВ можна звести до характеристичного рівняння, з якого визначаються частоти власних коливань для різних мод. Для резонаторів циліндричної та призматичної форми неможливо побудувати неперервні однохвильові визначення поля у зовнішньому просторі, що задовольняють умовам випромінювання. Наявність куткових ділянок у резонаторах з невизначеним розподілом поля спотворює структуру полів для різних мод і є джерелом похибок визначення їх резонансних частот та відповідних добротностей резонаторів. Тому для визначення частот власних коливань циліндричних резонаторів крім наближених аналітичних методів широко використовуються і числові методи.

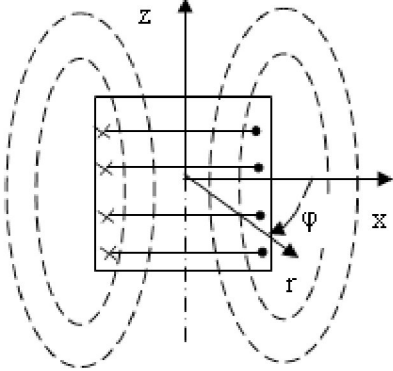


Рис.2. Структура поля для резонансу $H_{01\delta}$

Результати досліджень, необхідні для подальшого аналізу, наведені в [4]. У циліндричних резонаторах найнижчі частоти власних коливань мають коливання типів $H_{01\delta}$, $HE_{11\delta}$, $HE_{12\delta}$ та $E_{01\delta}$, де індекси визначають число варіацій поля (півхвиль) по координатах φ , r та z . Третій індекс $\delta < 1$ відображає той факт, що в ДРВ висота резонатора h є коротшою від половини довжини хвилі. Для ілюстрації на рис.2 подана структура поля, що відповідає резонансу $H_{01\delta}$, де штриховими лініями показані лінії напруженості магнітного поля, а суцільними – лінії напруженості електричного поля (вони є кільцевими

та ортогональними до площини рис.2).

Співвідношення між частотами власних коливань залежить не тільки від типу коливань, але і від відношення розмірів резонатора $K = a/h$ (рис.1). Від цього параметра залежить також і рознесення резонансних частот різних мод. Для підтвердження цього на рис.3,4 подані нормовані частоти власних коливань, одержані методом моментів для діелектричних резонаторів у

вільному просторі і розраховані за апроксимуючими виразами з похибкою не більше 2% [4]. Розрахунки нормованих частот наближеними аналітичними методами, виконані для діелектричних резонаторів з $\epsilon=38$ для коливань H_{018} та E_{018} [1], дали близькі значення до наведених на рис.3.

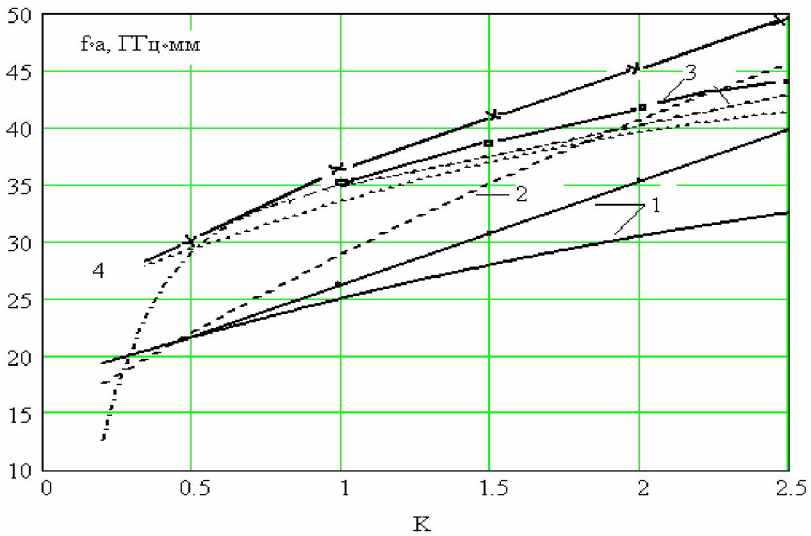


Рис.3. Нормовані частоти власних коливань та резонансів циліндричного резонатора з $\epsilon=38$ для різних мод: 1 – H_{018} , 2- HE_{118} , 3 - HE_{128} , 4 – E_{018}

Для чисельного моделювання власних частот та структур поля різних мод у діелектричних циліндричних резонаторних випромінювачах була використана програма для моделювання характеристик електродинамічних структур за методом FDTD, який відноситься до універсальних числових методів, придатних для розв'язування широкого класу електродинамічних задач. Зона моделювання являла собою паралелепіпед, в якому знаходилися досліджуваній циліндричний резонатор та елементи його збудження. З усіх боків від випромінювача, крім нижнього, де був розташований збуджувач, знаходився шар повітря, товщиною 0,15 довжини хвилі на найнижчій частоті досліджуваного діапазону. Тестові випробування програми показали, що при збільшенні зазорів між резонатором та границями зони моделювання результати моделювання не змінюються, а лише зростає час моделювання.

На всіх поверхнях зони, крім нижньої, були встановлені граничні умови, що відповідали магнітній стінці. Нижня поверхня була провідною, з виконаними на ній елементами збуджувача. Просторова дискретизація зони моделювання здійснювалася генератором комірок, що дозволяло відтворювати досліджувану структуру з мінімальною похибкою дискретизації. Розмір комірки відповідав критерію Найквіста, за яким

максимальний розмір комірки не повинен перевищувати половину довжини хвилі у середовищі з максимальним значенням ϵ . У даному випадку відносний розмір комірки складав 0,05 від довжини хвилі у діелектрику резонатора, що за оцінками, наведеними у [6], для середовищ з малими втратами давало похибку моделювання за рахунок дискретизації простору не більше 0,41%. Були досліджені впливи трьох найбільш поширених типів збуджувачів (рис.5) на власні частоти та структури поля різних мод в ОДР.

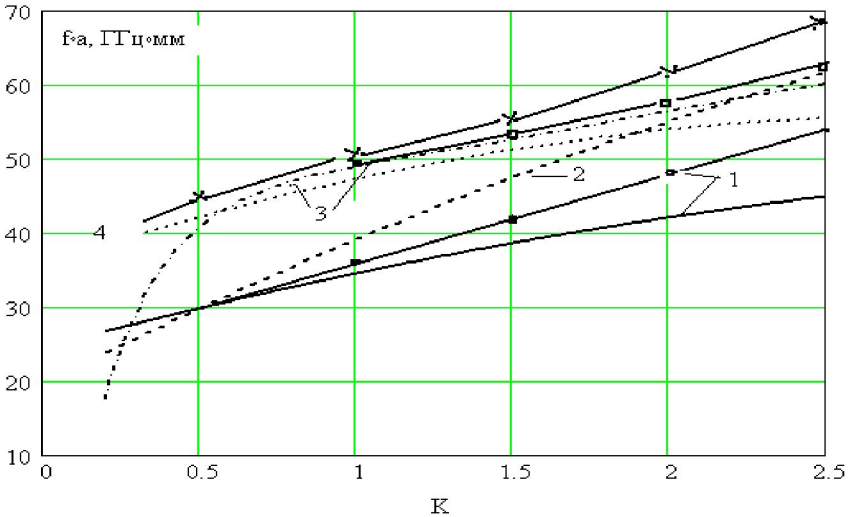


Рис.4. Нормовані частоти власних коливань та резонансів циліндричного резонатора з $\epsilon=19$ для різних мод: 1 - $H_{01\delta}$, 2 - $HE_{11\delta}$, 3 - $HE_{12\delta}$, 4 - $E_{01\delta}$

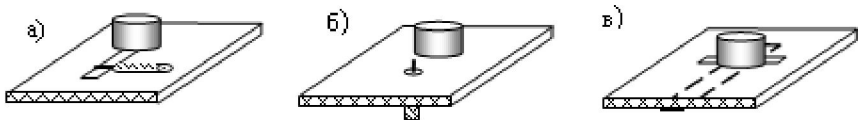


Рис.5. Коаксіально-щілинний а), коаксіально-штировий б) та смужково-щілинний в) збуджувачі ОДР

Всі збуджувачі виконані на матеріалі ФАФ-4 з двостороннім фольгуванням, з діелектричною проникністю $\epsilon=2,5$ і товщиною 1,5 мм. Поздовжні розміри щілин вибиралися з умови резонансу на найнижчій частоті власних коливань ОДР. Поперечні розміри коаксіальної та смужкової лінії відповідали хвильовому опорі 50 Ом. Місце під'єднання центрального провідника коаксіала до краю щілини (рис.5,а) вибрано з умови узгодження. Висота штиря та його віддалення від поверхні резонатора складали 0,1 довжини хвилі на найнижчій частоті власних коливань ОДР (рис.5,б).

На першому етапі дослідження проведено тестування програми на предмет співпадіння даних моделювання з даними [4] для власних частот різних мод ОДР у вільному просторі, яке виявило відсутність розбіжностей. На наступному етапі виконано моделювання власних частот та структур поля для різних мод ОДР, встановлених на металізованій поверхні плати з зазором 0,5 мм.

Результати моделювання для чотирьох мод з найнижчими частотами власних коливань ОДР у вільному просторі та їх резонансних частот з врахуванням впливу металізованої поверхні плати подані на рис.3,4 відповідно немаркованими та маркованими лініями. Спільною рисою впливу металізованої поверхні плати на характеристики ДРВ було підвищення їх резонансних частот порівняно з частотами власних коливань ОДР. Однак цей вплив був різним для різних мод. Так, для гібридних мод HE_{118} та HE_{128} підвищення резонансних частот виявилось значно меншим, ніж для мод магнітного та електричного типу з осью симетрії: H_{018} та E_{018} . Для моди HE_{118} резонансні частоти практично співпали з частотами власних коливань (рис.3,4 -2). Для моди HE_{128} спостерігалось зростання резонансної частоти на 4,5% при $K = 2,5$. У той же час як для мод H_{018} та E_{018} воно складало відповідно 19% та 22%. (рис.3). Для ОДР з діелектричною проникністю $\epsilon=19$ підвищення резонансної частоти для вказаних мод складало відповідно 5,4%, 21% та 23,6% (рис.4), тобто виявилось дещо вищим, ніж у попередньому випадку, через меншу концентрацію поля в ОДР і відповідно вищий вплив металізованої поверхні.

Загальну тенденцію підвищення резонансних частот H_{018} , HE_{128} та E_{018} порівняно з частотою власних коливань цих мод при зменшенні відносної висоти резонатора (збільшенні K) можна пояснити зростанням впливу металізованої поверхні плати на поле ОДР по всій його висоті, що було підтверджено моделюванням поля для цих мод.

При $K=0,5$ спостерігалось загушення спектру частот власних коливань і практичне співпадіння власних частот для мод H_{018} , HE_{118} та HE_{128} , E_{018} відповідно. У цій області вплив металізованої поверхні на спектр частот власних коливань виявився мінімальним (рис.3,4). В діапазоні змін $K=1...2,5$ відзначено не тільки помітне зростання резонансних частот, але і розрідження спектру під впливом металізованої поверхні.

Моделювання резонансних частот ДРВ для різних типів збуджувачів (рис.5) показало, що вони попадають в зону між немаркованими та маркованими лініями для відповідної моди (рис.3,4). Для коаксіально-щільникового збуджувача (рис.5,а) додатково проведено моделювання структур електричного та магнітного поля для нижчих мод (рис.6). Порівняння поданих структур з відповідними структурами поля в ОДР у вільному просторі виявили підвищену концентрацію поля в області збуджувача та деяке спотворення структур поля, особливо помітне для моди E_{011} , де спостерігалось значне зростання поперечних складових електричного поля.

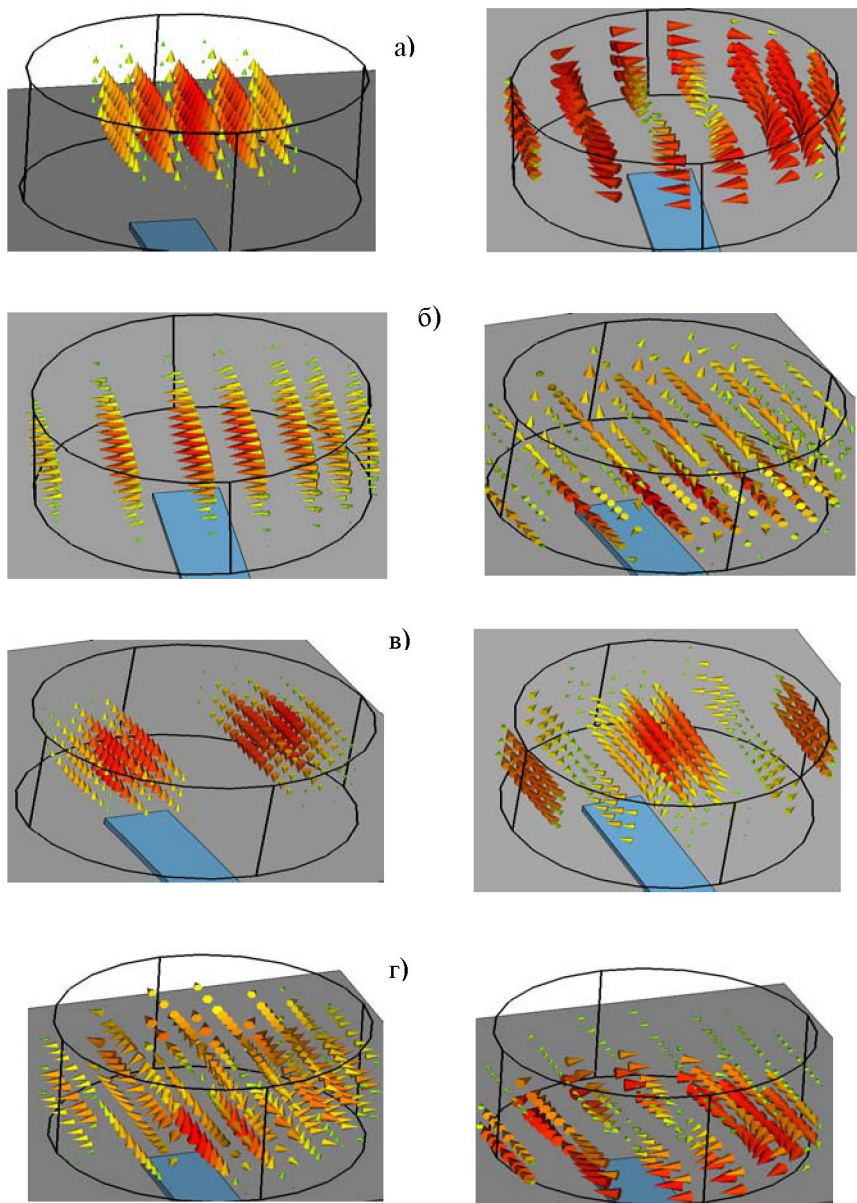


Рис.6. Структури електричного поля (ліва колонка) та магнітного поля (права колонка) для різних мод: E_{018} –а), HE_{118} – б), HE_{128} – в), E_{011} – г)

Особливістю цього типу збуджувача була практична відсутність збудження моди $H_{01\delta}$ в ОДР. При застосуванні інших збуджувачів (рис.5.б,в) ця мода була присутньою в ОДР і її структура достатньо добре співпадала з поданою на рис.2.

Складність структури поля збуджувача та наявність всіх складових як електричного, так і магнітного поля призводить до одночасного збудження різних мод в ОДР. Однак інтенсивність цих коливань є різною і залежить від конфігурації збуджувача та взаємного розташування збуджувача та резонатора.

Результати дослідження амплітудних характеристик для різних мод при симетричному розташуванні ОДР з $\varepsilon=38$ відносно збуджуючого елемента (щілини, щиття) подані в табл.1. Нормування рівня поля виконано за максимальною величиною вектора Пойтинга P для чотирьох збуджуваних мод. Індксацією відзначений на тип збуджувача: 1 – коаксіально-щілинний (рис. 5,а), 2 – коаксіально-щитровий (рис. 5,б), 3 – смужково-щілинний (рис. 5,в). Наведені дані дають уявлення про ефективність збудження різних мод в ОДР розглянутими типами збуджувачів.

Таблиця 1

Нормовані рівні поля в ДРВ для різних збуджуваних мод при $K=1$

Мода	P_1	P_2	P_3
$H_{01\delta}$	0,622*	0,291	0,355
$HE_{11\delta}$	0,987	0,951	0,432
$HE_{12\delta}$	1,00	0,386	1,00
$E_{01\delta}$	0,622	1,00	0,946
0,622* - рівень для моди E_{011}			

Висновки. Дослідження впливу збуджувачів: коаксіально-щілинного, коаксіально-щитрового та смужково-щілинного, виконаних на фольгованому діелектрику, на характеристики циліндричних ОДР виявило загальну тенденцію збільшення їх резонансних частот порівняно з частотами власних коливань нижчих мод ОДР у вільному просторі. Однак для різних мод це підвищення резонансних частот було суттєво відмінним: для гібридних мод $HE_{11\delta}$, $HE_{12\delta}$ воно не перевищувало 5,4%, а для мод з осьовою симетрією – $H_{01\delta}$, $E_{01\delta}$ – підвищення резонансних частот досягало 23,6% при малих відносних висотах ОДР ($K=a/h=2,5$). Виявлено також, що при $K=0,5$ вплив збуджувача на частоти власних коливань ОДР був незначним на всіх нижчих модах. Ця ділянка характеризувалася також згущенням спектру резонансних частот і їх співпадінням для мод $H_{01\delta}$ та $HE_{11\delta}$.

Дослідження структур поля для найнижчих мод ОДР: $H_{01\delta}$, $HE_{11\delta}$, $HE_{12\delta}$ та $E_{01\delta}$ виявило їх певні відмінності, порівняно з відповідними структурами поля в ОДР у вільному просторі, які полягали в концентрації поля в зоні збудження резонатора та зменшенні напруженості поля по висоті ОДР. Співставлення відносних рівнів поля за вектором Пойтинга для різних мод дало можливість виявити специфіку збудження ОДР різними типами збуджувачів. Одержані дані доцільно використати при розробці діелектричних резонаторних випромінювачів з заданими діаграмами

спрямованості та робочим діапазоном частот з метою створення ФАР на їх основі.

1. Ю.М.Безбородов, Т.Н.Нарытник, В.Б.Федоров. Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах. – Киев: Техника, 1989. -184 с.

2. М.Е.Ильченко, А.А.Трубин. Теория диэлектрических резонаторов. – Киев: Либідь, 1993. – 216 с.

3. М.Е.Ильченко, А.А.Трубин. Электродинамика диэлектрических резонаторов. - Киев: Наукова думка, 2004. -265 с.

4. А.А.Кішк, А.В.Гліссон, Г.Р.Джункер. Bandwidth Enhancement For Split Cylindrical Dielectric Resonator Antennas. Progress In Electromagnetics Research, PIER 33, 97-118, 2001.

5. D.Kajfez, A.Kishk. Dielectric Resonator Antenna – Possible Candidate For Adaptive Antenna Arrays. Progress In Electromagnetics Research, PIER 33, 2001.

6. Яковенко Є.І., Гоблик В.В. Оцінка точності математичної моделі розподілу електромагнітного поля зовнішніх джерел у фантомі людини. – Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Радіоелектроніка та телекомунікації, №508, 2004.

Поступила 9.02.2009р.

УДК 621.395.7

М.Й. Павликевич, к.т.н., доцент

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОПРОВІДНОЇ ЛІНІЇ З ПОПАРНИМ ЗБУДЖЕННЯМ ПРОВІДНИКІВ

Вступ. Вивчення властивостей багатопровідних передавальних ліній важливе для сучасних широкосмугових застосувань, зокрема, для технологій Ethernet та xDSL. Як апарат досліджень використовується спектральна теорія багатопровідних ліній, у якій довільний розподіл амплітуд напруг або струмів на провідниках лінії можна подати у вигляді розкладу за власними хвилями (модами), повна система яких утворює модовий спектр лінії. Однак результати цієї теорії базуються на представленні збудження провідників лінії джерелами, під'єднаними між певним провідником та екраном (землею), тоді як на практиці таке збудження найчастіше здійснюється під'єднанням джерел до вибраних пар провідників. У цій роботі здійснено аналіз для деяких прикладів багатопровідних ліній для вказаного варіанту попарного збудження провідників лінії.

Параметри провідності відрізка багатопровідної лінії в режимі попарного збудження провідників. Для розгляду цього варіанту збудження