

**Стоколос М.О., Алексєєва О.В.**

*Інститут геохімії навколишнього середовища*

## **ВИКОРИСТАННЯ НЕВЗАЄМНИХ ПАСИВНИХ ПРИСТРОЇВ У СИСТЕМАХ РАДІОАКТИВНОГО ТА ХІМІЧНОГО КОНТРОЛЮ**

*В статті обґрунтовується застосування невзаємних пасивних пристроїв у системах радіоактивного та хімічного контролю. Висунуто вимоги до феритового матеріалу невзаємних пасивних пристроїв діапазону дуже високих частот. Розглянуто приклад моделювання циркулятора на елементах із зосередженими параметрами.*

### **Вступ**

У теперішній час до систем вимірювання, контролю та моніторингу радіоактивних і хімічних забруднень, крім вимог стабільності та надійності, висувуються додаткові вимоги, такі як автономність, малогабаритність та мобільність. Якщо автономність та малогабаритність залежить від характеристик елементної бази (енергоефективність та мініатюризація), то мобільність можна реалізувати шляхом розділення вимірювального комплексу на детекторну частину, що виконує первинну обробку інформації, та центральну (серверну) частину, яка накопичує, обробляє та представляє результати в зручному вигляді. При цьому зв'язок між детекторною і серверною частинами здійснюється через бездротовий радіоканал.

Детекторна частина у своєму складі може містити різні датчики, наприклад: метеоконтролю (температура, вологість тиск, швидкість вітру і т.п.); контролю рівня та виду радіоактивного, іонізаційного випромінювання; визначення складу та рівня хімічного забруднення; координат, висоти, швидкості руху об'єкта контролю та інше. Також необхідно здійснювати керування цими датчиками зі сторони серверу, а, значить, зв'язок повинен бути повнодуплексним. Для поєднання приймача і передавача кожного детектора на одну приймально-передавальну антену і зменшення впливу один на одного застосовують невзаємні пасивні пристрої — циркулятори та вентиляі.

Розглянемо тепер принцип побудови високочастотної частини центрального серверу для обміну інформації з точками моніторингу. Так як на одній частоті кількість каналів зв'язку є обмеженою, то для підтримки необхідної та достатньої загальної кількості потрібно застосовувати ряд сусідніх частот, а відповідно — точок зв'язку, кожна з яких складається з приймача та передавача, на стороні центрального сервера. Оскільки загальна смуга частот, яку використовують точки зв'язку, може перекриватись однією антеною, то багатоантенне виконання є недоцільним. При цьому лише виникає потреба у розв'язці сигналів різних точок зв'язку серверу при роботі на одну антену, уникнення впливу передавачів на приймачі та вихідні каскади один одного. З цією метою, як було сказано вище, застосовують невзаємні пасивні пристрої. Для прикладу на рисунку 1 показано структурну схему високочастотних блоків трьох детекторів та одного центрального серверу системи контролю.

Для невзаємних пасивних феритових пристроїв властиві додаткові труднощі у реалізації на краях діапазону використання, що зумовлюються властивостями матеріалу та особливостями їх роботи. Тому необхідно старанно підходити до вибору феритового матеріалу та поля підмагнічування, яке визначає частоту феромагнітного резонансу і, відповідно, робочі характеристики приладу. Також потрібно враховувати особливості процесу їх моделювання з використанням комп'ютерних програм, наприклад, Microwave Studio (CST).

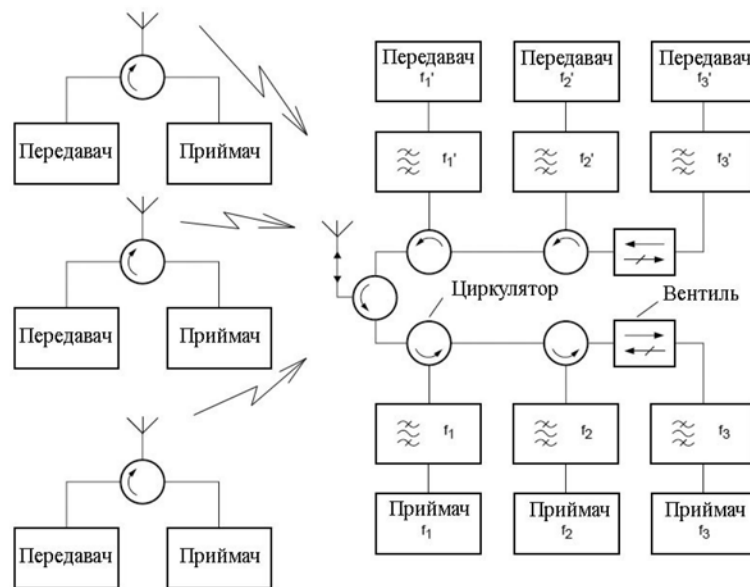


Рис. 1. Структурна схема височастотних блоків детекторів та центрального серверу

### Теоретична частина

Відомо [1], що постійним підмагнічуючим полем задається режим роботи невзаємного пасивного пристрою на елементах із зосередженими параметрами (ЕЗП) — дорезонансний або зарезонансний, для яких поле підмагнічування на робочій частоті, відповідно, менше та більше поля феромагнітного резонансу на цій частоті. Особливістю дорезонансного режиму роботи є те, що при слабких полях підмагнічування можливий випадок, коли втрати феромагнітного резонансу накладаються на втрати слабого поля. Для уникнення втрат слабого поля феритових пристроїв у діапазоні дуже високих частот (ДВЧ) в якості робочого вибирають зарезонансний режим [1]. Зарезонансний режим роботи для певної частоти характеризується тим, що зовнішнє постійне поле підмагнічування має більше значення, ніж поле, при якому відбувається феромагнітний резонанс на цій частоті, що в залежності від поля підмагнічування, форми та параметрів феромагнітного матеріалу визначається за формулою Кіттеля [2]:

$$f_0 = \gamma \mu_0 \sqrt{[H_0 + (N_x - N_z)M_s][H_0 + (N_y - N_z)M_s]}, \quad (1)$$

де  $\gamma$  — гіромагнітне відношення електрона;  $\mu_0$  — магнітна стала;  $N_x, N_y, N_z$  — розмагнічуючі фактори за осями  $x, y, z$  відповідно.

Для роботи в зарезонансному режимі необхідно, щоб ферит був насичений, тобто поле підмагнічування повинно бути більшим, ніж:

$$H_0 \geq H_a + N_z M_s, \quad (2)$$

де  $H_a$  — поле анізотропії;  $N_z$  — розмагнічуючий фактор за віссю  $z$ ;  $M_s$  — намагніченість насичення.

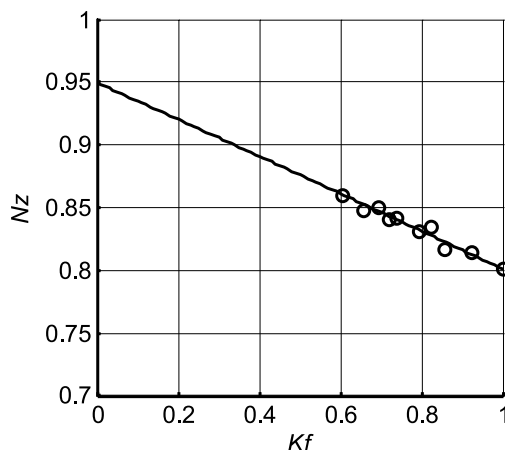
Для феритових вкладишів простої форми, що мають співрозмірні геометричні параметри, розмагнічуючі фактори можна розрахувати за відомими формулами [2, 3].

У невзаємних пасивних пристроях на елементах із зосередженими параметрами часто два феритові диски поєднуються у систему. При цьому внутрішнє поле кожного з них стає залежним як від їх власних розмагнічуючих факторів, так і від впливу, який вони здійснюють один на одного. Аналітичні вирази у такому випадку значно ускладнюються, тому для розрахунку застосовуються або чисельні методи, або експериментальні дослідження. У роботі [4] розмагнічуючий фактор системи двох феритових дисків був розрахований методом кінцевих елементів. Крім того, нами було проведено експериментальні

вимірювання та розрахунок розмагнічуючого фактору [5]. На рис. 2. суцільною лінією показуються теоретичні результати, розраховані методом кінцевих елементів, а круглими мітками позначені експериментальні точки. Коефіцієнт  $Kf$  враховує відстань між дисками і визначається за формулою:

$$Kf = Hf / (Hf + h / 2),$$

де  $Hf$  — висота феритового диска;  $h$  — відстань між дисками.



**Рис. 2.** Розмагнічуючий фактор системи двох феритових дисків

Як видно з рис.2 величини експериментального розмагнічуючого фактору за віссю системи двох феритових дисків співпадають з розрахунковими, лягаючи на одну пряму.

#### Вимоги до параметрів феромагнітного матеріалу

Для зарезонансного режиму роботи у діапазоні ДВЧ важливою умовою є насичення фериту. В той же час зменшення робочої частоти до мінімально можливої реалізується шляхом зменшення частоти феромагнітного резонансу. Визначимо, що впливає на цю мінімальну частоту. Для цього знайдемо резонансну частоту при полі насичення. Підставивши рівняння (2) в рівняння Кіттеля (1) отримуємо:

$$f_{0\min} = \gamma \mu_0 \sqrt{[H_a + N_x M_s][H_a + N_y M_s]}. \quad (3)$$

З формули (3) видно, що мінімальна частота феромагнітного резонансу визначається параметрами фериту та формою вкладиша. У випадку ідеально тонкого диску розмагнічуючі фактори  $N_x = N_y = 0$ , а, відповідно, мінімально допустима частота феромагнітного резонансу залежить лише від поля анізотропії. Якщо диск має певну товщину, а тим більше у випадку системи з двох феритових дисків, розмагнічуючі фактори  $N_x = N_y$  мають ненульове значення, тому крім поля анізотропії на мінімальну частоту феромагнітного резонансу впливає ще і намагніченість насичення  $M_s$ .

Отже, можна узагальнити певні вимоги до вибору феритового вкладиша невзаємного пасивного пристрою на ЕЗП, а саме:

1. Феритовий вкладиш повинен мати форму дуже тонкого диску, висота якого хоча б на порядок менша за його діаметр.
2. Ферит вибраної марки повинен мати якнайменші значення поля анізотропії  $H_a$ .
3. Згідно [6], для отримання максимальної широкосмуговості ферит вибраної марки повинен мати мінімально можливу ширину резонансної лінії  $\Delta H$ .

#### Моделювання та отримані результати

Особливістю високочастотних моделювань за допомогою Microwave Studio (CST) є те, що у властивостях феритового матеріалу задаються його параметри та напруженість внутрішнього підмагнічуючого поля  $H_i$ , яке вважається рівномірним. На практиці ж

відома величина напруженості лише зовнішнього поля та має місце нерівномірність його розподілу. При цьому частоту феромагнітного резонансу програма розраховує за формулою:

$$f_0 = \gamma \mu_0 H_i. \quad (4)$$

Порівнюючи (1) та (4), отримуємо формулу напруженості внутрішнього поля тонкого феритового диску, що використовується як вихідний параметр для програмного розрахунку:

$$H_i = \sqrt{[H_0 + (N_x - N_z)M_s][H_0 + (N_y - N_z)M_s]}$$

Замість такого розрахунку можна провести попереднє магнітостатичне моделювання пристрою із використанням додаткових постійних магнітів у моделі, але тоді вона ускладнюється, а це збільшує час розрахунку.

Використовуючи формули (3), (4) та враховуючи, що  $N_x = N_y = N_T$ , отримуємо формулу для мінімального внутрішнього поля феритового диску:

$$H_{i \min} = H_a + N_T M_s. \quad (5)$$

Для прикладу проведемо моделювання циркулятора на ЕЗП (рис. 3) із використанням двох феритових дисків товщиною 4 мм та діаметром 32 мм марки 30СЧ9, які мають  $M_s = 80$  кА/м,  $H_a = 6$  кА/м,  $\Delta H = 4.8$  кА/м, розмагнічуючі фактори  $N_z = 0.806$  та  $N_x = N_y = 0.097$ . З формули (5) мінімально допустиме внутрішнє поле для програми моделювання  $H_{i \min} \approx 14$  кА/м.

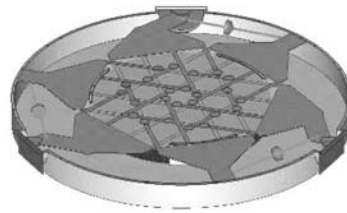


Рис. 3. Модель циркулятора на ЕЗП

Оскільки дана структура є резонансною, то моделювання потрібно здійснювати в частотній області.

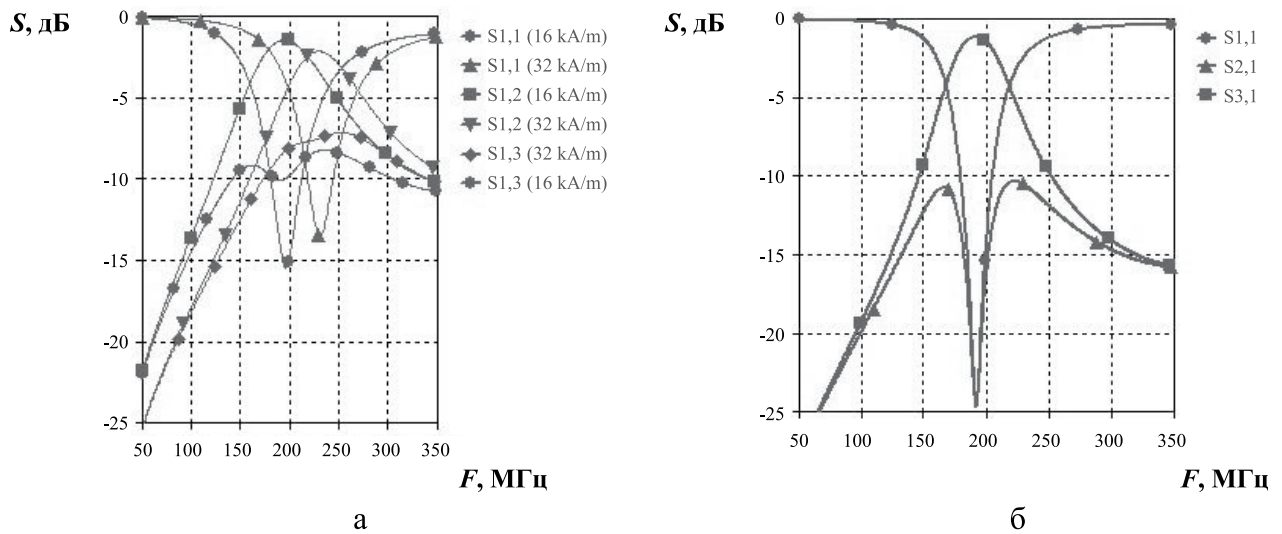


Рис.4. Результати моделювання циркулятора без узгодження (а) та з узгодженням (б)

Спочатку було проведено дослідження залежності параметрів циркулятора від поля підмагнічування. Результати моделювань при полях підмагнічування 16 та 32 кА/м показані на рис. 4а. Видно, що при зменшенні поля підмагнічування, тобто при наближенні робочої частоти до частоти феромагнітного резонансу, відбувається покращення характеристик циркулятора. Однак є межа зближення цих двох частот, оскільки при наближенні до феромагнітного резонансу збільшується величина прямих втрат циркулятора.

Подальше значне покращення величини розділення та коефіцієнта відбиття досягається за рахунок узгодження вхідного опору циркулятора із опором лінії передачі. Оскільки у наведених моделюваннях було реалізовано найпростіше узгодження за допомогою однієї паралельної ємності, яка скомпенсувала індуктивну складову вхідного опору, то для демонстрації узгодження активної складової збільшимо опір вхідної лінії передачі до 85 Ом. В результаті параметри коефіцієнта відбиття та розділення (рис. 4б) покращились. Отже, для узгодження даного циркулятора з лінією передачі, що має хвильовий опір 50 Ом, а також для розширення смуги робочих частот необхідні більш складні узгоджуючі схеми.

### **Висновки**

В системах радіоактивного та хімічно контролю при роботі з великою кількістю точок моніторингу серверна частина, використовуючи розв'язуючі не взаємні пасивні пристрої, може містити лише одну приймально-передавальну антену.

Для зменшення габаритних розмірів не взаємні пасивні пристрої можуть виконуватись на елементах із зосередженими параметрами. Виготовлення цих пристроїв вимагає старанного підбору феромагнітного матеріалу, з якого виготовляються феритові вкладиші.

При комп'ютерному моделюванні у програмі Microwave Studio (CST) необхідно або здійснювати попередній розрахунок внутрішнього поля підмагнічування, або ускладнювати модель і проводити додаткове магнітостатичне моделювання.

Результати моделювання показують наявність ефекту циркуляції. Зміна поля підмагнічування лише в невеликих межах змінює робочу частоту.

1. Вунтесмері Вол. С., Стоколос М.О. Широкопasmові не взаємні пасивні пристрої діапазону дуже високих частот // Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2008. — Вип. 37. — С. 65–70.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела: Пер. с англ. — М.: Наука, 1978. — 782 с.
3. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ: Пер. с англ. / Под ред. А.С. Галина. — М.: Радио и связь, 1981. — 200 с.
4. Helszajn J. Nonreciprocal Microwave Junctions and Circulators. — New-York: Wiley-Interscience, 1975. — 349 p.
5. Вунтесмері Вол. С., Стоколос М.О. Дослідження внутрішнього магнітного поля близько розташованих феритових вкладишів не взаємних пасивних пристроїв // Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2010. — Вип. 40 — С. 95–99.
6. Alexander I.M., Aitken F.M. Broadband VHF/UHF circulators with tailored filter characteristics // IEEE Transactions on Magnetics. — September 1975. — Vol. Mag-11, №. 5. — P.1267–1269.

### **Стоколос М.А., Алексеева О.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕВЗАИМНЫХ ПАССИВНЫХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ РАДИОАКТИВНОГО И ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

*В статье дается обоснование применения не взаимных пассивных устройств в системах радиоактивного и химического контроля. Выдвинуты требования к ферритовому материалу не взаимных пассивных устройств диапазона очень высоких частот. Рассмотрен пример моделирования циркулятора на элементах с сосредоточенными параметрами.*

### **Stokolos M.O., Alekseeva O.V. USING OF NON-RECIPROCAL PASSIVE DEVICES IN THE RADIOACTIVE AND CHEMICAL CONTROL SYSTEMS**

*The article gives explanation of the use of non-reciprocal passive devices in radioactive and chemical control systems. Standards of the ferrite material for interconnected passive devices of high-frequency range are presented. An example of simulation of a circulator based on elements with lumped parameters has been presented.*