

УДК 621.385.6:681.5

В. І. Водотовка, д. т. н., проф.;

А. С. Моставлюк, асп.

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ РОЗСІЯНОГО НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ: ІНВАРІАНТНИЙ СЕНСОР ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІД МІКРОХВИЛЬОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Пропонуються методи досягнення інваріантності відносно факторів впливу на точність інформаційно-вимірювального перетворення потужності надвисокочастотного електромагнітного поля для автоматичного контролю та вимірювання рівня випромінювання від мікрохвильового технологічного обладнання.

Вступ

В процесі тривалої експлуатації потужних мікрохвильових промислових печей різного технологічного призначення систематично трапляються порушення радіогерметичності робочих камер. Це зумовлено механічним зносом ущільнювачів технологічних отворів та з'єднувального кріплення елементів конструкції. Щоб запобігти опроміненню, що загрожує здоров'ю персоналу, необхідно постійно контролювати витік енергії через потенційно можливі нещільності.

Враховуючи, що кількість контрольних точок складає кілька десятків (залежно від потужності надвисокочастотних (НВЧ) генераторів), необхідно вирішити складну задачу побудови та функціонування автоматичної інформаційно-контролюючої системи, яка об'єднує відповідну кількість точних, метрологічно надійних та відносно дешевих сенсорів потужності НВЧ. Щоб визначити діапазон вимірювання, нескладно підрахувати, що на частоті 2450 МГц, ефективній площі розкриття антени 100 см² та нормі опромінювання людини 10 мкВт/см², верхня межа вимірюваної потужності не перевищує 1 мВт. Беручи до уваги наведені вихідні дані, зупинимось у своєму виборі на детекторному квадратичному первинному перетворювачеві за умови зменшення притаманних йому похибок.

Детекторні вимірювачі низького рівня НВЧ потужності мають ряд важливих переваг: швидкодію, багатофункціональність, чутливість, малі габарити. Але при цьому точність детекторного перетворювача є низькою, похибка складає $\pm(15...18)\%$ [1, 2].

Методи досягнення зростаючих рівнів інваріантності детекторного сенсора потужності надвисокочастотного електромагнітного поля

Метрологічній надійності, тобто здатності вимірювального засобу зберігати встановлені атестацією межі невизначеності вимірюваної фізичної величини протягом встановленого часу, відповідає здатність вимірювального засобу бути інваріантним щодо факторів, які зменшують його метрологічну надійність.

Беремо до вживання поняття «рівень інваріантності», який означає ту кількість факторів зовнішнього впливу та внутрішніх параметрів вимірювального засобу, які не зменшують метрологічну надійність. Звичайно, високий рівень інваріантності досягається складними структурними, схематичними, технологічними та конструкторськими засобами.

Розглянемо методи досягнення зростаючих рівнів інваріантності НВЧ мікроватметра, в структурі якого є квадратичний НВЧ детектор.

Метод інваріантного перетворення з використанням зворотного зв'язку (ЗЗ)

Ідея методу ЗЗ міститься в тому, що функціональні перетворювачі, нестабільні параметри яких необхідно виключити з результату перетворення, охоплюють петлею ЗЗ.

Розглянемо ВАХ квадратичного НВЧ детектора (рис. 1). Відмітимо дві важливі особливості: 1) вихідною величиною квадратичного НВЧ детектора слід вважати прямий струм детектора,

2) прямим струмом детектора можна керувати за допомогою джерела струму зворотного зміщення (рис. 2), фіксуючи робочу точку *A* на її квадратичній ділянці.

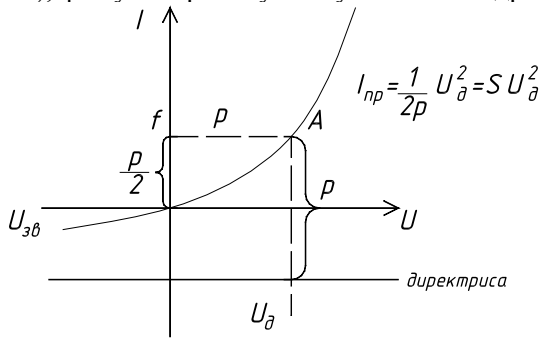


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) квадратичного НВЧ детектора: *p* — фокальний параметр параболи (ексцентриситет); $S = 1/2p$ — коефіцієнт передачі детектора; *F* — фокус параболи

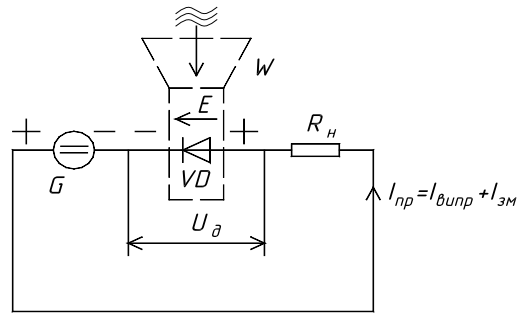


Рис. 2. Схема з'єднання НВЧ діода з джерелом струму зміщення: *G* — джерело струму зміщення; *W* — антено-хвильоводна детекторна секція; *VD* — квадратичний НВЧ детектор; $I_{\text{випр}}$ — випрямлений струм; $I_{\text{зм}}$ — струм зворотного зміщення; R_n — опір навантаження діода

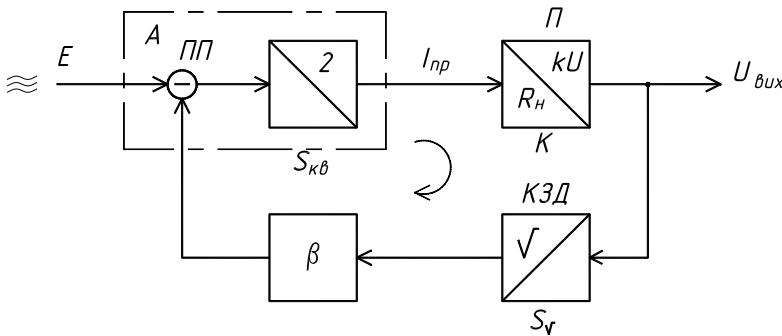


Рис. 3. Структурна схема детекторного інваріантного вимірювача потужності НВЧ випромінювання: *A* — НВЧ діод як функціональний перетворювач (квадратор); *ПП* — пристрій порівняння; *П* — підсилювач напруги; *КЗД* — коренездобувний перетворювач виходу, тобто в напрямку, вказаному стрілкою, отримуємо рівняння інформаційно-вимірювального перетворення

$$\left(S_{\text{КВ}} |E|^2 - S_{\text{КВ}} \beta S_{\text{r}} (\sqrt{U_{\text{вих}}})^2 \right) R_n K = U_{\text{вих}}, \quad (1)$$

де $|E|$ — модуль напруженості електромагнітного поля (ЕМП); $S_{\text{КВ}}$ — коефіцієнт чутливості квадратичного детектора по струму; S_{r} — коефіцієнт чутливості *КЗД*; *K* — коефіцієнт підсилення підсилювача *П*; $U_{\text{вих}}$ — вихідна напруга підсилювача *П*.

Розв'язуючи рівняння (1) відносно значення $U_{\text{вих}}$, отримуємо

$$U_{\text{вих}} = \frac{S_{\text{КВ}} R_n K}{1 + S_{\text{КВ}} \beta S_{\text{r}} R_n K} |E|^2. \quad (2)$$

Вважаючи, що $S_{\text{КВ}} \beta S_{\text{r}} R_n K \gg 1$, скорочуємо значення $S_{\text{КВ}}$, R_n , *K* в чисельнику та знаменнику дробу в (2). Рівняння набуває вигляду

$$U_{\text{вих}} = \frac{1}{\beta S_{\text{r}}} |E|^2 = S_{\text{заг}} (1 \pm \gamma) |E|^2. \quad (3)$$

де $S_{\text{заг}}$ — загальний коефіцієнт чутливості діодного НВЧ мікровольтметра; γ — відносна мульти-

плікативна похибка вимірювання величини $|E|^2$.

Вимірювана НВЧ потужність $P_{\text{НВЧ}}$ визначається відомою залежністю

$$P_{\text{НВЧ}} = \frac{|E|^2 ab}{480\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}, \quad (4)$$

де a, b — сторони прямокутного хвилеводу; λ_0 — довжина хвилі ЕМП у вільному просторі.

На частоті f_0 , яка відповідає λ_0 , всі величини в (4) постійні, тому маємо, що в діапазоні частот

$$|E|^2 = S_1 (1 \pm \gamma_f) P_{\text{СВЧ}}, \quad (5)$$

де γ_f — відносна частотна похибка.

Вираз (3) перетворюється

$$U_{\text{вих}} = S_{\text{заг}} S_1 (1 \pm \gamma) (1 \pm \gamma_f) P_{\text{НВЧ}} = S(1 \pm \gamma) (1 \pm \gamma_f) P_{\text{НВЧ}}. \quad (6)$$

Таким чином, функція інформаційно-вимірювального перетворення набула інваріантності відносно значень $S_{\text{КВ}}, K, R_H$, а похибка перетворення визначається тільки похибкою коренездобувного перетворювача $S_{\sqrt{}}$, не більше $\pm 2,5\%$, оскільки малою похибкою величини β (декілька десятих часток відсотка), а також частотною похибкою детекторної секції γ_f можна знехтувати.

Метод структурного симетрування

Розглянутий метод ВЗЗ дозволяє усунути нестабільність коефіцієнта чутливості квадратичного детектора як головного чинника похибок НВЧ детекторного вимірювального перетворювача ціною зменшення загальної чутливості вимірювача. Тому метод ВЗЗ ще не досить досконалий.

Пропонується метод, який за характерним виглядом структури вимірювального перетворювача (рис. 4), одержав назву «метод структурного симетрування».

Функція вимірювального перетворення вихідного сигналу $U_{\text{вих}}$ в допоміжний сигнал y дає можливість визначити коефіцієнт перетворення кола ЗЗ, що охоплює коренездобувний перетворювач

$$\frac{y}{U_{\text{вих}}} = \frac{S_{\sqrt{}}}{1 + S_{2\text{КВ}} K_2 S_{\sqrt{}}} = \frac{1}{S_{2\text{КВ}} K_2}, \quad S_{2\text{КВ}} K_2 S_{\sqrt{}} \gg 1. \quad (7)$$

За методом структурного перетворення одержуємо загальну функцію $U_{\text{вих}} = f(E^2)$,

$$U_{\text{вих}} = \frac{S_{1\text{КВ}} K_1}{1 + \frac{S_{1\text{КВ}} K_1}{S_{2\text{КВ}} K_2}} |E|^2 = S_{2\text{КВ}} K_2 |E|^2, \quad \frac{1}{S_{1\text{КВ}} \cdot K_1} \rightarrow 0. \quad (8)$$

Оскільки $|E|^2 \cong P_{\text{НВЧ}}$, то $U_{\text{вих}} = S |E|^2$, де S — загальний коефіцієнт перетворення, $S = K_{\text{ХВ}} S_{2\text{КВ}} K_2$, $K_{\text{ХВ}}$ — постійна хвилеводу [2]. Оскільки $P_{\text{НВЧ}} \cong |E|^2$, то $U_{\text{вих}} = S |E|^2$, де $S = K_{\text{ХВ}} S_{2\text{КВ}} K_2$, де $K_{\text{ХВ}} = \frac{|E|^2}{P_{\text{НВЧ}}} = \frac{480\pi}{ab \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{2a}\right)^2}}$.

Порівнявши між собою (3) і (8), робимо висновок про важливі переваги метода структурного симетрування. По-перше, присутність в (8) коефіцієнта підсилення K_2 вказує на підсилення пере-

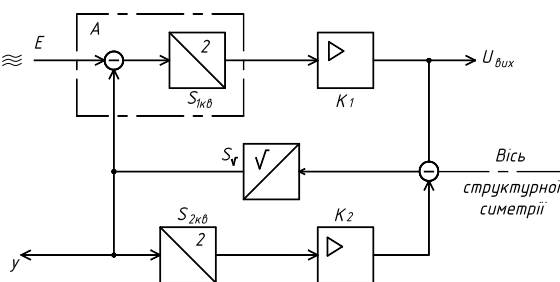


Рис. 4. Структурна схема поліінваріантного детекторного чутливого НВЧ сенсора за методом структурного симетрування

твореного сигналу, тобто на підвищення чутливості перетворювача. По-друге, операція квадратування сигналів рівня декількох вольт виконується точніше, ніж коренездобування взагалі, методична похибка зменшується як показують розрахунки, до $\pm(1...1,5) \%$, а відношення сигнал/шум зростає до 40 дБ.

Структура системного сенсора та автоматичної просторово-розподіленої вимірювальної системи

Поняття «сенсор» щодо інформаційно-вимірювальної системи є більш широким, ніж щодо саме чутливого елемента чи первинного перетворювача, яким є квадратичний НВЧ детектор. Сенсором саме в цій сфері його застосування вважатимемо вимірювальний перетворювач щільності потоку НВЧ потужності (рис. 5).

Системний сенсор обладнано стандартною рупорною антеною W та системним АЦП, який сумісний за інтерфейсом з ПЕОМ IBM PC. До того ж, вихідний сигнал квадратора KB (рис. 5) підсилюється підсилювачем ПМДМ за типом «модулятор-демодулятор», який, як відомо, має надзвичайно стабільний коефіцієнт підсилення, а функція порівняння сигналів виконується операційним диференціальним підсилювачем (ОДП). Кожен з сенсорів S_i з'єднується з ПЕОМ двосторонньою лінією зв'язку (ДЛЗ).

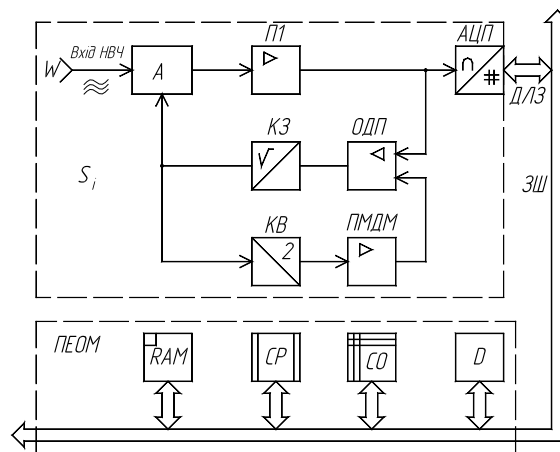


Рис. 5. Структура одного з інформаційно-вимірювальних та побудова системи контролю ЕМП НВЧ: W — рупорна антена; A — детекторна секція; $П1$ — підсилювач; $ОДП$ — операційний диференціальний підсилювач; $ПМДМ$ — підсилювач за типом «модулятор-демодулятор»; $КЗ$ — коренездобувач; $КВ$ — квадратор; $ДЛЗ$ — двостороння лінія цифрового зв'язку з загальною шиною (ЗП) ПЕОМ

Висновки

Пропонуються технічні рішення побудови інформаційно-вимірювальної системи для автоматичного моніторингу розсіяного ЕМП НВЧ поблизу технологічного обладнання мікрохвильових технологічних процесів. Сенсор щільності потоку НВЧ потужності побудовано за методом, що названий методом структурного симетрування. Він забезпечує інваріантність щодо багатьох факторів, які спричиняють похибки квадратичного НВЧ детектора, та прийнятну похибку контролю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гусятинер М. С., Горбачев А. И. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды. — М.: Радио и связь, 1983. — 224 с.
2. Силаев М. А., Комов А. Н. Измерительные полупроводниковые СВЧ преобразователи. — М.: Радио и связь, 1984. — 152 с.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2006, 25—28.09.2006 р.)

Надійшла до редакції 23.11.06
Рекомендована до друку 12.12.06

Водотовка Володимир Ілліч — професор.

Кафедра конструювання і виробництва радіоапаратури, Національний технічний університет України «КПІ»;

Моставлюк Антоніна Сергіївна — аспірант.

Кафедра проектування та конструювання радіоелектронних засобів, Хмельницький національний університет