

УДК 621.317.7.089

**Ю.О. Скрипник, д.т.н., проф.****К.Л. Шевченко, к.т.н., проф.***Київський національний університет технологій та дизайну***О.П. Яненко, д.т.н., проф.***Науково-дослідний центр квантової медицини "Відгук" МОЗ України***МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ РАДІОМЕТРІВ***Розглянуто метрологічні характеристики надвисокочастотних радіометричних систем, що використовуються в режимі ближньої дії для дослідження об'єктів живої та неживої природи.***Вступ**

В даний час надвисокочастотні (НВЧ) радіометри поряд з традиційним застосуванням в радіоастрономії [1] знаходять широке застосування в медицині [2], біології [3], фізиці [4], екології [5] та інших галузях науки і техніки. Однак, нормуючі параметри і характеристики НВЧ радіометрів, які в основному використовувались для приймання та реєстрації слабких сигналів з космосу, виявились недостатніми для оцінки метрологічних властивостей НВЧ радіометрів ближньої дії, антени яких контактують або знаходяться в безпосередній близькості від досліджуваних об'єктів.

В той же час в цій області ще не склалося однозначне розуміння характеристик радіометричних систем (РС), в тому числі метрологічних. Тому доцільно розглянути характеристики НВЧ-радіометрів, які впливають на результат і похибки вимірювання та отримали назву метрологічних характеристик [6]. Від того, наскільки вони точно будуть витримані при виготовленні і стабільні при експлуатації, залежить точність та достовірність результатів вимірювання.

**Визначення та оцінка метрологічних характеристик**

До метрологічних характеристик НВЧ-радіометрів ближньої дії відносяться функція перетворення (статична характеристика перетворення), поріг чутливості, чутливість засобу вимірювання, ціна поділки шкали або цифрового індикатора, межі вимірювань, діапазон робочих частот, смуга пропускання радіометричного каналу, ступінь узгодження з об'єктом дослідження, похибки вимірювань та ряд інших як загальних, так і специфічних параметрів.

Функція перетворення (статична характеристика перетворення) – функціональна залежність між інформативним параметром сигналу, що приймається, та вихідною величиною, що вимірюється (зазвичай – це постійний струм або напруга). Функція перетворення для конкретного типу НВЧ радіометра, яку відображають в нормативно-технічній документації саме на цей тип, називають номінальною функцією перетворення (НФП), наприклад, НФП модуляційного радіометра прямого перетворення. За НФП можна визначити значення вхідної величини що вимірюється, або інформативного параметра сигналу за значенням вихідної величини та оцінити характер перетворення (лінійний або нелінійний). НФП може задаватись аналітично, таблично або графічно. В НВЧ радіометрах НФП зазвичай відображає залежність вихідного постійного струму або напруги від інтегральної потужності вузькосмугового сигналу, що приймається, або спектральної щільності потужності широкопasmових (шумових) сигналів.

При вимірюванні інших фізичних величин, наприклад, температури радіотеплового випромінювання, шкала радіометра градується в градусах Кельвіна (К). У випадку медичних досліджень шкала радіометра може бути відградуєвана в одиницях фізіологічної активності або інших умовних одиницях, що характеризують той чи інший параметр людини чи біооб'єкта.

Реальна функція перетворення (РФП) відрізняється від НФП із-за виникаючих в процесі експлуатації прогресуючих похибок вимірювальних перетворювачів [7].

Поріг чутливості – найменша зміна інформативного параметра сигналу, що приймається, яка реєструється за вихідним приладом або індикатором. Поріг чутливості виражають в одиницях величини, що вимірюється, і він характеризує зону невизначеності поблизу нуля радіометра. В НВЧ радіометрах поріг чутливості в основному залежить від рівня флуктуацій коефіцієнта підсилення НВЧ тракту до детектора і низькочастотних шумів самого детектора. Тому в НВЧ радіометрії цей параметр називають флуктуаційним порогом чутливості. У високочутливих модуляційних радіометрах флуктуаційний поріг за спектральною щільністю потужності вхідного сигналу знижений до  $10^{-21} \dots 10^{-22}$  Вт/Гц [8].

Чутливість НВЧ радіометра – відношення приросту вихідного струму  $\Delta I$  (напруги  $\Delta U$ ) до зміни інформативного параметра сигналу, яке викликало цей приріст, наприклад, потужності сигналу  $\Delta P$ . У цьому випадку чутливість радіометра  $S = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta P} = \frac{dI}{dP}$ .

При нелінійній НФП чутливість  $S$  залежить від значення величини, що вимірюється, при лінійній НФП вона постійна. Відповідно змінюється і характер шкали радіометра.

Ціна поділки шкали або найменшого розряду цифрового індикатора – різниця значень величин, яка відповідає двом сусіднім відміткам шкали, або показання молодшого розряду цифрового індикатора. Ціна поділки радіометра  $C$  може бути визначена через його чутливість  $S$  і дорівнювати числу одиниць величини, що вимірюється, яке приходиться на одну поділку шкали (постійна радіометра):  $C = 1/S$ .

Похибка НВЧ радіометра оцінюється відхиленням реальної функції перетворення від номінальної. Зміна кута нахилу РФП відносно НФП, яка викликає зміну чутливості радіометра, є причиною появи мультиплікативної складової похибки (похибки чутливості). Паралельне зміщення РФП відносно НФП, яке викликає появу вихідного струму або напруги при відсутності вхідного сигналу, обумовлює появу адитивної складової похибки (похибки нуля). В умовах експлуатації радіометрів зазвичай проявляються обидві складові похибки вимірювання, але оцінювати їх зручно окремо, оскільки викликаються вони різними причинами. Адитивна похибка не залежить від величини, що вимірюється, та її абсолютне значення має розмірність величини, що вимірюється, яка постійна за всією шкалою. Мультиплікативна похибка пропорційна величині, що вимірюється, та нормує її відносно значення у відсотках, яке також не залежить від величини, що вимірюється, та постійна вздовж шкали.

Діапазон вимірювань НВЧ радіометра – це область значень величини, що вимірюється, для якої нормовані адитивна і мультиплікативна складові похибки, наприклад,  $10^{-14} \dots 10^{-12}$  Вт при допустимій похибці не більше  $3 \cdot 10^{-14}$  Вт [8].

Межа вимірювання – найбільше та найменше значення величини, що вимірюється. Найменша межа вимірювання зазвичай обмежена порогом чутливості радіометра, а верхня – допустимою похибкою від нелінійності РФП.

Діапазон робочих частот – це зона частот вузькосмугових сигналів або складових спектра широкосмугових сигналів, на яких нормуються допустимі відхилення функції перетворення від її номінального значення. Смуга пропускання радіометричного каналу – це зона частот, в межах якої виділяється інформативний параметр, а коефіцієнт передачі НВЧ-частини знаходиться в установлених нормативних значеннях.

Ступінь узгодження – це властивість однонаправленості тракту передачі сигналів без їх відбиття та спотворень, яка кількісно оцінюється неузгодженістю за коефіцієнтом відбиття або коефіцієнтом стоячої хвилі. Ступінь узгодження радіометра з об'єктом дослідження в режимі ближньої дії одна із важливих метрологічних характеристик, яка має вплив на достовірність результату вимірювання інформативного параметра.

До метрологічних характеристик відносяться також динамічні характеристики, які зв'язують вихідний струм або напругу радіометра зі змінним в часі інформативним параметром сигналу, що приймається.

Головною перевагою НВЧ радіометрів у порівнянні з іншими засобами вимірювання параметрів сигналів є можливість вимірювання широкосмугових (шумоподібних) сигналів, співставлених або менших за власні шуми приймальної антени, підсилювача, змішувача та інших елементів схеми радіометра. Однак ця можливість реалізується в залежності від рівня власних шумів. Тому до метрологічних відносяться і ряд специфічних характеристик радіометра, пов'язаних з шумами. Так, в радіометрії прийнято оцінювати рівень шумів через шумову температуру.

Шумова температура  $T_{ш}$  – міра потужності шумів, яка дорівнює температурі абсолютно чорного тіла (АЧТ) або узгодженого опору, при якій потужність його теплового шуму дорівнює потужності шумів даного елемента або пристрою. Відношення  $T_{ш}$  до  $T_0 = 300\text{K}$  називають відносною шумовою температурою або шумовим числом.

В НВЧ радіометрії поняттям шумова температура користуються для оцінки рівня шумів електровакуумних та напівпровідникових приладів, антен та при описі джерел радіовипромінювання.

Так, шумова (радіояскрава) температура об'єкта контролю визначається виразом:

$$T_B = \chi T_0, \quad (1)$$

де  $T_0$  – термодинамічна температура об'єкта;  $\chi$  – випромінювальна здатність об'єкта:

Згідно з законом Кірхгофа,

$$\chi = 1 - r = 1 - |\Gamma|^2, \quad (2)$$

де  $r$  – коефіцієнт відбиття об'єкта за потужністю;  $\Gamma$  – коефіцієнт відбиття об'єкта за напругою.

Шумова температура антени – температура АЧТ, потужність теплового випромінювання якого дорівнює потужності на виході антени. Ця температура залежить від конструктивних параметрів антени та властивостей середовища, яке контролюється. Для контактної антени (аплікатора), яка застосовується в радіометрії біологічних об'єктів, вона визначається виразом [9]:

$$T_A = \alpha A \int_V T_B(r) \varepsilon''(r) |\tilde{E}(r)|^2 dV + T_\alpha(1 - \alpha), \quad (3)$$

де  $A$  – нормуючий множник;  $T_B(r)$  і  $\varepsilon''(r)$  – власне функція розподілу температури та втрат у середовищі;  $|\tilde{E}(r)|^2$  – функція розподілу напруженості поля при роботі антени на “передавання”;  $r$  – радіус-вектор;  $\alpha$  – дисипативні втрати в антені;  $V$  – об’єм середовища, яке контролюється.

У випадку плоскої радіохвилі останнє рівняння набуває вигляду:

$$T_A = \alpha \gamma \int_0^\infty T_B(z) e^{-\gamma z} dz + T_\alpha(1 - \alpha), \quad (4)$$

де  $z$  – нормаль до апертури антени;  $\gamma$  – показник послаблення у середовищі [1/см].

Нарешті, при  $T(z) = \text{const} = T_B$  (рівномірно нагріте середовище)

$$T_A = \alpha T_B + T_\alpha(1 - \alpha), \quad (5)$$

тобто визначається в основному дисипативними втратами.

При використанні НВЧ радіометра для вимірювання глибинної температури, наприклад, органів людини, поріг чутливості відображається в градусах Кельвіна (К) і залежить від шумової температури антени.

В модуляційному радіометрі, в якому вхідний автоматичний перемикач почергово підключає до входу НВЧ-приймача антену, направлену на об’єкт, що досліджується, та еквівалент антени (узгоджений кінцевий поглинач), поріг чутливості знижується до значення

$$\delta = \frac{T_B - T_\Gamma}{\sqrt{\Delta f \tau}}, \quad (6)$$

де  $\delta$  – середньоквадратичне значення флуктуації температури на виході радіометра;  $T_\Gamma$  – температура шумів на вході приймача;  $T_B$  – температура шумів об’єкта;  $\Delta f$  – ширина смуги пропускання високочастотної частини радіометра;  $\tau$  – час накопичення в інтегруючій ячейці на виході радіометра.

При смугах частот  $\Delta f$ , що використовуються, в десятки і сотні мегагерц та часу накопичення  $\tau$  в одиниці секунд, радіометричний вигравш  $1/\sqrt{\Delta f \tau}$  складає  $10^4 \dots 10^5$  разів, та шуми на виході радіометра еквівалентні 0,05...0,1 °С.

Однак, слід мати на увазі, що зниження порогу чутливості за рахунок збільшення  $\tau$  призводить до росту інерційності радіометра, тобто погіршує його важливу метрологічну характеристику, якою є швидкодія. Тому при проектуванні НВЧ радіометрів для зменшення флуктуаційного порогу чутливості доцільно використовувати схемні методи придушення шумів в околицях частоти модуляції [10].

### Висновки

У висновку відмітимо, що чітке та однозначне визначення метрологічних характеристик НВЧ радіометрів буде сприяти розвитку теорії вимірювальних перетворювачів надслабких сигналів та оптимізації схемотехнічних рішень радіометрів на різні діапазони частот в залежності від властивостей об’єктів живої та неживої природи, які досліджуються.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. – М.: Наука, 1972. – 416 с.
2. Ситько С.П., Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Аппаратурное обеспечение современных технологий квантовой медицины. – К.: ФАДА, ЛТД, 1999. – 199 с.
3. Скрипник Ю.А., Перегудов С.Н., Яненко А.Ф. Радиометрическая система для исследования излучений биологических объектов // Физика живого. – 1998. – Т. 6, № 1. – С. 19–22.
4. Башаринов А.Е., Тучков Л.Г., Полякова В.М., Анапов Н.И. Изменение радиотепловых и плазменных излучений. – М.: Сов. радио, 1968. – 390 с.
5. Островецкая Ю.И., Супрун Н.П., Скрипник Ю.А., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф. Исследование радиопрозрачности материалов для одежды при изменении их влагоемкости // Материалы 13 международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2003. – С. 720–722.
6. Основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 115 с.

7. Григорян Р.Л., Скрипник Ю.А., Шалдыкин О.К. Анализаторы характеристик радиоэлектронных устройств. – К.: Техника, 1981. – 248 с.
8. Скрипник Ю.О., Манойлов В.П., Яненко О.П. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону: Навчальний посібник. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 374 с.
9. Вайнблат А.В. Методы калибровки и поверки медицинских радиометров // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2003. – № 1. – С. 49–54.
10. Головка Д.Б., Скрипник Ю.О., Яненко О.П. Модуляційні НВЧ вимірювачі електричних та неелектричних величин: Наукове видання. – К.: МП Леся, 2001. – 232 с.

СКРИПНИК Юрій Олексійович – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Київського національного університету технологій та дизайну, заслужений діяч науки і техніки України.

Наукові інтереси:

- автоматизація процесу вимірювання;
- комутаційно-модуляційне перетворення параметрів сигналів та ланцюгів;
- радіометричні системи.

Тел.: (044) 256-21-30

ШЕВЧЕНКО Костянтин Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Київського національного університету технологій та дизайну.

Наукові інтереси:

- автоматизація та комп'ютерна обробка сигналів;
- радіометрія та вимірювання слабких сигналів.

Тел.: (044) 256-29-93.

ЯНЕНКО Олексій Пилипович – доктор технічних наук, доцент кафедри автоматизації наукових досліджень Національного технічного університету України “КПІ”, заступник директора з наукової роботи Науково-дослідного центру квантової медицини “Відгук” МОЗ України.

Наукові інтереси:

- вимірювання слабких сигналів НВЧ-діапазону радіометричними методами;
- метрологічне забезпечення вимірювання слабких сигналів.

Тел.: (044) 220-87-81.

Подано 22.12.2003

**Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Яненко О.П.** Метрологічні характеристики надвисокочастотних радіометрів

**Скрипник Ю.А., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф.** Метрологические характеристики сверхвысокочастотных радиометров

**Skripnik Yu.A., Shevchenko K.L., Yanenko A.F.** Metrological characteristics of the microwave radiometers

УДК 621.317.7.089

**Метрологічні характеристики надвисокочастотних радіометрів / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко**

Розглянуто метрологічні характеристики надвисокочастотних радіометричних систем, що використовуються в режимі ближньої дії для дослідження об'єктів живої та неживої природи.

УДК 621.317.7.089

**Метрологические характеристики сверхвысокочастотных радиометров / Ю. А. Скрипник, К. Л. Шевченко, А. Ф. Яненко // Вісник ЖІТІ. – 2003. - № ... (...) / Технічні науки. – С. ...-... . – Библиогр.: 10 назв.**

Рассмотрены метрологические характеристики сверхвысокочастотных радиометрических систем, используемые в режиме ближнего действия для исследования объектов живой и неживой природы.

УДК 621.317.7.089

**Metrological characteristics of the microwave radiometers / Yu. A. Skripnik, K. L. Shevchenko, A. F. Yanenko // Вісник ЖІТІ. – 2003. - № ... (...) / Технічні науки. – Р. ...-... . – Refs.: 10 titles.**

Microwave radiometric systems of a short-range mode are used to research objects of the alive and lifeless nature. Metrological characteristics of microwave radiometric systems are described.