

УДК 389.629

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВИПРОМІНЮВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Ю.О. СКРИПНИК, К.Л. ШЕВЧЕНКО, О.А. ВАГАНОВ

Київський національний університет технологій та дизайну

Проаналізовано похибки вимірювання електромагнітного випромінювання нагрітих матеріалів у діапазоні міліметрових хвиль. Наведено алгоритми виключення похибок за рахунок додаткових вимірювань радіо-прозорості матеріалів. Описано структуру модуляційних радіометричних засобів

Показник по випромінювальній здатності текстильних матеріалів у діапазоні міліметрових довжин хвиль є визначальним у системі критеріїв електромагнітної сумісності одягу з організмом людини [1]. Однак, вимірювання цього показника пов'язане з певними складнощами, перш за все, з шумовим (випадковим) характером випромінювання і вельми низьким рівнем випромінювання порівняно з оптичним (інфрачервоним) діапазоном. Для кількісного оцінювання комфортності одягу, матеріал, який випробовують, нагрівають до середньої температури тіла людини (310 К). Випромінювання, потужність якого набагато менша за потужність власних шумів надвисокочастотних (НВЧ) приладів, вимірюють модуляційною радіометричною системою (РС) [2]. Висока чутливість модуляційних РС не забезпечує високої точності вимірювання електромагнітного випромінювання (ЕМВ), оскільки в антену РС потрапляє не лише ЕМВ випробовуваного матеріалу, але і ЕМВ нагріваючого елемента, з яким контактує матеріал [3]. Розділити ці випромінювання практично неможливо. Тому використовують двоантенні (диференційні) модуляційні РС, які дають можливість окремо вимірювати два ЕМВ та здійснювати операцію їх порівняння [4].

Постановка завдання

Проаналізуємо метрологічні можливості двоантенних модуляційних РС під кутом зору виключення впливу неінформативних ЕМВ на випромінювальну здатність матеріалів, а також вплив товщини, структури і складу самого матеріалу на результат вимірювання. Об'єктом вимірювання є текстильні матеріали з натуральних та хімічних волокон і їх сумішей. Хвилеводні системи модуляційних РС повинні забезпечувати пропускання НВЧ сигналів міліметрового діапазону довжин хвиль, які найбільше впливають на клітини живого організму.

Результати та їх обговорення

Двоантенна модуляційна РС (рис.1), додатково до традиційної РС, містить блок нагріву 18, за допомогою якого нагрівають матеріал 23 до температури 310 К, який контролюється термоелектричним термометром 22.

Антенною 1 приймається ЕМВ від досліджуваного матеріалу 23, нагрітого металевією пластинією 20, через яку протікає струм від регульованого джерела струму 19. Струм нагрівання встановлюється за показами термоелектричного термометра 22. Приймальною антенною 2 приймається ЕМВ безпосередньо від нагрітої металевією пластини 20. Якщо прийняти за P_0 потужність ЕМВ металевією пластини 20, то потужності радіо-теплових сигналів, прийнятих приймальними антенами 1 і 2, можна визначити за такою формулою:

$$P_1 = S_1 (P_x + P_o - \Delta P) + P_{n1}, \quad (1)$$

$$P_2 = S_2 q P_o + P_{n2} \quad (2)$$

де S_1 і S_2 – крутизна перетворення антен 1 і 2, зумовлена їх геометричними розмірами та діаграмою спрямованості; P_x – потужність ЕМВ нагрітого досліджуваного матеріалу 23; ΔP – втрати потужності ЕМВ металевієї пластини 20 у досліджуваному матеріалі 23; q – послаблення, виражене у відносних одиницях, яке вноситься градуїованим атенюатором 6; P_{n1} і P_{n2} – потужності власних шумів антен 1 і 2.

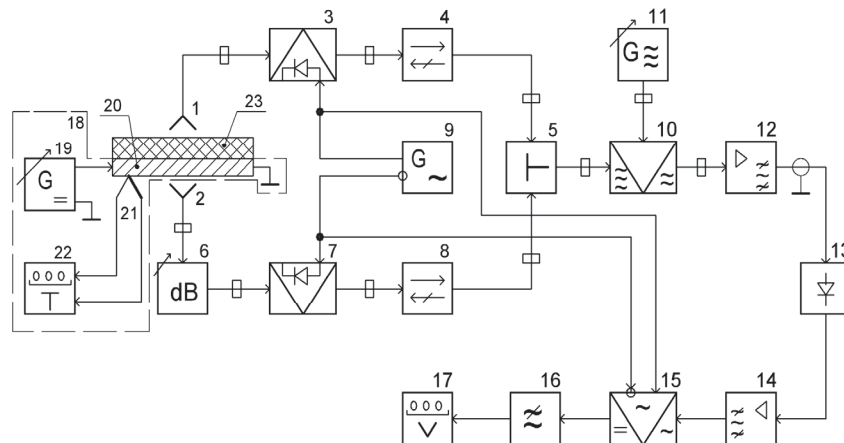


Рис. 1. Схема двоантенної модуляційної РС:

1, 2 – антени; 3, 7 – ключі-модулятори; 4, 8 – феритові вентилі; 5 – суматор-трійник; 6 – градуїований атенюатор; 9 – генератор низької частоти; 10 – балансний змішувач; 11 – гетеродин; 12 – підсилювач проміжної частоти; 13 – квадратичний детектор; 14 – вибіркового підсилювач; 15 – синхронний детектор; 16 – фільтр нижніх частот; 17 – вольтметр; 18 – блок нагрівання досліджуваного матеріалу; 19 – регульоване джерело струму; 20 – металева пластинка; 21 – термопара; 22 – термометр; 23 – досліджуваний матеріал

Прийняті антенами 1 і 2 надвисокочастотні сигнали з потужностями (1) і (2) періодично перериваються ключами-модуляторами 3 та 7, і через феритові вентилі 4 і 8 потрапляють до суматора-трійника 5. Оскільки ключі-модулятори 3 і 7 керуються протифазними напругами генератора 9 низької частоти, то через суматор-трійник 5 надвисокочастотні сигнали проходять у виді пакетів коливань (радіоімпульсів) по черзі з періодом, який відповідає частоті роботи ключів-модуляторів 3 і 7. Радіоімпульсні сигнали по черзі змішуються у балансному змішувачі 10 з коливаннями гетеродина 11, який генерує монохроматичні надвисокочастотні коливання. Під час змішування утворюються коливання різницевої частоти, які виділяються та підсилюються підсилювачем проміжної частоти 12. Радіотеплове випромінювання має широкий спектр. Тому і радіоімпульси, які потрапляють на балансний змішувач 10, є широкосмуговими. Але після змішування з монохроматичними коливаннями гетеродина 11, підсилювачем проміжної частоти 12 виділяються вузькосмугові шумові імпульси у межах смуги

пропускання. В результаті квадратичного детектування і усереднення вузькосмугових сигналів на виході квадратичного детектора 13 по черзі утворюються відеоімпульси з амплітудами:

$$U_1 = S_3 K_1 S_4 (P_1 + P_3), \quad (3)$$

$$U_2 = S_3 K_1 S_4 (P_2 + P_3), \quad (4)$$

де S_3 – крутизна гетеродинного перетворення частоти радіоімпульсів; K_1 – коефіцієнт підсилення підсилювача 12 проміжної частоти за потужністю; S_4 – крутизна квадратичного перетворення; P_3 – потужність шумів гетеродинного перетворювача частоти (елементів 5, 10, 11 і 12).

У послідовності відеоімпульсів (3) і (4) з різними амплітудами присутня змінна складова напруги частоти модуляції з амплітудою

$$U_3 = \frac{U_1 - U_2}{2} = \frac{1}{2} S_3 K_1 S_4 (P_1 - P_2). \quad (5)$$

Змінна напруга з амплітудою (5) підсилюється вибіркоким підсилювачем 14, налагодженим на низьку частоту модуляції генератора 9 низької частоти. Підсилена напруга випрямляється синхронним детектором 15 і додатково згладжується фільтром нижніх частот 16. В результаті одержуємо постійну напругу:

$$U_4 = \frac{1}{2} S_3 K_1 S_4 K_2 S_5 K_3 (P_1 - P_2), \quad (6)$$

де K_2 – коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача 14; S_5 – крутизна перетворення синхронного детектора 15; K_3 – коефіцієнт передачі фільтру нижніх частот 16.

Після підстановки у вираз (6) значень (1) і (2) отримаємо

$$U_5 = \frac{1}{2} S_3 K_1 S_4 K_2 S_5 K_3 [S_1 (P_x + P_o - \Delta P) - S_2 q P_o + P_{n1} - P_{n2}]. \quad (7)$$

Якщо антени 1 і 2 мають однакову конструкцію, тоді можна вважати, що й їх параметри однакові ($S_1 = S_2$, $P_{n1} = P_{n2}$). Постійну напругу, яка вимірюється вольтметром 17, визначимо за формулою:

$$U_6 = \frac{1}{2} S_1 S_3 K_1 S_4 K_2 S_5 K_3 (P_x + P_o - \Delta P - q P_o). \quad (8)$$

Прийнятий антеною 2 сигнал послабляємо градуйованим атенуатором 6, пропорційно товщині досліджуваного матеріалу 23 так, щоб виконувалася умова

$$P_o - \Delta P = q P_o. \quad (9)$$

При виконанні умови (9) вимірювану напругу визначаємо за формулою:

$$U_7 = \frac{1}{2} S_1 S_3 K_1 S_4 K_2 S_5 K_3 P_x = S_o P_x, \quad (10)$$

де $S_o = \frac{1}{2} S_1 S_3 K_1 S_4 K_2 S_5 K_3$ – результуюча крутизна перетворення потужності ЕМВ модуляційною РС у постійну напругу.

З одержаного виразу (10) видно, що вихідна напруга запропонованої РС радіотеплового контролю якості матеріалів одягу пропорційна потужності P_x радіотеплового випромінювання досліджуваного матеріалу 23 і не залежить від рівня потужності P_o ЕМВ металеві пластини 20. Крім того, виключено вплив власних шумів антен 1 і 2 (P_{n1} і P_{n2}) та власних шумів (P_3) блоку перетворення частоти надвисокочастотних сигналів (елементів 5, 10, 11 і 12).

Низькочастотні шуми квадратичного детектора 13, які незмінно присутні на його виході, пригнічуються за рахунок вибіркової властивості вибіркового підсилювача 14, детектування у синхронному детекторі 15 і подальшого усереднення фільтром 16 нижніх частот з великою постійною часу (до 5–7 с).

Проте, встановлене градуйованим атенюатором 6 ослаблення q для виконання умови (9) не забезпечує повну компенсацію втрат потужності ΔP , які визначаються не лише товщиною досліджуваного матеріалу. Вони значною мірою залежать від структури матеріалу, його поверхневої щільності, хімічного складу ниток та стану поверхні. Тому більш повне врахування втрат можливе лише шляхом експериментального оцінювання радіопрозорості досліджуваного матеріалу, яка визначається поглинанням та відбиттям ЕМВ [1].

Інформацію радіопрозорості матеріалу можна одержати за допомогою модуляційної РС (рис.2), у якій відсутнє безпосереднє нагрівання досліджуваного матеріалу. Радіотеплове випромінювання створюється тепловим генератором низькоінтенсивного випромінювання, наприклад, шумовим генератором [5].

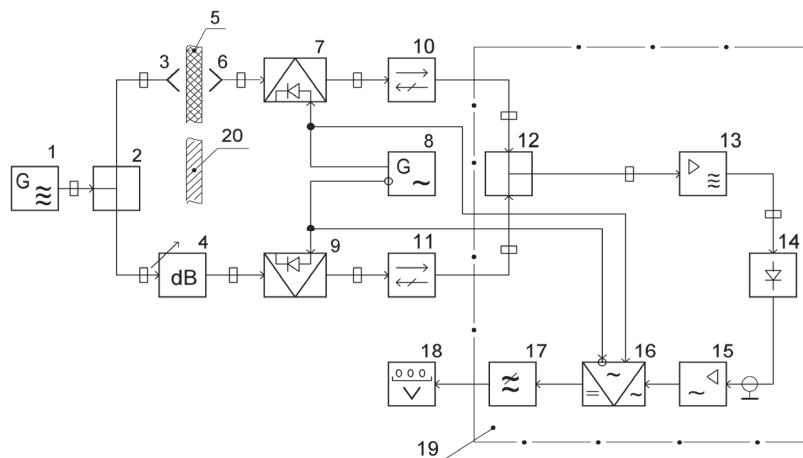


Рис. 2. Двоантенна модуляційна РС для вимірювання радіопрозорості матеріалів:

- 1 – тепловий генератор шуму; 2 – подільник потужності; 3 – передавальна антена; 4 – змінний атенюатор; 5 – досліджуваний матеріал; 6 – приймальна антена; 7 і 9 – ключі-модулятори;
- 8 – генератор низької частоти; 10 і 11 – феритові вентилі; 12 – хвилеводний трійник;
- 13 – підсилювач надвисоких частот; 14 – квадратичний детектор; 15 – підсилювач низької частоти;
- 16 – синхронний детектор; 17 – фільтр нижніх частот; 18 – вольтметр; 19 – модуляційна РС

Випромінювання теплового генератора шуму 1 через подільник потужності 2 живить передавальну антену 3 і змінний атенуатор 4. У електромагнітному полі передавальної антени 3 розташовано досліджуваний матеріал 5. ЕМВ, яке пройшло через досліджуваний матеріал 5, впливає на приймальну антену 6, вихідний надвисокочастотний сигнал якої періодично переривається ключем-модулятором 7, який керується напругою генератора низької частоти 8. Опорний сигнал з виходу змінного атенуатора 4 переривається ключем-модулятором 9, який керується протифазною напругою генератора низької частоти 8. Модульовані сигнали через феритові вентиля 10 і 11 поступають на хвилеводний трійник 12 модуляційної РС 19.

У теплового генераторі шуму 1 температуру генеруючого елемента встановлюють рівною середній температурі тіла людини (310 К). Низькоінтенсивний потік ЕМВ широкого спектру коливань, який аналогічний ЕМВ тіла людини, розділяється на дві рівні частини подільником потужності 2:

$$P_1 = P_2 = \frac{1}{2} \cdot P_0, \quad (11)$$

де P_0 – потужність теплового генератора шуму 1.

Одна частина потоку з потужністю P_1 випромінюється передавальною антенною 3 у вільний простір, у якому знаходиться досліджуваний матеріал 5. Випромінювана передавальною антенною 3 потужність

$$P_3 = \frac{1}{2} \cdot \eta_1 P_0, \quad (12)$$

де η_1 – коефіцієнт корисної дії передавальної антени 3.

У вільному просторі, як і в підодяговому просторі, частина електромагнітної енергії відбивається від досліджуваного матеріала 5, а частина енергії розсіюється і поглинається безпосередньо досліджуваним матеріалом 5. Якщо потужність ЕМВ, яка пройшла крізь досліджуваний матеріал 5, позначити через P_4 , то коефіцієнт радіопрозорості визначаємо за формулою:

$$K_p = \frac{P_4}{P_3} = 1 - \frac{\Delta P}{P_0}, \quad (13)$$

де ΔP – втрати потужності ЕМВ у матеріалі.

Потужність ЕМВ, що впливає на приймальну антену 6

$$P_5 = \eta_2 K_p P_3 + P_n, \quad (14)$$

де η_2 – коефіцієнт корисної дії приймальної антени; P_n – потужність власних шумів антени.

З врахуванням співвідношення (12), потужність прийнятого ЕМВ при ідентичних передавальній антені 3 та приймальній антені 6 ($\eta_1 = \eta_2$)

$$P_5 = \frac{1}{2} \cdot \eta^2 K_p P_0 + P_n. \quad (15)$$

Вихідний сигнал приймальної антени 6 періодично переривається ключем-модулятором 7, який відкривається в один з напівперіодів модулюючої напруги, яка виробляється генератором низької частоти 8.

Інша частина ЕМВ теплового генератора шуму 1 з виходу подільника потужності 2 використовується як опорний сигнал. З врахуванням ослаблення змінного атенюатора 4 потужність опорного сигналу

$$P_6 = \alpha_1 P_2 = \left(\frac{1}{10^{A_1/10}} \right) \cdot \frac{P_0}{2}, \quad (16)$$

де α_1 – коефіцієнт передачі змінного атенюатора 4 у відносних одиницях; A_1 – ослаблення змінного атенюатора 4 у логарифмічних одиницях (дБ).

Опорний сигнал з виходу змінного атенюатора 4 періодично переривається ключем-модулятором 9, але у сусідні напівперіоди модулюючої напруги, коли ключ-модулятор 9 пропускає сигнал приймальної антени 6.

Обидва надвисокочастотних сигнали, які періодично перериваються, проходять через феритові вентилі 10 і 11, потім додаються у хвилеводному трійнику 12 модуляційного радіометра 19.

Ослаблення опорного НВЧ-сигналу змінним атенюатором 4 змінюють до нульового значення напруги на виході модуляційного радіометра 19 ($P_5 = P_6$).

З врахуванням значень (15) і (16) одержимо рівність:

$$\eta^2 K_p P_0 + 2P_n = \alpha_1 P_0. \quad (17)$$

Далі виводять досліджуваний матеріал 5 із зони приймання сигналу приймальної антени 6. При цьому показ модуляційного радіометра 19 при $K_p = 1$ зростають.

Збільшують ослаблення опорного сигналу змінним атенюатором 4 до нульового значення вихідної напруги модуляційного радіометра 19, чому відповідає рівність

$$\eta^2 P_0 + 2P_n = \alpha_2 P_0 = \left(\frac{1}{10^{A_2/10}} \right) \cdot P_0, \quad (18)$$

де α_2 – коефіцієнт передачі атенюатора 4 у відносних одиницях при повторному обнулінні; A_2 – ослаблення змінного атенюатора 4 в логарифмічних одиницях при повторному обнулінні.

Після фіксації коефіцієнта передачі α_2 змінного атенюатора 4 вводять у зону приймання сигналу приймальної антени 6 металевий екран 20. В результаті цього переривається потік ЕМВ, який виходить від передавальної антени 3.

Зменшують ослаблення опорного сигналу змінним атенюатором 4 до відновлення нульового значення вихідної напруги модуляційного радіометра 19

$$2P_n = \alpha_3 P_0 = \left(\frac{1}{10^{A_3/10}} \right) \cdot P_0, \quad (19)$$

де α_3 і A_3 – коефіцієнти передачі змінного атенюатора 4 при третьому обнулінні у відносних і логарифмічних одиницях.

Розв'язуючи одночасно рівняння (17), (18) і (19) відносно коефіцієнта радіопрозорості досліджуваного матеріалу 5, отримують

$$K_p = \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{\alpha_2 - \alpha_3}. \quad (20)$$

З отриманого виразу (20) видно, що на обчислене значення коефіцієнта радіопрозорості K_p не впливають параметри, а, отже, і їх нестабільність, модуляційного радіометра 19, непостійність рівня випромінюваного ЕМВ (P_0), рівень власних шумів приймальної антени б (P_n), значення коефіцієнта корисної дії передавальної антени з (η_1) і приймальної антени б (η_2), а також власні шуми високочастотних і низькочастотних перетворюючих ланок модуляційного радіометра 19. При цьому повністю виключений додатковий нагрів досліджуваного матеріалу 5 від джерела ЕМВ.

Для числового оцінювання радіопрозорості необхідні значення коефіцієнтів передачі змінного атенюатора 4 визначаються у відносних одиницях. В той же час, змінні атенюатори, що випускаються промисловістю, градууються у логарифмічних одиницях (дБ), які пов'язані з відносними одиницями співвідношенням [6]

$$A = 10 \lg \left(\frac{P_{BX}}{P_{ВИХ}} \right), \quad (21)$$

де P_{BX} і $P_{ВИХ}$ – вхідна та вихідна потужності змінного атенюатора 4.

Зворотне відношення потужностей ($P_{ВИХ} / P_{BX}$) і є відносним значенням коефіцієнта передачі змінного атенюатора 4. У зв'язку з прийнятим градуюванням атенюаторів у логарифмічних одиницях зручно оцінювати і радіопрозорість різних матеріалів у цих одиницях (дБ) (рис.3).

Перерахунок результатів оцінювання радіопрозорості за формулою (20) у логарифмічних одиницях відбувається згідно з співвідношенням

$$A_p = 10 \lg \left(\frac{1}{K_p} \right) = 10 \lg \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_3}{\alpha_1 - \alpha_3} \right). \quad (22)$$

Значення A_p встановлюють градуйованим атенюатором б (рис.1), який забезпечує підвищення точності вимірювання випромінювальної здатності матеріалів за рахунок врахування реальної радіопрозорості матеріалів.

З гістограми розподілу деяких матеріалів за радіопрозорістю видно, що найбільш радіопрозорі матеріали з натуральних волокон (вовна, бавовна, шовк), які вносять мінімальне ослаблення. У випадку збільшення відсоткового вмісту хімічних волокон в матеріалах їх радіопрозорість істотно знижується. Тому товщина матеріалу не є визначальною в оцінюванні радіопрозорості, яка повинна оцінюватися експериментально.

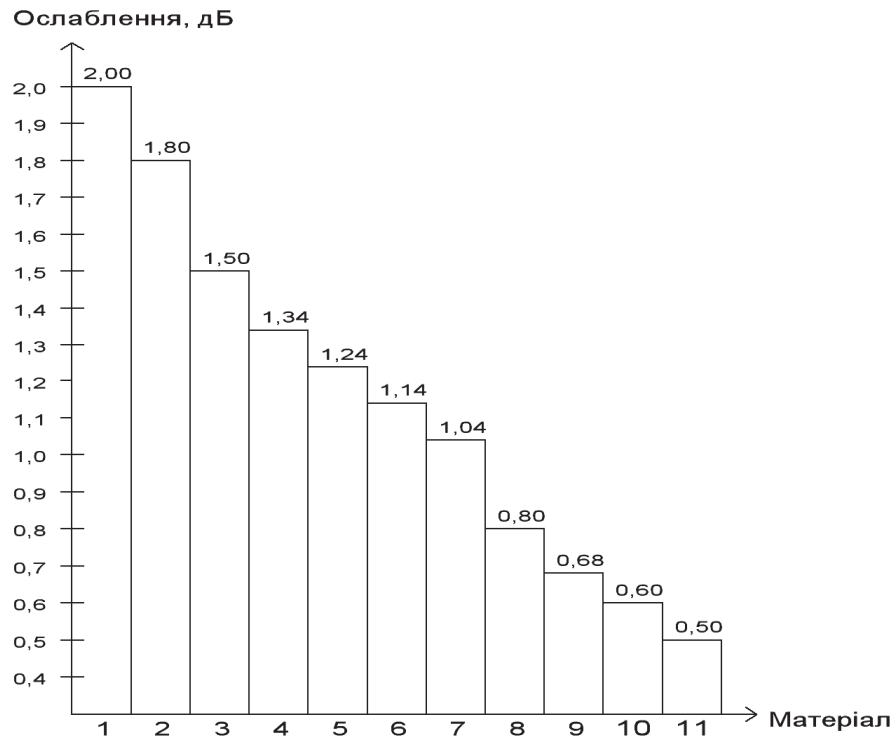


Рис.3. Гістограма розподілу радіопрозорості різних матеріалів:
 1 – поліамід (100%); 2 – поліестр (100%); 3 – бавовна (47%) + поліестр (53%);
 4 – бавовна (55%) + поліестр (45%); 5 – бавовна (55%) + поліестр (45%); 6 – бавовна (60%) +
 поліестр (40%); 7 – бавовна (65%) + поліестр (35%); 8 – віскоза (100%); 9 – шовк (100%);
 10 – бавовна (100%); 11 – вовна (100%)

Висновки

Підвищення точності вимірювання випромінювальної здатності текстильних матеріалів при температурі тіла людини можна досягти за рахунок прийому додатковою антеною ЕМВ самого нагрівального елемента і порівнянням у модуляційній РС з ЕМВ досліджуваного матеріалу. Для повної компенсації ЕМВ нагрівального елемента необхідно врахувати радіопрозорість досліджуваного матеріалу за допомогою ослаблення, що вводиться, в додатково прийняте ЕМВ. Радіопрозорість матеріалу також можна виміряти модуляційною РС, в якій джерелом ЕМВ є тепловий генератор шуму.

Випромінюючий елемент в тепловому генераторі шуму слід нагрівати до температури тіла людини. Порівняння ЕМВ, що пройшло крізь досліджуваний матеріал, з ослабленим ЕМВ теплового генератора шуму дозволяє оцінити радіопрозорість матеріалу без його додаткового нагріву та скомпенсувати її вплив при вимірюванні випромінюючої здатності тканин відповідним ослабленням в каналі додаткової антени.

Розроблені модуляційні РС можуть бути рекомендовані для оцінки рівня радіотеплового випромінювання і радіопрозорості текстильних матеріалів різної структури та складу, що сприятиме підвищенню комфортності одягу з цих матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Супрун Н.П., Ваганов О.А. Интегральная оцінка комфортності текстильних матеріалів за електромагнітними показниками // Вісник КНУТД, 2009 р., №4 (48). - С.46-50.
2. Головка Д.Б., Скрипник Ю.О., Яненко О.П. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин – К.: Либідь, 2003. – 328 с.
3. Скрипник Ю.О., Супрун Н.П., Ваганов О.А. Радиометричний метод оцінки комфортності текстильних матеріалів для одягу // Вісник КНУТД, 2008 р., №5 (43). – С.9-14.
4. Скрипник Ю.А., Куценко В.П., Шевченко К.Л., Ваганов А.А. Дифференциальный модуляционный радиометр // Наукові праці ДНТУ, Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація», 2009 р., №17 (148). – С.183-187.
5. Яненко О.П., Перегудов С.М. Генератор низькоінтенсивних квазігармонічних сигналів міліметрового діапазону // Вісник КНУТД, 2008 р., №5 (43). – С.103-107.
6. В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Каневских и др. Измерения в электронике: Справ очник. – М.: Энергоатомиздат, – 1987. – 512 с.

Надійшла 24.09.2010