

**ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ГАЗІВ
АТМОСФЕРНОГО І ПОНИЖЕНОГО ТИСКУ**

Проаналізовано класифікацію методів визначення вологості атмосферного повітря і технологічних газів, а також розглянуто типові конструкції сенсорів вологості газових середовищ, які працюють на основі описаних методів. Запропоновано конструкцію первинного перетворювача вологості на основі МДН-структури, в якій чутливим елементом виступає шар пористого окису кремнію.

The methods of moisture definition in atmosphere air and technological gases are analyzed, the moisture sensors constructions, based on these methods are observed. The construction of the primary moisture-sensing element based on MDS-structure with film of porous silicone is suggested.

Ключові слова: вологість, первинний перетворювач, пористий окис кремнію.

Вступ

На даному етапі розвитку науки і техніки досить гостро стоїть проблема підвищення якості, ефективності виробництва промислової, сільськогосподарської продукції, дотримання санітарно-гігієнічних норм та параметрів виробничого, складського і побутового мікроклімату.

Рівень відносної вологості є одним з найважливіших параметрів будь-якого виробничого мікроклімату (зони перебування людей, вмісту вакуумних камер, технологічних газопроводів, складських приміщень тощо), тому в наш час перспективним науковим напрямком є створення і покращення метрологічних характеристик сенсорів, створених для визначення і контролю вологості вищезазначених газових середовищ.

На даний час розроблена велика кількість методів визначення рівня вологості речовин, які знаходяться в різних агрегатних станах. Всі методи визначення вологості матеріалів можна розділити на два класи: прямі і опосередковані [1].

Класифікація методів визначення вологості газів

Прямі методи базуються на вимірюванні маси зволоженої речовини і її сухого залишку після висушування. Такі методи досить енергоємні, їх реалізація пов'язана із значними затратами часу і ресурсів, до того ж вони важкозастосовні у випадку вимірювання вологості газоподібних речовин [2].

Прямі методи вимірювання вологості використовують у лабораторних установках, метеорологічних дослідженнях та ін., де більшу інформативну рол виконує такий параметр як абсолютне значення вмісту вологи.

Опосередковані методи визначення вологості базуються на визначенні степеня зміни різних фізико-хімічних параметрів досліджуваних об'єктів залежно від рівня вологості оточуючого середовища. Серед таких параметрів вологого середовища може бути: електричні параметри (ємність, індуктивність, провідність), оптичні (прозорість, площина поляризації, коефіцієнт відбиття), механічні параметри (зміна лінійних розмірів, сили внутрішнього тертя, механічних напружень) та ін.

Застосування таких опосередкованих методів у виробництві та побуті є більш раціональним. Розглянемо класифікацію опосередкованих методів визначення вологості, що можуть бути застосовні у випадку газоподібних вимірюваних речовин [2]:

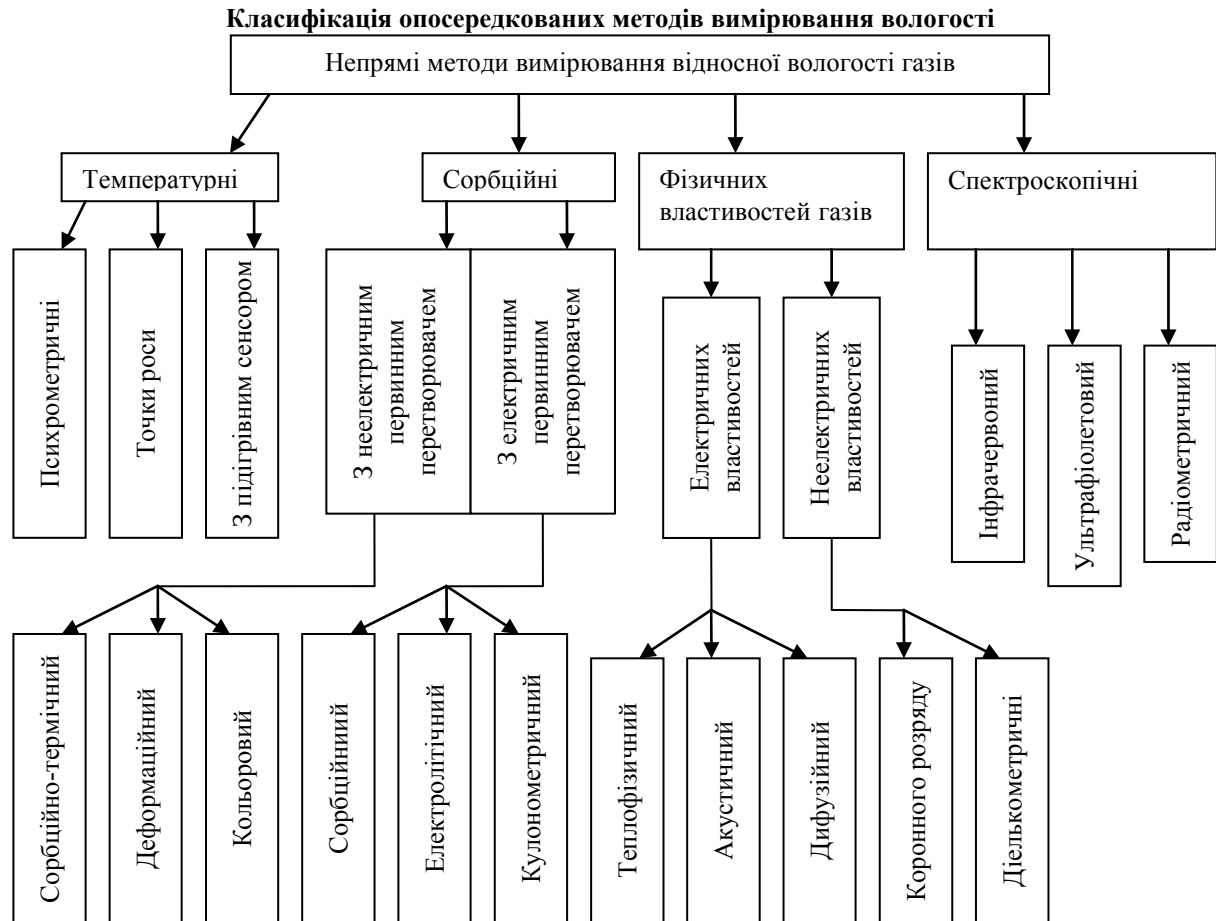
Розглянемо температурні методи на прикладі визначення точки роси. Дія таких оснований на вимірюванні точки роси, в яких газ, що аналізується, охолоджується до температури насичення водяної пари, тобто точки роси. Дану температуру визначають в момент конденсації пари на плоскій полірованій поверхні дзеркала. Для охолодження газу використовують дроселюючи, термоелектричні, термомагнітні пристрої. Момент випадання роси фіксується фотоелектричним і кондуктометричним способом. В останньому випадку вимірюють поверхневий опір дзеркала, на якому знаходиться конденсат. Також застосовують радіаційні детектори, принцип дії яких полягає у поглинанні α - і β - випромінювань. Знаючи точку роси і температуру газу, можна обчислити вологість за формулою [2]:

$$\varphi = \frac{p_1}{p_2}, \quad (1)$$

де p_1 і p_2 - відповідно тиск насиченої пари при точці роси і температурі газу.

Перевагою таких гігрометрів є низький поріг визначення вологості (в точці роси -100°C відповідає концентрація вологи $10^{-6}\%$), похибка найкращих зразків від 0,3 до $0,5^\circ\text{C}$, але не перевищує одного градуса Цельсія. Недолік таких гігрометрів: неможливість вимірювання вологості газів, температура конденсації яких вища вимірюваної точки роси.

На даний час в промислових і побутових умовах частіше за все використовують сенсори вологості, принцип дії яких засновано на сорбційному та спектрографічному методах вимірювання вологості.



Розглянемо оптичні властивості води. При атомній поляризації атоми кисню, які входять в склад молекули води, мають складний вид руху, який обумовлений синтезом трьох стандартних коливань: абсолютно симетричних кутових, абсолютно симетричних пружних, асиметрично пружних. Спектри поглинання цих коливань мають максимум на довжинах хвиль відповідно 2,74, 6,27, і 2,66 мкм. Показники поглинання на цих довжинах хвиль досить великі, однак через відсутність високостабільних малогабаритних джерел і приймачів випромінювання ці довжини хвиль при розробці промислових приладів не використовуються. Найбільший інтерес представляє ближній ІЧ-діапазон. Спектр поглинання води у ближній ІЧ-облаті, як показано нижче, складається з ближніх гармонік [3].

Таблиця 2

Показник оптичного поглинання вологи

Довжина хвилі, мкм	Приналежність	Показник поглинання, %
0,76	Вищі гармоніки	0,26
0,97	Вищі гармоніки	0,46
1,19	Комбінаційні складові	1,05
1,45	Комбінаційні складові	26,0
1,94	–	100

Найбільш оптимальною для практичного використання є довжина хвилі 1,94 мкм. Оскільки поглинання води в цьому діапазоні носить характер індукованої поляризації, що супроводжується коливанням атомів, таке явище вважається атомною поляризацією. Вода, що потрапляє в речовину, змінює її спектр. Із різних спектральних характеристик сухої речовини (рис. 1.1, крива 1) і при вологості 9 % H_2O (крива 2) виходить, що на довжині хвиль 1,94 мкм вода має значний коефіцієнт поглинання. Тому, якщо контрольований об'єкт опромінювати ІЧ-випромінюванням з такою довжиною хвилі і вимірювати потужність пройденого чи відбитого потоку випромінювання, то вона буде змінюватися залежно від вологості.

Всередині вимірювальних камер оптичних сенсорів вологості досліджуваний газ може прокачуватись і вологість вимірюється безпосередньо через ступінь проходження променів випромінювання від випромінювача до приймача випромінювання. Але, частіше, волога, яка міститься у досліджуваному газі, фіксується всередині камери у вигляді конденсата на поверхні охолоджуваного скла чи дзеркала. Прикладом такого сенсора вологості може слугувати конструкція наступного приладу [4]:

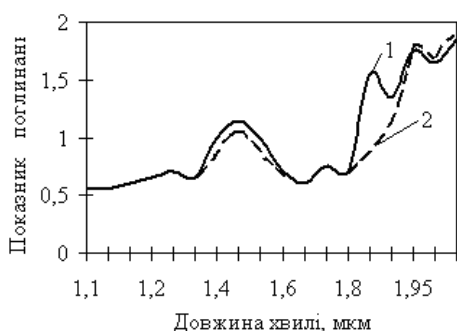


Рис. 1. Діаграма залежності показника поглинання води від довжини хвилі

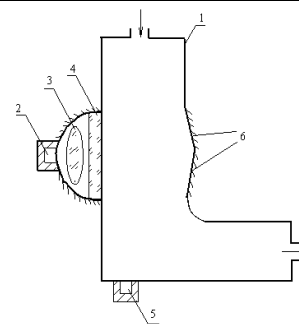


Рис. 2. Конденсаційний гігрометр

Досліджувані газ подають у вимірювальну „L”- подібну циліндричну вимірювальну камеру 1 під надлишковим тиском. При протіканні через камеру 1, газ приймає температуру, рівну температурі дзеркала Френеля 6. При охолодженні дзеркала Френеля 6 до моменту випадання конденсату світловий потік, що випромінюється джерелом випромінювання і формується за допомогою фокусувальної лінзи 3 і світлофільтра 4, відбивається від стінки камери 1, виконаної у вигляді дзеркал Френеля і потрапляє на фотоприймач 5, при цьому спостерігається максимальне значення амплітуди електричного сигналу, що формується на фотоприймачі під дією випромінювання від джерела.

Істотним недоліком спектрографічних сенсорів вологості є необхідність калібрування оптичної системи з точністю, на порядок меншою довжини хвилі випромінювання. Такі сенсори вологості є дуже чутливими до одиничних і серійних ударів, вібрації при транспортуванні та під час виробничого процесу.

Відомо [5], що вміст води в речовині чи матеріалі визначає його фізичні властивості – теплові, механічні, електрофізичні та інші. Функціональний зв'язок цих властивостей з вмістом води є основою побудови різних типів вимірювачів вологості, що працюють на принципі опосередкованого визначення вологості речовин і матеріалів (метод визначення фізичних властивостей матеріалів залежно від вологості оточуючого середовища). П'єзоелектричні вологоміри і гігрометри, як приклад таких сенсорів, працюють за принципом залежності частоти коливань кварцового генератора від його власної маси. Кристал кварцу покривають шаром речовини, яка вибірково сорбує молекули пари (рис. 3). Зміна частоти коливань резонатора залежить від маси поглинутої пари, а, отже, і концентрації води у атмосфері [5]:

$$\Delta F = -kF^2 \Delta m, \quad (3)$$

де F – власна частота коливань генератора (звичайно 5-15 МГц), k – коефіцієнт, що залежить від геометрії кристалу, Δm – зміна маси кристалу. Звичайно дана зміна частоти досягає кількох кілогерц.

Для вимірювання відносної вологості в межах 0-100 % в якості сорбентів використовують гідрофільні полімери, наприклад полікапроамід, товщина плівки сорбенту не перевищує кількох мкм, постійна часу вимірювань складає 15 с, похибка – до 3 %. На точність вимірювань негативно впливає наявність в газі парів спиртів, аміаку та ін. полярних речовин. Перевагою таких сенсорів є стійкість до дії вологості, мала маса і габарити. Використовують при виробництві бензола, толуола, циклогексану тощо. Прикладом такого сенсора може слугувати сенсор вологості, зображений на рис. 1.10 [25].

З метою метеорологічних спостережень можуть використовуватись сенсори вологості деформаційного типу, які використовують властивість деяких речовин змінювати свої лінійні розміри по мірі зміни вологості оточуючого середовища.

Прикладом такого сенсора може слугувати наступна конструкція:

Нитка з вологочутливого матеріалу закріплена між кінцями дуги 1 з пружного матеріалу. Один з кінців за допомогою шарнірів закріплений на напрямних 3 для вертикально-горизонтального переміщення. До другого кінця стержня приєднано до зажиму 4, який тримає нитку, при цьому можливе сковзання. На середині жорстко закріплений стержень з феромагнетика 5, навколо якого розташована катушка індуктивності 6, яка може використовуватись для безпосереднього вимірювання, або включена в коливальний контур. Рисунок даного приладу [6]:

Психрометричний метод один з найстаріших методів визначення вологості атмосферного повітря призначений для вимірювання відносної вологості газу (частіш за все повітря) при значеннях температури вище 273 К і оснований на залежності вологості повітря від різниці температур сухого і вологого термометрів [17]. При цьому температура вологого термометра залежить від інтенсивності випаровування

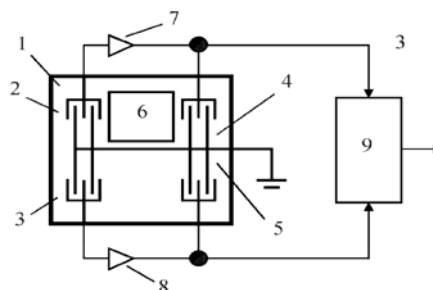


Рис. 3. Сорбційний сенсор вологості:
На даному рисунку: 1 – п'єзокристалічна підкладка; 2,3 – збуджуючі електроди; 6 – чутливе покриття; 7, 8 – підсилювачі; 9 – змішувач

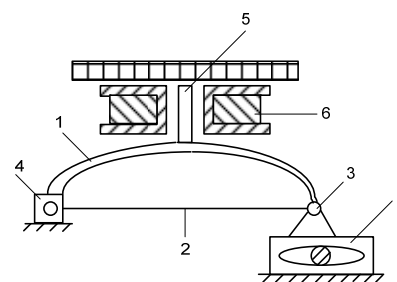


Рис. 4. Деформаційний вологомір

води зі зволоженої поверхні. Між тиском і температурою існує залежність:

$$p = p' - AP(t_c - t_e), \quad (4)$$

де p – парціальний тиск води в досліджуваному газовому середовищі при температурі сухого термометра t_c ; p' – тиск насичених парів води при температурі вологого термометра t_e ; P – загальний тиск, A – психрометричний коефіцієнт, який залежить від властивостей досліджуваного газу і конструктивних особливостей чутливого елемента.

На точність і надійність метода впливає ряд факторів: точність термометра, швидкість вітрового потоку, освітленість, розміри, форма і зволоженість фітіля, взаємне розташування термометрів, температура і чистота води. В якості термочутливих елементів використовують термопари, термометри опору, напівпровідникові терморезистори і термодіоди.

На сучасному етапі розвитку технологій до виробничих автоматизованих вимірювальних систем, окрім метрологічних, висуваються ще економічні вимоги, вимоги мінімізації об'ємних розмірів, здатності до інтеграції різнопланових вимірювальних систем о одному корпусі в рамках одного вимірювального приладу.

Таким вимогам можуть відповідати сорбційні сенсори фізичних величин. Чутливим елементом таких сенсорів можуть слугувати різноманітні як полімерні органічні плівки (поліемілід) [патент японії], так і шари напівпровідникового матеріалу [7].

В даному транзисторі роль вологочутливого елемента відіграє польовий транзистор, у якого один з шарів під затворного діелектрика створено з вологочутливого полімера поліімїда. Використання активного елемента в якості первинного перетворювача має деякі переваги: активні елементи змінюють свої параметри залежно від рівня зовнішнього подразника, підвищення технологічності виготовлення, усунення додаткових паразитних характеристик (опір додаткових контактних площадок, розподілені активний і реактивний опір струмоведучих доріжок та інші).

При подачі на керувальні електроди напруги, яка відповідає відкриттю каналів проходження струму, між стоковими і витоківими областями, через польовий транзистор протікає струм, параметри якого залежать від конструктивних характеристик польового транзистора. Серед таких параметрів є його реактивний опір. Його величина залежить від властивості матеріалу, на основі якого сформований польовий транзистор і властивостей пліткових затворів.

В наш час досить широко вивчаються властивості пористого кремнію та його двоокису як універсального газочутливого елемента. Так, в роботах [8], представлені результати дослідження вологочутливості шару пористого двоокису кремнію, сформованого на кремнієвій підкладці:

Як бачим з рис. 6, ємність МДН-структури з шаром пористого окису кремнію має широкі межі (від 0 до 1580 пФ) зміни ємності при зміні рівня вологості від 0 до 100%. Тому використання шару пористого окису кремнію є доцільним для виробництва сенсорів вологості як для домашнього, так і для промислового використання.

Прикладом сенсорів вологості, в яких чутливим матеріалом є шар пористого двоокису кремнію, може слугувати двоізотворна вологочутлива МДН-транзисторна структура, у якій чутливим елементом є пористого двоокису кремнію [9]:

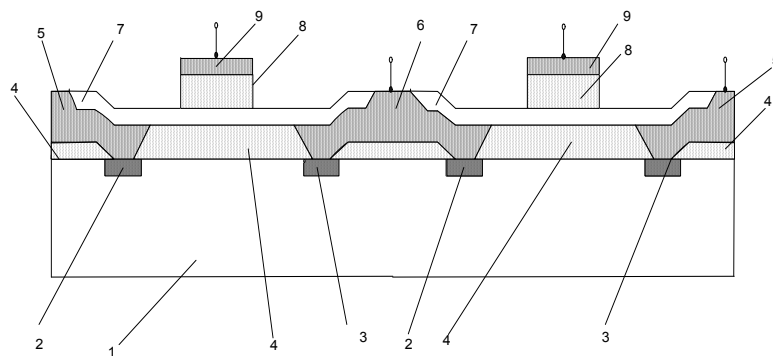


Рис. 7. Гігрометричний сенсор на польовому транзисторі:

На рис. 7 відповідними цифрами позначені елементи: 1 – підкладка; 2 – області витоку; 3 – область стоку; 4 – плівка SiO_2 ; 5 – провідні плівки; 6 – сумішена стоково-витоківова плівка; 7 – плівкові затвори; 8 – чутливі шари з пористого SiO_2 ; 9 – керувальні електроди.

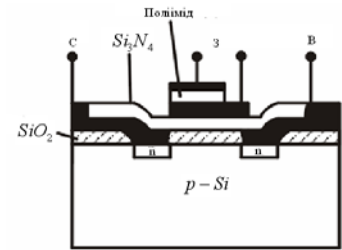


Рис. 5. Сенсор вологості на основі МДН-структури

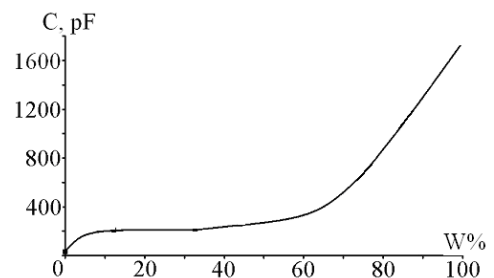


Рис. 6. Залежність ємності структури $n-Si-porSi-Al$ залежно від вологості оточуючого середовища

Запропонований первинний перетворювач вологості являє собою по суті двохзатворний МДН-транзистор, у якого реактивна складова повного опору (і, як наслідок, частотні характеристики) залежать від рівня вологості оточуючого середовища. Так, волога, адсорбована шаром підзатворного діелектрика з пористого окису кремнію, змінює коефіцієнт діелектричної проникності всього шару підзатворного діелектрика, а, отже, його ємність.

Перевагою такої конструкції сенсора вологості є висока точність (чутливий елемент сенсора вологості і активний елемент самої виміральної схеми знаходяться в рамках одного пристрою, чим зменшується вплив на вимірювання розподілених паразитних параметрів схеми), а також висока фізична і хімічна стійкість, зумовлена використанням в якості конструктивного матеріалу кремнію і його окису, що дозволяє використовувати даний сенсор і в атмосфері агресивних технологічних газів (наприклад, хлорвмісних).

Висновки

Розглянута класифікацію методів вимірювання вологості газів атмосферного пониженого тиску, а також розглянуті конструкції сенсорів вологості, які реалізують дані методи вимірювання вологості. Запропоновано конструкцію первинного перетворювача вологості на основі двохзатворної МДН-структури, в якій вологочутливим матеріалом є підзатворний шар пористого окису кремнію.

Література

1. Сазонов А.А. Автоматизация технологического оборудования микроэлектроники. / Сазонов А.А. Корнилов Р.В., Кохан Н.П., Лукичев А.Ю., Осокин В.И., Таран В.А., Федукін В.А. / – М.: Высш. шк., 1991. – С. 331.
2. Виглеб Г. Датчики: Пер. с нем. / Виглеб Г. – М.: Мир, 1989. – С. 196.
3. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности. / Мухитдинов М. Н., Мусаев Э.С. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 96.
4. Патент України № 40956, кл. G01N 21/53. Конденсаційний гігрометр / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Л.В. Крилик, А.Ю. Савицький, – 27.04.09. – бюл. № 8.
5. Пинхусович Р. Л. Методы и приборы для измерения относительной влажности. / Пинхусович Р. Л., Коломыйцев В. П. / – М.: Энергоатомиздат, 1977. – С. 413.
6. А.с. 1288557 СССР, МКИ G 01 N 19/12 Датчик влажности / М.Д. Мгалоблишвили, Т.И. Берелашвили, К.С. Сибашвили, Г.А. Варганов. – 07.02.87. Бюл. № 41.
7. Патент № 59-23598 Японії, кл. G01N27/02, Напівпровідниковий сенсор вологості / Такаси Нуэ, опубл. 13.03.92.
8. Тугов Е.А. Гетерофазные процессы при взаимодействии пористого кремния с водой / Тугов Е.А // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2009. – Т.9. – Вып. 1. – С. 131-136.
9. Патент України № 40955, кл. G01N 21/53. Гігрометричний сенсор на польовому транзисторі / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Л.В. Крилик, А.Ю. Савицький, – 27.04.09. – бюл. № 8.

Надійшла 23.4.2011 р.

УДК 621.396

А.А. ТАРАНЧУК, А. В. ДОБРОВОЛЬСКИЙ
Хмельницький національний університет

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЗАТУХАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ПРИ ЇХ ПОШИРЕННІ НА ТРАСАХ РУХОМОГО ЗВ'ЯЗКУ

В роботі зроблений огляд існуючих методів обчислення медіанного значення енергетичних втрат, що виникають при розповсюдженні радіохвиль на трасах рухомого зв'язку та надані рекомендації по їх ефективному використанню при розрахунках та розгортанні радіомереж.

The review of existing methods of calculation median value of the power losses arising at diffusion of radio waves on line of mobile communication is made, references on their effective utilization are made at calculations and expansion of radio networks.

Ключові слова: радіозв'язок, затухання, електромагнітні хвилі; інтерференція, дифракція

Вступ

У зв'язку з активним впровадженням нових перспективних радіосистем рухомого зв'язку проблема адекватного моделювання поширення радіохвиль у середовищі є досить актуальним завданням. На теперішній час розгорнуто і продовжує впроваджуватися велика кількість різноманітних засобів рухомого зв'язку: D-AMPS, GSM, IS-95 (CDMA), SmartTrunk, TETRA, EDACS, 3G/UMTS і т.п. Інформація про затухання електромагнітних хвиль при їх поширенні на трасах рухомого зв'язку необхідна для забезпечення якісного функціонування радіоелектронних засобів, для рішення питань електромагнітної сумісності, оцінки