

РОЗДІЛ III. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.391.812

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-156-167

Анатолій Сатюков, Анатолій Приступа, Микола Мошель

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПРОХОДЖЕННЯ СИГНАЛІВ НВЧ ДІАПАЗОНУ

Актуальність дослідження. Постійний розвиток НВЧ систем зумовлює появу новітніх пристроїв та методів вимірювання параметрів різноманітних матеріалів. Сфера застосування техніки, що працює в діапазоні надвисоких частот, стрімко розширюється. Велика кількість сучасних систем працюють у діапазоні 2-8 ГГц в межах приміщення та між різними інженерними спорудами. Ефективність їхньої роботи пов'язана з проходженням високочастотних сигналів через різні навколишні перешкоди – стіни, двері, перекриття тощо. Тому актуальним завданням є детальне дослідження взаємодії НВЧ сигналів із різними матеріалами. Серед них особливе місце посідає деревина, що має високу здатність до поглинання вологи, а вміст води в матеріалі навіть у незначних кількостях суттєво впливає на його фізико-хімічні й електричні властивості.

Постановка проблеми. Поширення радіохвиль у приміщенні має складний характер, оскільки сучасна будова являє собою неоднорідний простір, заповнений хаотично розташованими напівпровідними перешкодами. Здебільшого в точку прийому потрапляє не одна хвиля, а кілька – за рахунок віддзеркалень від різних поверхонь і дифракції на перешкодах. Розуміння впливу різних факторів на поширення радіохвиль має безліч практичних застосувань, від вибору частот для міжнародного короткохвильового телерадіомовлення до проектування надійних мобільних телефонних систем, радіонавігації та експлуатації радіолокаційних систем та систем моніторингу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання розповсюдження радіохвиль у повітрі вивчені дуже ретельно й повно. Визначено затухання сигналів залежно від частоти. Це дозволило створити надійні і оптимально структуровані канали бездротового зв'язку, що працюють на частотах, для яких затухання сигналу найменше.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Останніми роками дедалі більше розвиваються системи радіозв'язку, які працюють в умовах розповсюдження радіохвиль за наявності різноманітних перешкод. Наприклад, мобільний зв'язок чи бездротовий Інтернет, які працюють зокрема в приміщеннях і будівлях. Такі параметри каналів радіозв'язку, як потужність передавачів, конструкція та розміщення антен тісно пов'язані з взаємодією радіохвиль з різноманітними перешкодами. Такими перешкодами, зокрема, можуть бути різні будівельні конструкції – стіни, перекриття та ін. Вони послаблюють потужність радіохвиль, що проходять крізь них. Значення такого послаблення може суттєво залежати від рівня вологості матеріалу перешкоди. Наведені в різних літературних джерелах дані здебільшого не враховують цього аспекту.

Мета дослідження полягає у вивченні впливу вологості дерев'яних матеріалів на рівень послаблення НВЧ сигналів та визначення частот, на яких спостерігається мінімальний рівень послаблення.

Виклад основного матеріалу. У статті проведено експериментальні дослідження з визначення ступеня послаблення НВЧ сигналів дерев'яними матеріалами при різному рівню вологості речовини. Отримані результати порівнювались із проходженням радіохвиль через сухий зразок. Це дало змогу з'ясувати саме вплив зміни вологості на послаблення радіосигналу. Вимірювання проводились в діапазоні частот 2–8 ГГц та зміні вологості зразків від 0 до 8 %.

Проведено аналіз послаблення сигналу від ступеня вологості на окремих частотах. Здійснено порівняння послаблення радіохвиль різними матеріалами з однаковим рівнем вологості.

Висновки відповідно до статті. За результатами експериментальних досліджень було побудовано графічні залежності затухання сигналу від рівня вологості зі збільшенням частоти для обраних порід дерева: дуба, сосни, верби та берези. Отримані дані дозволяють виділити частотні інтервали для оптимальної роботи апаратури.

Ключові слова: НВЧ сигнал; послаблення радіохвиль; дерев'яні матеріали; вологість; експериментальні дослідження.
Рис.: 5. Бібл.: 23.

Актуальність дослідження. Постійний розвиток сучасних технологій призводить до того, що сфера застосування техніки, яка працює в діапазоні надвисоких частот, стрімко розширюється. Велика кількість сучасних НВЧ систем працюють у діапазоні 2-8 ГГц у межах приміщення та між різними інженерними спорудами. Ефективність їхньої роботи пов'язана з проходженням високочастотних сигналів через різні навколишні перешкоди – стіни, двері, перекриття тощо. Тому актуальним завданням є детальне дослідження взаємодії НВЧ сигналів із різними матеріалами. Серед них особливе місце посідає деревина, що має високу здатність до поглинання вологи, а вміст води в матеріалі навіть у незначних кількостях суттєво впливає на його фізико-хімічні й електричні властивості.

Постановка проблеми. Поширення радіохвиль у приміщенні має складний характер, оскільки сучасна будова являє собою неоднорідний простір, заповнений хаотично розташованими напівпровідними перешкодами. Здебільшого в точку прийому потрапляє не одна хвиля, а кілька – за рахунок віддзеркалень від різних поверхонь і дифракції на перешкодах. На сигнали чинить вплив багато різних явищ, пов'язаних із поширенням і розсіюванням радіохвиль на неоднорідностях середовища. Аналітично визначити значення фази й амплітуди цих хвиль для певного моменту часу в певній точці простору надзвичайно важко, тому особливий інтерес становлять експериментальні дані взаємодії НВЧ сигналу з навколишніми матеріалами.

Сучасні будівлі неможливо уявити без дерев'яних конструкцій. Широка сфера застосування деревини визначається її цінними будівельними властивостями. Мала щільність сухої деревини при порівняно великій міцності й жорсткості (вздовж волокон) робить доцільним застосування дерев'яних конструкцій у покриттях громадських, промислових і сільськогосподарських будівель. Екологічна чистота та теплофізичні властивості (мала теплопровідність сухої деревини поперек волокон) робить деревину особливо цінною для будівництва житла, зокрема котеджного типу.

Дерев'яні конструкції дозволяють підвищувати якість будівництва та широко застосувати збірні деталі будь-якої форми і розмірів. Хімічна стійкість сухої деревини виправдовує переважне застосування безметалевих і клеєних дерев'яних конструкцій для покриттів хімічних цехів і складів. Клеєні конструкції є найбільш економічними щодо витрати лісоматеріалу [1].

Розуміння впливу різних факторів на поширення радіохвиль має безліч практичних застосувань, від вибору частот для міжнародного короткохвильового телерадіомовлення до проєктування надійних мобільних телефонних систем, радіонавігації та експлуатації радіолокаційних систем та систем моніторингу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Свого часу були проведені масштабні дослідження з вивчення проходження радіохвиль через атмосферу Землі. Для різних діапазонів були вивчені залежності проходження радіохвиль від географічних та кліматичних факторів, добових та сезонних змін, стану тропосфери та іоносфери при впливі на них космічних явищ. Були виявлені величини послаблення радіосигналів в атмосфері, визначені частоти резонансного поглинання електромагнітних хвиль. Результати висвітлені у багатьох публікаціях [2; 16; 17; 18].

НВЧ-електроніка сьогодні є одним з основних векторів розвитку всієї індустрії електроніки. Це глобальний тренд, що охоплює всі можливі галузі електроніки – від технологій виробництва матеріалів, приладових структур, електронних компонентів до радіоелектронної апаратури, кінцевих виробів, а також систем і комплексів на їх основі [3].

До переліку основних сфер, де спостерігається найбільший розвиток, можна віднести: радіозв'язок (у тому числі радіо і телебачення), радіолокація та радіонавігація, мобільний телефонний зв'язок, телекомунікаційні системи, бездротовий Інтернет, НВЧ розігрів речовини, системи моніторингу тощо.

Для технологічних НВЧ систем нагріву обрано опорну частоту 2,45 ГГц, оскільки при такій частоті молекули води ще «встигають» орієнтуватись за напрямом електричного поля. Бурхливе зростання популярності систем НВЧ нагріву (побутовий варіант – мікрохвильова пічка) привело до того, що в багатьох країнах виділено частотний діапазон, в якому експлуатація НВЧ апаратури не потребує процедури ліцензування. В Україні, як і в деяких інших країнах, межі такого інтервалу відповідають частотам (2,45–2,48) ГГц.

Ринок локальних і персональних систем бездротового ширококутового зв'язку динамічно розвивається з 1998-1999 років. Передусім йдеться про системи Wi-Fi, пізніше були створені та набули популярності інші технології зв'язку: Bluetooth, ZigBee тощо. Пристрої цих стандартів працюють переважно в діапазонах від 2,4 до 5 ГГц [4].

Зростання кількості пристроїв у цьому діапазоні збільшує рівні завад, що змушує виробників звертатися до інших частот. Зокрема, сучасні системи Wi-Fi працюють на частоті 5,5 ГГц.

У 2013 році з'явилися системи зв'язку, що працюють на частотах 6 ГГц і в міліметровому діапазоні.

Важливим напрямом розвитку НВЧ є застосування їх у різноманітних технічних системах, наприклад, у системах позиціонування у виробничих приміщеннях [5], системах моніторингу [6; 7] тощо.

Також системи НВЧ широко використовуються для контролю вологості в непровідних або слабопровідних середовищах: газових середовищах, зерносховищах, текстилю, вугілля тощо [15; 19-23].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Автори свідомо не розглядають увесь велетенський перелік НВЧ пристроїв і систем. Виділено лише ті варіанти, в яких апаратура може працювати в закритих приміщеннях і на її надійність можуть впливати процеси взаємодії радіохвиль із перешкодами.

Отже, електронна техніка, яка є складовою частиною цієї апаратури, буде ефективно функціонувати, якщо при її створенні та в процесі експлуатації будуть враховані аспекти взаємодії електромагнітних хвиль з речовиною, або із середою їх розповсюдження. Водночас можна відзначити певні суперечності в деяких підходах до цього питання.

Як вже згадувалось, питання розповсюдження радіохвиль в атмосфері вивчені ретельно й системно. Це дозволило створити телекомунікаційні системи, надійний космічний зв'язок, різноманітну НВЧ апаратуру тощо [8]. Проте робота НВЧ систем у приміщеннях із великою кількістю перешкод може суттєво відрізнятись від роботи розглянутих вище НВЧ систем. Перешкоди, якими можуть бути різні будівельні конструкції (стіни, перекриття тощо), послаблюють потужність радіохвиль, що проходять крізь них. Ступінь такого послаблення може суттєво залежати від рівня вологості матеріалу перешкоди. Наведені в різних літературних джерелах дані здебільшого не враховують цього аспекту. Ті ж публікації, в яких висвітлено це питання, мають багато недосліджених моментів.

Зокрема, у [9; 10] розглянуто зменшення діелектричної проникності в чистій воді. Проте волога, що містяться в реальних речовинах, зазвичай не повною мірою відповідає такій моделі води. Тому корисно мати більш детальну інформацію про вплив вологості на проходженні НВЧ радіохвиль через різноманітні дерев'яні матеріали.

Мета дослідження. Визначення впливу вологості дерев'яних матеріалів на рівень послаблення НВЧ сигналів та визначення частот із мінімальним рівнем такого послаблення.

Виклад основного матеріалу. Дослідження впливу будівельних матеріалів є продовженням комплексних досліджень, спрямованих на встановлення взаємозв'язків між параметрами НВЧ сигналів на параметрами середовища розповсюдження електромагнітної хвилі. У роботах [11–13] наведено опис експериментальної установки та представлено результати досліджень для стінових будівельних матеріалів. Дослідження з дерев'яними матеріалами проводились на тому ж обладнанні. При визначенні впливу вологості дерев'яних матеріалів на проходженні НВЧ сигналів через них були визначені такі умови:

1. Як зразок були обрані породи дерев, які широко використовуються в будівництві і є типовими представниками кожної відокремленої групи деревини – дуб, сосна, береза та верба.

2. Вологість зразків змінювалась у межах від 1 до 8 %. Більший вміст вологи в звичайних умовах маловірогідний. Він може існувати в поверхневих шарах зовнішніх стін під час атмосферних опадів, а також у вологих підвальних та напівпідвальних виробничих приміщеннях, деяких підземних об'єктах. Для створення апаратури, що може працювати в таких умовах, треба проводити додаткові дослідження, які авторами цієї статті за мету не ставились.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

3. Обрано частотний діапазон (2–8) ГГц, який перекриває робочі частоти наявних технічних та інформаційних систем.

4. Вимірювання ослаблення сигналу, що проходить через експериментальні зразки, проводились для двох положень: волокна розташовані паралельно площині поляризації НВЧ сигналу і перпендикулярно. Зміна розташування досліджуваних матеріалів дозволяє дослідити вплив внутрішньої будови дерева на проходження радіохвиль. Витягнуті волокна деяких порід можуть являти собою своєрідну дифракційну ґратку. Тому взаємна орієнтація волокон і площини поляризації, безумовно, повинна впливати на рівень проходження сигналу. За таких умов детальніше теоретично описати це явище дуже складно через неоднорідність структури. Тому вплив розташування зразків на параметри НВЧ сигналів варто оцінити експериментально.

Вимірювання проводились за стандартною методикою описаною в [11]. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи представлена на рис. 1.

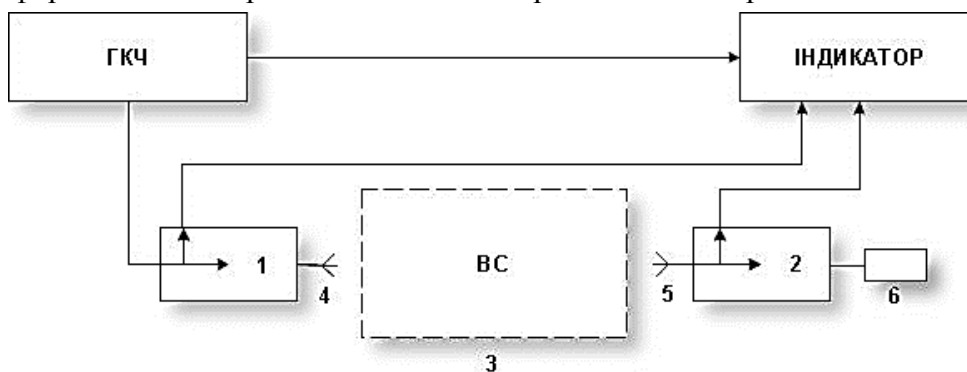


Рис. 1. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи:

1, 2 – спрямований відгалужувач; 3 – вимірювальне середовище; 4 – передавальна антена;
5 – приймальна антена; 6 – навантаження узгоджене

НВЧ сигнал з виходу генератора качаючої частоти (ГКЧ) (рис. 1) подається на вхід спрямованого відгалужувача 1, з якого сигнал падаючої хвилі спрямовується на вхід індикатора. З виходу первинного каналу спрямованого відгалужувача 1 НВЧ хвиля подається на передавальну антену 4. Випромінений антеною 4 НВЧ сигнал, проходячи через контрольоване середовище 3, потрапляє на приймальну антену 5 та вхід другого спрямованого відгалужувача 2. З виходу вторинного каналу спрямованого відгалужувача сигнал подається на другий вхід індикатора. На екрані індикатора відображається сигнал, пропорційний відношенню напруг на входах каналів відбитої (послабленої) та падаючої хвилі.

Як передавальні та приймальні елементи використовувались хвилеводно-коаксіальні переходи [12]. Елементи НВЧ тракту (спрямовані відгалужувачі, детекторні головки, випромінювачі, приймальні елементи, узгоджені навантаження) обирались відповідно до діапазону, в якому проводились вимірювання. Зовнішній вигляд експериментальної установки та опис її роботи представлено в [13].

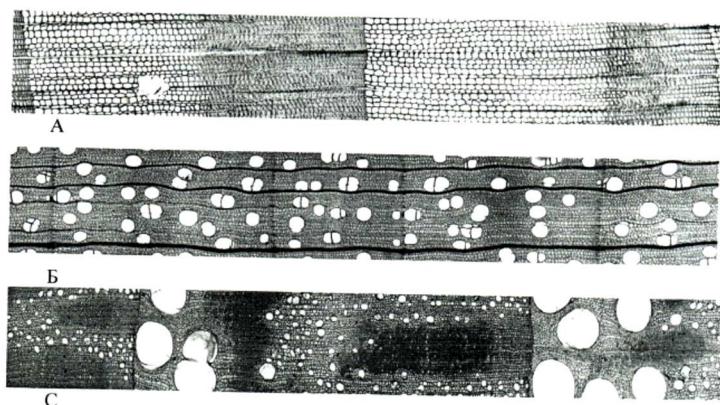
Визначена вологість зразків досягалась таким чином: на добре висушений зразок додавалась певна кількість води відповідно до його маси; після цього зразок витримувався в герметичному стані декілька годин для рівномірного розподілення води в ньому. Таким чином, змінюючи кількість води, вологість зразків встановлювалась від 1 до 8 % з інтервалом через один відсоток.

Як калібрувальну було взято залежність потужності сигналу, що пройшов через сухий зразок. Отримані залежності послаблення НВЧ сигналів дерев'яними матеріалами від частоти сигналу при різній вологості зразків представлені на рис. 3-5. На рис. 3-5 зображена різниця між потужністю сигналу при визначеному рівні вологості й калібрувальною залежністю.

Результати експериментальних досліджень. Досить складний характер експериментальних залежностей можна пояснити наступним. У випадках, коли досліджувалась взаємодія електромагнітних хвиль з чистою водою, взаємодія хвиль із речовиною визначалась насамперед властивостями молекул саме води. На потужність радіохвиль при їх проходженні через реальне вологе середовище впливає ціла низка чинників.

Вода, що потрапляє в речовину, не є чистою водою. Це скоріше специфічний розчин з великою кількістю компонентів. Отже, до взаємодії молекул води з НВЧ хвилями додається ще взаємодія НВЧ хвиль з домішками. Внаслідок цих процесів у вологому матеріалі можуть утворюватись досить різноманітні коливальні системи.

Усі породи дерев поділяються на три групи: хвойні, розсіяносудинні листяні й листяні кільцесудинні. Хвойні породи є менш розвиненими в еволюційному відношенні, ніж представники листяних порід. Деревина хвойних порід відрізняється простою будовою і радіальним розташуванням основних елементів. Деревина листяних порід характеризується великим набором високоспеціалізованих елементів та їх перехідних форм. Розвиток окремих елементів, особливо судин, зміщують сусідні клітини, внаслідок чого деревина листяних порід не має такої правильної будови, яка характерна для деревини хвойних порід [14]. Тому для дослідження проходження НВЧ сигналу через деревину було обрано типових представників вказаних вище груп – сосну, березу, дуб, а також вербу. Поперечні зрізи зразків зображено на рис. 2.



*Рис. 2. Зразки деревини (поперечний зріз):
а – сосна звичайна; б – береза повисла; с – дуб звичайний*

Як наслідок, залежності послаблення НВЧ потужності дерев'яними матеріалами від частоти сигналу при різній вологості зразків мають дуже складний вигляд (рис. 3). При тому ж самому рівні вологості на них спостерігаються як монотонні залежності, так і резонансні ділянки.

Для дуба на частотному інтервалі 6,4–8,0 ГГц (волокна паралельно) затухання сигналу до 5 % вологості є незначним, на відміну від перпендикулярного положення, для якого на цьому проміжку функціональна залежність спадає і на частоті 7,2 ГГц досягає свого максимуму затухання.

Для сосни, розташованої волокнами паралельно площині поляризації, характерним є відсутність різких послаблень або підсилень сигналу. Як і для дуба, незначне підсилення сигналу спостерігається на частоті 2,8 і 3,6 ГГц. На проміжку 3,6–6,0 ГГц 1 % вологості мало впливає на проходження сигналу.

Для берези з розташуванням волокон паралельно на частоті до 3,6 ГГц затухання сигналу для кожного рівня вологості буде найменше, що забезпечить надійну роботу апаратури. Зі збільшенням частоти спочатку спостерігається різке підвищення затухання, так само як у зразків дуба (волокна паралельно та перпендикулярно), верби (перпендикулярно), сосни (перпендикулярно). Від 4,0 ГГц графічні характеристики монотонно спадають, досяга-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

ючи максимуму затухання для вологості 7-8 % на частоті 7,0 ГГц. Для 1-2 % вологості на проміжку 6,2-8,0 ГГц затухання сигналу становить лише 0,5 дБ. Перпендикулярно розташований зразок берези має найбільший робочий діапазон частот – від 3,0 до 5,6 ГГц.

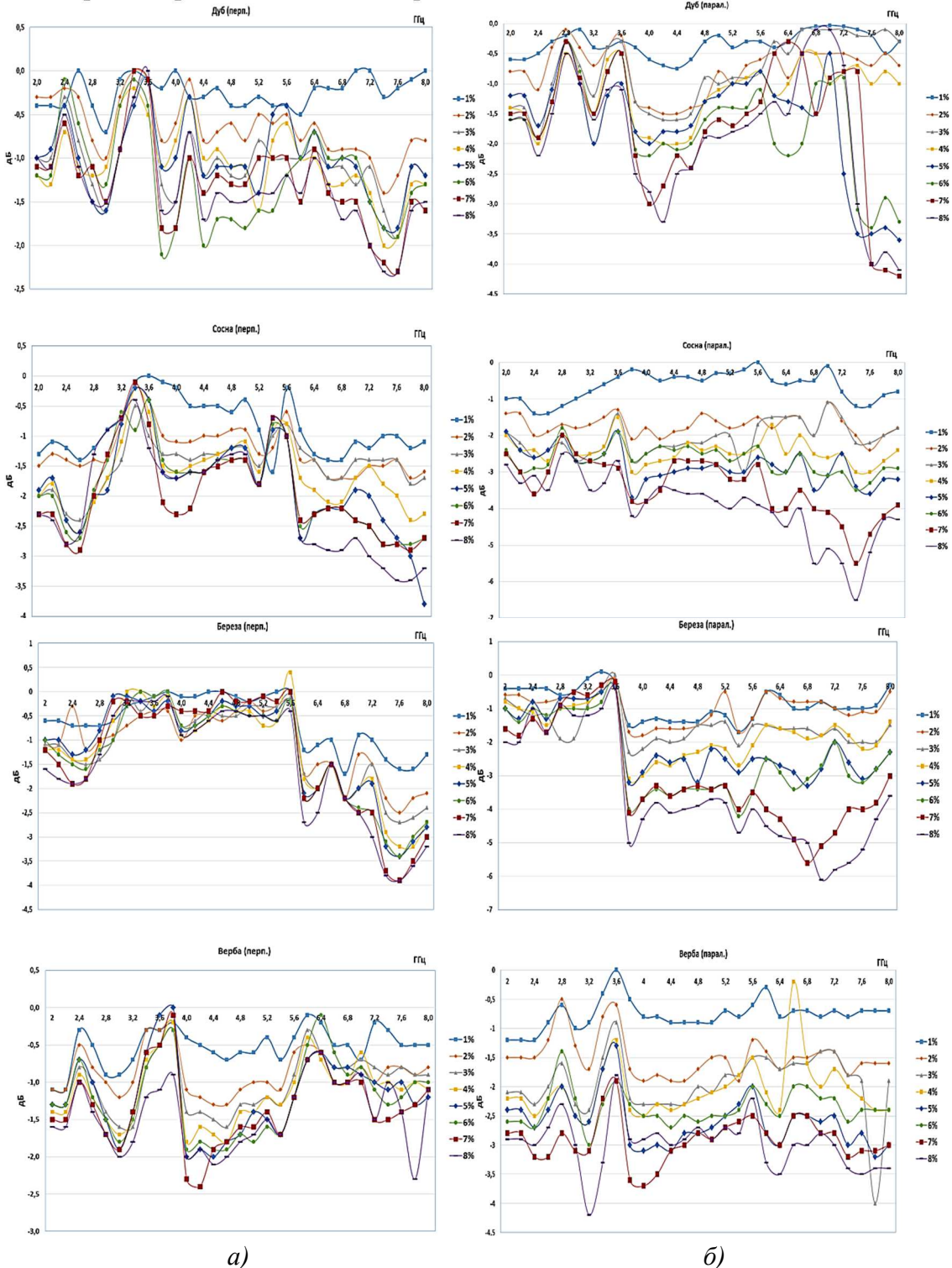


Рис. 3. Залежності послаблення НВЧ сигналу від частоти сигналу при різній вологості для двох положень обраних зразків:

а – волокнами перпендикулярно площині поляризації; б – волокнами паралельно площині поляризації

За отриманими графічними залежностями, затухання сигналу, що проходить через вербу, подібне до характеристик дуба. Обидва зразки, при паралельному розташуванні, мають чіткі піки посилення сигналу – на частоті 2,8; 3,6 ГГц. Зі збільшенням частоти

сигнал плавно затухає, але прослідковується певна стабільність рівнів затухання для всіх відсотків вологості – вони змінюються на $\pm 0,5$ дБ. Відмінним від дуба є відсутність ділянок із різким підсиленням або затуханням, починаючи від частоти 4,0 ГГц. Побудовані залежності для верби, що була розташована перпендикулярно, також подібні до залежностей дуба (волокнами паралельно). Перший пік підсилення сигналу змістився на частоту 2,4 ГГц, зі збільшенням частоти графіки цих матеріалів дуже подібні. Головна відмінність верби (волокнами перпендикулярно) – максимальне затухання сигналу на частоті від 6,4 до 8,0 ГГц становить 0,7 дБ для вологості 1-7 %. Цей результат один із найменших серед усіх досліджених зразків деревини.

За отриманими результатами, що наведені на рис. 3, були побудовані залежності послаблення сигналу дерев'яними матеріалами від рівня вологості для частоти 2,4 ГГц, на якій працює бездротовий Інтернет. Вони показані на рис. 4.

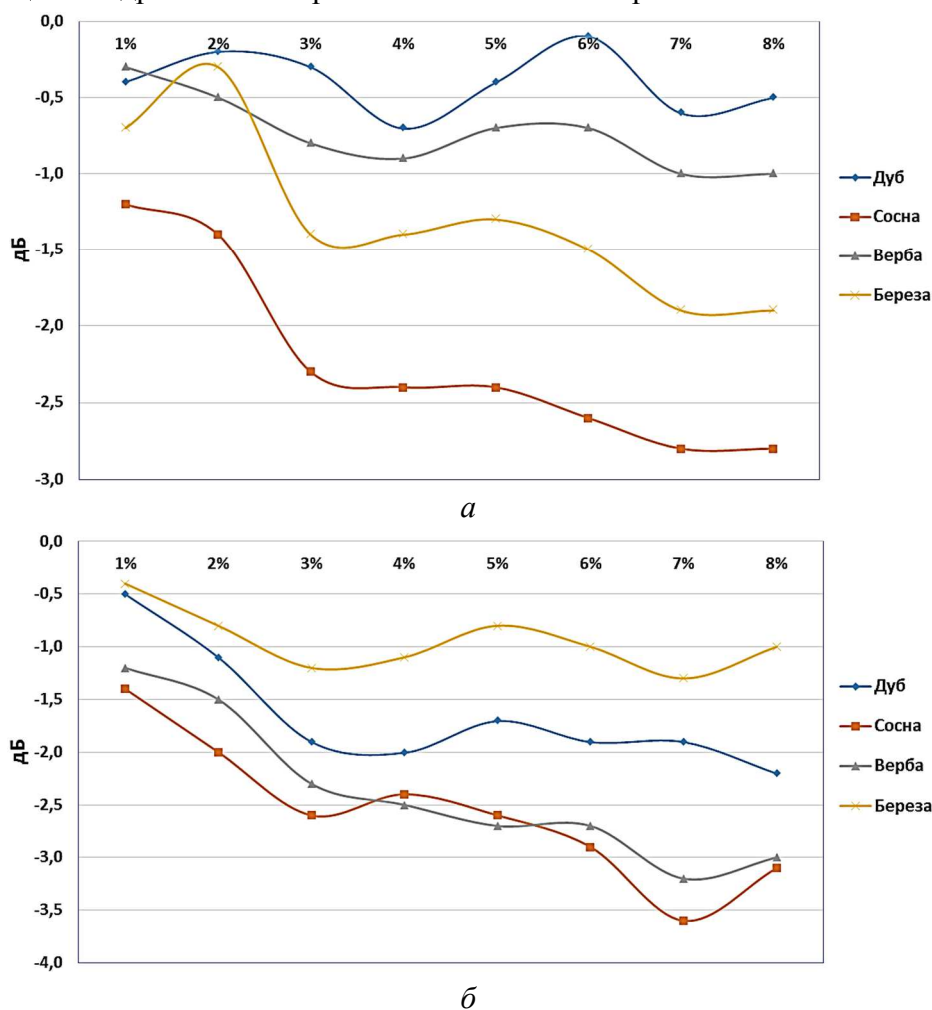


Рис. 4. Залежності послаблення НВЧ-сигналу при частоті 2,4 ГГц від рівня вологості дерев'яними матеріалами: волокнами перпендикулярно площині поляризації (а); волокнами паралельно площині поляризації (б)

Значний вплив вологості на проходження сигналу, при перпендикулярному розташуванні волокон, можна спостерігати для сосни. Збільшення вмісту води до 5 % призводить до значного затухання сигналу, що досягає 2,4 дБ.

Підвищення рівня вологості на частоті 2,4 ГГц для зразків дуба та верби не вносить значний вплив на затухання сигналу в порівнянні з іншими породами. При такому розташуванні спостерігається найкраще проходження сигналу для 6 % вологості.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Для обраних зразків, із розташуванням волокон паралельно, зміна вологості кожного від 1 до 3 % спричиняє стрімке затухання сигналу. Зі збільшенням вологості від 3 % для берези та дуба характерним є збільшення потужності сигналу, що потрапляє в приймальну антену.

Найбільша відмінність результатів залежно від положення зразка деревини спостерігається для берези, для якої затухання сигналу при перпендикулярному положенні досягає 2 дБ (при паралельному – 1,3 дБ).

Варто звернути увагу, що при паралельному розташуванні волокон найкращий матеріал для проходження сигналу – береза, а при перпендикулярному – дуб. Отримані результати слід враховувати для оптимізації роботи системи на обраній частоті 2,4 ГГц.

Також відповідно до результатів, представлених на рис. 2, були побудовані залежності послаблення сигналу дерев'яними матеріалами від частоти при сталих рівнях вологості – від 1 до 8 % (рис. 5).

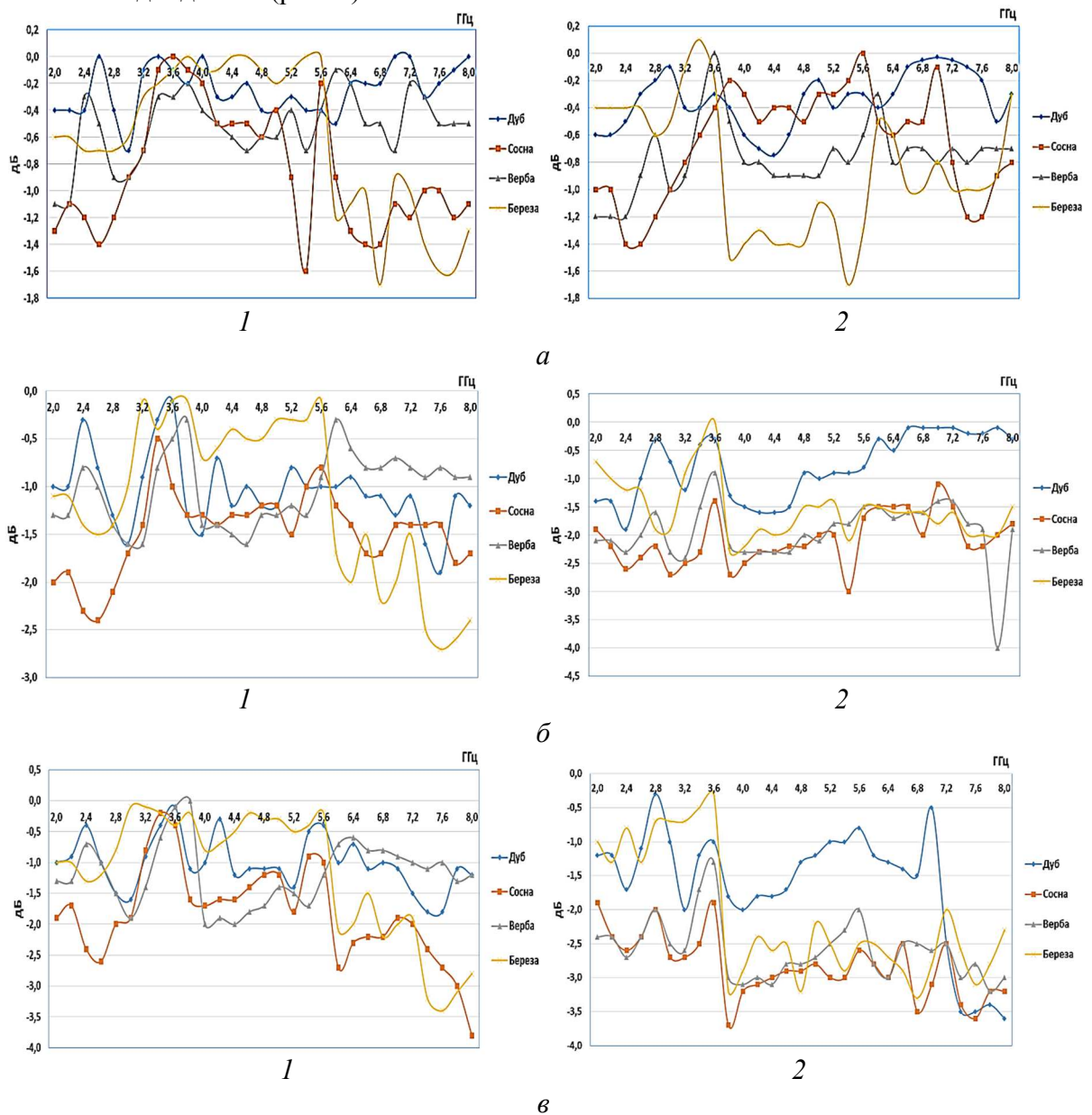


Рис. 5. Залежності послаблення сигналу дерев'яними матеріалами для положення волокон перпендикулярно (1) та паралельно (2) від частоти при сталих рівнях вологості: а – 1 %; б – 3 %; в – 5 %; г – 8 %

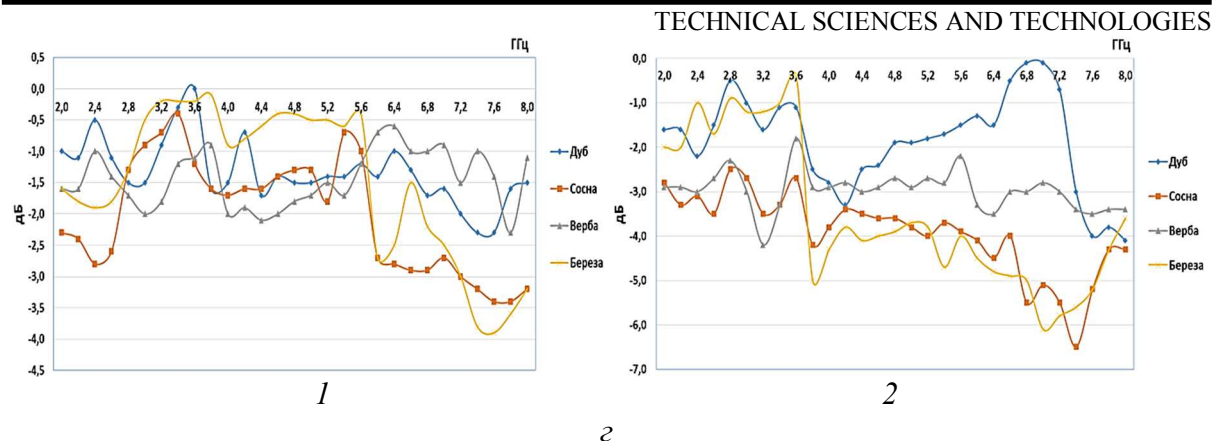


Рис. 5. Аркуш 2

Аналіз цих залежностей показує вплив положення волокон обраних порід дерев до площини поляризації, а саме визначає зони максимумів та мінімумів затухання сигналу.

Для всіх досліджуваних матеріалів, із перпендикулярним розташуванням волокон, можна виділити діапазон 3,4–5,6 ГГц. Саме на таких частотах у більшості матеріалів послаблення сигналу найменше.

Для більшості матеріалів, розташованих волокнами паралельно, можна виділити частоту 2,8 та 3,6 ГГц, як найбільш придатну для роботи апаратури за рівнем вологості до 8 %. Підвищення вологи деревини твердих порід найменше впливає на роботу НВЧ системи.

Висновки відповідно до статті. Для основних дерев'яних матеріалів: дуб, сосна, верба, береза визначені експериментальні залежності послаблення сигналу НВЧ від вологості в смузї частот 2-8 ГГц.

Значний вплив на проходження сигналу через матеріал чинить зміна положення зразка. Наприклад, для берези затухання сигналу при перпендикулярному положенні досягає 2 дБ, при паралельному – 1,3 дБ. Варто звернути увагу, що для частоти 2,4 ГГц при паралельному розташуванні волокон найкращий матеріал для проходження сигналу – береза, а при перпендикулярному – дуб.

Дані залежності можуть використовуватись як інформаційні характеристики систем неруйнівного контролю чи діагностики стану технічних об'єктів та створення каналів радіозв'язку, які працюють у будівлях та спорудах. Враховуючи розташування зразків деревини різних порід відносно антен, можна забезпечити оптимальну роботу НВЧ системи.

Список використаних джерел

1. Маилян Р. Л., Маилян Д. Р., Веселев Ю. А. Строительные конструкции: учебное пособие. Изд. 2-е. Ростов н/Д: Феникс, 2005. 880 с.
2. Харвей А. Техника СВЧ. Москва: Сов. радио, 1965. 775 с.
3. Мальцев П., Шахнович И. СВЧ-технологии – Основа электроники будущего тенденции и рынки. *ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ*. 2015. № 8. С. 72-73.
4. Шахнович И. Системы беспроводной связи 5G: телекоммуникационная парадигма, которая изменит мир. Краткие тезисы. *ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ*. 2015. № 7. С. 48–55.
5. Кудряшов А. А. Затухание радиоволн и беспроводные технологии построения промышленных сетей диапазона 2,4 ГГц. *Вісник ЧДТУ*. 2012. № 4 (61). С. 183-190.
6. Приступа А. Л., Безручко В. М., Велігорський О. А., Ревко А. С., Кришньов Ю. В. Сучасні автономні гідрометеорологічні вимірювальні станції: монографія. Чернівці: Видавець Брагинець О.В., 2019. 180 с.
7. Аўтаматызаваныя аўтаномныя станцыі гідраметэаралагічнага/экалагічнага маніторынгу навакольнага асяроддзя : манаграфія / Ю. В. Крышнеў і ін. Гомель: Pitmedia, 2019. 198 с.
8. Нарытник Т., Бабак В., Ильченко М., Кравчук С. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах. Київ: Техніка, 2000. 298 с.
9. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. Москва: Высш. школа, 1986. 367 с.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

10. Вязьмитинов И. А., Мирошниченко Е. И., Сытник О. В. Результаты исследований ослабления энергии электромагнитных волн оптически непрозрачными преградами. *Радиофизика та електроніка*. 2007. Т. 12, № 2. С. 426-434.
11. Сатюков А. І., Приступа А. Л., Ленько Ю. В. НВЧ метод вимірювання вологості об'єктів довільної форми. *Технічні науки та технології: науковий журнал*. 2017. № 2(8). С. 20-28.
12. Сатюков А. І., Приступа А. Л. Використання хвилеводно-коаксиального переходу при вимірюванні вологості тіл з довільною геометрією. *Збірник матеріалів науково-технічної конференції. Фізика, електроніка, електротехніка / Сумський державний університет*. Суми, 2014. С. 51.
13. Сатюков А., Приступа А., Журко В., Бивалькевич М. Результати експериментальних досліджень впливу вологості стінових будівельних матеріалів на проходження радіохвиль НВЧ діапазону. *Технічні науки та технології: науковий журнал*. 2018. № 1(11). С. 252-263.
14. Сурикова Н. С., Вилипп Е. М. Стрoение дерева и древесины. Методические указания. Томск: Изд-во Томского архитектурно-строительного университета, 2004. 46 с.
15. Carullo, A. Ferrero and M. Parvis. A microwave system for relative humidity measurement. *IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.99CH36309)*, Venice, 1999. Vol. 1. P. 124-129.
16. Reyes-Guerrero J. C., Ciamulski T. Influence of temperature on signal attenuation at microwaves frequencies underwater. *OCEANS 2015 - Genova*, Genoa, 2015. P. 1-4.
17. Asp A., Hentilä T., Valkama M., Pikkuvirta J., Hujanen A., Huhtinen I. Impact of Concrete Moisture on Radio Propagation: Fundamentals and Measurements of Concrete Samples. *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Oulu, Finland, 2019. P. 542-547.
18. Pozar D. M. Microwave engineering, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
19. Kon S., Horibe M., Kato Y. Dynamic measurements of moisture content using microwave signal and its verification. *2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, Ottawa, ON, 2016. P. 1-2.
20. Jiang Y., Zhang Y. Research on Microwave Measurement for Grain Moisture Content in Granary. *2009 IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (case 2009)*. Zhangjiajie, 2009. P. 327-330.
21. Pengfei L., Bo W., Junfeng J. The Application of Microwave Detecting Textile Moisture Content. *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Changsha, 2010. P. 706-709.
22. Menke F., Knochel R. New density-independent moisture measurement methods using frequency-swept microwave transmission. *1996 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. San Francisco, CA, USA, 1996. Vol. 3. P. 1415-1418.
23. Vermeulen C., Hancke G. P. Continuous measurement of moisture in nonconducting materials. *Conference Record IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Metropolitan, NY, USA, 1992. P. 419-421.

References

1. Mailyan, R. L., Mailyan, D. R., Veselev, Yu. A. (2005). *Stroitelnye konstruksii [Building construction]* (2nd ed.). Rostov n/D: Feniks [in Russian].
2. Kharvey, A. (1965). *Tekhnika SVCH [Microwave technology]*. Moscow: Sov. radio [in Russian].
3. Maltsev, P., Shakhnovich, I. (2015). SVCH-tekhnologii – Osnova elektroniki budushchego tendentsii i rynki [Microwave Technology – The Basics of Future Electronics Trends and Markets]. *ELEKTRONIKA – ELECTRONICS*, 8, 72-73 [in Russian].
4. Shakhnovich, I. (2015). Sistemy besprovodnoy svyazi 5G: telekommunikatsionnaya paradigma, kotoraya izmenit mir [5G wireless systems: the telecommunication paradigm that will change the world]. *ELEKTRONIKA - ELECTRONICS*, 7, 48–55 [in Russian].
5. Kudryashov, A. A. (2012). Zatokhaniye radiovoln i besprovodnyye tekhnologii postroyeniya promyshlennykh setey diapazona 2,4 GGt [Radio wave attenuation and wireless technologies for building industrial networks in the 2.4 GHz band]. *Visnik CHDTU. – Bulletin of CHSTU*, 4 (61), 183-190 [in Russian].
6. Prystupa, A. L., Bezruchko, V. M., Veligorskii, O. A., Revko, A. S., Krishnov, Yu. V. (2019). *Suchasni avtonomni hidrometeorologichni vimiriuvalni stantsii [Modern autonomous hydrometeorological measuring stations]*. Chernihiv: Braginecz O. V. [in Ukrainian].

7. Kryshneŭ, Yu. V. (Ed.) (2019). *Aŭtamatyzavanyya aŭtanomnyya stancyi gidrameteara-lagichnaga / ekalagichnaga manitoryngu navakolnaga asyaroddzya [Automated autonomous hydro-meteorological / ecological monitoring environment station]*. Gomel: Pitmedia [in Belorussian].
8. Narytnik, T., Babak, V., Ilchenko, M., Kravchuk, S. (2000). *Mikrovolnovye tekhnologii v tele-kommunikatsionnykh sistemakh [Microwave technology in telecommunication systems]*. Kyiv: Tekhnika [in Russian].
9. Pasyнков, V. V., Sorokin, V. S. (1986). *Materialy elektronnoy tekhniki [Electronic Materials]*. Moscow: Vyssh. shkola [in Russian].
10. Vyazmitinov, I. A., Miroschnichenko Ye. I., Sytnik O. V. (2007). Rezultaty issledovaniia oslableniia energii elektromagnitnykh voln opticheski neprozrachnymi pregradami [The results of studies of the attenuation of the energy of electromagnetic waves by optically opaque barriers]. *Radiofizika ta yelektronika – Radiophysics and electronics*, 12 (2), 426–434 [in Russian].
11. Satiukov, A. I., Prystupa, A. L., Lenko, Yu. V. (2018). NVCh metod vymiryuvannia volohosti ob'ektiv dovilnoi formy [Microwave method of measuring moisture objects of the arbitrary form]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2(8), 20–28 [in Ukrainian].
12. Satyukov, A. I., Pristupa, A. L. (2014). Viktorystannya khvilevodno-koaksial'nogo perekhodu pri vimiryuvanni vologosti til z dovil'noyu geometrieyu [The use of waveguide-coaxial transition when measuring the humidity of bodies with arbitrary geometry]. *Naukovo-tekhnichna konferentsia: Fizika, yelektronika, elektrotekhnika – Scientific and technical conference: Physics, electronics, electrical engineering*. Sumy, 51 [in Ukrainian].
13. Satyukov, A., Pristupa, A., Zhurko, V., Bivalkevich, M. (2018). Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen vplyvu vologosti stinovykh budyvelnykh materialiv na prokhozhenia radiokhvil NVCH diapazonu [Results of experimental studies of the Moisture influence for wall building materials on the passage of microwave radio waves]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2(8), 20–28 [in Ukrainian].
14. Surikova, N. S. (2004). *Stroenie dereva i drevesiny [The structure of wood and wood]*. Tomsk: TABU [in Russian].
15. Carullo, A. Ferrero, and Parvis, M. (1999). A microwave system for relative humidity measurement. *IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.99CH36309)* (vol. 1, pp. 124-129). Venice.
16. Reyes-Guerrero, J. C., Ciamulski, T. (2015). Influence of temperature on signal attenuation at microwaves frequencies underwater. *OCEANS 2015 – Genova* (pp. 1-4). Genoa.
17. Asp, A., Hentilä, T., Valkama, M., Pikkuvirta, J., Hujanen, A., Huhtinen, I. (2019). Impact of Concrete Moisture on Radio Propagation: Fundamentals and Measurements of Concrete Samples. *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)* (pp. 542-547). Oulu, Finland.
18. Pozar, D. M. (2012). *Microwave engineering*. Hoboken, NJ, USA: Wiley.
19. Kon, S., Horibe, M., Kato, Y. (2016). Dynamic measurements of moisture content using microwave signal and its verification. *2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)* (pp. 1-2). Ottawa, ON.
20. Jiang Y., Zhang, Y. (2009). Research on Microwave Measurement for Grain Moisture Content in Granary. *2009 IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (case 2009)* (pp. 327-330). Zhangjiajie.
21. Pengfei, L., Bo, W., Junfeng, J. (2010). The Application of Microwave Detecting Textile Moisture Content. *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation* (pp. 706-709). Changsha.
22. Menke, F., Knochel, R. (1996). New density-independent moisture measurement methods using frequency-swept microwave transmission. *1996 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* (vol. 3, pp. 1415-1418). San Francisco, CA, USA.
23. Vermeulen, C., Hancke, G. P. (1992). Continuous measurement of moisture in nonconducting materials. *1992 Conference Record IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference* (pp. 419-421). Metropolitan, NY, USA.

Anatoliy Satukov, Anatoliy Prystupa, Mykola Moshel

RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE INFLUENCE OF WOOD MATERIAL MOISTURE ON THE TRANSMISSION OF UHF BAND SIGNALS

Relevance of the research. Continuous development of microwave systems causes the emergence of new devices and methods for measuring the parameters of various materials. The field of application of equipment operating in the range of high frequencies is expanding rapidly. A large number of modern systems operate in the range of 2-8 GHz within the premises and between various engineering structures. Their performance is related to the passage of high-frequency signals through various surrounding obstacles - walls, doors, ceilings, etc. Therefore, the urgent task is a detailed study of the interaction of microwave signals with different materials. The wood, which has a high ability to absorb moisture, and the water content of the material, even in small quantities significantly affects its physical, chemical and electrical properties, is of particular importance.

Formulation of the problem. The propagation of radio waves in a room is complex, since the modern structure is a non-uniform space, filled with randomly arranged semiconductor obstacles. As a rule, not one wave gets to the point of reception, but several - due to reflections from different surfaces and diffraction on obstacles. Understanding the influence of various factors on the propagation of radio waves has many practical applications, from frequency selection for international shortwave broadcasting, to the design of reliable mobile telephone systems, radio navigation and operation of radar and monitoring systems.

Analysis of recent research and publications. The issues of radio wave propagation in the air have been studied very carefully and thoroughly. Frequency attenuation of signals is determined. This made it possible to create reliable and optimally structured wireless channels operating at frequencies with the least signal attenuation.

Selection of previously unsettled parts of the general problem. In recent years, radio systems have been increasingly developed, that operate in the presence of radio interference in the presence of various interferences. For example, mobile or wireless internet, including in premises and buildings. Radio channel parameters such as transmitter power, antenna design and placement are closely linked to the interference of radio waves with various interferences. Such obstacles, in particular, can be different building structures - walls, ceilings, etc. They reduce the power of the radio waves passing through them. The value of such attenuation can significantly depend on the Moisture level of the obstruction material. Data from various literary sources largely ignore this aspect.

The purpose of the study is the effect of wood moisture on the level of microwave attenuation and determining the frequencies at which the minimum attenuation is observed.

Presenting main material. The authors conducted experimental studies to determine the degree of microwave signals attenuation by wood at different levels of Moisture. The results obtained were compared with the passage of radio waves through a dry sample. This made it possible to find out precisely the effect of the change in Moisture on the attenuation of the radio signal. Measurements were made in the frequency range of 2 - 8 GHz and changes in humidity of the samples from 0 to 8 %.

The analysis of the attenuation of the signal from the degree of humidity at individual frequencies is carried out. We compared the attenuation of radio waves with different materials with the same humidity level.

Conclusions. According to the results of experimental studies, graphical dependences of the signal attenuation on the humidity level with increasing frequency for the selected tree species (oak, pine, willow and birch) were made. The obtained data allows to allocate frequency intervals for optimal operation of the equipment.

Keywords: microwave signal; attenuation of radio waves; wooden materials; humidity; experimental studies.

Fig. : 5. Bible: 23.

Сатюков Анатолій Іванович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, метрології та фізики, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Satukov Anatoliy – PhD of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Associate Professor of Information and Measurement Technology Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035, Chernihiv, Ukraine).

E-mail: ivtmif@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2901-1152>

Приступа Анатолій Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, метрології та фізики, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Prystupa Anatoliy – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Information and Measurement Technology Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: a.l.prystupa@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>

Мошель Микола Васильович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Чернігівського національного технологічного університету (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Moshel Mykola – Doctor in Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Information and Measurement Technologies of Chernihiv National Technological University (95, Shevchenko Str., Chernihiv, 14035, Ukraine).

E-mail: ivtmif@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8775-5793>