

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

Матяш Олександр Анатолійович

Допускається до захисту:
Завідувач кафедри
інформаційних технологій,
к.т.н., доцент,
_____ Нескородева Т. В.
«__» _____ 20__ р.

Дослідження діелектричних характеристик асфальтового дорожнього покриття.

Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Науковий керівник:

Сергієнко С.П.,
к.ф.-м.н., доцент кафедри
інформаційних технологій

(підпис)

Оцінка : _____ / _____ / _____
(бали/за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____
(підпис)

Вінниця 2021

АНОТАЦІЯ

Матяш О.А. Дослідження діелектричних характеристик асфальтового дорожнього покриття. Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Освітня програма «Технології інтернету речей», Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2021.

У кваліфікаційній (бакалаврській) роботі запропоновано та побудовано електроіндуктивний активатор нагріву асфальтового дорожнього покриття. Завдяки проведеній роботи було обрано найбільш оптимальне рішення для побудови пристрою для нагріву асфальтового дорожнього покриття.

ABSTRACT

Matyash O.A Investigation of dielectric characteristics of asphalt pavement. Specialty 105 "Applied Physics and Nanomaterials". Educational Program "Internet of Things Technologies", Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2021.

In the qualification (bachelor's) work the electroinductive activator of heating of an asphalt road covering is offered and constructed. Due to the work was chosen the most optimal solution for the construction of a device for heating the asphalt pavement.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
РОЗДІЛ 1.ТЕОРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТНИХ МАТЕРІАЛІВ	6
1.1 Основні теорії діелектриків	6
1.2 Електрична сприйнятливність та діелектрична проникність	6
1.3 Механізми діелектричної поляризації	7
1.4 Діелектрична релаксація	9
РОЗДІЛ 2.ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІТУМУ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОНУ	12
2.1. Діелектричні вимірювання та аналіз бітуму	12
2.2. Застосування на основі діелектричних властивостей бітуму	14
2.3. Діелектричні вимірювання та аналіз.....	17
2.4 Складова частина породи	17
2.5 Асфальтобетонні суміші.....	19
2.6 Моделі діелектричного змішування для асфальтобетонних сумішей	22
2.7 Застосування на основі електричних властивостей асфальтобетону	26
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОІНДУКТИВНОГО АКТИВАТОРА НАГРІВУ АСФАЛЬТА.....	31
3.1 Побудова електроіндуктивного активатора нагріву асфальта.....	31
3.2 Проведення вимірів параметрів асфальту.....	32
3.3 Розрахунки вимірів параметрів асфальтового дорожнього покриття.....	34
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ	36

Вступ

Під впливом різноманітних застосувань, починаючи від характеристики матеріалу і закінчуючи неруйнівним випробуванням умов дорожнього покриття, можна знайти значну кількість досліджень щодо власних електричних властивостей асфальтобетонного матеріалу та його складових (наприклад, бітумного в'язучого та кам'яних заповнювачів). Тим часом концепція багатофункціональної системи дорожнього покриття набирає обертів протягом останнього десятиліття, зокрема, функціональне використання асфальтобетонного матеріалу з підвищеними електричними властивостями є одним із нових напрямків. Електричне посилення зазвичай здійснюється шляхом штучного введення певної провідності в звичайні асфальтобетонні матеріали, наприклад, шляхом додавання різних електропровідних добавок. Одним із типових застосувань провідного асфальту є те, що матеріал може бути швидко нагрітий різними електричними або електромагнітними (ЕМ) методами нагрівання і застосовуватися для таких, як активне танення снігу / розморожування на дорожніх покриттях, загоєння на місці (мікро) тріщини на тротуарах, швидке виправлення вибоїн, переробка матеріалу в кінці його експлуатації. Хоча зростаючий науковий інтерес до електричних властивостей асфальтових матеріалів відсутня чітка і цілісна картина електричної сприйнятливості асфальтобетонних матеріалів у широкому діапазоні частот, що спричиняє незрозуміле розуміння поведінки матеріалів, а також недооцінене значення області досліджень як ціле. Використання електричного нагріву асфальтобетонного покриття на місці його знаходження дозволить знизити кошторис ремонтних робіт і автоматизувати процес ремонту.

Основною метою проекту є дослідження частотних характеристик діелектричної проникності і тангенса діелектричних втрат асфальтового дорожнього покриття для покращення і автоматизації його ремонту .

За умовами технічного завдання необхідно:

- Знайти параметри еквівалентної електричної схеми активатора електричного нагріву асфальтобетонного покриття.
- Дослідити частотні характеристики діелектричної проникності і тангенса діелектричних втрат асфальтового дорожнього покриття.

Актуальність теми полягає у тому що з часом асфальтне покриття втрачає свої механічні властивості, а це дослідження допоможе розробити пристрої для автоматизованого ремонту.

Предметом роботи є експериментальне вимірювання частотних властивостей електричних втрат в асфальті.



РОЗДІЛ 1. ТЕОРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Основні теорії діелектриків

Електропровідність σ простого асфальтобетону в сухому стані становить близько $1,0 \times 10^{-12} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, а відповідно до класифікації матеріалів на основі провідності [1], асфальтобетон є ізолятором. З іншого боку, асфальтобетон вказує на залежні від частоти реакції в електричному полі, а отже, матеріал також можна перевірити за допомогою діелектричних методів. Для того, щоб чітко та послідовно проаналізувати електричні властивості асфальтобетонних матеріалів, основні діелектрики матеріалу представлені нижче як підготовча робота.

1.2 Електрична сприйнятливість та діелектрична проникність

Матеріал класифікується як "діелектричний", якщо він має здатність накопичувати енергію при дії зовнішнього електричного поля. В ізотропному діелектричному середовищі основним рівнянням електричного поля, яке застосовується в будь-якій точці, є [2]:

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 \varepsilon_r E = \varepsilon_0 (1 + \chi^*) E, \quad (1)$$

де D - електричне зміщення в матеріалі внаслідок прикладеного електричного поля E (D також відома як щільність електричного потоку, заряд на одиницю площі, який буде зміщений через шар провідника, розміщений поперек електричного поля); ε_0 , діелектрична проникність вакууму зі значенням $8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$, також звана електричною постійною; поляризація P виражає величину і напрямок електричного моменту на одиницю об'єму, що індукується в матеріалі, дорівнюючи $\varepsilon_0 \chi^* E$ в лінійному діелектричному матеріалі. Електрична сприйнятливість χ^* вказує ступінь поляризації матеріалу у відповідь на електричне поле, яке залежить від частоти і зазвичай визначається в складній площині як:

$$\chi^*(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega). \quad (2)$$

При цьому $\chi'(\omega)$ та $\chi''(\omega)$ є відповідно дійсними та уявними частинами комплексної сприйнятливості $\chi^*(\omega)$. На практиці складна відносна діелектрична проникність, ε_r , частіше використовується для характеристики електричної сприйнятливості матеріалу, яка визначається в частотній області як:

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega). \quad (3)$$

У цьому,

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty(\omega) - \chi'(\omega), \quad (4)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega} - \chi''(\omega), \quad (5)$$

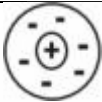
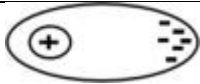






де, ε' - діелектрична проникність матеріалу, вимірювання того, наскільки поляризується матеріал в електричному полі; ε'' - діелектричні втрати, вимірювання того, наскільки дисипативна речовина знаходиться в електричному полі. Зазвичай і) екв. (4) виражає, що загальна діелектрична проникність ε' складається з ε_∞ , що охоплює внески від індукованої (електронної та атомної) поляризації на надзвичайно високій частоті, та χ' , що поляризація молекулярних диполів (та інші) на відносно низькій частоті асортимент; ii) Рівняння (5) виражає, що загальна діелектрична втрата ε'' Сприяють втрати іонної / електронної провідності $\sigma / \varepsilon_0\omega$, а також чисті діелектричні втрати χ'' , спричинені локалізованими та рухливими рухами диполів. Коефіцієнт втрат $\tan \delta$ зазвичай використовується для кореляції ε'' з ε' і, $\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$. Згадані поляризації мають бути введені в наступному підрозділі.

1.3 Механізми діелектричної поляризації

Залежно від хімічного складу, а також частоти прикладеного електричного поля, в діелектричному матеріалі можуть бути задіяні різні поляризації, включаючи такі, як електронна поляризація, атомна поляризація, дипольна (орієнтаційна) поляризація, а також міжфазна поляризація [3]. Ці механізми поляризації, як графічно проілюстровано в таблиці 1, коротко описуються наступним чином:

- *Електронна поляризація.* Зазвичай електрони обертаються навколо атомного ядра випадковим і симетричним способом. Якщо в подальшому застосувати електричне поле, електрони змістяться по відношенню до ядра і створюватимуть тимчасові дипольні моменти в атомах, спричиняючи електронну поляризацію. Електронна поляризація відбувається за дуже невеликий проміжок часу, що відповідає рівню частоти видимих та ультрафіолетових світлових хвиль.
- *Атомна та іонна поляризації.* Молекули утворюються, коли атоми зв'язуються між собою різними силами. Ексцентричний розподіл електронних хмар може призвести до того, що атоми в молекулі набувають зарядів. Коли застосовується електричне поле, атоми можуть зміщуватись і створювати дипольні моменти. Подібно до атомної поляризації, іонна поляризація відбувається, коли атоми пов'язані між собою іонними зв'язками. Атомна / іонна поляризація відбувається на нижчій частоті, ніж електронна поляризація, як правило, в діапазоні довжин хвиль інфрачервоного та видимого світла.
- *Дипольна (орієнтаційна) поляризація.* Деякі молекули мають дипольні моменти навіть за відсутності електричного поля, які називаються постійними дипольними моментами. В електричному полі молекула з постійними дипольними моментами може відчувати силу крутного моменту і орієнтуватися в цілому, що призводить до виникнення поляризації. Дипольна (орієнтаційна) поляризація - явище низької частоти, оскільки молекулам потрібен час, щоб зорієнтуватися.
- *Міжфазна (Максвелл-Вагнер) поляризація.* Для неоднорідних матеріалів з незначною провідністю (таких як сипучі породи або асфальтобетон), складна діелектрична здатність ще більше зростає на дуже низькій частоті, що може бути обумовлено ефектом Максвелла-Вагнера. Згідно з [4], ефект Максвелла-Вагнера стосується зарядів, накопичених на межі розділу між двома середовищами, що відрізняються провідністю, коли струм протікає по межі розділу, створюючи ефект макроскопічної поляризації.

Таблиця 1 . Схематична ілюстрація механізмів поляризації.

Механізми поляризації	Відсутність електричного поля ($E = 0$)	З електричним полем $\leftarrow (E \neq 0) \rightarrow$
Електронний		
Атомна або іонна		
Орієнтаційний (або дипольний)		
Міжфазний		

Таблиця 1 зображує діелектричну спектроскопію цих залежних від частоти механізмів поляризації загальним чином. Всі ці механізми поляризації можуть мати місце в неоднорідних матеріалах, таких як асфальтобетон. При фактичному вимірі на діелектричну спектроскопію матеріалу можуть впливати такі фактори, як мікроструктура матеріалу, температура та наявність вологи.

1.4 Діелектрична релаксація

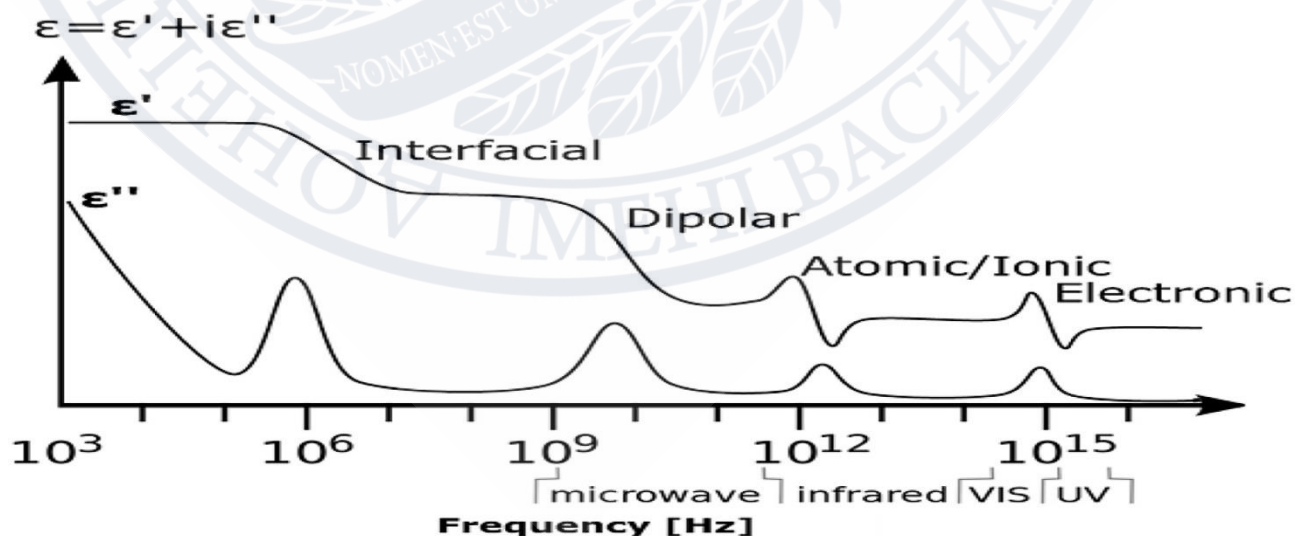


Рис.1 . Загальна ілюстрація діелектричної спектроскопії.

Як графічно проілюстровано на рис. 1, важливою характеристикою діелектричної поляризації є її частотна залежність у змінному електричному полі, яка також відома як діелектрична релаксація. Математично, коли зовнішнє електричне поле прикладено до діелектричного середовища з дипольними моментами, $\epsilon_r(\omega)$ можна виразити так: [5 , 6]:

$$\frac{\epsilon_r(\omega) - \epsilon_\infty}{\epsilon_s - \epsilon_\infty} = \int_0^\infty \frac{-d\Phi(\tau)}{dx} \exp(-i\omega\tau), \quad (6)$$

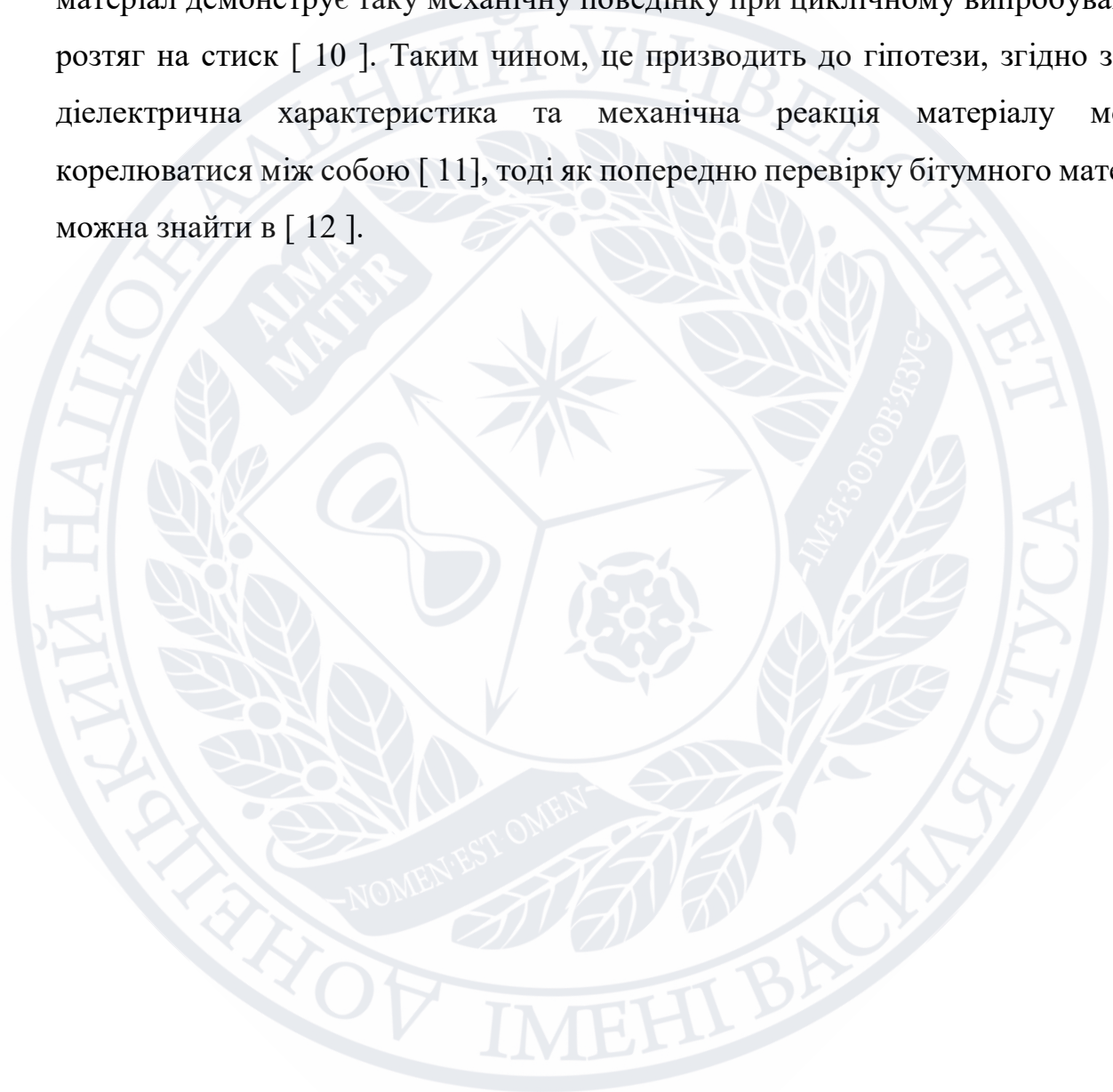
де, ϵ_∞ представляє діелектричну проникність на дуже високих частотах, на яку диполі не вистачає часу для реагування; ϵ_s - статична діелектрична проникність при нульовій частоті, а τ - час релаксації, який дозволяє диполям повернутися до випадкового стану орієнтації після видалення електричного поля. $\Phi(\tau)$ - кореляційна функція, яка асоціює коливання поляризації зі складною діелектричною проникністю. Зокрема, і) для чистого матеріалу з одиничним часом релаксації τ зазвичай спостерігається симетрична поведінка релаксації, і $\Phi(\tau)$ може бути виражена в експоненціальній формі у часовій області, яка читається: $\Phi(\tau) = \exp(-\tau/\tau)$. ii) Для систем із сильно взаємодіючими диполями (наприклад, композитні полімери) існує асиметрична поведінка релаксації; у багатьох випадках таких $\Phi(\tau)$ може бути описана функцією Кольрауша-Вільямса-Ваттса (KWW), яка звучить так: $\Phi(\tau) = \exp(-(\tau / \tau_{KWW})^{\beta_{KWW}})$. При цьому $\beta_{KWW} = 1$ є параметром розтягування ($0 < \beta_{KWW} \leq 1$), що призводить до асиметричного розширення $\Phi(\tau)$, а коли $\beta_{KWW} = 1$, він зменшується до попереднього експоненціального спаду; τ_{KWW} час розслаблення. Для ілюстрації, застосувавши $E(\tau) = \exp(-\tau/\tau)$ (у якому $\beta_{KWW} = 1$) до рівняння (6) отримана відома модель Дебая для простих матеріальних систем (наприклад, чистої води [7 , 8]) [9]:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{(1 + i\omega\tau)}, \quad (7)$$

з яких дійсну та уявну частини можна отримати як:

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{(1 + \omega^2\tau^2)}, \text{ і } \epsilon''(\omega) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{(1 + \omega^2\tau^2)} \omega\tau. \quad (8)$$

Варто згадати, що подібне розслаблення могло б існувати при механічній реакції матеріалу під впливом динамічного навантаження. У зв'язку з цим накопичувальна (реальна) частина $E(\omega)'$ та втратна (уявна) частина $E(\omega)''$ комплексного модуля $E(\omega)$ лінійного в'язкопружного матеріалу мають функції відповіді, подібні до рівняння (8). Зокрема, було доведено, що асфальтобетонний матеріал демонструє таку механічну поведінку при циклічному випробуванні на розтяг на стиск [10]. Таким чином, це призводить до гіпотези, згідно з якою діелектрична характеристика та механічна реакція матеріалу можуть корелюватися між собою [11], тоді як попередню перевірку бітумного матеріалу можна знайти в [12].



РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІТУМУ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОНУ

2.1. Діелектричні вимірювання та аналіз бітуму

Бітум є побічним продуктом нафтопереробного заводу, займаючи близько 5% ваги асфальтової суміші. Зазвичай бітум можна приймати як суміш "твердих" компонентів з великими молекулярними розмірами (асфальтени та смоли) та "м'яких" компонентів з меншими молекулярними розмірами (ароматичні та насичені речовини). Залежно від діапазону частот електричного поля та температури, бітум демонструє різноманітну діелектричну поведінку, а резюме яких подано наступним чином:

- У високочастотному діапазоні (рівень ГГц), де присутні атомна та електронна поляризації, діелектрична проникність ϵ' різних типів бітуму (незайманого, витриманого або модифікованого полімером) дуже мала, що зазвичай залишається на рівні $2,6 \sim 2,8$ і мало коливаються [13]. При низькій частоті активізується дипольна поляризація в бітумі, переважно полярними молекулами асфальтенів та смол [[14] , [15] , [16]]. Вимірювання в [17] показують, що при кімнатній температурі ϵ' бітуму коливається в межах $3,2 \sim 2,6$ на частоті $10^6 \sim 10^2$ Гц. шляхом підвищення температури від 20°C до 100°C , спостерігається невелике збільшення ϵ' (близько 10%), як показано з вимірювань на рис. 3(а). Порівняння ϵ' на низькій частоті (з дипольною поляризацією) з такою на високій частоті (без дипольної поляризації) показує, що в загальній поляризованості бітуму домінує електронна + атомна поляризація, тоді як вклад молекулярних диполів невеликий, добре узгоджуючись з оцінка за допомогою постійного методу Хамакера [18].

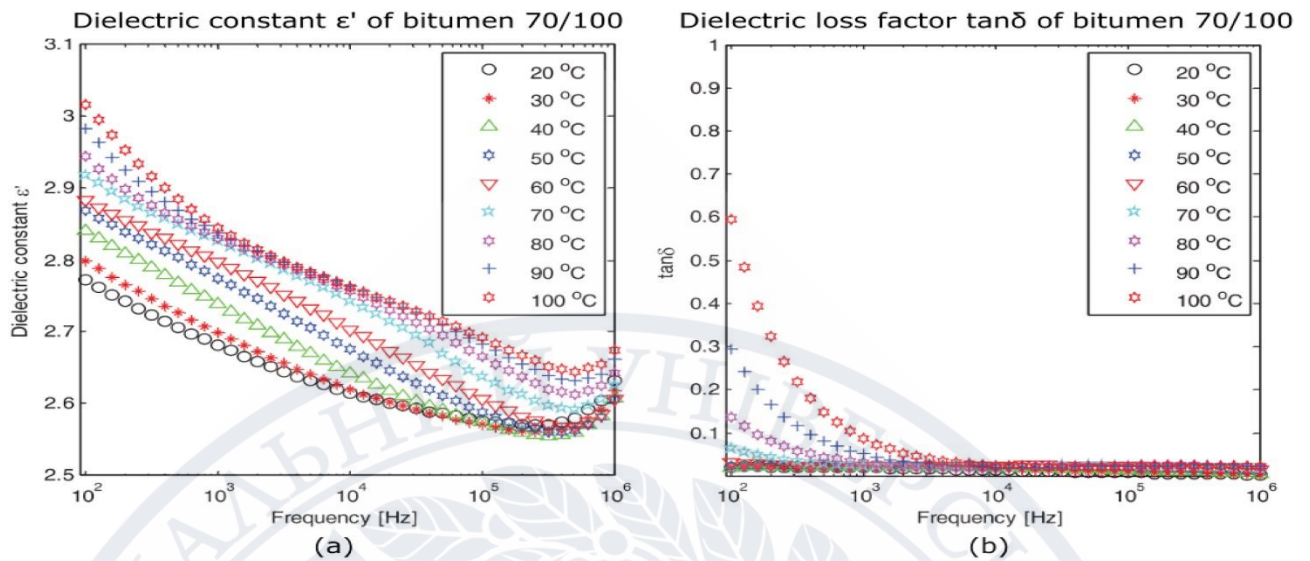


Рис.3 . Діелектрична спектроскопія бітуму в діапазоні низьких частот ($10^2 \sim 10^6$ Гц): (a) Діелектрична проникність ϵ' та (b) Коефіцієнт діелектричних втрат $\tan \delta$.

- Діелектричні втрати ϵ'' бітуму, які, як за рахунок дипольної поляризації, так і провідності (переважно від асфальтенів [15 , 19]), дуже малі при кімнатній температурі і можуть бути незначними. Однак при підвищеній температурі провідність σ бітуму можна значно підвищити, різко спричиняючи діелектричні втрати на кінці низької частоти. Тенденцію можна краще відобразити відповідно до результату вимірювання коефіцієнта втрат на рис. 3 (b).
- Щоб ближче розглянути температурну залежність діелектричної характеристики бітуму в низькочастотному діапазоні, на рис. 4 наведені подальші основні криві ϵ' та ϵ'' бітуму. При цьому на основі використання принципу часово-температурної суперпозиції отримані дані ϵ' і ϵ'' при різних температурах були зміщені до еталонної температури 20 о С, використовуючи ті ж коефіцієнти зсуву, отримані за відомим рівнянням Арреніуса . (17) (Для уточнення зростання ϵ' на кінці низької частоти обумовлений ефектом поляризації електрода, а не внутрішньою поляризацією бітуму).

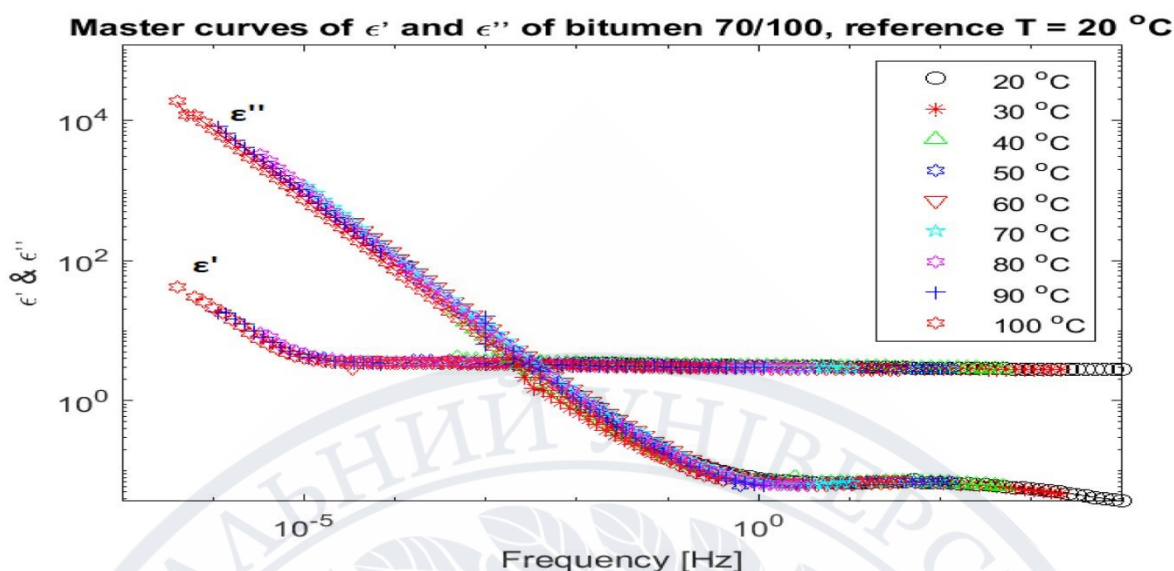


Рис.4 . Відповідність часу та температури діелектричної характеристики бітуму в діапазоні низьких частот.

2.2. Застосування на основі діелектричних властивостей бітуму

Вважається, що багато фізичних (особливо механічних) властивостей бітуму обумовлені полярною природою системи [[20] , [21] , [22]], і відповідно до цієї передумови кореляція між діелектричною реакцією бітуму та його цікавою темою була механічна реакція. Наприклад, у роботі [12] комплексна відповідність та комплексна діелектрична проникність бітуму моделювались за допомогою того самого рівняння дробової моделі. У [23 , 24], подальшу порівняння в'язкості та комплексної діелектричної проникності бітумів, модифікованих основою та SBS, було встановлено, що суперпозиція реологічних даних за часом та температурою дає ідентичні коефіцієнти зсуву та діелектричні дані. Цей зсув може допомогти розрізнити „реальну” діелектричну проникність, замасковану поляризацією електрода, через перекриття головної кривої в'язкості з головною кривою діелектричної проникності. Більше того, на міцність зчеплення бітум-заповнювач, як вважалося, впливає полярна природа бітуму [25]. Відповідно, дослідження в [26] спробував передбачити потенціал адгезії бітумного сполучного на основі його низькочастотної поляризованості. При цьому, проводячи низькочастотне діелектричне випробування та випробування поверхневого покриття на кварцових заповнювачах, спостерігали лінійну

залежність між коефіцієнтом діелектричних втрат бітуму $\tan \delta$ та його зоною покриття на поверхні заповнювача. Окрім цих механічних досліджень, деякі інші різноманітні додатки також можуть бути інформативними та надалі узагальнені наступним чином:

- *Обробка бітуму мікрохвильовим нагріванням.* Мікрохвильове опалення зазвичай використовується в харчовій промисловості. У цьому способі швидкість випромінювання мікрохвильової енергії лінійно пропорційна діелектричних втрат ϵ'' середовища [27]. На основі цього було випробувано ряд прикладних досліджень бітумного матеріалу. Наприклад, у роботі [28] мікрохвильовка була досліджена як простий і швидкий метод опосередкованого визначення: i) загальної полярності та ii) вмісту сірки та сульфїду в бітумі. У роботі [29] мікрохвильове нагрівання використовувалось для імітації короточасного та довгострокового старіння бітуму, тоді як було відзначено покращення економії часу кондиціонування (до 70%) порівняно зі стандартними методами старіння. Більше того, це було запропоновано в [30], що адгезію бітуму з заповнювачем можна поліпшити, використовуючи ефект поляризації мікрохвильової обробки.
- *Моніторинг затвердіння бітумної емульсії.* Діелектрична спектроскопія широко обговорювалась для моніторингу процесу затвердіння в умовах полімерної реакції [31] та гідратації цементу [32]. У процесі затвердіння бітумної емульсії вода поступово випаровується і призводить до злиття частинок бітумної емульсії; в результаті цього здійснюється поступовий розвиток механічної міцності матеріалу. Для прогнозування та моніторингу ступеня затвердіння може допомогти хороша кореляція між вмістом води та складною діелектричною проникністю бітумної емульсії, деякі експериментальні аналізи можна знайти в [33]. У [34], метод далі застосовувався для моніторингу процесу затвердіння стружкових

ущільнень (бітумна емульсія + заповнювачі), в якому покладался на розвиток електричного опору в залежності від часу.

- *Аналіз поглинання каучуково-бітумної суміші.* Відхідний каучуковий матеріал можна додавати в асфальтобетонні суміші для поліпшення характеристик бітумного в'язучого, тоді як під час дослідницького аналізу взаємодія каучук-бітум є важливою проблемою. У роботі [35] мікрохвильова діелектрична спектроскопія була використана для вивчення якісних змін молекулярних фракцій бітуму, що зумовлені поглинанням каучуком. У порівнянні з іншими методами хімічного аналізу повідомлялося про діелектричну техніку з перевагами економії часу аналізу та використання розчинника. Більше того, дослідження в [36 , 37] показують, що мікрохвильова обробка може допомогти порушити поверхню вулканізації гумової крихти і тим самим покращити сумісність порошків гумової крихти з бітумом.

2.3. Діелектричні вимірювання та аналіз

Об'ємна діелектрична проникність типової асфальтобетонної суміші є результатом як складових матеріалів (в'язучого, кам'яних заповнювачів, мінеральних наповнювачів, порожнеч), так і умов (наприклад, вологи) [38]. У цьому підрозділі спочатку перевірятимуться електричні властивості сипучих порід, а потім обговорюватимуться питання щодо асфальтобетону. Підкреслена важливість дослідження електричних властивостей сипучих порід обумовлена кількома причинами, якими є:

- 1) електричні властивості асфальтобетонної суміші глибоко визначаються її складовою порід, яка має високу об'ємну частку та високе значення діелектричної проникності порівняно з до інших складових;
- 2) насипні породи та асфальтобетонні матеріали є одночасно мікроструктурно неоднорідними;
- 3) загалом, гірські породи електрично більш вивчені і зрозумілі, ніж асфальтобетон, згідно з базою знань авторів.

2.4 Складова частина породи

Природні породи складаються з твердих речовин (наприклад, силікатів та оксидів), пор (заповнених повітрям або рідиною), а також розривів на межі розділу. Завдяки мікроструктурній неоднорідності гірські матеріали є електрично складними.

На високочастотному рівні (\sim ГГц) комплексна діелектрична проникність різних природних (сухих) порід демонструє незначну частотну залежність, тоді як значення ϵ' в основному складають близько $4 \sim 10$, а значення ϵ'' коливаються в межах $0,01 \sim 0,50$ [[39] , [40] , [41] , [42]]. Тим часом виявлено хімічний склад і щільність, що визначають діелектричні властивості гірських порід на рівні частоти \sim ГГц. Наприклад, вимірювання в [41] показують, що найбільш

значущими складовими при визначенні ϵ' силікатних порід є SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 і Na_2O ; важливими оксидними складовими при визначенні ϵ' є Fe_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O та MgO . Вимірювання в [42] вказують, що об'ємна щільність значною мірою впливає на ϵ' (а не на ϵ'') гірських порід, тоді як більша щільність поступається вищій ϵ' .

При нижчому рівні частоти ($\sim \text{МГц}$) складність поведінки діелектричної проникності гірських порід стає більш сприйнятливою через ефекти, що виникають внаслідок її неоднорідності. Дослідження показали, що в цьому діапазоні частот іонні заряди накопичуються на межі розділу і призводять до поляризації Максвелла-Вагнера (МВт), що збільшує об'ємну діелектричну проникність гірських порід [4, [43], [44], [45]]. Процес релаксації поляризації МВ у гірських породах може бути далі описаний моделлю Дебая (див. Рівняння (7)) [4]. При ще нижчому діапазоні частот ($\sim \text{кГц}$ і нижче) омична провідність, що виникає від іонних зарядів, піднімає ϵ'' порід до аномально високих. Для ілюстрації, загальні сюжети ϵ' і ϵ'' звичайних гірських порід у порівнянні з частотою далі наведено на рис. 5, наступне [46]. Слід також пам'ятати, що водоносні породи мають ще більш складну діелектричну поведінку на низьких частотах. Зазвичай, завдяки сильному поглинанню твердої поверхні, вода, що прилягає до фази твердої породи, зменшує переорієнтацію в електричному полі, утворюючи зв'язаний шар; додаткова вода поверх поглинутої води утворила б ще один вільно пов'язаний шар, орієнтований на заряд, і іонні заряди із вільної води можуть накопичуватися і обмінюватися в пов'язаних і вільно шарах [47]. Механізми поляризації, засновані на міграції та дифузії іонних зарядів в електричних шарах, можуть бути застосовані для врахування аномально високих ϵ' і ϵ'' вологих порід на дуже низьких частотах (кГц), тоді як поляризація Максвелла-Вагнера все ще зберігається в більш високому діапазоні частот (МГц) [48]. Емпірично вказано степеневу залежність діелектричної проникності ϵ' від вмісту вологи згідно з вимірами на частотах $4 \text{ МГц} \sim 60 \text{ кГц}$ [49]. При цьому ϵ' гірських порід демонструє різке збільшення з підвищенням вологи з жодної до

характерного вмісту близько 0,15%, а потім поступово насичується збільшенням вологи далі до 1,0%.

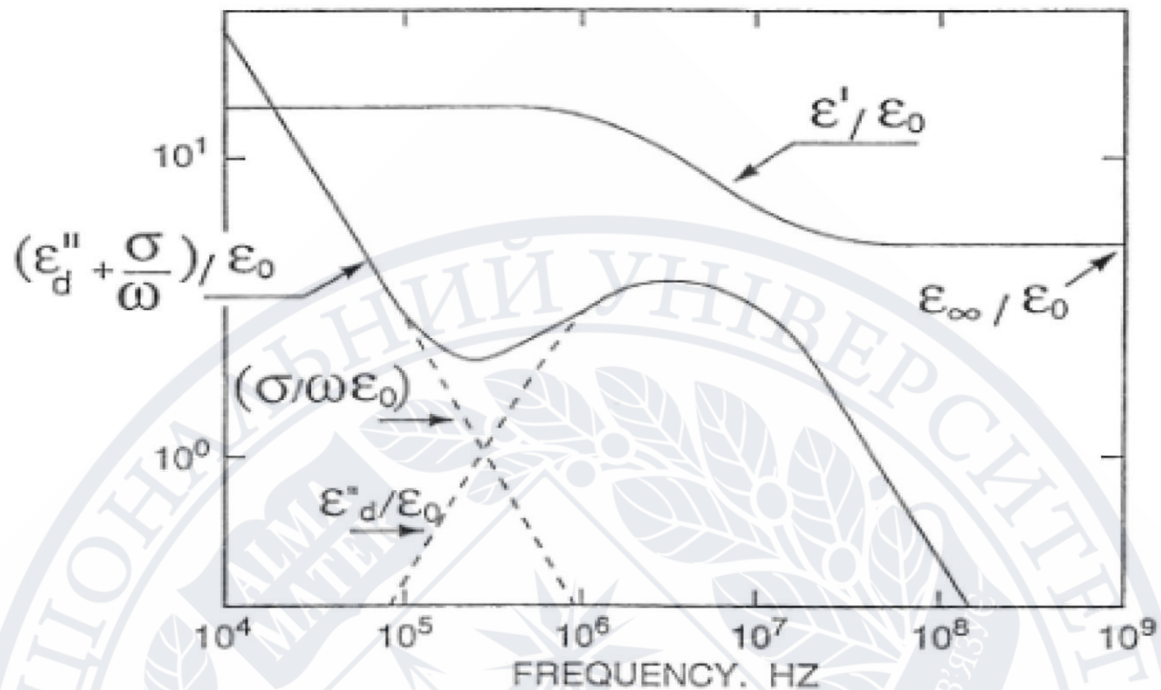


Рис.5 . Загальна поведінка реальних та уявних частин комплексу ϵ_r для гірської породи з омичною провідністю σ .

2.5 Асфальтобетонні суміші

У порівнянні з гірськими породами, асфальтобетон має ще вищу мікроструктурну неоднорідність, що може свідчити про навіть більш сприйнятливі електричні властивості, ніж гірські породи. Незважаючи на складність, було виявлено ряд досліджень вимірювань, а деякі приклади результатів представлені на рис. 6 . Беручи гірський матеріал за еталон, електричні властивості асфальтобетону обговорюються наступним чином:

- *Високочастотний діапазон (вище 1 ГГц).* У цьому діапазоні частот асфальтобетон має нижчий ϵ' , ніж його основний компонент гірської породи (але вищий, ніж у бітумного компонента). Наприклад, вимірювання в [50] показують, що ϵ' обраних зразків асфальту коливається між 4,0 ~ 4,5 на 1 ~ 10 ГГц, тоді як його складова частина гірських порід має значення $\epsilon' 5,5 \pm 0,1$. Крім того, вказуються вищі коливання ϵ' асфальтобетону, ніж у гірських порід, що може бути

пов'язано з мікро структурною неоднорідністю. Більше того, діелектричні втрати ϵ'' асфальтобетону та гірських порід мають порядки 0,1 (більші, ніж у бітуму).

- *Діапазон проміжних частот (1 ГГц ~ 100 МГц).* Діелектрична поведінка асфальтобетону стає значно більш сприйнятливою в цьому діапазоні частот. Подібно до гірських порід, діелектрична релаксація чітко спостерігалася навколо цього рівня частоти, як показано на рис. 6 (а) та (б)), що при вимірах у двох окремих роботах [50 , 51]. Між фазну (Максвелла-Вагнера) поляризацію, яка була запропонована для гірських порід, можна зрозуміти, щоб врахувати поляризацію асфальтобетону. Тут слід пам'ятати, що асфальтобетон - це багатофазна суміш із інтерфейсами на контактах бітум-заповнювач, бітум-наповнювач та бітум-повітря. Між фазна поляризація в асфальтобетонному матеріалі може бути дуже складною для кількісного аналізу, і тому ґрунтовна інтерпретація зарезервована для перегляду в майбутньому. Коли між фазна поляризація завершується в сусідній нижній частотній зоні (100 МГц ~ 200 МГц), ϵ' та ϵ'' заспокоюються і стабілізуються на рівні приблизно 6,0 та 0,05 відповідно [51].
- *Низькочастотний діапазон (100 МГц ~ 100 Гц).* Відповідно до вимірювань [52], зменшуючи частоту від 100 МГц до 100 Гц, ϵ' дещо збільшується з $6,4 \pm 0,4$ до $7,4 \pm 0,6$, тоді як ϵ'' помітно підвищується з $0,16 \pm 0,02$ до приблизно 0,40. Невелике збільшення ϵ' передбачає поступове насичення загальної поляризації із зменшенням частоти, тоді як значний підйом ϵ'' може бути пов'язаний із посиленням ефекту іонної провідності.

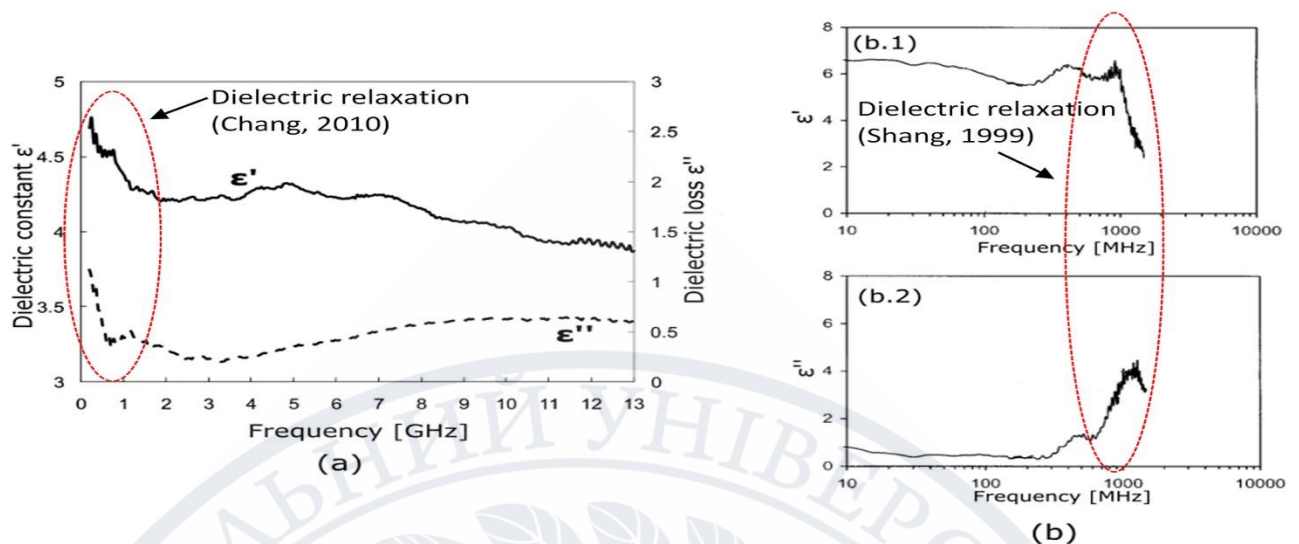


Рис.6 . Діелектрична спектроскопія асфальтобетонної суміші

Подібно до гірських порід, волога, здається, є домінуючим фактором, що впливає на складну діелектричну проникність асфальтобетону. Домінування залежить далі від вмісту води та частоти: і) Залежність від води . У роботі [53] дослідження чутливості лабораторно підготовлених зразків асфальту проводилось на частоті 1 ГГц ~ 100 МГц. При цьому було доведено, що вода переважає у змінах складної діелектричної проникності асфальтобетонної суміші, тоді як інші фактори, такі як щільність, градієнт заповнювача та вміст бітуму, вносять значно менший внесок. У роботі [51] було додатково визначено характерний вміст води, який становив 1,2% для досліджуваних зразків; поза цим вмістом, ϵ' і час релаксації τ зразка асфальту збільшуються в геометричній прогресії з подальшим збільшенням води. Прийнятним тлумаченням, яке потребує подальшої перевірки, є те, що визначений характерний вміст води є межею між зв'язаною водою та вільною полярною водою у водоносному асфальтобетоні. ii) Частотна залежність . Як правило, вплив на складну діелектричну проникність асфальтобетону зростає із зменшенням частоти. Вимірювання в [52] показують, що на рівні сотень Гц, внаслідок різкого ефекту від іонної провідності, значення ϵ' і ϵ'' можуть бути як на рівні $1,0 \times 10^3$. При високій частоті (рівень ГГц) вплив води значно зменшується, але все ж є

незначним у порівнянні з діелектричною проникністю сухого асфальтобетону [54].

2.6 Моделі діелектричного змішування для асфальтобетонних сумішей

Хороша модель прогнозування діелектричної проникності відіграє незамінну роль у багатьох методах неруйнівного контролю для будівельних застосувань. У літературах можна знайти різні моделі діелектричного змішування матеріалів цивільного будівництва, зокрема такі, як об'ємні моделі змішування, феноменологічні моделі, а також моделі, засновані на теорії ефективних середовищ [55 , 56]. Деякі з цих моделей, перелічені в таблиці 2, надають перевагу при моделюванні ефективної об'ємної проникності ϵ_{eff} асфальтобетонної суміші у високочастотному діапазоні (де основна частина ϵ_{eff} - діелектрична проникність ϵ' , тоді як, ϵ'' - Зазвичай дуже малий і нехтуваний). Детальна дискусія щодо моделей організована таким чином:

Моделі степенного змішування. Моделі раннього степенного змішування для прогнозування об'ємної діелектричної проникності композиційного матеріалу припускають, що діелектрична проникність суміші є сукупним результатом об'ємної діелектричної проникності окремих складових та їх об'ємних часток. Серед них репрезентативною є модель Ліхтенеккера-Ротера, представлена в рівнянні (9), яка зводиться до іншої загальної моделі під назвою Комплексна модель Показник заломлення, припускаючи параметр $\alpha = 0,5$. Модель Чанга [50], як показано в рівнянні (10), є модифікованою моделлю такого типу і з додатковими емпіричними константами, доданими для врахування ефекту взаємодій між складовими, який може бути значущим для неоднорідного матеріалу, такого як асфальтова суміш.

Ефективні моделі теорії середовища. Моделі, засновані на теорії ефективного середовища, передбачають, що тверді компоненти дискретно занурені у матеріал фонові матриці. Типові моделі цього типу включають такі, як модель Релея (рівняння (11)), модель Беттчера (рівняння (12)) та модель

Сіхвола-Конга (S одинарний зв'язок K) (рівняння (13)). Варто зазначити, що при виведенні моделі S одинарний зв'язок K враховується також ефект взаємодії між різними складовими [57]. У роботі [50] одинарний зв'язок модель $S K$ була порівняна з моделлю Чанга при прогнозуванні об'ємної діелектричної проникності асфальтобетонних сумішей. Встановлено, що модель Чанга має кращу збіжність з результатами експериментальних випробувань, ніж S одинарний зв'язок K -модель, тоді як про реальні можливості моделі Чанга важко зробити висновок, оскільки вона має ще декілька параметрів, які потрібно встановити.

Мікроструктурні моделі. Моделювання об'ємної діелектричної проникності гетерогенного композиту розвивається в напрямку включення ефектів мікроструктури більш реалістичним чином. Це може допомогти, оскільки багато мікомеханічні дослідження показали, що поліпшення прогнозування макроскопічних механічних реакцій асфальтобетонної суміші може бути досягнуто шляхом належного врахування мікроструктурних ефектів, таких як розриви напружень на межі розділу мастика-заповнювач (наприклад, [58]), градація заповнювача та анізотропна орієнтація (наприклад, [59 , 60]) тощо. Модель, нещодавно запропонована в [61 , 62], як показано в рівнянні (14), можна сприйняти як крок вперед до мікроструктурного моделювання. У моделі ефекти інтерфейсу мастика-заповнювач та розмір частинок заповнювача попередньо підраховувались ідеалізовано, досягаючись введенням параметра міжфазної діелектричної проникності, а також радіуса окремих включень.

Моделі вологи . Було також докладено зусиль для моделювання ефекту вологи з можливим застосуванням для моніторингу накопичення вологи в структурі дорожнього покриття на місці. Наприклад, в [63] була розроблена емпірична модель для прогнозування діелектричної проникності асфальтового матеріалу з додаванням вологи та без неї. Модель, як виражається рівнянням (15), складається з двох частин: самостійної частини, яка пропорційна дробовому об'єму складових частин, та частини взаємодії, яка враховує ефект інтерфейсів.

Ця емпірична модель передбачає параболічну залежність між діелектричною проникністю ε' асфальтової суміші та вмістом води.

Таблиця 2. Огляд моделей діелектричного змішування для асфальтобетонних сумішей.

Назва моделі	Вираз
Модель Ліхтенекера-Ротера	$\varepsilon_{eff}^a = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_i^a \quad (9)$ <p>Де a - константа, яка залежить від складу суміші, і коли $a = 0,5$, рівняння поступається моделі складного показника заломлення; v_i та ε_i - об'ємна частка та об'ємна діелектрична проникність i-ї складової; n - кількість складових.</p>
Модель Чанга	$\varepsilon_{eff} = c \left(\sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_i^a \right)^\beta + k \quad (10)$ <p>Де a - константа, що залежить від складу суміші, тоді як константа β становить частину взаємодії компонентів суміші, а для щільного асфальту приймається $a = 0,5$ і $\beta = 2$. c і k - статистичні параметри.</p>
Модель Релея	$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_m} = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m} \quad (11)$ <p>Де ε_m - об'ємна діелектрична проникність матеріалу фонові матриці.</p>
Модель Беттчера (і модель Максвелла-Гарнетта)	$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m}{3\varepsilon_{eff}} = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m} \quad (12)$
Модель Сіхвола-Конга	$\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m = \frac{\sum_{i=1}^n v_i (\varepsilon_i - \varepsilon_m) \frac{3\varepsilon_m}{\varepsilon_i + 3\varepsilon_m}}{1 - \sum_{i=1}^n v_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m}} \quad (13)$

Продовження таблиці 2

Модель Чжай	$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_m} = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\frac{2\varepsilon}{r_1} + \varepsilon_i - \varepsilon_m}{\frac{2\varepsilon}{r_1} + \varepsilon_i + 2\varepsilon_m} \quad (14)$ <p>Де, $\frac{2\varepsilon}{r_1}$ враховує поляризації на межі розділу бітумної матриці з включенням заповнювача / наповнювача, в яких r_1 - радіус включення i і ε - міжфазна діелектрична проникність, що підлягає експериментальному визначенню.</p>
Модель Subedi & Chatterjee (врахований ефект вологи)	$\varepsilon' = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_{i'} + \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n v_i v_j (\varepsilon_{i'} - \varepsilon_{j'}), \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n v_i v_j (\varepsilon_{j'} - \varepsilon_{i'}) \right] \quad (15)$ <p>Де, ε_i, ε_j = діелектрична проникність i-ї, j-ї складових відповідно; n - кількість складових.</p>

Підводячи підсумок, об'ємна діелектрична проникність асфальтобетонної суміші визначається об'ємною діелектричною проникністю окремих складових та їх об'ємними частками, а також мікро структурною неоднорідністю (наприклад, межі розділу, форма та форма заповнювача, розподіл порожнечі повітря) та умовами (наприклад, , волога). Існуючі моделі змішування навряд чи можуть явно врахувати всі ці міркування, і тому їх спрогнозовані можливості та потенціал застосування можуть бути оскаржені. Насправді, значні успіхи в моделюванні діелектричної проникності та моделюванні діелектричної гетеро структури були виявлені в останні десятиліття [66]. Зокрема, зростає популярність використання числових методів при мікро структурному моделюванні та аналізі діелектричної гетеро структури (наприклад, метод скінченних елементів [67]), з якого можна навчитися для асфальту. Для ілюстрації на рис. 7 графічно представлена дорожня карта модельного прогнозування об'ємної проникності асфальтобетону. Дорожня карта

демонструє перехід від традиційних моделей змішування до ідеалізованої мікро механічної моделі, що ідеалізовано враховує мікро структурні ефекти, і шукає перспектив для більш реалістичного мікро механічного моделювання на основі реконструйованих мікроструктур 3D.

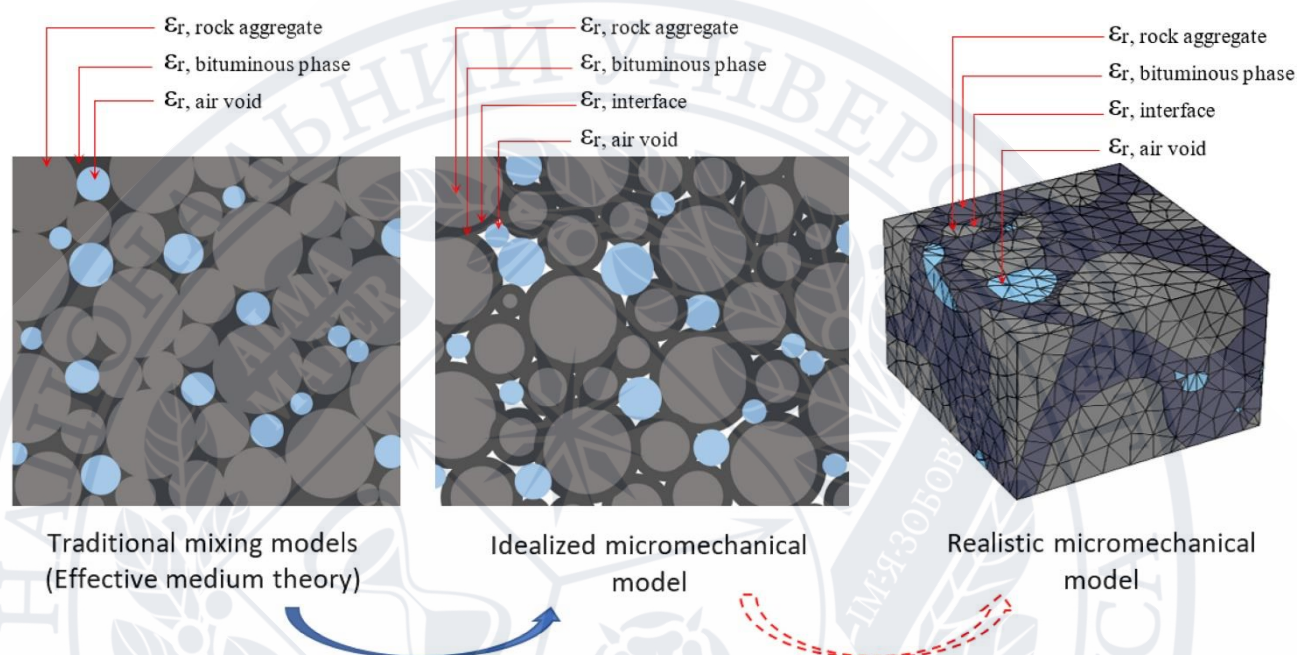


Рис.7 . Розробка об'ємного моделювання діелектричної проникності асфальтобетонної суміші.

2.7 Застосування на основі електричних властивостей асфальтобетону

Для неруйнівних методів контролю, таких як наземний радіолокаційний радар (GPR), діелектрична проникність ϵ_r асфальтобетонного матеріалу в мікрохвильовому діапазоні частот представляє особливий інтерес. У цьому діапазоні частот асфальтобетонні матеріали мають відносно стабільні значення діелектричної проникності, і тому легше виявити відмінності між різними типами сумішей або в змінених умовах. Типове обладнання GPR включає апаратну частину (генератор електромагнітних хвиль, антену та реєстратор) та програмну частину (збір, обробка та інтерпретація даних). Коли короткі імпульси ЕМ-хвилі передаються від генератора на конструкцію покриття через

антену, швидкість хвилі буде ослаблюватись, а частина хвиль відображатиметься на межі розділу матеріалів з різними значеннями діелектричної проникності або при зіткненні зі змістом вологості або щільності. Час пробігу та амплітуда хвиль відбиття реєструються та обробляються програмним забезпеченням для оцінки діелектричної проникності та товщини шарів або додатково інтерпретуються в іншій корисній інформації про дорожнє покриття (наприклад, щільність матеріалу). Проілюструвати,8 зображує відображення сигналу хвилі GPR в умовах дорожнього покриття, в якому для простоти передбачається одношарове асфальтове покриття. Відносна амплітуда відбиття на $\frac{A_n}{A_{inc}}$ n - му шарі інтерфейс має такий зв'язок з діелектричною проникністю матеріалів в конструкції дорожнього покриття ϵ_r [68]:

$$\frac{A_n}{A_{inc}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,n}} - \sqrt{\epsilon_{r,n+1}}}{\sqrt{\epsilon_{r,n}} + \sqrt{\epsilon_{r,n+1}}} \left[\prod_{i=1}^n (1 - \gamma_i^2) \right] e^{-\eta_0 \sum_{i=0}^n \frac{\sigma_i d_i}{\sqrt{\epsilon_{r,i}}}}, \quad (16)$$

де N - кількість шарів в системі дорожнього покриття, а $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$; A_n - амплітуда відбиття на межі розділу n - го шару у вольтах, а A_{inc} - амплітуда відбиття від великої металевої пластини (що представляє 100% випадок відбиття); $\epsilon_{r,n}$ та σ_i - відповідно діелектрична проникність та електропровідність матеріалу n - го шару ($\epsilon_{r,0} = 1$ та $\sigma_0 = 0$ для повітряного шару між антенною та поверхнею тротуару, тоді як для шару асфальту σ_1 також можна знехтувати через дуже низьке значення); γ_i - коефіцієнт відбиття на i - й межі розділу, який $\frac{\sqrt{\epsilon_{r,n}} - \sqrt{\epsilon_{r,n+1}}}{\sqrt{\epsilon_{r,n}} + \sqrt{\epsilon_{r,n+1}}}$. η_0 - хвильовий імпеданс вільного простору, $\approx 120 \pi \Omega$. Таким чином, шляхом збору амплітуди відбитих імпульсів, в $e_{p,n}$ з n - й шар дорожнього покриття може бути оцінена за формулою. (16) . Крім того, товщину першого шару асфальту можна додатково розрахувати наступним чином:

$$d_1 = \frac{ct_1}{2(\epsilon_{r,1})^{\frac{1}{2}}}, \quad (17)$$

де, d_1 - товщина шару асфальту; t_1 - двосторонній час руху сигналу GPR всередині асфальтового шару; $\varepsilon_{r,1}$ можна обчислити, присвоївши $n = 0$ в рівнянні. (16), що дає

$$\varepsilon_{r,1} = \left(\frac{1 - A_n/A_{inc}}{1 + A_n/A_{inc}} \right)^2 ; c - \text{швидкість світла у вільному просторі, } 3,0 \times 10^8 \text{ м/с. Оцінка}$$

товщини шару на місці є основним неруйнівним методом тестування GPR, який має практичне значення у контролі якості будівництва та моніторингу стану здоров'я (наприклад, деформацій) [69 , 70]. Крім того, технологія також може бути використана для інших цілей структурного моніторингу, таких як виявлення руйнування роз'єднання між шарами [71 , 72] та місць виникнення тріщин при утворенні [73].

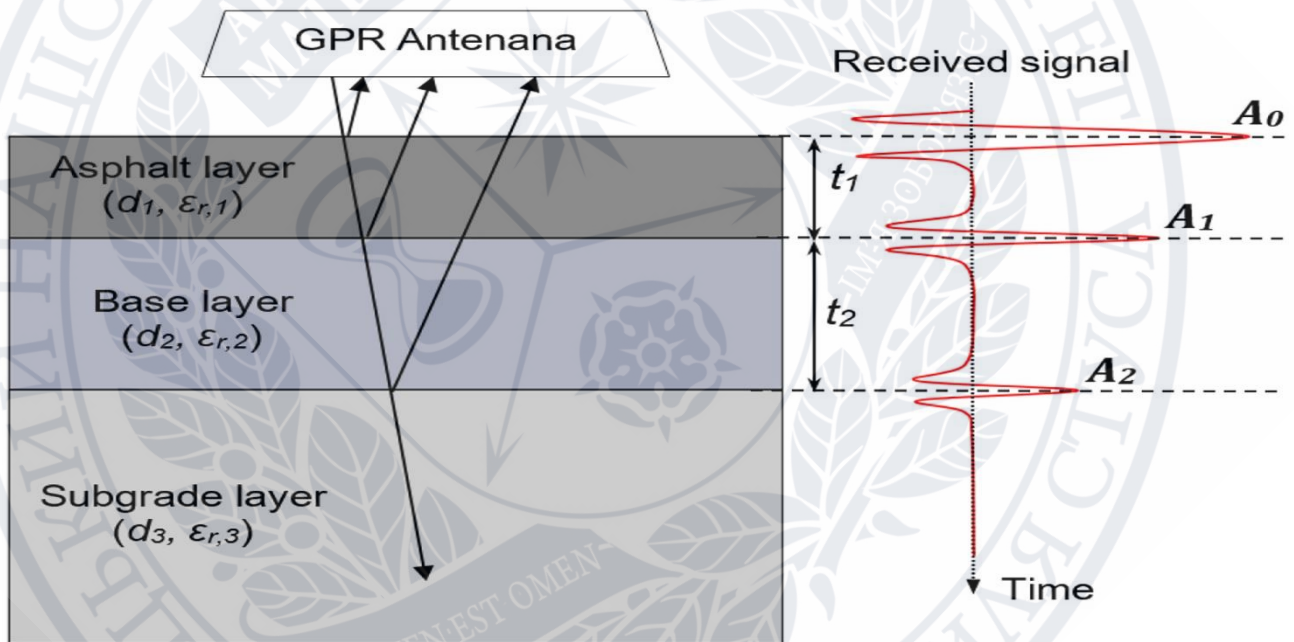


Рис.8 . Ілюстрація відбиття сигналу хвилі GPR у конструкції тротуару.

Окрім цих додатків для випробування «конструкції» тротуару, підвищений інтерес виявлено також у неруйнівних випробуваннях «матеріалу» тротуару. У зв'язку з цим, розрахункові дані про діелектричну проникність можуть повертати інформацію про матеріал in-situ, таку як об'ємна щільність, вміст порожнечі в повітрі або вміст води. Ця матеріальна інформація може бути надалі використана для моніторингу умов дорожнього покриття. Короткий зміст деяких попередніх робіт подано наступним чином:

- *У місці моніторинг асфальтованого ущільнення* . Насипна щільність є важливим параметром контролю якості ущільнення асфальтобетонного покриття. Постійний моніторинг щільності матеріалу на місці після кожного ущільнення приймається як важливе для поліпшення контролю якості ущільнення дорожнього покриття. Неруйнівний контроль (такий як GPR) дає можливість миттєво збирати та повідомляти інформацію про щільність, в той час як хороша модель взаємозв'язку для кореляції діелектричної проникності матеріалу з його щільністю відіграє важливу роль. У зв'язку з цим можна вивчити моделі змішування в таблиці 2, які базуються на відомій об'ємній інформації суміші. Як приклад, у [74], об'ємну щільність асфальтобетонної суміші було визначено відповідно за допомогою комплексної моделі показника заломлення, моделі Релея та моделі Беттчера. За останнє десятиліття було проведено низку розробок та перевірок на місцях [[74] , [75] , [76] , [77]], що вказують на попередній етап застосовності.
- *У місці виявлення дефектів дорожнього покриття* . Технологію можна використовувати для неруйнівного контролю дефектів дорожнього покриття, тим самим сприяючи обслуговуванню та будівництву дорожнього покриття. Наприклад, 1) Просочування вологи : Раннє виявлення місць, де може бути надмірна вологість, може надати корисну інформацію для планування технічного обслуговування асфальтового покриття заздалегідь. В роботах [78 , 79] була попередньо визначена кількість кількостей вологи в шарі асфальтобетонного покриття, яка на основі аналізу даних діелектричної проникності, виміряних за допомогою GPR, була показана. 2) Сукупна сегрегація: Агрегатна сегрегація в асфальтобетоні є набридливою технічною проблемою, яку також важко контролювати належним чином під час процесу ущільнення. Як показано в [80], пристрій GPR може повідомляти місця

розташування таких областей з низькою щільністю, припускаючи можливість постійного неруйнівного контролю сегрегації асфальту під час мощення. 3) Структурна деградація : Ризик деградації шару асфальтового покриття, як правило, оцінюється шляхом оцінки зниження його жорсткості матеріалу. У роботі [81] було висловлено припущення, що низька діелектрична проникність відповідає низькій жорсткості матеріалу в шарі асфальту, тоді як лінійне співвідношення було також помічено. Таким чином, моніторинг деструкції конструкції дорожнього покриття за допомогою GPR потенційно здійснений.

Як правило, методи неруйнівного контролю для будівельних проєктів прогресують як з точки зору апаратного забезпечення (наприклад, від 2D до 3D-сканування), так і програмного забезпечення (тобто алгоритмів обробки та інтерпретації даних) [82]. Однак можливість прогнозування масивної проникності може бути критичним викликом для їх використання в неоднорідних матеріалах, таких як асфальтобетон. Як уже зазначалося, наявні моделі в основному емпіричні та не враховують достатньо мікроструктурної неоднорідності матеріалу. Як результат, кореляція отриманої інформації про діелектричну проникність із практичними властивостями матеріалу (наприклад, щільністю, вмістом та розподілом повітряних порожнеч або води) може бути недостатньо чітко вираженою для використання, приклад якої можна знайти в [83]. Отже, покращення прогнозування діелектричної проникності може бути пріоритетним на наступних етапах роботи, тоді як, як обговорювалося раніше, ключовим напрямком є включення мікроструктурних ефектів у модель більш реалістичним чином.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОІНДУКТИВНОГО АКТИВАТОРА НАГРІВУ АСФАЛЬТА

3.1 Побудова електроіндуктивного активатора нагріву асфальта

Створенно креслення електроіндуктивного активатора нагріву асфальта. Активатор є кондинсатором, електричне поле якого проникає в асфальтове покриття і нагріває його.

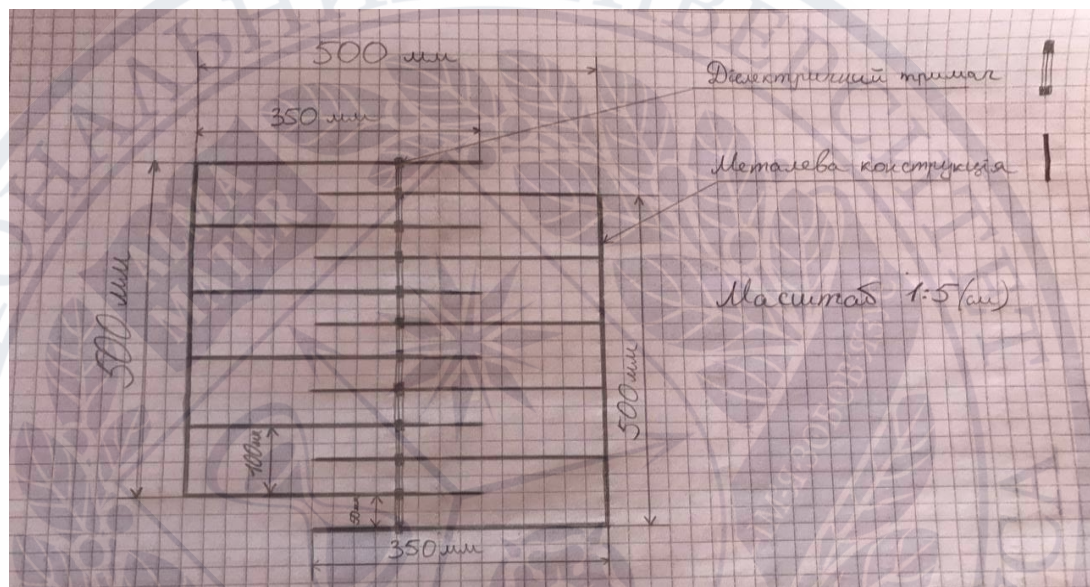


Рис.9. Креслення електроіндуктивного активатора нагріву асфальта.

Було побудованно конструкцію з металевого дроту діаметром 3 мм. Зеднується ця конструкція між собою діелектричним елементом.

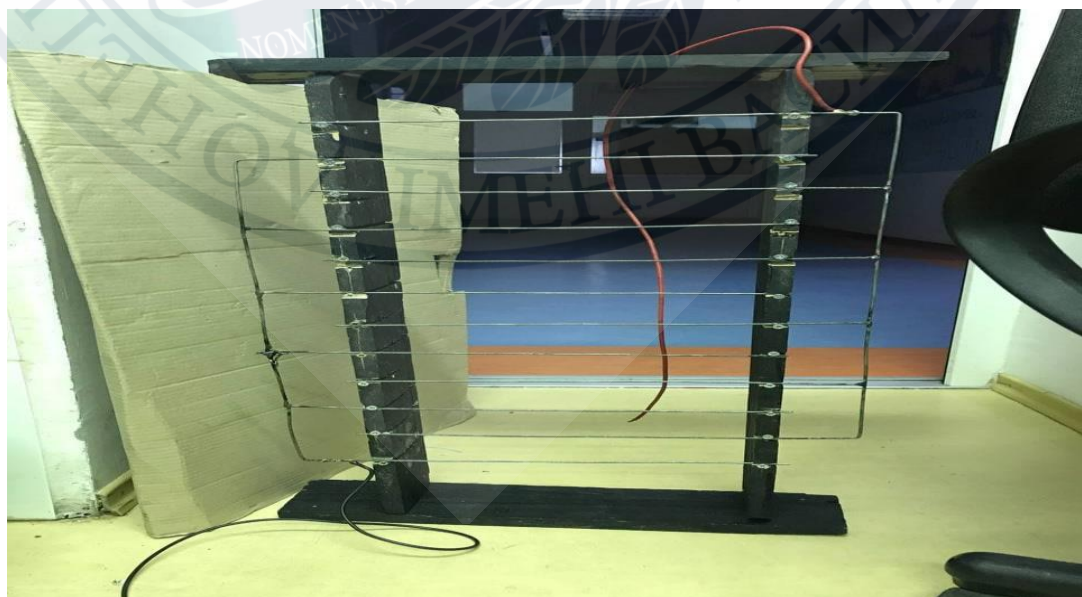


Рис. 10. Електроіндуктивний активатор нагріву асфальта.

На рис.10. показано активатор який виглядає таким чином. За допомогою нього проводилися всі виміри.

3.2 Проведення вимірів параметрів асфальту.

Вимірування проводилися за допомогою аналізатора ланцюгів Ronde/ScwaRZ FPC 1500 .



Рис. 11. Аналізатор ланцюгів Ronde/ScwaRZ FPC 1500 .

Виміри параметрів асфальтового дорожнього покриття проводилися на вулиці. На Рис.12 показано результат виміру параметрів асфальтового дорожнього покриття. Аналізатор показує електричну ємність 51.35 пФ

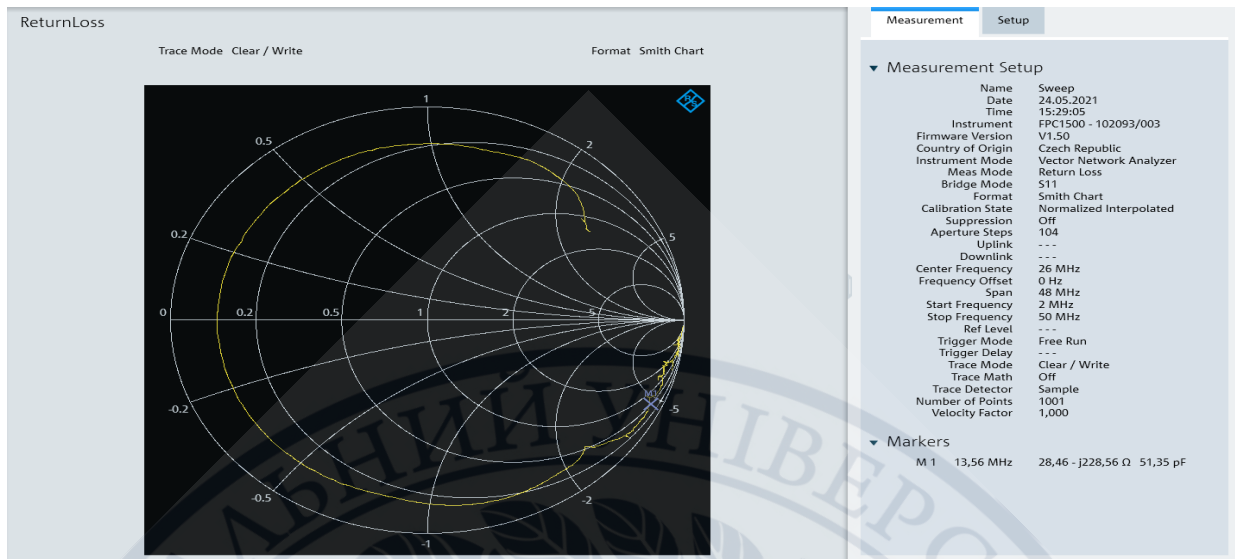


Рис.12. Результат виміру коли активатор прилягає до асфальту.

Для більш точніших вимірів ми піднімали поетапно нашу конструкцію до 3 см від асфальту, щоб побачити як змінюється результат. Всього вимірів проведено 9.

На Рис.13 показано результат виміру параметрів асфальтового дорожнього покриття на відстані 3 см до асфальту. Аналізатор показує електричну ємність 39.6пФ.

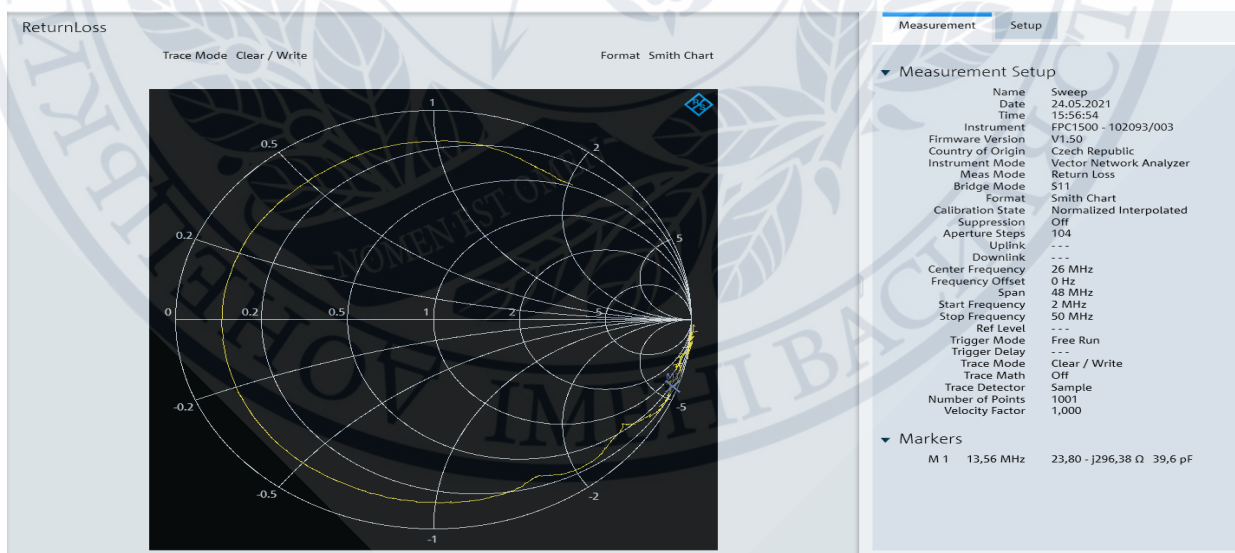


Рис.13. Результат виміру коли активатор знаходиться на відстані 3 см до асфальту.

Можемо зробити висновок що з збільшенням висоти від асфальту електрична ємність зменшується, в даному випадку на 11.75 ПФ.

3.3 Розрахунки вимірів параметрів асфальтового дорожнього покриття

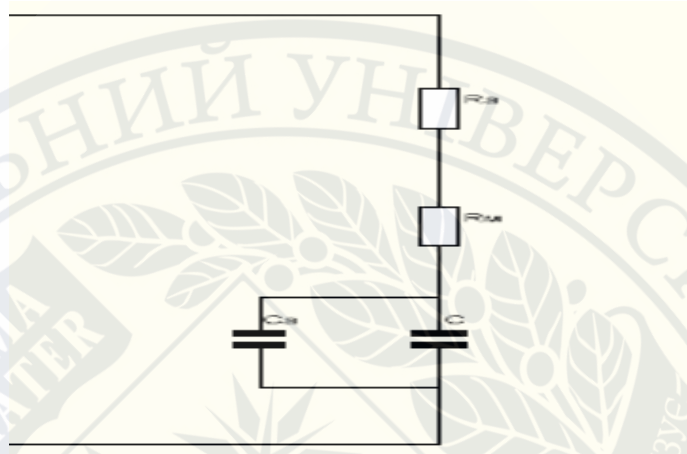


Рис.14. Еквівалентна схема

Завдяки еквівалентній схемі можна розрахувати кут втрат.

$$\operatorname{tg} \delta = R_{\text{ак}} \times \omega C = 2\pi f C R_{\text{ак}} = 0.017487288 \quad (18)$$

Розрахунки показали що кут втрат є значним для нашої конструкції.

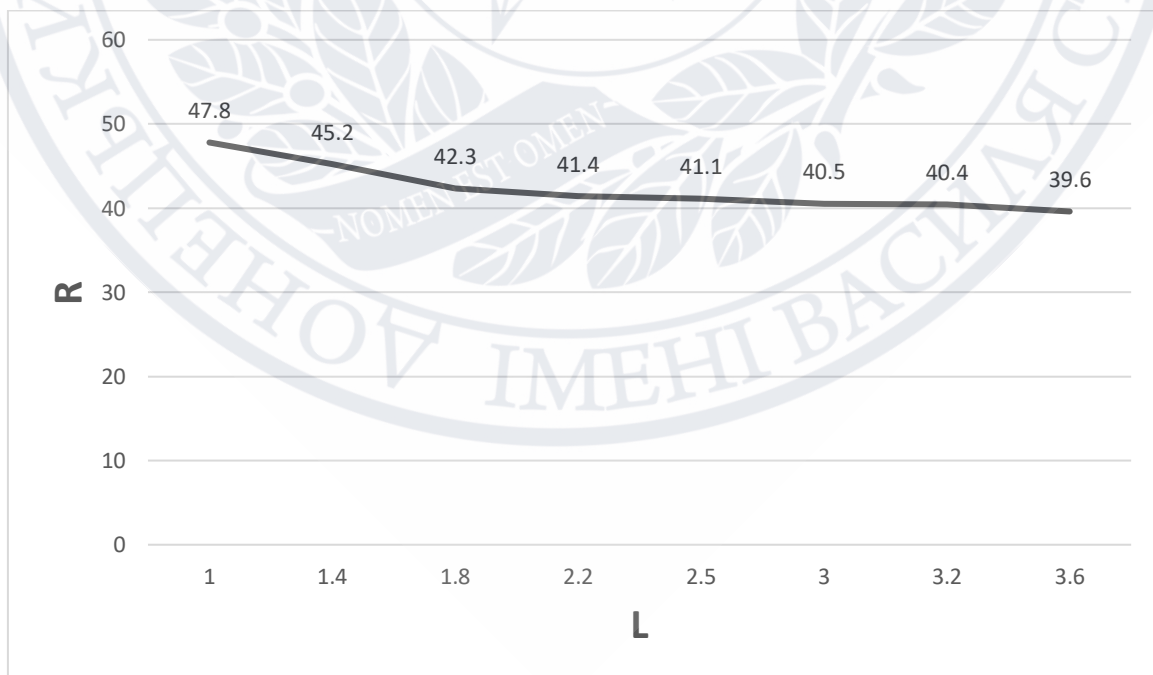


Рис.15. Графік залежності ємності активатора від відстані

Представлений графік залежності ємності активатора від відстані асфальтового дорожнього покриття. Ми можемо бачити що з збільшенням відстані від землі ємність зменшується завдяки тому, що на великих відстанях електричне поле не проникає в дорожнє покриття. З цього графіка можна зробити висновок що активатор не повинен знаходитися на відстані більше ніж 1.5 см від землі. Відстань на якому повині бути розміщені елементи можна зробити також 1.5 см. В результаті виміру знайдений еквівалентно активний опір вкладу в загальний активний опір активатору. Загальний опір складав 28 Ом, еквівалентно активний опір 4 Ом. Таким чином конструкція яку ми використовували для вимірювання дорожнього покриття не можна використовувати для нагріву, тому що тепло яке буде виділятися в металевій конструкції набагато більше чим виділяється в асфальт. Для даної конструкції потрібно використати метал який має менший супротив а саме мідь.

Також було вирішено замінити тонкий сталевий дріт на мідні трубки.

$$R = \rho \times \frac{l}{S}, \quad (19)$$

$$S = 2\pi R\delta, \quad (20)$$

$$\frac{\rho_m}{\rho_c} = \frac{1}{6}, \quad (21)$$

$$\frac{S_m}{S_c} = 2.5, \quad (22)$$

$$l = \frac{1}{2}, \quad (23)$$

$$\frac{R_m}{R_c} = 0.033. \quad (24)$$

Проведені розрахунки втрат для нового активатора, який потрібно виготовити з мідних трубок діаметром 10мм. Розрахунки показали що втрати в активаторі можна зменшити більше ніж в 30 разів.

ВИСНОВКИ

1. Проведено експериментальне випробування електричних параметрів асфальтобетонного покриття. На основі вимірювань розраховані електричні параметри еквівалентної схеми активатора.
2. Вибрано частотний діапазон оптимальний для ВЧ нагріву асфальтобетонного покриття 13,65 МГц.
3. Визначено діапазон допустимих відстаней активатора до асфальтобетонного покриття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Р. Тахеріан , А. Каусар. Вільям Ендрю, Норвіч, Нью-Йорк, США (2018). Електропровідність у композитах на основі полімерів: експерименти, моделювання та застосування.
2. Фон Гіппель . Вілі (1954). Діелектрики та хвилі
3. Као К. К. Діелектричні явища у твердих тілах / К. К. Као. – Сан-Дієго, 2004. – (Academic Press). с. 41 – 114.
4. Р. Альварес. Складна діелектрична проникність в гірських породах: метод її вимірювання та аналізу. Геофізика , 38 (1973) , с. 920 – 940.
5. Г. Вільямс , Д. К. Томас. Феноменологічні та молекулярні теорії діелектричної та електричної релаксації матеріалів. Novocontrol Appl. Примітка Dielect. , 3 (1998) , стор. 1 – 28.
6. А. Шенхальс, Ф. Кремер, Теорія діелектричної релаксації, у: Широкопasmовна діелектрична спектроскопія, Спрінгер, 2003, с. 1–33.
7. У. Каатце. Складна діелектрична проникність води як функція частоти та температури. J. Chem. Інж. Дані , 34 (1989) , с. 371 – 374.
8. У. Каатце. Діелектричні властивості води в різних її станах взаємодії. Й. Солют. Хім. , 26 (1997) , с. 1049 – 1112.
9. П. Дебає. Полярні молекули. The Chemical Catalogue Co. , Нью-Йорк, США (1929).

10. А. Гудмарссон , Н. Райден , Х. Ді Бенедетто , К. Созеат , Н. Тапсоба , Б. Біргіссон. Порівняння лінійних в'язкопружних властивостей асфальтобетону, виміряних лабораторними сейсмічними та натяжно-компресійними випробуваннями. Дж. Неруйнований. Евал. , 33 (2014) , с. 571 – 582.
11. Т. Пакула. Діелектрична та механічна спектроскопія – порівняння. Широкопasmова діелектрична спектроскопія , Спрінгер (2003) , с. 597 – 623.
12. Й. Стастна , Л. Занзотто. Лінійна реакція регулярних асфальтів на зовнішні гармонічні поля. Дж. Реол. , 43 (1999) , с. 719 – 734.
13. Т. Сааренкетто. Електричні властивості дорожніх матеріалів та ґрунтових шарів та використання наземних радіолокаційних станцій при обстеженнях інфраструктури руху. Доктор філософії дисертація. Природничий факультет Університету Оулу , Фінляндія (2006) .
14. Н.П Маруська , Б. Рао. Роль полярних видів у агрегації асфальтенів. Палива Sci. Технол. Міжнародний , 5 (1987) , с. 119 – 168.
15. Р. С. Чоу , Д. Л. Це , К. Такамура. Провідність та діелектрична поведінка розчинів бітуму в толуолі. Можна. J. Chem. Інж. , 82 (2004) , с. 840 – 845.
16. Х. Вральстад , Ø. Спец , К. Лесен , Л. Лундгаард , Й. Шоблом. Діелектричні властивості компонентів сирої нафти. Енергетичне паливо , 23 (2009) , с. 5596 – 5602.
17. Ф. Чен , Н. Тейлор , Н. Крінгос , Б. Біргіссон. Дослідження щодо діелектричної реакції бітуму в низькочастотному діапазоні. Road Mater. Тротуар Дез. , 16 (2015) , с. 153 – 169.
18. А.Л. Лайн , О. Кривошеєва , Б. Біргіссон. Адгезія між бітумом та заповнювачем: здійснення спектроскопічної характеристики еліпсометрії та оцінка константи хемейкера. Матер. Структура. , 46 (2013) , с. 1737 – 1745.
19. Q. Jiang , Q. Li , J. Li , A. Li , R. Cong , W. Si , Z. Li. Аналіз електрохімічного імпедансу в режимі реального часу для емульсій води в маслі бітуму, розведеного нафтою. ChemistrySelect , 3 (2018) , с. 3411 – 3416.

20. Д. Крістенсен , Д. Андерсон. Зв'язок хіміко-фізичних властивостей асфальтобетонних цементів та модель дисперсної полярної рідини. 204-а Національна нарада АСУ , вип. 37 (1992) , с. 1279 – 1291.

21. А. Келломякі. Молярна поляризація та дипольні моменти бітумів. Паливо , 70 (1991) , с. 1103 – 1104.

22. П. Ределіус , Х. Сонен. Співвідношення полярності бітуму та реології. Road Mater. Тротуар Дез. , 6 (2005) , с. 385 – 405.

23. З. Влаховікова , Й. Стастна , Л. Занзотто. Зсувна в'язкість та діелектрична проникність в асфальті, модифікованому sbs. Бензин. Вугілля , 45 (2003) , с. 178 – 183.

24. Г. Полакко , Дж. Стастна , Д. Біонді , Ф. Антонеллі , З. Влаховікова , Л. Занзотто. Реологія асфальтів, модифікованих функціоналізованими гліцидилметакрилатними полімерами. J. Колоїдний інтерфейс Sci. , 280 (2004) , с. 366 – 373.

25. Ж. Петерсен , Х. Plancher , Е. Енслі , Р. Венейбл , Г. Міуаке. Хімія взаємодії асфальт-заповнювач: взаємозв'язок з тестом прогнозування вологості на брук. Трансп. Рез. Рек. (1982) , с. 95 – 104..

26. Å.L. Лайн , Н. Тейлор , Н. Джеверберг , Х. Едін , Б. Біргіссон. Низькочастотна діелектрична спектроскопія бітумних в'язучих як показник потенціалу адгезії до кварцових заповнювачів з використанням портландцементу. Матер. Структура. , 49 (2016) , с. 1327 – 1336.

27. В.Х Саттон. Мікрохвильова обробка керамічних матеріалів. Am. Керам. Соц. Бик. , 68 (1989) , с.376 – 386.

28. С. В. Бішара , Д. Махоні. Застосування мікрохвильової енергії для непрямого визначення загальної полярності асфальту та вмісту сірки та сульфїду. Трансп. Рез. Рек. , Тисяча шістьсот тридцять-вісім (один тисяча дев'ятсот дев'яносто-вісім) , стор. 3 – 11.

29. С. В. Бішара , Р. Макрейнольдс , Д. Махоні , Р. Робертсон. Швидкі та прості методи окисного старіння сполучних речовин. Технічний звіт. Канзаський департамент транспорту (1999).

30. А. А. Аль-Огалі , Р. Л. Террель. Вплив мікрохвильового нагріву на адгезію та пошкодження вологи асфальтових сумішей. Трансп. Рез. Рек. (+1988), стр. 27 – 36.

31. Дж. Мійович , Б. Д. Фіц. Діелектрична спектроскопія реакційноздатних полімерів. Заяв. Діелектр. Спектроск. (1998) , стор. 1 – 24.

32. Н. Хагер III , Р. Домши. Моніторинг гідратації цементу за допомогою широкосмугової діелектричної спектроскопії в часовій області-рефлектометрія J. Appl. Фіз. , 96 (2004) , с. 5117 – 5128.

33. Дж. Сова , П. Шен , М. Чжоу , Т. Чень , А. Серрес , М. Сібен. Електричні властивості бітумних емульсій. Паливо , 74 (1995) , с. 1176 – 1179.

34. МА Монтойя , W. Джейсон Вайс , JE пікші. Використання електричного опору для оцінки процесу затвердіння ущільнення стружки. Road Mater. Тротуар Дез. , 18 (2017) , стор. 98 – 111.

35. М. Атеек , С. Уайлі , А. Аль-Шаммаа , Х. Аль-Нагейм. Мікрохвильова спектроскопія: потенційна методика аналізу діелектричних та фізичних властивостей бітуму. Міри. Наук. Технол. , 23 (2012) , стаття 085503.

36. Г.-Х. Ю. , З.-М. Лі , Х.-Л. Чжоу , К.-Л. Лі. Асфальт, модифікований гумовою крихтою: ефекти обробки мікрохвиль. Домашня тварина. Наук. Технол. , 29 (2011) , с. 411 – 417.

37. М. Лян , Х. Сін , В. Фан , С. Рен , Дж. Ши , Х. Ло. Термостійкість та ефективність старіння модифікованого асфальту з гумовою крихтою, активованою мікрохвильовкою та тор. Матер. Дез. , 127 (два тисячі сімнадцять) , стр. 84 – 96.

38. Р. Еванс , М. Фрост , М. Стонецліфф-Джонс , Н. Діксон. Оцінка діелектричної проникності матеріалів дорожнього покриття in situ. Трансп. Рез. Рек. , 2 037 (2007) , стор. 128 – 135.

39. М. Дж. Кемпбелл , Дж. Ульріхс. Електричні властивості гірських порід та їх значення для місячних радіолокаційних спостережень. Дж. Геофіз. Рез. , 74 (1969) , с. 5867 – 5881.

40. М. Бебло. 5.2 Діелектрична константа мінералів і гірських порід: Технічний опис Ландольта-Борнштейна - Група проти геофізики. Том 1b: У Springer materials. (1982) , 10.1007 / 10201909_43.

41. FT Ulaby , TH Bengal , MC Dobson , JR East , JB Garvin , DL Evans Мікрохвильові діелектричні властивості сухих порід. IEEE Trans. Геосці. Remote Sens. , 28 (1990) , с. 325 – 336.

42. Х. Ван , Х. Го , Ч. Ван , П. Чень , Ю. Ши. Відносна діелектрична проникність сухих порід. Підбіріддя Наук. Бик. , 44 (1999) , с. 2286 – 2293.

43. Р. Альварес. Вплив атмосферної вологи на питомий опір гірських порід. Дж. Геофіз. Рез. , 78 (1973) , с. 1769 – 1779.

44. Р. Дж. Найт , А. Нур. Діелектрична проникність пісковиків, від 60 кГц до 4 мГц. Геофізика , 52 (1987) , с. 644 – 654.

45. Т. М. Левицька , Б. К. Штернберг. Процеси поляризації в гірських породах: 1. Комплексний метод діелектричної проникності. Radio Sci. , 31 (1996) , с. 755 – 779.

46. Т. Челідзе , Ю. Гегуен. Електрична спектроскопія пористих порід: огляд і. теоретичні моделі. Геофіза. J. Int. , 137 (тисяча дев'ятого дев'ятого дев'ять) , стр. 1 – 15.

47. Джо Бокріс , Е. Гілеаді , К. Мюллер. Діелектрична релаксація в подвійному електричному шарі. J. Chem. Фіз. , 44 (1966) , с. 1445 – 1456.

48. Т. Челідзе , Ю. Гегуен , К. Руффет. Електрична спектроскопія пористих порід: огляд ii. Результати експерименту та інтерпретація. Геофіза. J. Int. , 137 (тисячу дев'ятого дев'ятого дев'ять) , стр. 16 – 34.

49. Р. Найт , А. Ендрес. Нова концепція моделювання діелектричної реакції пісковиків: визначення змоченої гірської породи та системи об'ємних вод. Геофізика , 55 (1990) , с. 586 – 594.

50. СМ. Чанг , Дж.-С. Чень , Т.-Б. Ву. Діелектричне моделювання асфальтобетонних сумішей та взаємозв'язок із щільністю. J. Transp. Інж. , 137 (2010) , с. 104 – 111.

51. Дж. Шан , Дж. Умана. Діелектрична проникність і час релаксації асфальтобетонних покриттів. *J. Інфраструктура. Сист.* , 5 (+1999) , стор. 135 – 142.
52. Е. Я. Ясельскіс , Й. Грігас , А. Брілінгас. Діелектричні властивості асфальтобетонного покриття. *Дж. Матер. Сів. Інж.* , 15 (2003) , с.427 – 434.
53. JQ Shang. Вплив властивостей асфальтобетонного покриття на складну діелектричну проникність. *Міжнародний Дж. Тротуарна інж.* , 3 (2002) , с. 217 – 226.
54. П. Шангуан , Іллінойс Аль-Каді. Калібрування моделювання fdtd сигналу gpr для контролю ущільнення асфальтового покриття. *IEEE Trans. Геосці. Remote Sens.* , 53 (2014) , с. 1538 – 1548.
55. М. Д. Нолл. Петрофізична основа проникнення на землю радіолокатора та дуже ранніх часів електромагнетики: електричні властивості піщано-глинистих сумішей. Доктор філософії дисертація. Університет Британської Колумбії (1996).
56. А. Сіхвола. Правила змішування зі складними діелектричними коефіцієнтами. Підводна частина. *Sens. Technol. Заяв.* , 1 (2000) , с.393 – 415.
57. А.Х. Сіхвола , Дж. Конг. Ефективна діелектрична проникність діелектричних сумішей. *IEEE Trans. Геосці. Remote Sens.* , 26 (1988) , с.420 – 429.
58. Х.-у. Чжу , Х. Ван , Ю. Ю. Мікромеханічні моделі повзучості для багатофазних композитів, зміцнених частинками на основі асфальту, з в'язкопружним недосконалим інтерфейсом. *Міжнародний J. Eng. Наук.* , 76 (2014) , стор. 34 – 46.
59. Е. Масад , Л. Ташман , Н. Сомедаван , Д. Літл. Аналіз анізотропії жорсткості в асфальтових сумішах на основі мікромеханіки. *Дж. Матер. Сів. Інж.* , 14 (2002) , с. 374 – 383.
60. Q. Дай. Дво- і тривимірне мікромеханічне в'язкопружне моделювання скінченних елементів кам'яних матеріалів за допомогою рентгенівських

комп'ютерних томографічних зображень. Констр. Збірка. Матер. , 25 (2011) , с. 1102 – 1114.

61. Ю. Чжай , Ю. Чжун , Б. Чжан , Ф. Ван , Х. Лі. Прогнозування діелектричних властивостей на основі мікромеханічного моделювання асфальтових мастик. *APR Adv.* , 8 (2018) , с. 125311.

62. Ю. Чжай , Б. Чжан , Ф. Ван , Ю. Чжун , Х. Лі. Композитна діелектрична модель асфальтобетонних сумішей з урахуванням градації мінеральних заповнювачів. *Дж. Матер. Сів. Інж.* , 31 (2019) , стаття 04019091.

63. П. Субеді , І. Чаттерджі. Модель діелектричної суміші для сумішей асфальт-заповнювач. *Дж. Мікроу. Потужність Електромагніт. Енергія.* , 28 (+1993) , стр. 68 – 72.

64. А. Х. Сіхвола. Формули та застосування електромагнітного змішування. Серія електромагнітних хвиль ІЕЕ , Інститут інженерів-електриків (1999).

65. Л. Релей. Lvi. про вплив перешкод, розташованих у прямокутному порядку, на властивості середовища, Лондон, Единбург та Дублін. *Філ. Маг. J. Sci.* , 34 (1892) , с. 481 – 502.

66. К. Броссо. Моделювання та моделювання діелектричних гетероструктур: фізичний огляд з історичної точки зору. *J. Phys. D. Заяв. Фіз.* , 39 (2006) , с. 1277.

67. В. Мирошниченко , Ч. Броссо. Кінцево-елементний метод розрахунку ефективної діелектричної проникності випадкових неоднорідних середовищ. *Фіз. Rev. E* , 71 (2005) , стаття 016701.

68. С. Лахуар. Розробка алгоритмів аналізу даних для інтерпретації наземних радіолокаційних даних. Доктор філософії дисертація. Техніка Вірджинії (2003).

69. С. Лахуар , І. Л. Аль-Каді , А. Лулізі , Т. М. Кларк , Д. Т. Лі. Підхід до визначення діелектричної проникності бруківки *in situ*: розробка та впровадження на міждержавному рівні 81 у штаті Вірджинія. *Трансп. Рез. Рек.* , 1806 (2002) , с. 81 – 87.

70. І. Л. Аль-Каді , С. Лахуар. Вимірювання товщини шару за допомогою gpr – теорії на практиці. Констр. Збірка. Матер. , 19 (2005) , с. 763 – 772.

71. Х. Лю , З. Ден , Ф. Хань , Ю. Ся , ҚН Лю , М. Сато. Частотно-часовий аналіз даних, пов'язаних з повітрям, для виявлення розшарування між шарами тротуару. Констр. Збірка. Матер. , 154 (2017) , с. 1207 – 1215.

72. С. С. Тодкар , К. Ле Бастар , В. Балтазарт , А. Ігамутен , Х. Деробер. Оцінка продуктивності методів класифікації на основі SVM для виявлення штучних відшаровувань у конструкціях дорожнього покриття на основі даних радіолокаційного сканування з частотним скануванням. NDT & E Int. (2019) , с. 102 – 128.

73. Ф. М. Фернандес , JC Pais. Лабораторне спостереження за тріщинами дорожніх покриттів з гпр. Констр. Збірка. Матер. , 154 (2017) , с. 1130 – 1138.

74. З. Ленг , І. Л. Аль-Каді , С. Лахуар. Розробка та перевірка моделей прогнозування щільності асфальтобетонної суміші in situ. NDT Int. , 44 (2011) , с. 369 – 375.

75. І. Л. Аль-Каді , З. Ленг , С. Лахуар , Дж. Баек. Оцінка щільності асфальтового покриття на місці за допомогою радіолокатора, що проникає в землю. Трансп. Рез. Рек. , 2152 (2010) , с. 19 – 27.

76. С. Fauchard , Б. Лі , Л. Лагера , Б. Heritier , Н. Бенджеллун , М. кади. Визначення ущільнення асфальтобетонної суміші за допомогою високочастотних електромагнітних методів. NDT & E Int. , 60 (2013) , стор. 40 – 51.

77. С. Ван , С. Чжао , І. Л. Аль-Каді. Моніторинг щільності асфальтобетонного покриття під час будівництва за допомогою радіолокатора, що проникає в землю: теорія на практиці. Трансп. Рез. Рек. , 2673 (2019) , с. 329 – 338.

78. Р. Еванс , М. Фрост , Р. Морроу. Оцінка впливу вологи на діелектричні властивості асфальту. 2012 14-а міжнародна конференція з наземного радіолокаційного радара (GPR) , IEEE (2012) , с. 536 – 541.

79. Ч. Платі , А. Лойзос. Оцінка щільності та вмісту води на місцях на покриттях hma на основі амплітуди відбиття сліду gpr з використанням різних частот. J. Appl. Геофіза. , 97 (2013) , стор. 3 – 10.

80. С. Себеста , Т. Скалліон. Застосування інфрачервоного зображення та радіолокатора, що проникає під землю, для виявлення сегрегації в асфальтових покриттях із гарячою сумішшю. Трансп. Рез. Рек. , +1861 (+2003) , стр. 37 – 43.

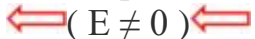








81. А. Лоїсос , Ч. Платі. Оцінка пустот та жорсткості hma на основі діелектричних значень матеріалу. Road Mater. Тропуар Дез. , 12 (2011) , с. 217 – 226.

82. WW-L. Лай , Х. Деробер , П. Аннан. Огляд застосування радіолокаційного наземного радару в цивільному будівництві: 30-річний шлях від пошуку та тестування до зображення та діагностики. NDT & E Int. , 96 (2018), стор. 58 – 78.

83. Т. Пеллінен , Е. Хуусконен-Снікер , П. Ескелінен , П. О. Мартінес. Репрезентативний об'ємний елемент асфальтового покриття для електромагнітних вимірювань. J. Транспортний транспорт. Інж. (Англ. Ред.) , 2 (2015) , с. 30 – 39.

ДОДАТОК А

Таблиця 1 . Схематична ілюстрація механізмів поляризації.

Механізми поляризації	Відсутність електричного поля ($E = 0$)	З електричним полем  ($E \neq 0$)
Електронний		
Атомна або іонна		
Орієнтаційний (або дипольний)		
Міжфазний		

Таблиця 2. Огляд моделей діелектричного змішування для асфальтобетонних сумішей.

Назва моделі	Вираз
Модель Ліхтенкера-Ротера	$\varepsilon_{eff}^a = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_i^a \quad (9)$ <p>Де a - константа, яка залежить від складу суміші, і коли $a = 0,5$, рівняння поступається моделі складного показника заломлення; v_i та ε_i - об'ємна частка та об'ємна діелектрична проникність i-ї складової; n - кількість складових.</p>

Модель Чанга	$\varepsilon_{eff} = c \left(\sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_i^{\alpha} \right)^{\beta} + k \quad (10)$ <p>Де α - константа, що залежить від складу суміші, тоді як константа β становить частину взаємодії компонентів суміші, а для щільного асфальту приймається $\alpha = 0,5$ і $\beta = 2$. c і k - статистичні параметри.</p>
--------------	---

Продовження таблиці 2

Модель Релея	$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_m} = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m} \quad (11)$ <p>Де ε_m - об'ємна діелектрична проникність матеріалу фонові матриці.</p>
Модель Беттчера (і модель Максвелла-Гарнетта)	$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m}{3\varepsilon_{eff}} = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m} \quad (12)$
Модель Сіхвола-Конга	$\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m = \frac{\sum_{i=1}^n v_i (\varepsilon_i - \varepsilon_m) \frac{3\varepsilon_m}{\varepsilon_i + 3\varepsilon_m}}{1 - \sum_{i=1}^n v_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m}} \quad (13)$
Модель Чжай	$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_m} = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\frac{2\varepsilon}{r_1} + \varepsilon_i - \varepsilon_m}{\frac{2\varepsilon}{r_1} + \varepsilon_i + 2\varepsilon_m} \quad (14)$ <p>Де, $\frac{2\varepsilon}{r_1}$ враховує поляризації на межі розділу бітумної матриці з включенням заповнювача / наповнювача, в яких r_1 - радіус включення і ε - міжфазна діелектрична проникність, що підлягає експериментальному визначенню.</p>

Модель Subedi & Chatterjee
(врахований ефект вологи)

$$\varepsilon' = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_{i'} + \left| \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n v_i v_j (\varepsilon_{i'} - \varepsilon_{j'}), \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n v_i v_j (\varepsilon_{j'} - \varepsilon_{i'}) \end{array} \right. \quad (15)$$

Де, ε_i , ε_j = діелектрична проникність i-ї, j-ї складових відповідно; n - кількість складових.

