

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Фізичний факультет  
Кафедра загальної фізики

На правах рукопису

**Визначення електричних характеристик  
сегрегованих структур на основі CNT**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки

**Спеціальність:** 104 Фізика та астрономія

**Освітня програма:** Фізика наносистем

**Кваліфікаційна робота магістра**  
студента 2 року навчання  
Лавренка Олександра Ігоревича

**Науковий керівник:**  
доктор фізико-математичних наук  
Мацуй Л.Ю.

Робота заслухана на засіданні кафедри загальної фізики та рекомендована до захисту на ЕК, протокол № 7 від «19» травня 2022 р.

Завідувач кафедри загальної фізики,  
док. фіз.-мат. наук, професор



Боровий М.О.

## **ВИТЯГ**

з протоколу № \_\_\_\_\_

засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент Лавренко О. І. виконав та захистив кваліфікаційну роботу  
магістра з оцінкою \_\_\_\_\_.

Голова ДЕК \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

## АНОТАЦІЯ

**Лавренко О. І.** Визначення електричних характеристик сегрегованих структур на основі CNT.

Кваліфікаційна робота магістра за напрямом підготовки 104 Фізика та астрономія, освітньої програми «Фізика наносистем». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра загальної фізики. – Київ – 2022.

**Науковий керівник:** д. ф.-м. н., проф. Мацуй Л.Ю., проф. каф. загал. фізики

У даній роботі досліджено електричні параметри композитів з наповнювачами ВНТ та ВНТ з додаванням NiFe. Електричні параметри вимірювали за допомогою програмного забезпечення LabView та двохзондового методу при сталій частоті. При змінній частоті параметри композитів вимірювалися за допомогою приладу який аналогічний до скалярного аналізатора мережі який дозволяв вимірювати значення комплексних параметрів  $S_{21}$  і  $S_{11}$  у вказаних частотних діапазонах (26-37 ГГц або 36-55.5 ГГц). Показано, що при більш ніж 1 об'ємному відсотку проявляється вплив декорування частинок CNT частинками NiFe.

**Ключові слова:** полімерні композити, вуглецеві нанотрубки, залізо, гібридні наповнювачі, залежності електродинамічних параметрів, вуглець-нікель-залізо, електропровідність, декорування.

## SUMMARY

**Lavernko O. I.** Determination of electrical characteristics of segregated structures based on CNT.

Qualification work of the master in the direction of preparation 104 Physics and astronomy, educational program "Physics of nanosystems". - Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of General Physics. - Kyiv - 2022.

**Supervisor:** Doctor of Physical and Mathematical Sciences Matzui L. Yu

In this work, the electrical parameters of composites with CNT and CNT fillers with NiFe addition are investigated. Electrical parameters were measured using LabView software and the two-probe method at a constant frequency. At variable frequency, the parameters of the composites were measured using an instrument similar to the scalar network analyzer which allowed to measure the values of complex parameters  $S_{21}$  and  $S_{11}$  in the specified frequency ranges (26-37 GHz or 36-55.5 GHz). It has been shown that more than 1 volume percent has the effect of decorating CNT particles with NiFe particles.

**Key words:** polymer composites, carbon nanotubes, iron, hybrid fillers, dependences of electrodynamic parameters, carbon-nickel-iron, electrical conductivity, decoration.

# Зміст

Вступ.....	6
<b>1. Огляд літератури</b>	
<b>1.1</b> Морфологія та методи виготовлення наноматеріалів з металізованим нановуглецевим наповнювачем .....	7
<b>1.2</b> Мікрохвильові властивості композитів з металізованим нановуглецевим наповнювачем.....	10
<b>1.3</b> Діелектрична та магнітна проникність композитів з металізованим нановуглецевим наповнювачем .....	11
<b>2. Методика експерименту</b>	
<b>2.1</b> Методика отримання ВНТ декорованих NiFe.....	13
<b>2.2</b> Методика приготування зразків КМ.....	14
<b>2.3</b> Методика дослідження електричних властивостей при змінній частоті.....	16
<b>2.4</b> Методика вимірювань електричних властивостей при сталій частоті.....	18
<b>2.5</b> Результати вимірювань.....	18
Висновки.....	23

## Вступ

**Актуальність теми.** Найактуальнішим завданням матеріалознавців останнім часом є активний пошук та створення матеріалів з якісно новими та контрольованими властивостями, які могли б задовольнити сучасні потреби людства в таких галузях як, наприклад, машинобудування, будівництво, передача та захист інформації тощо. Одним із пріоритетних напрямків досліджень у сучасній науці є вивчення властивостей нанорозмірних матеріалів, таких як графен, нанотрубки, фулерени, графітові нанопластинки.

Дана тема актуальна, перш за все, через можливість використання її в розробках нової матеріальної бази для сучасного обладнання та приладів в багатьох сферах. В добу колосального розвитку науки і техніки особливого значення набуває необхідність в нових якісних матеріалах. Такими матеріалами можуть стати добре відомі полімер-композитні матеріали з нановуглецевими наповнювачами, наприклад, поліетилен з вуглецевими нанотрубками.

Вуглецеві нанотрубки, які я досліджував, мають ряд досить суттєвих переваг. Вони мають дуже велику міцність в порівнянні навіть із найміцнішими матеріалами, наприклад, модуль пружності вздовж осі трубки становить 7000 ГПа. Велика електропровідність, невелика маса і корозійна стійкість викликали високу популярність даних матеріалів.

У порівнянні зі звичайними екрануючими металевими матеріалами, полімерні композити здобули свою популярність через їхню малу вагу та корозійну стійкість, що дуже важливо в багатьох сферах.

**Мета роботи:** Метою даної роботи було дослідження та з'ясування особливостей концентраційних залежностей електричних параметрів полімерних композитів на основі ВНТ та ВНТ модифікованих наночастинками металу.

## 1. Огляд літератури

### 1.1. Морфологія та методи виготовлення наноматеріалів з металізованим нановуглецевим наповнювачем

#### *Методи отримання*

Існує велика різноманітність методів виготовлення для отримання неорганічних наночастинок ядро-оболонка на основі хімічного та фізичного підходів [1, 2]. Однак, враховуючи велику універсальність багатьох хімічних шляхів у контролі матеріалів: кристалічність, однорідність, розміри чи навіть форми, менше уваги приділяється синтезу за допомогою фізичних підходів [1, 2]. Деякі приклади стандартних хімічних шляхів, що використовуються для синтезу наночастинок твердо- м'якого ядро-оболонки - це спільне осадження [3–5], термічне розкладання [6], відновлення металів [7, 8], методи, що підтримуються мікрохвильовою дією [9, 10] та електроосадження [11]. Один із найпростіших шляхів утворення неорганічних наночастинок ядро-оболонка виникає внаслідок поверхневої обробки наночастинок [12]. Цей підхід був, мабуть, найбільш розповсюдженим методом формування наночастинок ядро-оболонка, а саме щодо вивчення феромагнітних та антиферомагнітних систем [13]. Ця процедура полягає в обробці поверхні (наприклад, окиснення, відновлення, нітрування або карбідизація) наночастинок, що призводить до утворення шару на їх поверхні з іншою фазою (тобто з різними фізіохімічними властивостями ядра). У випадку наночастинок перехідних металів, контрольоване окиснення призводить до утворення шару пасивації оксиду. Подібним чином, для наночастинок оксиду пасивація кисню може спричинити утворення оксидної оболонки з вищим ступенем окиснення. З іншого боку, контрольоване відновлення наночастинок оксиду може призвести до поверхневого металевого шару. Незважаючи на свою простоту, для конкретного випадку наночастинок із твердо-м'яким ядром -оболонкою цей підхід широко не застосовувався.

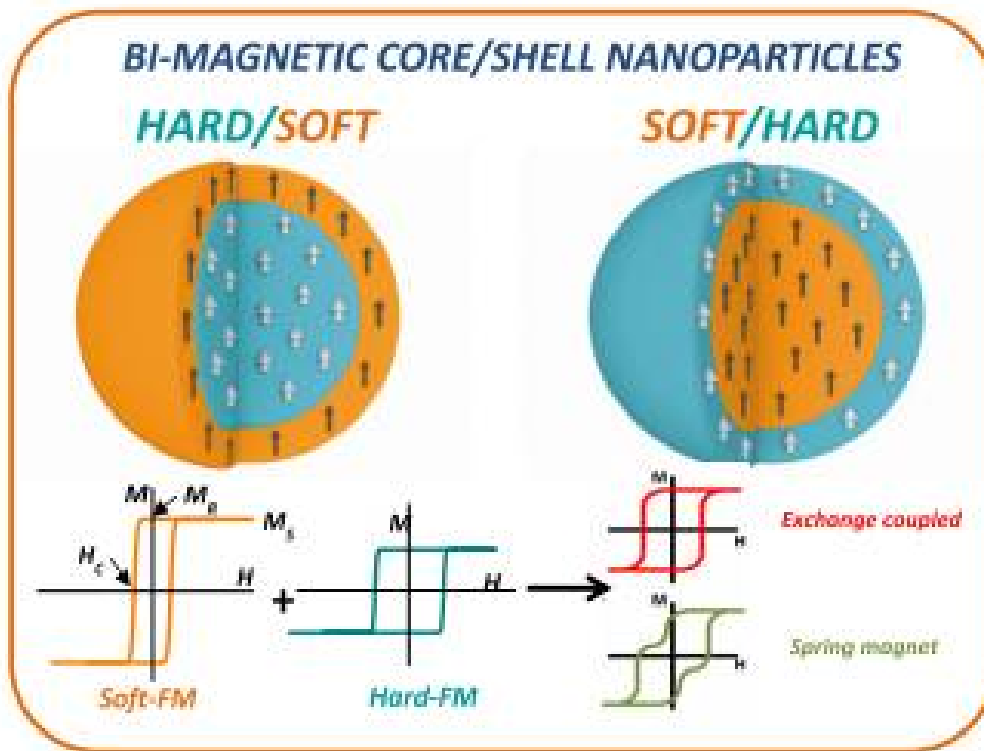


Рис. 1.1 Схематичне зображення твердо-м'якої та м'яко-твердої ядра-оболонки. Просте графічне зображення петель гістерезису для м'яких та твердих феромагнетиків та їх можливі комбінації: обмінний зв'язаний та обмінно-пружинний магніт, намагніченість насичення  $M_S$ , залишкова намагніченість  $M_R$  та коерцитивна сила  $H_C$ , вказані в контурі м'якого феромагнетика [14].

Це пов'язано з трьома основними недоліками цього методу: 1) оболонка завжди походить від ядра, отже, їх розміри не можна контролювати незалежно; 2) оскільки фаза оболонки повинна бути отримана в результаті поверхневої обробки матеріалу ядра, можливий вибір фаз ядро-оболонка дещо обмежений; 3) оскільки матеріали в ядрі та оболонці часто мають досить різні структурні характеристики (наприклад, метал та оксид), структурна якість оболонки може бути нижчою. Незважаючи на ці недоліки, можна знайти кілька прикладів цього підходу з використанням поверхневого окислення, головним чином для зворотних м'яко-твердих систем: FeCo / CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [14], FeCoB / CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> та FeCo (Al) / FeCo (Al) [15]. Цікаво, що до обробки поверхні наночастинки синтезуються в основному методами хімії, такими як: термічне розкладання [15], відновлення металів [14], або спільне



випадання осадів [14]. Однак також повідомлялося про деякі фізичні підходи для отримання вихідних наночастинок.

### *Морфологія*

Морфологію частинок зазвичай оцінюють на електронних мікрофотографіях. TEM - найбільш оптимальний спосіб для локального вимірювання розмірів частинок та визначення морфології наночастинок [16]. Що стосується наночастинок ядро - оболонка, то через збільшення інтенсивності розсіювання електронів із збільшенням атомного числа  $Z$  [17] звичайні TEM зображення у яскравому полі можуть бути корисними для розрізнення ядра від оболонки лише за умови різниці порівняно великих середніх атомних композицій, як це має місце для композицій метал-оксид [18].

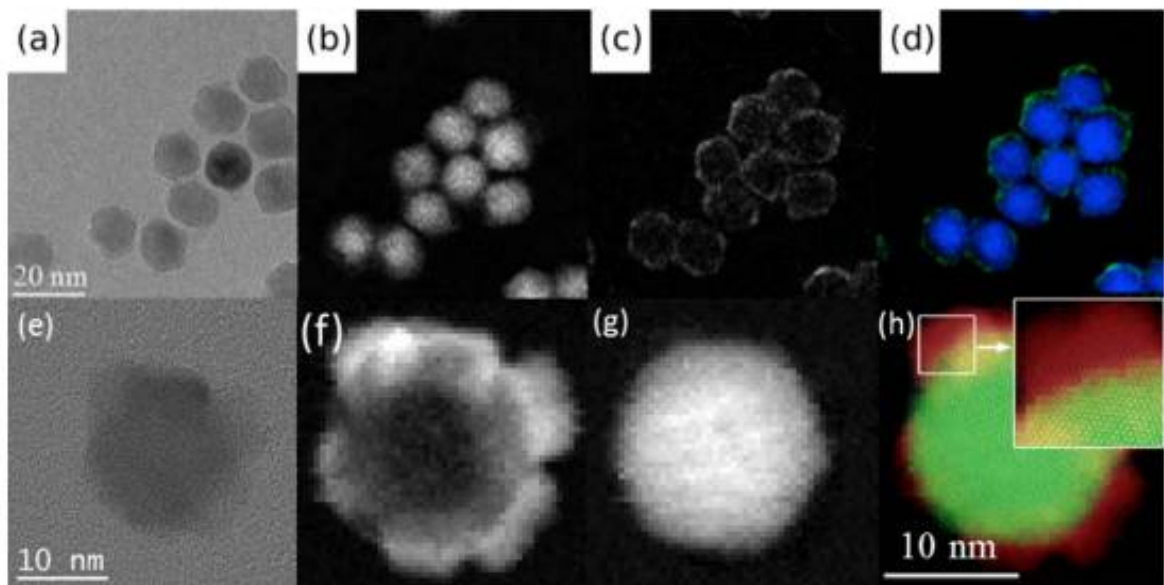


Рис 1.2 Зображення TEM на основі EELS. (a) BF-TEM зображення наночастинок FeO / Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> / MnO, (b) та (c) зображення EFTEM (a), отримані на (b) заліза та (c) марганцю L<sub>3</sub>. (d) Помилкове кольорове накладання зображення для (b) та (c) [19]. (e) Зображення STEM-HAADF із високою роздільною здатністю наночастинок ядра - оболонки Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> / Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, (f) та (g) зображень спектра STEM-EELS на краях Mn- та Fe. (h) Накладене

зображення HAADF та зображення спектра у помилковому кольорі. На вставці показано збільшений вигляд виділеної області [20].

В якості альтернативи, спектроскопічні методи на основі TEM також можуть бути використані для вивчення наночастинок ядро - оболонка. В результаті нееластичної взаємодії електрон-речовина передані електрони можуть зазнати квантованих втрат енергії, які можна виміряти як спектр втрат енергії електронів (EELS) [19]. Потім трансмісійні електронні мікроскопи, обладнані спектрометром EEL, можуть використовуватися для отримання специфічних для елемента зображень за допомогою енергетичної фільтрації спектрів EEL [17]. Наприклад, Салазар Альварес та ін. використовував EFTEM для зображення Ca. Оболонка MnO товщиною 1 нм, нанесена на ядра FeO / Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (див. Рис. 1.2 а – d) [19] та Ong et al. застосував його для характеристики наночастинок Fe / FeO / Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> [18]. Покращенням цієї техніки є поєднання STEM з дуже малим розміром зонда, як правило, <1 нм, та EELS, що забезпечує бічну роздільну здатність на атомному рівні [19]. Ця методика була використана для зображення різних типів наночастинок ядро - оболонка [18, 20] (див. Рис. 1.2 д). Що важливо, у поєднанні із зображеннями HRTEM цей підхід дозволяє візуалізувати чіткість інтерфейсу [20].

## **1.2. Мікрохвильові властивості композитів з металізованим нановуглецевим наповнювачем.**

Розглядалися різні металізовані нановуглецеві наповнювачі такі як: PEDOT-BaF, покриття вуглецевих нанообмоток магнітними Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> або Ni, нанопластинки кобальту з анізотропією сильної форми, та інші.

Наприклад PEDOT-BaF демонструє сильні властивості мікрохвильового поглинання в 12,4-18 ГГц зі значенням SE<sub>a</sub> 22,5 дБ на 15 ГГц з мінімальними втратами на відбиття 2 дБ. Високі властивості поглинання в основному обумовлені великими діелектричними та магнітними втратами в композитах і залежать від концентрації фериту барію в полімерному композиті.

Емульсійна полімеризація, яка призводить до морфології типу серцевина-оболонка, посилює міжфазну поляризацію та ефективну анізотропну енергію композиту, що сприяє більш високому мікрохвильовому поглинанню. Як результат, нанокомпозити з діелектричними оболонками та феритовими ядрами також є перспективними як нові типи мікрохвильових поглинаючих матеріалів, що використовуються в широкому діапазоні частот, підтримуючи сильне поглинання [21].

Підготовлені магнітні ВНТ (вуглецеві нанотрубки) демонструють набагато нижчий  $RL$  і ширший діапазон частот поглинання, ніж частоти звичайних ВНТ. Посилені мікрохвильові властивості поглинання магнітних ВНТ виникають внаслідок ефективного взаємодоповнення між комплексною діелектричною проникністю та магнітною проникністю, хіральною морфологією та багат шаровою структурою матеріалу [22].

Нанопластинки кобальту з сильною анізотропією форми виявляють потрійну резонансну поведінку в залежності від геометрії та середнього розміру частинок. Геометрія сприяє природному резонансному піку, енергія обміну та розмір можуть бути якісно пов'язані з режимом обмінного резонансу [23].

### **1.3. Діелектрична та магнітна проникність композитів з металізованим нановуглецевим наповнювачем**

Щоб дослідити можливі механізми та ефекти, що спричиняють посилення мікрохвильового поглинання, досліджують поведінку комплексної діелектричної проникності та магнітної проникності матеріалів. На рисунках 1.3 а, б показано дійсну та уявну частини комплексної діелектричної проникності, виміряної для зразків А-Е [26]. Абсолютні значення вимірних дозвільних показників, показані на малюнку 1.3, мають той самий порядок величини, що і  $\epsilon'$  та  $\epsilon''$ , що повідомляються Grimes et al. [24] для одностінних вуглецевих нанотрубок (SWCNT) навантажених полімерних композитів. Ці автори виявили, що частотно-залежний діелектричний відгук їх нанокомпозитів значною мірою визначається металевим пучком SWCNT, і

розрахунки, засновані на теорії ефективного середовища, розробленій Лагарковим та Саричевим [25], добре узгоджуються з їх експериментальними результатами.

Більш недавнє дослідження, проведене Hsu та його співробітниками [25], показало, що електронний спін через точкові дефекти та поляризовані центри може мати сильний вплив на реакцію вуглецевої нанотрубки; цей новий ефект не був включений в теорію

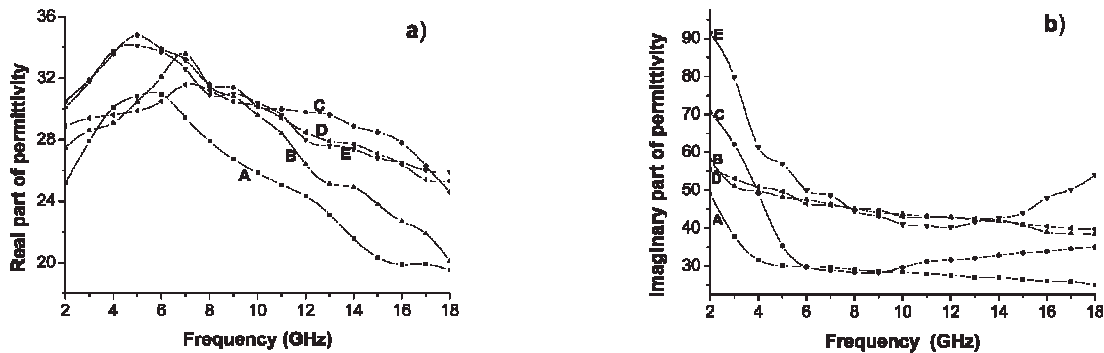


Рис 1.3 Частотна залежність комплексної відносної діелектричної проникності зразків А-Е: а) реальна та б) уявна частина. [26]

Лагаркова та Саричева [25]. З рис. 1.3 видно, що включення Fe у вуглецеві нанотрубки збільшує і реальні і уявні частини відносної діелектричної проникності, це дає змогу стверджувати, що ВНТ з Fe мають вищу електропровідність, ніж чисті ВНТ. Широкий пік близько 5-7 ГГц виявляється в  $\epsilon_r'$  для всіх зразків, що свідчить про резонансну поведінку, яка очікується, коли композит має високу провідність і поверхневий ефект стає значним [25]. Ретельне вивчення малюнка 1.3 виявляє, що, хоча абсолютні значення діелектричної проникності можуть суттєво відрізнятися (оскільки для більш провідного кристалічного  $\alpha$ -Fe очікується вищий вихровий струм, ніж для аморфного Fe, загальна дисперсійна поведінка, схоже, визначається головним чином формою зразка - співвідношенням сторін нанокapsуляту, а не фазою капсульованого Fe. Для реальної частини діелектричної проникності зразки з малим співвідношенням сторін (B, D) мають піки приблизно на 5 ГГц, тоді як ті, що мають більший коефіцієнт пропорцій (C, E), мають піки приблизно на 7 ГГц. Для уявної частини зразки B, D

демонструють загальну спадну поведінку щодо більш високої частоти, тоді як зразки С, Е демонструють ділянку між 8 і 11 ГГц.

## **2.Методика експерименту**

### **2.1 Методика отримання ВНТ декорованих NiFe**

Для виготовлення ВНТ, декорованих FeNi, використовували метод сольового просочення [11]. Для отримання металів використовували концентровану азотну кислоту Merck (65 об.%  $\text{HNO}_3$ ) та розчин нітрату. Для відновлення оксидів металів використовували два газу: водень ( $\text{H}_2$ ) взятий з Flame Ionization Detector (FID) і гелій (He) взяті з повітряних куль, які були поставлені Linde Gas Ukraine, 99,995 об. %. Перед введенням,  $\text{H}_2$  був зневоджений в системі сухого скрубберу.

Типова процедура приготування ВНТ, декорованих FeNi з 60 мас. % сплаву FeNi. Номінальний вміст 80 мас. % Ni і 20 мас. % Fe -  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ ) є наступним. Спочатку суміш 1 г Fe та 4 г чистого металевого порошку Ni розчиняли в 50 мл 65 мас.%  $\text{HNO}_3$  і кип'ятять із зворотним охолодженням за допомогою піщаної бані протягом 30 хв. Коли обидва метали були повністю розчинені, розчин нітрату охолоджували до кімнатної температури. Відповідна маса ВНТ просочували розчином нітрату (при 60 мас. % металевого компонента на ВНТ) Потім отриману вологу речовину висушували на піщаній бані. Для приготування використовували порцеляновий посуд для випаровування залишків розчинника при  $100^\circ\text{C}$  протягом 4 год і наступне висушування в муфелі при  $350^\circ\text{C}$  протягом 4 год, щоб отримати суміш порошоків  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і NiO. Перетворення отриманих оксидів в металеву суміш Ni-Fe проводили потоком газу.

## 2.2 Методика приготування зразків КМ

Найпоширенішим методом виготовлення сегрегованих полімерних композитів (СМК) є термопакування (компресія) [8]. На першому етапі формується механічна суміш полімерного порошку та наповнювача з розмірами частинок  $D$  і  $d$  відповідно за умови  $D \gg d$ , щоб частинки наповнювача покривали поверхню більших полімерних частинок, створюючи «структуру оболонки». Після термічного пакування (стиснення при температурі розм'якшення полімеру) початковий розподіл частинок наповнювача залишається практично незмінним на кордонах між зернами полімеру і утворює візерунок сегрегованої структури, тоді як частинки полімеру деформуються та агломеруються під тиском та утворюють тверду полімерну матрицю. Для отримання заданих електричних властивостей сегрегованих композитів важливі умови обробки – температура і час стиснення, а також механічні та реологічні властивості полімерної матриці, що впливають на формування сегрегованої структури [9]. Такі фактори, як нижча температура і час стиснення або висока в'язкість розплаву полімерів, мінімізують міграцію частинок наповнювача в полімерні зерна під час термічного пакування, що знижує значення порогу перколяції.



Рис 2.1 Установка за допомогою якої виготовлялись композитні матеріали

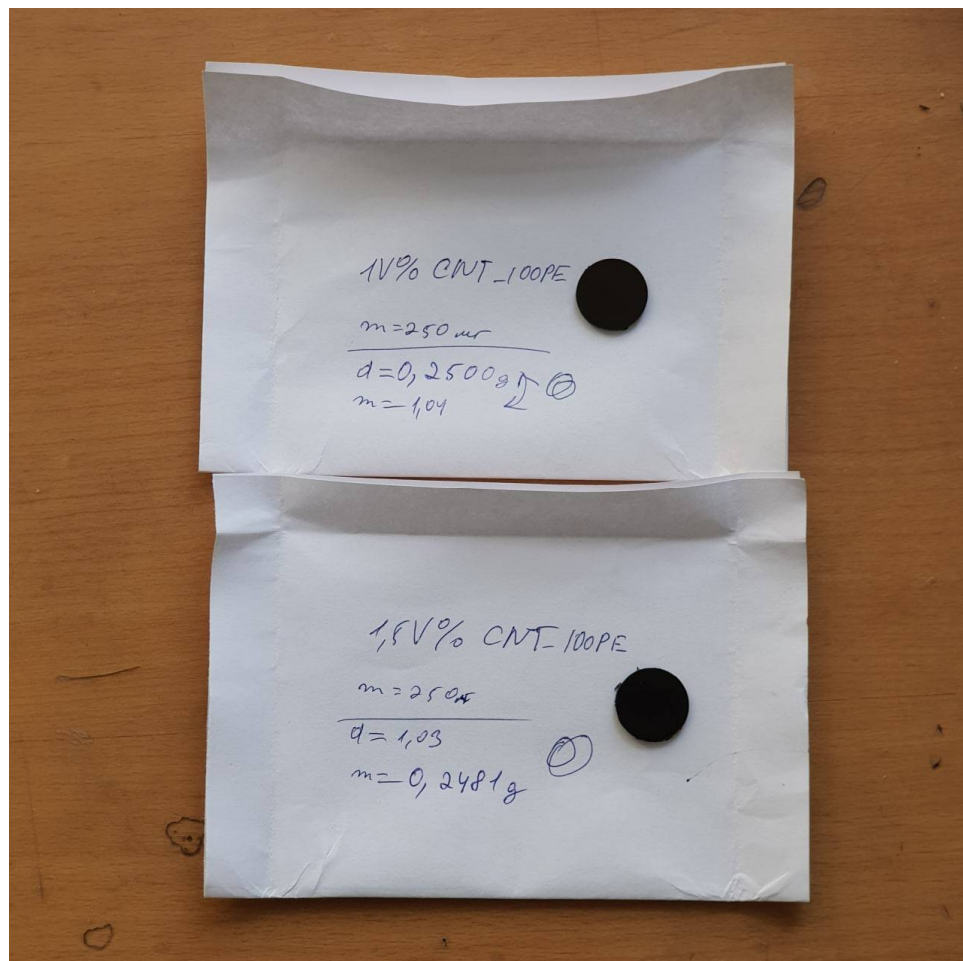


Рис 2.2 Приклади готових зразків

### 2.3 Методика дослідження електричних властивостей при змінній частоті

**Скалярний аналізатор мереж.** Зразки поміщали у хвилевід мережевого аналізатора. Використовувалась апаратура, аналогічна скалярним аналізаторам мереж, яка дозволяла вимірювати значення комплексних параметрів  $S_{21}$  і  $S_{11}$  у вказаних частотних діапазонах. Блок-схема за допомогою якої відбувалось вимірювання рівнів відбиття (коефіцієнт стоячої хвилі) та ослаблення ЕМВ зображена на рис 2.1

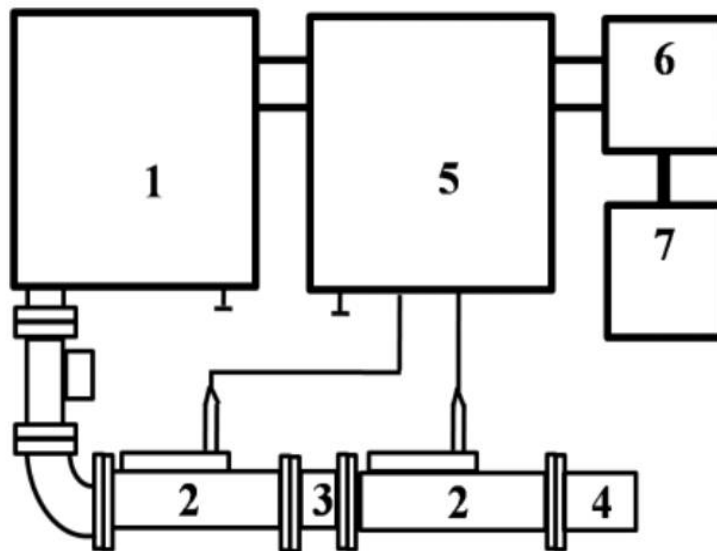


Рис. 2.1. Блок-схема скалярного аналізатора надвисокочастотних кіл (1 – генератор скануючої частоти, 2 – хвилеводні детекторні секції падаючої і відбитої хвилі, 3 – хвилевід разом з зразком, 4 – узгоджене навантаження, 5 – індикатор, 6 – АЦП, 7 - ПК).

Було взято 1024 точки які рівномірно розподілили по частотному діапазону. Частотна шкала прив'язувалась за допомогою зразкового електронного частотоміру. Керування відбувалось на комп'ютері з використанням ПЗ LabView та інтерфейса вводу-виводу National Instruments.



Коефіцієнти поглинання ЕМВ ( $A$ ) і відбивання ( $R$ ) пов'язані між собою та коефіцієнтом пропускання ( $Tr$ ) рівнянням балансу потужностей:

$$1 = R + A + Tr$$

Величини електричних полів відбитої, пропущеної та падаючої хвиль, відповідно:  $E_R$ ,  $E_{Tr}$ ,  $E_I$

$$R = |E_R/E_I|^2, \quad Tr = |E_{Tr}/E_I|^2,$$

Рівняння балансу енергії для частотних залежностей параметрів ефективності екранування, зареєстрованих в режимі короткого замикання (з металевою підкладкою) перетворюється на:

$$R + A = 1$$

В режимі узгодженого навантаження:

$$R + A + Tr = 1$$

Втрати на відбиття та ефективність екранування визначають як:

$$RL = 10 \lg R \quad SE_T = 10 \lg Tr$$

Крім того, існують такі фізичні величини  $r$  та  $t$  що являють собою коефіцієнт відбиття ЕМВ в екрані товщиною  $l$  та коефіцієнт ослаблення ЕМВ в екрані товщиною  $l$ :

$$r = \frac{(r_{12} - r_{12} e^{-2k_z l})}{(1 - r_{12} e^{-2k_z l})} \quad t = \frac{(1 - r_{12}^2) e^{-k_z l}}{(1 - r_{12}^2 e^{-2k_z l})},$$

Пов'язані з  $RL$  та  $SE_T$  наступним чином:

$$RL = 20 \lg |r|, \quad SE_T = 20 \lg |t|.$$

Комплексна діелектрична проникність середовища:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''$$

Комплексна магнітна проникність середовища:

$$\mu^* = \mu' - i\mu''$$

## 2.4 Методика вимірювань електричних властивостей при сталій частоті

Електричні параметри, а саме **R**,  **$\rho$**  вимірювались за допомогою, програмного забезпечення LabView на комп'ютері до якого підключались зразки за допомогою двохзондового методу.

Зразок фіксувався між двома зондами і контакти змазувались срібною пастою для кращого контакту з ними.

Після підключення зразка, запускається програмне забезпечення, яке з певною частотою фіксує значення опору. Після цього брали середнє значення отриманих даних та заносили до таблиці.

## 2.5 Результати вимірювань

Проведено дослідження електричних параметрів полімерних композитів на основі CNT та CNT модифікованих наночастинками металу (CNTNiFe).

На рисунку 2.2 представлено експериментальні результати дослідження електропровідності на постійному струмі KM CNT/100PE та CNTNiFe/100PE

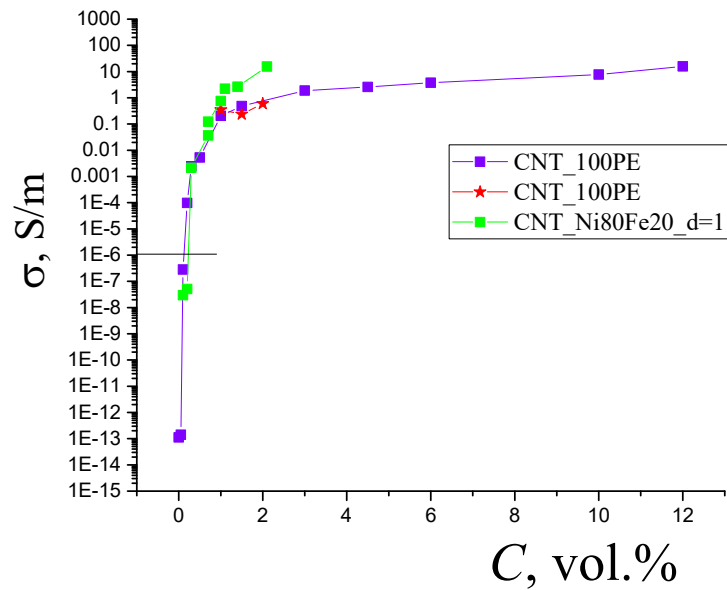


Рис. 2.2 Концентраційна залежність провідності

Як видно з рис 2.2, для зразка 1%V\_CNT\_100PE провідність дорівнює 0,255 S/m, при збільшенні концентрації до 1,5% CNT провідність зростає до 0,281, і відповідно при збільшенні концентрації до 2% CNT - бачимо різке зростання провідності до 0,558

Зразок	Концентрація CNTNiFe (V%)	σ, S/m
<b>0.1%V_CNT_NiFe_100PE</b>	<b>0.1</b>	<b>2,96912E-8</b>
<b>0.2%V_CNT_NiFe_100PE</b>	<b>0.2</b>	<b>5,10204E-8</b>
<b>0.3%V_CNT_NiFe_100PE</b>	<b>0.3</b>	<b>0,00214</b>
<b>0.7%V_CNT_NiFe_100PE</b>	<b>0.7</b>	<b>0,03676</b>
<b>0.7%V_CNT_NiFe_100PE</b>	<b>0.7</b>	<b>0,12195</b>
<b>1%V_CNT_NiFe_100PE</b>	<b>1</b>	<b>0,75188</b>
<b>1.1%V_CNT_NiFe_100PE</b>	<b>1.1</b>	<b>2,20751</b>
<b>1.4%V_CNT_NiFe_100PE</b>	<b>1.4</b>	<b>2,6455</b>

<b>2.1%V_CNT_NiFe_100PE</b>	<b>2.1</b>	<b>15,625</b>
-----------------------------	------------	---------------

Таб. 1. Значення  $\sigma$  для різних концентрацій CNT з металізованим наповнювачем.

Як бачимо з таб. 1, помітне зростання провідності відбувається при вмісті CNTNiFe в 1% і становить 0,75188 S/m, збільшуючи концентрацію CNT з металізованим наповнювачем до 1.1, 1.4, 2.1, отримуємо такі значення провідності відповідно: 2.20751, 2.6455, 15.625.

Відомо, що концентраційні залежності електропровідності досліджуваних КМ описуються класичною теорією перколяції, яка залежить від трьох параметрів: критичної концентрації  $\phi_{кр}$  (поріг перколяції), критичного індексу  $t$  та провідності матеріалу  $\sigma_n$

$$\sigma(\varphi) \sim \sigma_n (\varphi - \varphi_{кр})^t \quad (1.1)$$

Аналіз залежностей  $\sigma(\varphi)$  для досліджуваних зразків показав, що вони можуть бути описані залежністю (1.1), з параметрами  $\phi_{кр}$  та  $t$ . Величина  $\phi_{кр}$  складає 0,13 об.% та не змінюється при декорванні частинок CNT частинками NiFe.

Порівнюючи значення зразків CNT\_100PE з CNTNiFe\_100PE, можна стверджувати, що декорвання металізованим наповнювачем показало кращі результати для провідності починаючи з одного об'ємного відсотку CNT.

Проведені дослідження концентраційних залежностей електродинамічних характеристик таких як  $\Gamma$  (коефіцієнт пропускання)  $A$  (коефіцієнт поглинання)  $R$  (коефіцієнт відбивання). На рис 2.4 наведено графік концентраційної залежності при частоті 29 Гц

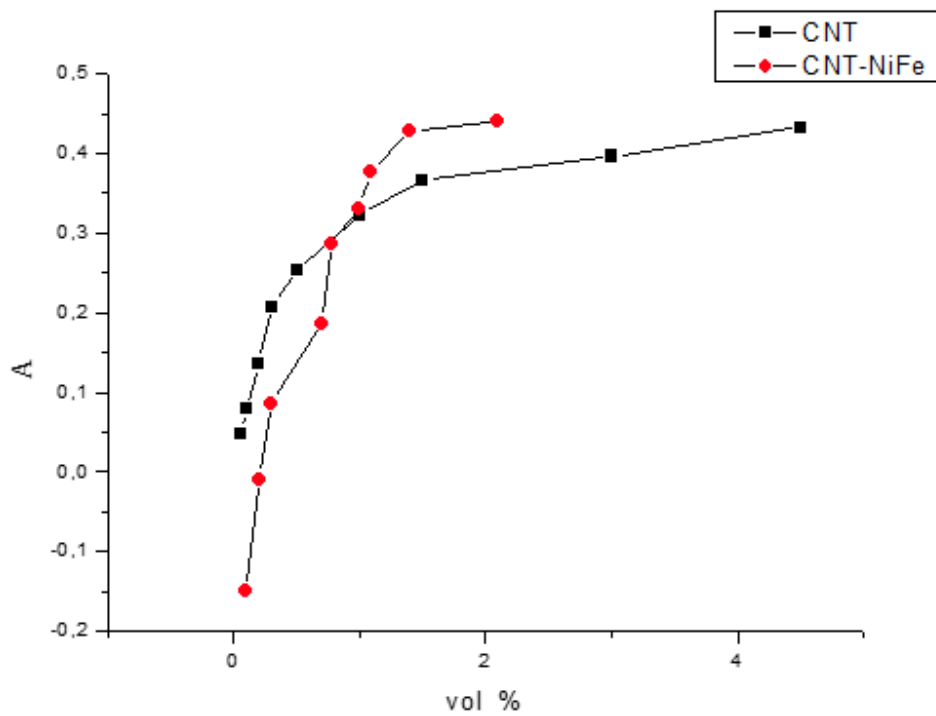


Рис. 2.4 Концентраційна залежність коефіцієнта поглинання ЕМВ (A)

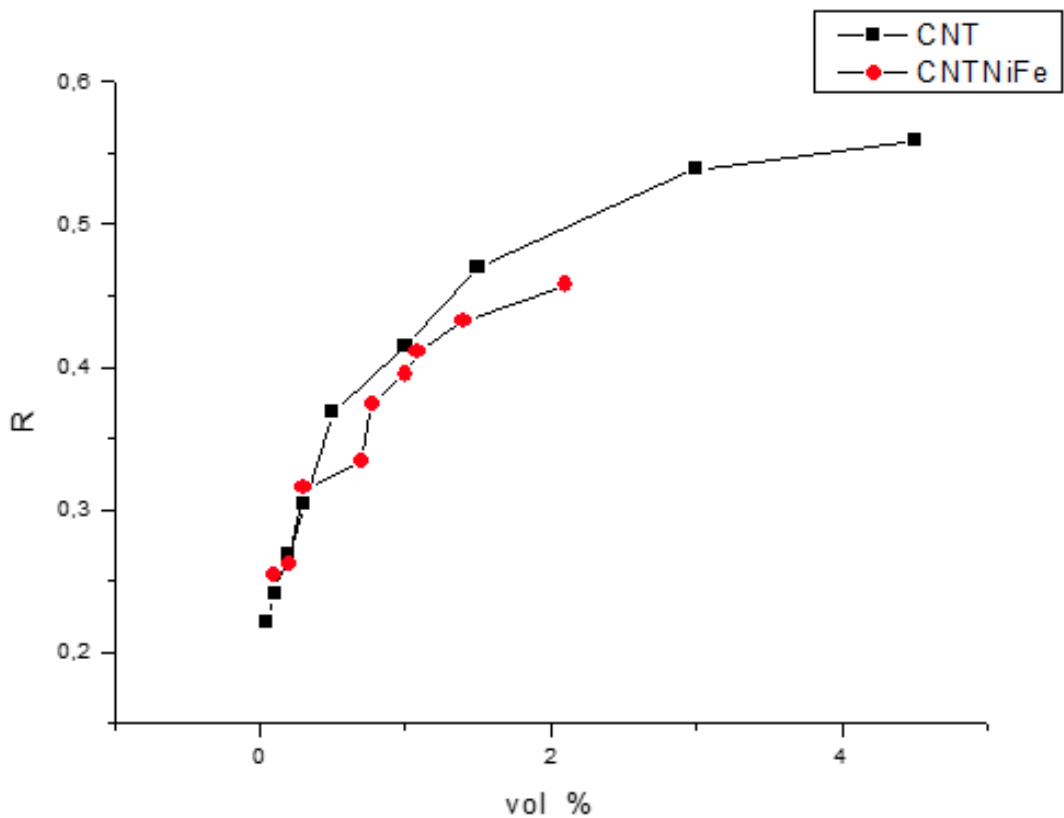


Рис. 2.5 Концентраційна залежність коефіцієнта відбивання (R)

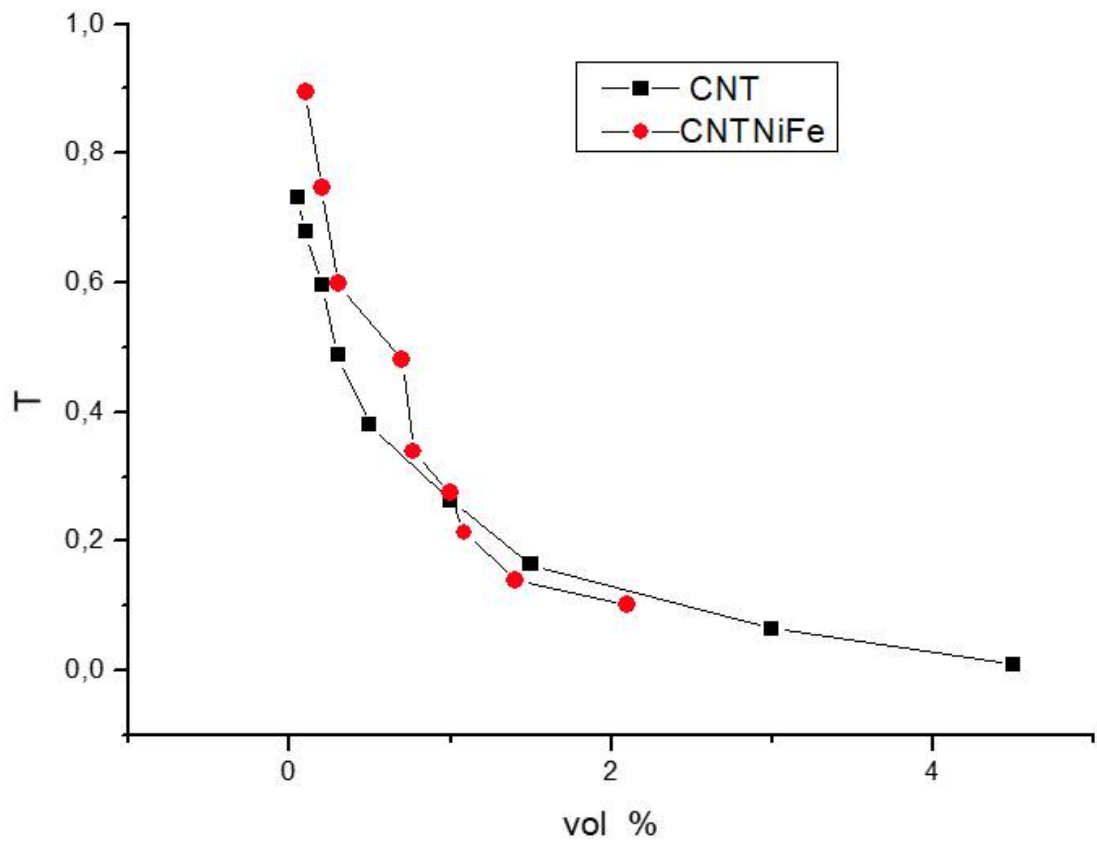


Рис. 2.6. Концентраційна залежність коефіцієнта пропускання ( $T_r$ )

Як видно з Рис. 2.6, вплив декорування CNT металізованим наповнювачем NiFe майже не проявляється.

## Висновки

1. Проведені дослідження електричних параметрів композитних матеріалів на основі вихідних та модифікованих нікелем та залізом вуглецевих нанотрубок (CNTNiFe\_100PE і CNT\_100PE) та побудовані концентраційні залежності для коефіцієнта відбивання, коефіцієнта пропускання та коефіцієнта поглинання.

2. Показано що для зразків композитів CNTNiFe\_100PE та CNT\_100PE при збільшенні вмісту наповнювача відбувається збільшення провідності.

3. При об'ємному вмісті наповнювача вище одного відсотка проявляється вплив декорування ВНТ частинками NiFe на коефіцієнти відбивання та поглинання, коефіцієнт поглинання збільшується, коефіцієнт відбивання зменшується. Вплив декорування на коефіцієнт пропускання практично не проявляється.

## Перелік використаних джерел

[1] Y. Duan, G. Li, L. Liu, S. Liu / Electromagnetic properties of carbonyl iron and their microwave absorbing characterization as filler in silicone rubber // *Bulletin of Materials Science*. – 2010 – Vol. 33, No. 5 –p. 633-636.

[2] Z. Wei, X. Huagang, W. Shaokai, L. Min, G. Yizhuo / Electromagnetic characteristics of carbon nanotube 4 film materials // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2015 – Vol. 28, Issue 4 – p. 1245-1254.

[3] M. Gawande, A. Goswami, T. Asefa, H. Guo, A. Biradar, D.-L. Peng, R. Zboril, R. Varma / Core-shell nanoparticles: synthesis and applications in catalysis and electrocatalysis // *Chem. Soc. Rev.* – 2015. – Vol. 44 – p. 7540-7590.

[4] Джурка Г.Ф., Полімерні композиційні матеріали - Полтава, 2008 – 58 с.

[5] A. Bouzidi, K. Omri, W. Jilani, H. Guermazi, I. Yahia / Influence of TiO<sub>2</sub> incorporation on the microstructure, optical, and dielectric properties of TiO<sub>2</sub>/epoxy composites // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. – 2017 – Vol. 28 – p. 1114–1126.

[6] E. Bekyarova, E. Thostenson, A. Yu, M. Itkis, D. Fakhrutdinov, T.-W. Chou, R. Haddon / Functionalized single-walled carbon nanotubes for carbon fiber-epoxy composites // *J. Phys. Chem.* – 2007. – V. 111, Issue 48. – p. 17865-17871.

[7] A. Goresy, M. Chen, L. Dubrovinsky, P. Gillet, G. Graup / An ultradense polymorph of rutile with seven-coordinated titanium from the Ries crater // *Science*. – 2001 – Vol. 293, Issue 5534. – p. 1467–70.

[8] Enhanced electrical conductivity of nanocomposites containing hybrid fillers of carbon nanotubes and carbon black / P. C. Ma [et al.] // *App. Mater. Interfaces* / - 2009. – V. 1, № 5. – p. 1090–1096.

[9] S.-H. Yao, Z.-M. Dang, M.-J. Jiang, J. Bai / BaTiO<sub>3</sub>-carbon nanotube/polyvinylidene fluoride three-phase composites with high dielectric constant and low dielectric loss // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – V. 93, Issue 18. – p. 1-3.



[10] A. Yu, P. Ramesh, X. Sun, E. Bekyarova, M. Itkis, R. Haddon / Enhanced thermal conductivity in a hybrid graphite nanoplatelet – carbon nanotube filler for epoxy composites // *Adv. Mater.* – 2008.- Vol. 20. – p. 4740–4744.

[11] Effect of carbon black on electrical property of graphite nanoplatelets/epoxy resin composites / Z. Fan [et. al.] // *Polym. Eng. Sci.* – 2009. – Vol. 49, Issue 10. – p.. 2041-2045.

[12] Engineering the Maxwell–Wagner polarization effect / T. Prodromakis, C. Papavassiliou // *Appl. Surf. Sci.* – 2009. – Vol. 255. – p. 6989-6994.

[13] J. Wei, S. Zhang, X. Liu, J. Qian, J. Hua, X. Li, Q. Zhuang / In situ synthesis of ternary BaTiO<sub>3</sub>/MWNT/PBO electromagnetic microwave absorption composites with excellent mechanical properties and thermostabilities // *J. Mater. Chem. A.* – 2015. Vol. 3. – p. 8205-8214.

[14] G. Psarras, E. Manolakaki, G. Tsangaris / Dielectric dispersion and ac conductivity in—Iron particles loaded— polymer composites // *Composites Part A.* – 2003. – Vol. 34, Issue. 12, p.1187–1198.

[15] H. Bottger, V. Bryksin. Hopping conduction in solids, Akademie, Berlin, Germany, 1985, 398 p.

[16] S. Barrau, P. Demont, A. Peigney, C. Laurent, C. Lacabanne / DC and AC conductivity of carbon nanotubes polyepoxy composites // *Macromolecules.* – 2003. – Vol. 36, Issue. 14, p. 5187–5194.

[17] Яковенко ЕС, Мацуй ЛЮ, Вовченко ЛЛ, Олейник ВВ. Диелектрические свойства композитных материалов с ориентированными углеродными нанотрубками. В: Материалы XI Международной научной конференции "Молодежь в науке - 2014"; 2014 Лист 18-21; Мінськ, Білорусь. с. 275.

[18] Yakovenko OS, Matzui LY, Vovchenko LL, Oliynyk VV, Launetz VL. The effect of barium hexaferrite structural distribution on the dielectric properties of the carbon-based composite materials with binary filler. В: Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю «Хімія, фізика та технологія поверхні»; 2015 May 13-15; Kyiv, Ukraine. Київ: НВП «Інтерсервіс»; 2015. с. 215.

[19] Matzui L, Yakovenko O, Oliynyk V, Zagorodniy V, Vovchenko L. Dielectric properties of MWCNT/epoxy composites with oriented distribution of the filler. In: Book of abstracts of the FANEM-2015; 2015 May 25-27; Minsk, Belarus. p. 22-23.

[20] Yakovenko O, Matzui L, Oliynyk V. Influence of nanosized barium ferrite particles addition on microwave properties of nanocarbon/polymer composites. In: Book of abstracts of the FANEM-2015; 2015 May 25-27; Minsk, Belarus. p. 101-102. 212

[21] Yakovenko OS, Perets YuS, Matzui LYu, Ovsiienko IV, Lazarenko OA, Vovchenko LL. Effect of ultraviolet/ozonolysis-treatment of nanocarbon on the temperature and concentration dependence of the resistivity of epoxy composites. In: Fesenko O, editor. Book of Abstracts of International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2015); 2015 Aug 26-29; Lviv, Ukraine. Lviv: Eurosvit; 2015. p. 236.

[22] Perets YuS, Yakovenko OS, Matzui LYu, Ovsiienko IV, Lazarenko OA, Zhuravkov AV. Functionalized by UV/Ozone treatment graphite nanoplatelets as an improved filler for electrical conductive epoxy-matrix composites. In: Fesenko O, editor. Book of Abstracts of International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2015); 2015 Aug 26- 29; Lviv, Ukraine. Lviv: Eurosvit; 2015. p. 172.

[23] Yakovenko O, Matzui L, Peres Yu, Zhuravkov A, Trukhanov A. Induced by electric field dynamic percolation in nanocarbon/epoxy composites. In: Book of Abstracts of Ukrainian-German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology; 2015 Sep 21-25; Kyiv, Ukraine. p. 180.

[24] Перец ЮС, Лазаренко ОА, Яковенко ОС, Вовченко ЛЛ, Мацуй ЛЮ, Лаунец ВЛ, Олійник ВВ, Овсієнко ІВ. Вплив Ультрафіолетового Опромінення Нановуглецевого Наповнювача на Електродинамічні Властивості Нанокompозиту Графітові Нанопластинки/ Епоксидна Смола. В: Криловський ВС, Пойда ВП, редактори. Матеріали XII Міжнародної наукової конференції «Фізичні явища в твердих тілах»; 2015 Груд 1-4; Харків, Україна. Харків: ФОП «Бузько ВП»; с. 38.

[25] Yakovenko OS, Matzui LYu, Danylova GO, Vovchenko LL. Electrical properties of composite materials with electric field assisted alignment of the filler. In: Fesenko O, editor. Book of Abstracts of International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2016); 2016 Aug 24-27; Lviv, Ukraine. Lviv: Eurosvit; 2016. p. 272. 213

[26] S. Barrau, P. Demont, A. Peigney, C. Laurent, C. Lacabanne / DC and AC conductivity of carbon nanotubes polyepoxy composites // *Macromolecules*. – 2003. – Vol. 36, Issue. 14, p. 5187–5194.