

І.Г. Грабар, д.т.н., проф.

Ю.О. Кубрак, аспір.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМОВАНИХ ПЕРКОЛЯЦІЙНО-ФРАКТАЛЬНИХ СИСТЕМ СТРУМОМ ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ

Показано, що істотний прорив в тензометруванні може бути досягнений при використанні перколяційно-фрактальних датчиків професора І.Г. Грабара. В статті наведені результати досліджень опору деформованих перколяційно-фрактальних середовищ струмами високої частоти.

Відомі засоби тензометрування, побудовані на провідникових, фольгових та плівкових тензодатчиках опору, мають ряд обмежень, пов'язаних з малою чутливістю і малим діапазоном вимірів, що накладає необхідність використання підсилювачів.

Розроблена методологія розрахунків та методологія виготовлення перколяційно-фрактальних датчиків (ПФД) будь-якої чутливості. В даний час в лабораторіях ЖІТІ проводяться дослідження дослідних зразків ПФД професора І.Г. Грабара [7–9].

Ідея методу полягає в наступному: на необхідну область з контуром D довільної конфігурації наноситься і закріплюється двокомпонентна суміш мікрочастинок типу «провідник-діелектрик». При цьому обов'язково повинна виконуватись умова перевищення провідної компоненти порогу перколяції (для плоскої моделі $P^* > 0.59$). У заданих точках контуру D приєднуються контакти зі з'єднувальними проводами.

Як провідник в даних датчиках гарно зарекомендував себе терморозширений графіт (ТРГ), який має унікальні властивості, високу хімічну, електрохімічну і термічну стійкість, можливість отримання його у дисперсній і компактній формі, доступність і низьку вартість сировини. В якості діелектрика використовувалась гума. Перколяційно-фрактальна суміш закріплювалась на гумовій, шкіряній, поліетиленовій та інших підкладках.

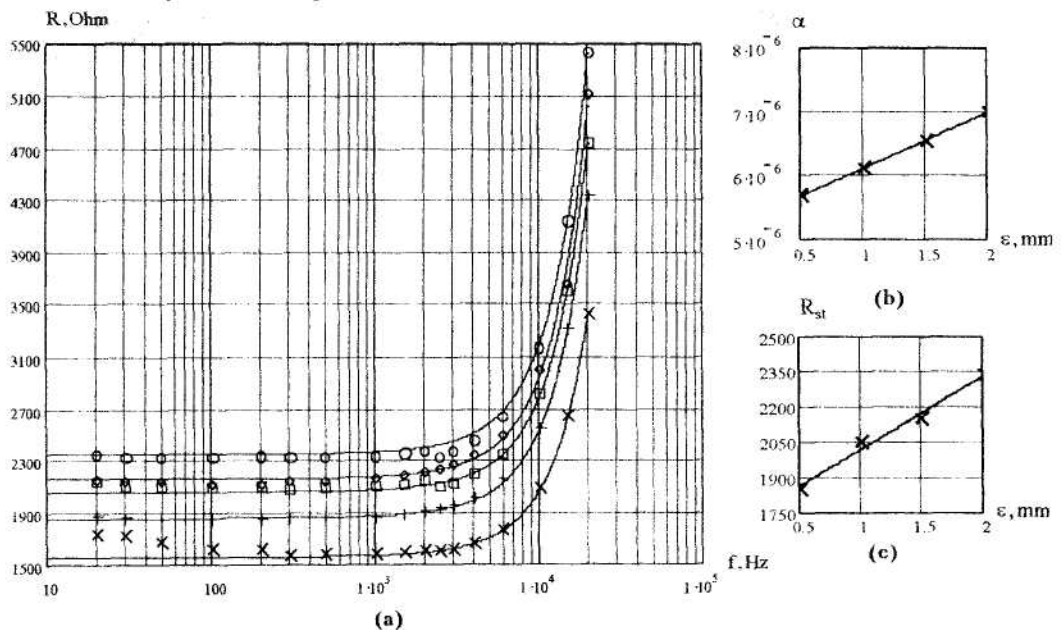


Рис. 1: а) частотна залежність опору ПФД від ступеня деформації (0; 0,75; 1,5; 2,25; 3 % (знизу вверху)) для ПФД на шкіряній підкладці, коефіцієнти кореляції для даних кривих знаходяться в діапазоні 0,999–0,99999;

б), с) залежності $\alpha(\epsilon)$ та $R_{st}(\epsilon)$ для деформацій 0,75; 1,5; 2,25; 3 % в функції

$$R(f) = \alpha f^2 + R_{st}$$

Ця робота є продовженням робіт [7–10]. В даній роботі досліджувалась залежність зміни опору перколяційно-фрактальної суміші від зміни частоти струму, що протікає через зразок. Для дослідів використовувався лабораторний звуковий генератор з діапазоном зміни частоти

20 ÷ 20000 Гц. Фіксувалися струм, що протікав через зразок, і падіння напруги на ньому. Оцір вираховувався з отриманих значень струму та напруги.

На рис. 1–2 показані залежності зміни опору ПФД від значення частоти змінного струму ($U = 12V$) при різних значеннях деформацій (0; 0,75; 1,5; 2,25 і 3 %) для датчиків на шкіряній і гумовій підкладці. З рис. 1–2 випливає, що при підвищенні частоти змінного струму понад 1 кГц спостерігається різка зміна активного опору середовища, в залежності від величини початкового опору. На рис. 3 показана залежність відношення величини активного опору при 20 кГц до початкового опору від величини початкового опору.

Апроксимація кривих рис.1–2 залежністю (1) дає гарні значення коефіцієнта кореляції:

$$R(f) = \alpha f^2 + R_{st}. \tag{1}$$

Показано, що коефіцієнт α і R_{st} у зазначеній залежності описуються лінійним законом:

$$\alpha(\epsilon) = a\epsilon + b; R_{st}(\epsilon) = c\epsilon + d, \tag{2}$$

де a, b, c і d – константи (рис. 1, $b, 1, c$). Показано, що лінійна залежність (2) $R_{st}(\epsilon)$ справедлива для діапазону деформацій до 3 %. Для деформацій більше 3 % варто використовувати параболічну залежність виду $R_{\epsilon}(\epsilon) = a \cdot \epsilon^b + R_{st}(0)$. Значення коефіцієнтів α і R_{st} при $\epsilon = 0$ не вписуються в (2). З огляду на отримані результати можна говорити про автономну залежність на рис.1, що описується законом:

$$R(f, \epsilon) = (a_1\epsilon + b_1) \cdot f^2 + c_1\epsilon + d_1, \tag{3}$$

де a_1, b_1, c_1 і d_1 – константи.

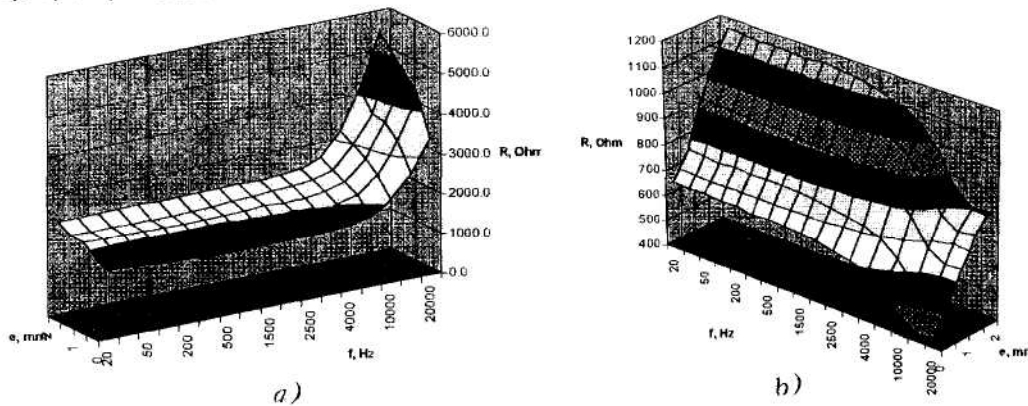


Рис. 2. Зміна опору в залежності від ступеня деформації (0; 0,75; 1,5; 2,25; 3 % знизу вгору):

- a) для ПФД на шкіряній підкладці, $R(f, \epsilon) = (8,8 \cdot 10^{-7}\epsilon + 5,2 \cdot 10^{-6}) \cdot f^2 + 314\epsilon + 1705$;
- b) для ПФД на гумовій підкладці

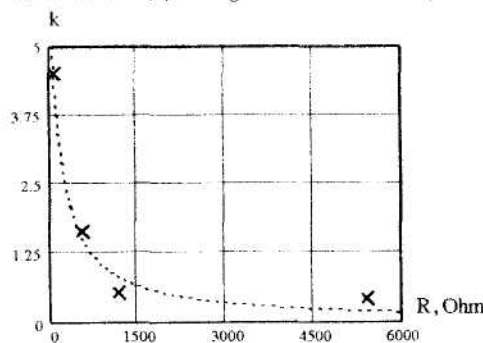


Рис. 3. Значення коефіцієнта k у залежності від значення початкового опору ($k = R(20000)/R(20)$), $k(R) = \alpha/(\beta+R)$; для середовища ТРГ-гума, поміщеної між підкладками різного виду (шкіра, гума), $k(R) = 1075/(170+R)$;

Був проведений цикл експериментів на дослідження впливу тиску на ПФД в діапазоні зусиль стискування 0 – 70 Н/см². Контроль зусиль здійснювався динамометр ДОСМ-3-0,2 ГОСТ 5.1546-72. Для дослідження використовувались ті самі зразки, що піддавалися поздовжньому деформуванню.

На рис. 4 наведено криві стабілізації датчиків на шкіряній та резиновій підкладці після навантаження їх зусиллям 70 Н/см^2 . Зразки датчиків мали розміри $10 \times 3 \text{ см}$. Після порівняння наведених кривих з кривими стабілізації після деформування (рис. 5) можна зробити висновок про подібність даних результатів. Всі криві описуються функцією $R_\epsilon(\epsilon) = a \cdot \epsilon^b$, де a і b – константи. Аналогічно подібні криві верхньої огинаючої при циклуванні даних зразків (рис. 6–7). Наведені результати свідчать про можливість використання ПФД як для тензометрування, так і для датчиків тиску.

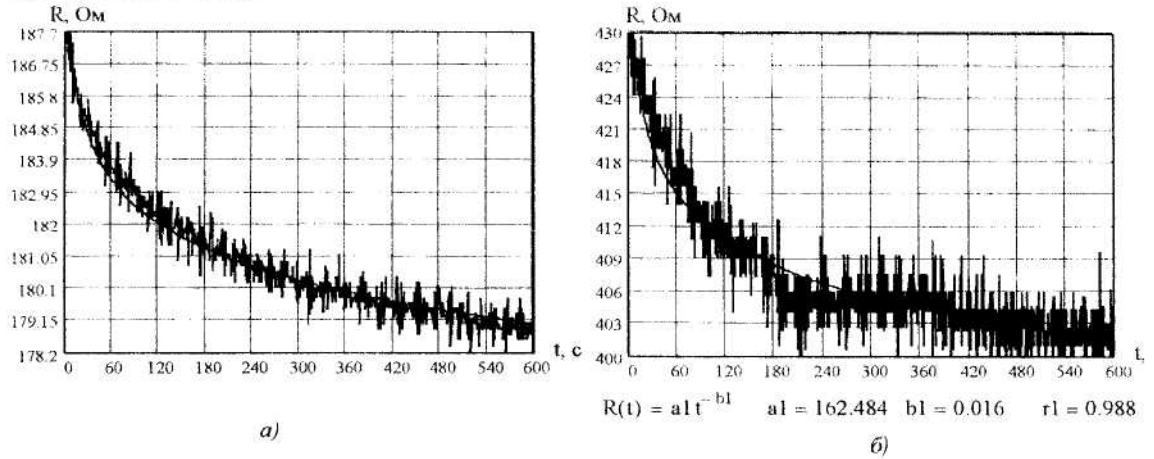


Рис. 4. Стабілізація опору зразків на шкіряній (а) та гумовій (б) підкладках після навантаження 70 Н/см^2

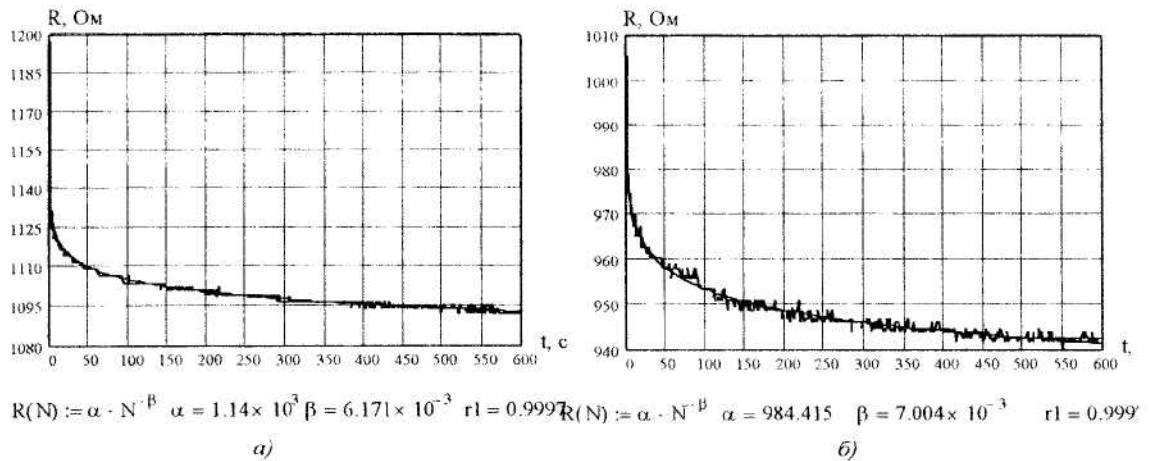


Рис. 5. Стабілізація опору зразків на шкіряній (а) та гумовій (б) підкладках після деформування $1,5 \text{ мм}$

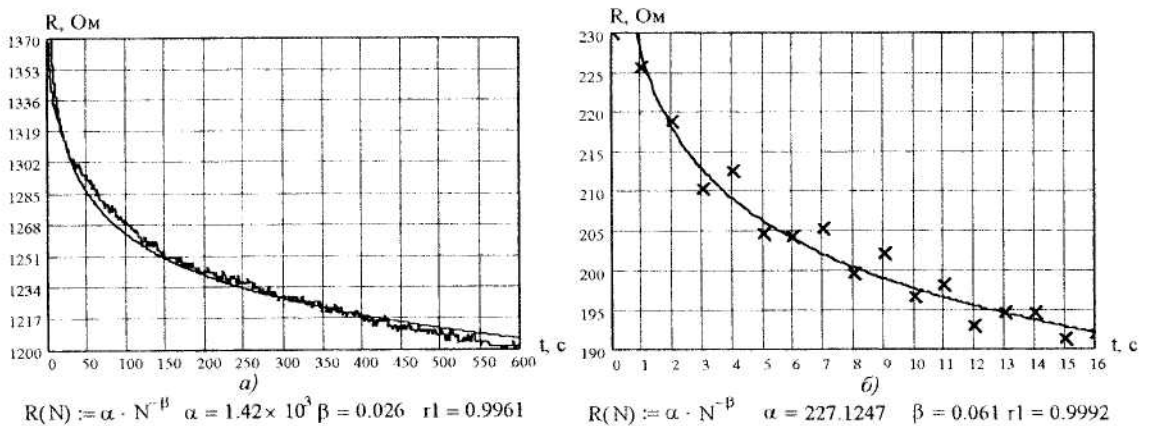
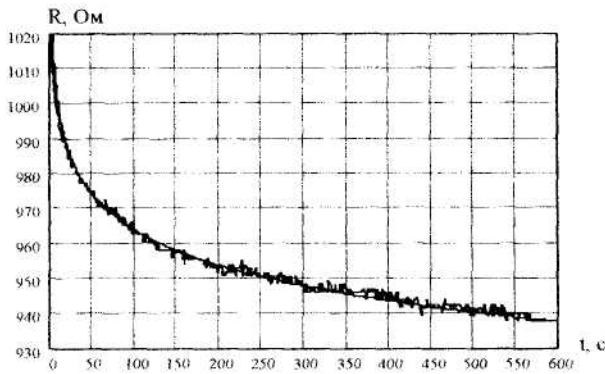
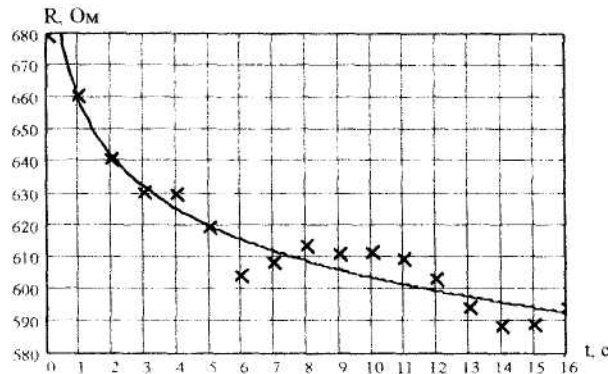


Рис. 6. Циклічне навантаження зразків на шкіряній підкладці
а) апроксимована верхня огинаюча при циклічному навантаженні деформацією $1,5 \text{ мм}$
б) апроксимована верхня огинаюча при циклуванні тиском 70 Н/см^2



$$R(N) := \alpha \cdot N^{-\beta} \quad \alpha = 1.03 \times 10^3 \quad \beta = 0.015 \quad r1 = 0.9993$$

(а)



$$R(N) := \alpha \cdot N^{-\beta} \quad \alpha = 658.5951 \quad \beta = 0.038 \quad r1 = 0.99938$$

(б)

Рис. 7. Циклічне навантаження зразків на гумовій підкладці

- а) апроксимована верхня огинаюча при циклічному навантаженні деформацією 1,5 мм
- б) апроксимована верхня огинаюча при циклічному навантаженні тиском 70 Н/см²

Порівняльний аналіз коефіцієнтів падіння опору *K* при стабілізації зразків після навантаження тиском та при деформуванні (табл. 1) оцінювали за співвідношенням:

$$K = \frac{R_{max} - R_{st}}{R_{max}} \cdot 100\% \tag{4}$$

де R_{max} – опір зразка після навантаження, R_{st} – опір після 10 хвилин стабілізації. Тобто, коефіцієнт *K* показує наскільки змінився опір зразка під час стабілізації.

Таблиця 1

	Шкіряна підкладка	Резинова підкладка
Навантаження тиском	5,3 %	7,0 %
Деформування	8,3 %	6,5 %

Аналіз інших зразків датчиків, як на гумовій, шкіряній так і на іншого виду підкладках показує, що коефіцієнт *K* в середньому має значення біля 6,5 %. Вид кривих при стабілізації має схожий характер (див. коефіцієнти під графіками). Наведені результати свідчать про незначний вплив даних підкладок на значення *K*.

Аналогічні закономірності можна спостерігати при аналізі верхніх огинаючих при циклічному навантаженні даних зразків. Значення коефіцієнтів *K*, що наведені в таблиці 2, для кривих циклічні навантаження мають в середньому значення біля 12 %.

Таблиця 2

	Шкіряна підкладка	Резинова підкладка
Навантаження тиском	16,0 %	14,7 %
Деформування	12,4 %	8,8 %

В таблиці 3 наведені значення коефіцієнтів *a* та *b* в залежностях $R_\epsilon(\epsilon) = a \cdot \epsilon^b$ та $R_\epsilon(N) = a \cdot N^b$ для різних видів навантаження:

Таблиця 3

Вид експерименту	Стабілізація опору після навантаження				Циклічне навантаження			
	Стискування		Розтяг		Стискування		Розтяг	
Тип підкладки	Шкіра	Гума	Шкіра	Гума	Шкіра	Гума	Шкіра	Гума
<i>a</i>	70,41	162,48	1140,0	984,41	227,12	658,60	1420,0	1030,0
<i>b</i>	0,0110	0,0160	0,00617	0,0070	0,0610	0,0380	0,0260	0,0150
Коеф. Кореляції	0,9980	0,9880	0,9997	0,9997	0,9992	0,9994	0,9961	0,9993

З таблиці видно, що криві стабілізації і циклування при стискуванні мають більш вигнуту форму. Різницю коефіцієнтів *a* для різного виду підкладок можна пояснити різною пропорцією

провідникової та діелектричної компоненти в суміші, що викликано різним вбиранням клею, який виступає діелектриком, різними типами підкладки.

Вищевикладене дозволяє стверджувати, що перколяційно-фрактальні середовища поводить себе аналогічно на різного виду підкладках, навіть, якщо середовище має різні компоненти діелектричної складової, що зі значною долею впевненості дозволяє казати про можливість побудови математичної моделі поведінки реальних перколяційно-фрактальних систем. І ми впевнені, що деформовані перколяційні і фрактально-перколяційні системи дуже перспективні і заслуговують найсерйознішого вивчення і застосування в сучасних технологіях.

Висновки

1. Вперше проведенні дослідження опору деформованих перколяційно-фрактальних середовищ струмами високої частоти і побудована математична модель $R(f, \varepsilon)$ та встановлені гранці застосування даної моделі.
2. Проведена оцінка стабілізації опору після навантаження розтягом та стискуванням перколяційно-фрактальних середовищ.
3. Проведені дослідження і оцінені результати впливу циклічного стискування на перколяційно-фрактальні системи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Хакен Г. Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах. – М.: Мир, 1985. – 419 с.
2. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. – М.: Мир, 1990. – Т. 2. – 400 с.
3. Писаренко Г.С., Стрижало В.А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – К.: Наук. думка, 1986. – 264 с.
4. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. – К.: Вища Школа. Головное изд-во, 1981. – 296 с.
5. Черныш И.Г., Картов И.И. Физико-химические свойства графита и его соединений. – АН УССР. Ин-т химии поверхности. – Киев: Наук. думка, 1990. – 200 с.
6. Olemskoi A.I. Fractal in condensed matter Physics // Phys. Rev. – 1995. – Vol. 18. – P. 1-173.
7. Грабар І.Г. Самоподібність в закономірностях жорсткості та пружності фрактальних та фрактально-перколяційних систем // Вісник ЖІТІ. – 1996. – № 3. – С. 38-44.
8. Грабар І.Г. Перколяційно-фрактальні матеріали – надперспективні матеріали для тензометричних датчиків-перетворювачів // Вісник ЖІТІ. – 1997. – № 6. – С. 3-7.
9. Грабар І.Г., Грабар О.І. Теоретико-ймовірносне моделювання механічних властивостей деформованих перколяційних середовищ // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 15. – С. 3-7.
10. Грабар І.Г., Кубрак Ю.О. Явище термостабілізації в перколяційно-фрактальних системах гума-графіт // Сучасні технології в аерокосмічному комплексі. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 4-6 вересня 2001 року, ЖІТІ. – С. 83-87.

ГРАБАР Іван Григорович – доктор технічних наук, професор, перший проректор Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- міцність конструкцій;
- нелінійні явища та моделі;
- синергетика;
- пові технології, екологія.

КУБРАК Юрій Олександрович – аспірант кафедри автомобілів та механіки технічних систем Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- перколяційні процеси;
- синергетика.