



УДК 681.513.6

## РОЗПОДІЛ ЕМП ПОБЛИЗУ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ ІНДУКОВАНОГО КРАПЛЕЮ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Лобода О.І., к.т.н.,

Залеський А.В., інженер

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел.: +38(0619) 425-797

**Анотація** - запропонована фізико-математична модель електромагнітного поля поблизу газорозрядного свічення рідиннофазних об'єктів на базі уявлень фізики фрактальних кластерів, яка дає уявлення про поведінку детермінованих складових часових рядів параметрів ГРВ зображень рідиннофазних об'єктів.

**Ключові слова:** висока напруга, газорозрядне свічення, газовий розряд, електромагнітне поле, кластер, трансформаторне масло.

*Постановка проблеми.* З метою пояснення видів трендів часових рядів параметрів ГРВ зображень, необхідне створення математичної моделі процесів ГРВ досліджуваного об'єкта.

*Аналіз останніх досліджень.* З результатів експериментів останніх досліджень можемо встановити, що відповідні тренди параметрів ГРВ зображень мають три види: монотонно зростаючі, монотонно спадні та квазістаціонарні.

Відомо, що всі розглянуті характеристики газорозрядного свічення та їх параметри ГРВ зображень, а також їх динаміка, залежать від ЕМП поблизу газового розряду, індукованого об'єктом у зовнішньому ЕМП високої напруги [1, 2].

Газовий розряд, індукований оптоелектронною емісією рідини в ЕМП, має випадково детерміновану розгалужену структуру.

*Формулювання цілей статті.* Розробити фізико-математичну модель електромагнітного поля поблизу газорозрядного свічення рідиннофазних об'єктів на базі уявлень фізики фрактальних кластерів. Отримати модель, що дасть уявлення про поведінку детермінованих складових часових рядів параметрів ГРВ зображень рідиннофазних об'єктів, і що дозволять описувати одержувані дані за допомогою нових параметрів, відповідних до подання різних видів досліджуваних



систем, з урахуванням використаних в основі процесу фрактальних властивостей.

**Основна частина.** При розгляді розподілу ЕМП поблизу газового розряду індукованого краплею трансформаторного масла, застосуємо формалізм фізики фрактальних кластерів до газового розряду. В рамках даного формалізму газовий розряд має вигляд фрактального кластера — системи частинок, що володіють фрактальними властивостями [3...5]. Фрактальна властивість кластера полягає в тому, що даний об'єкт має властивість самоподібності. Вона формулюється наступним чином: якщо поблизу радіуса зайнятого кластером, виділити площу відносно невеликого обсягу, то до неї потраплять ділянки кластера, що будуть подібними у фізичному розумінні цього слова.

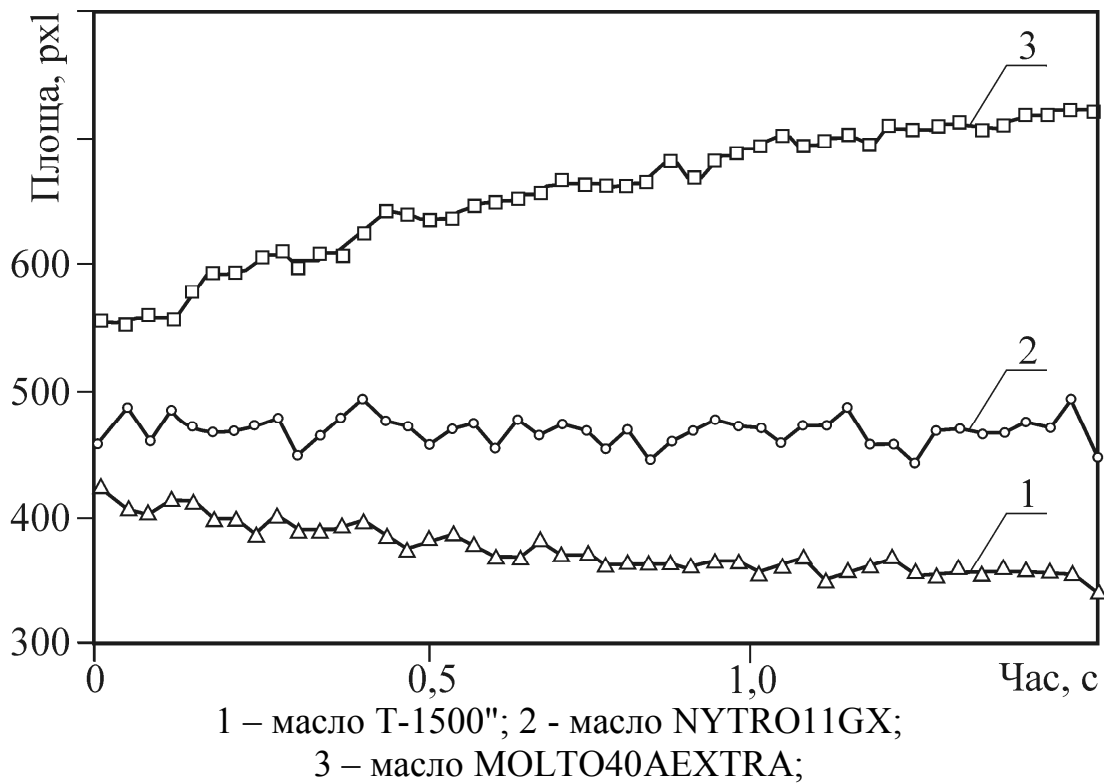


Рис. 1. Основні види трендів часових рядів параметрів ГРВ рідиннофазних об'єктів на прикладі натуральних масел

Концентрація частинок  $n$  у фрактальному кластері оцінюється співвідношенням

$$n \Rightarrow z^{d\beta - p}, \tag{1}$$

де  $z$  — характерний розмір кластера,  
 $d\beta$  — фрактальна розмірність кластера і  
 $p$  — розмірність простору, в якому знаходиться кластер.



Нехай газовий розряд, індукований краплею рідини в ЕМП високої напруженості, має вигляд фрактального кластера. Електромагнітне поле поблизу кластера з внутрішніми координатами  $z$  визначається як

$$E = E_0 \exp[iq(x-z) - i\omega t] \quad (2)$$

де  $E_0$  - амплітуда електромагнітної хвилі,  
 $q$  і  $\omega$  - її хвильове число і частота відповідно,  
 $x$  — координата простору,  
 $z$  - координата кластера,  
 $t$  — час.

Такий кластер буде здійснювати дифузію під впливом зовнішнього ЕМП. Тоді, з урахуванням нелінійного знесення маємо

$$d_t W = D d_l W + d_z [a(z)w], \quad (3)$$

де  $W(z,t)$  - ймовірність того, що кластер знаходиться в точці  $z$  в момент часу  $t$ ,  
 $D$  - коефіцієнт дифузії кластера і  
 $a(z)$  — функція знесення.

Функція знесення  $a(z)$  визначається зовнішнім впливом і має сенс переміщення кластера за одиницю часу, тобто розмірність порядку  $z/t$  [6].

Співвідношення для переміщення кластера за одиницю часу знаходимо у рівняннях, що описують процеси кінетики іонізації об'єкта. Рівняння кінетики іонізації визначається наступним чином [7]

$$\partial_t n_e = D' \Delta n_e + v_i n_e - v_a n_e, \quad (4)$$

де  $n_e$  – концентрація і число іонів у газі,  
 $D$  - коефіцієнт дифузії іонів,  
 $v_i$ -частота іонізації, яка визначається зовнішнім полем  $E_{\text{зовн}}$ ;  
 $v_a$ -частота прилипання.

Член рівняння (4), відповідний до зовнішнього поля має вигляд

$$\partial_t n_e|_{\text{зовн}} = v_i n_e. \quad (5)$$

Підставимо формулу (1) для концентрації частинок  $n$  у фрактальному кластері до виразу (5). Тоді отримаємо наступний вигляд формули для переміщення кластера за одиницю часу



$$\left. \frac{dz}{dt} \right|_{\text{внеш}} = \frac{1}{d_f - p} v_i z.$$

Таким чином, відповідно до даних вище визначень, отримаємо вираз для функції знесення  $a(z)$

$$a(z) = \frac{1}{d_f - p} v_i z.$$

Усереднене по положенню випромінюючого кластера ЕМП дорівнює:

$$E = E_0 f(t) \exp(iqx - i\omega t) \quad (8)$$

де

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-iqz) W(z, t) dz, \quad (9)$$

і умова нормування ймовірностей і граничні умови мають вигляд

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(z, t) dz = 1, \quad f(0) = 1, \quad (10)$$

$$\lim_{t \rightarrow \pm\infty} W(z, t) \rightarrow 0. \quad (11)$$

Проведемо диференціювання виразу (9) за часом. Тоді з урахуванням (10) і (11) маємо

$$\begin{aligned} d_t f &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-iqz) d_t W(z, t) dz = \\ &= -Dq^2 f + iq \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-iqz) a(z) W(z, t) dz \end{aligned} \quad (12)$$

Підставимо вираз (7) у вираз (12). Тоді останнє можна привести до виду

$$d_t f = -Dq^2 f + \frac{v_i}{p - d_f} f, \quad (13)$$

Звідки для функції  $f$  отримуємо

$$f = \exp\left(-Dq^2 t + \frac{v_i}{p - d_f} t\right). \quad (14)$$



Електромагнітне поле випромінюючого кластера (8), таким чином, прийме вигляд

$$E(x,t) = E_0 \exp(iqx - i\omega t - Dq^2 t + \frac{v_i}{p - d_f} t). \quad (15)$$

Введемо позначення  $v_d = Dq^2$ , що характеризує частоту дифузійних втрат [1].

Співвідношення (15) можна переписати в наступному вигляді

$$E(x,t) = E_0 \exp \left[ iqx - i\omega t + \left( \frac{v_i}{p - d_f} - v_d \right) t \right]. \quad (16)$$

Таким чином, показано, що ЕМП випромінюючого кластера є функцією від частот іонізації і дифузійних втрат, а також фрактальної розмірності кластера.

З виразу (16) випливає, що при  $v_i > (p - d_f)v_d$  тренди тимчасових рядів будуть зростаючими, при  $v_i < (p - d_f)v_d$  тренди будуть зменшувальними, а в разі  $v_i \approx (p - d_f)v_d$  тренди будуть мати періодичний, квазістаційний вигляд.

Як випливає з (16), зміна фрактальної розмірності газорозрядного свічення може змінити напрям тренда.

Вираз (16) для ЕМП поблизу краплі рідини показало високу достовірність при аналізі експериментальних даних у вигляді часових рядів параметрів ГРВ зображень з урахуванням відомих фізичних характеристик досліджуваних рідин.

Запропонована математична модель показала високу кореляцію з експериментальними даними. Покажемо це на прикладі описаних вище експериментальних даних по дослідженню трансформаторних масел різних марок (рис.1). Трансформаторне масло Т-1500 має більше значення частоти дифузійних втрат (за рахунок сильного випаровування визначається великим вмістом домішок), по відношенню до частоти іонізації при експериментальному значенні зовнішнього ЕМП, (крива 2) і має монотонно регресивний вигляд, на яку наводить математична модель; в той же час, для зарубіжного трансформаторного масла NYTRO 11GX частота іонізації перевищує значення частоти дифузійних втрат і частоти прилипання, що проявляється у вигляді монотонно зростаючої кривої 1, та перебуває в повній відповідності з запропонованою моделлю.

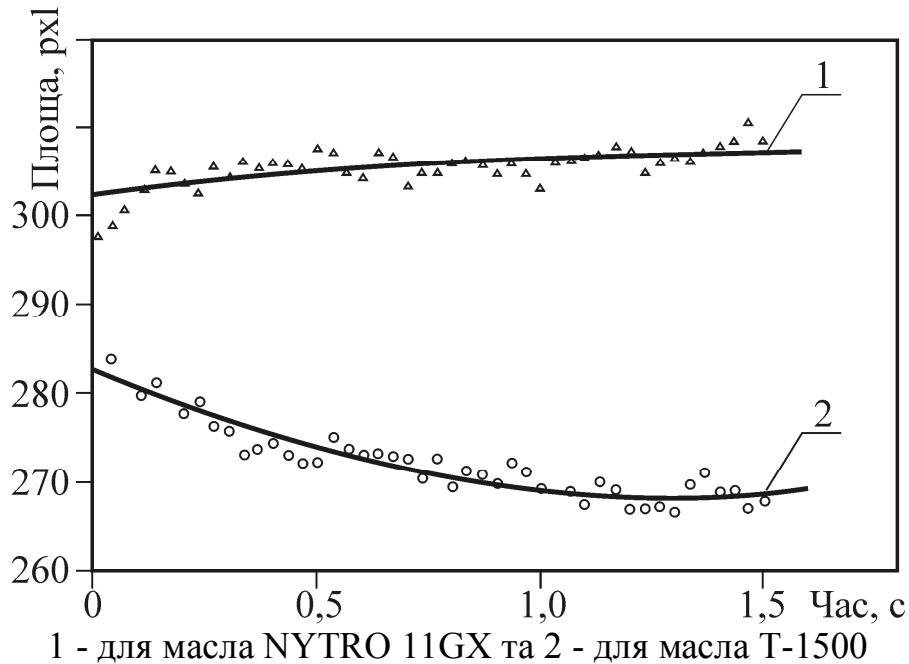


Рис. 2 - Експериментальні та відповідні аналітичні криві

### Висновки

Розроблена фізико-математична модель електромагнітного поля поблизу газорозрядного свічення рідиннофазних об'єктів на базі уявлень фізики фрактальних кластерів. Отримана модель дає уявлення про поведінку детермінованих складових часових рядів параметрів ГРВ зображень рідиннофазних об'єктів і дозволяє описувати одержувані дані з допомогою нових параметрів, відповідних до подання різних видів досліджуваних систем, з урахуванням фрактальних властивостей, що лежать в основі процесу. Розвинена математична модель дозволяє інтерпретувати поведінку трендів параметрів ГРВ зображень трансформаторних масел з допомогою фізичних характеристик досліджуваних систем.

### Список використаних джерел.

1. Коротков К.Г. Основы ГРВ биоэлектрографии. / К.Г. Коротков – Санкт-Петербург, Изд-во СПбГИТМО, 2001, 360с.
2. Коротков К.Г. Эффект Кирлиан – прошлое и современность / К. Г. Коротков, М.А. Шустов–Санкт-Петербург-Томск.: 2017. – 144 с.
3. Смирнов Б. М. Физика фрактальных кластеров / Б.М. Смирнов - М.: Наука, 1991, 135 с.
4. Лахно В. Д. Кластеры в физике, химии, биологии / В.Д. Лахно. - Москва-Ижевск.: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001, - 256 с.
5. Пайтген Х. О. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем / Х.О. Пайтген, П.Х. Рихтер. – Москва.: Мир. 1993 - 176 с.



6. Гардинер К.В. Стохастические методы в естественных науках / К.В. Гардинер. -М.: Мир,1986. 527 с.

7. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов / Ю.П. Райзер. - М.,Наука,1980 – 416 с.

### **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМП ВБЛИЗИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ИНДУКТИРОВАННОГО КАПЛЕЙ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА**

Лобода А. И., Залеский А.В.

**Аннотация** – предложена физико - математическая модель электромагнитного поля вблизи газоразрядного свечения жидкофазных объектов на базе представлений физики фрактальных кластеров, которая дает представление о поведении детерминированных составляющих временных рядов параметров ГРВ изображений жидкофазных объектов.

### **DISTRIBUTION OF EMF IN CLOSE PROXIMITY TO THE GAS DISCHARGE INDUCIROWANNOJ A DROP OF TRANSFORMER OIL**

Loboda A., Zalesky A.

#### **Summary**

The proposed physical - mathematical model of the electromagnetic field near a discharge luminescence of liquid-phase objects based on representations of the physics of fractal clusters, which gives an idea about the behavior of the deterministic components of the time series parameters of GDV images of liquid objects.