

Р.М. Івах¹, Я.Р. Совин²

Національний університет “Львівська політехніка”,

¹кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,²кафедра захисту інформації

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ НЕОДНОРІДНОГО СЕРЕДОВИЩА З РЕГУЛЯРНИМИ КУЛЬОВИМИ ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ

© Івах Р.М., Совин Я.Р., 2009

Запропоновано аналітичний метод визначення еквівалентної діелектричної проникності неоднорідного середовища з регулярними кульовими діелектричними включеннями.

Authors are offer the analytical method of determination of equivalent inductivity of heterogeneous environment with the regular dielectric including of bullets.

Вступ. Діелектрична проникність (ДП) є тією фізичною величиною, яка посідає чільне місце у вимірюваннях як електричних, так і неелектричних величин. Окрім того, діелектрична проникність, як і питома електрична провідність чи питомий опір, є фізичними властивостями досліджуваних матеріалів і їх безпосередньо не можна виміряти. Натомість можна опосередковано вимірювати такі величини, як ємність, провідність чи опір відповідних зразків. Тому реалізація засобів для вимірювання ДП можлива за допомогою ємнісних первинних перетворювачів (ЄПП).

Особливістю ДП неоднорідного середовища з регулярними кульовими включеннями є те, що вона залежить від діелектричних проникностей середовища, оболонки кульового включення та внутрішнього ядра кулі. Для контролю та регулювання діелектричної проникності таких матеріалів необхідно знати так звану еквівалентну діелектричну проникність (ЕДП) такого середовища та її зв'язок із діелектричними проникностями усіх складових неоднорідного середовища.

Метою роботи є розроблення математичної моделі еквівалентної діелектричної проникності неоднорідного середовища з регулярними кульовими включеннями, яка дає змогу врахувати вплив неінформативних параметрів зовнішньої оболонки і внутрішнього ядра кульових включень на результати вимірювань.

Методика досліджень. Для досягнення поставленої мети автори запропонували аналітичний метод визначення ЕДП неоднорідного середовища з регулярними кульовими включеннями, який ґрунтується на таких припущеннях:

1. Включення розглядаються як двошарова кулька з шарами різної діелектричної проникності та різного радіуса (ϵ , R_0 – відносна ДП та радіус зовнішньої оболонки відповідно; ϵ_n , R_n – відносна ДП та радіус внутрішнього ядра кулі; ϵ_c – відносна ДП зовнішнього відносно кулі середовища) (див. рис. 1).

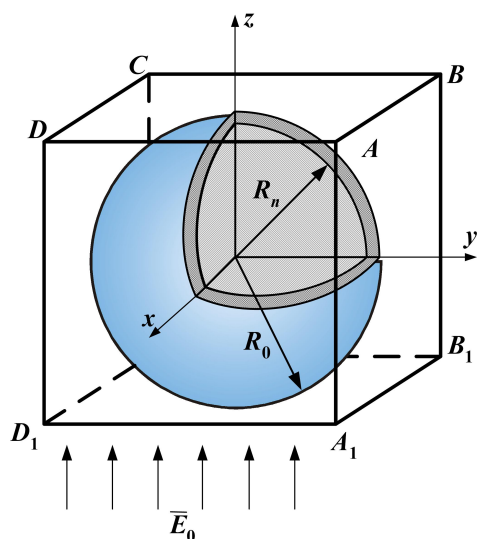


Рис. 1. Елементарна комірка із включенням у вигляді двошарової кулі

2. Для спрощення робочу зону виміральної камери ЄПП розділяють на елементарні куби з довжиною ребра $2R_0$, у кожний з яких вписана двошарова куля (рис. 2).

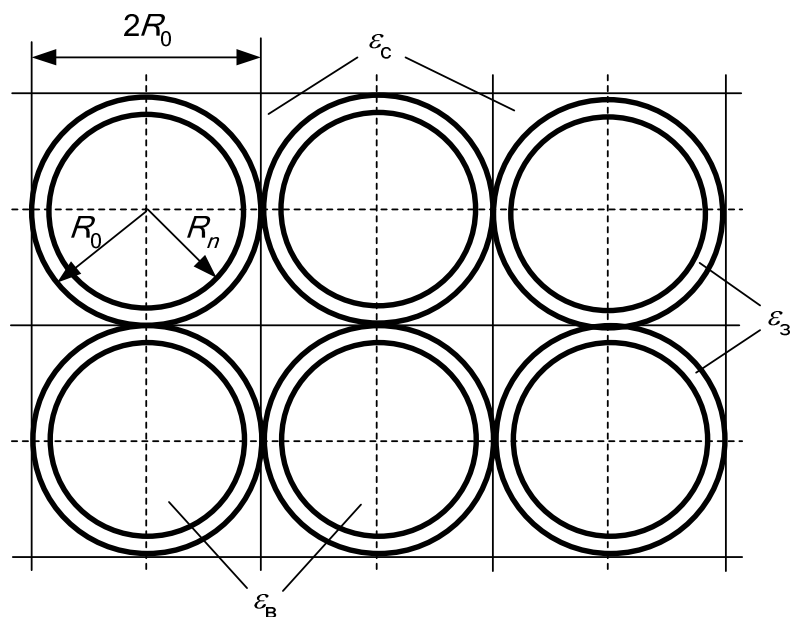


Рис. 2. Регулярна структура кульових включень

3. Електростатичне поле в межах куба розглядається як рівномірне поле, спотворене двошаровою діелектричною кулею.

4. Протилежні сторони куба, перпендикулярні до вектора напруженості рівномірного електростатичного поля, вже не будуть екіпотенціальними, а розглядаються як обкладки умовного плоского конденсатора (див. рис. 1).

Для визначення ЕДП неоднорідного середовища використовуватимемо *метод середніх потенціалів* [1], який ґрунтується на тому, що дві протилежні сторони куба розглядаються як обкладки елементарного конденсатора і, визначивши потенціал у будь-якій точці куба (зовні діелектричної кулі, у зовнішній оболонці та у внутрішньому ядрі діелектричної кулі), визначаємо різницю потенціалів між обкладками елементарного конденсатора та заряд на цих обкладках.

Тоді ємність C між обкладинками цього куба визначаємо як відношення заряду Q на обкладинках до різниці потенціалів U між обкладинками.

Визначення потенціалу кожної складової неоднорідного впорядкованого середовища (наповнювача, зовнішньої оболонки і внутрішнього ядра). Насамперед розрахуємо потенціал у будь-якій точці елементарного куба за таких умов.

Нехай рівномірне електричне поле напрямлене вздовж осі Oz і має напруженість електричного поля \vec{E}_0 . Внесемо в це поле двошарову діелектричну кулю. Для опису поля використаємо сферичну систему координат. Будь-яка точка цієї системи описується поточними координатами R, θ і ψ (рис. 3).

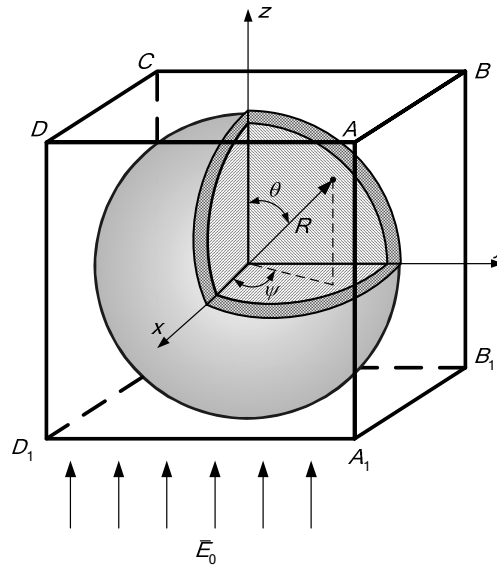


Рис. 3. До розрахунку потенціалу у будь-якій точці простору елементарного куба

Внаслідок симетрії поле не залежить від координати ψ . Тоді згідно з [1, 2, 5] рівняння Лапласа має такий вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \varphi}{\partial R} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) = 0, \quad (1)$$

де φ – потенціал поля.

Застосуємо метод розділення змінних. Розв'язок будемо шукати у вигляді добутку двох функцій, кожна з яких залежить тільки від однієї координати:

$$\varphi = F_1(R) \cdot F_2(\theta) = F_1 \cdot F_2 \quad (2)$$

тоді вираз (1) набуде такого вигляду:

$$\frac{1}{F_1} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial F_1}{\partial R} \right] + \frac{1}{F_2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\sin \theta \frac{\partial F_2}{\partial \theta} \right] = 0. \quad (3)$$

Після численних математичних розрахунків отримуємо, що потенціал у будь-якій точці простору описується у загальному випадку виразом:

$$\varphi = F_1 \cdot F_2 = \left(\frac{C_1}{R} + C_2 \right) \left(C_3 \ln \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + C_4 \right) + \left(C_5 R + \frac{C_6}{R^2} \right) \cos \theta. \quad (4)$$

Якщо ж записати вираз (4) для кожного середовища, то одержимо:

– для точок зовні діелектричної кулі:

$$\varphi_c = \left(K_1 \ln \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + K_2 \right) \left(\frac{K_3}{R} + K_4 \right) + \left(K_5 R + \frac{K_6}{R^2} \right) \cos \theta; \quad (5)$$

– для точок у зовнішній оболонці діелектричної кулі:

$$\varphi_3 = \left(N_1 \ln \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + N_2 \right) \left(\frac{N_3}{R} + N_4 \right) + \left(N_5 R + \frac{N_6}{R^2} \right) \cos \theta; \quad (6)$$

– для точок у внутрішньому ядрі діелектричної кулі:

$$\varphi_6 = \left(M_1 \ln \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + M_2 \right) \left(\frac{M_3}{R} + M_4 \right) + \left(M_5 R + \frac{M_6}{R^2} \right) \cos \theta. \quad (7)$$

У виразах (5), (6), (7) K_i, N_i, M_i ($i = 1 \dots 6$) – сталі інтегрування.

Після визначення сталих інтегрування вираз (4) для кожного середовища можна записати такою системою:

$$\begin{cases} \varphi_c = \left(-R + \frac{\alpha_1}{R^2} \right) \cos \theta \cdot E_0; \\ \varphi_3 = - \left(R + \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_6) \cdot R_n^3}{(2\varepsilon_3 + \varepsilon_6) \cdot R^2} \right) \frac{3\varepsilon_c}{2\varepsilon_c + \varepsilon_3} \cdot E_0 \cos \theta, \\ \varphi_6 = \frac{9\varepsilon_3 \varepsilon_c}{(2\varepsilon_3 + \varepsilon_6) \cdot (2\varepsilon_c + \varepsilon_3)} \cdot E_0 R \cos \theta. \end{cases} \quad (8)$$

де

$$\alpha_1 = \left[(\varepsilon_3 - \varepsilon_c) \cdot R_0^3 - \frac{3\varepsilon_c \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_6) \cdot R_n^3}{(2\varepsilon_3 + \varepsilon_6)} \right] \cdot \frac{1}{2\varepsilon_c + \varepsilon_3}. \quad (9)$$

Відзначимо, що всередині діелектричної кулі ($0 \leq R \leq R_n$) поле однорідне та ізотопне.

Якщо зовнішня оболонка діелектричної кулі відсутня, тобто $R_n = R_0$; $\varepsilon_3 = \varepsilon_6$, то зовні діелектричної кулі поле описується виразом:

$$\varphi_c = \left(\frac{\varepsilon_6 - \varepsilon_c}{2\varepsilon_c + \varepsilon_6} \cdot \frac{R_0^3}{R^2} - R \right) E_0 \cos \theta, \quad (10)$$

а всередині діелектричної кулі рівнянням:

$$\varphi_6 = \frac{3\varepsilon_c}{2\varepsilon_c + \varepsilon_6} \cdot E_0 R \cos \theta. \quad (11)$$

Визначення різниці потенціалів між обкладинками елементарного куба. Дослідимо розподіл потенціалу на сторонах куба $ABCD$ і $A_1B_1C_1D_1$, розглядаючи їх як обкладинки елементарного конденсатора. Для простоти сторону куба $ABCD$ позначимо площиною B , а сторону $A_1B_1C_1D_1$ – площиною A (рис. 3).

На сторонах куба $ABCD$ (площина B) і $A_1B_1C_1D_1$ (площина A) маємо

$$\varphi_A = -\varphi_B = \left(1 - \frac{\alpha_1}{(x^2 - y^2 - R_0^2)^{3/2}} \right) R_0 E_0, \quad (12)$$

де φ_A, φ_B – потенціали точок, що лежать у площині A і B відповідно; координати x, y змінюються в межах від $-R_0$ до $+R_0$.

Визначимо середній потенціал на стороні куба $ABCD$

$$\varphi_{B_{\text{сеп}}} = \frac{1}{S} \int_S \varphi_B dS, \quad (13)$$

де S – площа сторони куба $ABCD$.

Завдяки симетрії поля досить визначити середнє значення потенціалу лише в одному квадранті сторони $A_1B_1C_1D_1$, наприклад, у заштрихованому (див. рис. 4):

$$\varphi_{A_{\text{сеп}}} = \frac{1}{R_0^2} \int_0^{R_0} \int_0^{R_0} \varphi_A dx dy \quad (14)$$

або

$$\begin{aligned}\varphi_{A_{\text{сеп}}} &= \frac{1}{R_0^2} \int_0^{R_0} \int_0^{R_0} \left(1 - \frac{\alpha_1}{(x^2 + y^2 + R_0^2)^{3/2}} \right) R_0 E_0 dx dy = \frac{E_0}{R_0} \int_0^{R_0} dy \int_0^{R_0} \left(1 - \frac{\alpha_1}{(x^2 + y^2 + R_0^2)^{3/2}} \right) dx = \\ &= \frac{E_0}{R_0} \int_0^{R_0} \left(R_0 - \frac{\alpha_1 R_0}{(y^2 + R_0^2) \sqrt{y^2 + 2R_0^2}} \right) dy = E_0 R_0 - \alpha_1 E_0 \int_0^{R_0} \frac{dy}{(y^2 + R_0^2) \sqrt{y^2 + 2R_0^2}}.\end{aligned}$$

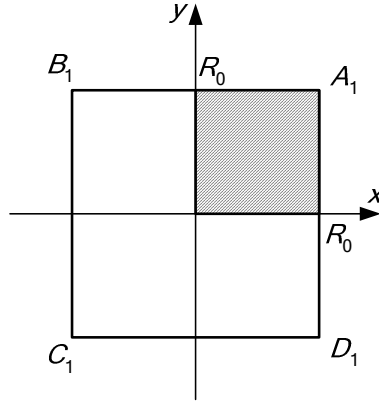


Рис. 4. До визначення середнього потенціалу

Обчисливши інтеграл (18) отримаємо:

$$\varphi_{A_{\text{сеп}}} = \left(1 - \frac{0,5236\alpha_1}{R_0^3} \right) E_0 R_0. \quad (15)$$

Відповідно до (9), якщо оболонка діелектричної кулі відсутня, тобто $\epsilon_s = \epsilon_g$ і $R_n = R_0$, то $\alpha_1 = \frac{(\epsilon_g - \epsilon_c) R_0^3}{2\epsilon_c + \epsilon_g}$, тоді:

$$\varphi_{A_{\text{сеп}}} = \left(1 - \frac{0,5236(\epsilon_g - \epsilon_c)}{2\epsilon_c + \epsilon_g} \right) E_0 R_0 = \frac{0,4764\epsilon_g + 2,5236\epsilon_c}{2\epsilon_c + \epsilon_g} E_0 R_0. \quad (16)$$

Різницю потенціалів між сторонами куба, паралельними до площини xOy , з урахуванням (15) будемо визначати як

$$U = \varphi_{A_{\text{сеп}}} - \varphi_{B_{\text{сеп}}} = 2\varphi_{A_{\text{сеп}}} = \left(1 - \frac{0,5236\alpha_1}{R_0^3} \right) 2E_0 R_0. \quad (17)$$

За відсутності зовнішньої оболонки діелектричної кулі ця напруга буде визначатися за виразом:

$$U = \frac{0,9528\epsilon_g + 5,0472\epsilon_c}{2\epsilon_c + \epsilon_g} E_0 R_0. \quad (18)$$

Знаходження заряду на обкладинках елементарного куба. Заряд, який припадає на сторони $ABCD$ і $A_1B_1C_1D_1$ елементарного куба, будемо визначати як потік вектора електричного зміщення через одну із цих сторін. Тобто

$$Q = \epsilon_c \epsilon_0 \int_{S_B} \vec{E}_B \cdot d\vec{S}_B = \epsilon_c \epsilon_0 \int_{S_B} E_{zB} dS_B, \quad (19)$$

де S_B – поверхня сторони куба $ABCD$, а E_{zB} – складова вектора напруженості електричного поля вздовж осі Oz на поверхні B .

Складова E_z вектора напруженості електричного поля зовні діелектричної кулі

$$E_z = -\frac{\partial \varphi_c}{\partial Z} = \left(1 - \frac{\alpha_1 (x^2 + y^2 - 2Z^2)}{(x^2 + y^2 + Z^2)^{5/2}} \right) E_0. \quad (20)$$

Напруженість електричного поля E_z в точках, що належать поверхні A , дорівнює:

$$E_{zA} = \left(1 - \frac{\alpha_1 (x^2 + y^2 - 2R_0^2)}{(x^2 + y^2 + R_0^2)^{5/2}} \right) E_0. \quad (21)$$

Внаслідок симетрії поля для визначення заряду, який припадає на обкладинки елементарного конденсатора, досить визначити заряд, який припадає лише на заштрихований квадрат (див. рис. 4) і результат помножити на 4. Тоді

$$\begin{aligned} Q &= 4\varepsilon_c \varepsilon_0 \int_0^{R_0} \int_0^{R_0} \left[1 - \frac{\alpha_1 (x^2 + y^2 - 2R_0^2)}{(x^2 + y^2 + R_0^2)^{5/2}} \right] \cdot E_0 dx dy = \\ &= 4\varepsilon_c \varepsilon_0 E_0 \int_0^{R_0} dy \int_0^{R_0} \left[1 - \frac{\alpha_1 (x^2 + y^2 - 2R_0^2)}{(x^2 + y^2 + R_0^2)^{5/2}} \right] dx. \end{aligned} \quad (22)$$

Обчисливши інтеграл (22) отримаємо:

$$Q = 4\varepsilon_c \varepsilon_0 R_0 E_0 \left[R_0 - \frac{\alpha_1}{R_0^2} \left(\frac{1}{2\sqrt{3}} - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\frac{1}{3} + 1} \right) \right] = 4\varepsilon_c \varepsilon_0 R_0^2 E_0 \left[1 + \frac{\alpha_1}{R_0^3 \sqrt{3}} \right]. \quad (23)$$

Тоді ємність між протилежними сторонами елементарного куба дорівнює [3, 4]:

$$C_0 = \frac{Q}{U} = \frac{4\varepsilon_c \varepsilon_0 R_0^2 E_0 \left(1 + \frac{\alpha_1}{R_0^3 \sqrt{3}} \right)}{\left(1 - \frac{0.5236\alpha_1}{R_0^3} \right) 2E_0 R_0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_c \varepsilon_0 R_0 \frac{(\sqrt{3}R_0^3 + \alpha_1)}{(R_0^3 - 0.5236\alpha_1)}. \quad (24)$$

Якщо відсутня оболонка діелектричної кулі, то вираз (24) набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_c \varepsilon_0 R_0 \frac{\sqrt{3}R_0^3 + \frac{(\varepsilon_b - \varepsilon_c) R_0^3}{2\varepsilon_c + \varepsilon_b}}{R_0^3 - 0.5236 \frac{(\varepsilon_b - \varepsilon_c) R_0^3}{2\varepsilon_c + \varepsilon_b}} = \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_c \varepsilon_0 R_0 \frac{2\sqrt{3}\varepsilon_c + \sqrt{3}\varepsilon_b + \varepsilon_b - \varepsilon_c}{2\varepsilon_c + \varepsilon_b - 0.5236\varepsilon_b + 0.5236\varepsilon_c} = \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_c \varepsilon_0 R_0 \frac{(2\sqrt{3}-1)\varepsilon_c + (\sqrt{3}+1)\varepsilon_b}{2.5236\varepsilon_c + 0.4764\varepsilon_b} = \\ &= 2\varepsilon_c \varepsilon_0 R_0 \frac{2.4641\varepsilon_c + 2.7320\varepsilon_b}{\sqrt{3}(2.5236\varepsilon_c + 0.4764\varepsilon_b)}. \end{aligned} \quad (25)$$

Звернемо увагу на те, що при $\varepsilon_b = \varepsilon_c$ (однорідне середовище) C_0 з (25) дорівнює ємності плоского конденсатора $C_0 = 2\varepsilon_c \varepsilon_0 R_0$, що підтверджує правильність отриманих результатів.

Якщо порівняти вираз для ємності плоского конденсатора і вираз (24), то коефіцієнт

$$\varepsilon_c \frac{\sqrt{3}R_0^3 + \alpha_1}{\sqrt{3}(R_0^3 - 0,5236\alpha_1)} = \varepsilon_{\text{екв}} \quad (26)$$

може розглядатися як *еквівалентна відносна діелектрична проникність такого неоднорідного середовища*.

У разі відсутності зовнішньої оболонки діелектричної кулі відносна еквівалентна діелектрична проникність дорівнює:

$$\varepsilon_{\text{екв}} = \varepsilon_c \frac{2,4641\varepsilon_c + 2,7320\varepsilon_g}{\sqrt{3}(2,5236\varepsilon_c + 0,4764\varepsilon_g)}, \quad (27)$$

яка не залежить від радіуса діелектричної кулі, а лише від співвідношення діелектричних проникностей середовища і кулі.

Аналіз отриманих результатів. Для аналізу одержаних результатів, зокрема для аналізу впливу параметрів зовнішньої оболонки кулі на значення ЕДП неоднорідного середовища, було виконано велику кількість обчислень. Встановлено: якщо товщина зовнішньої оболонки діелектричної кулі становить лише 5 % від радіуса кулі, то залежно від співвідношення діелектричних проникностей складових неоднорідного середовища зовнішня оболонка істотно впливає на значення ЕДП середовища (див. таблицю).

У табл. 1 наведено залежності відносної ЕДП неоднорідного середовища від відносних ДП ε_3 і ε_g при відносній ДП наповнювача $\varepsilon_c = 5$ та розмірах діелектричної кулі $R_0 = 5$ мм та $R_n = 4,95$ мм.

Аналіз отриманих результатів

	Без зовнішньої оболонки	$\varepsilon_3 = 1,0$	$\varepsilon_3 = 1,5$	$\varepsilon_3 = 2,0$	$\varepsilon_3 = 2,5$	$\varepsilon_3 = 3,0$	$\varepsilon_3 = 3,5$	$\varepsilon_3 = 4,0$	$\varepsilon_3 = 4,5$
$\varepsilon_g = 1,0$	3.31843	3.31844	2.95022	2.84444	2.84961	2.91054	3.00237	3.11232	3.23318
$\varepsilon_g = 1,5$	3.55491	4.1193	3.55492	3.33157	3.25865	3.26391	3.31398	3.3914	3.48614
$\varepsilon_g = 2,0$	3.78308	4.82221	4.10467	3.7831	3.6425	3.59836	3.61077	3.65847	3.72915
$\varepsilon_g = 2,5$	4.00338	5.44412	4.60663	4.2028	4.00341	3.91536	3.89375	3.9143	3.96277
$\varepsilon_g = 3,0$	4.21622	5.99825	5.06678	4.59392	4.34339	4.21625	4.16387	4.15957	4.18755
$\varepsilon_g = 3,5$	4.42195	6.49512	5.49012	4.95928	4.66419	4.50222	4.42199	4.39494	4.40397
$\varepsilon_g = 4,0$	4.62094	6.94316	5.88091	5.30135	4.9674	4.77436	4.66889	4.62098	4.61249
$\varepsilon_g = 4,5$	4.8135	7.34924	6.24276	5.62228	5.25443	5.03365	4.90529	4.83824	4.81355

Варто зазначити, що враховуючи аналогію між електростатичним полем та електричним полем постійного струму поза джерелами ЕРС, можна замінити дослідження електричного поля постійних струмів дослідженням електростатичного поля у геометрично подібному середовищі. Зокрема, формулу для електричної еквівалентної провідності аналогічного неоднорідного провідного середовища можемо одержати з відповідних формул ЕДП простою заміною ДП складових неоднорідного середовища на відповідні питомі провідності.

Висновки

Створено математичну модель еквівалентної діелектричної проникності неоднорідного середовища з регулярними кульовими діелектричними включеннями з урахуванням діелектричної проникності та товщини зовнішньої оболонки, внутрішнього ядра діелектричної кулі та діелектричної проникності середовища, в якому вони перебувають.

1. Нейман Л.Р., Димерчан К.С. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергоиздат, 2003.
2. Теоретические основы электротехники. Том II. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля: Учебник для электротех. вузов. / Под ред. П.А. Ионкина. – Изд. 2-е, перераб и доп. – М.: Высшая школа, 1972. 3. Клауснатцер Г. Введение в электротехнику. – М., 1985. – 480 с. 4. Малинівський С.М. Загальна електротехніка. – Львів: Бескид-Біт, 2003. – 500 с. 5. Атабеков Г.И., Купалян С.Д., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники / Под ред Г.И. Атабекова. Ч. 2 и 3. Нелинейные цепи. Электромагнитное поле. – Москва-Ленинград: Энергия, 1966. – 280 с.

УДК 621.317

В.О. Поджаренко¹, В.М. Дідич², О.М. Васілевський¹

¹Вінницький національний технічний університет,

²Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова,

ОЦІНКА ВІРОГІДНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ СКЛАДОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГУМУСУ В ҐРУНТІ

© Поджаренко В.О., Дідич В.М., Васілевський О.М., 2009

Здійснено оцінку помилок першого і другого роду, побудовано характеристики їхніх змін та визначено вірогідність автоматизованого контролю складових елементів гумусу в ґрунті.

The estimation of errors of the first and second family is carried out, descriptions of their change and certainly authenticity of the automated control of making elements of humus are built in soil.

Вступ. На всіх етапах розвитку людського суспільства родючість ґрунту, від якої залежать якісні та кількісні показники врожайності, була, є і буде найголовнішою турботою агропромислового комплексу України. Постійне вивчення та дослідження властивостей ґрунтів і оцінка їхніх потенціальних можливостей в плані забезпечення врожайності є неодмінним супутником сучасного сільського господарства, що націлене на розроблення інтенсивних методів вирощування сільськогосподарських культур. Ґрунт, як будь-яке природне тіло біосфери (вода, торф, вугілля), обов'язково містить продукти життєдіяльності мікроорганізмів, які посилюють його родючість. Одним з таких найважливіших продуктів є гумус – специфічний органічний субстрат, який характеризує ґрунт в плані його потенційної родючості. Гумусоутворення являє собою дуже складний фізико-хімічний процес, що проходить під впливом великої кількості зовнішніх випадкових та невідповідних факторів, які ведуть до певної імовірнісної характеристики його складу. Тому сьогодні актуальним є контроль основних складових елементів гумусу (амонійного азоту, нітратного азоту, фтору, калію) від яких залежить хімічна активність ґрунту.

Автоматизація контролю гумусового стану ґрунту була і є найголовнішим завданням сільського господарства, оскільки від нього прямо залежать якісні та кількісні показники врожайності.

Аналіз стану досліджень та публікацій. Вірогідність контролю можна визначити за допомогою розрахунку помилок контролю першого та другого роду, які для загальних випадків розглянуто в [1–3]. Загальна безумовна вірогідність D прийняття засобом контролю правильного рішення визначається як:

$$D = 1 - P_n = 1 - (\alpha + \beta), \quad (1)$$

де α – помилка першого роду (хибна тривога); β – помилка другого роду (пропуск сигналу); P_n – вірогідність прийняття засобом контролю помилкового рішення.