

УДК 621.3: 631.53.027.33

ПОВНИЙ СТРУМ ЗЕРНОВОЇ МАСИ ПІД ДІЄЮ ЗМІННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВИСОКОЇ НАПРУЖЕНОСТІ

*О.М. Берека, доктор технічних наук
С.М. Усенко, кандидат технічних наук*

Розглянуті теоретичні положення проходження розрядних процесів у зерновій масі, що знаходиться під дією електричного поля високої напруженості змінного струму і відділена від електродів діелектричними пластинами, що дозволило встановити математичні залежності повного струму з урахуванням струмів зміщення та розрядного струму.

Електричне поле високої напруженості, струм зміщення, розрядний струм, густина струму, напруженість поля, зернова маса.

В передових країнах світу велику увагу приділяють екологічно безпечним технологіям виробництва сільськогосподарської продукції в тому числі електрофізичним методам обробки.

Серед відомих електротехнологій, принципово новим напрямом є використання електричного поля високої напруженості, під дією якого у повітряних включеннях зернової маси відбуваються часткові розряди, які призводять до іонізаційних процесів. Як наслідок – у всьому об'ємі зернової маси, яка перебуває між електро-дами, буде утворюватись озон.

Ці процеси детально вивчались у випадку, коли обробка проводилася в електричному полі високої напруженості постійного струму з метою стимуляції зерна. На відміну від постійних електричних полів у змінних електричних полях, які доцільно застосовувати при знезаражуючій обробці зерна, крім розрядних струмів необхідно враховувати струм зміщення, який може суттєво впливати на розподіл напруженості електричного поля в зерновій масі, а відповідно і результат обробки.

Для обґрунтування розрядних процесів у зерновій масі було розроблено електричну схему заміщення (рис. 1) [1].

На еквівалентній електричній схемі зернова маса представлена як велика кількість ланцюгів, що складаються з опорів і ємностей діелектричних пластин, зерна та повітряних включень. Значення струму, що проходить через зернову масу, залежить від величини напруги на плоскопаралельних електродах, опору діелектричних пластин, що відділяють зернову масу, від електродів та опору самого зерна.

Розглянемо розрядні процеси на прикладі одного ланцюга.

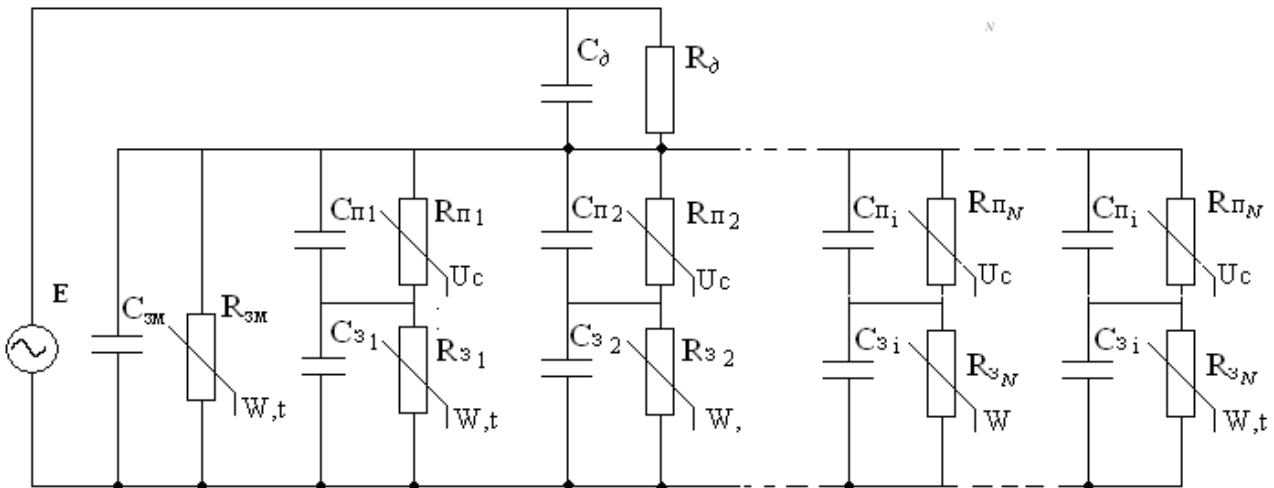


Рис. 1. Електрична схема заміщення зернової маси, що знаходиться в електричному полі високої напруги:

$R_{зм}, C_{зм}$ – опір та ємність зернової маси; $C_{д}, R_{д}$ – ємності та опори діелектричних пластин; $C_{зi}, R_{зi}$ – ємності і опори зернин, які розташовані послідовно з повітряним включенням; $C_{пi}, R_{пi}$ – ємність і опір повітряного включення, де $i=1, 2 \dots N$, N – кількість паралельних ланцюгів

При підключенні до електродів змінної напруги на першому півперіоді ємність повітряного включення $C_{пi}$ буде поступово заряджатися і при досягненні напруги певного пробивного значення $U_{нpi}$ виникне частковий розряд [2, 3].

При розряді напруга на i -му включенні падає не до нуля, а до $U_{н.зgi}$ (напруга загасання розряду). Значення $U_{н.зgi}$ звичайно не на багато менша напруги розряду $U_{н.зgi} = (0,7-0,9)U_{н.нpi}$ [2, 4].

Після загасання розряду напруга на включенні починає зростати по закону, що відповідає зміні прикладеної напруги, зміщеної на значення постійної складової, яка виникла в наслідок появи зарядів на поверхні включення. Коли напруга на ємності $C_{пi}$ досягає $U_{н.нpi}$ процес повторюється.

Таким чином розряди у повітряному включенні повторюються через проміжки часу, що відповідають зміні напруги на включенні $C_{пi}$ на значення $U_{н.нpi} - U_{н.зgi}$, але адсорбовані на поверхні заряди, що залишились від попереднього періоду, спотворюють поле на включенні і сприяють виникненню розрядів вже при дещо інших значеннях $U_{н.нpi}$ та $U_{н.зgi}$. Це пояснюється тим, що час релаксації зарядів у зерновій масі значно перевищує час тривалості півперіоду напруги. При зростанні часу релаксації частота проходження зарядів значно зменшується.

Часткові розряди зникають коли значення напруги досягає максимуму і знову виникають після зміни напруги на електродах на значення ΔU , що відповідає зміні напруги на i -му включенні $\Delta U_{ni} = U_{н.нpi} - U_{н.зgi}$, причому ΔU і ΔU_{ni} зв'язані співвідношенням [4]:

$$\Delta U = \frac{C_{\delta} + C_{zi} + C_{ni}}{C_{\delta} + C_{zi}} \cdot \Delta U_{ni}, \quad i=1,2 \dots N. \quad (1)$$

Якщо напруга, що подається на електроди змінюється за виразом $U=U_m \sin \omega t$, то напруга на включенні U_{ni} дорівнює:

$$U_{ni} = U_m \frac{C_{\delta} + C_{zi}}{C_{\delta} + C_{zi} + C_{ni}}, \quad i=1,2 \dots N. \quad (2)$$

Тоді число часткових розрядів m в i -му включенні за один півперіод дорівнює:

$$m_i = \frac{2 \left(\frac{C_{\delta} + C_{zi}}{C_{\delta} + C_{zi} + C_{ni}} U_m - U_{zci} \right)}{U_{npi} - U_{zci}}, \quad i=1,2 \dots N, \quad (3)$$

де U_{npi} і U_{zci} – напруга на електродах при виникненні розряду та загасанні розряду у i -му повітряному включенні зернової маси, кВ.

Кількості часткових розрядів $n_{чрi}$, у i -му повітряному включенні за 1с. визначається за виразом [4]:

$$n_{чрi} = 2 f m_i, \quad (4)$$

де f – частота мережі; m_i – число часткових зарядів в i -му повітряному включенні за один період.

Пробій повітряного включення у зерновій масі завжди буде супроводжуватись нейтралізацією певної кількості зарядів $U_{n.npi} C_{ni}$. При розряді у повітряних включеннях підвищується загальна ємність зернової маси, в результаті чого напруга на електродах зменшується і для її відновлення необхідний додатковий заряд ΔQ_i . Для одиничного розряду:

$$\Delta Q_i = U_{npi} \cdot (C_{\delta} + C_{zi}). \quad (5)$$

Враховуючи, що значення зарядів і частота їх проходження не постійні, а змінюються в деяких проміжках, для оцінки їх інтенсивності можна скористатися інтегральним параметром – середнім розрядним струмом, який буде визначатися зарядом, що нейтралізується в повітряному включенні за 1 секунду:

$$I_{чрi} = n_{чрi} \cdot \Delta Q_i. \quad (6)$$

Враховуючі співвідношення (3), (4) та (6), розрядний струм для будь-якого i -ого ланцюга зернової маси буде визначатися наступним чином:

$$I_{cpi} = 2f \frac{2 \left(\frac{C_{\delta} + C_{zi}}{C_{\delta} + C_{zi} + C_{ni}} U_m - U_{zci} \right)}{U_{npi} - U_{zci}} \cdot U_{npi} (C_{\delta} + C_{zi}), i=1, 2 \dots N. \quad (7)$$

Для розрахунку струму зміщення зернової маси слід розглядати, як багатошаровий діелектрик (рис. 2).

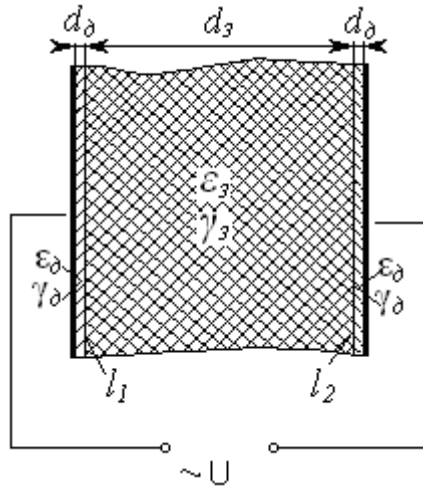


Рис. 2. Багатошаровий діелектрик (зернова маса-діелектричні пластини) в електричному полі:

$\varepsilon_{\delta}, \gamma_{\delta}, d_{\delta}, \varepsilon_3, \gamma_3, d_3$ – діелектрична проникність, питома електропровідність, товщина діелектричних пластин та зернової маси

В результаті детального аналізу цих процесів [1] встановлено, що напруженості поля в діелектрику \dot{E}_{δ} та зерновій масі \dot{E}_3 в будь-який момент часу, при змінній напрузі, виражаються наступним чином:

$$\dot{E}_{\delta m} = \frac{(\varepsilon_3 \gamma_{\delta} - \varepsilon_{\delta} \gamma_3) d_3 \dot{U}_m}{(2\varepsilon_3 d_{\delta} + \varepsilon_{\delta} d_3)(2\bar{\gamma}_3 d_{\delta} + \bar{\gamma}_{\delta} d_3)} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\bar{\gamma}_3 \dot{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_{\delta} + \bar{\gamma}_{\delta} d_3}; \quad (8)$$

$$\dot{E}_{3m} = \frac{(\gamma_3 \varepsilon_{\delta} - \gamma_{\delta} \varepsilon_3) 2d_{\delta} \dot{U}_m}{(2\varepsilon_3 d_{\delta} + \varepsilon_{\delta} d_3)(2\bar{\gamma}_3 d_{\delta} + \bar{\gamma}_{\delta} d_3)} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\bar{\gamma}_{\delta} \dot{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_{\delta} + \bar{\gamma}_{\delta} d_3}; \quad (9)$$

а густина струму, що проходить через зернову масу:

$$\dot{j}_3 = \frac{2d_{\delta} (\varepsilon_3 \gamma_{\delta} - \varepsilon_{\delta} \gamma_3)^2 d_3 \dot{U}_m}{(\varepsilon_{\delta} d_3 + 2\varepsilon_3 d_{\delta})^2 (\bar{\gamma}_{\delta} d_3 + 2\bar{\gamma}_3 d_{\delta})} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\bar{\gamma}_{\delta} \bar{\gamma}_3 \dot{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_{\delta} + \bar{\gamma}_{\delta} d_3}. \quad (10)$$

Відносна діелектрична проникність зернової маси, вологістю 12 – 17 %, лежить в діапазоні $\varepsilon_3 \in [3; 10]$, а питома електропровідність – $\gamma_3 \in [2 \cdot 10^{-9}; 4 \cdot 10^{-6}]$ См/м [18]; відповідно для діелектричних пластин вказані характеристики лежать в діапазоні $\varepsilon_{\delta} \in [2; 8]$, $\gamma_{\delta} \in [10^{-17}; 10^{-10}]$ См/м, при цьому товщина діелектричних пластин $d_{\delta} \in [0,25; 2]$ мм, а товщина шару зернової маси $d_3 \in [26; 30]$ мм. При таких значеннях першим доданком у співвідношеннях (8) і

(9) можна знехтувати. Тоді напруженість електричного поля в області зерна і діелектричних пластин може бути знайдено наступним чином:

$$\dot{E}_0 = \frac{\bar{\gamma}_3 \dot{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_0 + \bar{\gamma}_0 d_3}; \quad (11)$$

$$\dot{E}_3 = \frac{\bar{\gamma}_0 \dot{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_0 + \bar{\gamma}_0 d_3}, \quad (12)$$

а густина повного струму:

$$\dot{j}_{3м} = \frac{\bar{\gamma}_0 \cdot \bar{\gamma}_3 \dot{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_0 + \bar{\gamma}_0 d_3}. \quad (13)$$

Враховуючи вирази (7) та (13), рівняння загального струму, що проходить через зернову масу, яка знаходиться у електричному полі високої напруженості і відділена від електродів діелектричними пластинами, матиме вигляд:

$$I = \begin{cases} I_{3м}, \text{ якщо } U_{\text{пі}} < U_{\text{прі}} \\ I_{3м} + \sum_{i=1}^N I_{\text{спі}}, \text{ якщо } U_{\text{пі}} \geq U_{\text{прі}} \end{cases}, \quad (14)$$

де N – кількість ланцюгів, що складаються з опорів та ємностей діелектричних пластин, зерна та повітряних включень; $I_3 = I_m(j_3) \cdot S$, S – площа електродів.

Тобто, при підведенні до електродів камери обробки високої напруги і поступовому її підвищенні через зернову масу протікатиме струм зміщення, і лише після досягнення значення напруги на повітряному включенні пробивного значення через зернову масу протікатиме і розрядний струм. Причому значення пробивної напруги на повітряному включенні суттєво залежатиме від характеристик самого зерна (форма, вологість, забрудненість).

Висновки

В результаті теоретичного дослідження встановлені математичні залежності, які дозволяють визначити режимні параметри, а саме напруженість поля і густину струму при знезаражуючій обробці зернових в електричному полі високої напруженості змінного струму.

Список літератури

1. Берека О. М. Часткові розряди в зерновій масі під дією електричного поля високої напруженості змінного струму [Електронний журнал]: Енергетика і автоматика / О.М. Берека, С.М. Усенко – К.:НУБіП України, 2011. – № 3. – Режим доступу до журналу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/eia/index.html>.

2. Багиров М. А. Воздействие электрических разрядов на полимерные диэлектрики / М. А. Багиров, В. П. Малин, С. А. Абасов – Баку: Изд-во “ЭЛМ”, 1975. – 167 с.

3. Казарновский Д. М. Испытания электроизоляционных материалов / Д. М. Казарновский, Б. М. Тареев. – Л. : Изд - во „Энергия”, 1969. – 296 с.

4. Кучинский Г. С. Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров, Г. Т. Назаров, И. Ф. Переселенцев – М.: Энергия, 1975. – 248с.

5. Берека О. М. Аналіз режимних параметрів знезаражуючої обробки зернової маси в електричному полі високої напруженості змінного струму / О. М. Берека, А.В. Жильцов С. М. Усенко // *Энергетика і автоматика* . – 2014. – № 1. – С. 15-24. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/eia_2014_1_4.pdf

6. Берека О. М. Дослідження питомої електропровідності насінневої маси в електричних полях високої напруги / О. М. Берека // *Праці Таврійського держ. агротехн. ун-ту*. – Мелітополь, 2008. – Т. 7, Вип. 8. – С. 213 - 217.

Рассмотрены теоретические положения прохождения разрядных процессов в зерновой массе, находящейся под действием электрического поля высокой напряженности переменного тока отделенной от электродов диэлектрическими пластинами, что позволило установить математические зависимости для определения полного тока с учетом токов смещения и разрядного тока.

Электрическое поле высокой напряженности, ток смещения, разрядный ток, плотность тока, напряженность поля, зерновая масса.

The theoretical position of the passage of discharge processes in the grain mass, under the influence of an electric field of high intensity AC and separated from the dielectric electrode plates, which allowed us to establish the mathematical dependence to determine the total current, taking into account the displacement current and the discharge current.

The electric field of high intensity, bias current, discharge current, current density, field strength, grain weight.