

УДК 537.29(631.365.22+631.348:632.7)

БАГАТОФАЗНИЙ ВИСОКОЧАСТОТНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДЕЗІНСЕКЦІЇ І СУШІННЯ ЗЕРНА

Зіньковський Ю. Ф., д.т.н., проф.; Сидорук Ю. К., доцент;

Туровський А. О., асистент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна, toljatyf@i.ua, sydoryk_@ukr.net, toljatyf@i.ua

MULTIPHASE HIGH FREQUENCY APPARATUS FOR DISINFESTATION AND DRYING OF GRAIN

Zinkovskiy Yu. F., doctor of sci. (techn.), prof.; Sydoruk Yu. K., ass. prof.;

Turovskiy A. O., assistant

*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", toljatyf@i.ua,
sydoryk_@ukr.net, toljatyf@i.ua*

Вступ

Застосування електрофізичних технологій здобуло широкого впровадження у різноманітних сферах виробництва. Винятком не став і агропромисловий комплекс, де здобутки технічних наук створили можливість вдосконалення технологій вирощування і зберігання вирощеної продукції. До таких новацій варто віднести використання в агропромисловому комплексі електричного поля високої частоти (ВЧ) та електромагнітного поля надвисокої частоти (НВЧ) для передпосівної обробки насіння, сушіння зерна, ягід, фруктів, грибів, овочів, іншої продукції, а також в багатьох інших випадках.

При використанні електричного та електромагнітного полів для передпосівної обробки насіння відбувається його знезараження та активація процесів проростання. Рослини, насіння яких було опромінено електричним або електромагнітним полем, швидше і краще розвиваються, стійко переносять природні катаклізми, особливо засуху, раніше визрівають і мають підвищений імунітет до хвороб [1–3].

Сушіння електричним та електромагнітним полем теж має ряд переваг. Зокрема, вдається знизити енергетичні затрати, виконувати сушіння при зниженому тиску повітря, що інтенсифікує пароутворення при відносно низьких температурах, забезпечити високу рівномірність нагрівання. Сушіння зерна супроводжується знищенням патогенної мікрофлори та комах-шкідників, що забезпечує значно вищу якість зерна і зменшує його втрати при зберіганні.

Реалізація обладнання для сушіння та дезінсекції зерна електричним полем високої частоти

Однією з найважливіших технологічних особливостей апаратної реалізації сушіння і дезінсекції зерна, є рівномірність нагрівання всієї маси зерна. В обладнанні, в якому носієм енергії є електричне поле, останнє в активній зоні, де відбувається взаємодія електричного поля з зерном, має бути суттєво однорідним.

У ВЧ обладнанні для сушіння та дезінсекції зерна важливим параметром є величина напруженості електричного поля в активній зоні, яка повинна становити не менше $1,2 \div 1,8$ кВ/см. Продуктивність ВЧ сушарки визначається розмірами активної камери, в якій опромінюється зерно, в тому числі розмірами поперечного перетину, і при відстані між електродами $d = 30$ см напруга на електродах має становити $36 \div 54$ кВ. Таким чином, ВЧ сушарки потребують генераторів з високою вихідною напругою, що створює певні труднощі при їх проектуванні та експлуатації.

При створенні і проектуванні ВЧ установок необхідно також враховувати, що навантаження на генератор має переважно ємнісний характер, і при значній ємності електродів виникає складність узгодження його з генератором, що суттєво впливає на коефіцієнт корисної дії.

Постановка задачі

Найпростіший варіант електродної системи, в якій може існувати однорідне електричне поле, має дві металеві паралельно розташовані пластини. Щоб зменшити вплив крайових ефектів і забезпечити потрібну однорідність поля, необхідно значно збільшити розміри електродів, що, однак, призведе до значного збільшення ємності.

Для забезпечення високої рівномірності розподілу електричного поля за меншої ємності, порівняно з плоскими електродами, зберігаючи високу продуктивність установки запропоновано використання електродної структури [4 — 6], яка складається з n дугоподібних електродів, розташованих на поверхні циліндра радіусом r та довжиною l , де $l \gg r$. Вважаємо, що електроди мають нескінченно високу провідність і нехтовно малу товщину, а вся структура оточена вакуумом. Потенціал кожного електрода дорівнює $V_{01}, V_{02}, \dots, V_{0n}$.

Мета роботи полягає у створенні математичної моделі описаної структури з точки зору застосування її у складі пристрою для оброблення сипучих діелектричних матеріалів електричним полем високої частоти; визначенні розподілу напруженості електричного поля в області між електродами, що визначить оптимальну кількість і розмір електродів для забезпечення необхідного розміру активної зони. При цьому зона взаємодії повинна знаходитись в межах, де поле має рівномірний характер.

Теоретичний аналіз електричного поля в багатозв'язній електродній структурі

Враховуючи, що $l \gg r$, то при розрахунку напруженості електричного поля і потенціалу в середині циліндричної структури теоретично задача зводиться до плоскої задачі на комплексній необмеженій площині з n -зв'язною кільцевою границею L радіусом r . Кільцева границя L розділена на окремі відрізки розімкнених дуг $L_1, L_2, \dots, L_n \in L$, що не мають спільних точок (рис. 1). Дуги L_1, L_2, \dots, L_n знаходяться в інтервалах $a_1b_1, a_2b_2, \dots, a_nb_n$ і є екіпотенціальними оскільки мають нескінченно високу провідність. Повна комплексна площина z розділена на дві симетричні, відносно граничного кола радіусом r , області: зовнішню S^+ , для якої $|z| \geq r$, та внутрішню S^- , для якої $|z| \leq r$, де z — незалежна комплексна змінна. Задача полягає у визначенні комплексного потенціалу $\Phi(z) = U(z) + jV(z)$, де $V(z)$ — потенціал поля, та напруженості електричного поля $\vec{E}(z) = -j[\Phi'(z)]^*$, де $\Phi'(z)$ — похідна від потенціалу по z . Напруженість електричного поля $\vec{E}(z)$ є однозначною аналітичною функцією, а символ $[\dots]^*$ позначає комплексне спряження. Вказані функції задані у всіх точках відкритої n -зв'язної комплексної площини z [7]. На всій комплексній площині величина $\vec{E}(z)$ має такі властивості:

1. $\vec{E}(z)$ — обмежена скрізь, окрім кінців дуг (a_k та b_k), в яких $\vec{E}(z) \rightarrow \infty$.

2. Завдяки симетрії $\vec{E}(z)$ відносно граничного кола на дугах a_kb_k $\vec{E}^+(\gamma) = -\vec{E}^-(\gamma)$, а на дугах $b_k a_{k+1}$ $\vec{E}^+(\gamma) = \vec{E}^-(\gamma)$, де $\vec{E}^+(\gamma)$ — напруженість електричного поля на граничних дугах з зовнішньої сторони, а $\vec{E}^-(\gamma)$ — напруженість електричного поля з внутрішньої сторони, γ — комплексна координата на кільцевій границі.

3. На дугах a_kb_k тангенційна складова напруженості електричного поля відносно граничного кола $\vec{E}_t(\gamma) = 0$, а на проміжках $b_k a_{k+1}$ перпендикулярна складова напруженості електричного поля відносно граничного кола $\vec{E}_n(\gamma) = 0$ як з зовнішньої, так і з внутрішньої сторони.

4. В нескінченності $\vec{E}(z)$ має нуль другого порядку.

5. Відносно граничного кола радіусом r напруженість електричного поля і комплексний потенціал зв'язані відповідними виразами:

$$\vec{E}(z)_{S^+} = \{[\vec{E}(1/z^*)]/z^{*2}\}_{S^-}^* \text{ і } \Phi(z) = -[\Phi(1/z^*)]^*$$

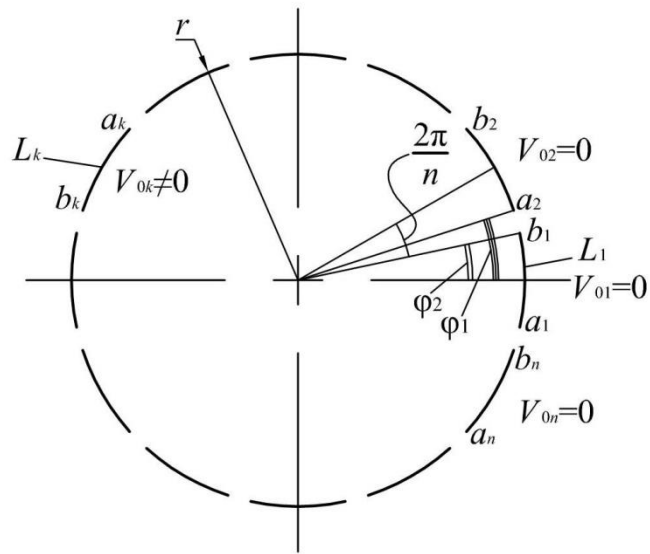


Рис. 1. Розташування електродів структури

Ці властивості означають, що $\bar{E}(z)$ є кусково-голоморфною функцією, а L позначає сукупність скінченного числа простих (гладких) дуг, що не мають ні спільних точок, ні кінців, крім того $\bar{E}^+(\gamma) = G(\gamma)\bar{E}^-(\gamma)$ на L .

Завдяки властивості 2 $G(\gamma) = -1$ на дугах $a_k b_k$, а на $b_k a_{k+1}$ $G(\gamma) = 1$, тобто $G(\gamma)$ — кусково-постійна функція, яка має розрив першого роду при переході через точки a_k та b_k , відповідно, a_k та b_k є вузловими і особливими, а $G(\gamma)$ постійна скрізь на L , окрім вузлів.

Вказані вище властивості $\bar{E}(z)$ відповідають вимогам однорідної задачі спряження теорії сингулярних інтегральних рівнянь [8].

Загальний вигляд виразу, який є розв'язком однорідної задачі спряження при умові, що функція, яку необхідно знайти (в даному випадку, напруженість електричного поля), має скінченний характер в нескінченності, записується у вигляді [8]:

$$F(\xi) = X(\xi) P(\xi), \quad (1)$$

де $F(\xi)$ — функція, яку необхідно знайти, ξ — незалежна комплексна змінна, $X(\xi)$ — деякий канонічний розв'язок; $P(\xi)$ — довільний поліном степені k .

Стосовно даної задачі вираз (1) приймає вигляд:

$$E(z) = X(z^*) P(z^*). \quad (2)$$

Згідно з вказаною вище теорією степінь поліному $P(z^*)$ та так званий індекс задачі спряження χ визначається поведінкою $E(z)$ в нескінченності.

Так як $E(z)$ має в нескінченності нуль другого порядку, $P(z^*)$ має степінь m , то степінь $X(z^*)$ дорівнює $\chi = (m + 2)$. Згідно визначення

$$\chi = [\arg(G(\gamma))]_L / 2\pi,$$

де $[\dots]_L$ позначає приріст виразу, взятого в дужки, при обході контуру L один раз в додатньому напрямку, тобто суму приростів виразу при обході контурів L_k ($k = 1, 2, 3, \dots, n$) по одному разу. В зв'язку з тим, що a_k та b_k — особливі вузли, $[\arg(G(\gamma))]_L = 2\pi n$, тому $\chi = n$, а $m = n - 2$. При відомому індексі спряження вираз поліному приймає вигляд [8]:

$$P(z^*) = \sum_{k=2}^n C_{k-1} (z^*)^{n-k} \quad (3)$$

Залежно від характеру $G(\gamma)$ і поведінки $F(z)$ в вузлах визначається клас задачі. Відповідно, вузли можуть бути особливими, коли дана функція в вузлах має нескінченне значення, і неособливими, коли дана функція в вузлах обмежена. Умовно клас задачі позначається як h_i , де i — кількість неособливих вузлів на граничній лінії.

Так, в загальному випадку задача класу h_q має канонічну функцію:

$$X(\xi) = Q \frac{\sqrt{R_1(\xi)}}{\sqrt{R_2(\xi)}} \quad (4)$$

де Q — довільна постійна. Відповідно,

$$R_1(\xi) = \prod_{k=1}^q (\xi - c_k), \quad R_2(\xi) = \prod_{k=q+1}^{2n} (\xi - c_k) \quad (5)$$

де c_1, c_2, \dots, c_q — неособливі вузли; $c_{q+1}, c_{q+2}, \dots, c_{2n}$ — особливі вузли. В даній задачі неособливі вузли відсутні, тому $q = 0$, а дана задача є задачею класу h_0 , її канонічна функція

$$X(z^*) = \frac{Q}{\sqrt{R(z^*)}} \quad (6)$$

де $R(z^*) = \prod_{k=1}^n (z^* - a_k)(z^* - b_k)$, постійна Q визначається з умови 3 на гранич-

ному колі і дорівнює: $Q = \sqrt[4]{\prod_{k=1}^n a_k b_k}$.

Вирази напруженості електричного поля і потенціалу доцільно представляти через нормовану змінну $Z = z/r$, що реалізується шляхом конформного відображення комплексної площини z на площину з одиничним граничним колом Z . Використавши вирази (2, 3, 5, 6) і виконавши процедуру конформного відображення, одержимо вираз напруженості електричного поля [4]:

$$E(Z^*) = \frac{\sqrt[4]{\prod_{k=1}^n a_k b_k}}{r} \frac{\sum_{k=2}^n C_{k-1} (Z^*)^{n-k}}{\sqrt{\prod_{k=1}^n (Z^* - a_k)(Z^* - b_k)}} \quad (7)$$

Відповідно, потенціал

$$V = -\operatorname{Re} \left[\frac{\sqrt[4]{\prod_{k=1}^n a_k b_k}}{r} \int_z \frac{\sum_{k=2}^n C_{k-1} (Z^*)^{n-k} dZ}{\sqrt{\prod_{k=1}^n (Z^* - a_k)(Z^* - b_k)}} \right]^* \quad (8)$$

Приведені вище вирази можуть бути використані, як вихідні, для розрахунку напруженості електричного поля і потенціалу в кожній точці області Z при довільному розподілі точок a_k та b_k на граничному колі L , а також при довільному розподілі потенціалів між граничними дугами L_k . Але в даній електродній структурі згідно з постановкою задачі необхідно забезпечити однорідне електричне поле, що можливо лише при $L_1 = L_2 = L_3 = \dots = L_m$ та при однакових проміжках між ними ($b_1 a_2 = b_2 a_3 = \dots = b_n a_1$). Позначимо кутом $2\varphi_1$ кут, на який спирається дуга L_k , відповід-

но, кутовий проміжок між дугами L_k і L_{k+1} позначимо $2\varphi_2$, кутова відстань між серединами сусідніх дуг — $2\pi/n$ (рис. 1). Кожна дуга має потенціал $V_{01}, V_{02}, \dots, V_{0n}$, відповідно. У зв'язку з лінійністю середовища, в якому визначаються основні параметри електричного поля, його напруженість і потенціал в заданій структурі при довільному розподілі напруги між дугами L_k можна знайти як суму напруженостей і потенціалів, одержаних при часткових розв'язках задачі, коли лише одна дуга L_k має потенціал V_{0k} , а решта дуг мають нульовий потенціал. При цих умовах вираз напруженості електричного поля (7) приймає вигляд [4]:

$$E(Z^*) = \frac{1}{r} \frac{\sum_{k=2}^n C_{k-1} (Z^*)^{n-k}}{\sqrt{Z^{*2n} - 2Z^{*n} \cos n\varphi_1 + 1}} \quad (9)$$

а структура силових ліній електричного поля має вигляд відповідно до рис. 2.

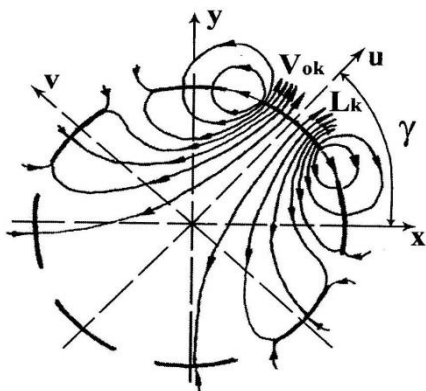


Рис. 2. Структура силових ліній електричного поля

Так як структура електричного поля симетрична відносно лінії u , що проходить через центр k -ї дуги перпендикулярно до неї, і, відповідно, відносно дуги L_k , що знаходиться під потенціалом V_{0k} (рис. 2), то симетричні коефіцієнти мають бути однаковими: $C_1 = C_{n-1}, C_2 = C_{n-2}$ і т.д. При цьому кількість невідомих коефіцієнтів зменшується до $N=n/2$ при парному значенні n та $N=(n+1)/2$ при непарному.

Після виконання симетризації граничних умов відносно осі u (рис. 2) і з врахуванням приведенного вище, вираз (9) запи-

шеться у вигляді [5]:

$$\dot{E}(Z)_k = \frac{(-1)^{k-1}}{r} Z^{*\frac{n-1}{2}} \times \sum_{i=1}^N C_i \left\{ \frac{Z^{*\frac{n-i}{2}} \exp \left[j \left(\frac{n-i}{2} \right) \frac{2\pi}{n} (k-1) \right] + Z^{*i-\frac{n}{2}} \exp \left[-j \left(\frac{n-i}{2} \right) \frac{2\pi}{n} (k-1) \right]}{\sqrt{Z^{*2n} - 2Z^{*n} \cos n\varphi_1 + 1}} \right\} \quad (10)$$

Приймаючи до уваги, що всі точки на граничному колі віддалені від початку координат на R , тому для опису довільної точки на колі достатньо задати лише її кутову координату φ , що відповідає полярній системі координат. У такому випадку $Z = \exp(j\varphi)$. Підставляючи значення Z в (10) і використовуючи перетворення Ейлера, одержимо вираз напруженості електричного поля на граничному колі [5]:

$$E_{\varphi}(Z)_k = \frac{(-1)^{k-1}}{r} \sqrt{2} \times \sum_{i=1}^N C_i \cos(n/2 - i) [\varphi - 2\pi(k-1)] \times \frac{1}{\sqrt{\cos n\varphi - \cos n\varphi_1}} \quad (11)$$

Вираз (11) використовується для визначення невідомих коефіцієнтів C_i шляхом інтегрування $E_{\varphi}(\gamma)_k$ між вузлами b_k і a_{k+1} , різниця потенціалів між якими відома. Так як кількість таких проміжків становить N , то кількість лінійних незалежних рівнянь, з яких визначаються N невідомих коефіцієнтів C_i , також дорівнює N . Система N рівнянь ($p = 1, 2, \dots, N$), при подачі на k -ту дугу потенціалу V_{0k} , записується у вигляді:

$$\sum_{i=1}^N C_i \sin\left(i \frac{\pi}{n} (2p-1)\right) P_{-i/n}(\cos n\varphi_2) = \frac{nV_{b_{k+p-1}a_{k+p}}}{2\pi} \quad (12)$$

де $P_{-i/n}(\cos n\varphi_2)$ — функція Лежандра порядку $(-i/n)$, $V_{b_{k+p-1}a_{k+p}}$ — різниця потенціалів між точками b_{k+p-1} і a_{k+p} . В даній системі кожне рівняння визначається цілим числом p , і лише перше рівняння, для якого $p=1$, має праву частину, тобто $V_{0k} \neq 0$, в решті рівнянь, для яких $p>1$, права частина дорівнює нулю. Детальне математичне пояснення цих, а також приведених нижче виразів викладено у [4, 5].

Високу ступінь однорідності електричного поля у внутрішній частині області z та рівномірне його обертання можна одержати, якщо розподіл потенціалу на граничних дугах реалізовано згідно виразу

$$V_{0k} = V_{0m} \sin[\Omega t + (k-1) 2\pi/n], \quad (13)$$

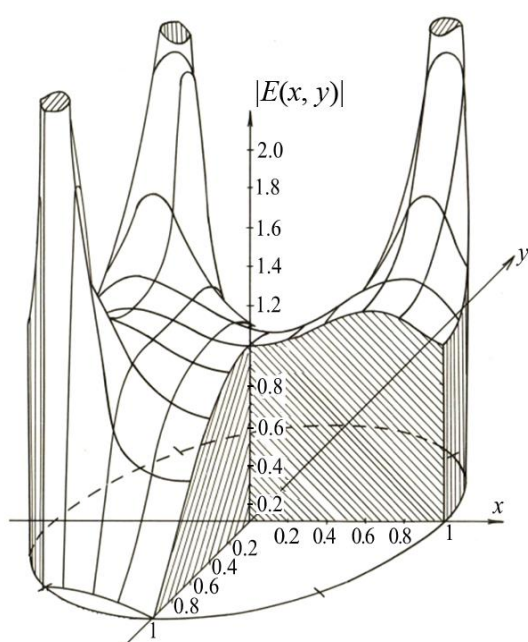
де Ω — колова частота та V_{0m} — амплітуда напруги на електродах, t — час. При цьому сумарний вектор напруженості електричного поля буде направлений між електродами з максимальною напругою, фаза напруги на яких становить $\pi/2 + \pi M$, де M — ціле число.

Так як $C_i = V_{0k} F_i$, а $F_i = -n/2\pi \cdot A/A_i \cdot 1/P_{-i/n}(\cos n\varphi_2)$, де A та A_i — визначник системи рівнянь (12) та алгебраїчне доповнення його i -го елемента ([5]), то вираз (10) після підстановки в нього (13) та знаходження сумарного поля, що створюється всіма n дугами, шляхом знаходження відповідної суми по k , приймає вигляд:

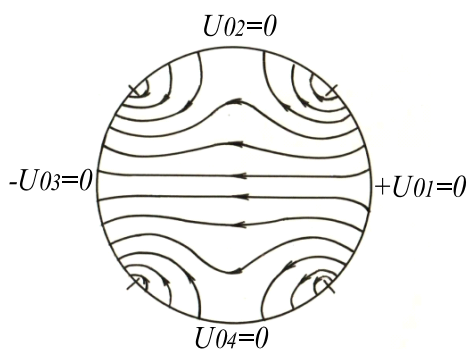
$$E(Z)_n = \frac{n V_{0m}}{2 r} F_1 \left[\frac{\sin \Omega t (1 + Z^{*(n-2)}) + j \cos \Omega t (1 - Z^{*(n-2)})}{\sqrt{Z^{*2n} - 2Z^{*n} \cos n\varphi_2 + 1}} \right] \quad (14)$$

Розрахунок напруженості електричного поля, згідно виразу (14), свідчить, що при малих значеннях n електричне поле у внутрішній частині області комплексної площини z суттєво неоднорідне, але при збільшенні n з'являється зона, в якій поле має високу однорідність, що зростає зі збільшенням n . Для ілюстрації цього твердження на рис. 3, а та рис. 4, а приве-

дені графічні результати розрахунків $|E(x, y)|$ для $n = 4$ та $n = 8$. Приведені залежності нормовані до модуля напруженості електричного поля у точці $(0, 0)$. На рис. 3, а та рис. 4, а зображені відповідні картини силових ліній електричного поля в площині Z . При $n = 8$ радіус зони однорідності $r_{од} = 0,6r$ при величині неоднорідності менше 10%, тоді як при $n = 4$ зона однорідності практично відсутня. Розмір зони однорідності також залежить від кута $2\varphi_2$. При малих значеннях n вплив цього параметра на одно-

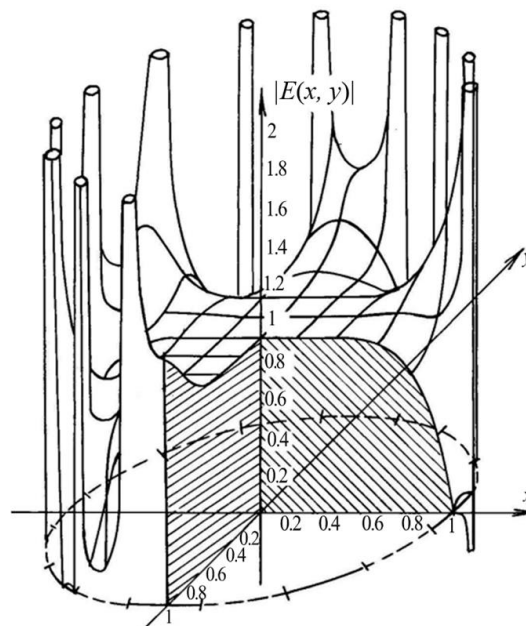


а

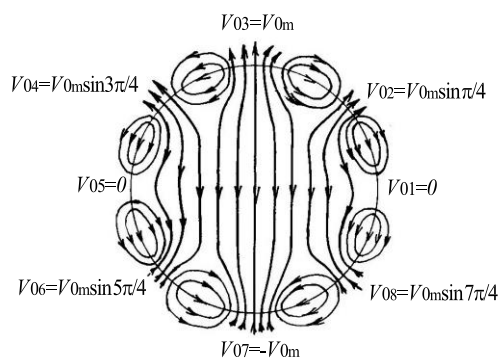


б

Рис. 3. Залежність $|E(x, y)|$ (а) та структура ліній електричного поля (б) при $n = 4$



а



б

Рис. 4. Залежність $|E(x, y)|$ (а) та структура ліній електричного поля (б) при $n = 8$

рідність поля значний, але при збільшенні n його вплив на розмір зони однорідності зменшується. Значною перевагою даної електродної структури є і те, що напруженість електричного поля в зоні однорідності має обертовий характер. Ця особливість також підвищує рівномірність опромінення об'єкту, особливо в випадках, коли окремі часточки, що підлягають опроміненню мають видовжену форму.

Принцип побудови пристрою для опромінення зерна електричним полем високої частоти. Основою даного пристрою є електродна система, яка має циліндричну форму. Електроди виконані в формі тонких металевих смуг з дуговим поперечним перетином, розташованих в діелектричній оболонці 1, 3 (рис. 5) [9]. Діелектрична оболонка, в середині якої знаходиться зерно або інший сипучий матеріал, що підлягає опроміненню, орієнтована вертикально так, що зерно рухається в ній під дією сили тяжіння. Електроди мають однаковий розмір і кут між серединами електродів дорівнює $2\pi/n$. Ззовні електродна система закрита металевим екраном 4.

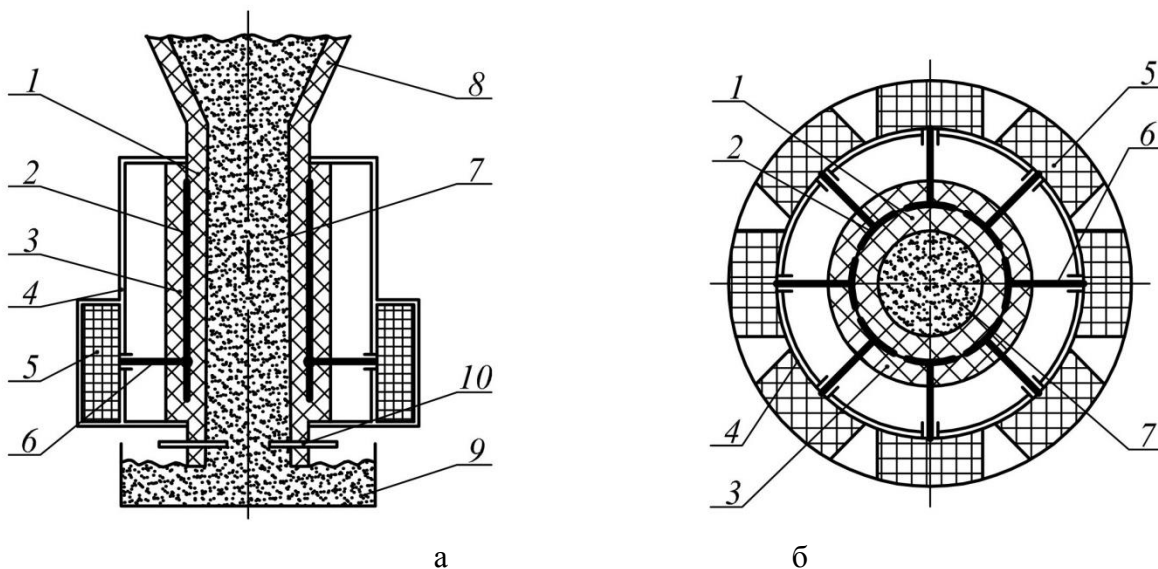


Рис. 5. Пристрій для опромінення зерна електричним полем високої частоти у вертикальному (а) та горизонтальному перетині (б)

Багатофазний (n -фазний) генератор, що живить електродну систему, має n вихідних блоків, розташованих навколо електродної системи так, що кожний вихідний блок знаходиться безпосередньо за електродом, який ним живиться, в окремій камері 5 і з'єднаний з відповідним електродом кабелем 6. Об'єкт сушіння 7 з вхідного бункеру 8 через активну зону надходить у вихідний бункер 9. Швидкість руху об'єкту сушіння і, відповідно, час сушіння регулюються розсувною діафрагмою 10.

Структурна схема багатофазного генератора. Генератор, структурна схема якого приведена на рис. 6, а, формує монохроматичний сигнал в діапазоні частот $10 \div 100$ МГц. До його складу входять: автогенератор, що перестроюється в заданому діапазоні частот, з підсилювачем 1; розщеплювач фаз сигналу 2, що має чотири виходи, в яких амплітуди сигналів рівні, а фази відрізняються на 90° ; розщеплювач фаз сигналу 3, який має чотири входи і 8 виходів зі зміною фази між сусідніми виходами $\pi/4$; підсилювачі напруги і високочастотні високовольтні трансформатори $4^I \div 4^{IV}$. На рис. 6, б приведено схему розташування клем підключення електродів, номери яких відповідають номерам виходів генератора і зсувам фаз сигналів

живлення. Для корекції амплітуди і фаз напруг на електродах генератор має в своєму складі систему контролю і корекції вихідних сигналів, яка на рисунку не приведена.

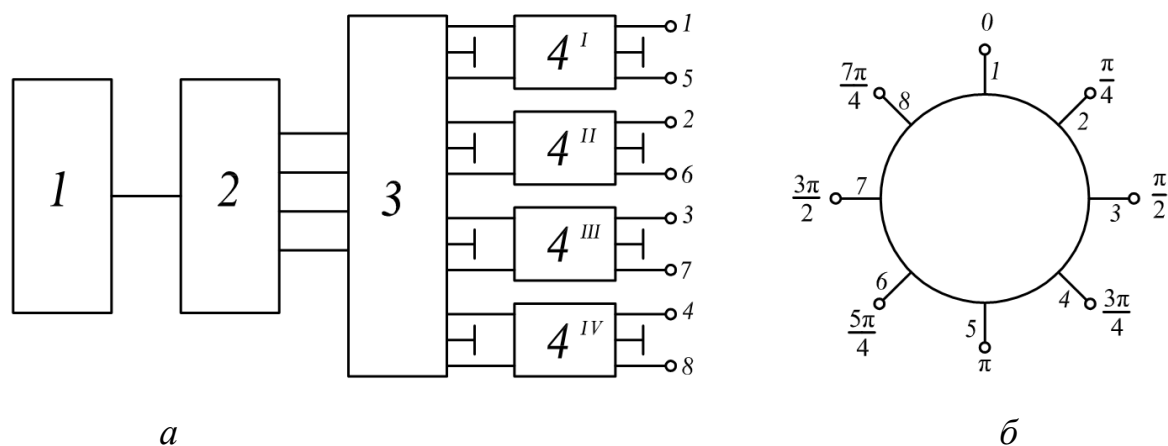


Рис. 6. Структурна схема 8-фазного генератора (а) та схема розташування електродів (б) з відповідністю їх номерів з номерами виходів генератора

Висновки

Задача спряження теорії інтегральних сингулярних рівнянь є ефективним засобом для аналізу розподілу напруженості електричного поля всередині простору, обмеженого багатозв'язною кільцевою границею, і дозволяє отримати точні аналітичні вирази для розрахунку розподілу електричного поля в межах електродної структури. Виконані розрахунки показали, що розмір зони однорідного поля всередині структури визначається розподілом фаз і амплітуд напруг на кожному електроді. При збудженні рівномірно розташованих електродів гармонічною напругою зі зсувом фази на кожному, що відповідає кутовому положенню електрода на колі; при кількості елементів структури 8, розмір зони однорідності становить 60% від діаметра структури. Збудження у такий спосіб електродної структури забезпечує рівномірне обертання поля.

Перелік посилань

1. Черепнев А. Использование импульсного электромагнитного излучения для обеззараживания зерновой смеси / А. Черепнев, И. Черепнев, Г. Ляшенко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. — 2008. — Вип. 2(17). — с.53-55.
2. Rajagopal V. Disinfestation of stored grain insects using microwave energy : a thesis for Degree of PhD / V. Rajagopal. — Manitoba, 2009. — 197 p.
3. Nelson S. O. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control // Trans. of the ASAE. — 1996. — Vol.39. — No.4. — pp. 1475-1484.
4. Зиньковский Ю. Ф. Задача сопряжения в расчётах напряженности и потенциала электрического поля кольцевой многосвязной структуры / Ю. Ф. Зиньковский, Ю. К. Сидорук, А. В. Голощапов // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2007. — Т.50, №5. — с. 76-80.
5. Зиньковский Ю. Ф. Напряженность электрического поля в области с кольцевой

многосвязной границей и равными длинами граничных дуг / Ю. Ф. Зиньковский, Ю. К. Сидорук, А. В. Голощапов // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2009. — Т. 52, №2. — с.14-22.

6. Зиньковский Ю. Ф. Управляемое электрическое поле в многосвязной кольцевой структуре / Ю. Ф. Зиньковский, Ю. К. Сидорук // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2012. — Т. 55, №6. — с. 45-56.

7. Лаврентьев М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. — СПб. : Лань, 2002. — 688 с.

8. Мухелишвили Н. И. Сингулярные интегральные уравнения: Граничные задачи теории функций и некоторые их приложения к математической физике. — М. : Наука, 1968. — 512 с.

9. Патент України 69812 А01С 1/00. Установка для сушіння зерна та інших сипучих матеріалів електромагнітним полем високої частоти / Сидорук Ю. К. ; заяв. 21.11.2011, опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

References

1. Cherepnev A.S., Cherepnev I.A. and Liashenko G.A. (2008) Usage of pulse electromagnetic radiation for a decontamination of a grain mix. *Scientific works of Kharkiv Air Force University*, Is. 2 (17), pp. 53-55. (in Russian)

2. Rajagopal V. (2009) *Disinfestation of stored grain insects using microwave energy*. A thesis for Degree of PhD, Department of Biosystems Engineering, University of Manitoba, Manitoba, 197 p.

3. Nelson, S. O. (1996). Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Transactions-American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 39, No 4, pp. 1475-1484.

4. Zin'kovskii Yu. F., Sidoruk Yu. K. and Goloshchapov A. V. (2007) The problem of conjugation in calculations of electric field strength and potential of a ring-shaped multiply connected structure. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol. 50, No. 5, pp. 284-287.

5. Zin'kovskii Yu. F., Sidoruk Yu. K. and Goloshchapov A. V. (2009) Electric field density in the region with circular multiply connected border and equal lengths of bounding arcs. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol. 52, No.2, pp. 63-69.

6. Zin'kovskii Yu. F. and Sidoruk Yu. K. (2012) Controlled electric field in multiply connected circular structure. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol. 55, No. 6. pp. 277-287.

7. Lavrent'ev M.A. and Shabat B.V. (2002) *Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo* [Methods of the theory of functions of a complex variable]. St. Peterburg, Lan' Publ. 688 p.

8. Muskhelishvili N.I. (1968) *Singulyarnye integral'nye uravneniya: Granichnye zadachi teorii funktsii i nekotorye ikh prilozheniya k matematicheskoi fizike* [Singular integral equations: boundary problems of function theory and their applications to mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 512 p.

9. Sydoruk Yu. K. (2012) *Ustanovka dlia sushinnia zerna ta inshykh sypuchykh materialiv elektromagnitnym polem vysokoi chastoty* [Installation for drying grain and other bulk materials by high frequency electromagnetic field] Patent UA 69812.

Зиньковський Ю. Ф., Сидорук Ю. К., Туровський А. О. Багатофазний високочастотний пристрій для дезінсекції і сушіння зерна. Виконано аналіз розподілу напруженості електричного поля всередині простору, обмеженого багатозв'язною кільцевою границею на основі теорії інтегральних сингулярних рівнянь у вигляді задачі спря-

ження. Наведено розрахункові формули для визначення напруженості електричного поля в активній зоні. Запропоновані структурна схема генератора для живлення електродів та принцип побудови установки для опромінення зерна та інших сипучих матеріалів електричним полем високої частоти.

Ключові слова: електричне поле, висока частота, інтегральні сингулярні рівняння, сушіння, дезінсекція.

Зиньковский Ю. Ф., Сидорук Ю. К., Туровский А. А. **Многофазное высокочастотное устройство для дезинсекции и сушки зерна.** Выполнен анализ распределения напряженности электрического поля внутри пространства, ограниченного многосвязной кольцевой границей на основе теории интегральных сингулярных уравнений в виде задачи сопряжения. Приведены расчетные формулы для определения напряженности электрического поля в активной зоне. Предложены структурная схема генератора для питания электродов и принцип построения установки для облучения зерна и других сыпучих материалов электрическим полем высокой частоты.

Ключевые слова: электрическое поле, высокая частота, интегральные сингулярные уравнения, сушка, дезинсекция.

Zinkovskiy Yu. F., Sydoryk Yu. K. and Turovskiy A. O. **Multiphase high frequency apparatus for disinfestation and drying of grain.**

Introduction. In order to reduce the field inhomogeneity caused by edge effects and capacitance of two parallel metal plate electrode system we have proposed a mathematical model of conductive multielectrode cylindrical system.

Analytical analysis techniques. According to the model the analysis of the distribution of the electric field inside the zone restricted with multiply connected circular boundary on the basis of the theory of singular integral equations in the form of conjugation problem is performed. The calculation of the electric field distribution is reduced to the consideration of partial problem where only one electrode possesses a non-zero voltage. It is shown that providing the harmonic feeding of the electrode system consisting of identically sized equally spaced arc-shaped electrodes with voltages of the same amplitudes and phases equal to the angular position of the electrode on the circle will ensure the feasibility of the rotating and homogeneous field in the area. The expressions for determination of the electric field strength in the area are given.

Results and discussion. It is shown that the size of the field homogeneity zone depends on the number of electrodes in such a way that increasing the number of elements causes the increasing of the zone size, and with the number of electrodes equal to 8 the diameter of the zone is equal to 60% of structure. It is proved that such an electrode system can be successfully applied for creating of apparatus for bulk materials irradiation. A schematic diagram of a generator for the electrodes supply and the principle of building of the apparatus for treatment of grain and other bulk materials with the electric field of high frequency are proposed.

Keywords: electric field, high frequency, integral singular equations, drying, disinfestation.