

## Koncepcja modelowania wyładowania pulsacyjnego pola elektrycznego (PEF) w produktach przemysłu rolno-spożywczego

**Streszczenie.** W ostatnich latach nastąpił znaczący wzrost badań nad możliwością wykorzystania różnych części widma elektromagnetycznego, do ogólnie pojętego przetwarzania i parametryzowania żywności. Jednym z takich rozwiązań jest możliwość oddziaływania Pulsacyjnym Polem Elektrycznym na surowce i produkty przemysłu rolno spożywczego. Istota metody umożliwia niszczenie błon komórkowych drobnoustrojów, przez co zwiększa się trwałość produktów poddawanych temu procesowi. W pracy scharakteryzowano zasady działania tej techniki w oparciu o wykorzystywany model fizyczny urządzenia do generacji impulsów elektrycznych w sokach. Z punktu widzenia możliwości planowania procesów technologicznych, istotnym czynnikiem jest efektywne modelowanie i analizowanych zjawisk. Na podstawie wykonanych badań, zaproponowano procedurę modelowania wyładowań występujących w cieczach.

**Abstract.** In recent years a significant increase of possibilities of different electromagnetic spectrum parts utility for treatment and parameterization of food was observed. One of the most promising and future technology is application of Pulsed Electric Field (PEF) on raw materials and products of wide known agri-food industry. Basic essence of this method is to microorganisms cell membranes destroying and, according to this phenomena, increment of durability of products that were treated in the process. In the article basic principles of PEF technique were presented, basing on physical model tests in juices used as the workpiece. In planning of technological processes point of view, a very important factor is possibility of effective modeling and simulation of electric arc distributions within liquid workpiece. Basing on performed tests, calculating procedure of electromagnetic field distribution and arc processing were proposed for liquid juices. (**Concept of Pulsed Electric Field discharge modeling for agri-food industry**).

**Słowa kluczowe:** pulsacyjne pole elektryczne (PEF), badania, symulacja.

**Keywords:** pulsed electric field (PEF), modeling, tests

### Wstęp

Surowce przemysłu spożywczego w większości przypadków są nietrwałe. Organizmy żywe, na skutek zachodzących procesów życiowych, powodują znaczące straty w procesie przechowywania żywności. W celu jej ochrony przed zepsuciem, wykorzystywane są zróżnicowane procesy utrwalania. Najbardziej rozpowszechnione są techniki chemiczne oraz cieplne. W obu przypadkach występują jednak istotne wady, powodujące zmiany w składzie chemicznym oraz parametrach organoleptycznych produktów poddawanych wspomnianym obróbkom. Alternatywą dla tych technik jest wykorzystanie oddziaływania wyładowań elektrycznych na produkty spożywcze. Proces ten pozwala jednocześnie na zachowanie wartości odżywczej, cech organoleptycznych oraz właściwego stanu higienicznego przetwarzanego produktu.

W celu sprawdzenia skuteczności tej metody, wykonano badania zawartości składników odżywczych takich jak: witamina C, polifenole oraz wartość opisującą aktywność antyoksydacyjną na soku jabłkowym, porównując sok nieutralizowany z trzema rodzajami tego produktu poddanym działaniu metody PEF w zakresach 200, 300 oraz 400 imp. Zawartość witaminy C pozostała nie niższa niż w soku nieutralizowanym. Porównanie zawartości polifenoli, odpowiedzialnych za działanie przeciwnowotworowe oraz korzystne dla układu krwionośnego, wykazało, że już po upływie 24h ilość tych związków w próbkach utrwalanych jest większa niż w nieutralizowanym soku. Taki sam wynik uzyskano zestawiając aktywność antyoksydacyjną soków, co oznacza że próbki poddane metodzie PEF zawierały większy potencjał do działań antyoksydacyjnych, co wpływa na wspomaganie naturalnych mechanizmów obronnych człowieka, ochronie przeciw nowotworom oraz chorobie niedokrwiennej serca.

Technologia PEF jest obecnie uważana za jedną z najbardziej obiecujących metod inaktywacji mikroorganizmów w żywności [1 ÷ 5]. Pola elektryczne w zakresie 5-50 kV/cm generowane przez zastosowanie

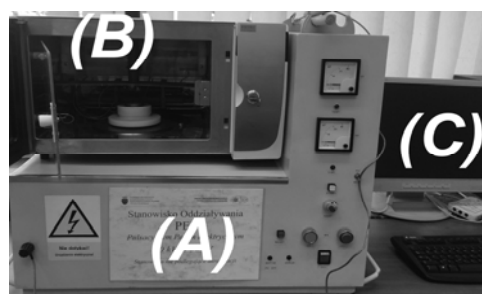
krótkich impulsów wysokiego napięcia pomiędzy dwoma elektrodami powoduje inaktywację drobnoustrojów w temperaturze dużo niższej, aniżeli stosowanej w klasycznej obróbce termicznej.

Dokładny mechanizm oddziaływania pola elektrycznego na inaktywowanie mikroorganizmów nie został jeszcze w pełni wyjaśniony i jest przedmiotem badań, niemniej jednak można stwierdzić, że głównym czynnikiem prowadzącym do redukcji liczby drobnoustrojów jest mikroporacja ich błony komórkowej.

W niniejszym artykule zaprezentowano podstawowe wyniki badań modelu urządzenia do generacji impulsowych wyładowań elektrycznych w środowiskach ciekłych. Z uwagi na zakładany rozwój tej technologii, zaproponowano wstępny algorytm umożliwiający modelowanie zjawisk zachodzących w urządzeniach tej klasy. Będzie on wykorzystywany podczas racjonalizacji konstrukcji nowych modeli.

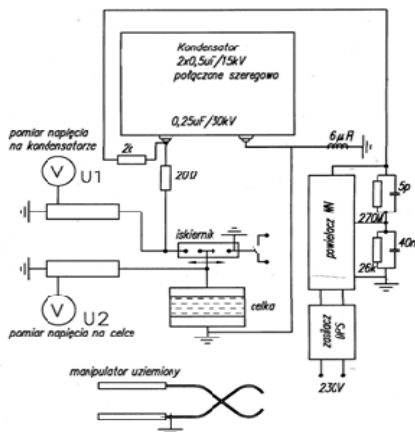
### Badania modelu urządzenia do oddziaływań PEF

Typowe urządzenie do oddziaływań PEF składa się z generatora impulsów wysokiego napięcia, komory roboczej oraz systemu kontroli. Widok przykładowego laboratoryjnego prototypowego stanowiska badawczego pokazano na rysunku 1.

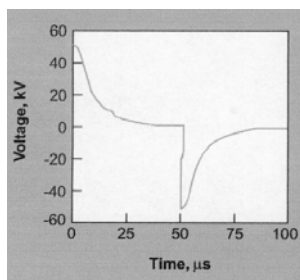


Rys. 1. Widok stanowiska badawczego. (A) - generator wysokiego napięcia, (B) - komora robocza, (C) - system nadzoru

Podstawową zasadą oddziaływania PEF jest stosowanie krótkich impulsów pól elektrycznych o wysokim natężeniu rzędu 10-80 kV/cm z czasem trwania od mikrosekund do milisekund. Proces jest oparty na oddziaływaniu elektrycznych impulsowych prądów dostarczanych do produktu wprowadzanego między zestaw elektrod. Dotychczas nie ustalono wpływu kształtu stosowanych impulsów, na intensywność procesu degradacji drobnoustrojów. W wykorzystywanym urządzeniu istnieje możliwość generacji impulsów o kształcie wykładniczym. Na rysunku 2 przedstawiono schemat elektryczny urządzenia a na rysunku 3 kształt impulsów generowanych w obciążeniu wodnym.



Rys. 2. Schemat układu elektrycznego do generowania impulsów PEF o kształcie „wykładniczym”

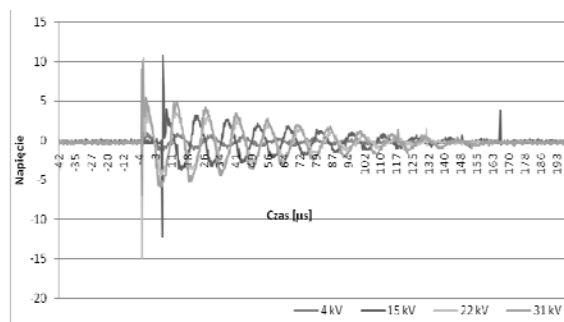


Rys. 3. Założony kształt bipolarnego impulsu typu „wykładniczego”

Do badania stanowiska laboratoryjnego do utrwalania żywności przy stosowaniu impulsów elektromagnetycznych wykorzystano analizator parametrów sieci AS3-mini wyposażony w trójfazowy oscyloskop do rejestracji przebiegów napięć i prądów. Na podstawie zgromadzonych wyników wyznaczono, że przeciętne zużycie energii na wytworzenie pojedynczego impulsu wynosi 65,6 mWh. W trakcie badań mierzono wartości z przedziału od 56,5 mWh do 71,3 mWh a wyznaczona wartość współczynnika zmienności wynosiła 6,9%. Możliwe jest zatem stwierdzenie, że metoda utrwalania żywności przy wykorzystaniu PEF jest energooszczędna. Przy założeniu maksymalnej energii w impulsie (71,3 mWh) oraz liczbie 400 impulsów, całkowita energia wykorzystana w procesie wynosi około 108 kJ. Nagrzanie tej samej objętości wody do temperatury charakterystycznej dla pasteryzacji wymaga dostarczenia ponad dwukrotnie wyższej energii.

W trakcie pomiarów parametrów wytwarzanego impulsu wysokiego napięcia zmieniano wartość napięcia początkowego w przedziale od 4 do 31 kV. Zarejestrowane przebiegi czasowe zestawiono na rysunku 4. Na zarejestrowanych przebiegach widoczny jest oscylacyjny przebieg zmian wartości napięcia generowanego impulsu.

Jego amplituda początkowa zależna jest od przyjętego napięcia wyzwalającego impuls. Czas, w którym oscylacje wygenerowanego impulsu były wytłumione dla wszystkich badanych impulsów wynosił ok. 150 – 160  $\mu$ s.

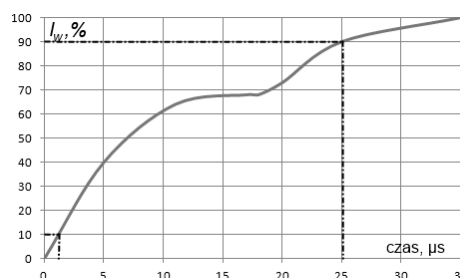


Rys. 4. Przebiegi czasowe zmian impulsu wysokiego napięcia w zależności od napięcia

Wykonane badania pozwoliły na określenie kształtu generowanych impulsów, wraz z wszystkimi charakterystycznymi wielkościami (amplitudy, czasu narastania i opadania). Zostały one wykorzystane do modelowania procesu wyładowania.

### Badania modelu urządzenia do oddziaływań PEF

Wieloletnie badania wyładowań w cieczach, zwłaszcza dielektrycznych, pozwoliły na opracowanie wielu teorii związanych z inicjacją i propagacją wyładowań w tych środowiskach [9 ÷ 11]. Tym niemniej, mechanizm jednoznacznie determinujący te zjawiska nie został opisany [12]. Wyładowanie pomiędzy elektrodami zanurzonymi w cieczy może występować w przypadku podania napięcia wyższego od tzw. napięcia inicjacji, zawierającego się w granicach 0,05 ÷ 5 MV/cm [12]. Inicjacja wyładowania następuje w wyniku generacji pęcherzyka gazowego, na skutek generacji ciepła Joule'a lub emisji polowej. W zależności od wartości napięcia stałego, możliwe jest rozwijanie się wyładowań "wolnych" (prędkość propagacji w granicach kilku km/s), lub szybkich (prędkość propagacji od kilkunastu do kilkudziesięciu km/s). Na podstawie wykonanych pomiarów przebiegów prądów i napięć w badanym urządzeniu (opisanych w poprzednim rozdziale), wyznaczono prędkość propagacji (rys. 5) wyładowania ma podstawie czasu narastania prądu.



Rys. 5. Pomiar czasu narastania prądu

Oszacowana szybkość propagacji wyładowania wynosiła 2,27 km/s, co pozwoliło na klasyfikację wyładowania jako "wolnego". W tych warunkach przyjmuje się, że wyładowanie jest skutkiem jonizacji w fazie gazowej wypełniającej kanał wyładowania [11, 12]. Fakt ten ma istotne znaczenie w zagadnieniach modelowania wyładowania.

Jak wspomniano powyżej, warunki wyładowania w sokach są determinowane wartością natężenia pola

elektrycznego, wielkością przerwy między elektrodami, ich kształtem, temperaturą oraz parametrami materiałowymi środowiska. Wymagane jest pojawienie się w obszarze wyładowania dostatecznej liczby elektronów i jonów. Proces ten prowadzi do powstania jednego lub większej liczby kanałów, z których jeden charakteryzuje się najmniejszą rezystancją, i to przez niego przepływa największa liczba elektronów [9, 11]. Rozpoczyna się wyładowanie wstęgowe, rozchodzące się od katody w kierunku anody. W chwili osiągnięcia przez wyładowanie obszaru anody, impedancja przerwy gwałtownie maleje, co prowadzi do istotnego wzrostu prądu w obszarze wyładowania. Faza ta, nazywana fazą przebiecia, charakteryzuje się występowaniem kanału o przekroju niemal cylindrycznym i czasie trwania zależnym od pojemności w układzie. Energia wyładowania może być prosto określona jako:

$$(1) \quad W = \frac{C}{2} (U_i^2 - U_f^2)$$

gdzie  $U_i$  - napięcie przed przebicciem,  $U_f$  - napięcie po przebicciu.

Faza przebiecia charakteryzuje się dość krótkim czasem, wysokim napięciem oraz znacznymi prądami. W tej fazie energia zgromadzona w pojemności układu zostaje przekazana do wyładowania. W trakcie przebiecia tworzy się kolumna plazmowa, w której osiągane są wysokie temperatury i ciśnienia. Kolumna rozszerza się, wywołując falę uderzeniową. Pojawia się plamka katodowa i wyładowanie przechodzi do fazy łukowej, trwającej mikrosekundy. Spadki napięć na elektrodach stanowią w tym stanie znaczący odsetek spadku napięcia w samej kolumnie łuku. Zwiększenie energii wyładowania łukowego nie prowadzi do zwiększenia jego temperatury, lecz rozmiarów kolumny łukowej.

Kolejną fazą wyładowania jest faza jarzeniowa, w której zanika plamka katodowa. Stopień jonizacji w tej fazie jest zdecydowanie niższy niż w przypadku fazy łukowej. Emisja elektronów następuje przede wszystkim na skutek bombardowania katody jonami dodatnimi.

Opisany proces przebiegu wyładowania pozwala na stwierdzenie złożoności zjawiska, co determinuje konieczność wykorzystywania zaawansowanych metod obliczeniowych. W niniejszej pracy zaproponowano uproszczoną procedurę modelowania wyładowania w sokach. Zgodnie z założeniami, wykonywane obliczenia powinny pozwolić na realizację następujących zadań:

- określenie przebiegu kanału wyładowania;
- określenie parametrów energetycznych wyładowania przy modelowaniu rzeczywistego źródła zasilania;
- określenie minimalnego czasu repetycji wyładowań, z uwzględnieniem dynamicznych warunków związanych z zanikaniem ładunku po wystąpieniu poprzedniego wyładowania.

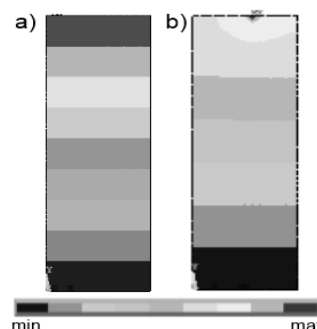
Wykorzystywanie znanych modeli statystycznych nie jest możliwe w analizowanej klasie zagadnień, ponieważ parametry materiałowe soków istotnie zmieniają się w funkcji temperatury oraz liczby wyładowań. Spotykane obliczenia dynamiczne opierają się zazwyczaj na wykorzystaniu uproszczonych modeli dwuwykładniczych lub modeli Heidlera (2) [5].

$$(2) \quad i(\tau) = \frac{I}{\eta_2} \cdot \frac{(\tau / N_1)^n}{1 + (\tau / N_1)^n} e^{-\frac{\tau}{N_2}}$$

gdzie:  $I$  - wartość szczytowa prądu wyładowania,  $N_1$ ,  $N_2$  - stałe czasowe czoła i grzbietu,  $\tau$  - czas,  $\eta_2$  - współczynnik korekcyjny wartości szczytowej

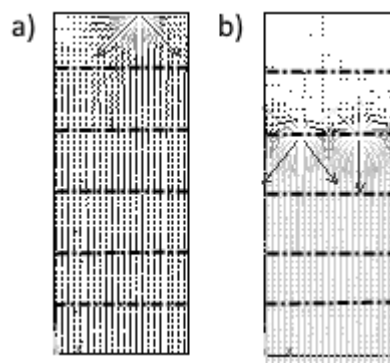
Wadą takich modeli jest konieczność stosowania zróżnicowanych współczynników, w zależności od parametrów wyładowania (prąd, napięcie, czas trwania). Dlatego procedura ich wykorzystania wymagałaby wykonanych uprzednio badań fizycznych. Nie jest to racjonalna droga. Tym bardziej, że wprowadzanie stałych współczynników nie pozwala na uwzględnienie przypadkowości w spotykanych rozwiązaniach i modelach.

W celu spełnienia opisanych wyżej wymagań, zaproponowano uproszczoną metodę obliczeniową wykorzystującą modelowanie polowe oraz obwodowe. W pierwszej kolejności, na podstawie podanej wartości napięcia pomiędzy elektrodami wykonywane są obliczenia statyczne przy wykorzystaniu oprogramowania typu MES (ANSYS). Na podstawie znajomości geometrii układu elektrod oraz parametrów środowiska, wyznaczany jest rozkład natężenia pola elektrycznego (rys. 6a). Na podstawie wyników dokonywane jest sprawdzenie, czy otrzymana wartość natężenia pola elektrycznego spełnia wymagania natężenia inicjacji wyładowania [12]. W przypadku spełnienia opisanego warunku, na jednej z elektrod generowany jest węzeł, do którego wprowadzane jest wymuszenie w postaci stałej wartości napięcia. Warunek ten odpowiada opisanemu procesowi inicjacji wyładowania z pęcherzyka gazowego (rys. 6b).



Rys. 6. Przykładowy rozkład potencjału w obszarze próbki

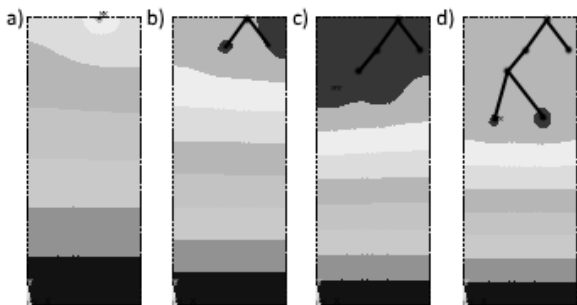
Wykonane cyklicznie obliczenia statyczne pozwalają na wyznaczenie gradientu potencjału. W procedurze obliczeniowej przyjęto, że wyładowanie może rozprzestrzeniać się w kierunkach największego spadku potencjału (rys. 7).



Rys. 7. Wektorowe rozkłady gradientu potencjału elektrycznego w różnych fazach (a, b) wyładowania wstęgowego

Proces propagacji wyładowania jest realizowany, w proponowanym uproszczonym algorytmie, poprzez podział obszaru między elektrodami na zadaną liczbę podobszarów zlokalizowanych w równych odstępach. Na kolejnych powierzchniach ograniczających podobszary wprowadzane

są kolejne wartości potencjałów (rys. 7). Jeżeli wartości gradientów w większej liczbie kierunków są zbliżone (rys. 7b), zastosowany jest generator liczb losowych, wprowadzający do obliczeń przypadkowość. Wartości potencjałów w kolejnych punktach węzłowych wyznaczone są na podstawie wartości gradientu oraz odległości pomiędzy poszczególnymi punktami (rys. 8).



Rys. 8. Przykładowy rozwój wyładowania wstęgowego (a – d)

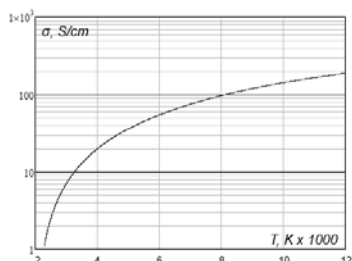
Po wykonaniu zadanej liczby cykli obliczeń wyznaczony zostaje kanał pomiędzy katodą i anodą. Od tej chwili rozpoczyna się faza przebiccia, połączona z przepływem prądu między elektrodami. Do obliczeń prądu i napięcia w dziedzinie czasu konieczne jest wyznaczenie konduktywności plazmy. Nośnikami ładunku są elektrony i cząstki zjonizowane. Konieczne jest wyznaczenie wpływu parametrów termodynamicznych (głównie temperatura i ciśnienie) na wartość konduktywności. Dla plazmy silnie zjonizowanej, wartość konduktywności może być wyznaczona na podstawie zależności (3), a dla plazmy słabo zjonizowanej na podstawie (4) [10].

$$(3) \quad \sigma_D = 0,591 \frac{(4\pi\epsilon)^2 (kT)^{3/2}}{e^2 m^{1/2}} \frac{1}{\ln \theta}$$

$$(4) \quad \sigma_M = 0,85 \frac{n_e \cdot e^4 (\pi m_e)^{1/2}}{m_e (8kT)^{1/2} \cdot n_o}$$

gdzie  $T$ - temperatura,  $k$ - stała Boltzmanna,  $m$ - masa cząstki,  $\theta$ - parametr Kulombowski,  $n_e$  - koncentracja elektronów,  $n_o$  - koncentracja cząstek obojętnych elektrycznie,  $e$  - elementarna energia

Przyjęto, że w omawianym układzie występuje plazma, w której gaz jest częściowo zjonizowany, co uwzględniono poprzez wprowadzanie uśrednionej wartości z zależności (3) i (4) [7]. Na rysunku 9 pokazano wartości konduktywności, w funkcji temperatury łuku. Widać, że wartości zmieniają się istotnie. Dlatego analizy wyładowania wymagają sprzężonych obliczeń analitycznych i cieplnych.



Rys. 9. Konduktywność plazmy w funkcji temperatury

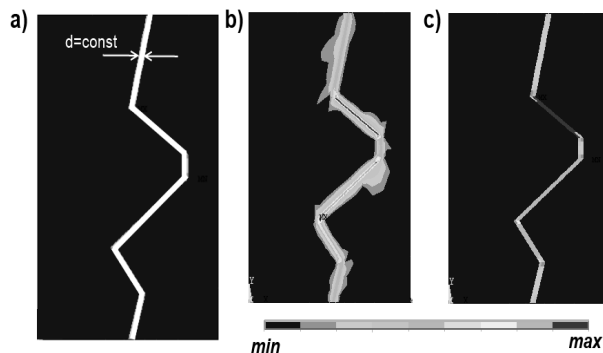
Dalsze analizy wymagają określenia przekroju kolumny łukowej. W przypadku łuku o przekroju kołowym, zależność na promień kolumny wyładowania może zostać określona jako [13]:

$$(5) \quad r_l = \left(\frac{2}{\pi^2}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{1}{\sigma \rho h}\right)^{1/4} \cdot \left(2g \frac{\rho_a}{\rho}\right)^{1/8} \cdot z^{1/8} \cdot I^{1/2} \text{gd}$$

zie:  $I$  - prąd,  $z$  - długość łuku,  $g$  - przyciąganie ziemski,  $h$  - entalpia właściwa plazmy łuku,  $\rho$  - gęstość plazmy łuku

Zależność (5), z uwagi na nieznaną prądu wyładowania, nie została wykorzystana w uproszczonej wersji algorytmu obliczeniowego. Na podstawie badań modelu fizycznego, przyjęto stały, uśredniony przekrój kolumny wyładowania. Założono, że średnica kolumny wyładowania wynosiła 0,6 mm.

Dysponując drogą przebiegu wyładowania oraz jego promieniem, plazma łuku zostaje wprowadzona do modelu w postaci modelu geometrycznego (rys. 10a). W tym stanie procesu symulacyjnego występują dwa środowiska: ciekłe (sok) oraz gazowe (plazma łuku). Wykonywane są obliczenia statyczne zagadnienia elektromagnetycznego, pozwalające na wyznaczenie prądu wyładowania (rys. 10b) oraz rozkładu i gęstości źródeł ciepła (rys. 10c). Do analiz stosowane jest źródło napięciowe. Tym niemniej, analizy statyczne wykonywane są cyklicznie, z częstością inkrementacji zależną od analiz cieplnych, omówionych w dalszych akapitach.



Rys. 10. geometria (a), rozkład gęstości prądów (b) i źródeł ciepła (c) modelu wyładowania łukowego

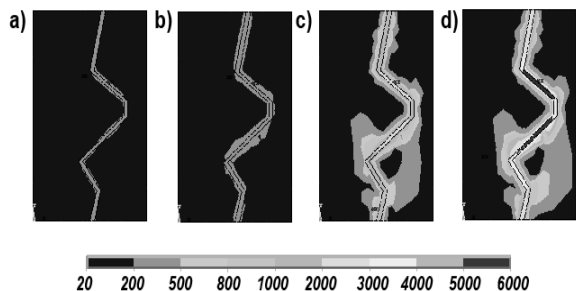
Na podstawie gęstości prądów przewodzenia ( $J$ ) oraz rozkładu źródeł ciepła ( $p_i$ ), możliwe jest wyznaczenie rezystancji łuku (6), stanowiącej podstawę do analiz współpracy obszaru wyładowania z stosowanym źródłem energii. Proponowana metoda polega na wyznaczeniu całkowitej mocy ( $P$ ) oraz prądu ( $I$ ) poprzez sumowanie tych wartości w poszczególnych elementach skończonych w modelu wyładowania ( $i=1 \dots N$ ).

$$(6) \quad R = \frac{P}{I^2} = \frac{\sum_{i=1}^N p_{Vi} \cdot V_i}{\left[\sum_{i=1}^N (J_i \cdot F_i)\right]^2}$$

Obliczenia cieplne wykonywane są w dziedzinie czasu, wykorzystując wyznaczone uprzednio źródła ciepła oraz warunki brzegowe charakterystyczne dla kondukcyjnego oraz konwekcyjnego przejmowania ciepła. W wykonanym przykładzie, rozkład temperatury w czasie 0 - 0,002 s został pokazany na rysunku 11.

Po wykonaniu obliczeń cieplnych konieczne jest dokonanie zmian parametrów materiałowych (przede wszystkim konduktywności plazmy) oraz napięcia zasilającego. W przypadku symulacji źródła napięcia przyjęto, że układ jest odbiornikiem RC. Znane wartości rezystancji łuku i pojemności (wartość przyjęta jako równa pojemności kondensatora źródła), umożliwiają wyznaczenie

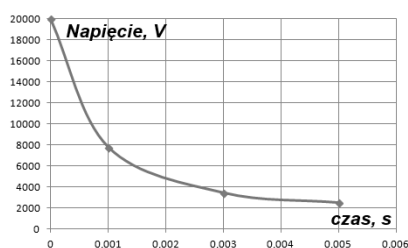
kolejnych napięć po wykonanych obliczeniach cieplnych (7). Na rysunku 12 pokazano przebieg napięcia wyładowania w czasie, wyznaczony na podstawie wykonanych analiz.



Rys. 11. Rozkład temperatury w próbce w kolejnych chwilach. a) 0,0001 s; b) 0,0005 s; c) 0,001 s; d) 0,002 s

$$(7) \quad U(\tau) = U_0 e^{-\frac{\tau}{RC}}$$

gdzie:  $U_0$  - napięcie początkowe,  $\tau$  - czas



Rys. 12. Przebieg napięcia w czasie symulowanego wyładowania

Wartość napięcia na elektrodach, po wykonanych obliczeniach cieplnych, wykorzystywana jest w charakterze wymuszenia w kolejnym cyklu statycznych obliczeń elektromagnetycznych. Stosowany algorytm może być wykonywany iteracyjnie, do osiągnięcia całkowitego rozładowania kondensatora.

### Podsumowanie

Wykorzystanie pulsacyjnego pola elektromagnetycznego może być z powodzeniem wykorzystywana do przedłużania trwałości produktów spożywczych, zwłaszcza cieczy. Z uwagi na komplikację opisu matematycznego procesu generacji i propagacji wyładowań w tych środowiskach, rozwój tej technologii związany jest z badaniami modeli fizycznych. Badania takie wymagają znacznych nakładów finansowych oraz są czasochłonne. Dlatego też, w pracy zaproponowano uproszczony model wyładowania impulsowego w środowiskach ciekłych. Wyniki modelowania takiego procesu powinny w znaczący sposób ułatwić procedury badań fizycznych, poprzez możliwość doboru urządzeń gwarantujących generację impulsów o pożądanych parametrach. Zaproponowany model i procedura obliczeniowa pozwalają na symulację procesu rozwoju wyładowania oraz wyznaczanie chwilowych wartości prądów i napięć w kolumnie łuku. Umożliwia to dobór kondensatorów oraz napięć w generatorach impulsów. Wykonywane analizy cieplne pozwalają na uwzględnienie zmiennych parametrów środowiska oraz wyznaczanie temperatur w kolumnie wyładowania. Z uwagi na impulsowe działanie urządzeń PEF, obliczenia te pozwalają też na analizę procesu chłodzenia obszaru roboczego, co umożliwia określenie wymaganej przerwy między impulsami.

Proponowany model jest uproszczony i wymaga dalszych prac, pozwalających na automatyczny dobór wymiarów kolumny łukowej, uwzględnienie energii

pobieranej ze źródła podczas rozwoju wyładowania oraz uwzględnienie wszystkich dynamicznych zjawisk występujących w generowanych wyładowaniach. Tym niemniej, zaproponowany algorytm obliczeniowy, łącznie z modelami, są uniwersalne i umożliwiają symulację wszystkich faz procesu wyładowania. Przewiduje się dalszy rozwój modeli opartych o opisaną w referacie procedurę obliczeniową.

**Autorzy:** dr inż. Marcin Wesołowski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [marcin.wesolowski@jen.pw.edu.pl](mailto:marcin.wesolowski@jen.pw.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Jarosław Gocławski, Joanna Sekulka-Nalewajko, Ewa Korzeniewska, Agnieszka Piekarska, "The use of optical coherence tomography for the evaluation of textural changes of grapes exposed to pulsed electric field", *Computers and Electronics in Agriculture*, COMPUTERS AND ELECTRONICS IN AGRICULTURE Volume: 142 Pages: 29-40, Part: A Published: NOV 2017
- [2] Oziembłowski M., Drózd T., Wrona P.; „Oddziaływanie Pulsacyjnych Pól Elektrycznych (PEF) na mikroorganizmy w kontekście technologii żywności”, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, NR 12/2013, STRONA 222-226
- [3] Oziembłowski M., Drózd T., Kurytnik I., Bobak L.: "Effect of pulsed electric field strength and number of pulses on fatty acid profile of liquid whole egg" *Browse Conference Publications > ELEKTRO*, 2014, Strona 678 – 682, Print ISBN:978-1-4799-3720-2,
- [4] Maciej OZIEMBLÓWSKI, Tomasz DRÓZDZ, Piotr NAWARA, Krzysztof NĘCKA, Stanisław LIS, Paweł KIELBASA, Marcin TOMASIK, Marek OSTAFIN: „Synergiczne oddziaływanie Pulsacyjnych Pól Elektrycznych (PEF) oraz innych metod na płynne produkty spożywcze” *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, NR 12/2016, STRONA 121-125
- [5] Maciej Oziembłowski, Magdalena Drózd, Paweł Kielbasa, Tomasz Drózd, Maciej Gliński, Piotr Nawara, Marek Ostafin., "Impact of pulsed electric field on the quality of unpasteurized beer," *2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, Koscielisko, Poland, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/PAEE.2017.8009011
- [6] Monfort S., Saldaña G., Condón S., Raso J., Álvarez I., Inactivation of *Salmonella* spp. in liquid whole egg using pulsed electric fields, heat, and additives, *Food Microbiology*, 30 (2012), 393-399
- [7] Monfort S., Gayán E., Condón S., Raso J., Álvarez I., Design of a combined process for the inactivation of *Salmonella* Enteritidis in liquid whole egg at 55 °C, *International Journal of Food Microbiology* 145 (2011), 476–482
- [8] Puertolas E., Lopez N., Condon S., Alvarez I., and Raso J., Potential applications of PEF to improve red wine quality, *Trends in Food Science & Technology*, 21 (2010), 247-255
- [9] Hebner R.E., Measurement of electrical breakdown in liquids, *NATO ASI series*, Vol. B193, (1988) [2] Lesaint O., Massala G., Positive streamer propagation in large oil gaps: Experimental characterization of propagation mode, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 5 (1998), n.3, 360-370 [3] [3] Beroual A. i inni, Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 14 (1998), n.2, 6-17
- [10] Różga P.: Wyładowania elektryczne w układzie elektrod ostrze-izolowana płyta w wybranych cieczach dielektrycznych przy wysokim napięciu udarowym piorunowym, *Przegląd Elektrotechniczny* ISSN 0033-2097, R. 92 NR 10/2016, pp. 151 - 154
- [11] Walczak J., Pacholski K., Kowalczyk R.: WYBRANE MODELE MATEMATYCZNE UDARU PIORUNOWEGO, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, ISSN 2353-1290, Nr 55/2017
- [12] Qin J., Pasko V. P.: On the propagation of streamers in electrical discharges, *Journal of Physics D: Applied Physics* no 47 (2014)
- [13] Wciślik M.: Analityczne modele łuku elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 84 NR 7/2008