Mikołaj SKOWRON, Agnieszka WANTUCH

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

doi:10.15199/48.2020.02.30

Nowe technologie utrwalania żywności – badania modelowe

Streszczenie. *Pulsacyjne pole elektromagnetyczne (PEF) o wysokim natężeniu jest stosunkowo nową, nietermiczną technologią konserwacji żywności. Opiera się ona na wykorzystaniu pól elektrycznych do eliminowania patogenów i kontrolowania mikroorganizmów powodujących psucie się żywności. Podstawową zaletą tej technologii jest zdolność do przedłużania okresu trwałości produktów spożywczych bez wykorzystania ciepła. Dzięki temu możliwe jest zachowanie odpowiedniej jakości oraz wartości odżywczych i smakowych.*
W artykule przedstawiono technologię PEF, możliwości jej zastosowania oraz badania modelowe.

Abstract*. High intensity pulsed electromagnetic field (PEF) is a relatively new, non-thermal food preservation technology. It is based on the use of electric fields to eliminate pathogens and control food spoilage microorganisms. The main advantage of this technology is the ability to extend the shelf life of food products without using heat. Thanks to this, it is possible to preserve the right quality as well as nutritional and taste values. The article presents PEF technology, the possibilities of its application and model research. (****New food preservation technologies - model research****).*

Słowa kluczowe: pulsacyjne pole elektromagnetyczne (PEF), utrwalanie żywności, elektroporacja.
Keywords: pulsed electromagnetic field (PEF), food preservation, electroporation.

Wstęp

Żywność jest źródłem składników odżywczych, niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania organizmu człowieka, ale z tych samych składników korzystają również drobnoustroje. Zanieczyszczenie pożywienia drobnoustrojami chorobotwórczymi, które powodują zatrucia pokarmowe zagraża zdrowiu, a nawet życiu człowieka [1]. Patogeny w żywności to najczęściej bakterie, wirusy i grzyby, a także toksyny produkowane przez pewne rodzaje bakterii i pleśni. By móc przechowywać żywność w niezmienionym stanie przez dłuższy okres, konieczne jest jej konserwowanie, czyli stosowanie metod mających na celu przedłużenie jej trwałości oraz zabezpieczenie jej przed niekorzystnym wpływem czynników fizycznych (takich jak temperatura, światło), chemicznych (utlenianie), czy biologicznych (rozwój mikroorganizmów).

Procesy nietermiczne (ciśnieniowe, ultradźwiękowe, PEF i inne) zyskały w ostatnich latach na znaczeniu ze względu na wzrost popytu na żywność o wysokiej wartości odżywczej i właściwościach zbliżonych do świeżych produktów, stanowiąc alternatywę dla żywności konserwowanej termicznie.

Konserwacja żywności technologią wykorzystującą pulsacyjne pole elektryczne opiera się na jego zdolności do przebijania błon komórkowych, powodując tym samym zabijanie mikroorganizmów. Produkt umieszcza się w komorze obróbki, pomiędzy dwiema elektrodami i poddaje oddziaływaniu impulsów elektrycznych o wysokim natężeniu, rzędu 10 do 80 kV/cm [2, 3]. Są to impulsy krótkotrwałe, powodujące przepływ prądu przez czas rzędu kilku mikro- lub milisekund. Wysokie pole elektryczne doprowadza do inaktywacji mikroorganizmów, impulsy powodują powstanie porów w ich błonie komórkowej, a dzięki tak krótkim czasie trwania impulsu żywność nie ulega podgrzaniu [3], przez co PEF wpływa na zwartość witamin w konserwowanej żywności w znacznie mniejszym stopniu niż procesy termiczne.

Skuteczne próby stosowania technologii PEF na poziomie laboratoryjnym do produktów płynnych, takich jak soki owocowe, mleko i produkty mleczne, produkty jajeczne i inne płynne produkty żywnościowe, wskazują na jej duży potencjał w przetwórstwie spożywczym [4, 5].

Elektroporacja

Elektropolacja jest procesem poddawania materiału biologicznego impulsom pola elektrycznego, przez co zwiększania przepuszczalności błon komórkowych na skutek powstawania w nich otworów [6]. Obecność porów umożliwia swobodny transfer przez błonę różnych składników (jonów, cząstek, czy bardziej złożonych związków) do wnętrza komórki. Średnica porów, zależnie od zadanych parametrów, może się zawierać w przedziale od 1 do 10 nm.

Zjawisko to może mieć charakter odwracalny lub nieodwracalny, zależnie od natężenia pola elektrycznego, liczby impulsów, czasu ich trwania, rodzaju sygnału, jak również właściwości materiału poddawanego działaniu pola. W zależności od tych parametrów PEF daje możliwość wpływania na procesy przetwórstwa żywności, na zachowanie wartości odżywczych produktów [7]. Elektropolacja odwracalna ułatwia także suszenie (przyspiesza usuwanie wody), tłoczenie, zamrażanie, ekstrakcję. Dodatkowo produkty poddane wstępnej obróbce za pomocą PEF cechują się większą obecnością składników odżywczych, jak witamina C, karotenoidy, związki mineralne. Elektropolacja nieodwracalna [8], prowadząca do całkowitego zniszczenia komórek, stosowana może być m.in. w procesie zimnej pasteryzacji.

Wielkość i kształt mikroorganizmów określają wymagane natężenie zewnętrznego pola elektrycznego konieczne do spowodowania zakłócenia błony komórkowej. Krytyczne natężenie pola elektrycznego (E_c), które powoduje elektroporację nieodwracalną obliczamy ze wzoru:

$$E_C = \frac{V_C}{f_k \cdot r} \tag{1}$$

gdzie: E_c – natężenie krytyczne [kV/cm], V_c – napięcie krytyczne [V], f_k – współczynnik kształtu komórki (f = 1,5 dla mikroorganizmów o kształcie kulistym), r – promień komórki [μm].

Wartość natężenia krytycznego dla komórek roślinnych wynosi 1 - 3 kV/cm (przy rozmiarze komórek 40 – 200 μm), a dla drobnoustrojów 12 – 50 kV/cm (dla rozmiaru komórek 1 – 10 μm) [9].

Dla mikroorganizmów o kształcie wydłużonym współczynnik f można obliczyć ze wzoru [10]:

$$f = \frac{L}{L - d/3} \tag{2}$$

gdzie L – długość, d – średnica komórki w m.

Powyższe równania pokazują, że zewnętrzne pole elektryczne indukuje wyższe potencjały transbłonowe w większych komórkach.

Oddziaływanie PEF

Technologia PEF została przebadana przez wielu naukowców w szerokim zakresie płynnych produktów spożywczych [11-13]. Pomimo, iż jest ona uważana za obróbkę nietermiczną, to zastosowanie pól elektrycznych o wysokiej amplitudzie napięcia może spowodować wzrost temperatury w poddanym przetworzeniu produkcie dzięki efektowi omowego ogrzewania Joule'a. Szybkość objętościowego wytwarzania ciepła w żywności podczas impulsów zależy od przewodności elektrycznej produktu spożywczego i zastosowanego natężenia pola elektrycznego [14]. Aby uniknąć nadmiernego wzrostu temperatury produktu podczas procesu, należy stosować impulsy o krótkim czasie trwania i niskiej częstotliwości powtarzania. Może to jednak prowadzić do mniej skutecznego działania.

Efektywność oddziaływań PEF zależy od wielu zmiennych. Jednym z najważniejszych parametrów jest natężenie pola elektrycznego.

Gęstości mocy *p* wymagane do zastosowania natężenia pola *E* w materiale z przewodnością σ przedstawia zależność:

$$p = \sigma E^2 \tag{3}$$

By móc porównać oddziaływaniami PEF na produkty w przepływie oraz te nie będące w przepływie można obliczyć średnią liczbę impulsów na jednostkę objętości *PPV* w odniesieniu do produktów w przepływie wykorzystując równanie [12]:

$$PPV = \frac{n \cdot f \cdot V}{v} \tag{4}$$

gdzie: *PPV* – średnia liczba impulsów na jednostkę objętości, *n* – liczba komór oddziaływań PEF, *f* – częstotliwość impulsów PEF [Hz], *V* – objętość komory oddziaływań [ml], *v* – przepływ produktu [ml/s].

Powyżej przytoczono wybrane zależności związane z PEF. Złożoność wzorów i trudności obliczeń wzrasta z liczbą zmiennych.

Istotne czynniki w technologii PEF

Efektywność technologii PEF, jako procesu inaktywacji drobnoustrojów, zależy od kilku czynników związanych z rodzajem wykorzystywanych urządzeń, m.in. takich jak ustawienie parametrów obróbki, rodzaj przetwarzanego produktu i występujące mikroorganizmy.

Czynniki techniczne, które zwykle określają charakterystykę urządzenia, można modyfikować i ustawiać zgodnie z odpowiednimi danymi, aby zapewnić wymaganą obróbkę. Jednak niektóre dane są od siebie zależne, dlatego nie można ich zmieniać, bez modyfikacji pozostałych, z nimi powiązanych. Istotne są także ograniczenia narzucone przez wewnętrzne czynniki produktu lub procesu.

Natężenie pola elektrycznego uważane jest za czynnik najistotniejszy przy dezaktywacji drobnoustrojów w technologii PEF.

Pole elektryczne w dowolnym punkcie przestrzeni jest scharakteryzowane przez wektor natężenia pola elektrycznego **E**, równy stosunkowi siły **F**, działającej na nieruchomy punktowy ładunek elektryczny *q*, umieszczony w tym punkcie, do wartości tego ładunku (3):

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \tag{5}$$

Wynika stąd, że poprzez przyłożenie napięcia do dwóch punktów oddzielonych materiałem dielektrycznym, w obszarze pomiędzy punktami przyłożenia powstaje pole elektryczne o natężeniu *E* bezpośrednio proporcjonalnym do różnicy potencjałów *U* i odwrotnie proporcjonalnym do odległości między punktami zastosowania *d*, jak przedstawiono w równaniu (6):

$$E = \frac{U}{d} \tag{6}$$

gdzie: *E* – natężenie pola elektrycznego [kV/cm], *U* – przyłożone napięcie [V]; *d* – odległość między elektrodami [cm].

Jako ogólne wyrażenie do opisania generowanego pola elektrycznego można następnie zastosować równanie Laplace'a, gdzie φ oznacza potencjał elektryczny:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \tag{7}$$

Każdą żywą komórkę charakteryzuje potencjał transmembranowy, gdzie w stanie spoczynku cytoplazmatyczna strona błony jest naładowana negatywnie i może przyjąć wartości od -50 do -200 mV [18]. Krytyczne natężenie pola elektrycznego odpowiada takiemu natężeniu pola zewnętrznego, które jest zdolne do indukowania potencjału błonowego wynoszącego około 1 V, co stanowi próg dla rozerwania błony komórki. Potencjałem błonowym nazywamy różnicę potencjałów pomiędzy wnętrzem komórki i jej otoczeniem ($V_m = V_w - V_z$) [14]. Aby obróbka była skuteczna, natężenie pola elektrycznego musi być utrzymywane na możliwie najniższym poziomie. Jego wysoka wartość może spowodować dielektryczny rozpad cieczy, lub inne niepożądane reakcje.

Częstotliwość aplikowanego pola elektrycznego mieści się w przedziale 1 do 1000 Hz. Zdarzają się jednak procesy, w których może ona wynosić ponad 1000 Hz [8].
Kolejnym istotnym czynnikiem jest czas przetwarzania. Wykorzystuje się krótkie impulsy, aby nie doprowadzić do nagrzewania się produktu. Całkowity czas obróbki jest określony przez iloczyn szerokości impulsu i liczbę ich stosowania. Stwierdzono, iż najlepsze wyniki inaktywacji drobnoustrojów dają impulsy pomiędzy 1 a 5 μs [17]. W błonach bakterii tworzą się pory, które przy osiągnięciu krytycznej średnicy nie są możliwe do naprawienia i powodują śmierć komórek, zwiększając skuteczność konserwacji.

Wpływ na działanie PEF ma także kształt impulsu. Praktyczne znaczenie w omawianej technologii mają impulsy wykładnicze zanikające, fale prostokątne, bipolarne lub impulsy oscylacyjne [3]. Liczba impulsów zależy m.ni. od charakterystyki stosowanego urządzenia i cech surowca. Zastosowana energia zależy od natężenia pola elektrycznego, konstrukcji komory przetwarzania, przewodności produktu oraz czasu obróbki.

Skuteczność inaktywacji metodą PEF zależy również od czynników biologicznych, czyli indywidualnych cechy mikroorganizmów. Podatność na inaktywację przez PEF zależy od rodzaju, gatunku, kształtu, rozmiaru, czy stanu fizjologicznego mikroorganizmu.

Elektryczny model komórki

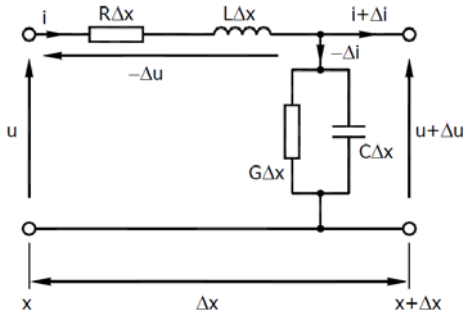
Produkt żywnościowy poddawany jest oddziaływaniu impulsów elektrycznych o wysokim natężeniu, czyli dochodzi do wyładowania elektrycznego. Wyładowanie udarowe można potraktować, jako rozchodzącą się w komórkach falę elektromagnetyczną. Ilość energii przenoszonej przez falę elektromagnetyczna określa wektor Poytinga [19]:

(8) $$S = \frac{1}{\mu}(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$$

Fala elektromagnetyczna składa się z dwóch wzajemnie prostopadłych składowych: elektrycznej i magnetycznej. Biorąc pod uwagę to, że produkty spożywcze są przewodnikami, dominującą w tym wypadku będzie składowa elektryczna. Ponad to np. soki są przewodnikami jonowymi, w których przypływ prądu związany jest z transportem masy, co powoduje zmiany fizyczne w przewodniku.

Jednym z efektów rozchodzeniem się fali elektromagnetycznej jest efekt termiczny, spowodowany tym, że podczas ekspozycji komórek, część energii zostaje pochłonięta i zamieniona na ciepło. Zbyt duże podwyższenie temperatury komórek produktu powoduje utratę cennych własności odżywczych, co należy to brać pod uwagę podczas procesu utrwalania.

Biorąc pod uwagę czasy trwania impulsów elektrycznych wykorzystywanych w technologii PEF można założyć, że w komórkach będą zachodzić efekty falowe, podobnie jak w linii długiej (rys. 1).



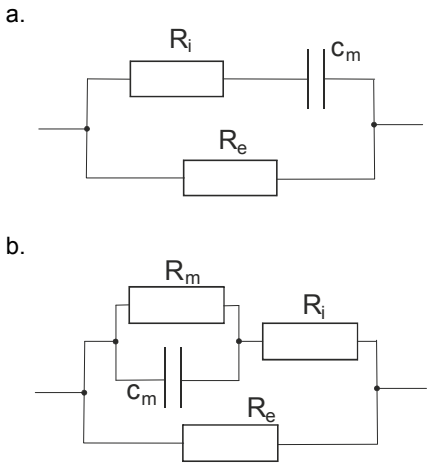
Rys.1. Model odcinka linii długiej [20]

Konieczność uwzględnienia zjawisk falowych oznacza, że wartości prądów w danym punkcie układu są zarówno funkcją czasu jak i jego położenia geometrycznego.

(9) $$\lambda = v_f T$$

gdzie: λ – długość fali, v_f – prędkość rozchodzenia się fali. Przyjmując dla komórek $\varepsilon_r = 80$ i $\mu_r = 1$ oraz częstotliwość impulsów $f = 10^9$ otrzymujemy:

$$v = 3{,}35 \cdot 10^7 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}},\ \lambda = 3{,}35\ \mathrm{cm},\ X < 1{,}675 \div 8{,}375\ \mathrm{mm}$$



Rys.2. Elektryczny model komórki [21]

Dotychczasowe badania pozwoliły określić uproszczony model elektryczny produktów spożywczych, zamiast czwórnika (jak w modelu linii długiej) operując dwójnikiem, jak na rys. 2. Model ten składa się z rezystancji pozakomórkowej, rezystancji wewnątrz komórkowej, pojemności błony komórkowej oraz rezystancji membrany.

Impedancje komórki przed poddaniem wpływowi PEF możemy wyznaczyć na podstawie zależności [21]:

(10) $$Z_0 = R_0 + jX_0$$

$$R_0 = \frac{R_e\left(c_m^2\omega^2 R_i\left(R_e + R_i\right) + 1\right)}{c_m^2\omega^2\left(R_e + R_i\right)^2 + 1}$$

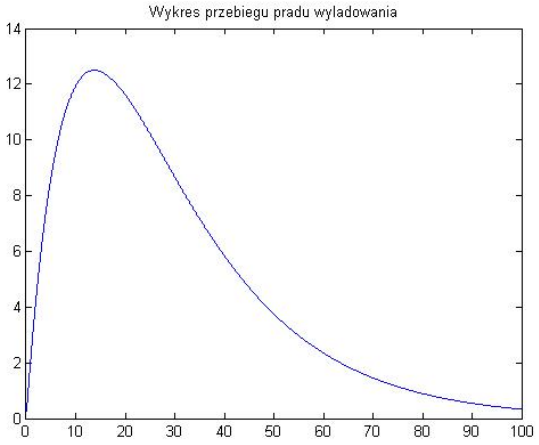
$$X_0 = \frac{-c_m\omega R_e^2}{c_m^2\omega^2\left(R_e + R_i\right)^2 + 1}$$

Natomiast dla komórki poddanej wpływowi PEF:

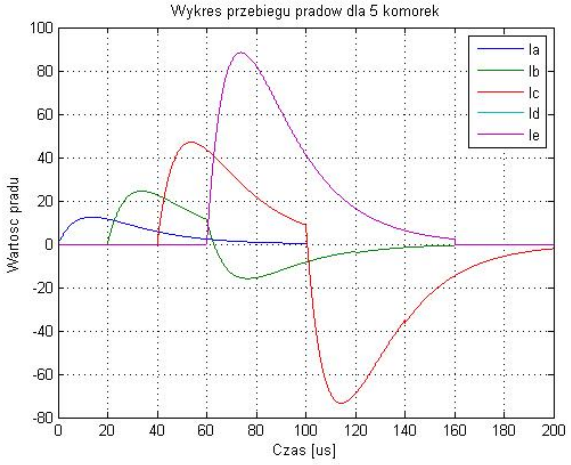
(11) $$Z_p = R_p + jX_p$$

$$R_p = \frac{c_{pm}^2\omega^2 R_m^2 R_i\left(R_e + R_i\right) + \left(R_i + R_m\right)\left(R_i + R_e + R_m\right)}{c_{pm}^2\omega^2 R_m^2\left(R_e + R_i\right)^2 + \left(R_i + R_e + R_m\right)^2}$$

$$X_p = \frac{-c_{pm}\omega R_m^2 R_e}{c_{pm}^2\omega^2 R_m^2\left(R_e + R_i\right)^2 + \left(R_i + R_e + R_m\right)^2}$$



Rys.3. Wykres prądu wyładowania



Rys.4. Przykład prawidłowo wykonanego wykresu

W celu sprawdzenia skutków efektu falowego wykonano obliczenia numeryczne dla układu składającego się z pięciu elementów połączonych szeregowo (wszystkie o takiej samej impedancji) z czterema punktami nieciągłości. Badany układ został poddany oddziaływaniu uproszczonego przebiegu wyładowania udarowego (rys. 3). Na rys. 4 przedstawiono wykres przebiegu wartości prądu przepływającego przez badany model. Można na nim zaobserwować zwielokrotnienie wartości maksymalnej prądu płynącego przez badany układ. Można tu zaobserwować zwielokrotnienie wartości maksymalnej prądu płynącego przez badany układ. Dla każdego punktu nieciągłości zachowany został kształt przebiegu prądu.

Podsumowanie

Technologia PEF ma szerokie zastosowanie w przemyśle spożywczym, jak utrwalanie w niskich temperaturach żywności płynnej (inaktywacja mikroorganizmów), przyspieszenie ekstrakcji soków komórkowych, przyspieszenie usuwania wody, modyfikacja aktywności enzymów, utrwalanie stałej i półstałej żywności, odkażanie płynnych odpadów, modyfikacja właściwości funkcjonalnych składników żywności [5]. Pozwala także obniżyć koszty przetwarzania żywności oraz jest przyjazna środowisku. Żywność przetworzona z wykorzystaniem PEF zachowuje wyższą wartość odżywczą w porównaniu do produktów przetwarzanych termicznie.

Ze względu na to, iż czasy trwania impulsów w technologii PEF, rzędu nanosekund, nie powinno się pominąć zachodzących w komórkach zmian spowodowanych przez efekt falowy. Rozchodzące się w komórkach wyładowanie można potraktować jako falę elektromagnetyczną. Wyniki obliczeń pokazały zwielokrotnienie wartości prądów płynących w badanej próbce, co wiąże się to z ilością energii przekazywanej do utrwalanej żywności. Przekazanie jej zbyt dużo może doprowadzić do za wysokiego podniesienia temperatury komórek, co w konsekwencji może doprowadzić do utraty własności odżywczych oraz walorów sokowo-zapachowych produktu.

Subwencja 16.16.120.773

***Autorzy**: dr. inż. Mikołaj Skowron, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: mskowron@agh.edu.pl; dr inż. Agnieszka Wantuch, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: awantuch@agh.edu.pl.*

LITERATURA

[1] Kordala N., Bednarski W., Lewandowska M., Nanotechnologia w doskonaleniu oceny mikrobiologicznej jakości żywności, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, (2016), nr 586, 45–57

[2] Syed Q.A., Ishaq A., Rahman U.U., Aslam S., Shukat R., Pulsed electric field technology in food preservation: a review, *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, (2017), vol. 6, 168-172

[3] Maged E.A. Mohamed, Ayman H. Amer Eissa, Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology, Structure and Function of Food Engineering, (2012), 275-306

[4] Bermúdez-Aguirre D., Mawson R., Versteeg K., Barbosa-Cánovas G.V., Composition parameters, physical chemical characteristics and shelf-life of whole milk after thermal and thermo-sonication treatments. *Journal of Food Quality*, (2009), 32, 283–302

[5] Ade-Omowaye B.I.0., Taiwo K, Knorr D., Use of pulsed electric field pretreatment to improve dehydration characteristics of plant based foods, *Trends Food Sci. Technol.*, (2002), n.12, 285-295

[6] //www.jagiellonskiecentruminnowacji.pl/images/Files/Broszura_dla_producentow_zywnosci_F.pdf, 26.09.2019

[7] Nowacka M., Nowoczesne operacje wstępne w technologii żywności, Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydz. Nauk o Żywności SGGW w Warszawie, (2012)

[8] Wiktor A., Wiatrowa-Rajchert D., Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego do wspomagania procesów usuwania wody z tkanek roślinnych, *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 81, (2012), nr 2, 22 – 32

[9] Fellows P.J., Food Processing Technology – Principles and Practice, Woodhead Publishing Ltd., Abington (2000)

[10] Zimmerman U., Pilwat G., Riemann F., Dielectric breakdown on cell membranes. *Biophysical Journal*, (1974), n. 14, 881-899

[11] Barbosa-Canovas G.V., Zhang Q.H., Pulsed Electric Fields in Food Processing, Technomic Publishing Co., Inc., 2001

[12] Sitzmann W., Vorobiev E., Lebovka N., Applications of electricity and specifically pulsed electric fields in food processing: Historical backgrounds, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 37, Part C, (2016), 302-311

[13] Cserhalmi Zs., Sass-Kiss Á., Tóth-Markus M., Lechner N., Study of pulsed electric field treated citrus juices, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 7, (2006), 49-54

[14] Oziembłowski M., Dróżdż T., Wrona P., Oddziaływanie Pulsacyjnych Pól Elektrycznych (PEF) na mikroorganizmy w kontekście technologii żywności, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92, (2016), nr 12

[15] Koh Y., Modeling of Joule heating and thermoelectronic transport in thin film silicon for sjem measurement, University of Illinois at Urbana-Champaign, (2014)

[16] http://www.biofiz.umed.wroc.pl/dydaktyka/inne/bfstr61.html (26.09.2019)

[17] Barbosa-Canovas G., Tapia MS., Cano MP., Novel Food Processing Technologies, CRC Press, (2004)

[18] Król E., Autoreferat rozprawy habilitacyjnej, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Lublin (2015)

[19] Krupa S., Mitkowski S., Teoria pola, AGH, Kraków, (2002)

[20] Konspekt do ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotu „Technika cyfrowa" layer.ket.agh.edu.pl/maglay/wrona/pl/podstrony/dydaktyka/Technika_Cyfrowa/Linia_Dluga/LinDluga_teor.pdf

[21] Zelmat A., Hadi H., Amiali M., Gashovska T., Tilmatine A., Determination and analysis of the electrical components of a PEF treated equivalent circuit of potato tissue, *International Journal of Environmental Studies*, vol. 74, (2017), 262-274