

CECHY ELEKTRYCZNE ZIAREN PSZENICY

CECHY ELEKTRYCZNE ZIAREN PSZENICY

Deta Łuczycka



WROCŁAW 2009

Opiniodawca
prof. dr hab. inż. Wiktor Pietrzyk

Redaktor merytoryczny
prof. dr hab. inż. Zygmunt Owsiak

Opracowanie redakcyjne
mgr Elżbieta Winiarska-Grabosz

Korekta:
dr Ewa Jaworska
Janina Szydłowska

Łamanie i projekt okładki
Halina Sebzda

Monografie LXXIII

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2009

ISSN 1898–1151
ISBN 978–83–60574–70–6

WYDAWNICTWO UNIwersytetu PRZYRODniczego WE WROCLAWIU

Redaktor Naczelny – prof. dr hab. Andrzej Kotecki
ul. Sopocka 23, 50–344 Wrocław, tel. 071 328–12–77
e-mail: wyd@up.wroc.pl

Nakład 100 + 16 egz. Ark. wyd. 5,7. Ark. druk. 5,75
Druk i oprawa: EXPOL, P. Rybiński, J. Dąbek, Spółka Jawna
ul. Brzeska 4, 87–800 Włocławek

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	7
1. WSTĘP	9
2. PRZEGLĄD LITERATURY	11
2.1. Charakterystyka materiału badawczego	12
2.2. Właściwości elektryczne materiału biologicznego	13
3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO I CELU PRACY	22
4. ANALIZA TEORETYCZNA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNYCH WARSTWY ZIARNA	24
4.1. Przenikalność elektryczna ϵ	26
4.2. Współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$	28
4.3. Rezystywność i przewodność	30
4.4. Omówienie metod pomiarowych w przedziale częstotliwości 20 Hz – 100 kHz	30
5. METODYKA BADAŃ	35
5.1. Materiał badawczy	36
5.2. Metody pomiaru wielkości elektrycznych	37
5.3. Metody pomiaru wielkości geometrycznych i chemicznych ziarna pszenicy	39
5.4. Analiza niepewności wyników pomiarów	40
6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ	44
6.1. Wpływ częstotliwości pola elektromagnetycznego na cechy elektryczne ziarna ..	46
6.2. Wpływ wilgotności materiału badawczego na cechy elektryczne ziarna	49
6.3. Wpływ temperatury materiału badawczego na cechy elektryczne ziarna	52
6.4. Omówienie wyników badań	54
7. EMPIRYCZNE MODELOWANIE CECH ELEKTRYCZNYCH WARSTWY ZIARNIAKÓW PSZENICY	56
7.1. Empiryczny model cech elektrycznych ziarniaków pszenicy dla częstotliwości pola elektromagnetycznego $f= 100$ Hz	58

7.2. Empiryczny model cech elektrycznych ziarniaków pszenicy dla częstotliwości pola elektromagnetycznego $f = 1$ kHz.....	60
7.3. Empiryczny model cech elektrycznych ziarniaków pszenicy dla częstotliwości pola elektromagnetycznego f od 10 do 100 kHz.....	63
8. ZASTOSOWANIE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO ANALIZY CECH ELEKTRYCZNYCH WARSTWY ZIARNIAKÓW PSZENICY	66
8.1. Neuronowe sieci Kohonena	66
8.2. Zastosowanie wielowarstwowej sieci jednokierunkowej do szacowania właściwości elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy	68
8.3. Weryfikacja modelu cech elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy opartego na SSN	71
9. PODSUMOWANIE I DYSKUSJA NAD WYNIKAMI.....	79
10. WNIOSKI	82
PIŚMIENNICTWO.....	83

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- α – poziom istotności [-]
 γ – konduktywność dielektryka, S/m
 ε – przenikalność elektryczna, F/m
 ε_0 – przenikalność elektryczna próżni
 ε_r – względna przenikalność elektryczna [-]
 $\omega = 2\pi f$ – pulsacja, Hz
 a – grubość ziarna, mm
 a_w – aktywność wody [-]
 b – szerokość ziarna, mm
 Bi – zawartość białka w suchej masie, %
 c – długość ziarna, mm
 C_o – pojemność kondensatora próżniowego, F
 C_x – pojemność kondensatora rzeczywistego, F
 C_p – pojemność kondensatora w układzie równoległym, F
 C_s – pojemność kondensatora w układzie szeregowym, F
 E – natężenie pola elektromagnetycznego, V/m
 E_m – maksymalne natężenie pola elektromagnetycznego, V/m
 f – częstotliwość, Hz
 G – przewodność materiału, S
 Gl – zawartość glutenu w suchej masie, %
 I – natężenie prądu, A
 $j = \sqrt{-1}$ – jednostka urojona
 Lo – liczba opadania [-]
 Ls – liczba sedymentacji [-]
 Q – ładunek elektryczny, C
 Po – zawartość popiołu w suchej masie, %
 R – rezystancja, Ω
 R_p – rezystancja w układzie równoległym, Ω
 R_s – rezystancja w układzie szeregowym, Ω
 R^2 – współczynnik determinacji, %
 Sk – zawartość skrobi w suchej masie, %
 T – temperatura, $^{\circ}C$
 t – czas, s
 $tg \delta$ – współczynnik strat dielektrycznych [-]
 $Tł$ – zawartość tłuszczu w suchej masie, %
 U – napięcie, V
 V_z – objętość ziarna w przestrzeni międzyelektrodowej, mm^3
 w – wilgotność, %
 $Wł$ – zawartość włókna w suchej masie, %

1. WSTĘP

Ziarniaki zbóż należą do najczęściej badanych materiałów roślinnych. Ich cechy można rozpatrywać z różnego punktu widzenia, w zależności od przeznaczenia danego materiału:

- a) zewnętrzne (powierzchniowe),
- b) wewnętrzne (strukturalne, chemiczne, mechaniczne, elektryczne),
- c) biologiczne.

W ostatnich latach, w związku z rozwojem techniki i coraz szerszym zastosowaniem elektrotechnologii oraz automatyki, również w procesach produkcji rolnej i przetwórstwa rolno-spożywczego badane są właściwości elektryczne nasion (rezystancja, przenikalność elektryczna, tangens kąta stratności i inne). Pomimo to znajomość właściwości elektrycznych ziarniaków zbóż jest jeszcze niedostateczna. Wynika to między innymi z trudności metodycznych związanych ze zbyt małymi wymiarami geometrycznymi i zróżnicowanym kształtem, brakiem powtarzalności cech fizycznych itp.

Sz szczególnie interesujące wydają się możliwości bezpośredniego wykorzystania energii elektrycznej do obróbki nasion. Za pomocą pola elektromagnetycznego można powodować zmianę właściwości biologicznych materiału siewnego oraz powstałych z niego roślin [Pietruszewski 1998]. Ze względu na pionierski charakter prac w tym zakresie potrzebne są badania, które weryfikowałyby uzyskane wyniki oraz doprowadziłyby do poznania mechanizmów oddziaływań pól elektromagnetycznych na materiał siewny. Nie jest możliwe analizowanie wpływu pól elektromagnetycznych na materiał biologiczny, jeśli nie poznamy i nie opiszemy wcześniej zależności cech elektrycznych tego materiału od wpływających na nie czynników fizycznych i chemicznych.

Poszukuje się też sposobów ograniczania strat ilościowych i jakościowych w procesach suszarniczych. O ogromne znaczenie dla zmniejszania tych strat ma prawidłowo przeprowadzony proces dosuszania ziarna w procesie grzania dielektrycznego. Przenikalność i stratność elektryczna ziarniaków są głównymi parametrami określającymi pochłanianie energii w tym procesie [Pietrzyk i in. 1998]. Dokładne opisanie cech elektrycznych ziarna oraz czynników determinujących wspomniane właściwości elektryczne pozwoli na automatyzację pomiarów wilgotności w trakcie suszenia, a więc ograniczenie uszkodzeń materiału i optymalizację zużycia energii.

Wilgotność decydująca o zdolności przechowywania nasion wpływa w znacznym stopniu na przenikalność elektryczną, rezystywność oraz współczynnik strat dielektrycznych, ale nie jest to jedyny czynnik determinujący cechy elektryczne ziarna. Jego właściwości elektryczne związane są również z innymi czynnikami (np. temperatura, właściwości chemiczne, wymiary geometryczne ziarna). Uzyskiwane wyniki zależą również od samej metody pomiaru (pomiar pojedynczych ziaren, ziarna w masie, materiał rozdrobniony), a także układu i kształtu elektrod.

Produkowane obecnie mierniki mikroprocesorowe umożliwiają nie tylko pomiar w oparciu o sztywno założone charakterystyki, ale również wprowadzanie wielkości korekcyjnych dla badanego zboża. Konieczna jest jednak znajomość charakteru wielkości dielektrycznych polskich odmian zbóż, a nie ma tego typu opracowań.

Badania prowadzone w innych krajach mają na celu wyeliminowanie występujących znanych błędów zarówno w miernictwie (np. pomiar wilgotności zboża, naprężeń mechanicznych w złożu), jak i w szeroko pojętej elektrotechnologii materiałów pochodzenia biologicznego.

W Polsce, jak dotąd, zastosowanie elektrotechnologii w rolnictwie nie jest powszechne, a prowadzone badania w zakresie właściwości elektrycznych nasion są wrywkowe i nie pozwalają na całościowy opis problemu. Ich zakres ma często charakter przypadkowy. Stąd wynika celowość prowadzenia tego typu prac, które w konsekwencji doprowadziłyby do kompleksowego opracowania cech elektrycznych odmian zbóż rosnących w Polsce.

Pszenica uznawana jest za najbardziej wartościowe zboże ze względu na specyficzne właściwości technologiczne i żywieniowe. Globalna produkcja pszenicy wynosi około jednej trzeciej produkcji zbóż, a blisko 90% jej plonu stanowi podstawowy pokarm dla ludzi, pokrywając około 20% dziennego zapotrzebowania na energię, głównie w postaci chleba [Gąsiorowski 2003]. Najistotniejszy więc staje się problem opisu cech elektrycznych polskich odmian pszenicy.

Ze względu na pojawianie się nowych odmian celowym też wydaje się stworzenie takiego modelu matematycznego, który pozwoliłby na szacowanie cech elektrycznych warstwy ziarniaków na podstawie właściwości fizycznych i chemicznych charakterystycznych dla danej odmiany.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Nasiona roślin z punktu widzenia fizyki dielektryków należą do grupy dielektryków o słabej polaryzowalności [Basow i in. 1968, Dąbrowski i in. 1981, Szmigiel i Jusubolijew 1984, Landau i Lifszyc 1960, Nelson i Stetson 1976]. Ziarno w masie, zgodnie z tym, co twierdzą Torosjan i Konochowa [1972], jest skomplikowanym dielektrykiem, ponieważ jest niejednorodne zarówno w samej budowie ziarniaka, jak i w przestrzeni międzyelektrodowej.

Badania cech elektrycznych i dielektrycznych materiałów pochodzenia biologicznego można podzielić na:

- badania nad zależnościami między właściwościami elektrycznymi materiału a wybranymi cechami fizycznymi oraz chemicznymi,
- badania zmian biofizycznych, biochemicznych i mikrostrukturalnych zachodzących w komórkach i tkankach pod wpływem pól elektrycznych i magnetycznych pozwalające na określenie możliwości i optymalnych parametrów stymulacji wzrostu i rozwoju roślin.

Na proces elektroobróbki materiału roślinnego ma wpływ bardzo wiele różnych czynników działających kompleksowo. W licznych pracach [Dąbrowski i in. 1981, Nelson i Stetson 1976] znajdują się próby pogrupowania i usystematyzowania tych czynników, które można podzielić na dwie grupy:

- a. Charakterystyki pola elektromagnetycznego oraz cechy techniczne stosowanych urządzeń. Do tej grupy należą:
 - natężenie pola elektromagnetycznego,
 - rodzaj pola (elektryczne, magnetyczne) i jego częstotliwość,
 - układ i kształt elektrod,
 - kształt przestrzeni międzyelektrodowej,
 - stosowana grubość warstwy badanego materiału,
 - czas ekspozycji nasion w strefie działania pola elektromagnetycznego.
- b. Cechy badanego materiału biologicznego takie jak:
 - skład chemiczny,
 - wilgotność,
 - kształt nasion („geometria”),
 - stopień rozdrobnienia materiału,
 - tekstura.

Należy podkreślić, że żadna z wymienionych cech z grupy pierwszej i drugiej nie działają indywidualnie, a otrzymywane wyniki pomiarów są efektem łącznego i równoczesnego oddziaływania kilku lub kilkunastu czynników.

2.1. Charakterystyka materiału badawczego

Zboża to rośliny wydające owoce zwane ziarniakami (*caryopsis*). Jednym z najważniejszych zbóż jest pszenica. Istnieje wiele jej odmian, różniących się właściwościami rolniczymi, technologicznymi, jak również fizycznymi i chemicznymi cechami ziarniaków. Odmiana to morfologicznie wyrównana populacja roślin o podobnych właściwościach oraz określonej reakcji na dane warunki przyrodniczo-rolnicze. Wyróżnia się odmiany hodowlane: oryginalne, selekcyjonowane, miejscowe.

W wyniku badań technologicznych poszczególne odmiany pszenicy zostają zaklasyfikowane do jednej z 4 grup jakościowych [Klockiewicz i in. 2001]:

- 1) pszenica elitarna – grupa E,
- 2) pszenica jakościowa – grupa A,
- 3) pszenica chlebowa – grupa B,
- 4) pozostałe (w tej grupie również paszowa) – grupa C.

Zakwalifikowanie odmiany do odpowiedniej grupy jakościowej następuje na podstawie dziewięciu cech jakościowych ziarna i mąki, w tym trzy cechy (białko, liczba opadania, wskaźnik sedimentacji) są cechami ziarna, pozostałe określają jakość mąki i ciasta [Klockiewicz i in. 2001].

Pszenica ozima uprawiana jest w Polsce na powierzchni 1,8–1,9 mln ha. Wartość gospodarcza odmian pszenicy ozimej wyznaczana jest przez wiele cech i właściwości, z których do podstawowych należą wielkość i jakość plonu. Istotne znaczenie mają również korzystne cechy rolnicze, przy czym im lepsza wartość technologiczna odmiany, tym mniejsze oczekiwania dotyczące poziomu plonowania. Jest 56 zarejestrowanych odmian pszenicy ozimej, wśród nich brak odmian z grupy elitarniej (E).

Pszenica jara wysiewana jest na powierzchni około 370–500 tys. ha. Ziarno przeznaczone jest głównie na cele młynarsko-piekarskie. Większość zarejestrowanych odmian cechuje się lepszą, w porównaniu z odmianami ozimymi, wartością wypiekową. Obecnie w Rejestrze jest 31 odmian. Z wyjątkiem jednej (Pasteur została zaliczona do grupy C z uwagi na niższą wydajność mąki) wszystkie odmiany pszenicy jarej są przydatne do uprawy na cele młynarsko-piekarskie. Trzy spośród nich należą do najwyższej grupy [Lista opisowa odmian 2007].

Pod względem geometrycznym ziarniaki zbóż stanowią obiekty o kształtach zbliżonych do wydłużonej elipsoidy. Cechą charakterystyczną ziarniaków niektórych zbóż (w tym pszenicy) jest występowanie po stronie brzusznej (przeciwległej do zarodka) charakterystycznego rowka zwanego bruzdką [Haber 1979], dlatego też przyjmuje się, że przekrój poprzeczny ziarna jest kardiodą. Kształt ziarniaka określa się trzema wymiarami: grubością (2,5–3,0 mm), szerokością (3,0–3,5 mm) i długością (6,0–6,5 mm) [Szot 1976]. Masa pojedynczego ziarniaka pszenicy mieści się w przedziale od 30 do 40 mg [Horyński 2001].

Ziarno składa się z trzech zasadniczych elementów: okrywy owocowo-nasiennej (łuski), bielma oraz zarodka. Jednak przy prowadzeniu pomiarów cech elektrycznych ziarna w masie czy też śrutu budowa wewnętrzna w sensie niejednorodności struktury wewnętrznej ziarniaka nie ma tak istotnego znaczenia jak w przypadku badań pojedynczego ziarna.

Skład chemiczny ziarna zależy od gatunku i odmiany, warunków glebowych, nawożenia, ilości opadów, nasłonecznienia i innych warunków wzrostu, wysuszenia ziarna, sposobu przechowywania i wielu innych czynników [Grzesiuk i Kulka 1988, Pijanowski i in. 2000]. Głównym składnikiem ziarna pszenicy są węglowodany, natomiast ich najliczniejszym

składnikiem jest skrobia, która jest odkładana w bielmie w postaci ziaren. Ich kształt i uwarstwienie są charakterystyczne dla rodzaju zboża i jego gatunku (ziarna skrobi pszenicy mają 30–40 μm). Jako substancja silnie higroskopijna, może wchłaniać 30% wody z powietrza o dużej wilgotności. Skrobia jest praktycznie nierozpuszczalna w zimnej wodzie i ulega tylko nieznacznemu pęcznieniu. Jej zawartość w ziarnie pszenicy wynosi 65–72% [Jasińska i Kotecki 1999]. Kolejnym, pod względem ilościowym, składnikiem ziarna pszenicy są białka. Dzielimy je na białka proste – proteiny i złożone – proteidy [Haber 1979]. W zależności od jakości odmiany pszenica może zawierać od 8 do 15% białka. Wartość technologiczna ziarna zależy od składu chemicznego białek. Na przykład gluten jest substancją białkową nadającą ciastu elastyczność [Pomianowska 2002].

Ziarno pszenicy nie jest zasobne w lipidy [Gąsiorowski 2003]. Tłuszcze w swym składzie zawierają zwykle alkohol oraz jeden lub więcej kwasów tłuszczowych [Pijanowski i in. 2000]. Lipidy zawarte w pszenicy są w przeważającej mierze tłuszczami właściwymi, czyli estrami wyższych kwasów tłuszczowych (nasyconych lub nienasyconych) z glicerolem [Haber 1979]. Zawartość tłuszczów ogółem mieści się w przedziale od 0,88 do 3,33%, najbogatsze w tłuszcze są pszenice durum.

Błonnik pokarmowy stanowią części jadalne roślin lub węglowodany nieskrobiowe. Jest on nierównomiernie rozmieszczony w ziarnie, a poszczególne zboża różnią się jego zawartością. Najwięcej tej substancji występuje w peryferyjnych warstwach ziaren. Ziarno pszenicy jest o około 20% uboższe w błonnik od ziarna żyta i zawiera ok. 1,9% tej substancji [Gąsiorowski 2003].

Główna część suchej masy rośliny to substancja organiczna. Może być ona usunięta na drodze spalania rośliny. Pozostałość po spaleniu – popiół zawiera składniki mineralne [Kamińska i Strahl 1976]. Do makroelementów zalicza się: chlor, fosfor, magnez, potas, sód, wapń, żelazo, zaś do mikroelementów: cynk, fluor, jod, kobalt, molibden, selen, mangan, kobalt [Gąsiorowski 2003]. Mogą występować istotne różnice w zawartości mikro- i makroskładników pomiędzy poszczególnymi odmianami roślin [Kamińska i Strahl 1976]. Ziarno pszenicy jest również źródłem niektórych witamin: A, B1, C, E, H [Łubkowski 1968].

Różny jest udział powietrza w objętości ziarniaka. Przykładowo, powietrze zajmuje od 0 do 13% objętości w nasionach pszenicy jarej miękkiej, 8–9% objętości pszenicy jarej twardej.

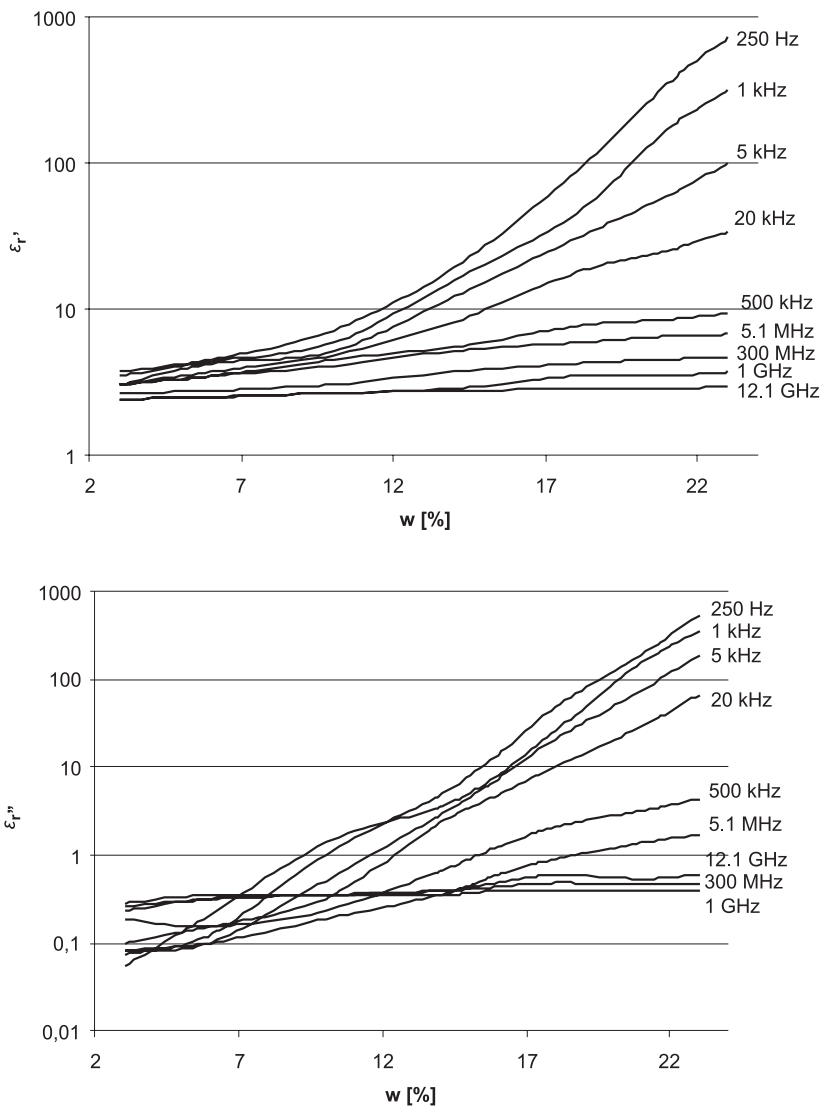
2.2. Właściwości elektryczne materiału biologicznego

Właściwości elektryczne ziarna określane są za pomocą następujących wielkości fizycznych [Dąbrowski i in. 1981, Nelson 1985, Łuczycza 1994, 1996, 1999, 1999a, Horyński 2001]:

- rezystancja – R ,
- pojemność elektryczna – C ,
- przenikalność elektryczna – ϵ ,
- współczynnik strat dielektrycznych – $\text{tg } \delta$,
- konduktywność – σ .

Wielkości te związane są z czynnikami fizycznymi (wilgotność ziarna i jego temperatura, wymiary i kształt nasion, masa, tekstura) oraz czynnikami chemicznymi (zawartość wody związanej chemicznie i skład chemiczny materiału). Otrzymane z pomiarów wartości uzależnione są od tego, czy dotyczą pojedynczych ziaren, czy ziarna w masie.

W pracy Basowa i in. [1968] przeanalizowano zależność przenikalności elektrycznej od masy właściwej i wilgotności nasion. Przenikalność elektryczna wszystkich gatunków zbóż rośnie jednocześnie ze wzrostem ich masy właściwej oraz w dużym stopniu zależy od wilgotności nasion i wraz z nią wzrasta.



Rys. 2.1. Zależność składowej rzeczywistej ϵ_r' i urojonej ϵ_r'' przenikalności elektrycznej czerwonej pszenicy ozimej od wilgotności w temperaturze 24°C dla różnych częstotliwości pola elektromagnetycznego [Nelson i Stetson 1976]

Fig. 2.1. Dependence of the dielectric constant ϵ_r' and loss factor ϵ_r'' of hard red winter wheat on moisture content at 24°C and indicated frequencies

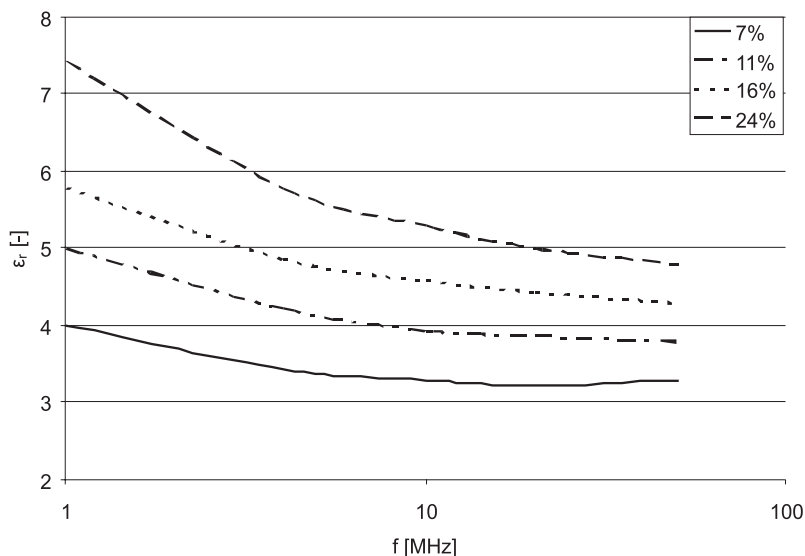
Biednow [1974] badał przenikalność elektryczną niesortowanych ziarniaków pszenicy, jak również żyta i jęczmienia w zależności od częstotliwości pola elektrycznego (20 kHz–20 MHz) przy wilgotności od 5 do 10%. Stwierdził, że dla częstotliwości pola elektrycznego większej od 1 MHz zależność przenikalności elektrycznej od wilgotności jest liniowa.

Badania przenikalności elektrycznej ϵ prowadzono dla pszenicy ozimej na Uniwersytecie Nebraska w Lincoln już w latach 1970–1990 [Nelson i Stetson 1976, Nelson 1985, 1986]. Na podstawie badań określono zależność części rzeczywistej i urojonej przenikalności elektrycznej od częstotliwości pola elektrycznego przy różnych stopniach uwilgotnienia ziarniaków i w stałej temperaturze (24°C). Rzeczywista przenikalność elektryczna w niskich częstotliwościach pola elektrycznego i przy wilgotności ziarna od 6 do 19,5% wzrasta około 100 razy, a przy częstotliwościach wysokich rzędu 10^{10} Hz tylko dwa razy (rys. 2.1).

Składowa urojona przenikalności elektrycznej ϵ'' jednocześnie ze wzrostem częstotliwości pola elektromagnetycznego od 250 Hz do 1 GHz maleje 10^4 razy (rys. 2.1).

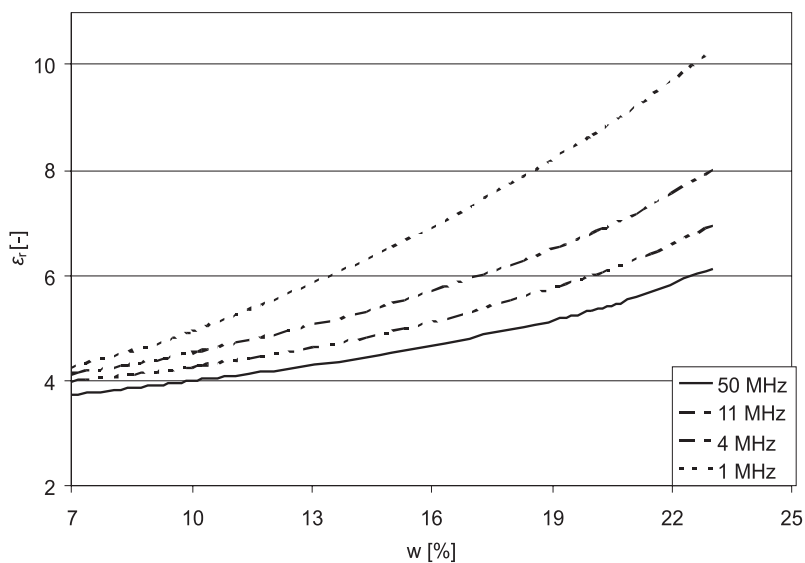
Wskazano również na istnienie zależności przenikalności elektrycznej nasion pszenicy od masy właściwej. Szczególnie wyraźnie zależność ta występuje przy podwyższaniu wilgotności ziarna i obniżaniu częstotliwości pola elektromagnetycznego [Nelson i Stetson 1976]. W latach 1990–2006 Nelson kierował badaniami cech dielektrycznych ziarna, koncentrując się na badaniach w wysokich częstotliwościach pola – rzędu 10^6 Hz i wyższych [Nelson 2006, Kraszewski i Nelson 1989, 1992, Trabelsi i Nelson 2003].

Badania wpływu wilgotności na przenikalność elektryczną względną jęczmienia i pszenicy w zakresie częstotliwości pola elektromagnetycznego 1–150 MHz prowadził Hanzelik [1985]. Doświadczeniom poddano pszenicę odmian Jubilejna (rys. 2.2) i Mironovska (rys. 2.3). Ze wzrostem częstotliwości przenikalność elektryczna maleje oraz rośnie jednocześnie ze wzrostem wilgotności.



Rys. 2.2. Zależność względnej przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy (odmiana Jubilejna) od częstotliwości pola elektromagnetycznego – $T=25^{\circ}\text{C}$ [Hanzelik 1985]

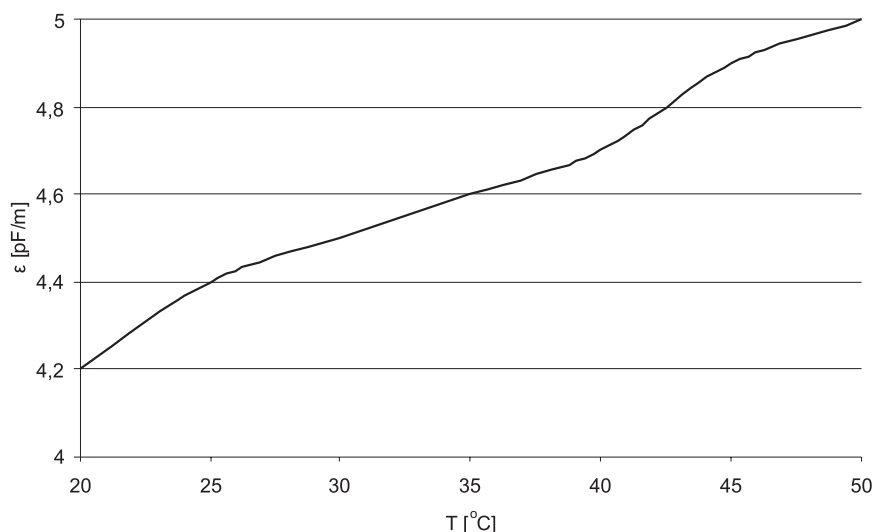
Fig. 2.2. Dependence of relative permittivity on frequency for wheat grains (variety Jubilejna) – $T=25^{\circ}\text{C}$



Rys. 2.3. Zależność względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r ziarniaków pszenicy (odmiana Mironovska) od wilgotności – $T=25^\circ\text{C}$ [Hanzelik 1985]

Fig. 2.3. Dependence of relative permittivity ϵ_r on moisture for wheat grains (variety Mironovska) – $T=25^\circ\text{C}$

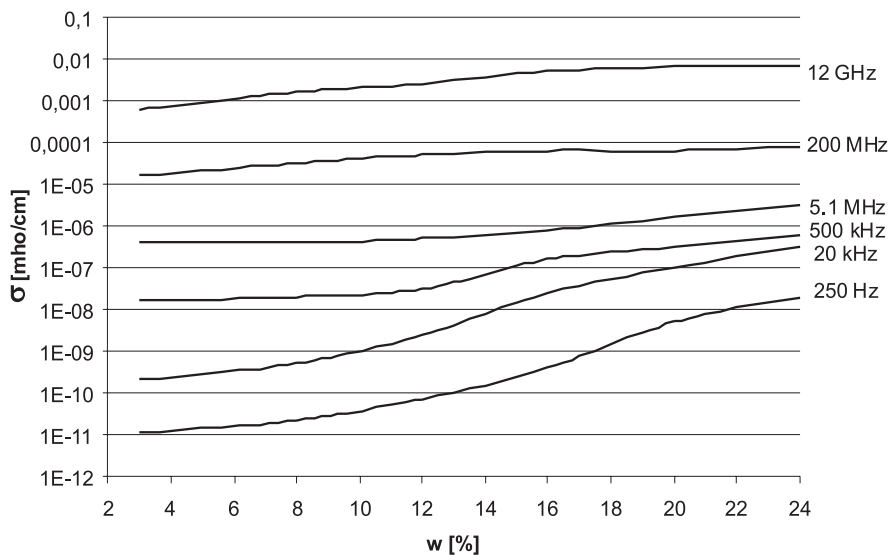
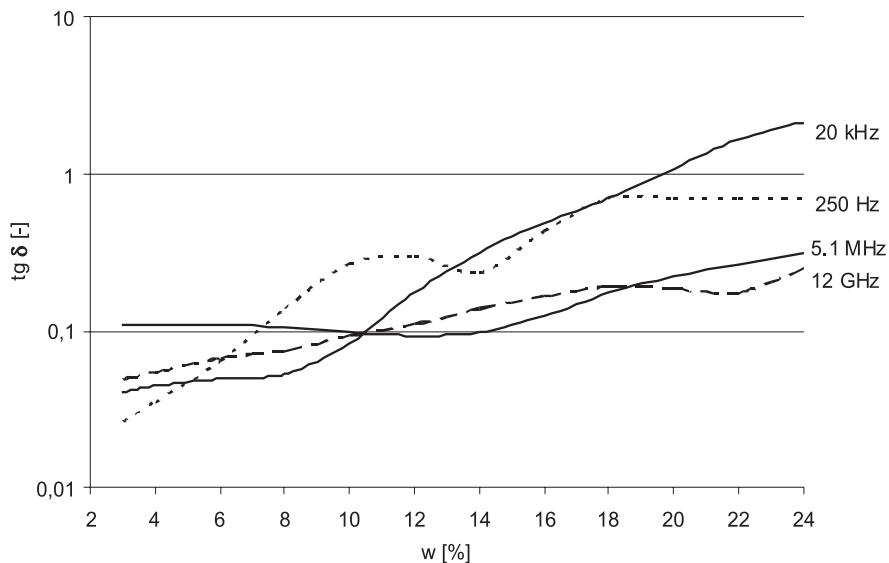
Torosjan i Konochova [1972] przytaczają wyniki badań wpływu temperatury ziarniaków na wartości przenikalności elektrycznej (rys. 2.4), według nich przenikalność elektryczna ziarniaków pszenicy wyraźnie rośnie jednocześnie ze wzrostem ich temperatury.



Rys. 2.4. Wpływ temperatury na przenikalność elektryczną ziarniaków pszenicy [Torosjan i Konochova 1972]

Fig. 2.4. The dependence of electric permittivity vs. temperature (wheat)

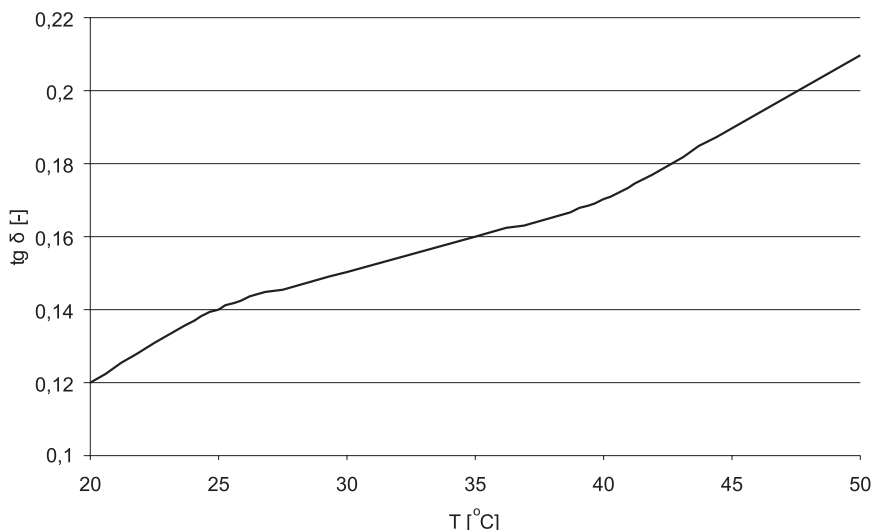
Innym parametrem opisującym właściwości elektryczne nasion jest współczynnik strat dielektrycznych $tg \delta$. Jest on rzeczywistym obrazem strat zachodzących w dielektrykach.



Rys. 2.5. Zależność współczynnika strat dielektrycznych i konduktywności czerwonej pszenicy oziemej od wilgotności, w temperaturze 24°C dla wybranych częstotliwości pola elektromagnetycznego (1 mho/cm odpowiada 0,01 S·m⁻¹) [Nelson i Stetson 1976]

Fig. 2.5. Dependence of the dielectric loss tangent and conductivity of hard red winter wheat on moisture content at 24° C and indicated frequencies (1 mho/cm is equivalent to 0,01 S·m⁻¹)

Tangens kąta stratności zależy od częstotliwości, wilgotności i temperatury. Przeprowadzone badania [Nelson i Stetson 1976, Torosjan i Konochowa 1972] wykazały znaczną zależność tego parametru od wilgotności i temperatury. Tangens kąta stratności rośnie zarówno ze wzrostem wilgotności (rys. 2.5), jak i temperatury ziarniaków (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Zależność wartości współczynnika strat dielektrycznych ziarniaków pszenicy od temperatury [Torosjan i Konochowa 1972]

Fig. 2.6. The dependence of coefficient dielectrical losses vs. temperature (wheat)

Łuczycyka [1995, 1996, 1998, 1999, 1999a] prowadziła badania zależności współczynnika strat dielektrycznych od częstotliwości pola elektromagnetycznego i wilgotności materiału badawczego dla pszenicy, pszenżyta i żyta. Analiza uzyskanych wyników wskazuje na występujące znaczne różnice w przebiegu zależności współczynnika stratności od wilgotności dla różnych gatunków zbóż. Inny jest też charakter zmian tego parametru dla badanych zbóż. Łuczycyka [1998] stwierdziła, że wartości współczynnika strat dielektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy zależą od odmiany w całym badanym zakresie wilgotności, a różnice wartości przenikalności elektrycznej między badanymi odmianami rosną ze wzrostem wilgotności. Różnice międzyodmianowe w wartościach mierzonych cech elektrycznych są zauważalne przy pomiarach pojedynczej warstwy ziarniaków pszenicy, a w grubszej warstwie są jeszcze wyraźniejsze. W miernikach stosuje się najczęściej pomiar cech elektrycznych ziarna w warstwie wielokrotnie większej od grubości pojedynczego ziarniaka. Z reguły producenci przyrządów pomiarowych nie zamieszczają w instrukcjach obsługi tabel do określania właściwości różnych odmian czy nawet grup odmian danego gatunku zboża. W takim przypadku należy oczekiwać, że mierzone wartości będą obciążone znacznie większym błędem, niż wynikałoby to z klasy przyrządu.

Szczegółowo opisano w literaturze właściwości elektryczne pojedynczego ziarniaka pszenicy [Pietrzyk 1996, 2001, Horyński 1997, 2000, Sumorek i Pietrzyk 1999, 2001]. Konduktywność oraz rezystywność ziarniaka zależą od wilgotności i temperatury. Na podkreślenie zasługuje znaczna różnica wartości tych parametrów dla różnych części ziarna [Pietrzyk i in. 1996a].

Zarówno rezystancja, jak i rezystywność ziarniaków ρ maleją przy wzroście temperatury, podobnie jak w ciałach będących na pograniczu dielektryków i półprzewodników. Rezystancja ziarniaków zbóż zależy również silnie od wilgotności. Jednocześnie ze wzrostem wilgotności rezystancja maleje [Horyński 2001]. Pomiary rezystywności ziarniaków w masie prowadziła Łuczycka [1994], stwierdzając, że ρ maleje ze wzrostem wilgotności.

Horyński zajmował się wpływem obciążeń mechanicznych na cechy elektryczne ziarniaka [Horyński i in. 1996, Horyński 1999] czy też wpływu pola elektrostatycznego na analizowane wielkości [Horyński 1997, 2000, 2001, Horyński i in. 2003]. Prowadzone były również prace mające na celu scharakteryzowanie właściwości mechanicznych i reologicznych ziarniaków pszenicy oraz ich powiązań z cechami elektrycznymi [Łuczycka i Pawlak 2002].

Wartość rezystancji ziarniaka zależy również od natężenia pola elektrycznego. Przy wzroście natężenia pola elektrycznego rezystancja zmniejsza się i ma w przybliżeniu charakter liniowy. Największa zmiana rezystancji przy wzroście natężenia od 0 do 5 kV/cm wynosi ok. 5,5% [Adamkiewicz i in. 1996]. Zmniejszenie rezystancji ziarniaka jednocześnie ze wzrostem natężenia pola elektrycznego może sugerować, że wywołane polem siły strykcyjne mają charakter sił ściskających. Efekt tych sił, w postaci spadku rezystancji, rośnie jednocześnie ze zmniejszeniem wilgotności ziarniaka. Spowodowane to może być wzrostem naprężeń. Przy większych wilgotnościach ziarno staje się plastyczne i siły strykcyjne mogą wywołać deformację jego cząstek wewnętrznych, nie powodując naprężeń mechanicznych [Pietrzyk i in. 1995].

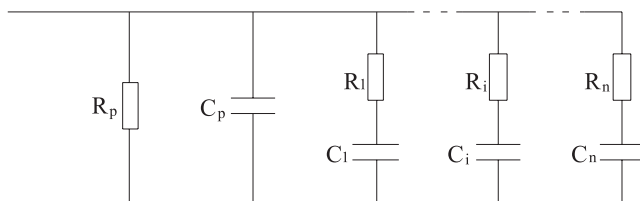
Horyński [2003, 2004, 2005, 2006] prowadził również badania nad wykorzystaniem właściwości elektrycznych, w tym rezystywności, do weryfikacji stopnia przemiału zboża. Znajomość właściwości elektrycznych ziarniaków całych oraz rozdrobnionych może być wykorzystana przy konstruowaniu suszarek konwekcyjnych wspomaganych polem elektrycznym z wiatrem jonowym oraz przy konstrukcji filtrów bifilarnych [Pietrzyk i in. 2001, Pietrzyk 2008]. Analizę wpływu stopnia rozdrobnienia ziarniaków pszenicy na wielkości przenikalności elektrycznej oraz współczynnika stratności, a także badania cech dielektrycznych mąki prowadziła Łuczycka [2007].

Równolegle wielu badaczy prowadziło badania nad cechami dielektrycznymi innych nasion, na przykład Skalska [2002, 2002a] badała cechy dielektryczne pojedynczego nasiona bobiku, analizując wpływ wilgotności badanego materiału i wybranych warunków pomiaru na wartości przenikalności elektrycznej i rezystywności. Torosjan i Konochova [1972] badali oprócz pszenicy: łubin pastewny, groch, grykę, kukurydzę. Analizowali wpływ temperatury materiału, wilgotności oraz częstotliwości pola elektromagnetycznego na przenikalność elektryczną. Z ich doświadczeń wynika, że ze wzrostem częstotliwości przenikalność elektryczna badanych nasion maleje, a przy stałej częstotliwości przenikalność elektryczna nasion wzrasta jednocześnie ze wzrostem wilgotności i temperatury.

Badania soi [Utieszew 1973] wykazały znaczną różnicę rezystancji pomiędzy nasionami całymi a uszkodzonymi mechanicznie oraz niski współczynnik korelacji między wymiarami geometrycznymi, indywidualnym ciężarem pojedynczych nasion i ich rezystancją. Bardzo duży wpływ na rezystancję nasion ma wilgotność. Jednocześnie ze wzrostem wilgotności rezystancja maleje. Interesująco wygląda wpływ natężenia pola elektrycznego na wartość rezystancji nasion – ze wzrostem natężenia rezystancja maleje. Można to wytłumaczyć pojawianiem się w ziarnie, w miarę wzrostu natężenia pola elektrycznego, prądu elektronowego. Wpływ ten zarysowuje się szczególnie dla nasion o dużej wilgotności, ($w > 15\%$), kiedy przechodzą w stan półprzewodnikowy [Basow i in. 1968].

Badano również cechy elektryczne innych materiałów biologicznych, jak np. amarantusa [Waszkiewicz i Nowakowski 2001], lucerny, jęczmienia, ziarna kawy, kukurydzy, prosa, owsa, orzechów pekan, ziarna sezamowego, soi i pszenicy, produktów mlecznych, ryb, owoców (jabłko, sok jabłkowy, banany, brzoskwinie i gruszki), jarzyn (kabaczek, marchew, ziemniaki w postaci świeżej i chrupek, szpinak), mięsa, oleju i tłuszczu stałych, cukru, czekolady czy miodu.

W literaturze spotyka się nieliczne próby formułowania modeli semantyczno-elektrycznych badanych materiałów tworzonych na podstawie ich właściwości elektrycznych. Zadaniem takich modeli jest wierne odzwierciedlenie zależności zachodzących między wielkościami elektrycznymi ziarna a cechami fizycznymi masy ziarna, w założonych warunkach pomiaru (częstotliwości pola elektromagnetycznego, natężenia pola, geometrii układu pomiarowego itp.). Zdolność masy do gromadzenia ładunków elektrycznych została określona na schemacie pojemnością kondensatora. Najprostszym modelem elektrycznym masy ziarna jest układ pojemnościowy zawierający idealny kondensator C oraz połączony z nim szeregowo lub równolegle rezystor R (rys. 4.1 i 4.2). Zaletą jego jest łatwość określania parametrów tego układu i dokonywanie obliczeń modelowych [Borodin 1971, Łuczycza 1995]. Bardziej rozbudowany jest model przedstawiony przez Borodina (rys. 2.7). Jak wykazały badania, model ten dokładnie odwzorowuje zmierzoną i wyliczoną przewodność właściwą i przenikalność elektryczną ziaren zbóż mierzoną w masie.



Rys. 2.7. Semantyczny model elektryczny ziarniaków zbóż [Borodin 1971]
 Fig. 2.7. Semantic electric model of cereal seeds

Na schemacie rezystor R_p odzwierciedla konduktywność powierzchniową i skrośną przy prądzie stałym. Kondensator C_p przedstawia pojemność masy ziarna przy częstotliwości pola elektromagnetycznego dążącego do nieskończoności. Szeregowe połączenie elementów R_i i C_i modeluje proces relaksacyjny określony polaryzacją poszczególnych komponentów ziarna i masy. Do obliczeń praktycznych Borodin [1971] zaleca przyjąć skończoną liczbę gałęzi $R_i C_i$ rozpatrywanego modelu. Liczba gałęzi jest zobligowana częstotliwością pola elektromagnetycznego. Dla częstości mniejszych od 10^{10} Hz liczbę gałęzi można ograniczyć do trzech: tj. $R_1 C_1, R_2 C_2, R_3 C_3$. Praktyczna przydatność modeli semantycznych jest stosunkowo niewielka ze względu na skomplikowane procedury wyznaczania wartości R_i oraz C_i dla wybranego materiału badawczego.

Podstawą do określania wartości elementów schematu zastępczego warstwy ziarna są badania laboratoryjne przenikalności elektrycznej ϵ i współczynnika stratności $tg\delta$. Wielkości te zależą od wilgotności i temperatury materiału i zmieniają się w funkcji częstotliwości pola elektromagnetycznego [Łuczycza 1995, Majewska i in. 2005, 2008].

Poza wspomnianymi modelami semantycznymi można w literaturze spotkać liczne próby matematycznego opisu zmienności parametrów elektrycznych opisujących masy ziarna

w funkcji częstotliwości pola elektromagnetycznego lub wilgotności [Łuczycka 1999, 1999a, Nelson i Stetson 1976, Nelson 1986a, 1996, 2006, Majewska i in. 2005, 2008], zdecydowanie mniej jest opisów wpływu temperatury na cechy elektryczne ziarna [Dąbrowski i in. 1981, Nelson i Stetson 1976, Lawrence i in. 1991]. Pojawiają się również próby uwzględnienia cech geometrycznych [Łuczycka 2002] czy wpływu poszczególnych składników chemicznych ziarna na wybrane cechy dielektryczne [Nelson i Stetson 1976, Łuczycka i Romański 2008].

Znajomość wpływu wymienionych czynników na właściwości elektryczne ziarniaków zbóż, zarówno w odniesieniu do pojedynczego ziarniaka, jak i ziarna w warstwie, jest istotna z punktu widzenia analizy wpływu pól elektrycznych i elektromagnetycznych [Horyński 2000, 2001, 2001a, Pietrzyk 2006] i magnetycznych [Pietruszewski 1998, 1999, Pietruszewski i Kornarzyński 2000, Kordas 2002, 2002a, Kornarzyński i Pietruszewski 1999, Kornarzyński i in. 2004, 2004a] na właściwości biologiczne materiału nasiennego. Nie zawsze prowadzone prace nad wpływem pól elektromagnetycznych na kiełkowanie i plony roślin są oparte na znajomości określanych wcześniej cech elektrycznych nasion [Pietrzyk 2006]. Konstruowanie coraz dokładniejszych mierników wilgotności również możliwe jest w oparciu o analizę modeli elektrycznych lub matematycznych ziarna w masie. W piśmiennictwie brak opracowań, które uwzględniałyby jednocześnie kilka z wymienionych czynników, jak również prób przedstawienia formuł matematycznych czy też modeli matematycznych opisujących kompleksowo cechy elektryczne masy ziarna. Model taki powinien odwzorowywać zależności między cechami fizycznymi oraz chemicznymi ziarna a właściwościami elektrycznymi masy ziarna o określonej geometrii. Weryfikować się on powinien w pełnym, analizowanym zakresie częstotliwości pola elektromagnetycznego.

W tym kontekście znaczenia nabierają poszukiwania nowych metod badawczych efektywniej wspomagających procesy poznawcze. Rozwój technik informatycznych spowodował pojawienie się możliwości wykorzystania metody sztucznych sieci neuronowych (SSN). SSN może być narzędziem do stworzenia modelu ekwiwalentnego w stosunku do opartych na tradycyjnych metodach statystycznych modeli empirycznych [Boniecki 2005, Langman 1999]. Brak sformalizowanego modelu matematycznego opisującego omawiane zagadnienie, fragmentaryczność dotychczasowej wiedzy o badanych zależnościach oraz znaczna ilość wielkości, które mogą wpływać na wymienione cechy elektryczne masy ziarna wraz z ich w dużym stopniu losową strukturą wskazują na możliwości zastosowania do opisu sztucznych sieci neuronowych. Techniki te, wspomagające proces badania złożonych systemów empirycznych, powinny znajdować zastosowanie praktyczne również w agrofizyce. Próby zastosowania SSN podejmowano między innymi do wyznaczania twardości ziarna pszenicy [Hebda i Francik 2006] czy też mechanicznych uszkodzeń ziarniaków kukurydzy [Nowakowski i Boniecki 2008].

3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO I CELU PRACY

Z przedstawionego w przeglądzie literatury stanu wiedzy z zakresu cech elektrycznych ziarniaków pszenicy w masie wynika, że tematyka ta nurtuje wielu badaczy. Uzyskane jednak przez nich wyniki są często nieporównywalne, ponieważ prowadzone są w odmiennych warunkach, przy różnych zakresach częstotliwości pola elektromagnetycznego dla odmian pszenicy istotnie się różniących pod względem badanych właściwości elektrycznych, stąd znaczna rozbieżność uzyskiwanych wyników.

Ze względu na występujące znaczne różnice międzyodmianowe w wartościach badanych właściwości elektrycznych dokładniejszej analizy wymaga wpływ wymiarów ziarniaków, jak również ich składu chemicznego na mierzone wielkości elektryczne. Z tego też powodu nie można bezpośrednio wykorzystać wyników doświadczeń prowadzonych w innych krajach na odmiennym materiale badawczym. Nie ma w literaturze szerzej opisanej charakterystyki właściwości elektrycznych polskich odmian pszenicy, brak kompleksowych badań, prowadzonych w jednorodnych warunkach, nad wpływem cech fizycznych i chemicznych ziarna pszenicy na właściwości elektryczne warstwy ziarniaków.

Można sformułować hipotezę, że na podstawie znajomości cech fizycznych i chemicznych ziarna pszenicy danej odmiany można szacować wartości cech elektrycznych ziarniaków pszenicy w zakresie częstotliwości pola elektromagnetycznego od 100 Hz do 100 kHz.

Dotychczasowe badania dotyczą najczęściej jedynie wpływu poszczególnych cech fizycznych czy chemicznych na właściwości elektryczne ziaren pszenicy. Podkreślić należy, że co prawda każda z wielkości fizycznych czy chemicznych wpływa oddzielnie na cechy elektryczne, jednak czynniki te występują zawsze jednocześnie. Opisy zależności mające charakter fragmentaryczny nie dają podstaw do sformułowania wniosków dotyczących kompleksowego opisanie zjawisk. Brak w piśmiennictwie modeli empirycznych, nie stosowano również dotychczas innych metod niż analiza regresji liniowej do formalizacji opisu czynników wpływających na właściwości elektryczne masy ziarna, w tym np. sztucznych sieci neuronowych.

Stało się to inspiracją do podjęcia pracy, której celem było scharakteryzowanie właściwości elektrycznych:

- przenikalności elektrycznej,
- współczynnika strat dielektrycznych,

ziarniaków wybranych odmian pszenicy oraz określenie determinujących je właściwości fizycznych i chemicznych. Pozwoliło to na sformułowanie i weryfikację formuł matematycznych (modelu) opisujących analizowane zależności.

Ponadto celem pracy było też sprawdzenie przydatności sieci neuronowych do modelowania powiązań między wybranymi cechami oraz różnicowania odmian pszenicy ze względu na ich właściwości elektryczne.

Realizacja tak postawionych zadań wymagała przeprowadzenia:

1. Analizy wpływu czynników metrologicznych związanych ze stosowaną metodą i aparaturą pomiarową. W tym na etapie opracowywania metodyki badań wyboru przyjętego schematu zastępczego oraz geometrii elektrod pomiarowych, a następnie w toku ich prowadzenia:

- czasu trwania pomiaru,
- częstotliwości pola elektromagnetycznego.

2. Analizy wpływu czynników związanych z materiałem badawczym:

- wilgotności ziarniaków,
- temperatury ziarna,
- wymiarów geometrycznych ziarniaków,
- właściwości chemicznych ziarna.

4. ANALIZA TEORETYCZNA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNYCH WARSTWY ZIARNA

Dielektryki stałe są ważną grupą materiałów elektrotechnicznych. Najważniejszymi parametrami elektrycznymi dielektryków są rezystywność skrośna i powierzchniowa, przenikalność elektryczna i współczynnik strat dielektrycznych, wytrzymałość elektryczna, odporność na wyładowanie niezupełne, a także podatność na elektryzację [Lisowski 2004]. Nie wszystkie jednak z wymienionych cech znajdują zastosowanie dla materiałów biologicznych. Materiały te nie są elementami montażowymi i nośnymi w układach elektrycznych, nie służą zazwyczaj jako materiały izolacyjne. Nie są więc dla opisanego ich właściwości ważne te z cech, które opisują ich przydatność jako materiałów dielektrycznych technicznych. Istotne są natomiast te właściwości elektryczne, które charakteryzują materiał biologiczny oraz zależą w znacznym stopniu od właściwości fizycznych i chemicznych, umożliwiając zastosowanie elektrycznych metod pomiarowych dla określania nieelektrycznych wielkości charakteryzujących badany materiał. Zwrócić też należy uwagę na cechy elektryczne, których poznanie pozwala na ulepszenie procesów technologicznych (np. suszenie pojemnościowe).

Dielektryki to substancje niezawierające swobodnych ładunków, ich oporność właściwa jest większa od ok. $10^8 \Omega\text{cm}$. Zjawisko przesunięcia ładunku ujemnego elektronów względem ładunku dodatniego jąder atomowych w zewnętrznym polu elektrycznym nazywamy polaryzacją elektryczną indukowaną. Powstały układ przesuniętych względem siebie ładunków dodatniego i ujemnego nazywa się dipolem. W niektórych ciałach stałych, nawet bez zewnętrznego pola elektrycznego, znajdują się obszary o spontanicznej polaryzacji zwane domenami. Ponieważ domeny zorientowane są przypadkowo, wypadkowa polaryzacja całego dielektryka jest równa zero. Dielektryki o strukturze domenowej to ferroelektryki. Wyróżniamy dielektryki niepolarne, których molekuly nie mają trwałych elektrycznych momentów dipolowych oraz dielektryki polarne mające trwałe momenty dipolowe molekuł. Zewnętrzne pole elektryczne porządkuje domeny, silnie polaryzując dielektryk. Czasy polaryzacji dla różnych materiałów są zawarte w szerokich granicach 10^{-15} – 10^5 s. Dla nasion czasy te zawierają się w zakresie od kilku sekund do kilku minut [Dąbrowski i in. 1981]. Wolne rodzaje polaryzacji polegają przede wszystkim na porządkowaniu dipoli lub fragmentów makromolekuł obdarzonych momentem elektrycznym. Powodują one określone straty energii, gdyż przesunięciom cząstek dielektryka przeciwstawiają się ruchy cieplne, siły lepkości i sprężystości, a więc wyzwala się określona ilość ciepła. Tylko w niewielkiej części energia elektryczna pobrana ze źródła zostaje zamieniona w energię potencjalną sprężystych odkształceń dipoli [Hippel 1963, Chełkowski 1993].

Wyznaczenie właściwości elektrycznych materiału wymaga umieszczenia go w kondensatorze. Kondensator to układ dwóch przewodników rozdzielonych warstwą nieprzewodzącą. Po przyłączeniu źródła o napięciu U w kondensatorze gromadzi się ładunek Q , przy czym:

$$Q = C \cdot U \quad (4.1)$$

Współczynnik C nazywa się pojemnością kondensatora.

W próżniowym kondensatorze płaskim, w wyniku naładowania ładunkiem Q , powstaje jednorodne pole elektryczne o natężeniu [Kurdziel 1969]:

$$E_0 = \frac{U}{d} \quad (4.2)$$

Dielektryk umieszczony w polu elektrycznym, w wyniku zjawiska polaryzacji, modyfikuje to pole. Ponieważ przy stałym napięciu natężenie pola E_0 nie ulega zmianie, umieszczenie w kondensatorze dielektryka spowoduje wzrost zgromadzonego w kondensatorze ładunku do wartości Q' równej:

$$Q' = \varepsilon_r \cdot Q \quad (4.3)$$

Jeżeli między okładkami kondensatora umieści się dielektryk, to jego pojemność elektryczna wzrośnie ε_r razy [Chełkowski 1993, Hilczer i Małecki 1992] i osiągnie wartość:

$$C = \varepsilon_r \cdot C_0 \quad (4.4)$$

Wielkość ε_r nosi nazwę przenikalności elektrycznej. W literaturze spotyka się często określenie: „przenikalność dielektryczna”, jednak współcześnie odchodzi się od tej nazwy na rzecz „przenikalność elektryczna”, gdyż to drugie określenie lepiej oddaje charakter wielkości ε w pełnym zakresie jej wartości.

Jeżeli kondensator próżniowy o pojemności C_0 podłączy się do źródła przemiennego napięcia sinusoidalnego:

$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4.5)$$

to w obwodzie popłynie prąd [Lisowski 2004]:

$$i_o = C_o \cdot \frac{du}{dt} = \omega \cdot C_o \cdot U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.6)$$

Gdyby dielektryk był idealny, zmieniłaby się jedynie amplituda natężenia prądu:

$$I_m = \omega \cdot C \cdot U_m \quad (4.7)$$

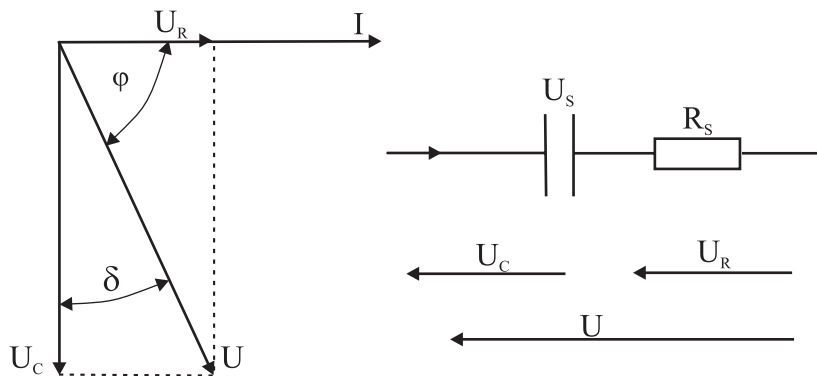
przesunięcie fazowe φ między natężeniem prądu a napięciem wynosiłoby $\pi/2$ i w dielektryku nie byłoby strat energii (dielektryk bezstratny).

W rzeczywistych dielektrykach zawsze występują pewne starty energii ujawniające się w postaci ciepła [Hilczer i Małecki 1992]. Prąd i płynący przez kondensator będzie przesunięty o kąt: $\pi/2 - \delta$, i wzór (4.7) przyjmie postać:

$$i = I_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2} - \delta\right) \quad (4.8)$$

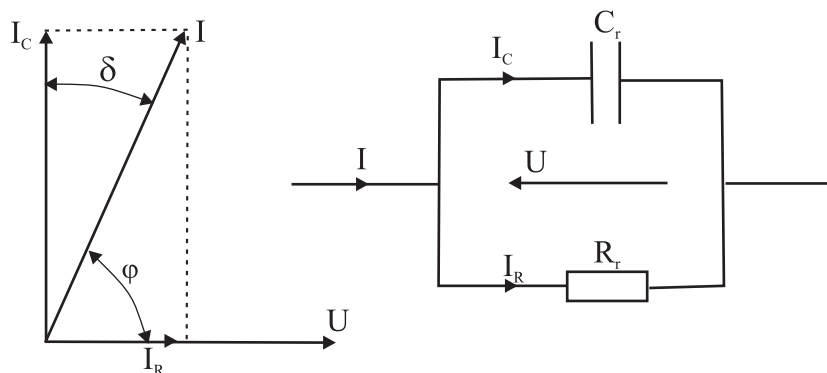
Kąt δ jest nazywany kątem strat dielektrycznych, a kąt φ między prądem I a napięciem U – kątem fazowym.

Aby opisać kondensator z dielektrykiem stratnym, stosuje się szeregowy schemat zastępczy przedstawiony na rysunku 4.1. Na schemacie tym C_s jest idealną bezstratną pojemnością, a R_s – rezystancją odpowiadającą stratom w kondensatorze.



Rys. 4.1. Szeregowy układ zastępczy kondensatora z dielektrykiem stratnym i jego wykres wskazowy
 Fig. 4.1. Series RC circuit and respective phasor diagram

Wykresowi wskazowemu prądów w stratnym kondensatorze odpowiada również schemat zastępczy równoległy pokazany na rysunku 4.2. Na schemacie tym C_r jest idealną bezstratną pojemnością, a R_r – rezystancją odpowiadającą stratom w kondensatorze.



Rys. 4.2. Wykres wektorowy prądów w kondensatorze z dielektrykiem rzeczywistym i odpowiadający mu równoległy układ zastępczy
 Fig. 4.2. Parallel RC circuit and respective phasor diagram

Prąd I jest wielkością zespoloną wyrażoną wzorem:

$$\hat{I} = I_R + j \cdot I_C . \quad (4.9)$$

4.1. Przenikalność elektryczna ϵ

Przenikalność elektryczna charakteryzuje właściwości elektryczne środowiska. Opisuje makroskopowe właściwości dielektryka w polach elektrycznych o różnych częstościach.

Wymiarem przenikalności elektrycznej w układzie SI jest $F \cdot m^{-1}$ (farad na metr). Spośród wszystkich ośrodków najmniejszą przenikalność elektryczną wykazuje próżnia, oznacza się ją symbolem – ϵ_0 , jest stałą fizyczną, której wartość zgodnie z danymi opublikowanymi w 2002 r. przez Komitet Danych dla Nauki i Techniki (CODATA) wynosi: $0,854187817e^{-12} F \cdot m^{-1}$.

Jeśli wypełnimy badanym dielektrykiem kondensator, to jego pojemność się zmieni. Według definicji podanej w normach IEC 250 i PN-86/E-04403 ϵ_r – względna przenikalność elektryczna materiału wyrażana jest stosunkiem pojemności C_x kondensatora całkowicie nim wypełnionego do pojemności C_0 – kondensatora próżniowego. Względna przenikalność elektryczna powietrza wynosi 1,00053 (określona dla powietrza suchego i wolnego od dwutlenku węgla). Zatem względną przenikalność elektryczną ϵ_r zamiast dla warunków próżniowych z dostateczną dokładnością możemy określić, badając kondensator powietrzny.

Względna przenikalność elektryczna cieczy i ciał stałych mieści się w granicach od 1 do 100. W przypadku ferroelektryków ϵ_r osiąga wartość do kilkunastu tysięcy. Wartości przenikalności elektrycznej niektórych dielektryków podane są w tabeli 4.1.

Tabela 4.1
Table 4.1

Wartości względnej przenikalności elektrycznej dla wybranych dielektryków gazowych, ciekłych i stałych [Lisowski 2004]
Values of the relative electric permittivity for chosen gauze, liquid and permanent dielectrics

Dielektryk Dielectric	ϵ_r
powietrze air	1,00059
olej transformatorowy transformer oil	2,28
woda destylowana distilled water	ok. 79
Pleksiglas Plexiglass	3–3,7
szkło glass	5–7

Względna przenikalność elektryczna jest wielkością zespoloną:

$$\epsilon_r = \epsilon' - j \cdot \epsilon'' \quad (4.10)$$

gdzie:

ϵ' – składowa czynna względnej zespolonej przenikalności elektrycznej,

ϵ'' – składowa bierna względnej zespolonej przenikalności elektrycznej.

Składowa czynna ϵ' wyraża zdolność do gromadzenia energii przez kondensator w polu elektrycznym, jest ona ważnym czynnikiem przy określaniu wartości natężenia pola elektrycznego przy projektowaniu i stosowaniu urządzeń do mikrofalowego suszenia i niszczenia insektów w nasionach zbóż.

Składowa bierna wyraża zdolność dielektryka do rozpraszania energii zmagazynowanej w polu elektrycznym [Siciński 1968, Lisowski 2004].

Składowe ε zależą silnie od wilgotności i częstotliwości pola. Składowa rzeczywista i urojona wzrastają przy wzroście wilgotności, co jest związane z dużą przenikalnością elektryczną wody. Natomiast w funkcji częstości pola maleje składowa rzeczywista ε' , co wiąże się z zanikiem niektórych mechanizmów polaryzacji. Zależność ta jest przedziałami liniowa. Składowa urojona ε'' jest natomiast nieregularną funkcją częstotliwości [Lisowski 2004].

Wybór układu zastępczego jest w zasadzie dowolny, byle tylko zachodziła w ściśle określonych warunkach równość między składowymi, czynną i bierną pojemnościową prądu w układzie rzeczywistym i równoważnym. Dla innych warunków (np. innej częstotliwości pola elektromagnetycznego) schemat zastępczy może, ale nie musi być równoważny układowi rzeczywistemu.

Najczęściej dla dielektryków jednorodnych stosuje się zastępczy układ równoległy a dla niejednorodnych bądź uwarstwionych może niekiedy lepiej sprawdzić się układ szeregowy.

Przenikalność elektryczną badanego materiału można wyrazić wzorem:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (4.11)$$

Zależność między pojemnością kondensatora a przenikalnością dielektryczną materiału, jakim wypełniony jest kondensator, wyraża się wzorem:

$$\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot k} \cdot C \quad (4.12)$$

gdzie k jest współczynnikiem zależnym od wymiarów geometrycznych przestrzeni, w której znajduje się masa ziarna.

Dla kondensatora płaskiego współczynnik k jest równy:

$$k = \frac{S}{d} \quad (4.13)$$

gdzie:

S – pole powierzchni elektrody kondensatora [m^2],

d – odległość między elektrodami (wysokość warstwy ziarna) [m].

Znajomość wartości przenikalności jest konieczna przy projektowaniu wilgotnościomierzy, przyrządów mierzących jakość zbóż oraz urządzeń do elektrostatycznego sortowania i elektrostymulacji materiału siewnego [Dąbrowski i in. 1981, Horyński i Pietrzyk 1998].

W literaturze można też spotkać pojęcie podatności elektrycznej. Jest to wielkość powiązana z przenikalnością elektryczną określona zależnością:

$$\chi = \varepsilon - 1 \quad (4.14)$$

Podatność elektryczna jest również wielkością zespoloną.

4.2. Współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$

Innym parametrem opisującym właściwości elektryczne nasion jest współczynnik strat dielektrycznych (współczynnik stratności) $\text{tg}\delta$. Jest to wielkość bezwymiarowa będąca rzeczywistym obrazem strat zachodzących w dielektrykach.

Znajomość współczynnika stratności dielektrycznej $tg\delta$ jest konieczna podczas projektowania dielektrycznych urządzeń suszarniczych [Dąbrowski i in. 1981].

W dielektrykach stałych umieszczonych w zmiennym polu elektrycznym wydziela się energia cieplna na skutek strat dielektrycznych. Aby wyjaśnić pojęcie stratności dielektrycznej, trzeba przeanalizować procesy występujące w kondensatorze wypełnionym dielektrykiem.

Układ izolacyjny ze stratnością dielektryczną charakteryzuje się przepływem prądu o składowej biernej pojemnościowej I_C i o składowej czynnej I_R , a więc można go zastąpić równoległym układem równoważnym zawierającym pojemność i rezystancję pokazanym na rysunku 4.2 [Lisowski 2004].

Z wykresu wskazowego widać, że moc czynna tracona w dielektryku przy napięciu przemiennym, czyli moc strat dielektrycznych, wyraża się wzorem:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (4.15)$$

Im większa stratność dielektryku, tym kąt φ jest mniejszy od 90° , a więc tym bardziej rośnie kąt δ :

$$\delta = 90^\circ - \varphi \quad (4.16)$$

Dla materiałów izolacyjnych najczęściej podaje się nie kąt strat δ , ale tangens tego kąta. Nazywa się go współczynnikiem strat dielektrycznych czy też współczynnikiem stratności i oznacza $tg\delta$ lub symbolem D ($D=tg\delta$) [Hippel 1963, Chełkowski 1993]. Można go przedstawić jako stosunek prądów:

$$tg\delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (4.17)$$

Zależność 4.15 można sprowadzić do postaci:

$$P = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot tg\delta \quad (4.18)$$

Skąd:

$$tg\delta = \frac{1}{\omega \cdot C_r \cdot R_r} \quad (4.19)$$

Często stosuje się również szeregowy układ równoważny dielektryku (rys. 4.1), którego wykres wskazowy pozwala wyrazić współczynnik strat wzorem:

$$tg\delta = \frac{U_R}{U_C} = \omega \cdot C_s \cdot R_s \quad (4.20)$$

Obydwa zastępcze układy kondensatora stratnego z rysunków 4.1 i 4.2 są równoważne dla danej częstotliwości. Znając parametry jednego układu, np. szeregowego, można łatwo przeliczyć je na parametry układu równoległego, korzystając z zależności [Siciński 1968, IEC 250 1969, PN-86/E-04403]:

$$C_R = \frac{C_s}{1 + tg^2\delta} \quad (4.21)$$

$$R_R = \frac{1 + tg^2\delta}{tg^2\delta} \cdot R_s \quad (4.22)$$

Zależności (4.19) i (4.20) wskazują, że współczynnik strat dielektrycznych zmienia się w funkcji częstotliwości. Może się zdarzyć, że w pewnym zakresie wielkość ta zmienia się w sposób niemonotoniczny i występuje ekstremum współczynnika strat. Zjawisko to można wytłumaczyć, analizując budowę dielektryku oraz różne mechanizmy jego polaryzacji.

Współczynnik stratności $tg\delta$ zależy także od temperatury dielektryku. Dla stałych materiałów izolacyjnych jest on zwykle większy przy wyższych temperaturach. Dla cieczy o cząsteczkach niesymetrycznych zależność ta ma zazwyczaj bardziej złożony charakter, ponieważ w pewnych zakresach temperatur mogą występować ekstrema $tg\delta$.

4.3. Rezystywność i przewodność

Rezystywność (rezystancja właściwa) jest to cecha substancji charakteryzująca opór danego materiału. Liczbowo równa jest rezystancji próbki o długości 1 m i polu przekroju poprzecznego 1 m². Można ją wyznaczyć ze wzoru:

$$\rho = \frac{S}{d} \cdot R \quad (4.23)$$

Rezystywność jest wielkością charakterystyczną dla substancji w danej temperaturze.

Jej odwrotność nazywa się przewodnością właściwą (konduktywnością), oznacza się literą σ i wyraża wzorem:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4.24)$$

Konduktywność (przewodnictwo właściwe, przewodność elektryczna właściwa) to miara zdolności materiału do przewodzenia prądu elektrycznego.

Rezystywność i przenikalność elektryczna oraz współczynnik strat dielektrycznych materiałów dielektrycznych zależą od temperatury i wilgotności, jak również od częstotliwości pola elektromagnetycznego [Lisowski 2004].

4.4. Omówienie metod pomiarowych w przedziale częstotliwości 20 Hz – 100 kHz

Częstotliwości pola elektromagnetycznego, przy których prowadzi się pomiary właściwości elektrycznych materiałów dielektrycznych, dzieli się na zakresy [Lisowski 2004]:

- bardzo małe – poniżej 20 Hz,
- akustyczne – od 20 Hz do 100 kHz,
- radiowe – od 100 kHz do 100 MHz,
- mikrofalowe – powyżej 100 MHz.

Najczęściej pomiary przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych dielektryków stałych wykonuje się w zakresie częstotliwości akustycznych lub radiowych [Lisowski 2004].

Materiał pochodzenia biologicznego ze względu na swoją specyfikę (niejednorodność, kształt, budowę komórkową, skład chemiczny) wymaga opracowania technik pomiarowych właściwych dla tego typu materiałów.

W technice dielektryki niejednorodne nie znajdowały dotychczas praktycznego zastosowania, dlatego też nie powstały dla tych materiałów znormalizowane metody pomiarowe mające na celu jednoznaczne określenie ich parametrów elektrycznych [Hippel 1963, Lisowski 2004]. W polskich normach zawarto jedynie wskazówkę, że: „...pomiar dielektryków wykazujących niejednorodną i nieliniową polaryzację można wykonać według: norm przewidzianych do pomiarów materiałów izolacyjnych stałych przy możliwie małych napięciach – od ułamka wolta do kilkunastu woltów”.

Spośród wszystkich metod technicznych do pomiaru elementów układu zastępczego należy w praktyce stosować tylko te, które spełniają wyżej podane warunki Polskiego Komitetu Normalizacji Miar i Jakości [PN-E-04403:1986; IEC 250 1969].

Warstwa ziarniaków zboża charakteryzuje się małą pojemnością i dużą rezystancją. Wyniki pomiarów mogą być więc obciążone dużymi błędami, gdyż znikome wartości prądów przepływających przez próbkę są porównywalne z wartościami tzw. prądów pasożytniczych sprzężeń galwanicznych i pojemnościowych.

Istnieją dwie grupy czynników, które wpływają na dokładność pomiarów wielkości elektrycznych charakteryzujących materiał biologiczny:

- czynniki metrologiczne związane ze stosowaną metodą i aparaturą pomiarową,
- czynniki związane z materiałem.

Czynniki metrologiczne to: rodzaj stosowanej metody pomiarowej, stosowana aparatura, szumy i zakłócenia, prądy pasożytnicze i upływu, pojemności pasożytnicze, a także warunki pomiaru (napięcie, częstotliwość itp.).

Czynniki związane z badanym materiałem to [Lisowski 2004]:

- czynniki wpływające na pomiar bezpośrednio w badanej próbce – układzie pomiarowym: nacisk elektrod, ułożenie materiału na elektrodach, struktura materiału, temperatura, wilgotność, rodzaj i intensywność promieniowania oraz wpływ pola elektromagnetycznego;
- czynniki determinujące właściwości obszarów przyelektrodowych: rodzaj elektrod, oraz inne zjawiska elektrodowe, rozumiane jako mechanizmy determinujące transport nośników ładunku przestrzennego w obszarze przyelektrodowym;
- inne czynniki związane z występowaniem procesów przejściowych określonych przez polaryzację wielosekcyjną, przemieszczanie ładunku przestrzennego oraz przez inne procesy fizyczne, zwykle zależne od wartości natężenia pola elektrycznego i czasu jego przyłożenia.

Pomiarów wielkości elektrycznych charakteryzujących materiał biologiczny dokonuje się metodami bezpośrednimi lub pośrednimi, jednak w zakresie częstotliwości akustycznych pomiarów przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych dokonuje się głównie metodami pośrednimi. Są dwa zasadnicze sposoby pomiaru przenikalności elektrycznej: w dziedzinie czasu – metoda TDR (ang: Time Domain Reflectometry) oraz w dziedzinie częstotliwości FD (ang: Frequency Domain).

W metodzie TDR – reflektometrii czasowo-domenowej – przenikalność elektryczna materiału wyliczana jest na podstawie pomiaru prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego wzdłuż falowodu utworzonego z elektrod przewodzących prąd elektryczny, tworzących sondę pomiarową umieszczoną w badanym materiale. Przenikalność elektryczna warunkuje prędkość propagacji w takim falowodzie. Metoda ta znalazła zastosowanie między innymi w pomiarach przenikalności elektrycznej pyłu pochodzenia roślinnego [Pietrzyk i in. 2008] oraz wilgotności gleby [Skierucha 2005].

W metodach FD przewodzące elektrody traktuje się jako okładki kondensatora, którego dielektrykiem jest mierzony materiał. Wartość przenikalności elektrycznej materiału wpływa na pojemność tak utworzonego kondensatora.

Najczęściej zasada pomiarowa dla metod pośrednich jest jednakowa i polega na zmierzeniu pojemności kondensatora i rezystancji w zastępczych układach (szeregowym, równoległym) z masą ziarna, stanowiącą badaną próbkę. Współczynnik stratności oraz przenikalność elektryczną wyznacza się z właściwych wzorów.

Pomiary cech elektrycznych materiałów biologicznych w zakresie częstotliwości pola elektromagnetycznego od kilkudziesięciu Hz do kilkuset kHz przeprowadza się za pomocą mostków zmiennoprądowych (np. mostka Wiena, wysokonapięciowego mostka Scheringa dla częstotliwości 15 Hz – 1 kHz itp.). Przy zwiększeniu zakresu od setek kHz do kilkudziesięciu MHz pomiar podatności wykonuje się metodami radiowymi (np. metodą rezonansową, dudnieniową, fazową, impulsową itd.) [Chełkowski 1993]. Dla częstotliwości 0–100 kHz stosuje się metody napięciowo-prądowe pomiaru impedancji polegające na bezpośrednim pomiarze miernikami fazoczułymi prądu przepływającego przez badany obiekt i spadku napięcia na tym obiekcie.

Wprowadzenie i rozwój pomiarowych technik mikroprocesorowych pozwoliło na rozpowszechnienie tych metod pomiarowych – obecnie są one najczęściej wykorzystywane. W większości niskonapięciowych przyrządów do pomiaru impedancji w zakresie od 10 Hz do 1 MHz wykorzystuje się tę metodę, budując w oparciu o nią, często sterowane komputerowo, mierniki cyfrowe RLC, nazywane niesłusznie mostkami [Lisowski 2004].

Przy doborze metod pomiarowych ważnym aspektem jest dobranie odpowiedniego układu elektrod pomiarowych. To zaś zależy od fizycznej postaci badanej próbki i częstotliwości pola elektromagnetycznego.

W literaturze można spotkać zastosowanie do tego typu pomiarów układy elektrod:

- płaskich,
- sferycznych,
- cylindrycznych.

Wyróżnia się dwa typy elektrod płaskich:

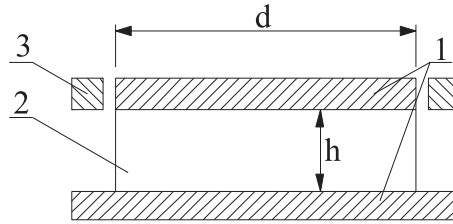
- elektrody z pierścieniem ochronnym (układ trójelektrodowy),
- elektrody bez pierścienia ochronnego.

Układ trójelektrodowy stosuje się przede wszystkim do pomiarów metodami mostkowymi i przy częstotliwościach do 100 kHz (rys. 4.3). Zastosowanie elektrody ochronnej obniża wpływ pojemności brzegowej i wyklucza wpływ upływności powierzchniowej na wynik pomiaru. Efektywność pierścienia ochronnego jest tym większa, im mniejsza jest szczelina między elektrodą pomiarową i ochronną oraz im mniejsza jest grubość badanej próbki.

Elektrody bez pierścienia ochronnego (układ dwuelektrodowy) stosuje się przy częstotliwościach większych niż 10 kHz, przy których zastosowane metody pomiarowe uniemożliwiają przyłączenie elektrod ochronnych, a upływność powierzchniową można pominąć.

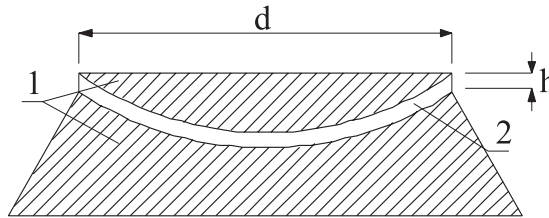
Ze względu na eliminację nierównomierności pola elektromagnetycznego (szczególnie w wysokich częstotliwościach) w przestrzeni pomiarowej stosuje się układ elektrod sferycznych (rys. 4.4).

W miernikach wilgotności stosowany jest najczęściej układ elektrod cylindrycznych (rys. 4.5). Jego wadą, w warunkach laboratoryjnych, jest konieczność przygotowania dużych próbek materiału badawczego, jak również znaczny wpływ stopnia wypełnienia przestrzeni międzyelektrodowej ziarnem na uzyskiwane wyniki (wysokość zasypania cylindra, masa ziarna).



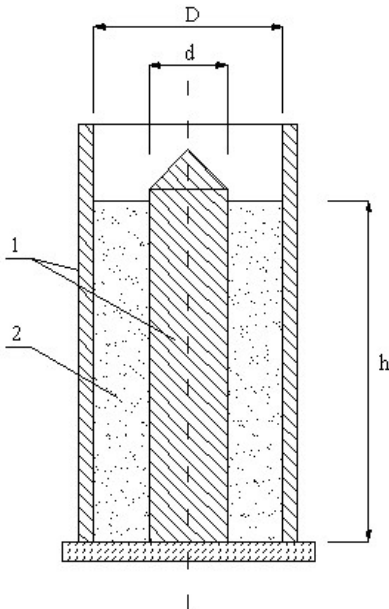
Rys. 4.3. Płaski układ elektrod z pierścieniem ochronnym: 1 – elektrody pomiarowe, 2 – badane ziarno zbóż, 3 – elektroda ochronna, d – średnica elektrody, h – grubość warstwy ziarna

Fig. 4.3. Cheap agreement of electrodes with the protective ring: 1 – measuring electrodes, 2 – examined cereal seed, 3 – protective electrode, d – diameter of the electrode, h – thickness of the layer of the grain



Rys. 4.4. Elektrody sferyczne do pomiaru ziarna: 1 – elektrody, 2 – ziarno, d – średnica elektrody, h – grubość warstwy ziarniaków

Fig. 4.4. Spherical electrodes for the measurement of the grain: 1 – electrodes, 2 – grain, d – diameter of the electrode, h – thickness of the layer of the grain



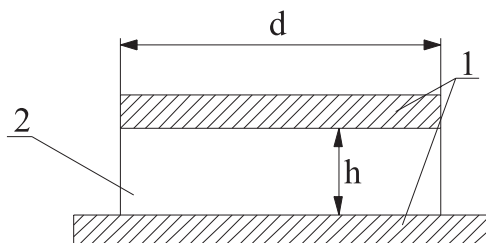
Rys. 4.5. Układ elektrod cylindrycznych stosowany w pomiarach: 1 – elektrody cylindryczne, 2 – ziarno, h – wysokość warstwy materiału badawczego, d – średnica wewnętrznej elektrody, D – średnica zewnętrznej elektrody

Fig. 4.5. Arrangement of cylindrical electrodes applied in measurements: 1 – cylindrical electrodes, 2 – grain, h – height of the layer of research material, d – diameter of the inside electrode, D – diameter of the outside electrode

Spotykaną modyfikacją układu płaskiego i sferycznego jest układ elektrod mikrometrycznych. Elektrody mikrometryczne są utworzone z dwóch krążków dociskowych, przy czym jeden z nich, ruchomy, połączony jest ze śrubą mikrometryczną. Zaletą elektrod mikrometrycznych jest możliwość wykluczenia podczas pomiarów wpływu pojemności pasywnych. Stosuje się je przy pomiarach w zakresie częstotliwości do 300 kHz. Przy pomiarach za pomocą elektrod mikrometrycznych najpierw określa się odstęp między elektrodami z próbką, a następnie mierzy pojemność kondensatora z próbką. Próbkę wyjmuje się i ustawia taki odstęp między elektrodami, aby pojemność powietrznego kondensatora miała tę samą wartość jak przy pomiarze z próbką. Ze zmierzonych wielkości oblicza się przenikalność elektryczną.

Pole elektryczne zamyka się nie tylko między okładkami kondensatora (elektrodami pomiarowymi), ale także w przestrzeni wokół próbki. Kondensator pomiarowy wypełniony dielektrykiem (badanym materiałem) ma pojemność będącą sumą trzech cząstkowych pojemności: pojemności geometrycznej kondensatora z dielektrykiem, pojemności brzegowej oraz pojemności rozproszenia. Kondensator powietrzny i kondensator z dielektrykiem mają tę samą pojemność rozproszenia będącą połączonymi szeregowo pojemnościami rozproszenia każdej z elektrod. Zastosowanie uziemionej elektrody ochronnej eliminuje z pomiaru pojemność brzegową. Dla układu dwuelektrodowego (rys. 4.6) można ją w przybliżeniu obliczyć w oparciu o wzór [Lisowski 2004]:

$$C_b = \pi \cdot d \cdot (0,041 \cdot \varepsilon - 0,077 \cdot \lg h + 0,045) \quad (4.25)$$



Rys. 4.6. Płaski, dwuelektrodowy układ pomiarowy: 1 – elektrody pomiarowe, 2 – ziarno, h – grubość warstwy, d – średnica elektrody

Fig. 4.6. Cheap, two-electrode measuring agreement: 1 – electrode measuring, 2 – grain, h – thickness of layer, d – diameter of the electrode

Na prawidłowość uzyskanych wyników ma też wpływ prawidłowe obliczenie pojemności geometrycznej C_o , jeśli niemożliwy jest pomiar kondensatora powietrznego o takich samych wymiarach jak z materiałem badanym.

Gdy badana próbka zostanie umieszczona w przestrzeni nieekranowanej, wtedy pojemność rozproszenia zmienia się np. w wyniku poruszenia się przewodu lub ręki, dlatego lepiej mierzoną próbkę umieścić w ekranowanej celce.

5. METODYKA BADAŃ

Badania analizowanych w pracy cech i parametrów ziarniaków pszenicy prowadzono na dwóch etapach.

Na pierwszym etapie wyznaczano zależności przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych masy ziarna od przyjętych warunków pomiarów (częstotliwość pola elektromagnetycznego, układ elektrod, przyjęty układ zastępczy) oraz określono wpływ czasu ekspozycji materiału badawczego w polu elektromagnetycznym.

Te pomiary przeprowadzono dla częstotliwości pola elektromagnetycznego: 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz, przy wilgotnościach ziarna od 9 do 24% i temperaturze ziarna 20°C.

Na drugim etapie określono związki między składem chemicznym badanego materiału, stopniem wypełnienia przestrzeni międzyelektrodowej, wilgotnością i temperaturą ziarna a charakteryzującymi ten materiał wielkościami elektrycznymi.

Badaniami objęto ziarno 14 odmian pszenicy. Plan badań zakładał:

- określenie cech chemicznych ziarna – zawartości: białka, glutenu, popiołu, skrobi, tłuszczu, włókna oraz suchej masy;
- wyznaczenie cech technologicznych: liczby opadania oraz liczby sedymentacji;
- pomiar wymiarów ziaren (a , b , c) oraz objętości ziarna V_z w przestrzeni międzyelektrodowej dla wszystkich wilgotności ziarna;
- wyznaczenie aktywności wody a_w dla wszystkich wilgotności ziarna;
- pomiar pojemności i rezystancji kondensatora wypełnionego ziarnem oraz wyliczenie współczynnika strat dielektrycznych i przenikalności elektrycznej. Pomiary przeprowadzono dla próbek ziarna o wilgotnościach: 9, 12, 15, 18, 21, 24% (z dokładnością $\pm 0,5\%$ – rzeczywistą wilgotność ziarna określano po pomiarach metodą suszarkową), oraz w temperaturach: 10, 15, 20, 25, 30°C. Ogółem zbadano 420 próbek w zakresie częstotliwości pola elektromagnetycznego od 100 Hz do 100 kHz (dla 25 wartości częstotliwości pola elektromagnetycznego).

Badania zostały przeprowadzone w laboratoriach Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej pozwalającej na określenie istnienia zależności i ich opisanie ilościowe za pomocą zależności funkcyjnych. W statystycznym opracowaniu wyników wykorzystano metody analizy zmiennych ilościowych i jakościowych. Dla oceny statystycznej znamienności różnic w zakresie rozkładów zmiennych ilościowych i jakościowych przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$. Na ich podstawie podjęta została próba sformułowania modelu matematycznego opisującego zależność właściwości dielektrycznych badanego materiału biologicznego od mierzonych wielkości charakteryzujących materiał badawczy, jak również ustalanych warunków pomiaru. Stworzono też model w oparciu o sztuczne sieci neuronowe. Na podstawie przeprowadzonych oddzielnie pomiarów przeprowadzono weryfikację sformułowanych modeli.

5.1. Materiał badawczy

Do badań wybrano następujące odmiany pszenicy:

- pszenicę ozimą: Almari, Finezja, Kobra, Mewa, Rubens, Tonacja, Turnia, Zyta;
- pszenicę jarą: Helia, Jasna, Monsun, Nawra, Pasteur, Triso.

Pszenice należą do grup wartości technologicznej podanych w tabeli 5.1. W grupie badanych znalazły się odmiany określone przez COBORU jako odmiany wzorcowe: odmiana jara Jasna i odmiana ozima Tonacja [Lista opisowa odmian 2007].

Wszystkie próbki użyte w badaniach były kwalifikowanym materiałem siewnym.

Pozyskany materiał badawczy poddano elementarnej ocenie organoleptycznej obejmującej ocenę zapachu oraz wyglądu ziarna. W żadnej z próbek nie stwierdzono zapachów obcych. Połysk oraz stopień wykształcenia były w normie, nie stwierdzono przesłanek, że ziarno porażone jest jakimikolwiek szkodnikami, wyeliminowano możliwość istnienia w próbce ziaren uszkodzonych. Kontrolowano również masę tysiąca sztuk MTS (znaną także jako masa tysiąca ziaren), mieściła się ona w normie i wahała w granicach od 38,4 g (odmiana TRISO) do 54,3 g (dla odmiany MONSUN).

Próbki ziarna do dalszych badań pobrano zgodnie z Polską Normą PN-86/A-74011. Następnie metodą suszarkową określono ich wilgotność początkową (tab. 5.1). Metoda suszarkowa należy do metod bezpośrednich, polega na ogrzewaniu w suszarce próbki wilgotnego materiału tak długo, aż zostanie z niej usunięta cała nie związana chemicznie woda. Stosuje się w tej metodzie suszenie w temp. 105°C do osiągnięcia przez próbkę stałego ciężaru, co może trwać 72–96 godzin. Wilgotność próbki oznacza się ze wzoru [Mohsenin 1970]:

$$w = \frac{100 \cdot (M - M_s)}{M} \quad (5.1)$$

gdzie:

w – wilgotność materiału [%],

M – masa próbki przed suszeniem [g],

M_s – masa suchej próbki [g].

W celu uzyskania wilgotności w zakresie od 12 do 24% co 3% nasiona zostały nawilżone sztucznie. Poznanie wilgotności początkowej pozwoliło na obliczenie ilości potrzebnej wody do nawilżenia próbek do założonej wilgotności. W wyliczeniach tych posługiwano się wzorem [Mohsenin 1970]:

$$w_{1,2} = M_s \cdot \left[\frac{100 \cdot (w_1 - w_2)}{(100 - w_1) \cdot (100 - w_2)} \right] \quad (5.2)$$

gdzie:

$w_{1,2}$ – ilość wody potrzebnej do nawilżenia od wilgotności początkowej do założonej,

M_s – masa suchej próbki,

w_1 – wilgotność założona próbki,

w_2 – wilgotność początkowa próbki.

Próbki ziarniaków po 200 g umieszczono w czystych i suchych plastikowych, szczelnych pojemnikach o pojemności 0,5 dm³ i nawilżano wodą destylowaną w ilości obliczonej na podstawie wzoru (5.2). Pojemniki umieszczono w mieszarce mechanicznej zbudowanej

w Instytucie Inżynierii Rolniczej. W celu uzyskania równomiernego nawilżenia ziarna materiał mieszany był ciągle przez 48 godzin. Uzyskano próbki ziarna o założonych wilgotnościach z dokładnością $\pm 0,5\%$. Wilgotność faktyczną materiału badawczego ustalano metodą suszarkową.

Tabela 5.1
Table 5.1

Charakterystyka materiału badawczego
Characteristics of research material

Lp. No.	Odmiana Variety	Pszenica Wheat	Grupa wartości technologicznej Group of the technological value	Wilgotność początkowa Initial humidity [%]
1.	Almari	ozima – winter	C	8,8
2.	Finezja	ozima – winter	A	9,2
3.	Helia	jara – spring	B	8,6
4.	Jasna	jara – spring	A	9,4
5.	Kobra	ozima – winter	B	8,8
6.	Mewa	ozima – winter	B	8,9
7.	Monsun	jara – spring	A	8,7
8.	Nawra	jara – spring	A	9,1
9.	Pasteur	jara – spring	C	9,0
10.	Rubens	ozima – winter	A	9,5
11.	Tonacja	ozima – winter	A	8,5
12.	Triso	jara – spring	A	8,8
13.	Turnia	ozima – winter	A	9,5
14.	Zyta	ozima – winter	A	8,5

5.2. Metody pomiaru wielkości elektrycznych

Dla przygotowanych próbek ziarna wyznaczano ich cechy elektryczne takie jak:

- rezystancja,
- pojemność elektryczna,
- przenikalność elektryczna,
- współczynnik strat dielektrycznych (kąąt stratności).

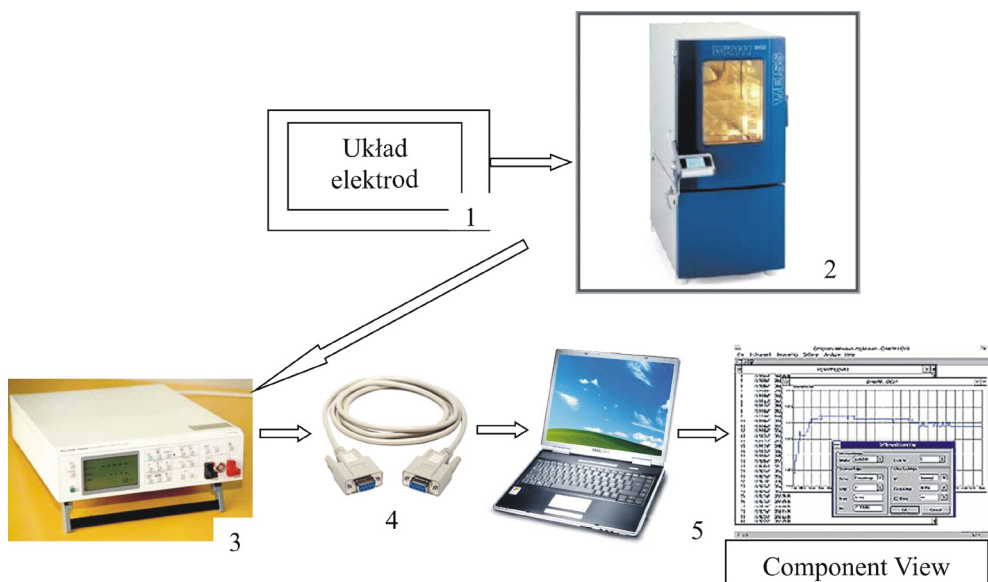
Spośród przedstawionych w rozdziale 4.4 metod badawczych cech elektrycznych materiału wybrano tę, która daje możliwość szybkiego, a zarazem dokładnego pomiaru. Jest to metoda pośrednia, w której najpierw mierzy się pojemność elektryczną warstwy ziarniaków C i jej rezystancję R , mierzy się pojemność powietrznego kondensatora o takiej samej geometrii, a następnie na podstawie otrzymanych wyników oraz wartości częstotliwości pola elektromagnetycznego, w jakiej prowadzono pomiar, oblicza się współczynnik stratności $\tan \delta$ i przenikalność elektryczną ϵ , będące przedmiotem właściwej analizy.

Na rysunku 5.1 przedstawiono stanowisko badawcze. Pomiary przeprowadzono za pomocą cyfrowego miernika RLC o regulowanej częstotliwości od 0 do 100 kHz (analyzer impedancji FLUKE PM6304). Do miernika dołączano układ elektrod umieszczony w komorze klimatyzacyjnej. Materiał badawczy był umieszczony w przestrzeni międzyelektrodowej w postaci warstwy ziarna o grubości kilkakrotnie przekraczającej grubość pojedynczego ziarniaka. W efekcie badań wstępnych stwierdzono, że grubość warstwy ziarniaków (badano w zakresie od grubości pojedynczego ziarniaka do ok. 20 mm) nie ma wpływu na uzyskiwane wartości badanych parametrów elektrycznych. Próbki przetrzymywane były w warunkach pomiaru w komorze klimatyzacyjnej WEISS WK 111 340 – każdorazowo po otwarciu i zamknięciu komory czekano na ustabilizowanie się warunków.

Do pomiarów użyto:

- płaskiego układu elektrod pomiarowych z elektrodą ochronną,
 - sferycznego układu elektrod pomiarowych,
- obydwa ze śrubą mikrometryczną.

W toku badań stosowano dwa schematy zastępcze: szeregowy i równoległy, stwierdzono, że dla tego typu materiału właściwsze (mniejsze odchylenia standardowe) jest stosowanie schematu równoległego (rys. 4.2).



Rys. 5.1. Stanowisko badawcze: 1 – kondensator pomiarowy, 2 – komora klimatyzacyjna, 3 – analizator impedancji, 4 – kabel RS 232, 5 – komputer z oprogramowaniem Component View

Fig. 5.1. Test stand 1 – capacitor, 2 – climatic chamber, 3 – impedance analyzer, 4 – connecting cable RS232, 5 – computer Component View

Zmierzone wartości pojemności elektrycznej masy ziarna C_p i jej rezystancji R_p wstawiono do wzorów (5.3) i (5.4) wyznaczonych dla przyjętego w pomiarach schematu zastępczego równoległego i na ich podstawie obliczono wspomniane już wielkości: $tg\delta$ i ϵ .

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p} \quad (5.3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \frac{C_p}{C_0} \quad (5.4)$$

Komputerowe sterowanie pomiarem pozwoliło na analizowanie wpływu czasu przebywania materiału w polu elektromagnetycznym na rejestrowane wielkości elektryczne.

Pomiary powtarzano pięciokrotnie w celu uniknięcia błędów przypadkowych i uzyskania podstawy do szacowania niepewności pomiaru. Aby usunąć ze zbioru danych pomiary obciążone grubymi błędami, przeprowadzono wstępną selekcję danych. Obliczono średnie wartości wyznaczanych wielkości fizycznych oraz odchylenie standardowe. Wszystkie te punkty, które odstawały od wartości średniej więcej niż trzykrotna wartość odchylenia standardowego, odrzucono i nie brano pod uwagę w dalszej analizie. Wyznaczono wartości średnie oraz odchylenia standardowe – te wartości stały się podstawą między innymi do wyznaczenia niepewności pomiarów, a następnie empirycznych krzywych regresji badanych zależności. Do konstrukcji modeli użyto bezpośrednio danych pomiarowych.

5.3. Metody pomiaru wielkości geometrycznych i chemicznych ziarna pszenicy

Cechami uwzględnianymi przy próbie interpretacji uzyskanych wyników są wymiary ziaren, które umieszczone zostały w przestrzeni międzyelektrodowej. Charakterystyka wielkości ziarna sprawia jednak trudności z matematycznego punktu widzenia, gdyż stanowi ono nieregularną bryłę o znacznej zmienności kształtu. Dlatego też opisując wielkość ziarniaków, przyjęto trzy podstawowe wymiary: największy – długość, najmniejszy – grubość i pośredni – szerokość [Szot 1976]. Wielkości te zostały wyznaczone dla wszystkich odmian dla całego zakresu pomiarowego wilgotności. Mierzono wymiary wszystkich ziaren znajdujących się w przestrzeni międzyelektrodowej, a do analizy brano wartości średnie z uzyskanych wyników pomiarowych.

Wyznaczono również objętość ziarna znajdującego się w przestrzeni międzyelektrodowej, co pozwoliło na porównanie stopnia wypełnienia przestrzeni międzyelektrodowej. Mierzono ilość oleju, który wypełnił wolne przestrzenie między ziarniakami i na tej podstawie wyznaczono objętość ziarna w przestrzeni międzyelektrodowej.

Analiza składu chemicznego badanego ziarna prowadzona była w laboratoriach Katedry Szczegółowej Uprawy Roślin przy zastosowaniu analizy w podczerwieni NIR (Infra Analyzer 450^o firmy De – Laval). Pomiary za pomocą spektrometrów do bliskiej podczerwieni umożliwiają jednoczesne oznaczanie wielu składników, wymagany jest tylko jeden układ analityczny oraz jednorazowe wzorcowanie. Przygotowanie próbki polega na jej rozdrobnieniu i umieszczeniu w pojemniku pomiarowym. Czas pomiaru nie przekracza 1 min, otrzymuje się w ten sposób informacje o zawartości: suchej masy, włókna, tłuszczu, białka i popiołu.

W Laboratorium Zakładu Technologii Zbóż przeprowadzono badania składu chemicznego ziarna metodami tradycyjnymi. W otrzymanych próbkach określone były takie parametry jak:

- zawartość białka ogółem metodą Kjeldahla wg PN-75/A-0418,
- zawartość skrobi metodą polarymetryczną Lintnera,
- zawartość glutenu mokrego wg PN-77/A-74041,
- zawartość popiołu wg PN-ISO 2171,
- zawartość suchej masy.

Dla określenia składu chemicznego odmian badano materiał o wilgotności 15%.

Aktywność wody a_w w materiale biologicznym określano za pomocą miernika aktywności wody KMAW2-7 z termostatyczną komorą i wymuszonym obiegiem powietrza, przez umieszczenie ziarniaków pszenicy w zamkniętej komorze na czas wystarczający do osiągnięcia równowagi. Czas badania jednej próbki wynosi około 20–30 minut. Parametr ten jest istotny ze względu na właściwości przechowalnicze materiału biologicznego. Bezpośredni związek z aktywnością wody ma rozwój mikroflory. Drobnoustroje nie mogą się rozmnażać, gdy $a_w < 0,6$. Poszczególne grupy drobnoustrojów rozwijają się w różnych zakresach aktywności wody, ale większość z nich wymaga $a_w > 0,8$. Wyjątkiem są drożdże osmofilne i niektóre pleśnie, które mogą rozmnażać się przy $a_w = 0,6–0,65$ [Lewicki 2003].

5.4. Analiza niepewności wyników pomiarów

Według definicji podanej w międzynarodowym słowniku podstawowych i ogólnych terminów metrologii: niepewność pomiaru to parametr związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej. Niepewność pomiaru jest obrazem braku dokładnej znajomości wartości wielkości mierzonej. Jest ona parametrem określającym z założonym prawdopodobieństwem granice przedziału, w którym znajduje się nieznaną, prawdziwą wartość rzeczywistą mierzonej wielkości X :

$$X - u(x) \leq X \leq X + u(x) \quad (5.5)$$

gdzie:

X – surowy wynik pomiaru,

$u(x)$ – niepewność pomiaru.

Niepewność pomiaru ma zawsze charakter losowy, charakteryzuje rozrzut wartości, które można przypisać wielkości mierzonej. Można ją wyznaczyć na podstawie rozkładu statystycznego wyników wielu pomiarów.

Zgodnie z przyjętym podziałem (ISO 17025) rozróżnia się trzy rodzaje niepewności pomiarowej [Wyrażanie niepewności pomiaru 1999]:

- standardową, równą odchyleniu standardowemu,
- standardową złożoną,
- rozszerzoną, będącą wielokrotnością niepewności standardowej.

Wyróżnia się również niepewność typu A wyznaczaną metodami statystycznymi oraz typu B, przy wyznaczaniu której uwzględnia się wiele czynników wpływających na niepewność pomiaru. Niepewność typu A można oszacować, jeśli ten sam pomiar wykonuje się wielokrotnie w tych samych warunkach. W przypadku gdy wyniki pomiarów są takie same lub podlegają systematycznym zmianom, wówczas metody statystyczne nie mogą być zastosowane i wtedy wyznacza się niepewność typu B.

Niepewność standardowa jest określana na poziomie ufności $p = 0,68$ [Wyrażanie niepewności pomiaru 1999]. Taki poziom jest zazwyczaj niewystarczający, dlatego dla okre-

ślenia wiarygodności wyników pomiarów stosuje się niepewność rozszerzoną (całkowitą), która jest iloczynem niepewności standardowej i współczynnika rozszerzenia. W laboratoriach badawczych niepewność pomiaru oblicza się najczęściej na poziomie ufności $p = 0,95$. Gdy wartości mierzonych wielkości mają rozkład normalny, to dla poziomu ufności $p = 0,95$ współczynnik rozszerzenia k_p równy jest 2 [Lisowski 2004]. Jeśli rozkłady nie są normalne, to współczynnik rozszerzenia jest równy kwantylowi rozkładu t-Studenta dla wymaganego poziomu ufności i efektywnej liczby swobody. Dla poziomu ufności $p = 0,95$ oraz czterech stopni swobody obliczony w ten sposób współczynnik rozszerzenia k_p wynosi 2,78 (dla 2 stopni swobody $k_p = 4,30$) [Lisowski 2004].

W badaniach materiałowych najistotniejszym czynnikiem wpływającym na wynik pomiarów, a zarazem całkowitą niepewność pomiarową, jest niestabilność właściwości badanego materiału. Często uzyskuje się dość znaczny rozrzut wyników, spowodowany niestabilnością właściwości oraz udziałem sygnałów zakłócających. Jest to szczególnie widoczne podczas badań właściwości elektrycznych dielektryków [Lisowski 2004]. Ponieważ w pomiarach stosuje się przyrządy o dużej rozdzielczości, cyfrowe, o wysokiej klasie, niedokładność podstawowa przyrządu w porównaniu z niedokładnością wynikającą z niestabilności właściwości badanego materiału jest pomijalnie mała. Najczęstszym przypadkiem jest niepewność statystyczna spowodowana bądź statystyczną naturą badanego zjawiska, bądź statystycznym szumem aparatury, a także czynnikiem czasu, który warunkuje zmianę właściwości przedmiotu badanego.

Podsumowując, w prowadzonych pomiarach przenikalności elektrycznej oraz współczynnika strat dielektrycznych dla wyznaczenia niepewności pomiaru należy obliczyć odchylenie standardowe wartości średniej. Ponieważ liczba pomiarów jest mniejsza od 30, wartość uzyskaną należy przemnożyć przez wyznaczony dla liczby stopni swobody i założonego poziomu ufności kwantyl rozkładu t-Studenta.

W stosowanych w tym przypadku pomiarach pośrednich mierzona wielkość wyjściowa Y jest funkcją mierzonych bezpośrednio wielkości wejściowych X_j . Wartości średnie oraz niepewność standardową typu A wyznacza się dla każdej wielkości wejściowej (pojemność elektryczna C oraz rezystancja R) według wzoru:

$$u_A(\bar{X}_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_j)^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (5.6)$$

Rozszerzoną niepewność standardową wielkości wyjściowej wyznacza się ze wzoru:

$$U_A(Y) = k_p \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j \cdot u_A(\bar{X}_j)} \quad (5.7)$$

gdzie:

c_j – współczynnik wrażliwości

$$c_{cx} = \frac{1}{C_o} \quad (5.8)$$

$$c_{co} = \frac{C_x}{C_o^2} \quad (5.9)$$

Nie zawsze można ująć w analizie niepewności pomiarowej wszystkie czynniki. Podczas rutynowych pomiarów praktycznie nie można określić wartości liczbowej niepewności pomiaru pojemności spowodowanej wpływem pojemności kontaktowych elektrod z dielektrykiem. Problemem jest również minimalizacja rozproszonych pojemności sprzęgających. Mimo doboru odpowiednich metod pomiarowych, ekranowania i innych działań mających na celu minimalizację wpływu tego czynnika te pojemności mają swój udział rzędu 1 pF lub więcej [Lisowski 2004]. Można więc szacować, że wynikająca stąd niepewność pomiaru pojemności C dla mierzonego zakresu jest na poziomie od 0,1 do 10%.

Bilans niepewności standardowej złożonej przenikalności elektrycznej oraz współczynnika strat dielektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy (wyznaczony dla przykładowego punktu pomiarowego: $f=1$ kHz, $w=12\%$, $T=20^\circ\text{C}$, odmiana Finezja) przedstawiono w tabelach 5.2 oraz 5.3.

W przedstawionym w tabeli 5.2 przykładzie niepewność względna pomiaru przenikalności elektrycznej wynosi 0,31%. Względna niepewność pomiaru współczynnika strat dielektrycznych (tab. 5.3) wynosi 0,07%.

Na podstawie wyników analogicznie przeprowadzonych obliczeń dla wszystkich wariantów pomiarowych można stwierdzić, że względna niepewność pomiarowa przenikalności elektrycznej mieściła się w zakresie do 7% a współczynnika strat dielektrycznych do 11% wielkości mierzonych. Szczególnie duże niepewności pomiaru otrzymywano dla wilgotności ziarniaków powyżej 20%. Najprawdopodobniej przyczyną jest zawilgocenie powierzchni niektórych ziaren przy tak wysokich wilgotnościach, co powoduje dodatkowe błędy wynikające z niejednorodności badanych próbek oraz zwiększa rozrzut otrzymywanych wyników pomiarów.

Tabela 5.2
Table 5.2

Przykład bilansu niepewności przenikalności elektrycznej
Example of balance of the uncertainty of the electric permittivity

Mierzona wielkość Measured size	Wartość średnia Average	Współczynnik wrażliwości Rate of the sensitivity C_j	Niepewność standardowa Standard uncer- tainty $u(X_i)$ (5.6)	$c_i^2 \cdot u^2(X_i)$	Liczba stopni swobody d.f.
Pojemność kondensatora próżniowego Capacity of the vacuum condenser	$3,05 \cdot 10^{-12}$ F/m	$7,76 \cdot 10^{11}$ (5.8)	$8,37 \cdot 10^{-15}$	$4,22 \cdot 10^{-5}$	4
Pojemność kondensatora z ziarnem Capacity of the condenser with the grain	$7,22 \cdot 10^{-12}$ F/m	$3,28 \cdot 10^{11}$ (5.9)	$6,97 \cdot 10^{-14}$	$5,22 \cdot 10^{-4}$	4
Przenikalność elektryczna Electric permittivity	20,9593 pF/m			$U(\epsilon)=0,066$ (5.7)	

Tabela 5.3
Table 5.3

Przykład bilansu niepewności współczynnika strat dielektrycznych
Example of balance of the uncertainty of the dielectric loss factor

Mierzona wielkość Measured size	Wartość średnia Average	Współczynnik wrażliwości Rate of the sensitivity C_j	Niepewność standardowa Standard uncertainty $u(X_i)$ (5.6)	$c_i^2 \cdot u^2(X_i)$	Liczba stopni swobody d.f.
Pojemność kondensatora z ziarnem Capacity of the condenser with the grain	$7,22 \cdot 10^{-12}$	$3,71 \cdot 10^{+06}$	$1,94 \cdot 10^{-13}$	$5,17 \cdot 10^{-13}$	4
Rezystancja kondensatora z ziarnem Resistance of the condenser with the grain	$3,71 \cdot 10^{+06}$	$7,22 \cdot 10^{-12}$	$6,08 \cdot 10^{+05}$	$1,93 \cdot 10^{-11}$	4
Współczynnik strat dielek- trycznych Dielectric loss factor	0,1683			$U(\text{tg } \delta)=1,27 \cdot 10^{-04}$ (5.7)	

6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Prowadzenie dalszych rozważań wymaga w pierwszej kolejności odniesienia się do problemu wpływu czasu ekspozycji ziarna w polu elektrycznym na wartość przenikalności dielektrycznej ϵ i współczynnika stratności $tg\delta$.

Stwierdzono istotny wpływ tego czasu jedynie w sytuacji, kiedy w badaniach wstępnych próbki o wysokiej wilgotności badano w warunkach pokojowych (temp. 20–30°C i wilgotność 50–60%). Charakter zmian badanych wielkości elektrycznych w funkcji czasu dla wszystkich odmian pszenicy i wilgotności był w większości przypadków podobny. Największe zmiany następowały w ciągu pierwszych 30 s, a po upływie minuty nie przekraczały 1% wartości wielkości mierzonej.

Przy prowadzeniu pomiarów w komorze klimatyzacyjnej, gdzie temperatura i wilgotność otoczenia były zrównoważone z temperaturą i wilgotnością materiału badawczego, wpływ czasu ekspozycji w zakresie czasu wielokrotnie przekraczającym czas pomiaru (do 60 s) okazał się nieistotny – nie zaobserwowano występujących zmian pojemności elektrycznej ani rezystancji warstwy ziarniaków w funkcji czasu. Ponieważ pomiary właściwe prowadzone były w komorze klimatyzacyjnej, w dalszych rozważaniach nie uwzględnia się czasu ekspozycji ziarna, tym bardziej że była ona stała ze względu na zastosowanie komputerowego sterowania przebiegiem pomiaru – zasilanie elektrod pomiarowych było dołączane po ustabilizowaniu się warunków w komorze klimatyzacyjnej.

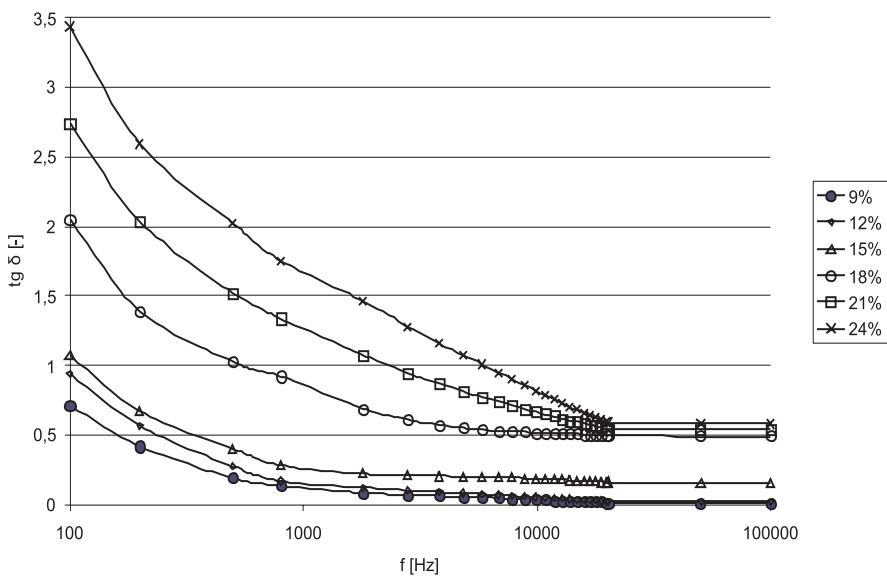
Analiza uzyskanych wyników pomiarów pozwoliła na wybór układu elektrod pomiarowych. Nie występują istotne statystycznie różnice między rozrzutami wyników pomiarów dla tego typu materiału przy pomiarach w płaskim i sferycznym układzie elektrod pomiarowych. Dlatego w dalszych pomiarach stosowano wygodniejszy z praktycznego punktu widzenia układ płaski trójelektrodowy.

Wyniki przeprowadzonej wieloczynnikowej analizy wariancji wskazują, że zarówno współczynnik strat dielektrycznych, jak i przenikalność elektryczna zależą w statystycznie istotny sposób (poziom istotności $\alpha = 0,05$) od:

- częstotliwości pola elektromagnetycznego, w jakiej prowadzone są pomiary,
- wilgotności ziarniaków,
- odmiany pszenicy.

Temperatura próbki ziarna wpływa znamiennej jedynie na współczynnik strat dielektrycznych ($p = 0,0097$), natomiast jej wpływ na wartości przenikalności elektrycznej są nieistotne statystycznie ($p = 0,9714$). Nieistotna statystycznie okazała się zarówno dla przenikalności elektrycznej ($p = 0,1316$), jak i współczynnika strat dielektrycznych ($p = 0,4318$) klasa technologiczna badanych odmian pszenicy.

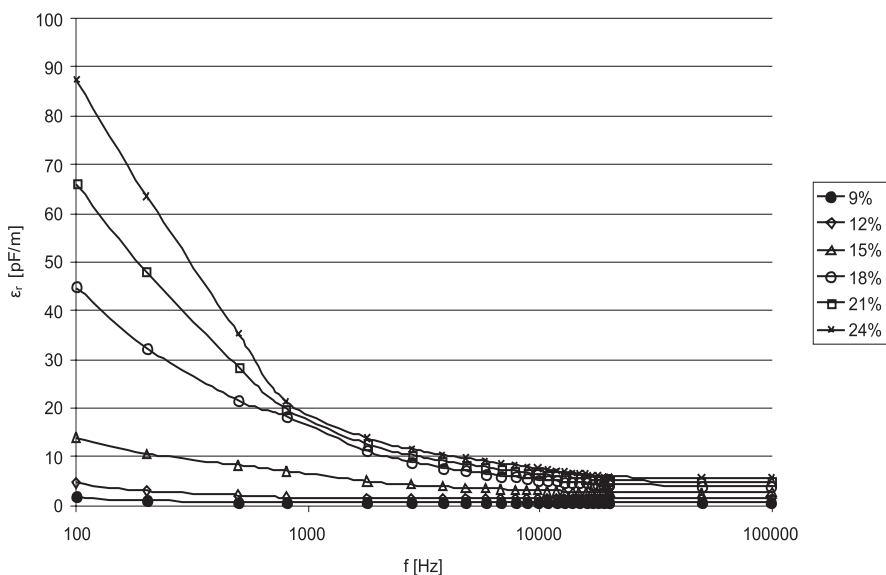
Na rysunkach przedstawiono wartości średnie współczynnika strat dielektrycznych (rys. 6.1) oraz przenikalności elektrycznej (rys. 6.2) dla pszenicy ozimej odmiany Zyta.



Rys. 6.1. Zależność współczynnika strat dielektrycznych ziarniaków pszenicy od częstotliwości pola elektromagnetycznego dla różnych wilgotności, w temperaturze 20°C – pszenica ozima Zyta
 Fig. 6.1. Dependence of coefficient dielectrical losses on frequency for different humidities, in temperature 20°C (winter wheat – Zyta)

Charakter zależności współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ od częstotliwości pola elektromagnetycznego, w jakiej prowadzone są pomiary, jest taki sam dla różnych wilgotności ziarna. Wzrost częstotliwości powoduje, że wartości $tg\delta$ wyznaczone dla ziarna pszenicy w masie wyraźnie maleją, jak również zmniejsza się zakres wartości tego parametru. Przy częstotliwości $f = 100$ Hz współczynnik strat dielektrycznych $tg\delta$ zmienia się w zależności od wilgotności ziarna pszenicy w zakresie od 0,58 do 3,43, a dla f wynoszącej 100 kHz współczynnik strat dielektrycznych dla badanego zakresu wilgotności materiału przyjmuje wartości od 0,01 do 0,71.

Przenikalność elektryczna również maleje jednocześnie ze wzrostem częstotliwości pola elektromagnetycznego w przestrzeni międzyelektrodowej. Dla ziarna suchego zmiany tej wielkości w funkcji częstotliwości są zdecydowanie mniejsze niż dla wilgotnego. Ziarno pszenicy Zyta o wilgotności 9% wraz ze zmianą częstotliwości f od 100 Hz do 100 kHz zmniejsza swoją przenikalność elektryczną prawie trzykrotnie, podczas gdy dla wilgotności 24% wartości przenikalności elektrycznej zmniejszają się 15 razy.



Rys. 6.2. Zależność względnej przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy od częstotliwości pola elektromagnetycznego dla różnych wilgotności, w temperaturze 20°C – odmiana ozima Zyta

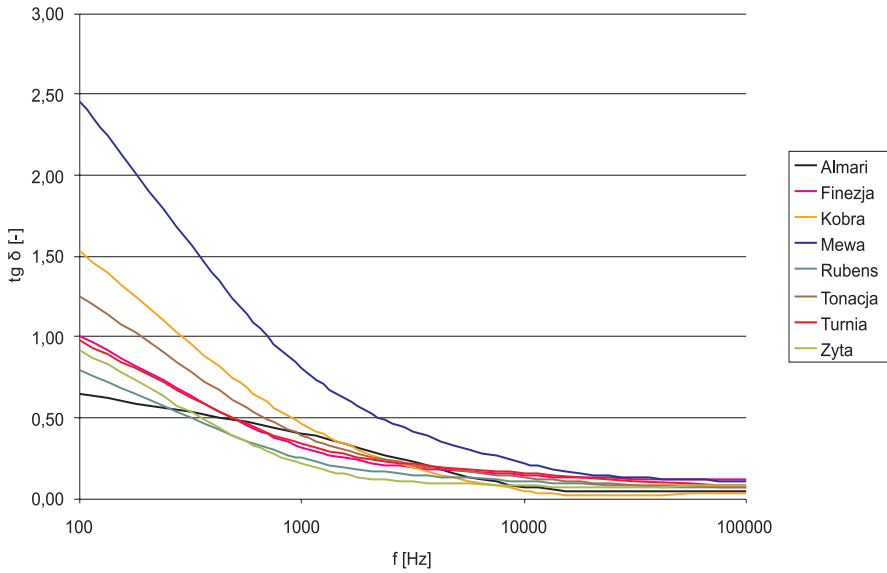
Fig. 6.2. Dependence of relative permittivity on frequency for different humidities, in temperature 20°C (winter wheat – Zyta)

Analogiczne spostrzeżenia dotyczą cech elektrycznych ziarna pozostałych badanych odmian pszenicy. Zwraca uwagę znaczne zróżnicowanie uzyskiwanych wartości obydwu analizowanych parametrów dla różnych odmian.

W dalszej części rozdziału przedstawiono przykładowe, typowe zależności opisujące wpływ wymienionych ilościowych zmiennych niezależnych na analizowane wielkości elektryczne charakteryzujące warstwę ziarniaków pszenicy. Przedstawione na rysunkach krzywe obrazują charakter zmian analizowanych wielkości fizycznych w funkcji istotnych statystycznie zmiennych ilościowych. Przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów wyznaczono parametry równań opisujących badane zależności.

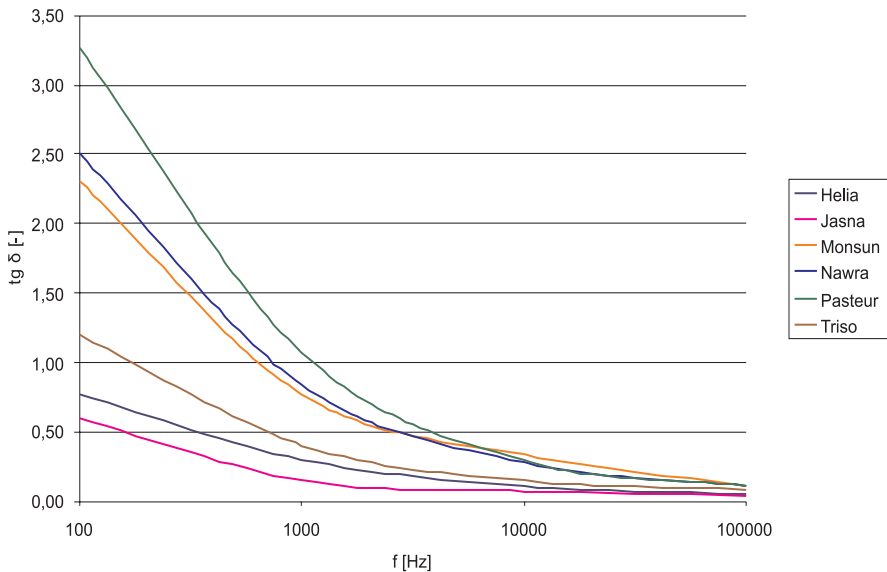
6.1. Wpływ częstotliwości pola elektromagnetycznego na cechy elektryczne ziarna

Analizowano zależności współczynnika strat dielektrycznych (rys. 6.3, 6.4) oraz przenikalności elektrycznej (rys. 6.5, 6.6) od częstotliwości pola elektromagnetycznego w przestrzeni międzyelektrodowej. Pokazane przykładowe krzywe wyznaczono dla wszystkich badanych odmian pszenicy dla wilgotności równej 15% oraz w temperaturze 20°C. Przebiegi analizowanych zmian obydwu wielkości fizycznych w funkcji częstotliwości pola elektromagnetycznego mają taki sam charakter w całym badanym zakresie wilgotności i temperatury materiału badawczego.



Rys. 6.3. Zależność współczynnika strat dielektrycznych pszenicy ozimej od częstotliwości pola elektromagnetycznego, $w = 15\%$, $T = 20^{\circ}\text{C}$

Fig. 6.3. The dependence of coefficient dielectrical losses $tg\delta$ on frequency f , (winter wheat grains), $w = 15\%$, $T = 20^{\circ}\text{C}$



Rys. 6.4. Zależność współczynnika strat dielektrycznych pszenicy jarej od częstotliwości pola elektromagnetycznego, $w = 15\%$, $T = 20^{\circ}\text{C}$

Fig. 6.4. The dependence of coefficient dielectrical losses $tg\delta$ on frequency f , (spring wheat grains), $w = 15\%$, $T = 20^{\circ}\text{C}$

Badane odmiany charakteryzują się znacznie różniącymi zakresami zmian współczynnika strat dielektrycznych w funkcji częstotliwości (rys. 6.3, 6.4).

Współczynnik strat dielektrycznych maleje jednocześnie ze wzrostem częstotliwości pola elektromagnetycznego, charakter tej zależności opisuje funkcja potęgowa:

$$\operatorname{tg}\delta = a_1 \cdot f^{b_1} \quad (6.1)$$

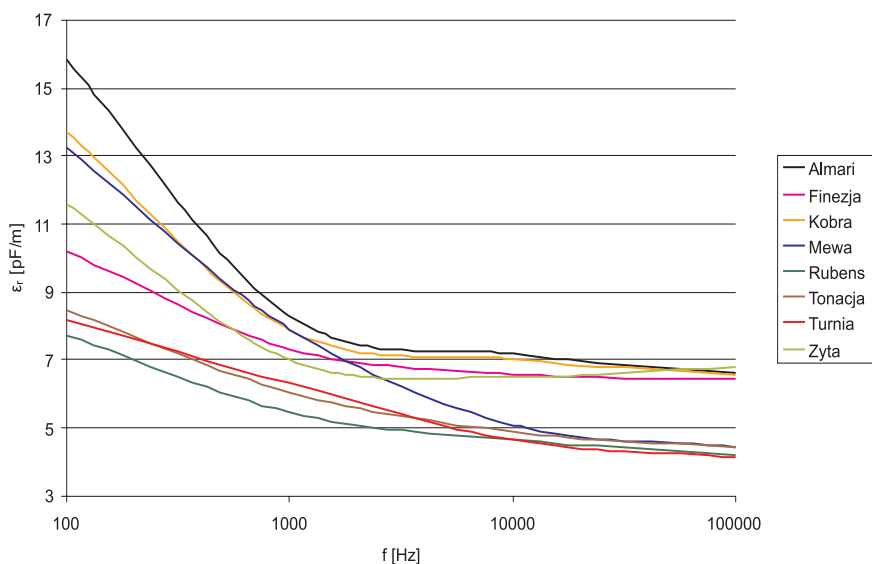
gdzie a_1, b_1 są współczynnikami równania wyznaczonymi empirycznie. Dla przedstawionych na rysunkach 6.3 i 6.4 krzywych obliczone współczynniki determinacji R^2 zawierały się w zakresie od 86,5 do 99,8%. Wyraźnie widać na przedstawionych rysunkach różnice międzyodmianowe determinujące przebiegi analizowanych zależności.

Na rysunkach 6.5 i 6.6 przedstawiono charakterystyki dyspersyjne – $\varepsilon(f)$ odmian ozimych i jarych warstwy ziarniaków pszenicy. Również w przypadku przenikalności elektrycznej wyraźnie widać, że jest ona modyfikowana przez właściwości odmian pszenicy.

Przenikalność elektryczna maleje wraz ze wzrostem częstotliwości pola elektromagnetycznego, zależność tę można opisać funkcją:

$$\varepsilon = a_2 + \frac{b_2}{f} \quad (6.2)$$

gdzie a_2, b_2 są współczynnikami równania wyznaczonymi empirycznie. Dla krzywych przedstawionych na rysunkach 6.5 i 6.6 uzyskano współczynniki determinacji R^2 od 80,2 do 99,8%.

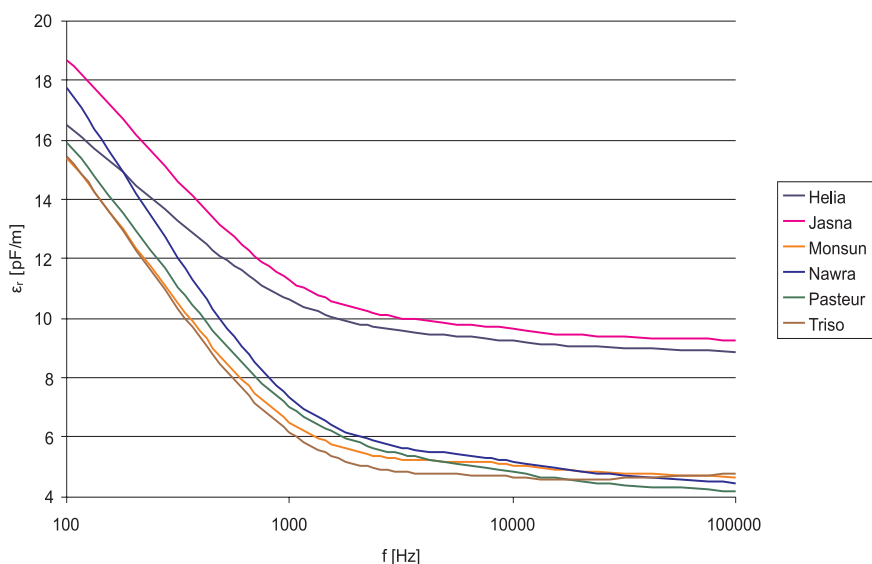


Rys. 6.5. Zależność przenikalności elektrycznej pszenicy ozimej od częstotliwości pola elektromagnetycznego, $w = 15\%$, $T = 20^\circ\text{C}$

Fig. 6.5. The dependence of electric permittivity ε on frequency f , (winter wheat grains), $w = 15\%$, $T = 20^\circ\text{C}$

Jednak analiza wszystkich wariantów pomiarowych w całym zakresie zmian parametrów wejściowych nie wskazywała aż tak dobrego dopasowania, szczególnie dla wysokich wilgotności, powyżej 17%. Próby dopasowania funkcji opisującej zależność przenikalności

elektrycznej od częstotliwości pola elektromagnetycznego warstwy ziarniaków pszenicy (bez uwzględnienia właściwości odmianowych) nie powiodły się, ponieważ uzyskane współczynniki determinacji spadały nawet do 40–60%.



Rys. 6.6. Zależność przenikalności elektrycznej pszenicy jarej od częstotliwości pola elektromagnetycznego, $w = 15\%$, $T = 20^\circ\text{C}$

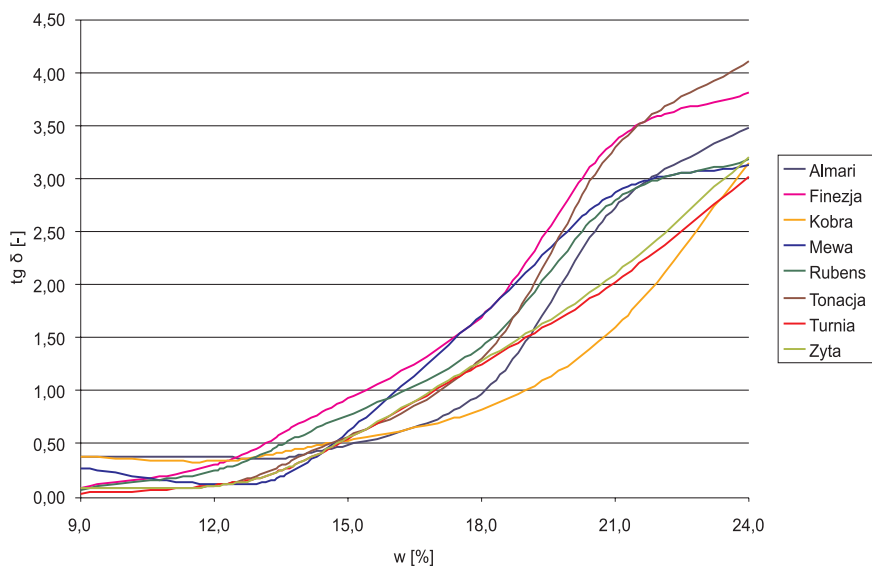
Fig. 6.6. The dependence of electric permittivity ε on frequency f , (spring wheat grains), $w = 15\%$, $T = 20^\circ\text{C}$

Wyraźnie widać (rys. 6.5, 6.6) występujące różnice międzyodmianowe, odmiany Jasna i Helia znacznie odbiegają od pozostałych odmian jarych pod względem wartości przenikalności elektrycznych praktycznie w całym zakresie częstotliwości pola. Również w grupie odmian ozimych zwraca uwagę grupa: Almari, Finezja, Kobra i Zyta, dla których wartości tego parametru znacząco odbiegają od uzyskanych dla pozostałych odmian w częstotliwościach pomiarowych powyżej 1 kHz.

6.2. Wpływ wilgotności materiału badawczego na cechy elektryczne ziarna

Wilgotność ziarniaków pszenicy jest kolejnym analizowanym czynnikiem wpływającym na poziom współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ oraz przenikalności elektrycznej ε .

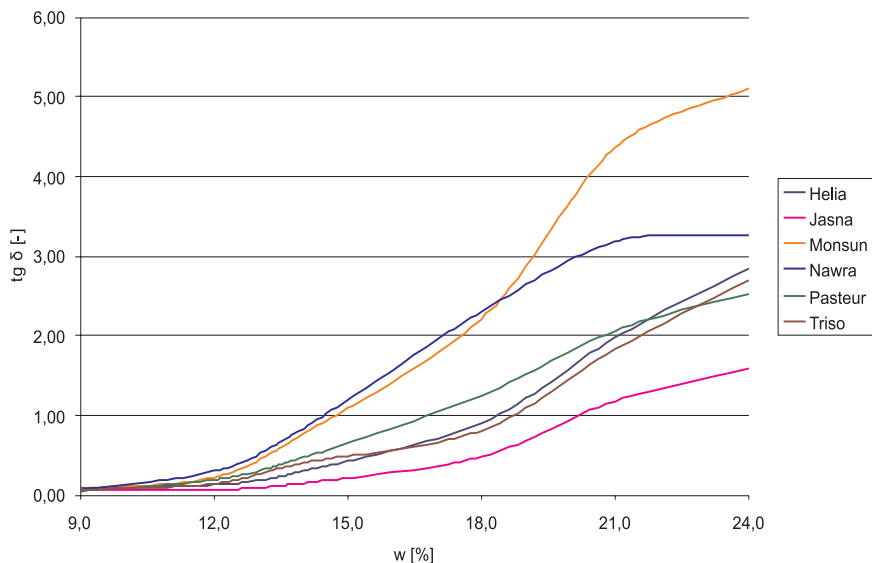
Na rysunkach 6.7 oraz 6.8 przedstawiono wpływ wilgotności na współczynnik strat dielektrycznych dla wybranej częstotliwości pola elektromagnetycznego $f = 1$ kHz, dla temperatury próbki $T = 20^\circ\text{C}$. Wybrano jako przykładową częstotliwość pola elektromagnetycznego $f = 1$ kHz, ponieważ w tej właśnie częstotliwości najwyraźniej widoczne są różnice międzyodmianowe w całym zakresie wilgotności ziarna. Podkreślić należy, że przedstawione przykładowe przebiegi zależności są charakterystyczne dla całego zakresu częstotliwości pola elektromagnetycznego (100 Hz – 100 kHz) oraz temperatury warstwy ziarniaków od 10 do 30°C .



Rys. 6.7. Zależność współczynnika strat dielektrycznych pszenicy ozimej od wilgotności ziarna, $f = 1 \text{ kHz}$, $T = 20^\circ\text{C}$

Fig. 6.7. The dependence of coefficient dielectrical losses $tg\delta$ on humidity w , (winter wheat grains), $f = 1 \text{ kHz}$, $T = 20^\circ\text{C}$

Empiryczne krzywe regresji wyraźnie wskazują, że zależności pomiędzy współczynnikiem strat dielektrycznych a wilgotnością oraz zależności pomiędzy przenikalnością ϵ a wilgotnością materiału nie mają charakteru liniowego.



Rys. 6.8. Zależność współczynnika strat dielektrycznych pszenicy jarej od wilgotności ziarna, $f = 1 \text{ kHz}$, $T = 20^\circ\text{C}$

Fig. 6.8. The dependence of coefficient dielectrical losses $tg\delta$ on humidity w (spring wheat grains), $f = 1 \text{ kHz}$, $T = 20^\circ\text{C}$

Zależność tę można opisać funkcją sigmoidalną 6.3. Prowadzone badania dla innych niż przedstawione na wykresach warunków pomiaru (wyższe wilgotności, inne temperatury) potwierdziły, że przebiegi funkcji mają zawsze taki charakter:

$$\operatorname{tg} \delta = a_3 + \frac{b_3}{1 + \exp\left(-\left(\frac{w - c_3}{d_3}\right)\right)} \quad (6.3)$$

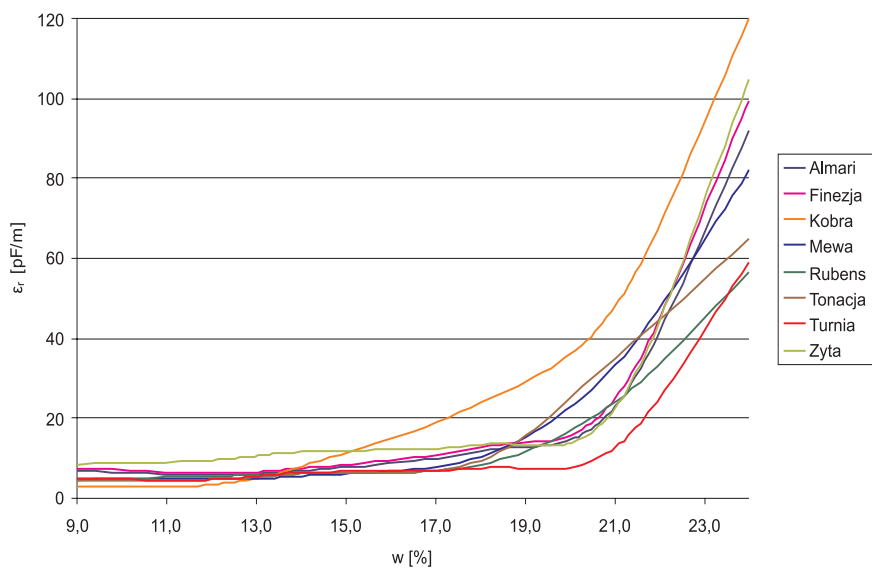
gdzie a_3, b_3, c_3, d_3 są parametrami wyznaczonym empirycznie. Miarą dopasowania są uzyskane współczynniki determinacji w zakresie od 75 do 99%.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono zależności przenikalności elektrycznej od wilgotności dla badanych odmian pszenicy: jarych – rys. 6.9 i ozimych – rys. 6.10.

Jednocześnie ze wzrostem wilgotności przenikalność elektryczna rośnie. Dla wszystkich badanych odmian zależność przenikalności elektrycznej od wilgotności można opisać funkcją eksponentialną postaci:

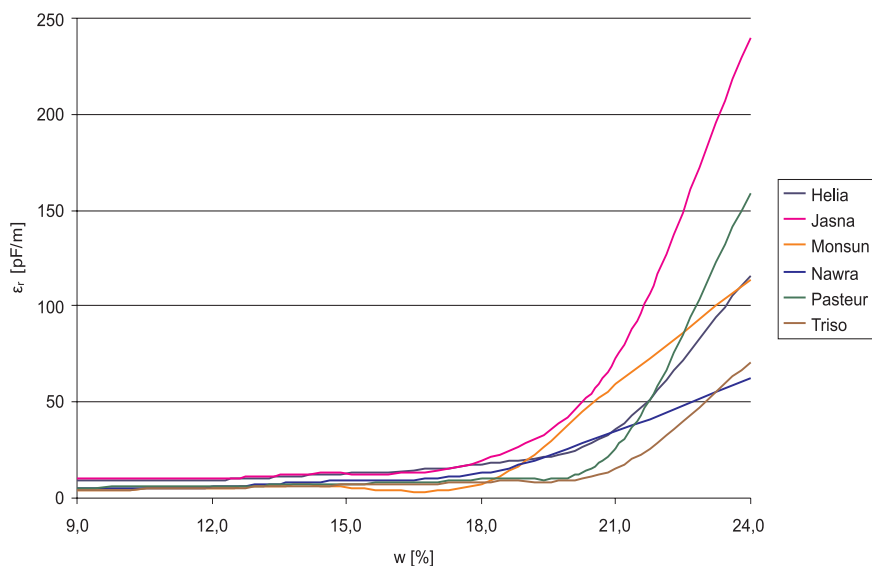
$$\varepsilon = a_4 + b_4 \cdot e^{(w/c_4)} \quad (6.4)$$

gdzie a_4, b_4, c_4 są parametrami wyznaczonymi empirycznie. Uzyskane współczynniki determinacji R^2 krzywoliniowej wynoszą od 75 do 95%.



Rys. 6.9. Zależność przenikalności elektrycznej pszenicy ozimej od wilgotności ziarna, $f = 1$ kHz, $T = 20^\circ\text{C}$

Fig. 6.9. The dependence of electric permittivity ε on humidity w (winter wheat grains) $f = 1$ kHz, $T = 20^\circ\text{C}$



Rys. 6.10. Zależność przenikalności elektrycznej pszenicy jarej od wilgotności ziarna, $f = 1$ kHz, $T = 20^{\circ}\text{C}$

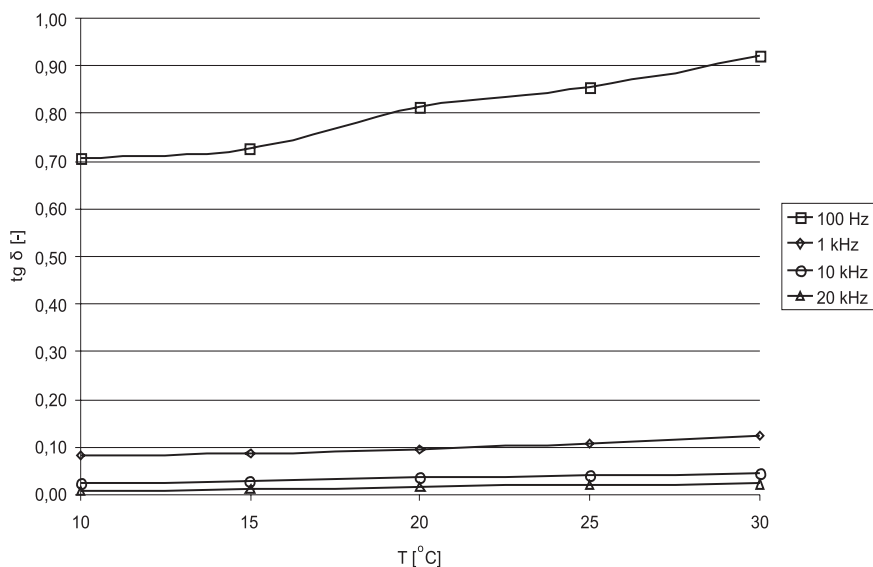
Fig. 6.10. The dependence of electric permittivity ε on humidity w (spring wheat grains) $f = 1$ kHz, $T = 20^{\circ}\text{C}$

Istotne (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$) są różnice wartości przenikalności dielektrycznej między odmianami, przy wilgotności ziarniaków powyżej 12%. Poniżej tej wilgotności różnice są bardzo małe w odniesieniu do wartości średniej dla wszystkich odmian. Zwracają również uwagę niskie wartości przenikalności elektrycznej przy tak małych wilgotnościach ziarna.

6.3. Wpływ temperatury materiału badawczego na cechy elektryczne ziarna

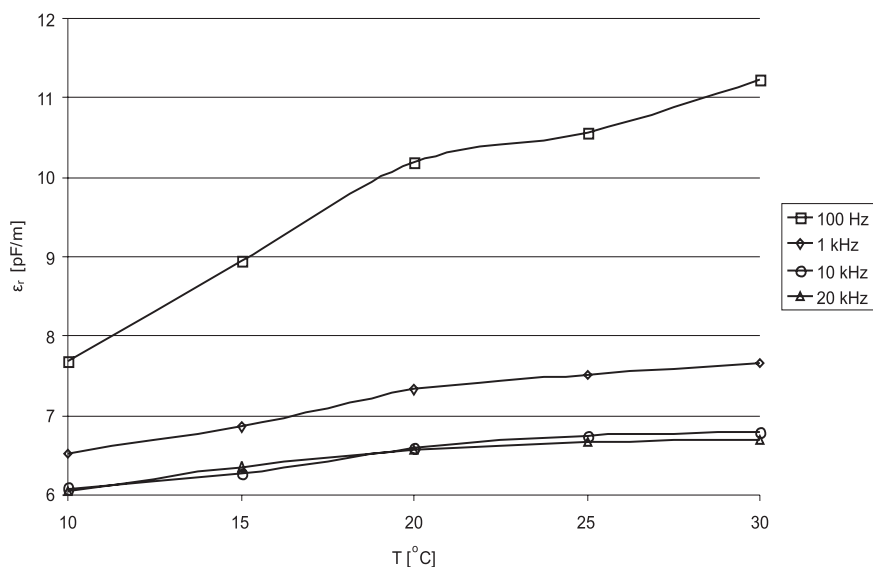
Mimo że jak wskazuje przeprowadzona analiza wariancji dla wszystkich badanych odmian pszenicy, temperatura próbki ziarna wpływa znamiennej jedynie na współczynnik strat dielektrycznych, natomiast jej wpływ na przenikalność elektryczną jest nieistotny statystycznie na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, to dla niektórych odmian, w tym Finezji, wpływ temperatury daje się wyraźnie zauważyć – jest niewielki co do wartości, ale ze wzrostem temperatury rośnie zarówno przenikalność elektryczna, jak i współczynnik strat dielektrycznych.

Na rysunkach zobrazowano charakter wpływu temperatury materiału badawczego na współczynnik strat dielektrycznych (rys. 6.11) oraz przenikalność elektryczną (rys. 6.12) dla odmiany Finezja dla wilgotności ziarna 12%.



Rys. 6.11. Wpływ temperatury ziarna na współczynnik strat dielektrycznych ziarniaków pszenicy – odmiany Finezja, $w = 12\%$

Fig. 6.11. The dependence of coefficient dielectrical losses $tg\delta$ on temperature T (wheat grains – Finezja variety) $w = 12\%$



Rys. 6.12. Wpływ temperatury ziarna na przenikalność elektryczną ziarniaków pszenicy – odmiany Finezja, $w = 12\%$

Fig. 6.12. The dependence of electric permittivity ϵ on temperature T (wheat grains – Finezja variety) $w = 12\%$

6.4. Omówienie wyników badań

Miarą dopasowania wszystkich przedstawianych w tym rozdziale zależności są współczynniki determinacji R^2 krzywoliniowej. Współczynnik determinacji określa, w jakim stopniu badana zmienna niezależna tłumaczy zachowanie zmiennej zależnej. Dla większości odmian ozimych i jarych współczynniki determinacji są większe niż 70% zarówno dla zależności, opisywanych równaniami cech elektrycznych ziarniaków pszenicy, od częstotliwości pola elektromagnetycznego, jak i od wilgotności materiału. Tak duże wartości miar korelacji wyraźnie wskazują, że obydwa analizowane czynniki bardzo silnie określają obydwie zmienne zależne. Jednocześnie wyniki przeprowadzonej analizy wariancji pozwalają stwierdzić, że właściwości odmianowe modyfikują badane właściwości elektryczne warstwy ziarniaków pszenicy. Współczynniki determinacji wyznaczone dla funkcji opisujących jedną dla wszystkich odmian zależność współczynnika strat dielektrycznych od częstotliwości pola elektromagnetycznego ($R^2 = 15\text{--}27\%$) oraz wilgotności ($R^2 = 35\text{--}45\%$) są niskie. Również współczynniki determinacji wyznaczone dla funkcji opisujących zależność przenikalności elektrycznej od częstotliwości pola elektromagnetycznego ($R^2 = 15\text{--}25\%$) oraz wilgotności ($R^2 = 40\text{--}60\%$) bez uwzględnienia odmiany pszenicy (uśrednione wyniki dla wszystkich odmian) są niezadowalające. Nie można więc pominąć w opisie cech elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy wpływu różnic międzyodmianowych. Opis cech elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy wymaga zatem uwzględnienia innych wielkości niezależnych, które pozwoliłyby opisać ilościowo różnice między badanymi odmianami pszenicy oraz wpływ tych różnic na przenikalność elektryczną i współczynnik strat dielektrycznych.

Próbowano uwzględnić w opisie cechy geometryczne ziarna. Dla czterech odmian, dwóch ozimych – Finezji i Zyty oraz dwóch jarych – Helii i Jasnej określono sposób, w jakim trzy zmienne niezależne, tj. wilgotność, objętość ziarna (potraktowanego jako nieregularna elipsoida obrotowa) i częstotliwość pola wpływają jednocześnie na cechy elektryczne. Za miernik zależności przyjęto współczynniki korelacji i determinacji wielorakiej, tłumaczącej w ilu procentach badane zmienne niezależne (wilgotność, objętość ziarna i częstotliwość) jednocześnie określają cechy elektryczne warstwy ziarniaków pszenicy.

Współczynniki korelacji wielorakiej R_w dla odmian ozimych zawierają się w przedziale od 0,4 do 0,6, czyli wilgotność, objętość ziarna i częstotliwość pola elektrycznego mogą, co najwyżej, tłumaczyć zachowanie $tg\delta$ i ε w około 40%. Taki wynik sugeruje fakt istnienia innych czynników, które w równie silny sposób mogą wpływać na zachowanie cech elektrycznych badanych odmian.

W przypadku odmian jarych wartości współczynników korelacji wielorakiej należą do przedziału od 0,6 do prawie 0,9. A zatem w przypadku Helii i Jasnej jednoczesny wpływ wilgotności, objętości ziarna i częstotliwości na współczynniki $tg\delta$ lub ε jest duży. Większe wartości współczynnika R_w uzyskano dla $tg\delta$, mianowicie 0,883 i 0,777 odpowiednio dla Helii i Jasnej. W tym przypadku $tg\delta$ jest określany przez trzy wyżej wymienione zmienne w około 70%.

Przeprowadzono również analizę wpływu składu chemicznego ziarna na analizowane zmienne zależne. Okazało się, że dla różnych zakresów częstotliwości pola istotne, ze względu na wartości współczynnika strat dielektrycznych, okazywały się odmienne czynniki, i tak dla częstotliwości 50–500 Hz istotna statystycznie (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$) okazała się zawartość popiołu i glutenu, dla częstotliwości 500 Hz do 1,5 kHz jedynie glutenu, a np. dla częstotliwości powyżej 10 kHz wpływ żadnego z analizowanych składników nie oka-

zał się istotny. Przenikalność elektryczna zależała istotnie dla częstotliwości od 500 Hz do 1,5 kHz od zawartości włókna i tłuszczu, a dla częstotliwości powyżej 10 kHz – od zawartości tłuszczu, białka, glutenu, włókna i skrobi. Dla częstotliwości pola elektromagnetycznego poniżej 500 Hz badane właściwości chemiczne nie miały istotnego statystycznie wpływu na przenikalność elektryczną.

Podsumowując, można stwierdzić, że żadna z omówionych zmiennych niezależnych nie opisuje w satysfakcjonujący sposób analizowanych zmiennych zależnych w całym badanym zakresie zmian parametrów ilościowych dla wszystkich badanych odmian.

7. EMPIRYCZNE MODELOWANIE CECH ELEKTRYCZNYCH WARSTWY ZIARNIAKÓW PSZENICY

Podjęto próbę sformułowania modelu matematycznego opisującego analizowane cechy elektryczne masy ziarna: współczynnik strat dielektrycznych oraz przenikalność elektryczną w funkcji wielkości fizycznych i chemicznych charakteryzujących materiał badawczy. Tworzone modele regresyjne opisują wszystkie badane odmiany pszenicy dla uwzględnionych w założeniach modelowych zakresów wielkości wejściowych. Opis cech elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy oparto na założeniu, że istnieje związek korelacyjny między zmiennymi niezależnymi:

- $X_1 = a$ [mm] – wymiar poprzeczny ziarna (grubość), $X_1 \in \langle 2,58; 4,35 \rangle$;
- $X_2 = b$ [mm] – wymiar poprzeczny ziarna (szerokość), $X_2 \in \langle 2,86; 4,25 \rangle$;
- $X_3 = c$ [mm] – wymiar podłużny ziarna (długość), $X_3 \in \langle 5,80; 7,57 \rangle$;
- $X_4 = V_z$ [mm³] – objętość ziarna w przestrzeni międzyelektrodowej, $X_4 \in \langle 9,0; 13,5 \rangle$;
- $X_5 = Tl$ [%] – zawartość tłuszczu w suchej masie, $X_5 \in \langle 0,4; 1,0 \rangle$;
- $X_6 = Bi$ [%] – zawartość białka w suchej masie, $X_6 \in \langle 9,6; 15,6 \rangle$;
- $X_7 = Po$ [%] – zawartość popiołu w suchej masie, $X_7 \in \langle 1,4; 2,3 \rangle$;
- $X_8 = Gl$ [%] – zawartość glutenu w suchej masie, $X_8 \in \langle 26,2; 42,4 \rangle$;
- $X_9 = Wl$ [%] – zawartość włókna w suchej masie, $X_9 \in \langle 4,4; 5,6 \rangle$;
- $X_{10} = Sk$ [%] – zawartość skrobi w suchej masie, $X_{10} \in \langle 57,2; 60,0 \rangle$;
- $X_{11} = Ls$ [-] – liczba sedymentacji, $X_{11} \in \langle 40; 57 \rangle$;
- $X_{12} = Lo$ [-] – liczba opadania, $X_{12} \in \langle 228; 428 \rangle$;
- $X_{13} = a_w$ [-] – aktywność wody, $X_{13} \in \langle 0,27; 0,59 \rangle$;
- $X_{14} = w$ [%] – wilgotność, $X_{14} \in \langle 0; 27 \rangle$;
- $X_{15} = T$ [°C] – temperatura, $X_{15} \in \langle 10; 30 \rangle$;
- $X_{16} = f$ [Hz] – częstotliwość, $X_{16} \in \langle 100; 100000 \rangle$.

a zmiennymi zależnymi:

- $Y_1 = tg\delta$ [-] – współczynnik strat dielektrycznych, $Y_1 \in \langle 0,007; 5,877 \rangle$;
- $Y_2 = \varepsilon$ [F/m] – przenikalność elektryczna, $Y_2 \in \langle 2,5 \cdot 10^{-12}; 1295,8 \cdot 10^{-12} \rangle$.

Zarówno zmienne zależne, jak i niezależne, z uwagi na różne jednostki, zostały unormowane do zakresu $\langle 0, 1 \rangle$ za pomocą zależności:

$$z_i = \frac{x_i - x_{\min.}}{x_{\max.} - x_{\min.}} \quad (7.1)$$

Rozkład empiryczny zmiennych unormowanych (tak samo jak i zmiennych surowych) odbiegał od rozkładu normalnego. Zmienne skośne prawostronnie przetransformowano za pomocą zależności:

$$u_i = \log(z_i) \quad (7.2)$$

a zmienne skośne lewostronnie zależnością:

$$u_i = x_i^2 \quad (7.3)$$

lub

$$u_i = x_i^3 \quad (7.4)$$

Na potrzeby konstrukcji modelu zastosowano metodę regresji wielorakiej. Założono, że jej zastosowanie pozwoli na jednoczesne uwzględnienie wpływu wszystkich istotnie wpływających na wartości przenikalności elektrycznej oraz współczynnika strat dielektrycznych zmiennych niezależnych, co pozwoli na dokładniejsze niż uprzednio opisanie analizowanych cech elektrycznych ziarniaków pszenicy.

Klasyfikacja obiektów za pomocą wielowymiarowej analizy statystycznej wymaga wyspecyfikowania cech diagnostycznych. Wybór zestawu cech diagnostycznych (zmiennych niezależnych, opisujących) dokonuje się m.in. na podstawie:

- metody analizy macierzy współczynników korelacji,
- metody analizy czynnikowej,
- metody analizy głównych składowych.

Na pierwszym etapie analizy usiłowano uzyskać zależności wiążące zmienne zależne ze zmiennymi niezależnymi w całym zakresie badanych częstotliwości. Tabela 7.1 zawiera wyznaczone współczynniki korelacji Pearsona – pogrubieniem wyróżniono współczynniki istotnie różne od zera na poziomie $p < 0,05$.

Tabela 7.1

Table 7.1

Macierz współczynników korelacji Pearsona r analizowanych cech ilościowych z $tg\delta$ i ϵ
 Motherland of Pearsona r coefficients of correlation of analysed quantitative trademarks from $tg\delta$ i ϵ

	$tg\delta$	ϵ
a [mm]	0,141	0,023
b [mm]	0,138	0,058
c [mm]	0,181	0,155
V_z [mm ³]	-0,060	0,138
Tl [%]	-0,023	0,169
Bi [%]	-0,093	0,010
Po [%]	0,120	-0,025
Gl [%]	-0,153	-0,013
Wl [%]	0,054	-0,129
Sk [%]	-0,075	-0,079
Ls [-]	-0,023	-0,070
Lo [-]	-0,099	-0,139
a_w [-]	-0,192	-0,020
w [%]	0,632	0,468
T [°C]	0,069	-0,019
f [Hz]	-0,320	-0,157
$\log(f)$	-0,493	-0,247

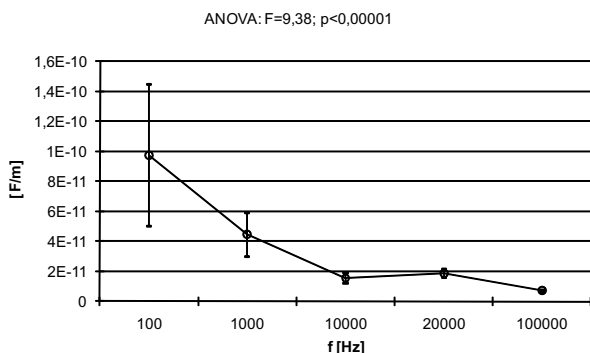
W wyniku przeprowadzonej regresji wielorakiej przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów otrzymano następujące zależności:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta = & -0,3157 \cdot a + 0,1559 \cdot c + 0,1529 \cdot Wk \\ & - 0,4575 \cdot \log(f) + 0,02344 \cdot T + 0,08146 \cdot w \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\log(\varepsilon) = 2,08556 \cdot \log(Gl) + 0,08 \cdot w - 0,0073 \cdot b^2 + 0,025 \cdot \log(f) - 3,2428 \quad (7.6)$$

Jedna i druga analizowana zmienna zależna w znaczącym stopniu zależy od częstotliwości pola elektromagnetycznego oraz wilgotności ziarna. Ponadto współczynnik strat dielektrycznych (formuła 7.5) zależy od temperatury ziarna, jak również zawartości włókna oraz średniej długości i grubości ziarniaka ($R^2 = 32,5\%$), natomiast przenikalność elektryczna (opisana formułą 7.6) zależy od zawartości glutenu w suchej masie oraz szerokości ziarniaka ($R^2 = 38,2\%$).

Ze względu na stosunkowo niskie wartości współczynnika korelacji przeanalizowano wpływ ustalonej częstotliwości pola elektromagnetycznego w przestrzeni międzyelektrodowej na uzyskane wyniki pomiarów. Wyniki analizy wariancji oraz testów *post hoc* wykazały, że statystycznie istotne różnice ($p < 0,05$) średnich wartości $\operatorname{tg} \delta$ i ε występują dla częstotliwości: $f = 100 \text{ Hz}$, $f = 1000 \text{ Hz}$ i $f \geq 10\,000 \text{ Hz}$ (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Średnie wartości wraz z odchyleniami standardowymi analizowanych parametrów dla stosowanych częstotliwości pomiarowych

Fig. 7.1. Mean of parameters with standard deviations analysed for applied measuring frequencies

Dalsze analizy współczynników korelacji między analizowanymi cechami a zmiennymi niezależnymi oraz próby tworzenia formuł matematycznych opisujących te zależności prowadzono osobno dla wymienionych trzech grup jednorodnych dla podanych zakresów częstotliwości pola elektromagnetycznego.

7.1. Empiryczny model cech elektrycznych ziarniaków pszenicy dla częstotliwości pola elektromagnetycznego $f = 100 \text{ Hz}$

Tabela 7.2 zawiera wyznaczone współczynniki korelacji Pearsona między analizowanymi czynnikami a zmiennymi zależnymi dla częstotliwości pola elektromagnetycznego $f = 100 \text{ Hz}$ – pogrubieniem wyróżniono współczynniki istotnie różne od zera na poziomie $p < 0,05$.

Tabela 7.2
Table 7.2

Macierz współczynników korelacji między analizowanymi czynnikami a zmiennymi zależnymi dla $f = 100$ Hz
Motherland of coefficients of correlation between analysed factors and dependent variables for $f = 100$ Hz

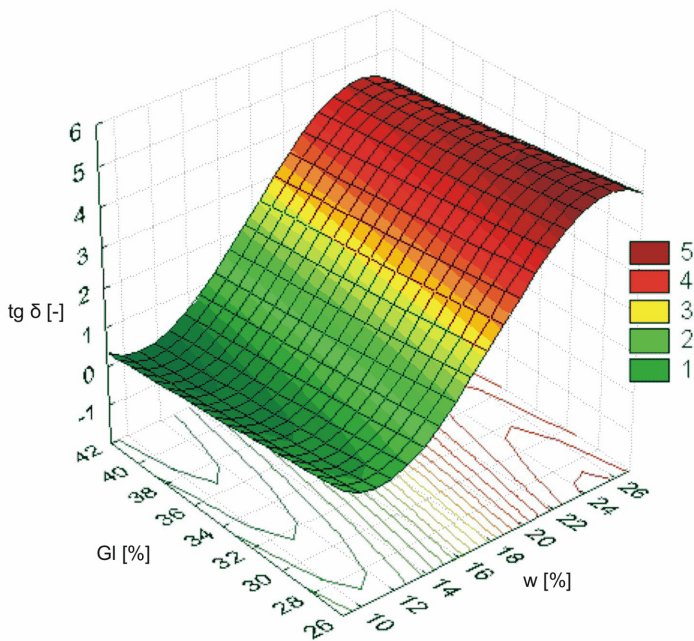
	$\text{tg}\delta$	ε	$\log(\text{tg}\delta)$	$\log(\varepsilon)$
a [mm]	0,16	-0,03	0,21	0,02
b [mm]	0,18	0,13	0,09	0,20
c [mm]	0,28	0,17	0,25	0,12
V_z [mm ³]	-0,32	0,19	-0,35	0,22
Tl [%]	-0,10	0,18	-0,11	0,14
Bi [%]	-0,11	-0,01	-0,18	-0,05
Po [%]	0,22	-0,00	0,19	0,07
Gl [%]	-0,24	0,02	-0,27	-0,06
Wl [%]	0,09	-0,23	0,11	-0,13
Sk [%]	-0,02	-0,15	0,32	-0,40
Ls [-]	0,04	0,08	-0,11	0,03
Lo [-]	-0,00	-0,10	-0,09	-0,13
a_w [-]	-0,33	-0,07	-0,39	-0,22
$\log(a_w)$	-0,34	-0,06	-0,39	-0,22
w [%]	0,89	0,67	0,83	0,90
T [°C]	0,01	0,00	0,03	0,03

W tabeli 7.2 pogrubieniem wyróżniono współczynniki korelacji istotne statystycznie na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ i na tej podstawie określono formuły korelacyjne o postaci:

$$\text{tg } \delta = 17,534 - 2,8594 \cdot w + 0,1869 \cdot w^2 - 0,003473 \cdot w^3 - 3,726 \cdot \log Gl - 5,4646 \cdot \log a_w \quad (7.7)$$

$$\varepsilon = 0,06902 \cdot e^{0,357265 \cdot w} \quad (7.8)$$

Dla częstotliwości pola elektromagnetycznego 100 Hz uzyskano wysokie wartości współczynnika korelacji. Na podstawie uzyskanych empirycznych formuł matematycznych można stwierdzić, że wyraźny wpływ na wartość przenikalności elektrycznej ma jedynie wilgotność materiału ($R^2 = 89,9\%$), natomiast współczynnik strat dielektrycznych uzależniony jest również od zawartości glutenu oraz aktywności wody w materiale ($R^2 = 88,9\%$). Oczywiście wilgotność i aktywność wody nie są parametrami w pełni niezależnymi. Na rysunku 7.2 przedstawiono przykładowy wykres zależności współczynnika strat dielektrycznych od zawartości glutenu i wilgotności materiału. Jednocześnie ze wzrostem wilgotności współczynnik strat dielektrycznych rośnie. Niewielkie zmiany można zauważyć w zakresie wilgotności 10–13% oraz 22–26%, a od 13 do 22% wpływ jest bardzo wyraźny. Wzrost zawartości glutenu powoduje niewielkie, ale wyraźne zmniejszenie współczynnika strat dielektrycznych.



Rys. 7.2. Wykres zależności współczynnika strat dielektrycznych od zawartości glutenu i wilgotności materiału dla częstotliwości pola elektromagnetycznego 100 Hz

Fig. 7.2. The graf of coefficient dielectical losses $tg\delta$ vs. gluten GI and humidity w , frequency $f=100$ Hz

7.2. Empiryczny model cech elektrycznych ziarniaków pszenicy dla częstotliwości pola elektromagnetycznego $f=1$ kHz

Kolejną macierz współczynników korelacji między analizowanymi czynnikami a zmiennymi zależnymi wyznaczono dla częstotliwości pola elektromagnetycznego 1 kHz (tab. 7.3). Pogrubieniem wyróżniono współczynniki korelacji istotne na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Tabela 7.3
Table 7.3

Macierz współczynników korelacji między analizowanymi czynnikami a zmiennymi zależnymi dla $f = 1000$ Hz

Motherland of coefficients of correlation between analysed factors and dependent variables for $f = 1000$ Hz

	$\text{tg}\delta$	ϵ	$\log(\text{tg}\delta)$	$\log(\epsilon)$
a [mm]	0,18	0,01	0,29	0,03
$\log a$	0,19	0,01	0,31	0,04
b [mm]	0,22	0,13	0,23	0,16
c [mm]	0,12	0,10	0,12	-0,11
Vz [mm ³]	0,02	0,25	0,02	0,42
Tl [%]	-0,00	0,26	-0,03	0,24
Bi [%]	-0,13	-0,04	-0,17	-0,08
Po [%]	0,14	-0,08	0,07	-0,10
Gl [%]	-0,16	0,06	-0,17	0,12
Wl [%]	0,11	-0,20	0,00	-0,26
Sk [%]	-0,21	-0,14	-0,30	-0,33
Ls [-]	0,00	0,04	-0,07	0,16
Lo [-]	-0,15	-0,12	-0,22	-0,11
Lo^3 [-]	-0,16	-0,14	-0,24	-0,14
a_w [-]	-0,24	-0,03	-0,27	-0,16
$\log(a_w)$	-0,25	-0,02	-0,29	-0,16
w [%]	0,82	0,67	0,90	0,88
T [°C]	0,06	0,01	0,09	0,06

Sformułowane na tej podstawie zależności przedstawiają równania (7.9) i (7.10):

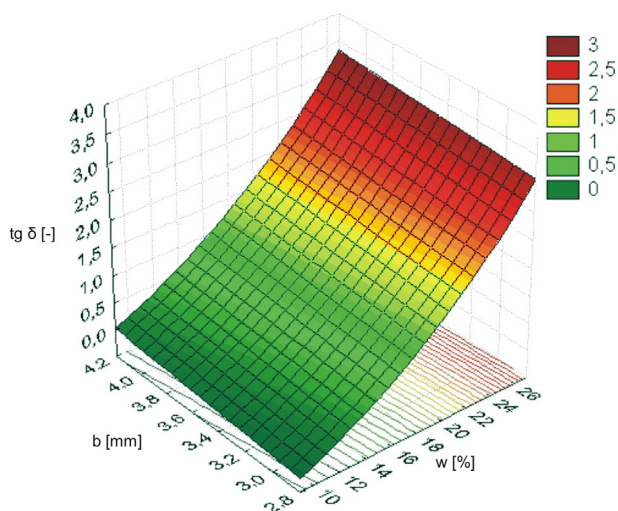
$$\text{tg}\delta = -2,554 + 1,096 \cdot e^{0,0574 \cdot w} + 0,1853 \cdot b + 0,1225 \cdot \log a_w \quad (7.9)$$

$$\epsilon = -27,226 + 0,0224 \cdot e^{0,3629 \cdot w} + 6,351 \cdot Wl \quad (7.10)$$

Współczynnik strat dielektrycznych przy częstotliwości pola elektromagnetycznego $f = 1$ kHz zależy od wilgotności ziarna i aktywności wody oraz od średniej szerokości ziarniaka dla danej odmiany ($R^2 = 72,6\%$). Przenikalność elektryczna zależy od wilgotności oraz zawartości włókna w suchej masie ($R^2 = 78,7\%$).

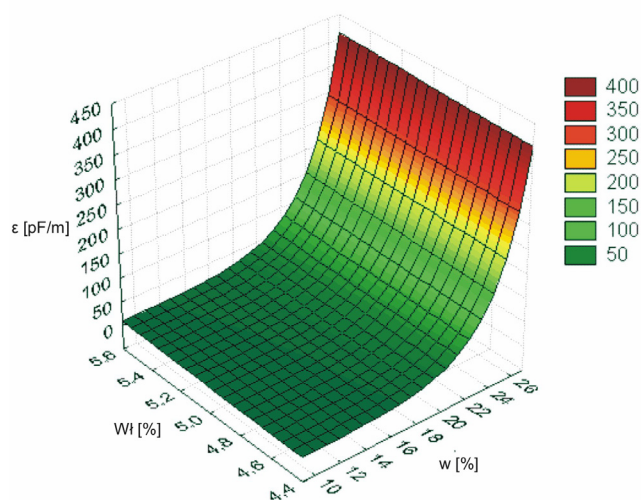
Na wykresach 7.3 i 7.4 przedstawiono przykładowe przebiegi analizowanych zależności. Na rysunku 7.3 widać wyraźnie wpływ wilgotności ziarniaków na wartości współczynnika strat dielektrycznych mierzonych przy częstotliwości pola elektromagnetycznego 1 kHz, zaznacza się też wyraźny wpływ szerokości ziarniaków b na badany parametr – ze wzrostem średniej szerokości ziarniaków wartości współczynników strat dielektrycznych rosną.

Rysunek 7.4 przedstawia wykres przenikalności elektrycznej w funkcji wilgotności i zawartości włókna – ze wzrostem zawartości włókna w ziarniakach przenikalność elektryczna rośnie. Wzrost wilgotności powyżej 22% powoduje gwałtowny wzrost wartości przenikalności elektrycznej aż do ponad 400 pF/m.



Rys. 7.3. Wykres zależności współczynnika strat dielektrycznych od wilgotności materiału oraz średniej szerokości ziarna dla częstotliwości pola elektromagnetycznego 1 kHz

Fig. 7.3. The graf of coefficient dielectical losses $tg \delta$ vs. of average of the grain breadth b and humidity w , frequency $f=1$ kHz



Rys. 7.4. Wykres zależności przenikalności elektrycznej od wilgotności materiału oraz zawartości włókna dla częstotliwości pola elektromagnetycznego 1 kHz

Fig. 7.4. The graf of electric permittivity vs. fibre Wf and humidity w , frequency $f=1$ kHz

7.3. Empiryczny model cech elektrycznych ziarniaków pszenicy dla częstotliwości pola elektromagnetycznego f od 10 do 100 kHz

Ostatnim przedziałem częstotliwości, dla którego podjęto próbę sformułowania zależności, jest przedział od 10 do 100 kHz. Tabela 7.4 przedstawia macierz współczynników korelacji między analizowanymi czynnikami, a zmiennymi zależnymi dla analizowanego przedziału częstotliwości.

Tabela 7.4
Table 7.4

Macierz współczynników korelacji między analizowanymi czynnikami a zmiennymi zależnymi dla $10 \text{ kHz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$
Motherland of coefficients of correlation between analysed factors and dependent variables for $10 \text{ kHz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$

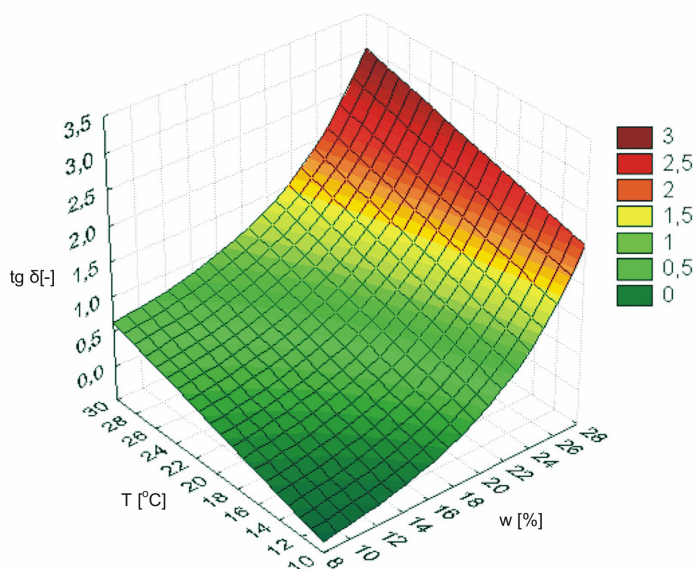
	$tg\delta$	ϵ	$\log(tg\delta)$	$\log(\epsilon)$
a [mm]	0,05	-0,06	0,24	-0,10
$\log a$	0,06	-0,04	0,25	-0,08
b [mm]	0,03	-0,02	0,16	-0,04
c [mm]	0,21	0,16	0,31	0,00
Vz [mm ³]	-0,24	0,51	-0,33	0,50
Tl [%]	0,12	0,33	0,03	0,43
Bi [%]	0,05	0,28	-0,05	0,34
Po [%]	0,06	-0,11	0,10	-0,16
Gl [%]	-0,07	0,27	-0,15	0,42
Wl [%]	-0,08	-0,32	-0,02	-0,43
Sk [%]	-0,03	-0,32	-0,12	-0,44
Ls [-]	-0,02	0,17	-0,02	0,26
Lo [-]	-0,06	0,08	-0,10	0,08
a_w [-]	-0,15	-0,10	-0,23	-0,18
$\log(a_w)$	-0,16	-0,09	-0,24	-0,16
w [%]	0,68	0,54	0,88	0,63
T [°C]	0,25	0,20	0,22	0,13

$$tg \delta = -0,9585 + 0,05226 \cdot e^{0,1388 \cdot w} - 0,0186 \cdot \log a + 0,0479 \cdot T, \quad (7.11)$$

$$\epsilon = -8,6 + 0,025 \cdot e^{0,2793 \cdot w} + 17,039 \cdot Tl \quad (7.12)$$

Zależności (7.11) oraz (7.12) są wyznaczonymi metodą regresji wielorakiej formułami matematycznymi opisującymi współczynnik strat dielektrycznych ($R^2 = 79,9\%$) oraz przenikalność elektryczną ($R^2 = 75,4\%$). Na uwagę zasługuje fakt, iż dla tego zakresu częstotliwości pola elektromagnetycznego istotnymi okazały się cechy, których wpływ był nieistotny przy niższych częstotliwościach. Dla współczynnika strat dielektrycznych w formule pojawiła się średnia grubość ziarniaka a oraz temperatura T materiału badawczego. Dla przenikalności elektrycznej – zawartość tłuszczu, która dla niższych częstotliwości nie była czynnikiem istotnym. Na rysunku 7.5 przedstawiono zależność współczynnika strat dielektrycznych w funkcji temperatury oraz wilgotności dla założonego zakresu częstotliwości pola elektro-

magnetycznego i przyjętej przykładowo średniej wartości grubości ziarniaka 3,47 mm. Przy częstotliwości pola elektromagnetycznego $10 \text{ kHz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$ wyraźnie widać wpływ temperatury ziarniaków na wartości współczynnika strat dielektrycznych, przy zmianie temperatury od 10 do 30°C $\text{tg} \delta$ rośnie o 0,5 do 1.



Rys. 7.5. Wykres zależności współczynnika strat dielektrycznych od temperatury i wilgotności materiału dla częstotliwości pola elektromagnetycznego $10 \text{ kHz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$ (średnia grubość ziarna $a = 3,47 \text{ mm}$)

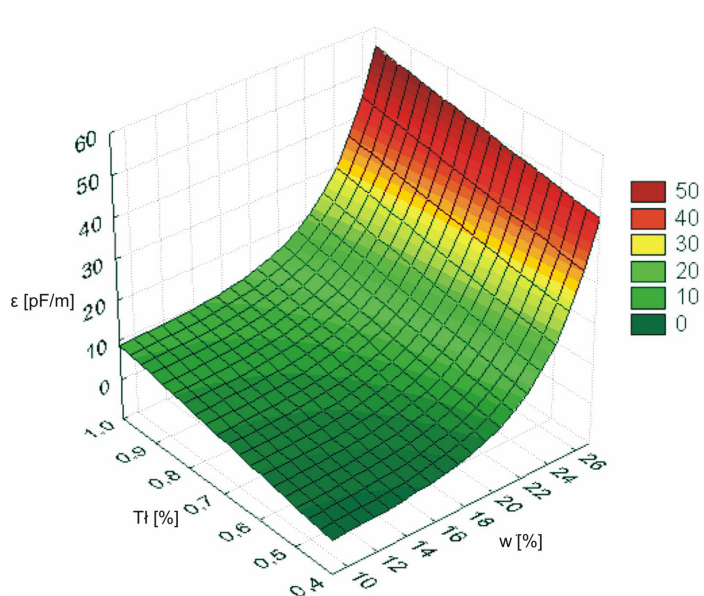
Fig. 7.5. The graf of coefficient dielectical losses $\text{tg} \delta$ vs. temperature T and humidity w , frequency: $10 \text{ kHz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$ (medium thickness of the grain $a = 3,47 \text{ mm}$)

Wykres zależności przenikalności dielektrycznej od istotnych w tym zakresie częstotliwości zmiennych niezależnych przedstawiono na rysunku 7.6. Dla tego zakresu częstotliwości pola elektromagnetycznego istotny wpływ na wartości przenikalności elektrycznej ma jedynie wilgotność ziarna oraz zawartość tłuszczu, przy czym zależność od zawartości tłuszczu jest liniowa i podobna w całym zakresie wilgotności ziarniaków.

Podsumowując, można stwierdzić, że przy podziale zakresu częstotliwości pola elektromagnetycznego, w jakim prowadzono badania nad wpływem zmiennych niezależnych na przenikalność elektryczną i współczynnik strat dielektrycznych, uzyskano zadowalające wyniki modelowania zależności (wysokie wskaźniki determinacji powyżej 60%), jednak niepokojącym z punktu widzenia możliwości kompleksowego opisu badanych zależności są niskie wskaźniki dopasowania przy próbie opisu w całym analizowanym zakresie częstotliwości.

Przeprowadzona analiza pozwoliła na stwierdzenie, że dla każdej częstotliwości pomiarowej stają się istotnie wpływającymi inne zmienne niezależne, szczególnie dotyczy to składu chemicznego ziarna, ale również jego geometrii. Otwiera to możliwość dalszych badań nad przyczynami występowania tych różnic. Nie pozwala jednak na osiągnięcie jednego modelu wiążącego ze sobą analizowane zmienne niezależne i zależne z satysfakcjonującą

dokładnością. Ponadto, stosowana metoda opisu pozwala na sformułowanie zależności funkcyjnych, ale eliminuje z ostatecznego rezultatu te wielkości, których wpływ, co prawda bardzo słaby, ale jednak występuje.



Rys. 7.6. Wykres zależności przenikalności elektrycznej wilgotności materiału oraz zawartości tłuszczu dla częstotliwości pola elektromagnetycznego $10 \text{ kHz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$

Fig. 7.6. The graf of electric permittivity vs. fat Tf and humidity w , frequency: $10 \text{ kHz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$

8. ZASTOSOWANIE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO ANALIZY CECH ELEKTRYCZNYCH WARSTWY ZIARNIAKÓW PSZENICY

Sztuczne sieci neuronowe SSN są wydajnym narzędziem informatycznym, którego powstanie jest pochodną badań nad biologiczną strukturą i biochemicznymi mechanizmami zachodzącymi w ludzkim mózgu. Ich główne zalety to równoległe przetwarzanie informacji oraz zdolność „uczenia się” na reprezentatywnych dla danego problemu przykładach [Tadeusiewicz 1998]. Nie wymagając klasycznego (algorytmicznego) programowania, potrafią one samodzielnie modyfikować swoją strukturę „osłabianych” i „wzmacnianych” połączeń wewnętrznych tak, aby sieć stała się modelem numerycznym („czarną skrzynką”) konkretnego zjawiska.

8.1. Neuronowe sieci Kohonena

Sieci Kohonena należą do tzw. sieci samoorganizujących się. Pierwotnie sieci Kohonena były wykorzystywane do analizy obrazów i dźwięków, ale stanowią również potężny mechanizm do analizy skupień.

Dla trzech zbiorów, tj. uczącego, walidacyjnego i testowego wyliczany jest średni błąd kwadratowy (RMS). Błąd wyznaczany jest poprzez sumowanie kwadratów błędów indywidualnych, następnie uzyskana suma podzielona jest przez liczbę uwzględnionych wartości i z tego wyznaczany jest pierwiastek kwadratowy.

Zbiór uczący w sieciach neuronowych to zbiór z danymi, na których odbywa się uczenie wybranej sieci.

Zbiór walidacyjny to zbiór danych wydzielonych ze zbioru uczącego, dla którego wyliczane są osobno błędy sieci. Kiedy błędy liczone dla zbioru walidacyjnego zaczynają przyrastać, należy zakończyć proces uczenia. Wzrost błędu zbioru walidacyjnego i jednocześnie zmniejszanie się błędu zbioru uczącego świadczy o przeuczeniu sieci. Sieć ztraca zdolność do generalizacji.

Zbiór testowy również wydzielony jest z danych uczących, służy do przetestowania na wybranych przykładach nauczonej już sieci.

Przetestowano trzy różne architektury sieci Kohonena, za każdym razem zmieniając ilość neuronów w warstwie wyjściowej. Najprostsza z warstwą wyjściową 2x2 miała zbyt duże błędy RMS, zwykle powyżej 0,8. Sieci z warstwami 4x4 i 5x5 miały mały błąd RMS dla zbioru uczącego zwykle poniżej 0,05, ale RMS dla zbioru walidacyjnego wzrastał powyżej 1,0, co świadczy o przeuczeniu sieci. Dla sieci z warstwą wyjściową 3x3 dla różnych danych (osobno ozime, jare, ozime + jare) błędy RMS dla zbiorów uczącego, walidacyjnego i testowego zawierały się w przedziale od 0,2 do 0,43.

Najprostsze architektury odpadają ze względu na duże błędy, te bardziej skomplikowane dla zestawu danych, którymi dysponujemy, mogą być przeuczone. Najlepszą pod względem błędów okazała się sieć, w której warstwa wyjściowa tworzyła mapę o wymiarach 3×3 neurony.

W efekcie, wprowadzając na wejście sieci współczynnik strat dielektrycznych oraz przenikalność elektryczną, otrzymano wyniki przedstawione w tabelach 8.1–8.3.

Tabela 8.1

Table 8.1

Rozmieszczenie badanych odmian ozimych na mapie topologicznej stworzonej przez sieć neuronową
Arranging examined winter wheat varieties on the topological map created by the neural network

	0	1	2
0	Almari	–	Kobra
1	–	–	–
2	Finezja	Mewa, Rubens, Tonacja, Turnia	–

Tabela 8.2

Table 8.2

Rozmieszczenie badanych odmian jarych na mapie topologicznej stworzonej przez sieć neuronową
Arranging examined spring wheat varieties on the topological map created by the neural network

	0	1	2
0	Pasteur	–	Helia, Jasna
1	Nawra	–	–
2	–	Triso, Monsun	–

Tabela 8.3

Table 8.3

Rozmieszczenie badanych odmian ozimych i jarych na mapie topologicznej stworzonej przez sieć neuronową
Arranging examined winter and spring wheat varieties on the topological map created by the neural network

	0	1	2
0	Kobra	Mewa, Rubens, Tonacja, Turnia, Monsun, Triso	Almari
1	Jasna	Finezja, Nawra, Pasteur	–
2	–	Helia	–

Uzyskane wyniki potwierdzają spostrzeżenia oparte na innych metodach analizy wyników badań (np. analiza wariancji wielorakiej), że badane odmiany pszenicy są zróżnicowane pod względem badanych cech elektrycznych. Nie znajduje również uzasadnienia przyjmowany w praktyce (mierniki wilgotności) podział odmian pszenicy na jare i ozime. Jak widać w tabeli 8.3, odmiany pszenicy tworzą grupy niezależnie od takiego podziału. Na podstawie tabel 8.1 i 8.2 można zauważyć, że i wśród badanych w ramach pracy odmian jarych czy ozimych można wyróżnić grupy odmian różniących się wyraźnie pod względem cech elektrycznych warstwy ziarniaków.

8.2. Zastosowanie wielowarstwowej sieci jednokierunkowej do szacowania właściwości elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy

Sztuczne sieci neuronowe zbudowane są z wielu połączonych ze sobą i współpracujących elementów (neuronów). Na wejścia neuronu podawane są sygnały wejściowe: x_1, x_2, \dots, x_n , które mnożone są przez odpowiadające poszczególnym wejściom wartości liczbowe: w_1, w_2, \dots, w_n , zwane wagami synaptycznymi. Iloczyny te są następnie sumowane w bloku sumującym, na wyjściu którego pojawia się sygnał v . Sygnał ten jest następnie przekształcony przez funkcję aktywacji (przejścia) neuronu $f(v)$ na sygnał wyjściowy y .

Pracę sztucznej sieci neuronowej możemy ogólnie podzielić na dwa zasadnicze etapy: etap uczenia sieci i etap odtworzeniowy. Na początku procesu uczenia wagi synaptyczne wszystkich połączeń międzyneuronowych sieci przyjmują pewne wartości startowe. Następnie na wejścia sieci podawany jest ciąg danych reprezentujących dany problem, zwany ciągiem uczącym. W wyniku wielokrotnego „przedstawiania” sieci ciągu uczącego dochodzi do sukcesywnej, gradientowo ukierunkowanej modyfikacji wartości wag poszczególnych połączeń. Zastosowany został proces uczenia nadzorowany. Iteracyjna korekta wartości wag poszczególnych neuronów dokonywana jest, zgodnie z wybranym algorytmem, w zależności od błędu bieżących odpowiedzi sieci lub – w przypadku uaktualniania wag połączeń z warstwą ukrytą – oszacowanym sygnałem na wyjściu neuronów wewnętrznej warstwy sieci (algorytm propagacji wstecznej błędu). Proces uczenia sztucznej sieci neuronowej kończy się w momencie spełnienia przez sygnały wyjściowe sieci pewnego ustalonego kryterium (np. zdefiniowany błąd pomiędzy wektorem wartości wyjściowych sieci a wektorem wartości oczekiwanych).

Tworzenie neuronowego modelu badanego zjawiska można zasadniczo podzielić na cztery etapy.

Zacząć należy od rozpoznania modelowanego zjawiska, co pozwala na wstępne ustalenie parametrów mających wpływ na jego przebieg i odpowiednie skonstruowanie wektora danych wejściowych. Etap ten został zrealizowany w oparciu o badania wstępne, w toku opracowania metodyki jak i dalszych analiz otrzymanych wyników badań. W efekcie zgromadzono wiarygodne i reprezentatywne dane uczące. Teoria mówi, że nie należy do wektora danych wejściowych wprowadzać nadmiarowych wielkości, o których na podstawie obserwacji lub przesłanek teoretycznych wiemy, że ich wpływ na modelowane zjawisko jest znikomy. Jeśli jednak nie ma całkowitej pewności co do znaczenia danego parametru decyzyjnego, należy go uwzględnić w wymiarze wektora wielkości wejściowych. Jeżeli na podstawie danych zawartych w ciągu uczącym okaże się, że dany parametr nie ma wpływu na przebieg zjawiska, w czasie uczenia wagi połączeń synaptycznych pomiędzy wejściem reprezentującym dany parametr a wyjściami sieci zostaną automatycznie ustalone na poziomie bliskim zeru. Spowoduje to, że wartości podawane na to wejście nie będą miały praktycznie wpływu na sygnały wyjściowe sieci. Taka metodyka postępowania jest korzystniejsza dla modelowania neuronowego danej zależności niż przypadkowe pominięcie potencjalnie ważnego parametru decyzyjnego. Dlatego też w zbiorze uczącym umieszczono również wielkości słabo skorelowane z analizowanymi cechami elektrycznymi.

Dane doświadczalne tworzące ciąg uczący sieci powinny spełniać kilka zasadniczych wymagań. Rozmiar zbioru uczącego, na podstawie którego można prawidłowo nauczyć sieć, zależy zarówno od rozmiaru sieci (liczby neuronów i warstw ukrytych), jak i od złożoności

wielowymiarowej i nieliniowej, modelowanej zależności funkcyjnej. Najprostsza zasada heurystyczna uzależniająca rozmiar zbioru uczącego od rozmiaru sieci mówi, że liczba elementów ciągu uczącego powinna być dziesięciokrotnie wyższa od całkowitej liczby połączeń międzyneuronowych występujących w strukturze sieci [Tadeusiewicz 1998]. Warunek ten został spełniony. Zbiór uczący musi być również reprezentatywny dla danego zjawiska. Oznacza to, że punkty eksperymentalne powinny być równomiernie rozłożone w hiperprzestrzeni wielkości wejściowych. Uczenie sieci ciągiem niespełniającym tego wymagania spowoduje, że sieć będzie dobrze odwzorowywać zjawisko wyłącznie w pewnym zakresie danych wejściowych, a poza nim będzie popełniać znaczące błędy wynikające z braku wzorców uczących dla tych obszarów.

Sieci neuronowe przetwarzają wyłącznie dane numeryczne. Zakresy wartości wielkości wchodzących w skład wektora wejściowego muszą być porównywalne. W przypadku znacznego zróżnicowania zakresów numerycznych poszczególnych parametrów konieczne jest ich unormowanie.

Kolejnym etapem jest wybór rodzaju sieci i rodzaju funkcji aktywacji neuronów w poszczególnych warstwach. Wykorzystanie neuronów o nieliniowej funkcji aktywacji, przy odpowiednio dobranej strukturze sieci, pozwala na odwzorowanie praktycznie dowolnie złożonej zależności nieliniowej. Najczęściej stosowanym w inżynierskiej praktyce obliczeniowej typem sztucznej sieci neuronowej jest wielowarstwowa sieć jednokierunkowa. Ma ona stosunkowo prostą strukturę bez sprzężeń zwrotnych, a sygnały przechodzą pomiędzy neuronami zawsze w jednym kierunku: od wejścia do wyjścia sieci.

Funkcja przejścia $f(v)$ może być liniowa lub nieliniowa. W oparciu o wyniki przeprowadzonej w rozdziale 7 tej pracy analizy wpływu zmiennych niezależnych na przenikalność elektryczną oraz współczynnik strat dielektrycznych zastosowano w proponowanym modelu, często stosowaną w praktyce nieliniową, sigmoidalną funkcję przejścia

$$f(v) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot v)} \quad (8.1)$$

gdzie $\beta > 0$ jest parametrem dobieranym empirycznie przez użytkownika w taki sposób, aby uzyskać właściwy efekt uczenia się sieci.

W sieciach nieliniowych (z nieliniową – np. sigmoidalną funkcją aktywacji) wprowadzenie do struktury warstw ukrytych teoretycznie powoduje poszerzenie klasy zadań, jakie może rozwiązać dana sieć. Zgodnie z teorią Kołmogorowa [Ossowski 2000] aproksymacja nieliniowych funkcji ciągłych jest możliwa przy użyciu sieci o jednej warstwie ukrytej. Przy N neuronach wejściowych wystarczy użycie $(2N+1)$ neuronów w warstwie ukrytej [Ossowski 2000].

Do tworzenia modelu pozwalającego na oszacowanie cech elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy (współczynnika strat dielektrycznych oraz przenikalności elektrycznej) wykorzystano jednokierunkowe wielowarstwowe SSN o nieliniowych funkcjach aktywacji neuronów.

Jako zmienne wyjściowe z sieci przyjęto $tg\delta$ – współczynnik strat dielektrycznych oraz ϵ_r – przenikalność elektryczną.

Ogólny zapis modelu SSN można przedstawić funkcją:

$$tg\delta = f(a, b, c, Vz, Tl, Bi, Po, GL, Wl, Sk, Ls, Lo, a_w, w, T, f) \quad (8.2)$$

$$\epsilon_r = f(a, b, c, Vz, Tl, Bi, Po, GL, Wl, Sk, Ls, Lo, a_w, w, T, f) \quad (8.3)$$

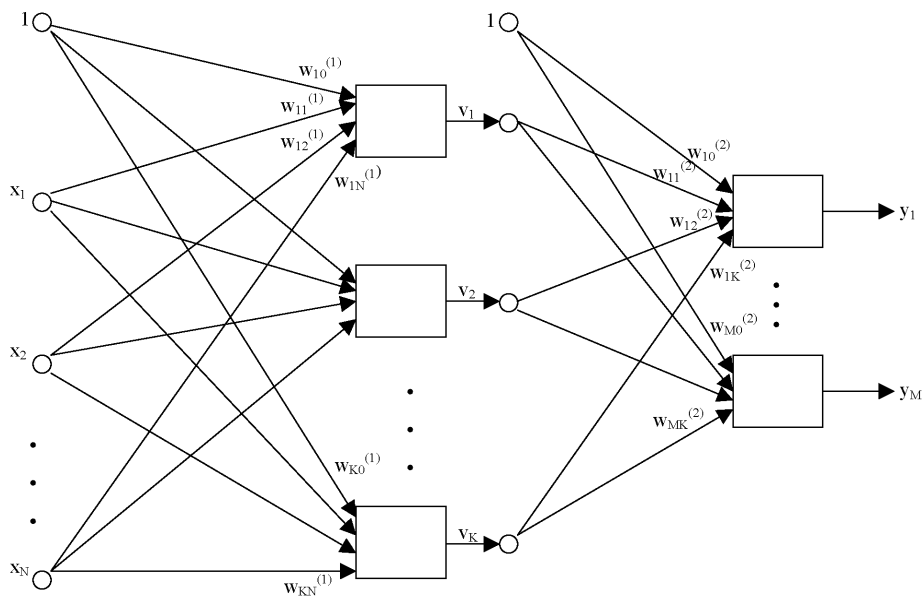
Dane uzyskane z eksperymentu podzielono na zbiory: uczący i testujący. Zbiór uczący wykorzystano do uczenia sieci o różnych architekturach, a zbiór testujący służył do wyboru sieci neuronowej, najdokładniej opisującej analizowane zjawisko. Następnie dokonano wyboru algorytmu uczącego oraz trenowano wybrane struktury sieci.

Dla nieliniowych sieci wielowarstwowych jednokierunkowych najchętniej wybieranym algorytmem uczenia jest algorytm wstecznej propagacji błędów.

Z powodu trudności w jednoznacznym i obiektywnym określeniu zasad optymalnego doboru liczby warstw ukrytych sieci oraz liczby neuronów w tych warstwach celowym jest przeprowadzenie procesu uczenia dla założonej liczby różnych konfiguracji sieci, a następnie wybór najlepszej struktury w oparciu o między innymi statystyczną analizę błędów. Zbyt mała liczba neuronów lub warstw ukrytych powoduje trudności w osiągnięciu poprawnego, wiarygodnego odwzorowania modelowanego zjawiska. Z kolei zbyt duża liczba neuronów może doprowadzić do przeuczenia sieci, czyli do odwzorowywania danych wejściowych ze zbyt dużą dokładnością przy zaniku zdolności sieci do generalizacji zdobytej „wiedzy”.

Uczenie sieci przeprowadza się za pomocą wyodrębnionego z danych doświadczalnych ciągu uczącego A_n , przyjęto jego wartość na poziomie 0,1% wartości wyjściowej.

Rysunek 8.1 przedstawia strukturę perceptronu wielowarstwowego z jedną warstwą ukrytą [Ossowski 2000]. Schemat zawiera oznaczenia parametrów oraz sygnałów sieci wykorzystywane w dalszych rozważaniach. Na wejście sieci podawany jest wektor danych wejściowych o postaci $X = [x_0, x_1, \dots, x_N]$. Wagi neuronów warstwy ukrytej ($w_{10}^{(1)}, \dots, w_{KN}^{(1)}$) oznaczono indeksem górnym „(1)”, a wagi neuronów warstwy wyjściowej indeksem górnym „(2)”. Sygnały wyjściowe neuronów warstwy ukrytej oznaczono jako v_i , dla $i = 1, 2, \dots, K$, sygnały wyjściowe neuronów warstwy wyjściowej (a tym samym sygnały wyjściowe sieci) oznaczono jako y_i dla $i = 1, 2, \dots, M$.



Rys. 8.1. Ogólny schemat perceptronu dwuwarstwowego [Ossowski 2000]

Fig. 8.1. General outline of the two-tier perceptron

Algorytm wstecznej propagacji błędów w postaci klasycznej wykorzystuje gradientowe metody optymalizacji dla doboru wartości wag neuronów w całej sieci. W dalszych rozważaniach przyjęto sigmoidalną funkcję aktywacji neuronów w warstwie ukrytej i wyjściowej oraz założenie, że aktualizacja wag odbywa się po każdorazowej prezentacji próbki. Dla tego algorytmu definiuje się funkcję celu dla jednej próbki uczącej [Ossowski 2000]:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (y_k - d_k)^2 \quad (8.4)$$

gdzie:

y_k – odpowiedź sieci,

d_k – wartość zadana,

M – liczba odpowiedzi sieci.

Proces uczenia, zmodyfikowaną metodą wstecznej propagacji błędów, prowadzono przez 600 – 800 epok dla sieci dwuwarstwowych. Zmieniano liczbę neuronów w warstwach ukrytych. Sieć dwuwarstwowa zawierała 2 neurony wyjściowe i jedną warstwę ukrytą ze zmieniającą się liczbą neuronów od 2 do 33. Proces uczenia sieci powtarzano trzykrotnie dla każdej architektury.

Dla wydzielonego zbioru danych nie wchodzących w skład zbioru uczącego przetestowano proces uczenia, kontrolując czy nie doszło do zjawiska przeuczenia sieci. Błąd odpowiedzi sieci na wektory wejściowe, które nie były zawarte w zbiorze uczącym jest miarą zdolności sieci do generalizacji zdobytej wiedzy.

Przy szacowaniu przenikalności elektrycznej oraz współczynnika strat dielektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy za pomocą Sztucznych Sieci Neuronowych najlepsze wyniki otrzymano dla sieci dwuwarstwowej 16→2 (o 16 neuronach w warstwie ukrytej i 2 neuronach w warstwie wyjściowej).

8.3. Weryfikacja modelu cech elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy opartego na SSN

Dla zastosowania utworzonej i nauczonej sieci neuronowej najważniejszy wydaje się wynik jej testowania będący weryfikacją przydatności praktycznej. Sieć neuronowa nauczona na podstawie zbioru uczącego została przetestowana za pomocą zbioru testującego, którego elementy nie należą do zbioru uczącego.

W wyniku wprowadzenia danych testujących (losowo wybranych przypadków dla wszystkich odmian pszenicy – tab. 8.4) – na wyjściu sieci uzyskano wartości wielkości wyjściowych. Na rysunkach 8.2–8.5 przedstawiono różnice między wartościami pomiarowymi (rzeczywistymi) a odpowiedziami ze sztucznej sieci neuronowej (po odnormowaniu). W tabeli 8.4 przedstawiono też wartości błędów względnych poszczególnych wyjść dla zbioru testującego. Wyznaczono błędy średnie dla poszczególnych częstotliwości pola elektromagnetycznego stosowanego w pomiarach dla stworzenia zbioru testującego – tabela 8.5. Najniższe wartości średnich błędów uzyskano dla częstotliwości pomiarowych 1 kHz, ale dla całego testowego zbioru danych mieściły się one w zakresie 10–20%, chociaż dla poszczególnych punktów pomiarowych osiągały nawet około 36% (tab. 8.4).

Tabela 8.4
Table 8.4

Opis wariantów pomiarowych dla zbioru testującego oraz wyznaczone względne błędy oszacowania z zastosowanej SSN dla obydwu wyjść sieci
Description of measuring variants for the testing set and appointed relative mistakes of pricing the net from applied Artificial Neural Networks

Odmiana Variety	w	T	f	Błąd wzg. dla $tg\delta$ Relative error for $tg\delta$	Błąd wzg. dla ϵ_r Relative error for ϵ_r
	[%]	[°C]	[Hz]	[%]	[%]
1	2	3	4	5	6
Almari	12,0	20	100	4,16	27,52
Finezja	9,0	15	100	6,55	36,35
Helia	12,0	20	100	15,48	5,76
Jasna	18,0	25	100	0,78	20,01
Kobra	15,0	20	100	16,73	0,18
Mewa	14,0	20	100	11,85	22,23
Monsun	11,0	15	100	7,72	11,86
Nawra	15,0	20	100	9,61	6,50
Pasteur	13,0	10	100	8,70	12,01
Rubens	13,0	20	100	8,01	19,29
Tonacja	16,0	20	100	21,57	13,19
Triso	17,0	25	100	0,37	8,78
Turnia	15,0	20	100	11,40	18,02
Zyta	12,0	20	100	25,66	20,89
Almari	12,0	20	1000	16,14	16,09
Finezja	9,0	20	1000	14,87	10,20
Helia	12,0	30	1000	17,02	3,60
Jasna	18,0	20	1000	2,64	9,28
Kobra	15,0	20	1000	0,16	2,74
Mewa	14,0	20	1000	14,60	12,64
Monsun	11,0	10	1000	17,63	19,91
Nawra	15,0	20	1000	18,18	11,46
Pasteur	13,0	20	1000	9,67	12,70
Rubens	13,0	10	1000	12,98	25,48
Tonacja	16,0	20	1000	13,82	11,85
Triso	17,0	25	1000	23,03	13,93
Turnia	15,0	20	1000	20,40	9,56
Zyta	12,0	15	1000	10,82	14,66
Almari	12,0	20	10000	3,60	19,47
Finezja	9,0	15	10000	15,70	20,69

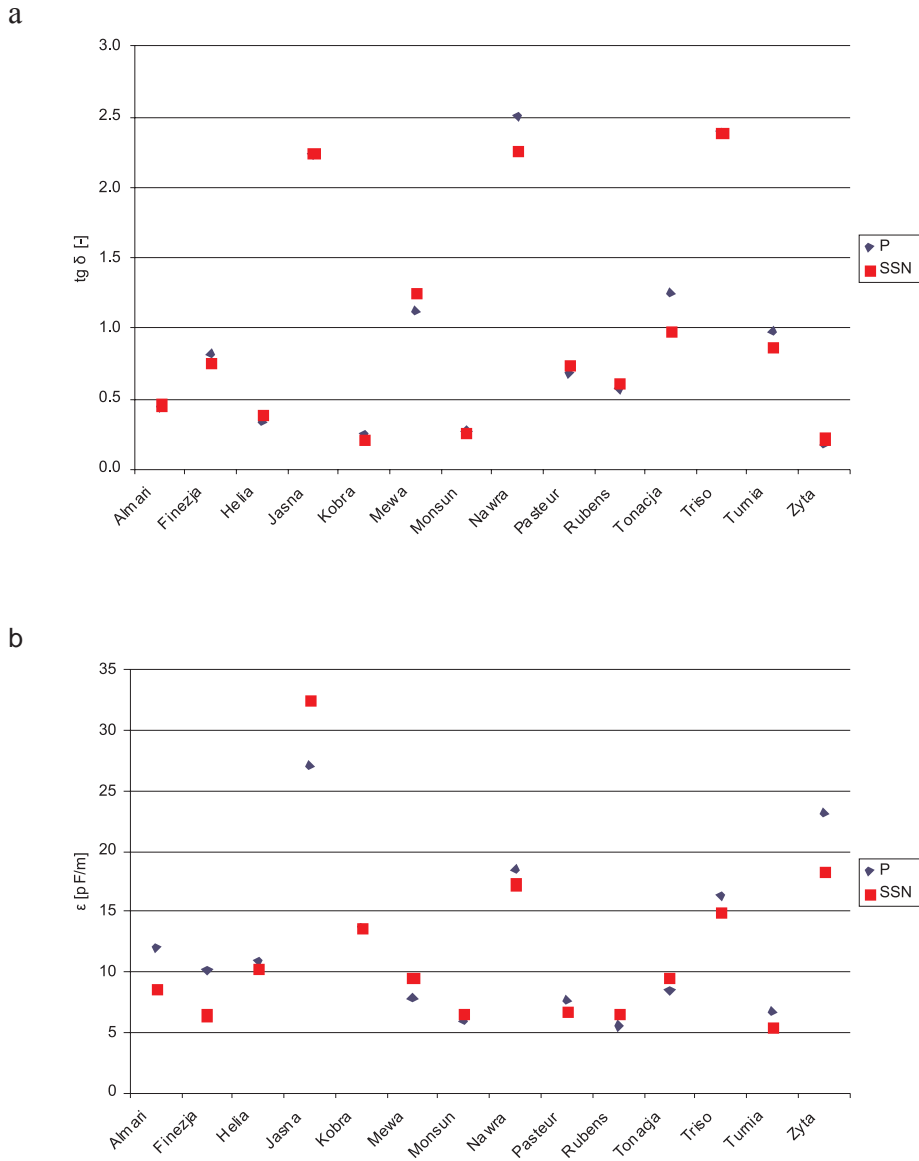
Tabela 8.4. cd.
Table 8.4. cont.

1	2	3	4	5	6
Helia	12,0	20	10000	36,61	5,47
Jasna	18,0	10	10000	31,04	10,57
Kobra	15,0	20	10000	13,06	26,23
Mewa	14,0	20	10000	33,53	14,14
Monsun	11,0	20	10000	20,89	12,93
Nawra	15,0	15	10000	36,70	23,79
Pasteur	13,0	20	10000	2,24	12,06
Rubens	13,0	30	10000	22,67	4,74
Tonacja	16,0	25	10000	9,79	24,31
Triso	17,0	20	10000	10,29	6,31
Turnia	15,0	15	10000	20,47	11,01
Zyta	12,0	20	10000	8,89	6,38
Almari	12,0	20	100000	25,40	37,79
Finezja	9,0	25	100000	18,56	20,27
Helia	12,0	20	100000	26,87	28,88
Jasna	18,0	15	100000	22,89	10,03
Kobra	15,0	20	100000	4,74	0,75
Mewa	14,0	20	100000	28,66	27,11
Monsun	11,0	25	100000	7,97	9,19
Nawra	15,0	15	100000	7,24	18,47
Pasteur	13,0	30	100000	36,27	2,87
Rubens	13,0	20	100000	23,32	24,97
Tonacja	16,0	20	100000	34,16	8,76
Triso	17,0	10	100000	3,71	8,46
Turnia	15,0	20	100000	30,66	20,54
Zyta	12,0	20	100000	16,91	2,37

Tabela 8.5
Table 8.5

Średnie wartości błędów względnych oszacowania dla zbioru testującego SSN
Mean of relative errors of estimating for the testing ANN set

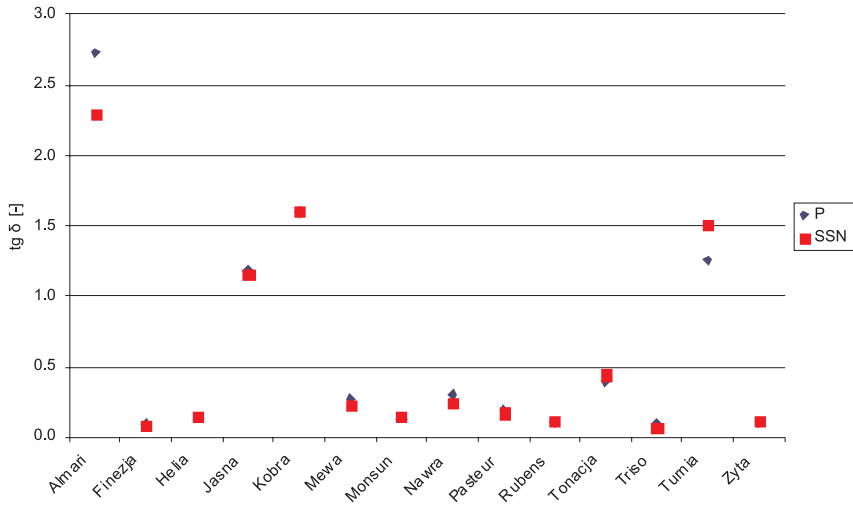
f	Średni błąd względny dla $t\delta$ Average relative error for $t\delta$	Średni błąd względny dla ε Average relative error for ε
[Hz]	[%]	[%]
100	10,61	15,90
1000	13,71	12,44
10000	18,96	14,15
100000	20,52	15,75



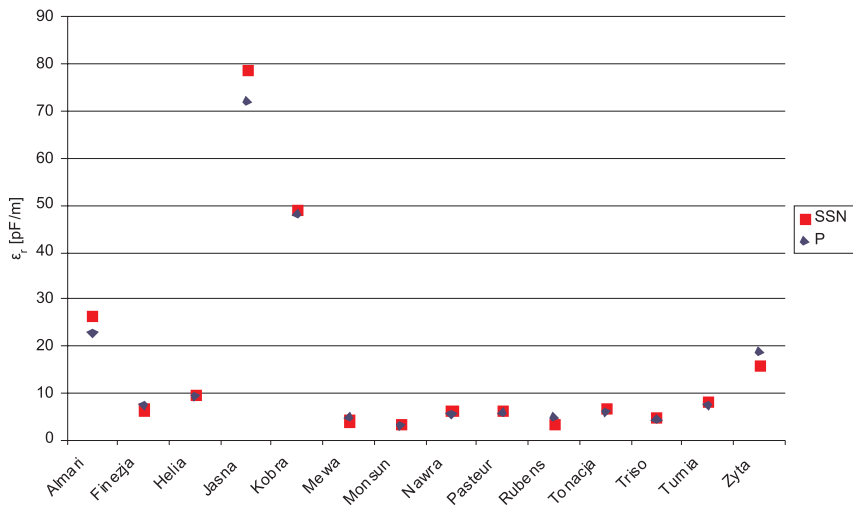
Rys. 8.2. Wartości pomiarowe (P) oraz uzyskane ze sztucznej sieci neuronowej (SSN) dla zbioru testującego przy częstotliwości $f=100$ Hz, a – współczynnik strat dielektrycznych, b – przenikalność elektryczna

Fig. 8.2. Measuring values (P) and get from the artificial neural network (SSN) for the set testing at the $f=100$ Hz frequency, a – dielectric loss factor, b – electric permittivity

a



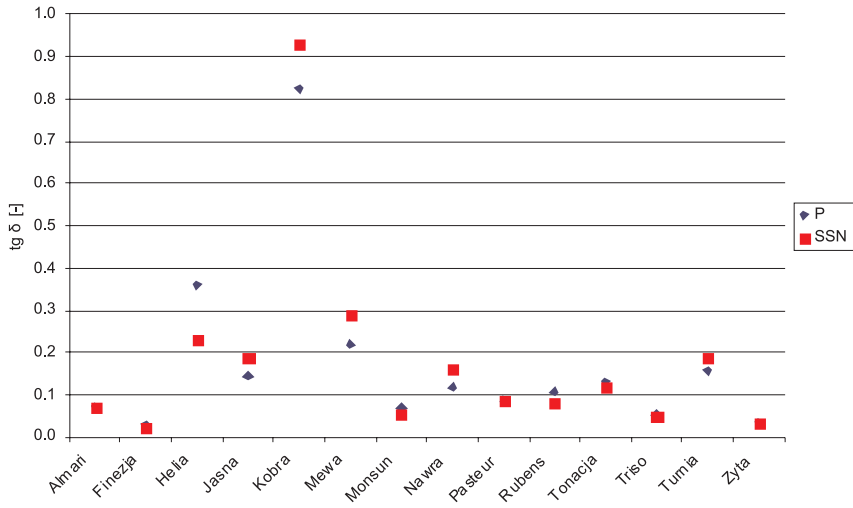
b



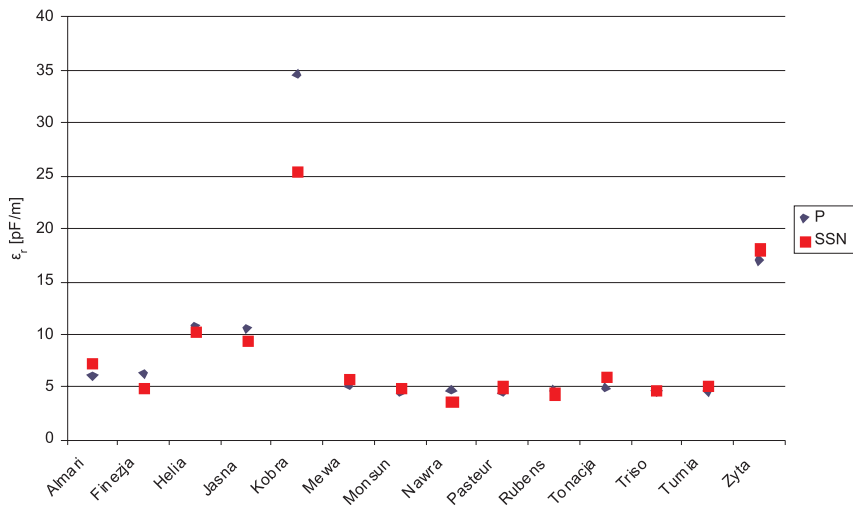
Rys. 8.3. Wartości pomiarowe (P) oraz uzyskane ze sztucznej sieci neuronowej (SSN) dla zbioru testującego przy częstotliwości $f=1$ kHz, a – współczynnik strat dielektrycznych, b – przenikalność elektryczna

Fig. 8.3. Measuring values (P) and get from the artificial neural network (SSN) for the set testing at the $f=1$ kHz frequency, a – dielectric loss factor, b – electric permittivity

a



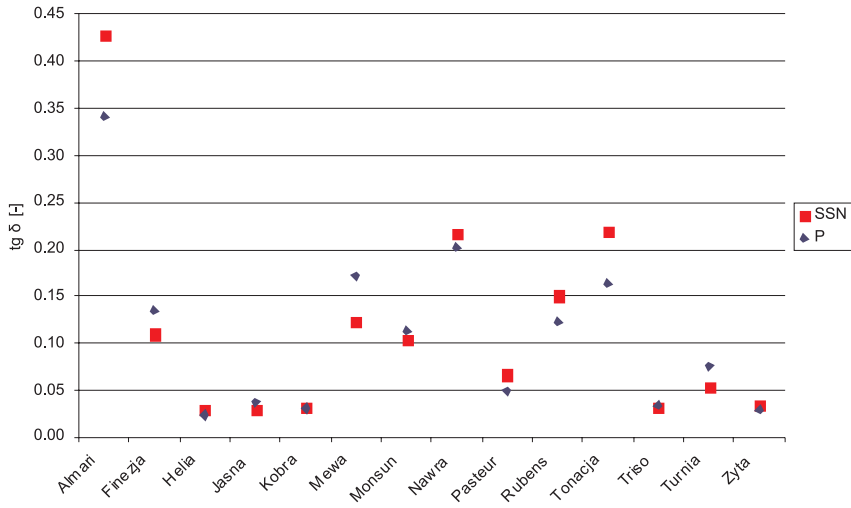
b



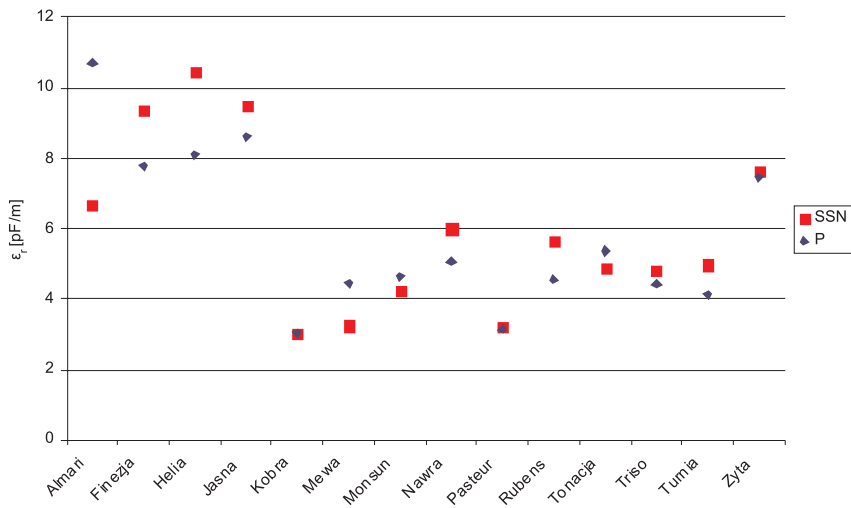
Rys. 8.4. Wartości pomiarowe (P) oraz uzyskane ze sztucznej sieci neuronowej (SSN) dla zbioru testującego przy częstotliwości $f = 10$ kHz, a – współczynnik strat dielektrycznych, b – przenikalność elektryczna

Fig. 8.4. Measuring values (P) and get from the artificial neural network (SSN) for the set testing at the $f = 10$ kHz frequency, a – dielectric loss factor, b – electric permittivity

a



b



Rys. 8.5. Wartości pomiarowe (P) oraz uzyskane ze sztucznej sieci neuronowej (SSN) dla zbioru testującego przy częstotliwości $f = 100$ kHz, a – współczynnik strat dielektrycznych, b – przenikalność elektryczna

Fig. 8.5. Measuring values (P) and get from the artificial neural network (SSN) for the set testing at the $f = 100$ kHz frequency, a – dielectric loss factor, b – electric permittivity

Stwierdzono, że jeśli z ciągu uczącego zabrać informacje dotyczące geometrii ziarna, to średnie błędy rzędu 10–20% na obu wyjściach wzrastają do 30–40%, a jeśli zabrać cechy chemiczne (zawartość białka, popiołu i glutenu itp.), to błąd wzrasta do 30–50%.

Do oszacowania dokładności nauczonej sieci zastosowano też [Tadeusiewicz 1998, Stanisz 2006]:

1. Średnie odchylenie (Mean Deviation)

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{calc} - y_i^{exp})}{n} \quad (8.5)$$

2. Odchylenie standardowe (Root Mean Square Deviation)

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{calc} - y_i^{exp})^2}{n}} \quad (8.6)$$

y_i^{calc} – wartość obliczona przez sieć,

y_i^{exp} – wartość doświadczalna,

n – liczba elementów zbioru testowego.

Odchylenie średnie wynosiło dla współczynnika strat dielektrycznych $MD = -0,00738$ a dla przenikalności elektrycznej $MD = -0,02882$. Odchylenie standardowe wynosiło odpowiednio dla $tg\delta$ $RMSD = 0,0948$ a dla ϵ , $RMSD = 2,2561$. Rozkład wartości generowanych przez tę sieć porównano z wartościami uzyskanymi w eksperymencie dla losowo wybranych próbek ze wszystkich badanych odmian pszenicy. Do porównania użyto testu t, w rezultacie uzyskano zgodność obu rozkładów (przy poziomie ufności $\alpha = 0,95$).

Uzyskany model wykorzystujący Sztuczne Sieci Neuronowe może być z powodzeniem stosowany do szacowania przenikalności elektrycznej oraz współczynnika strat dielektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy.

9. PODSUMOWANIE I DYSKUSJA NAD WYNIKAMI

W pracy przedstawiono analizę licznych czynników wpływających na cechy elektryczne warstwy ziarniaków pszenicy. Opisano 14 odmian pszenicy w zakresie częstotliwości akustycznych (100 Hz – 100 kHz) dla wilgotności materiału badawczego od 9 do 24% oraz temperatur od 10 do 30°C.

W literaturze można spotkać wiele prób opisu zależności badanych parametrów od jednej ze zmiennych niezależnych. Najczęściej badane są zależności od częstotliwości pola elektromagnetycznego, w której prowadzone są pomiary, od wilgotności materiału, rzadziej od temperatury. Zdecydowanie mniej jest prac zawierających próby analizowania wpływu innych czynników takich jak geometria ziarniaków [Łuczycka 2002], skład chemiczny [Nelson i Stetson 1976, Łuczycka i Romański 2008], uszkodzenia mechaniczne ziarna [Majewska i in. 2005, 2008]. Trudno jednakże porównywać uzyskiwane przez badaczy wyniki, choćby ze względu na niejednakowe stosowane metody badawcze oraz różne stosowane odmiany pszenicy.

W publikacji zaprezentowano analizę wpływu częstotliwości pola elektromagnetycznego, wilgotności i temperatury na współczynnik strat dielektrycznych i przenikalność elektryczną ziaren pszenicy. Najczęściej w literaturze można spotkać opis tych zależności za pomocą funkcji wykładniczej lub potęgowej. W efekcie zaplanowanego i przeprowadzonego eksperymentu oraz wnikliwej analizy uzyskanych wyników zdecydowano się na opisanie zależności współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ oraz przenikalności elektrycznej ϵ od częstotliwości pola elektromagnetycznego f funkcją potęgową (6.3 i 6.4). Na szczególną uwagę zasługuje wykazana zależność współczynnika strat dielektrycznych od wilgotności. Opisano ją funkcją sigmoidalną (6.3). Wpływ wilgotności na przenikalność elektryczną można wyrazić funkcją ekspotencjalną (6.4). Wzrost temperatury materiału badawczego powoduje zarówno niewielki wzrost współczynnika strat dielektrycznych, jak i przenikalności elektrycznej. Dla niektórych odmian występują jednak maksima lokalne, co zgodne jest z teorią dielektryków [Lisowski 2004]. Nie potwierdzono w efekcie analizy otrzymanych wyników pomiarów wskazywanej przez Torosjana i Konochową [1972] wyraźnej zależności przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych od temperatury ziarniaków pszenicy.

Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że dla każdej z badanych odmian funkcje opisują wymienione zależności w zadowalający sposób (wysokie współczynniki determinacji), jednak różnice międzyodmianowe na tyle silnie wpływają na ich przebieg, że opis cech elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy z pominięciem właściwości odmianowych jest niemożliwy.

Zaproponowano empiryczne modele cech elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy wyznaczone metodą regresji wielorakiej w oparciu o metodę najmniejszych kwadratów. Cechy elektryczne opisywano przy założeniu, że istnieje związek korelacyjny pomiędzy

wyznaczonymi cechami geometrycznymi ziarna, jego składem chemicznym, właściwościami technologicznymi, wilgotnością, temperaturą materiału oraz częstotliwością pola elektromagnetycznego a współczynnikiem strat dielektrycznych i przenikalnością elektryczną warstwy ziarniaków pszenicy. Pośrednio założono, że scharakteryzowanie materiału badawczego poprzez jego właściwości geometryczne i chemiczne pozwoli wyznaczyć wartości parametrów elektrycznych opisujących badany materiał. Zadowolające wartości współczynnika determinacji uzyskano, wyznaczając formuły matematyczne opisujące zarówno przenikalność elektryczną, jak i współczynnik strat dielektrycznych dla stałej częstotliwości pola elektromagnetycznego. Wprowadzenie do grupy zmiennych niezależnych częstotliwości pola elektromagnetycznego spowodowało tak znaczne pogorszenie współczynnika determinacji, że ewentualny model empiryczny oparty na formułach matematycznych zawierających tę zmienną nie byłby przydatny praktycznie – współczynnik determinacji tak dobranych formuł wynosił 32,5% dla współczynnika strat dielektrycznych oraz 38,2% dla przenikalności elektrycznej.

Założony cel poznawczy pracy w zakresie opisu charakteru wpływu poszczególnych zmiennych niezależnych na analizowane cechy elektryczne badanego materiału, jak również określenia tych wielkości fizycznych i chemicznych, które w najsilniejszy sposób determinują współczynnik strat dielektrycznych oraz przenikalność elektryczną warstwy ziarniaków pszenicy, został zrealizowany. Nie osiągnięto jednak za pomocą zastosowanych metod celu, jakim było stworzenie modelu pozwalającego na wyznaczenie z zadowalającą dokładnością parametrów elektrycznych materiału badawczego w całym zakresie zmian wielkości wejściowych. Również w literaturze brak kompleksowego opracowania zawierającego próbę jednoczesnego uwzględnienia wielu zmiennych, niezależnie od siły ich oddziaływania.

W rozprawie wskazano na przydatność sztucznych sieci neuronowych do analizy cech elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy. Zastosowanie sieci Kohonena do analizy skupień w zakresie cech elektrycznych, jakimi charakteryzują się badane odmiany pszenicy, pozwoliło na rozmieszczenie badanych odmian na mapie topologicznej stworzonej przez sieć neuronową. Podziału na pokazane w tabelach 8.1–8.3 grupy nie można interpretować, badając jakąś pojedynczą cechę fizyczną, chemiczną czy technologiczną charakteryzującą odmianę.

Do szacowania właściwości elektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy zastosowano wielowarstwową sieć jednokierunkową. Co prawda, zastosowanie tej metody nie pozwala na wizualizację charakteru zależności między poszczególnymi zmiennymi niezależnymi (wejściowymi) a zmiennymi wyjściowymi, ale ma wymiar praktyczny oraz umożliwia dużej grupie parametrów wejściowych – znacznie różniących się wagą wpływu na wielkość wyjściową – wyznaczyć wartości zmiennych wyjściowych. Taki sposób modelowania rzeczywistości pozwala na znaczne ograniczenia założeń upraszczających.

W proponowanym modelu opartym na sztucznej sieci neuronowej (SSN) wprowadzono wszystkie wyznaczone wielkości charakteryzujące zarówno materiał badawczy, jak i warunki pomiaru. Do uczenia sieci zastosowano wielkości mierzone – sieć była uczona na tablicy zawierającej ponad 2000 wzorców (danych pomiarowych), dla kontroli procesu uczenia się sieci wydzielono również niewielki zbiór walidacyjny. Zbiór testujący (weryfikacyjny) zawierał 56 rekordów. Dla stworzenia go przeprowadzono osobne prace pomiarowe. Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że uzyskany model ma znaczenie praktyczne, ponieważ można na podstawie wyznaczonych zmiennych niezależnych określić oczekiwane wartości cech elektrycznych.

Parametry łatwo mierzalne, a zarazem determinujące cechy elektryczne masy ziarna takie jak średnie wymiary geometryczne ziarniaków oraz skład chemiczny ziarna pszenicy pozwolą zakwalifikować badaną odmianę pszenicy do grupy, w ramach której właściwości elektryczne różnią się nieznacznie. Umożliwi to precyzyjniejszy podział odmian pszenicy ze względu na ich cechy elektryczne niż stosowany obecnie w wielu miernikach wilgotności, a w świetle przeprowadzonych badań niemający uzasadnienia podział na pszenice jare i ozime.

Wyniki badań cech elektrycznych ziarniaków pszenicy w masie oraz znajomość rodzaju wpływu analizowanych cech fizycznych i chemicznych na właściwości elektryczne ziarniaków są ważne dla konstruktorów urządzeń pomiarowo-kontrolnych. Stosowane obecnie powszechnie techniki mikroprocesorowe w automatyce i technice pomiarowej umożliwiają zastosowanie efektów pracy w praktyce. Inżynierowie elektrycy już na poziomie projektowania aparatury i urządzeń służących do kontrolowania i automatyzowania procesów w przetwórstwie rolno-spożywczym mają wpływ na kształtowanie ostatecznego mechanizmu działania tych urządzeń. Prezentowany model SSN może umożliwić uwzględnienie nowych wprowadzanych odmian i ich cech charakterystycznych już na etapie projektowania aparatury. Jego zastosowanie pozwala uwzględnić występujące różnice międzyodmianowe, co umożliwi uniknięcie konieczności czasochłonnej kalibracji urządzeń kontrolno-pomiarowych przez ich użytkowników przez przeniesienie tego procesu na etap projektowania i wytwarzania aparatury.

Problem badania cech elektrycznych masy ziarna pozostaje nadal otwarty. Dalsze badania mające na celu doskonalenie teorii zastosowania cech elektrycznych warstwy nasion w technice pomiarowej oraz procesach suszenia i elektrostymulacji należałoby prowadzić w następujących kierunkach:

- uwzględnienie wpływu uszkodzeń mechanicznych ziarna na rejestrowane wielkości elektryczne, w tym również uszkodzeń przez szkodniki;
- badania istnienia wpływu porażenia przez choroby i grzyby;
- badania oddziaływania zanieczyszczeń, nasion chwastów, pyłów, domieszki rozdrobnionych nasion;
- rozpoznanie zjawisk występujących wewnątrz ziarniaka znajdującego się w zmiennym polu elektromagnetycznym.

10. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy cech elektrycznych warstwy ziarniaków 14 badanych odmian pszenicy, w zakresie częstotliwości pola elektromagnetycznego od 100 Hz do 100 kHz, wilgotności ziarna od 9 do 24% i w temperaturach od 10 do 30°C, można sformułować następujące wnioski:

1. Przenikalność elektryczna oraz współczynnik strat dielektrycznych ziaren pszenicy w masie są modyfikowane zarówno przez cechy geometryczne ziarna, jak i skład chemiczny ziarniaków badanych odmian pszenicy.

2. Zależności przenikalności elektrycznej jak i współczynnika strat dielektrycznych ziaren pszenicy od częstotliwości pola elektromagnetycznego są funkcją potęgową.

3. Wilgotność pszenicy w istotny statystycznie sposób wpływa na wartości przenikalności elektrycznej oraz współczynnika strat dielektrycznych w całym zakresie analizowanych częstotliwości pola elektromagnetycznego, dla wszystkich badanych odmian pszenicy. Współczynnik strat dielektrycznych ziaren pszenicy rośnie jednocześnie ze wzrostem wilgotności i zależność tę można opisać funkcją sigmoidalną (R^2 od 75 do 99% dla poszczególnych odmian). Natomiast przenikalność elektryczną ziaren pszenicy w funkcji wilgotności można opisać funkcją eksponentialną (R^2 od 75 do 95% dla poszczególnych odmian).

4. Jednocześnie ze wzrostem temperatury ziarna zauważalny jest niewielki trend rosnący obydwu analizowanych wielkości elektrycznych charakteryzujących badany materiał.

5. Sformułowane empiryczne modele opisują z zadowalającą dokładnością analizowane cechy elektryczne dla określonych częstotliwości pola elektromagnetycznego. Nie jest jednak możliwe sformułowanie wystarczająco dokładnego modelu empirycznego opisującego badane cechy elektryczne warstwy ziaren pszenicy w całym badanym zakresie zmian częstotliwości pola elektromagnetycznego.

6. Uzyskany model wykorzystujący Sztuczne Sieci Neuronowe może być z powodzeniem stosowany do szacowania zarówno przenikalności elektrycznej, jak i współczynnika strat dielektrycznych warstwy ziaren pszenicy, co potwierdza dobra zgodność wyników symulacyjnych z wynikami eksperymentu weryfikacyjnego – średnie błędy względne mieszczą się w zakresie 10–20%.

PIŚMIENNICTWO

- Adamkiewicz J., Pietrzyk W., Złonkiewicz Z., Ścibisz M.: 1996. Resistance of wheat seeds influenced by tensile forces and electrostatic field. *International Agrophysics* 10, 263–267.
- Basow A.M., Izakow F.J., Smigiel W.N., Lukienko T.N., Jasnow G.A., Panus J.W.: 1968. Elektroziernooczistitielnyje maszyny. *Maszinostrojenije Moskwa*.
- Białobrzewski I.: 2005. Porównanie modeli GRNN utworzonych z wykorzystaniem modułów sieci neuronowych pakietów MATLAB i STATISTICA. *Inż. Rol.* 8 (68), 15–22.
- Biednow N.I.: 1974. Wlijanie czastoty elektriczeskogo pola na dielektriczeskiju pronicajemnost ziarna. *Sielskochozajstwiennyj Institut* 40, 16–20.
- Boniecki P.: 2005. Liniowe sieci neuronowe a metody analizy regresji w aspekcie ich wykorzystania w inżynierii rolniczej. *Inż. Rol.* 2 (62), 31–43.
- Borodin I.F.: 1971. Wybor elektriczeskoi schiemy modelirowanija ziernowoj massy. *Miech. i Elektr. Socji. Choz.* 1 42–44.
- Chełkowski A.: 1993. *Fizyka dielektryków*. PWN, Warszawa.
- Dąbrowski S., Grochowicz J., Pietrzyk W.: 1981. Elektryczne właściwości nasion i ich praktyczne wykorzystanie. *Problemy Agrofizyki*, 35, Lublin.
- Dielectric properties of grain and seed. 2002. *ASAE-Standards-2002-Standards-Engineering-Practices,-Data*. Ed. 49, 575–584.
- Grochowicz J.: 1994. *Maszyny do czyszczenia i sortowania nasion*. AR Lublin.
- Gąsiorowski H.: 2003. Aspekty żywieniowe pszenicy i jej przetworów. Część I – Ogólna charakterystyka. *Przegląd Zbożowo-Młynarski* 5, 28–30.
- Gąsiorowski H.: 2002. Aspekty żywieniowe pszenicy i jej przetworów – Lipidy. *Przegląd Zbożowo-Młynarski* 4, 29–30.
- Gąsiorowski H.: 2003. Aspekty żywieniowe pszenicy i jej przetworów – Błonnik pokarmowy w przetworach zbożowych. *Przegląd Zbożowo-Młynarski* 9, 31–33.
- Grzesiuk S., Kulka S.: 1988. *Biologia ziarniaków zbóż*. PWN, Warszawa.
- Haber T.: 1979. *Studia porównawcze nad charakterystyką biochemiczną i technologiczną niektórych rodów triticale wyhodowanych w Polsce w porównaniu z pszenicą i żytem*. Zeszyty Naukowe SGGW, Rozprawy Naukowe 120, Warszawa.
- Hanzelik F.: 1985. Dielectrical properties of wheat and barley grains. *Proceedings. Third International Conference on Physical Properties of Agricultural Materials Prague*, 469–474.
- Hebda T., Francik S.: 2006. Wykorzystanie SSN do wyznaczania twardości ziarna pszenicy. *Inż. Rol.* 12 (87), 181–188.
- Hilczer B., Małecki J.: 1992. *Elektrety i piezopolimery*. PWN, Warszawa.
- Hippel A.R.: 1963. *Dielektryki i fale*. PWN, Warszawa.

- Holmes M.G., McCallum K., Diament A.D.: 1991. Non-destructive measurement of seed moisture content using dielectric properties. *Seed-Science-and-Technology*, 19(2), 413–422.
- Hlavacova Z.: 2005. Utilization of electric properties of granular and powdery materials. *International Agrophysics*, 19(3), 209–213.
- Horyński M.B., Pietrzyk W., Walusiak S.: 1996. Badanie przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji naprężeń mechanicznych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 425, 67–71.
- Horyński M.B.: 1997. Analysis of correlations between the influence of electrostatic field and the influence of pressure on grain electric permittivity. 6th International Conference on Agrophysics: Book of Abstracts Vol. 1, Lublin, 74–77.
- Horyński M.B.: 1997a. Wpływ pola elektrostatycznego na przenikalność elektryczną ziarniaków pszenicy. *Polskie Towarzystwo Agrofizyczne I Zjazd Naukowy: Referaty i doniesienia*, Lublin, Polskie Towarzystwo Agrofizyczne, 57–59.
- Horyński M.B., Pietrzyk W.: 1998. Wykorzystywanie pola elektrostatycznego i ozonu do obniżania energochłonności procesu suszenia zbóż. *Wyd. Instytutu Agrofizyki w Lublinie*.
- Horyński M.B.: 1999. Influence of electric field and mechanical stresses on the electric properties of the grain. *Trends in agricultural engineering: Proceedings of the International Conference, Czech University of Agriculture Prague*, 35–39.
- Horyński M.B.: 2000. Analysis of correlations between the influence of electrostatic field and of pressure on the dielectric permittivity of grain. *International Agrophysics* 14, 53–56.
- Horyński M.B.: 2001. Wpływ pola elektrostatycznego na właściwości elektryczne. *Acta Agrophysica*, 40, 147 s.
- Horyński M.B.: 2001a. Właściwości elektryczne materiałów pochodzenia roślinnego, *Inż. Rol.* 2(22), 93–99.
- Horyński M.B., Walusiak S., Pietrzyk W.: 2003. Zależność właściwości elektrycznych ziarniaków zbóż od obciążeń mechanicznych i pola elektrostatycznego. *Acta Agrophysica* 93, 33–42.
- Horyński M.B.: 2003. Wpływ pola elektrostatycznego na rezystywność pyłu dielektrycznego powstałego z przemiału ziarniaków pszenicy. *Acta Agrophysica*, 82, 81–87.
- Horyński M.B.: 2004. CA measurement of organic dust electric permittivity, *Computer applications in electrical engineering. Institute of Industrial Electrical Engineering Poznań University of Technology*, 71–78.
- Horyński M.B.: 2005. Wykorzystanie właściwości elektrycznych do weryfikacji stopnia przemiału ziarna zbóż. *Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, 7, 92–96.
- Horyński M.B.: 2006. Wykorzystanie elektrycznych charakterystyk pyłów do weryfikacji stopnia przemiału ziarniaków zbóż, [w:] *Procesy fizyczne w kształtowaniu środowiska i jakości surowców żywnościowych*, Lublin, 77–78.
- IEC 250 1969. Recommended methods for the determination of the permittivity and dielectric dissipation factor of electrical insulating materials at power, audio and radio frequencies including metre wavelengths.
- Jasińska Z., Kotecki A., (red.): 1999. *Szczegółowa uprawa roślin*. AR we Wrocławiu.
- Kamińska W., Strahl A.: 1976. *Skład chemiczny roślin uprawnych*. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach.

- Klockiewicz J., Klamińska E., Brzeziński W.: 2001. Metoda oceny i klasyfikacji jakości odmian pszenicy. *Wiadomości odmianowe* 67 Słupia Wielka.
- Kordas L.: 2002. The effect of magnetic field on growth, development and yielding of spring wheat. *Polish Journal of Environmental Studies*, 11 (5), 527–530.
- Kordas L.: 2002a. Wpływ magnetycznej biostymulacji materiału siewnego pszenicy jarej na jej rozwój i plonowanie. *Fol. Univ. Agric. Stetin.*, 226, *Agricultura* 90, 123–129.
- Kornarzyński K., Pietruszewski S.: 1999. Kapilarno-wagowa metoda pomiaru szybkości pobierania wody przez ziarno pszenicy. *Inż. Rol.* 2 (8), 71–77.
- Kornarzyński K., Gładyszewska B., Pietruszewski S., Segit Z., Łacek R.: 2004. Ocena wpływu zmiennego pola magnetycznego na kiełkowanie ziarniaków pszenicy twardej. *Acta Agrophysica*, 4(1), 59–68.
- Kornarzyński K., Pietruszewski S., Segit Z., Szwed-Urbaś K., Łacek R.: 2004a. Wstępne badania wpływu stałego i zmiennego pola magnetycznego na szybkość wzrostu kielków pszenicy. *Acta Agrophysica*, 3(3), 521–528.
- Kraszewski A., Nelson, S.O.: 1989. Composite model of the complex permittivity of cereal grain. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 43(3), 211–219.
- Kraszewski A.W., Nelson S.O.: 1992. Resonant microwave cavities for sensing properties of agricultural products. *Transactions of the ASAE (USA)*, 35(4), 1315–1321.
- Kumar P., Singh S.P., Manohar R., Shukla J.P.: 2006. Moisture Dependent Electrical Parameter as an Indicator of Germination of Seed: A Case Study of Poppy Seed. *International Journal of Agricultural Research*, 1 (6), 534–544.
- Kurdziel R.: 1969. *Elektrotechnika*. PWN, Warszawa.
- Landau L., Lifszyc E.: 1960. *Elektrodynamika ośrodków ciągłych*. PWN, Warszawa.
- Langman J.: 1999. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w inżynierii rolniczej. *Inż. Rol.* 1(7), 153–158.
- Lawrence K.C., Nelson S.O., Kraszewski A.W.: 1991. Temperature-dependent model for the dielectric constant of soft red winter wheat. *Transactions of the ASAE*, 34(5), 2091–2093.
- Lewicki P.P.: 2003. Woda jako składnik żywności. *Przem. Spoż.* 57 (5), 8–14.
- Lisowski M.: 2004. Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław.
- Lista opisowa odmian. *Rośliny Rolnicze 2007. Część 1 Zbożowe*. COBORU Słupia Wielka.
- Łubkowski Z.: 1968. *Pszenica – charakterystyka botaniczna, hodowla i agrotechnika*. PWRiL, Warszawa, 21–23.
- Łuczycka D.: 1994. Metodyczne aspekty pomiarów cech elektrycznych ziarna zbóż. *Zeszyty Probl. Post. Nauk Rol.* 416, 139–148.
- Łuczycka D.: 1995. Elektryczny model pojedynczej warstwy ziarna zbóż. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 424, 321–326.
- Łuczycka D.: 1996. Analiza częstotliwościowa współczynnika strat dielektrycznych ziarn zbóż. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 444, 225–230.
- Łuczycka D.: 1996a. Cechy elektryczne ziarna zbóż – porównanie. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu CCLXXXVI*, 131–136.
- Łuczycka D.: 1998. Właściwości dielektryczne wybranych odmian pszenicy. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 454, 237–242.
- Łuczycka D.: 1999. Wpływ częstotliwości pola elektromagnetycznego na cechy elektryczne ziarna zbóż. *Inż. Rol.* 5, 181–186.

- Łuczycza D.: 1999a. The dependence of permittivity of a single layer of grain on the variety of wheat. Zbornik z II Medzinarodnej vedeckej konferencie, AGROTECH NITRA '99 1, 295–300.
- Łuczycza D.: 2002. Powiązanie cech dielektrycznych pojedynczej warstwy ziaren pszenicy z właściwościami geometrycznymi ziarniaka. Inż. Rol. 5 (38), 57–64.
- Łuczycza D., Pawlak T.: 2002. Cechy mechaniczne a właściwości elektryczne pojedynczego ziarna pszenicy. Inż. Rol. 5 (38), 65–72.
- Łuczycza D.: 2007. Wpływ stopnia rozdrobnienia ziarna pszenicy na cechy dielektryczne badanego materiału. Zesz. Nauk. UP we Wrocławiu, 552, 137–144.
- Łuczycza D., Romański L.: 2008. Analiza zależności pomiędzy cechami dielektrycznymi a właściwościami chemicznymi mąki. Inż. Rol. 5 (103), 91–95.
- Majewska K., Żywica R., Wójcik J., Białobrzewski I.: 2005. Właściwości przewodnościowe ziarna pszenicy. Inż. Rol. 9 (69), 197–205.
- Majewska K., Banach J.K., Żywica R., Białobrzewski I.: 2008. Influence of variety, moisture content, kernel size and applied current frequency on the electric properties of wheat grain. International Journal of Food Properties, 11(2), 392–406.
- Mohsenin N.N.: 1970. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publ. New York.
- Nelson S.O., Stetson L.E.: 1976. Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of hard red winter wheat. Journal of Agricultural Engineering Research, 21 (2), 181–192.
- Nelson S.O.: 1985. Electrical properties of agricultural products. A critical review. Transactions of the ASAE.
- Nelson S.O.: 1986. Models for estimating the dielectric constant of winter barley. International-Agrophysics, 2(3), 189–200.
- Nelson S.O.: 1986a. Mathematical models for the dielectric constants of spring barley and oats. Transactions of the ASAE, 29(2), 607–610.
- Nelson S.O., Lawrence K.C., Kandalá C.V.K., Himmelsbach D.S., Windham W.R., Kraszewski A.W.: 1990. Comparison of DC conductance, RF impedance, microwave, and NMR methods for single-kernel moisture measurement in corn. Transactions of the ASAE, 33(3), 893–898.
- Nelson S.O.: 1996. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. Transactions of the ASAE, 39 (4), 1475–1484.
- Nelson S.O.: 2006. Dielectric spectroscopy of wheat from 10 MHz to 1.8 GHz. www.dbnrrc.ars.usda.gov.
- Nowakowski K., Boniecki P.: 2008. Wpływ liczby zmiennych na jakość działania neuronowego modelu do identyfikacji mechanicznych uszkodzeń ziarniaków kukurydzy. Inż. Rol. 6 (104), 151–157.
- Ossowski S.: 2000. Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Pietruszewski S.: 1993. Effect of Magnetic Seed Treatment on Yields of Wheat Seed. Sci.& Technol. 21, 621–626.
- Pietruszewski S.: 1998. Stanowisko do przedsięwziętej biostymulacji nasion zmiennym polem magnetycznym. Inż. Rol. 2 (3). 31–36.
- Pietruszewski S.: 1999. Magnetyczna biostymulacja materiału siewnego pszenicy jarej. Wydawnictwo AR w Lublinie.

- Pietruszewski S., Kornarzyński K.: 2000. Wpływ przedsięwziętego oddziaływania pola magnetycznego na właściwości chemiczne i technologiczne pszenicy. *Inż. Rol.* 5 (16), 211–214.
- Pietrzyk W., Horyński M., Walusiak S.: 1995. Wpływ pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych na przenikalność dielektryczną nasion zbóż. *Technika rolnicza i jej rola w kształtowaniu środowiska rolniczego*, Szczecin, Akademia Rolnicza, 76–77.
- Pietrzyk W., Horyński M., Ścibisz M.: 1996. Influence of electrostriction forces on energy consumption of drying grain seeds in a drum drier. *International Agrophysics*, 10, 63–67.
- Pietrzyk W., Adamkiewicz J., Złonkiewicz Z., Ścibisz M.: 1996a. Pomiar rezystancji ziarniaków zbóż poddanych działaniu pola elektrycznego. *Probl. Inż. Rol.* 1, 91–95.
- Pietrzyk W.: 1996. Electric field influence on grain. *Acta Agrophysica*, 5, s. 118.
- Pietrzyk W., Horyński M., Ścibisz M.: 1996b. The electric field influence on drying curves of grain seeds in a fluidal layer. *International Agrophysics*, 10, 57–61.
- Pietrzyk W., Grundas S., Horyński M., Sumorek A.: 1998. Wykorzystanie pola elektrostatycznego i ozonu do obniżania energochłonności procesu suszenia zbóż. *Acta Agrophysica*, 16.
- Pietrzyk W., Sumorek A.: 1999. Influence of electric field on wheat grain drying. *International Agrophysics*, 13(2), 245–250.
- Pietrzyk W.: 2001. Modele ziarniaków zbóż stosowane w analizie elektrodynamicznej. *Monografia, Acta Agrophysica*, 42.
- Pietrzyk W., Horyński M., Walusiak S.: 2001. Właściwości elektryczne ziarniaków i ich zmiana pod wpływem pola elektrycznego. I Międzynarodowa Konferencja Naukowa: AGRO-LASER 2001: Referaty i doniesienia, Polskie Towarzystwo Agrofizyczne, 161–162.
- Pietrzyk W., Horyński M., Sumorek A., Ścibisz M., Walusiak S., Grundas S.: 2001. Uzwojenia bifilarne do odpylania w przemyśle rolno-spożywczym. *Acta Agrophysica*, 43.
- Pietrzyk W.: 2006. Standaryzacja badań wpływu pól elektromagnetycznych na materiały pochodzenia biologicznego. *Acta Agrophysica*, 8 (4), 915–921.
- Pietrzyk W. (red.): 2008. Elektrofiltr bifilarny do usuwania pyłów pochodzenia roślinnego. *Wydawnictwo Naukowe FRNA, Lublin*.
- Pijanowski E., Dłużewski M., Dłużewska A., Jarczyk A.: 2000. *Ogólna technologia żywności*. PWN, Warszawa.
- PN-A-74011:1986. Ziarno zbóż, nasiona roślin strączkowych i przetwory zbożowe – Oznaczanie wilgotności.
- PN-EN ISO 13690:2007. Ziarno zbóż, roślin strączkowych i przetwory zbożowe – Pobieranie próbek z partii statycznych.
- PN-A-74004:1987. Ziarno zbóż – Sprawdzanie wzorcowania wilgotnościomierzy.
- PN-A-74009:1990; PN-A-74009:1990/Az1:1998. Ziarno zbóż, nasiona roślin strączkowych i rzepaku oraz przetwory zbożowe – Oznaczanie wilgotności za pomocą wilgotnościomierzy elektrycznych.
- PN-E-04403:1986 Materiały elektroizolacyjne stałe – Metody pomiaru przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych.
- Podleśny J., Koper R.: 1996. Wpływ biostymulacji laserowej nasion na plony i ich skład chemiczny. *Zesz. Probl. Postępów Nauk Rol.* 444, 654–660.
- Pomianowska K.: 2002. *Gluten pszenicy – właściwości i zastosowanie*. Przegląd Zbożowo-Młynarski 4.

- Siciński Z.: 1968. Badanie materiałów elektroizolacyjnych. WNT, Warszawa.
- Skalska D.: 2002. Charakterystyki parametrów elektrycznych pojedynczego nasiona bobiku. *Inż. Rol.* 5, 345–351.
- Skalska D.: 2002a. Metodyczne aspekty pomiarów cech elektrycznych pojedynczych nasion bobiku. Materiały Konferencyjne VII Międzynarodowej Konferencji, Polanica Zdrój, 321–324.
- Skierucha W.: 2005. Wpływ temperatury na pomiar wilgotności gleby metodą reflektometryczną. *Acta Agrophysica Monografia*, 122 (5).
- Stanisz A.: 2006. Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny. Tom 1–3 StatSoft Kraków.
- Sumorek A., Pietrzyk W.: 1999. Influence of electric field on the speed of convective removal of water from wheat grain. *International Agrophysics*, 13 (4), 509–513.
- Sumorek A., Pietrzyk W.: 2001. Influence of corona wind on the convective wheat grain drying course. *International Agrophysics* 15 (2), 125–129.
- Sumorek A.: 2001. Wpływ pola elektrycznego na konwekcyjne suszenie ziarna zbóż. *Acta Agrophysica*, 87, Lublin.
- Sumorek A., Horyński M., Pietrzyk W.: 2003. Wykorzystanie właściwości elektrycznych ziarniaków pszenicy i ich frakcji przemiałowych w elektrotechnologiach. *Acta Agrophysica*, 93, 103–122.
- Szmigiel W., Jusubolijew A.: 1984. Issledawanije wlijanija napraziennosti pola na wnutrieniju oblast siemieni. *Mech. i Elektr. Sielsk. Chozj.*, 4, 45–47.
- Szot B.: 1976. Metodyczne aspekty oceny wpływu warunków glebowych na zmienność niektórych cech fizycznych ziarna pszenicy. *Roczniki Nauk Rolniczych*, Warszawa.
- Tadeusiewicz R.: 1998. Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa.
- Torosjan R.N., Konochowa O.I.: 1972. Issledowanije elektrofiziceskich paramietrow siemjan. *Mech. i Elektr. Sielsk. Chozj.*, 1, 39–40.
- Trabelsi S., Nelson S.O.: 2003. Free-space measurement of dielectric properties of cereal grain and oilseed at microwave frequencies. *IOP Electronic Journals*.
- Utieszew U.U.: 1973. Soprotiwlenije siemjan soi postojannomu toku i mietodika jego izmierenija. *Naucz. Tr. Kazachsk. S. Ch. Inst.*, 5.
- Walczak R.T., Gliński J., Horabik J.: 2003. Agrofizyka i jej rola w rozwoju nauk rolniczych. *Acta Agrophysica*, 100.
- Waszkiewicz C., Nowakowski T.O.: 2001. Changes in tangent of dielectric loss angle of amaranth seeds under the influence of water content and electromagnetic field frequency. *Annals of Warsaw Agricultural University, Agriculture Agricultural Engineering* 41, 59–63.
- Wyrażanie Niepewności Pomiaru: 1999. Przewodnik, Główny Urząd Miar, Warszawa.
- Zdradzisz E., Urbaniak Z.: 1989. Próba zastosowania elektroprzewodnictwa jako wskaźnika wigoru ziarniaków pszenicy jarej. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 170, 83–88.
- Złobeki A., Francik F.: 2003. Ocena odporności na uszkodzenia ziarna zbóż okryto- i nagoziarnistych przy pomocy metod statystycznych oraz z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych. *Acta Agrophysica*, 2 (1), 281–287.
- Zych J., Cyfert R.: 2003. Lista opisowa odmian. Rośliny rolnicze. Pszenica zwyczajna. Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych, Słupia Wielka.

CECHY ELEKTRYCZNE ZIAREN PSZENICY

Streszczenie

Celem pracy jest scharakteryzowanie właściwości elektrycznych: przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych ziarniaków wybranych odmian pszenicy oraz określenie determinujących je właściwości fizycznych i chemicznych. Sformułowanie i weryfikację formuł matematycznych (modelu) opisujących analizowane zależności oraz sprawdzenie przydatności sieci neuronowych do modelowania powiązań między wybranymi cechami oraz różnicowania odmian pszenicy ze względu na ich właściwości elektryczne.

Analiza przedstawianych w piśmiennictwie metod badawczych, wyników badań i stosowanych metod obliczeniowych pozwoliła sformułować szereg problemów, których rozwiązanie podano w kolejnych rozdziałach.

W rozprawie przedstawiono własne formuły matematyczne opisujące wpływ częstotliwości pola elektromagnetycznego (100 Hz do 100 kHz), wilgotności (9–24%) i temperatury (10–30°C) ziarniaków badanych 14 odmian pszenicy na analizowane cechy elektryczne, jak również omówiono wpływ wybranych cech chemicznych ziarniaków na przenikalność elektryczną i współczynnik strat dielektrycznych.

Sformułowano modele empiryczne opisujące wpływ wszystkich istotnych statystycznie cech fizycznych i chemicznych ziarniaków na cechy elektryczne warstwy ziaren pszenicy. Opisują one z zadowalającą dokładnością analizowane cechy elektryczne dla określonych częstotliwości pola elektromagnetycznego. Nie jest jednak możliwe sformułowanie wystarczająco dokładnego modelu empirycznego opisującego badane cechy elektryczne warstwy ziarniaków pszenicy w całym badanym zakresie zmian częstotliwości pola elektromagnetycznego.

Uzyskany model wykorzystujący Sztuczne Sieci Neuronowe może być z powodzeniem stosowany do szacowania zarówno przenikalności elektrycznej, jak i współczynnika strat dielektrycznych warstwy ziarniaków pszenicy. Potwierdza to dobra zgodność wyników symulacyjnych z wynikami eksperymentu weryfikacyjnego – średnie błędy względne mieszczą się w zakresie 10–20%.

Słowa kluczowe: pszenica, cechy elektryczne, przenikalność elektryczna, współczynnik strat dielektrycznych

ELECTRICAL PROPERTIES OF WHEAT GRAINS

Summary

The aim of this work is to characterize the electrical properties – permittivity and dielectric loss factor – of caryopses of selected varieties of wheat, and to determine the physical and chemical properties on which these depend. It aims to construct and verify mathematical formulae (a model) describing the analysed relationships, and to verify the usefulness of neural networks for modelling the links between selected features and differentiating wheat varieties on the basis of their electrical properties.

Through analysis of the research methods described in the literature, the results of research and computational methods applied, it was possible to formulate a number of problems, whose solutions are given in successive chapters.

The paper includes original mathematical formulae describing the effect of electromagnetic field frequency (100 Hz to 100 kHz), humidity (9–24%) and temperature (10°–30°C) of caryopses of 14 tested wheat varieties on the analysed electrical properties, and also includes discussion of the effect of selected chemical properties of the caryopses on permittivity and dielectric loss factor.

Empirical models are constructed describing the effect of all statistically significant physical and chemical features of the caryopses on the electrical properties of a layer of wheat grains. These describe, with satisfactory accuracy, the analysed electrical properties for specified electromagnetic field frequencies. However it is not possible to construct a sufficiently accurate empirical model describing the tested electrical properties of a layer of wheat caryopses over the whole of the investigated range of variation in electromagnetic field frequency.

The model obtained, which uses Artificial Neural Networks, can be successfully used to estimate both the permittivity and dielectric loss factor of a layer of wheat caryopses. This is confirmed by the good fit between the results of the simulation and the results of a verifying experiment – average relative errors lie between 10% and 20%.

Key words: wheat, dielectrical properties of grains, electric permittivity, dielectric loss factor