

MODEL PLONOWANIA ROŚLIN ZIEMNIAKA
(*SOLANUM TUBEROSUM* L.) WYROSŁYCH Z SADZENIAKÓW
NAPROMIENIONYCH MIKROFALAMI

Tomasz Jakubowski

Instytut Eksploatacji Maszyn, Ergonomii i Procesów Produkcyjnych,
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytet Rolniczy
ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków
e-mail: tomasz.jakubowski@ur.krakow.pl

Streszczenie. Celem pracy była budowa modelu matematycznego uwzględniającego zależność między wielkością jednostkowej dawki promieniowania mikrofalowego o częstotliwości 2,45 GHz, którą napromieniowano sadzeniaka ziemniaka odmiany Felka Bona, a wielkością plonu pojawiającego się po okresie wegetacji rośliny potomnej. Dodatkowo określono: wielkość jednostkowej dawki promieniowania mikrofalowego mającej optymalny wpływ na plonowanie rośliny ziemniaka, wartości graniczne jednostkowych dawek promieniowania po przekroczeniu których nie obserwuje się pozytywnego wpływu mikrofal na roślinę ziemniaka oraz dokonano weryfikacji opracowanego modelu oraz zastosowano go do prognozowania masy plonu roślin ziemniaka wyrosłych z sadzeniaków napromieniowanych mikrofalami. Opracowany model regresyjny wyjaśnia w 93% zmianę masy plonu bulw ziemniaka odmiany Felka Bona względem dawki promieniowania mikrofalowego.

Słowa kluczowe: model, mikrofałe, ziemniak, plon

WYKAZ OZNACZEŃ

M_f – dawka promieniowania mikrofalowego ($J \cdot g^{-1}$),

$P(M_f)$ – zmierzona wielkość plonu przy zadanej dawce promieniowania mikrofalowego (g),

$W(M_f)$ – estymowana wielkość plonu przy określonej dawce promieniowania mikrofalowego (g),

ε – wartość błędu średniokwadratowego,

n – stopień wielomianu,

i – liczba pomiarów,

R – współczynnik korelacji liniowej Pearsona,

R^2 – współczynnik determinacji,

\check{R}^2 – skorygowany współczynnik determinacji.

WSTĘP

Stosowanie nowoczesnych technik prognozowania w rolnictwie może przynieść wymierne korzyści finansowe. Na podstawie prognozowania plonu roślin uprawnych można szacować opłacalność ich uprawy jak również planować strukturę zasiewów poszczególnych roślin. Wielkość plonu roślin ziemniaka uzależniona jest od wielu wzajemnie oddziałujących na siebie czynników, z których priorytetowe znaczenie mają: czynniki klimatyczne (temperatura powietrza, opady atmosferyczne, usłonecznienie), czynniki glebowe (zawartość próchnicy, temperatura i wilgotność gleby) oraz czynniki agrotechniczne (sposób uprawy, stosowane zabiegi pielęgnacyjne, poziom nawożenia). Większość istniejących modeli dotyczących plonowania roślin ziemniaka (produkcyjności biomasy) bazuje na istnieniu ścisłej zależności między nagromadzeniem suchej masy a ilością pochłoniętego przez nie światła co powoduje, że modele takie określają plon potencjalny (Burstall i Harris 1983, 1986, Zaag van Der 1984). W praktyce rolniczej bardziej przydatne są modele określające plon osiągalny (uwzględniający czynniki limitujące) lub plon aktualny (uwzględniający czynniki redukujące). Przykładem takiego modelu może być opisany w pracy Mazurczyka (1995) *POTATO.1* lub wykorzystany w badaniach prowadzonych przez Shahbazi i in. (2009ab) system *MicroLEIS DSS* (bazujący na modelach *Terraza* i *Cervatana*). W uprawie ziemniaka jedną z ważniejszych cech wpływających na wielkość osiąganych plonów jest jakość i zdrowotność materiału sadzeniakowego. W literaturze tematu napotkać można na informacje dotyczące stosowania w odniesieniu do materiału nasiennego metod fizycznych jako sposobu polepszania wigoru kiełkowania (Pietruszewski i Kania, 2010, Kornarzyński i Pietruszewski 2008, Achremowicz i in. 2002, Olchowik i Gawda 2002). Metody fizyczne, w postaci oddziaływania pól elektromagnetycznych, stosowane były również w stosunku do sadzeniaków ziemniaka (Marks i in. 2005, Marks i Szczówka 2011). Wyniki badań Marksa i Jakubowskiego (2006) wskazują, że krótkotrwałe napromienianie sadzeniaków ziemniaka mikrofalami powoduje lepsze ich przechowywanie oraz wpływa pozytywnie na proces ich kiełkowania a w dalszej kolejności na plonowanie rośliny potomnej. Mając na uwadze powyższe wskazany jest uwzględnienie wpływu promieniowania mikrofalowego na sadzeniaki ziemniaka jako czynnika modyfikującego wielkość osiąganych plonów. Cel taki osiągnąć można poprzez badanie związków statystycznych między wielkością dawki promieniowania mikrofalowego na jaką wyeksponowany był sadzeniak a wielkością plonu pojawiającego się po okresie wegetacji rośliny potomnej. Określenie związku statystycznego między badanymi zmiennymi realizowane może być poprzez budowę modelu matematycznego (Ressing i in. 2007, Soysal i in. 2006). W pracach Wanga i in. (2007), Bilbao-Sàinz i in. (2006) oraz Karima i Hawlader (2005) opisano modele

matematyczne uwzględniające działanie mikrofal jednak badania te dotyczyły głównie zagadnień związanych z suszeniem płodów rolnych. W niniejszej pracy jako cel główny określono budowę modelu matematycznego uwzględniającego zależność między wielkością jednostkowej dawki promieniowania mikrofalowego, którą napromieniowano sadzeniaka ziemniaka, a wielkością plonu pojawiającego się po okresie wegetacji rośliny potomnej. W obrębie celu głównego realizowano cele dodatkowe:

- określono wielkość jednostkowej dawki promieniowania mikrofalowego mającej optymalny wpływ na plonowanie rośliny ziemniaka,
- określono wartości graniczne jednostkowych dawek promieniowania (minimalną i maksymalną) po przekroczeniu których nie obserwuje się pozytywnego wpływu mikrofal (w postaci zwiększenia masy plonu) na roślinę ziemniaka,
- dokonano weryfikacji opracowanego modelu oraz zastosowano go do prognozowania masy plonu roślin ziemniaka wyrosłych z sadzeniaków napromieniowanych mikrofalami.

ZAKRES PRACY I METODA BADAŃ

W badaniach polowych, prowadzonych w latach 2005-2007, wykorzystano bardzo wczesną odmianę ziemniaka Felka Bona. Sadzeniaki do badań dobrano losowo a ich masa zawierała się w przedziale 37-151 g przy wartości średniej 58,1 g i odchyleniu standardowym 29,8 g. Doświadczenie usytuowano w rejonie Polski Południowej na glebie lekkiej, piasek słabo gliniasty, klasa bonitacyjna IIIa. Badania obejmowały dwa etapy prac. W etapie pierwszym napromieniano sadzeniaka ziemniaka mikrofalami o częstotliwości 2,45 GHz a następnie po okresie wegetacji określano plon spod jednej rośliny potomnej. Etap drugi obejmował budowę modelu matematycznego, opartego na danych empirycznych pozyskanych w trakcie prezentowanego doświadczenia, opisującego zmienność masy plonu rośliny ziemniaka w zależności od wielkości dawki którą napromienowano jej sadzeniaka. Wartości mocy urządzenia generującego mikrofałe, czasy ekspozycji oraz liczebność próby ustalono w oparciu o badania wstępne przeprowadzone w roku 2004. Do badań przyjęto trzy wartości mocy generatora mikrofal (100, 200 i 300 W) oraz trzy czasy ekspozycji (5, 10 i 15 s). Wszelkie prace uprawowe prowadzono zgodnie z wytycznymi przewidzianymi dla agrotechniki ziemniaka. Aby sadzeniaka ziemniaka napromieniować mikrofalami określano jego masę i umieszczano go w szczelnej komorze generatora wyposażonego w obrotowe dno i precyzyjny wyłącznik czasowy. Sadzeniaki ziemniaka, bezpośrednio po napromieniowaniu, umieszczono (ręcznie) w glebie w pierwszej dekadzie kwietnia a zbioru plonu (również ręcznie) dokonano po 88 dniach wegeta-

cji w roku 2005, 84 w roku 2006 i 90 w roku 2007. W każdej kombinacji (uwzględniając próbę kontrolną) doświadczenia występowały trzy replikacje obejmujące 50 roślin każda. W badaniach wykorzystano wagę laboratoryjną o dokładności pomiaru 0,02 g (do pomiaru masy sadzeniaka) oraz wagę platformową o dokładności pomiaru 2 g (do pomiaru masy plonu bulw). Jednostkową dawkę promieniowania mikrofalowego określono jako iloraz całkowitej dawki promieniowania (iloczyn mocy generatora i czasu ekspozycji) i masy sadzeniaka poddanego ekspozycji. Podkreślić należy, że dalsze badania prowadzono w oparciu o uzyskane wartości teoretyczne (a więc nie uwzględniające strat) jednostkowych dawek promieniowania mikrofalowego. W etapie drugim badań poszukiwano funkcji, która najlepiej oddawałaby charakter zmienności plonu w zależności od dawki promieniowania mikrofalowego. Zagadnienie to sprowadzono do minimalizacji błędu średniokwadratowego (2):

$$\varepsilon(Mf) = \sum_{i=1}^n (P(Mf) - W(Mf))^2 \quad (1)$$

Arbitralnie przyjęto wielomianową postać funkcji (2) dla estymowanej wielkości plonu $W(Mf)$:

$$W(Mf) = a_0 + a_1 Mf + \dots + a_n Mf^n \quad (2)$$

Następnie, dla tak wyznaczonego wielomianu, w celu określenia wartości dawki promieniowania mikrofalowego (Mf) dającej plon o najwyższej masie, poszukiwano maksimum lokalne. Proces modelowania oraz statystyczną analizę wyników badań prowadzono z wykorzystaniem pakietu STATISTICA 8.0 na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wartości średnich i odchyleń standardowych testowanych rozkładów oceniane były z próby (wielkości te nie były znane a priori) więc do określenia normalności rozkładu w badanych grupach wykorzystano prawdopodobieństwo Lillieforsa. Test ten (podobnie jak test Kołmogorowa-Smirnowa) oparty jest na badaniu maksymalnej różnicy pomiędzy dystrybuantą empiryczną a dystrybuantą rozkładu normalnego o takiej samej średniej i wariancji jak oszacowana. Wpływ dawki promieniowania mikrofalowego na plonowanie roślin ziemniaka w poszczególnych latach badań określano poprzez analizę wariancji a różnice między średnimi w poszczególnych grupach analizowano z wykorzystaniem nieparametrycznych testów mediany i Kruskala-Wallisa. Istotność parametrów modelu (równania regresji) szacowano z wykorzystaniem procedur ogólnego modelu regresji (regresji wielomianowej). Metoda ta pozwala na badanie zależności, mogących występować w wyższych potęgach, między zmienną zależną a zmienną niezależną (Stanisz 2005). Do prognozowania masy plonu roślin ziemniaka wyrosłych z sadzeniaków napromieniowanych mikrofalami,

w oparciu o opracowany model, wykorzystano wyniki doświadczenia (Jakubowski 2010) przeprowadzonego w latach 2008-2009. Prognoza obejmowała szacowanie masy plonu (spod jednej rośliny) bulw 100 losowo wytypowanych roślin ziemniaka odmiany Felka Bona. W tabeli 1 przedstawiono wartości średnich temperatur powietrza i sumy opadów w okresie wegetacji w rejonie gdzie prowadzono doświadczenie (lata 2005-2009).

Tabela 1. Wartości średnich temperatur powietrza i sumy opadów w badanym okresie (miesiące maj-sierpień)

Table 1. Mean air temperatures and sums of precipitation in the period studied (May-August)

Czynniki – Factor	Rok badań – Year				
	2005	2006	2007	2008	2009
Temperatura – Temperature (°C)	16,1	16,7	17,5	16,5	16,4
Opad– Precipitation (mm)	119,5	101,2	83,7	103,7	143,7

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

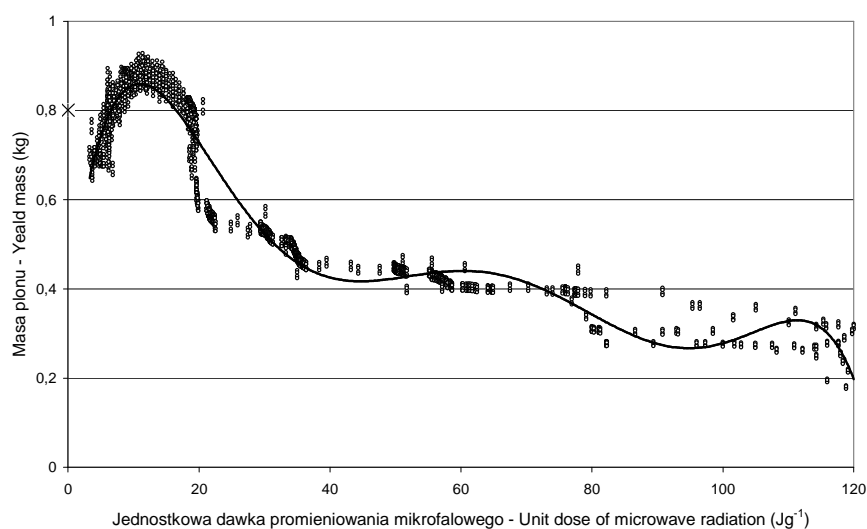
W pracy rozważano wielomiany stopnia co najwyżej szóstego. Dalszy wzrost stopnia wielomianu nie przekładał się na poprawę dokładności dopasowania. Najlepszym wielomianem ($R^2=0,934$) okazała się funkcja w postaci:

$$y = -6 \cdot 10^{-11}x^6 + 2 \cdot 10^{-8}x^5 - 3 \cdot 10^{-6}x^4 + 0,0002x^3 - 0,008x^2 + 0,112x + 0,363$$

Analiza ekstremów lokalnych funkcji (rys. 1) $W(Mf)$ pozwoliła stwierdzić, iż największy plon bulw ziemniaka można uzyskać przy dawce $9,25 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (wielkość plonu $0,812 \text{ kg}$). W następnym kroku określono, które wartości dawek promieniowania mikrofalowego wpływają na wzrost masy plonu, a które powodują jego obniżenie. Porównano wartości estymowanego wielomianu ze średnią masą plonu bulw ziemniaka uzyskaną z sadzeniaków nie napromieniowanych (próba kontrolna – grupa 0). Z powyższego porównania wynika, że dawki mikrofal w zakresie $7,48-11,10 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ powinny dawać rezultaty (w postaci wielkości masy plonu) nie gorsze od tych uzyskanych z próby kontrolnej. Na podstawie analizy punktów przegięcia stwierdzić można, że dawki mikrofal powyżej $24,01 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ powinny skutkować zmniejszaniem masy plonu bulw ziemniaka. Na tej podstawie wyodrębniono cztery grupy (zakresy) dawek promieniowania mikrofalowego (tab. 2).

W dalszej kolejności badano występowanie istotnych różnic pomiędzy tak określonymi grupami. Wynik przeprowadzonego testu Lillieforsa ($p < 0,01$) wykazał, że rozkład analizowanej zmiennej (masy plonu) nie we wszystkie badanych grupach

spełnia warunki rozkładu normalnego. Na tej podstawie, w dalszych obliczeniach, zastosowano testy mediany oraz Kruskala-Wallisa jako nieparametryczne odpowiedniki analizy wariancji. Podkreślić należy, że wymienione testy zezwalają na analizę prób o różnej liczebności. Wartości testów Kruskala-Wallisa ($H = 4333$) oraz chi-kwadrat mediany ($\chi^2 = 3451$) były istotne co wskazuje, że prawdopodobieństwo identycznego plonowania (masy plonu) roślin ziemniaka we wszystkich pięciu grupach jest bliskie zeru. Taki stan rzeczy był przesłanką do przeprowadzenia wielokrotnych porównań dla średnich rang w badanych grupach (tab. 3).



Rys. 1. Masa plonu roślin ziemniaka w zależności od dawki promieniowania mikrofalowego (znakiem X oznaczono średnią wartość masy plonu w próbie kontrolnej)

Fig. 1. Mass of potato plant yield in relation to microwave radiation dose (X denotes the mean yield value in the control sample)

Tabela 2. Wyodrębnione zakresy (grupy) promieniowania mikrofalowego

Table 2. Identified ranges (groups) of microwave radiation

Nr grupy Group No.	Zakres dawek jednostkowych promieniowania mikrofalowego w danej grupie Range of unit doses of microwave radiation in a given group ($J \cdot g^{-1}$)
0	grupa kontrolna – control group
I	3,27-7,48
II	7,49-11,10
III	11,11-24,01
IV	24,02-120,0

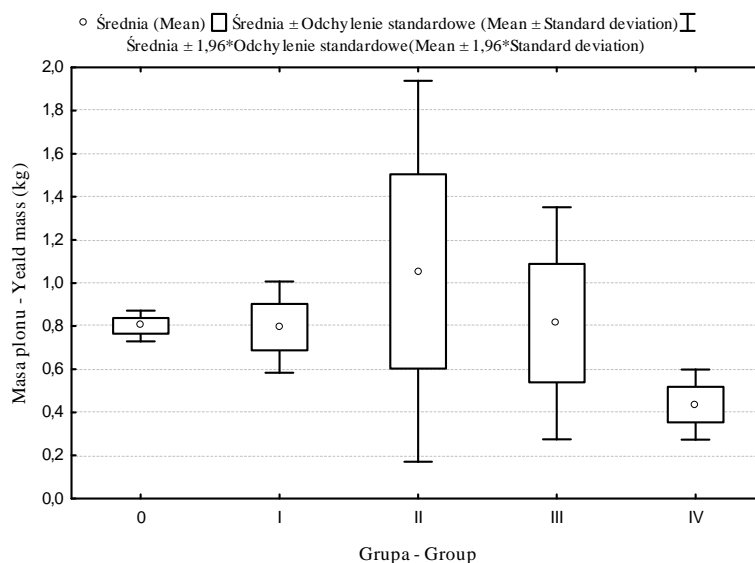
Tabela 3. Wynik analizy wariancji Kruskala-Wallisa oraz wartości prawdopodobieństw porównań wielokrotnych dla średnich rang w badanych grupach

Table 3. Result of Kruskal-Wallis analysis of variance and values of probability of multiple comparisons for mean ranks in studied groups

Liczba zmiennych w grupie No. of variables in a group	Suma rang Sum of ranks	Wartości średnich rang w badanych grupach Mean rank values in studied groups				
		Grupa 0 R:3929,5	Grupa I R:3690,8	Grupa II R:5163,1	Grupa III R:3797,7	Grupa IV R:1058,6
Grupa 0 – 450	1768260		0,146	0,000	1,000	0,000
Grupa I – 888	3277422	0,146		0,000	1,000	0,000
Grupa II – 520	2684814	0,000	0,000		0,000	0,000
Grupa III – 1883	7151030	1,000	1,000	0,000		0,000
Grupa IV – 2109	2232650	0,000	0,000	0,000	0,000	

Wynik porównań wielokrotnych dla średnich rang w badanych grupach (tab. 3) oraz graficzna prezentacja tych grup (rys. 2) pozwala na poczynienie pewnych ustaleń. Niewątpliwie rośliny przyporządkowane do grupy II odznaczały się najwyższą masą plonu bulw ziemniaka a co za tym idzie można przyjąć, że napromieniowanie sadzeniaków dawkami promieniowania mikrofalowego w zakresie 7,49-11,10 J·g⁻¹ wpływa stymulująco na procesy plonotwórcze. Nie stwierdzono istotnych różnic między grupami 0 (obiekt kontrolny) i I co oznacza, że napromieniowanie mikrofalami sadzeniaków ziemniaka dawkami w zakresie 3,27-7,48 J·g⁻¹ nie powoduje zmian w masie wytwarzanych bulw w plonie. Podobne zjawisko stwierdzono w przypadku roślin przynależnych do grupy III. Zaznaczyć jednak trzeba, że w przypadku grupy I stwierdzono raczej brak istotnego efektu oddziaływania mikrofal na rośliny ziemniaka (określonego przez masę plonu), a w przypadku grupy III oddziaływanie to mogło już powodować uszkodzenie struktur komórkowych sadzeniaka. Rośliny ziemniaka wyrosłe z sadzeniaków napromieniowanych dawkami mikrofal w zakresie 24,02-120,0 J·g⁻¹ (grupa IV) cechowały się plonem istotnie niższym w porównaniu z pozostałymi grupami. W tym przypadku, przyjąć należy, że promieniowanie mikrofalowe oddziaływało negatywnie na rośliny ziemniaka. Przyjąć również można, analizując zależność między promieniowaniem mikrofalowym a plonowaniem rośliny ziemniaka (rys. 1), że dalszy wzrost jednostkowej dawki mikrofal skutkować będzie obniżeniem masy plonu bulw spod jednej rośliny. W latach 2008 i 2009, w trakcie innych badań autora (Jakubowski 2010), opracowany model zastosowano w praktyce (rys. 3). Miarą dokładności modelu w szacowaniu masy plonu bulw ziemniaka spod jednej

rośliny była wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona (R) między wartościami pomierzonymi empirycznie a wartościami wyliczonymi z modelu (rys. 1). Wymienione wyżej wartości współczynników korelacji wynosiły 0,82 i 0,85 (istotne dla $\alpha = 0,05$) odpowiednio dla badań z roku 2008 i 2009. Takie wartości współczynników korelacji, zdaniem Stanisza (2005), świadczą o silnym powiązaniu analizowanych zmiennych.

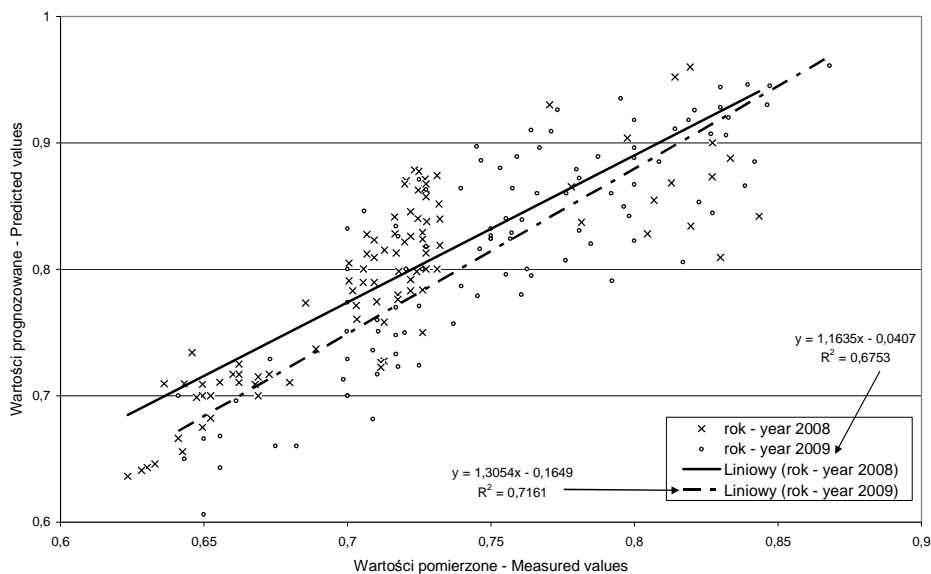


Rys. 2. Masa plonu bulw ziemniaka w poszczególnych grupach

Fig. 2. Mass of yield of potato tubers in particular groups

Zasadność stosowania modeli regresyjnych w badaniach rolniczych została omówiona w pracach Dmowskiego i Dzieżyca (2009) oraz Gołackiego (2005). Model regresji wielomianowej był stosowany w odniesieniu do roślin ziemniaka przez Sawicką (2005) w celu szacowania terminu pojawiania się i rozwoju *Phytophthora infestans*, a Bondaruk i in. (2007) określali wpływ mikrofal na jakość suszonej kostki ziemniaczanej. Zagadnienia wpływu promieniowania mikrofalowego na rośliny ziemniaka w aspekcie związków korelacyjnych między dawką mikrofal a efektem cieplnym bulwy ziemniaka i przyrostem jej temperatury były omawiane w pracach autora (Jakubowski 2009ab). W pracy Kornackiego i Wesołowskiej-Janczarek (2008) dotyczącej weryfikowania poprawności matematycznych modeli procesów w oparciu o dane empiryczne sugerowano aby oprócz współczynnika determinacji (R^2) używać również i jego wartości skorygowanej (\check{R}^2). Wartość skorygowanego współczynnika

determinacji nie zależy od liczby zmiennych niezależnych, a dodatkowo wskaźnik ten może być wykorzystany do ustalenia, czy wprowadzone do modelu nowe zmienne wpływają na opisywaną zmianę badanej cechy (Konishi i in. 2008). W przypadku opisywanego modelu wartość \hat{R}^2 wyniosła 0,934 i jest nieznacznie mniejsza od wyliczonego współczynnika determinacji. Ocena parametrów modelu wykazała ich statystyczną istotność a wynik testu sum kwadratów dla pełnego modelu wykazał istotną wartość test $F = 7697,9$.



Rys. 3. Wynik zastosowania opracowanego modelu do prognozowania masy bulw w plonie roślin ziemniaka odmiany Felka Bona

Fig. 3. Effect of application of the model developed for the prediction of mass of tubers in the yield of plants of potato cv. Felka Bona

Faktem jest, że dla zastosowań praktycznych najwygodniejsze są modele liniowe w postaci $f(x) = ax + b$. W przypadku jednak, gdy brak jest jednoznacznych informacji na temat wpływu wybranego czynnika na rozpatrywaną zmienną zależną to wskazanym jest badanie tego wpływu poprzez modele bardziej rozbudowane. Gdyby zależność między dawką promieniowania mikrofalowego a plonem roślin opisać zależnością prostoliniową to miałaby ona postać $y = -0,006x + 0,818$ ($R^2 = 0,735$), a wartość współczynnika korelacji liniowej dla tej zależności wyniosłaby $R = -0,857$ (kowariancja = $-4,3$). Mimo wysokiej wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona, przedstawiony powyżej wielomian pierw-

szego stopnia nie determinuje blisko 27% zaobserwowanej całkowitej zmienności masy plonu względem dawki mikrofal. Było to przesłanką do poszukiwania funkcji (wielomianów wyższego stopnia) lepiej dopasowanych do danych empirycznych. Ujemna wartość współczynnika korelacji skłania do uogólnionego stwierdzenia, że promieniowanie mikrofalowe ma negatywny wpływ na plonowanie roślin ziemniaka (wzrost wartości dawki mikrofal powoduje spadek średniej wartości masy plonu). Mimo, że taka interpretacja i ocena powiązania badanej zmiennej losowej (masy plonu) z dawką mikrofal ma swoje merytoryczne uzasadnienie (zdaniem Cioka (1992) oraz Szóstki (2006) pole elektromagnetyczne oddziałuje negatywnie na organizmy żywe) to, jak wskazują prezentowane wyniki badań, w przypadku roślin *Solanum tuberosum* L. istnieją dawki promieniowania mikrofalowego (zakresy dawek), które powodują przyrost masy plonu roślin wyrosłych z sadzeniaków napromieniowanych. Podobne wyniki badań uzyskano w doświadczeniach prowadzonych przez Marksa i in. (2005), Marksa i Jakubowskiego 2006, Marksa i Szczówkę (2011) oraz Jakubowskiego (2010), tam też zamieszczono opis prawdopodobnego mechanizmu działania mikrofal na bulwy ziemniaka. Dalsze badania modelowe związane z wpływem mikrofal na rośliny ziemniaka powinny, zdaniem autora, skupiać się na wartościach dawek oddziałujących pozytywnie na procesy plonotwórcze określone poprzez masę plonu. Uściślenie badań w tym zakresie pozwoli na konstrukcję prostszych, a co za tym idzie łatwiejszych do interpretacji i stosowania w praktyce, modeli matematycznych. Wskazaniem byłoby również, w kolejnych doświadczeniach, uwzględnienie budowy wewnętrznej bulwy ziemniaka, gdyż jak podkreśla Szarycz (2001), pozwoliłoby to określić wartości ciśnienia panującego w komórkach oraz relacji między ciśnieniami panującymi w komórkach sąsiednich. Narastające ciśnienie wewnątrz komórek bulwy ziemniaka może być przyczyną uszkodzenia (rozerwania bądź deformacji) jej struktury komórkowej, a to z kolei może skutkować zaburzeniami w rozwoju rośliny potomnej.

WNIOSKI

1. Zaprezentowany model regresyjny wyjaśnia w 93% zmianę masy plonu bulwy ziemniaka odmiany Felka Bona względem dawki promieniowania mikrofalowego o częstotliwości 2,45 GHz.
2. Rośliny ziemniaka wyrosłe z sadzeniaków napromienionych dawkami mikrofal w zakresie 7,49-11,10 J·g⁻¹, w odniesieniu do pozostałych kombinacji doświadczenia, cechowały się istotnie wyższą masą plonu spod jednej rośliny potomnej.

3. Napromienianie sadzeniaków ziemniaka jednostkową dawką mikrofal o wartości $9,25 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ powodowało największy przyrost masy bulw w plonie roślin potomnych.

PIŚMIENNICTWO

- Achremowicz B., Gruszecka D., Kornarzyński K., Kulpa D., Pietruszewski S., 2002. Vigour variability in hybrid kernels of triticale with *Aegilops* under the influence of biostimulation. *Int. Agrophysics*, 16, 2, 91-96.
- Bilbao-Sàinz C., Andrés A., Chiralt A., Fito P., 2006. Microwaves phenomena during drying of apple cylinder. *Journal of Food Engineering*, 74, 160-167.
- Bondaruk J., Markowski M., Błaszczak W., 2007. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 81, 306-312.
- Burstall L., Harris P., 1983. The estimation of percentage light interception from leaf area index and percentage ground cover in potatoes. *J. Agric. Sci., Camb.*, 100, 241-244.
- Burstall L., Harris P., 1986. The physiological basis for mixing varieties and seed "ages" in potato crops. *J. of Agric. Sci.*, 106, 411-418.
- Ciołk Z., Maksymiuk J., Pochanke Z., Zdanowicz L., 1992. Badanie urządzeń energoelektrycznych. *WNT*, 22-31.
- Dmowski Z., Dzieżyc H., 2009. Potrzeby opadowe pszenicy jarej na glebach kompleksów pszenne-go dobrego i żytniego bardzo dobrego w północno-wschodniej Polsce. *Acta Agrophysica*, 13(1), 39-48.
- Gołacki K., Stankiewicz A., Stropek Z., 2005. Wpływ prędkości deformacji na wybrane charakterystyki lepkościowych materiałów roślinnych. *Acta Agrophysica*, 5(3), 645-655.
- Jakubowski T., 2009. Efekt cieplny mikrofalowego ogrzewania bulw ziemniaka. *Acta Agrophysica* 14(2), 345-354.
- Jakubowski T., 2009a. Modelowanie przyrostu temperatury bulwy ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania. *Inżynieria Rolnicza*, 9(118), 79-85.
- Jakubowski T., 2010b. Plonowanie roślin ziemniaka w zależności od wielkości zastosowanej dawki promieniowania mikrofalowego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, (w druku).
- Jakubowski T., 2010. Wpływ mocy generatora i czasu napromieniowania mikrofalami zastosowanych do stymulacji sadzeniaków na plonowanie roślin ziemniaka. *Materiały konferencyjne. Tradycja i nowoczesność w produkcji ziemniaka. Jadwisin*, 7-9 lipiec 2010.
- Karim M., Hawlader M., 2005. Mathematical modeling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(23), 4914-4925.
- Konishi S., Kitagawa G., 2008. Information criteria and statistical modeling. *Springer Verlag*, 81-255.
- Kornacki A., Wesołowska-Janczarek M., 2008. O weryfikowaniu poprawności matematycznych procesów w oparciu o dane empiryczne. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 16(3), 5-18.
- Kornarzyński K., Pietruszewski S., 2008. Wpływ zmiennego pola magnetycznego na kiełkowanie nasion o niskiej zdolności kiełkowania. *Acta Agrophysica*, 11(2), 429-435.
- Marks N., Jakubowski T., 2006. Wpływ promieniowania mikrofalowego na trwałość przechowalniczą bulw ziemniaka. *Inżynieria Rolnicza*. 6 (81), 57-64.
- Marks N., Lipiec J., Jakubowski T., 2005. Ocena przydatności metod fizycznych do zwalczania przechowalniczych chorób bulw ziemniaka. *Inżynieria Rolnicza*, 7(67), 169-175.

- Marks N., Szecówka P., 2011. Wpływ stymulacji sadzeniaków zmiennym polem magnetycznym na plonowanie ziemniaków. *Acta Agrophysica*, 17(1), 135-150.
- Mazurczyk W., 1995. Modelowanie potencjalnej produktywności oraz czynników kształtujących nagromadzenie biomasy i plonu bulw w łanach ziemniaka. Wydawnictwo Fundacja "Rozwój SGGW" w Warszawie, 6-21.
- Olchownik G., Gawda H., 2002. Influence of microwave radiation on germination capacity of flax seeds. *Acta Agrophysica*, 62, 63-68.
- Pietruszewski S., Kania K., 2010. Effect of magnetic field on germination and yield of wheat. *Int. Agrophysics*, 24, 3, 297-302.
- Ressing H., Ressing M., Durance T., 2007. Modeling the mechanisms of dough puffing during vacuum microwave drying using the finite element method. *Journal of Food Engineering*, 82(4), 498-508.
- Sawicka B., 2005. Terminy pojawiania się i rozwoju *Phytophthora infestans* [Mont.] de Bary w zmiennych warunkach pola uprawnego. *Acta Agrophysica*, 6(2), 537-547.
- Shahbazi F., Jafarzadeh A., Sarmadian F., Neyshaboury M, Oustan S., Anaya-Romero M., De la Rosa D., 2009a. Suitability of wheat, maize, sugar beet and potato using MicroLEIS, DSS software in Ahar area, North-West of Iran. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.*, 5, 45-52.
- Shahbazi F., Jafarzadeh A., Sarmadian F., Neyshaboury M, Oustan S., Anaya-Romero M., De la Rosa D., 2009b. Climate change impact on land capability using MicroLEIS DSS *Int. Agrophysics*, 2009b, 23, 277-286.
- Soysal Y., Özetkin S., Eren Ö., 2006. Microwave drying parsley: modeling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Engineering*, 93(4), 403-413.
- Stanisz A., 2005. Biostatystyka. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, 135-409
- Szarycz M., 2001. Matematyczne modelowanie mikrofalowo-konwekcyjnego suszenia surowców rolniczych na przykładzie jabłek. *Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu nr 420, Rozprawy CLXXXIII*, 14-15.
- Szóstka J., 2006. Mikrofała – układy i systemy. *WKŁ*, 15-23.
- Wang Z. Sun J., Chen F., Liao, X., Hu X., 2007. Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 536-544.
- Zaag van Der D., 1984. Reliability and significance of simple method of estimating the potential yield of potato crop. *Potato Res.*, 27, 51-73.

MODEL OF YIELDING OF POTATO PLANTS (*SOLANUM TUBEROSUM* L.)
GROWN FROM SEED POTATOES IRRADIATED WITH MICROWAVES

Tomasz Jakubowski

Department of Production Engineering and Energy, Institute of Machinery Operation,
Ergonomics and Production Processes, University of Agriculture
ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków
e-mail: tomasz.jakubowski@ur.krakow.pl

Abstract. The objective of the study was to develop a mathematical model reflecting the relation between the level of unit dose of microwave radiation with frequency of 2.45 GHz, applied to irradiate seed potatoes of cv. Felka Bona, and the level of yield obtained after the vegetation period of the second-generation plants. Additionally, the study included determinations of the value of unit dose of microwave radiation producing the optimum effect on the yield of potato plants, the limit values of unit doses of microwave radiation the exceeding of which causes that the positive effect of microwaves on potato plants is no longer observed, and the model developed was subjected to verification and applied for the prediction of the mass of yield of potato plants grown from seed potatoes subjected to microwave irradiation. The regression model developed accounts for 93% of changes in the mass of yield of potato plants cv. Felka Bona with relation to the dose of microwave radiation.

Key words: model, microwaves, potato, yield