

## Wpływ działania pola magnetycznego na kiełkowanie nasion

**Streszczenie.** Prezentowany artykuł przedstawia wyniki badań dotyczących wpływu oddziaływania pola magnetycznego na kiełkowanie nasion lniarki. Badania polegały na określeniu kształtu badanych obiektów i ich właściwości magnetycznych. Następnie autorzy przygotowali model matematyczny nasiona oraz przeprowadzili obliczenia rozkładu natężenia pola magnetycznego wewnątrz i wokół badanego nasiona. Ostatnim etapem badań było przeprowadzenie badań na rzeczywistych obiektach i określenie odpowiednich współczynników kiełkowania.

**Abstract.** This article presents the results of studies on the effect of magnetic field on germination of seeds of *Camelina*. The study determining the shape of the objects and their magnetic properties. Then the authors prepared mathematical model the seeds for calculating the magnetic field distribution in and around the test seeds. The last stage of the research was to carry out tests on real objects and determine appropriate coefficients of germination. (**The effects of magnetic fields on seed germination**).

**Słowa kluczowe:** pole magnetyczne, biostymulacja nasion, sferoida spłaszczona.

**Keywords:** magnetic field, biostimulation seed, spheroid oblate.

### Wstęp

Nowoczesna Inżynieria Rolnicza, szuka „bezpiecznych” metod podwyższania jakości plonów roślin uprawnych, wykorzystując interdyscyplinarne powiązanie nauk z zakresu biofizyki, biologii molekularnej i fizyki. Dobra jakość i odpowiednie przygotowanie materiału siewnego jest jednym z ważniejszych czynników plonotwórczych. Wykorzystanie niektórych czynników fizycznych stwarza nowe możliwości pobudzania materiału roślinnego do wzrostu. Metody przedsewnej obróbki nasion stymulują przebieg zmian fizjologicznych i biochemicznych w nasionach, są zatem bezpieczne dla środowiska. Wśród tych metod można wymienić stymulowanie: promieniowaniem jonizującym, laserowym, podczerwonym, ultrafioletowym, ultradźwiękami, mikrofalami oraz polami elektrycznym, magnetycznym i elektromagnetycznym. Oddziaływanie polem magnetycznym na nasiona nie niesie zagrożenia dla środowiska a zwiększa efektywność procesów fizjologicznych, czego efektem jest większy wigor i wyższy poziom plonowania.

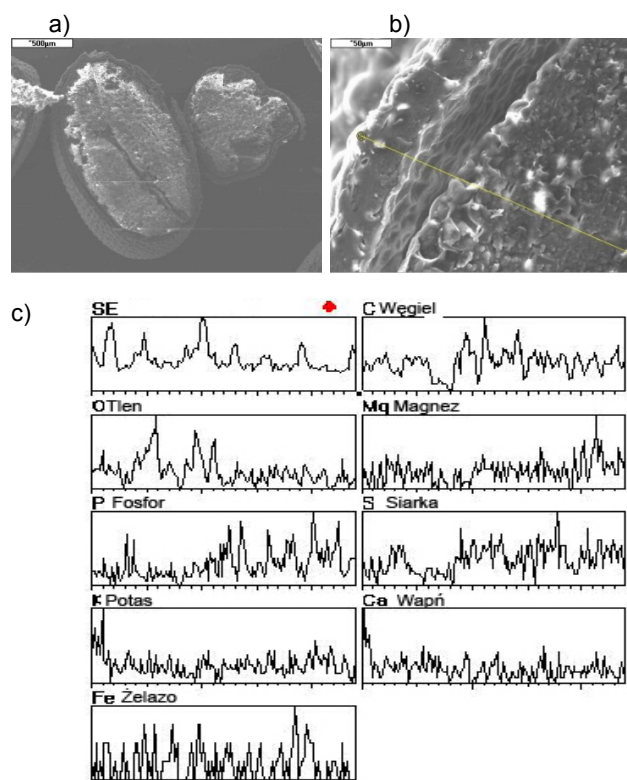
Na podstawie dostępnej literatury [1-10] można stwierdzić, że działanie pola magnetycznego na umieszczone w nim obiekty biologiczne jest wielorakie:

- oddziaływanie elektrodynamiczne z występującymi w organizmach prądami elektrycznymi (siła Lorentza i efekt Halla),
- powstawanie efektów magnetomechanicznych wewnątrz organizmów polegających na orientacji struktur o anizotropii magnetycznej w polach jednorodnych oraz przesunięcia substancji ferromagnetycznych i paramagnetycznych w polach mających niezerowe gradienty,
- oddziaływanie na nieskompensowane spiny magnetyczne pierwiastków paramagnetycznych i wolnych rodników,
- efekt Dorfmana, polegający na przeorientowaniu się protein w polu magnetostatycznym wskutek anizotropii tych molekuł,
- niektóre składniki organizmów żywych wykazują właściwości magnetostrykcyjne; istnieje zatem możliwość oddziaływania na takie składniki,
- pole magnetyczne zmienia energię oddziaływań wewnątrz- i między-atomowych w organizmach żywych,
- sinusoidalnie zmienne pole magnetyczne powoduje indukowanie się prądów wewnątrz żywych organizmów,
- pole magnetyczne może wywierać wpływ na depolaryzację komórek. Zjawiska rezonansowe wskutek przenikania pola magnetycznego mogą zachodzić nie tylko w przestrzeni pozakomórkowej, lecz także w błonie

komórkowej (czyli też w kanałach jonowych) oraz wewnątrz komórki,

– pole magnetyczne ma wpływ również na wodę, która poddana działaniu zewnętrznego pola magnetycznego zmienia swoje właściwości: wzrasta szybkość krystalizacji, stężenie rozpuszczonych gazów, szybkość koagulacji i osiadania zawiesin. Zmienia się pH i zdolności zwilżania [1-10].

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu przedsewnej biostymulacji nasion lniarki polem magnetycznym na zdolność i szybkość ich kiełkowania.



Rys. 1. Zdjęcia przekrojów nasion lniarki a) obraz SEM - powiększenie 50x, b) obraz SEM - powiększenie 500x, c) mikroanaliza składu pierwiastkowego wzdłuż zaznaczonej linii na rysunku 1b

### Struktura nasiona

Ostatnie lata przyniosły dynamiczny rozwój technik i metod badań struktury nasion roślin i ich właściwości. Metody te wykorzystują między innymi: wiązki laserowe,

ultradźwięki, promieniowanie podczerwone i promieniowanie X. Większość aplikacji dotyczy badań właściwości mechanicznych, chemicznych i biologicznych właściwości. Celowe zatem jest poznanie struktury takich nasion wykorzystując np. badania mikroskopem skaningowym, które dają wiele informacji o wewnętrznej strukturze nasiona.

Do badań użyto mikroskopu skaningowego JEOL (model 5400), współpracującego ze spektrometrem promieniowania rentgenowskiego z dyspersją energii firmy Oxford Instrument LINK ISIS. Mikroskop ten posłużył do zaobserwowania kształtu nasion Inianki, a także do oszacowania składu pierwiastkowego. Badania obejmowały, mikroanalizę wzdłuż linii, oraz rozkład powierzchniowy pierwiastków. Przygotowanie próbek do badań obejmowało przecięcie każdej z nich skalpelem wzdłuż dłuższej osi.

Na rysunku 1a przedstawiono obrazy SEM powierzchni przekrojów nasion Inianki w powiększeniu 50x. Rysunek 1b przedstawia obrazy SEM powierzchni przekrojów nasion Inianki w powiększeniu 500x, wraz z mikroanalizą wzdłuż zaznaczonej linii z rysunku 1c.

Obecność tlenu, magnezu, fosforu, siarki, potasu, wapnia i żelaza nie wykazuje większych zmian zawartości w badanym zakresie, cechuje równomierny udział.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników badania nasion Inianki mikroskopem skaningowym można stwierdzić że:

- kształt nasiona jest zbliżony do elipsoidy lub sferoidy,
- nasiono Inianki ma strukturę warstwową, o różnej grubości,
- rozkład badanych pierwiastków w warstwach jest równomierny.

#### Opis matematyczny nasiona jako sferoidy spłaszczonej

Przeprowadzona analiza pokazuje warstwową budowę badanych nasion. Jednak rozkład obserwowanych pierwiastków jest równomierny w poszczególnych warstwach, w związku z tym można przyjąć, że właściwości magnetyczne poszczególnych warstw są bardzo zbliżone do siebie. Zatem w modelu matematycznym, służącym do obliczeń rozkładu pola magnetycznego wewnątrz i na zewnątrz nasiona, można opisać je jako jednowarstwowe. Natomiast kształt badanych nasion najwierniej odwzorowuje sferoida spłaszczona.

Dla wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego wewnątrz i w otoczeniu rozważanego modelu nasiona użyto równania Laplace'a w układzie sferoidy spłaszczonej (1).

We współrzędnych sferoidy spłaszczonej równanie Laplace'a ma postać [11]:

$$(1) \quad \nabla^2 V_m = \frac{1}{a^2 (\cosh^2 \eta - \sin^2 \theta)} \left( \frac{\partial^2 V_m}{\partial \eta^2} + \operatorname{tgh} \eta \frac{\partial V_m}{\partial \eta} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial \theta^2} + \operatorname{ctg} \theta \frac{\partial V_m}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{a^2 \cosh^2 \eta \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V_m}{\partial \psi^2} = 0$$

Metodą analityczną rozwiązania równania Laplace'a zastosowaną w obliczeniach jest metoda rozdzielania zmiennych.

Jeżeli potencjał  $V_m$  zależy tylko od współrzędnej  $\eta$ , rozwiązanie równania Laplace'a upraszcza się do wyrażenia:

$$(2) \quad \frac{\partial^2 V_m}{\partial \eta^2} + \operatorname{tgh} \eta \frac{\partial V_m}{\partial \eta} = 0$$

W przypadku modelowania nasion istnieje symetria osiowa, zatem potencjał jest tylko funkcją współrzędnej  $\eta$

rozwiązanie równania Laplace'a przyjmuje zatem postać (2), a jego rozwiązaniami ogólnymi są równania [11-13]:

$$(3) \quad V_m = A + B \operatorname{arctg}(\sinh \eta)$$

lub

$$(4) \quad V_m = C + D \operatorname{arcctg}(\sinh \eta)$$

w których:  $A, B, C, D$  – stałe całkowania.

#### Obliczenia rozkładu pola magnetycznego

Do obliczeń natężenia pola magnetycznego wokół namagnesowanej sferoidy spłaszczonej. Przyjęto, że sferoida znajduje się w jednorodnym polu magnetycznym. Potencjał jest funkcją jednej zmiennej  $\eta$ , rozwiązanie równania Laplace'a dla takiego przypadku ma postać (4). Przyjmuje się następujące warunki brzegowe [11]:

$$\eta = \eta_0 \rightarrow V_m = V_{m0}$$

$$\eta \rightarrow \infty \rightarrow V_m = 0$$

Podstawiając powyższe warunki do równania (4), otrzymuje się stałe całkowania  $C$  i  $D$

$$C = 0$$

$$(5) \quad D = \frac{V_{m0}}{\operatorname{arcctg}(\sinh \eta_0)}$$

Funkcja rozkładu potencjału przybiera zatem postać:

$$(6) \quad V_m(\eta) = \frac{V_{m0}}{\operatorname{arcctg}(\sinh \eta_0)} \operatorname{arcctg}(\sinh \eta)$$

Natężenie pola magnetycznego można obliczyć z zależności:

$$(7) \quad \mathbf{H} = -\nabla V_m$$

$$(8) \quad \mathbf{H} = \frac{\mathbf{a}_\eta}{a \sqrt{\cosh^2 \eta - \sin^2 \theta}} \frac{V_{m0}}{\operatorname{arcctg}(\sinh \eta_0)} \frac{1}{\cosh \eta}$$

gdzie:  $\mathbf{a}_\eta$  – wektor jednostkowy w układzie sferoidy spłaszczonej.

W celu wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego wewnątrz sferoidy spłaszczonej, zakładając symetrię osiową, należy przyjąć następujące warunki brzegowe [13]:

$$\eta = \eta_0 \rightarrow V_m = 0$$

$$\eta \rightarrow \infty \rightarrow V_m = H_0 z = H_0 a \sinh \eta \cos \theta$$

Rozwiązanie równania Laplace'a, w analizowanym przypadku, ma postać:

$$(9) \quad V_m(\eta) = H_0 \left\{ 1 - \frac{\sinh \eta_0}{\sinh \eta} \left[ \frac{\sinh \eta \operatorname{arcctg}(\sinh \eta) - 1}{\sinh \eta_0 \operatorname{arcctg}(\sinh \eta_0) - 1} \right] \right\}$$

$$(10) \quad \mathbf{H} = H_0 \mathbf{a}_\eta \left[ 1 + \frac{\sinh \eta_0 \operatorname{arcctg}(\sinh \eta_0) - \operatorname{tgh}^2 \eta_0}{1 - \sinh \eta_0 \operatorname{arcctg}(\sinh \eta_0)} \right]$$

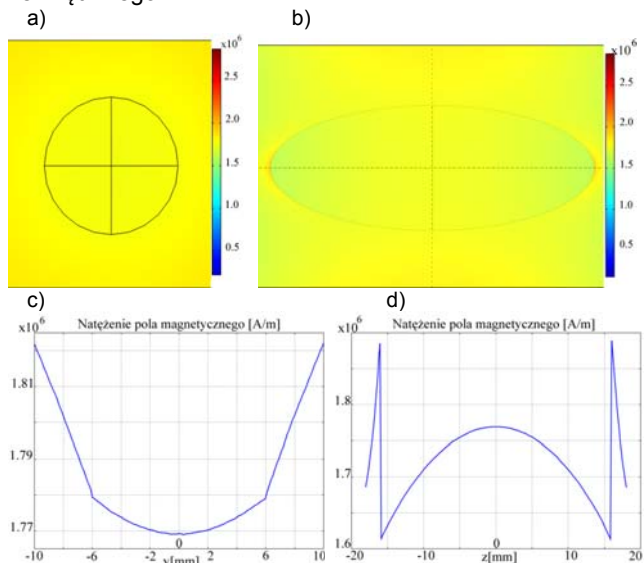
Przyjmuje się następujące założenia co do właściwości środowisk:

- sferoida oraz środowisko otaczające (powietrze) jest izotropowe oraz liniowe,
- zmiany właściwości środowisk na granicach są skokowe.

Analizę rozkładu pola magnetycznego sferoidy spłaszczonej umieszczonej w jednorodnym polu magnetycznym przeprowadzono dla przypadku gdzie pole magnetyczne spolaryzowane wzdłuż dłuższej osi sferoidy. Sferoida jest paramagnetykiem o przenikalności magnetycznej  $\mu_r = 1,1$ .

W analizowanym przypadku można zaobserwować, że zniekształcenia pola magnetycznego są największe na granicy ośrodków gdzie linie pola wnikają do wnętrza sferoidy pod większym kątem. Dla płaszczyzny  $z = 0$ ,

natężenie pola magnetycznego, zbliżając się do środka sferoidy nieznacznie maleje w stosunku do krawędzi sferoidy. Dla płaszczyzny  $y = 0$  jest przeciwnie tzn. bliżej środka sferoidy pole rośnie względem krawędzi. Na zewnątrz sferoidy przy największej krzywiznie powstaje szybki wzrost pola, który następnie maleje do wartości pola zewnętrznego.



Rys. 2. Rozkłady natężenia pola magnetycznego dla: a) płaszczyzny  $z = 0$ , b) płaszczyzny  $y = 0$ . Wykresy natężenia pola magnetycznego dla: c)  $x = 0$ ,  $z = 0$  oraz  $-10 < y < 10$ , d)  $x = 0$ ,  $y = 0$  oraz  $-18 < z < 18$

### Badania eksperymentalne

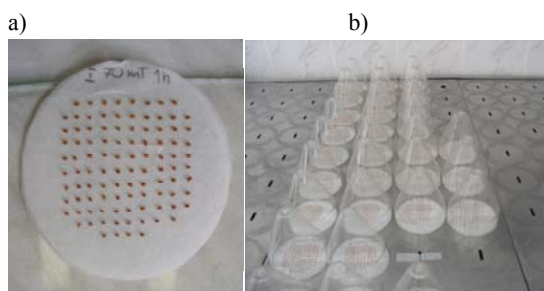
Istnieją dwa podstawowe parametry, które mogą oddziaływać na nasiona i rośliny [14]. Są nimi: gęstość energii pola magnetycznego i czas ekspozycji. Wielkość, która charakteryzuje wpływ pola magnetycznego na organizmy żywe, nazywa się dawką ekspozycyjną  $D$ . Jest ona iloczynem wspomnianych parametrów.

$$(11) \quad D = \rho_{em} t_e$$

gdzie:  $\rho_{em}$  – gęstość energii pola magnetycznego [ $\text{Jm}^{-3}$ ],  
 $t_e$  – czas ekspozycji [s].

Średnią gęstość energii pola magnetycznego można przedstawić jako:

$$(12) \quad \rho_{em} = \frac{1}{2} \mu_0 H_m^2 = \frac{1}{2 \mu_0} B_m^2$$



Rys. 3. a) zdjęcie przedstawiające próbę nasion Inianki bezpośrednio po wysiewie, b) kiełkownik Jacobsona z wysianymi ziarniakami Inianki

Autorzy przeprowadził badania eksperymentalne wpływu stałego w czasie pola magnetycznego na nasiona Inianki. W tym celu wykorzystali pole magnetyczne wytworzone przez elektromagnes nadprzewodnikowy firmy Sumitomo Electric Industries, Ltd. Biostymulację nasion Inianki przeprowadzono w polu stałym o wartościach indukcji: 1 [T], 2 [T], 3 [T], 4 [T], 5 [T] a czasy ekspozycji

miały wartość 1 [min], 5 [min], 10 [min], w tabeli 1 przedstawiono dawki ekspozycyjne zastosowane do biostymulacji.

Tabela 1. Dawki ekspozycyjne zastosowane do stymulacji

Lp.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Dawka ekspozycyjna [ $\text{Jm}^{-3}\text{s}$ ]	Kontrola	4,77 $\cdot 10^7$	1,91 $\cdot 10^8$	2,39 $\cdot 10^8$	4,30 $\cdot 10^8$	4,77 $\cdot 10^8$	7,64 $\cdot 10^8$	9,55 $\cdot 10^8$	1,19 $\cdot 10^9$
Lp.		9	10	11	12	13	14	15	
Dawka ekspozycyjna [ $\text{Jm}^{-3}\text{s}$ ]		1,91 $\cdot 10^9$	2,15 $\cdot 10^9$	3,82 $\cdot 10^9$	4,30 $\cdot 10^9$	5,97 $\cdot 10^9$	7,64 $\cdot 10^9$	1,19 $\cdot 10^{10}$	

Nasiona Inianki odmiany „Przybrodzka” wysiewano w kiełkowniku Jacobsena (rysunek 3), umieszczonym w pomieszczeniu klimatyzowanym w temperaturze 20 °C i oświetleniu 12 h na dobę. Wysiewano po 100 nasion w 3 powtórzeniach dla każdej kombinacji. W doświadczeniu zastosowano również nasiona nie poddane działaniu pola magnetycznego czyli kontrolę. Zdolność kiełkowania oceniono po 10 dniach.

Od 2 dnia po wysiewie usuwano z podłoża ziarniki pszenicy oraz nasiona Inianki, które wykształciły 2 mm kiełek i korzonki. Obserwacje powtarzano co 24 h przez 10 dni. Obserwacje te pozwoliły na oznaczenie wskaźników: szybkości kiełkowania Maguire’a, a także wskaźnika średniego czasu kiełkowania Piepera.

Zdolność kiełkowania oznacza procent normalnie skielkowanych nasion w czasie określonym w normach. Jest jednym z parametrów wartości siewnej nasion.

Wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire’a (WSK) obliczany jako suma ilorazów normalnie skielkowanych nasion podzielonych przez kolejny dzień kiełkowania. Wysoka wartość współczynnika Maguire’a świadczy o szybkim kiełkowaniu badanych ziarniaków. Dzięki dużej czułości tego wskaźnika, jest on bardzo przydatny w ocenie szybkości kiełkowania

Wskaźnik średniego czasu kiełkowania jednego ziarniaka wg Piepera (WSCK) obliczany jako iloraz z sumy iloczynów liczby skielkowanych ziarniaków danego dnia i numeru dnia (od wysiewu do usunięcia ziarniaków z podłoża), do sumy skielkowanych ziarniaków w tych dniach. Niska wartość współczynnika Piepera świadczy o wysokim wigorze nasion i szybkich wschodach, zaś im przebieg wschodów jest bardziej rozciągnięty w czasie, tym współczynnik jest wyższy.

Dla otrzymanych wyników zdolności kiełkowania, średniego czasu kiełkowania wg Piepera oraz szybkości kiełkowania wg Maguire’a obliczono dwuczynnikowe analizy wariancji. Pierwszym czynnikiem była wartość pola magnetycznego użytego do biostymulacji, a drugim czas ekspozycji nasion. Istotność badanych źródeł zmienności testowano testem F Snedecora. Istotność różnicowania średnich przedstawiono z zastosowaniem wielokrotnego testu Duncana. Wyniki testu Duncana zaprezentowano za pomocą liter (a – h) na wykresach (Rys. 4 – 6). Różne litery wskazują na istotne różnice wpływu poszczególnych czynników. Ze względu na odchylenie analizowanych obserwacji zdolności kiełkowania od rozkładu normalnego, wartości procentowe transformowano z zastosowaniem wzoru Bliss’a ( $y = \arcsin \sqrt{t}$ ).

Zdolność kiełkowania przyjmowała wysokie wartości które wahały się od 97% do 100%, (Rys. 4). Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji, stwierdzono istotny wpływ czasu ekspozycji nasion Inianki polem magnetycznym na zdolność kiełkowania.

Dla czasu 5 [min] i 10 [min] Przy tak wysokiej zdolności różnice wprawdzie istotne ale wynosiły tylko 1,06%. Nie zaobserwowano natomiast wpływu wartości pola magnetycznego na tą cechę.

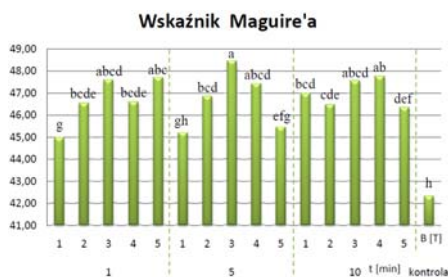


Rys. 4. Wpływ czasu ekspozycji na zdolność kiełkowania



Rys.5. Wpływ wartości indukcji pola magnetycznego i czasu ekspozycji na wskaźnik średniego czasu kiełkowania wg Piepera

Czas ekspozycji oraz wartość indukcji pola magnetycznego istotnie skrócił średni czas kiełkowania nasion Inianki w porównaniu do kontroli. Wykazano również istotne współdziałanie badanych czynników (Rys. 5). Najkrótszy średni czas kiełkowania obserwowano po biostymulacji polem magnetycznym o wartości indukcji 3 [T] i czasie ekspozycji 5 [min].



Rys.6. Wpływ wartości indukcji pola magnetycznego i czasu ekspozycji na szybkość kiełkowania wg. Maguire'a

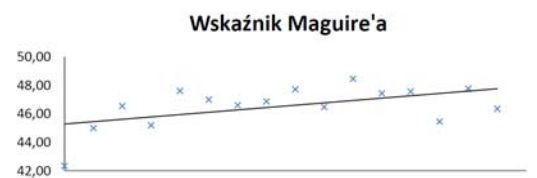
a)



b)



c)



Rys. 7. Wskaźniki kiełkowania nasion Inianki stymulowanych stałym w czasie polem magnetycznym a) zdolność kiełkowania, b) wskaźnik Piepera, c) wskaźnik Maguire'a

Wartości szybkości kiełkowania wahały się od 42,6 do 49,0. Dwuczynnikowa analiza wariacji szybkości kiełkowania wykazała istotny wpływ wartości indukcji pola

magnetycznego i czasu ekspozycji oraz współdziałania badanych czynników. Wykazano również istotne współdziałanie badanych czynników na szybkość kiełkowania rysunek 6. Najwyższe wartości szybkości kiełkowania obserwowano przy zastosowaniu pola o wartości indukcji 3 [T] i czasie ekspozycji 5 [min].

Rysunek 7 przedstawia średnie wartości wskaźników kiełkowania dla danej dawki ekspozycyjnej oraz trendy liniowe obliczone na ich podstawie.

Dla nasion Inianki wykres zdolności kiełkowania ma malejący trend. Oznacza to mniejszą zdolność kiełkowania nasion poddanych stymulacji większą dawką ekspozycyjną. Jednak większość wyników zdolności kiełkowania ma większe wartości niż kontrola. Trend na wykresie szybkości kiełkowania jest rosnący, a na wykresie czasu kiełkowania jest malejący, oznacza to zwiększenie szybkości kiełkowania oraz skrócenie czasu kiełkowania wraz ze wzrostem dawki ekspozycyjnej.

## Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników biostymulacji nasion Inianki polem magnetycznym, wykazano istotny wpływ tego zabiegu na poprawę zdolności kiełkowania oraz wskaźników średniego czasu kiełkowania i szybkości kiełkowania.

## LITERATURA

- [1] Adair R. K.: „Comment: Influence of Stationary Magnetic Fields on Water Relations in Lettuce Seeds” *Bioelectromagnetics*, (2002), Vol. 23, 550-553
- [2] Adey R.W.: „Biological effects of electromagnetic field” *Journal of Cellular Biochemistry* Vol. 51, 1993, s.410-416
- [3] Barnes F. S.: „Mechanisms for electric and magnetic fields effects on biological cells” *IEEE Transactions on magnetic*, (2005), Vol. 41, 4219- 4224
- [4] Binhi V. N.: „Theoretical concepts in magnetobiology” *Electro- and Magnetobiology*, (2001), Vol. 20(1), 43-58
- [5] Blanchard J. P.: „Modeling Biological Effects from Magnetic Fields” *IEEE AES Systems Magazine*, (1996), 6-10
- [6] Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M., Syrek P.: Determination of safety zones in the context of the magnetic field impact on the surrounding during magnetic therapy, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2011), Vol 87, 79-82
- [7] Krawczyk A.: „Bioelektromagnetyzm”, *Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu Instytut Naukowo-Badawczy ZTUREK Warszawa* (2002)
- [8] Rosen A. D.: „Studies on the effect of static magnetic fields on biological systems” *Piers Online*, (2010), Vol. 6, 133-136
- [9] Ueno S.: „Biological effects of magnetic fields” *IEEE Transactions journal on magnetics in Japan*, (1992), Vol.7, 580-585
- [10] Zhadin M. N.: „Review of Russian Literature on Biological Action of DC and Low-Frequency AC Magnetic Fields” *Bioelectromagnetics*, (2001), Vol. 22, 27-45
- [11] Cieśla A., Skowron M.: „The analysis of the static magnetic field in paramagnetic spheroids at the laminar structure on the example grain wheat” *ISEF'2007 Prague* ISBN: 978-80-01-03784-3, (2007), 1-6
- [12] Cieśla A., Skowron M.: „Biostymulacja ziarniaków silnym stałym polem magnetycznym” *Prace Instytutu Elektrotechniki*, (2008), Vol. 55, 143-167
- [13] Cieśla A., Skowron M.: „Many layer paramagnetic oblate spheroid in the homogeneous magnetostatics field on the example grain wheat” *IEEE CEFC 2008 13th biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation Athens*, 11-15 May (2008), 95
- [14] Pietruszewski S., Kania K.: „Effect of magnetic field on germination and yield of wheat” *Int. Agrophysics*, (2010), Vol. 24, 297-302

**Autorzy:** dr hab. inż. Antoni Cieśla, prof. AGH, dr inż. Wojciech Kraszewski, dr inż. Mikołaj Skowron, dr inż. Przemysław Syrek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektroenergetyki i Elektroenergetyki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [aciesla@agh.edu.pl](mailto:aciesla@agh.edu.pl), [wkraszew@agh.edu.pl](mailto:wkraszew@agh.edu.pl), [mskowron@agh.edu.pl](mailto:mskowron@agh.edu.pl), [syrekp@agh.edu.pl](mailto:syrekp@agh.edu.pl)