

## Wykorzystanie przewodności elektrycznej gleby do oceny przestrzennego zróżnicowania wartości siły oporu roboczego narzędzia wzorcowego

**Streszczenie.** Przy metodach pośrednich bardzo często wykorzystywany jest pomiar siły uciążu jako parametru obrazującego zmienność warunków glebowych. Celem badań było określenie relacji pomiędzy wynikami skanowania przewodności elektrycznej gleby sondą EM38 a oporem roboczym narzędzia wzorcowego generowanym przez zagęszczenie gleby, ewentualnie podglebia. Zakres badań obejmował pomiary z jednoczesnym zapisem współrzędnych geograficznych wszystkich punktów pomiarowych sposób pozwalający wygenerować mapy zróżnicowania analizowanych wielkości. Zaobserwowano, że w przypadku kilku obszarów wydzielonych w obrębie poligonu doświadczalnego istnieje silny związek pomiędzy przewodnością elektryczną gleby a oporem narzędzia wzorcowego. Uzyskane wyniki badań dają podstawę do prowadzenia dalszych prac i walidacji metody pomiaru przewodności elektrycznej gleby w sposób umożliwiający jej praktyczne wykorzystanie nie tylko do określania chwilowej zmienności gleby, ale również do sterowania pracą maszyn uprawowych realizowanym w czasie rzeczywistym.

**Abstract.** With indirect methods, the measurement of tractive force is very often used as a parameter illustrating the variability of soil conditions. The aim of the study was to determine the relationship between the results of soil electrical conductivity scanning with the EM38 probe and the working resistance of the reference tool generated by the soil compaction or possibly subsoil. The scope of the research included measurements with simultaneous recording of geographical coordinates of all measurement points, which allowed to generate maps of variation of the analyzed quantities. It has been observed that in the case of several areas separated within the experimental polygon, there is a strong relationship between the soil's electrical conductivity and the resistance of the reference tool. The obtained test results provide the basis for further work and validation of the method for measuring soil electrical conductivity in a way that allows its practical use not only to determine the instantaneous variability of soil, but also to control the operation of cultivation machines carried out in real time. **(The use of soil electrical conductivity to spatial differentiation of the value of the working resistance of a reference tool).**

**Słowa kluczowe:** system pomiarowy, automatyka, GPS, rolnictwo precyzyjne

**Keywords:** measuring system, automation, GPS, precision agriculture

### Wstęp

Zmienność fizycznych i chemicznych właściwości gleby, na powierzchni pola uprawnego, jest jedną z przyczyn wprowadzania technologii rolnictwa precyzyjnego [1,2]. Występowanie różnych warunków glebowych na polu jest podstawą do przeprowadzania zmiennych zabiegów agrotechnicznych [3,4]. Powszechnie wykorzystywane metody badania zmienności gleby pod względem chemicznym i fizycznym wymagają poboru próbek i są czasochłonne. Rozwiązaniem jest więc wykorzystanie własności elektrycznych badanego materiału [5] lub pomiarów pośrednich przy użyciu różnego rodzaju czujników elektrycznych [6-10]. Badania nad rozwojem czujników i metod pomiarowych trwają już od wielu lat, ponieważ wciąż możliwość pozyskania informacji o zmienności przestrzennej gleby w krótkim czasie i po niskich kosztach jest jedną z największych przeszkód w szerokim upowszechnianiu technologii rolnictwa precyzyjnego. Najbardziej popularnym urządzeniem, w przypadku badania gleby, jest konduktometr przewodności elektromagnetycznej EM38. Wyniki pomiaru są ściśle powiązane z podstawowymi cechami gleby (skład granulometryczny, zawartość wody i substancji organicznej) i mogą posłużyć do wyznaczenia obszarów charakterystycznych na polu. Akinsunmade i in. [11] zastosowali georadar do pomiaru stanu podglebia symulując stopnie jego zagęszczenia, które odpowiadały prowadzonej technologii. Wykorzystanie wyników w technologii rolnictwa precyzyjnego i przygotowanie map przestrzennej zmienności wymaga wyznaczenia pozycji konduktometru EM38 na polu i w tym celu dołączany jest komputer polowy z odbiornikiem GPS lub GNSS [12,13]. Bardziej rozbudowane systemy, wyposażone w połączenie z Internetem, umożliwiają przesyłanie zbieranych danych do serwerów lub komputerów biurowych w celu ich dalszej obróbki [14]. Przy metodach pośrednich bardzo często

wykorzystywany jest pomiar siły uciążu jako parametru obrazującego zmienność warunków podglebia. W opracowaniu Van Bergijka i in. [15] wykazano, że każde odpowiednio oprzyrządowane narzędzie uprawowe może pełnić rolę czujnika skanującego przestrzenną zmienność siły uciążu. Do podobnych wniosków doszedł Kielbasa [4], który jako narzędzie wzorcowe zastosował ząb głębosza z elementem roboczym w postaci dłuta o kącie natarcia 21° i długości 0,28 m, który korelował ze wskazaniami pomiarów penetrometrycznych i plonowaniem roślin oraz wybranymi właściwościami plonu. Bajla i in. [16] mierzyli opór penetracji gleby poziomym penetrometrem, konkludując, że zastosowana metoda może być wykorzystana do szybkiego określenia stanu gleby dla celów rolnictwa precyzyjnego oraz do prognozowania oporów roboczych narzędzi stosowanych w rolnictwie. Tóth i in. [17] zastosowali do badania zmienności glebowej nóż mierzący opór poziomy gleby, w kilku punktach profilu glebowego. Postęp techniczny (nowe konstrukcje maszyn i narzędzi rolniczych) umożliwił modyfikację technologii produkcji, tak aby każdy z jej etapów był precyzyjny w obrębie realizowanej funkcji celu. Jednym z przejawów nowoczesnego rolnictwa jest prowadzenie (tj. sterowanie torem jazdy) agregatów uprawowych w sposób automatyczny, lub wspomaganie kierowcy w prowadzeniu agregatu [18]. Obecnie na rynku stosowane są systemy, pozwalające realizować zmienną głębokość pracy maszyn w czasie rzeczywistym, ale dalej wyzwaniem są systemy o charakterze autonomicznym, które pozwolą realizować tego typu zabiegi z uwzględnieniem optymalizacji ścieżki przejazdu maszyny. Prowadzenie badań związanych z walidacją metod pomiarowych wykorzystujących czujniki bezkontaktowe stanowi podstawę do dalszych prac związanych z tworzeniem nowych technologii. Obecnie istotnym produkcyjnym elementem technologii jest stan podglebia,

które jest degradowane przejazdami maszyn wykorzystywanych w poszczególnych zabiegach.

### Cel i zakres badań

Celem badań było określenie relacji pomiędzy wynikami skanowania przewodności elektrycznej gleby sondą EM38 a oporem roboczym narzędzia wzorcowego generowanym przez zagęszczenie gleby, ewentualnie podglebia. Zakres badań obejmował pomiary z jednoczesnym zapisem współrzędnych geograficznych wszystkich punktów pomiarowych sposobem pozwalający wygenerować mapy zróżnicowania analizowanych wielkości.

### Metodyka badań

Pomiar przewodności elektrycznej gleby wykonywany był sondą EM38 (rys. 1a) na całym 35 hektarowym poligonie doświadczalnym w siatce punktów węzłowych oddalonych od siebie o 20 m. należy zaznaczyć, że przejazdy pomiarowe realizowane były równoległe i prostopadłe do ścieżek technologicznych. W tych samych punktach pomiarowych dokonano pomiaru oporu roboczego lemiesza narzędzia wzorcowego (rys. 1b) pracującego na głębokości 0,25 m.



Rys. 1. Pomiar: a - przewodności elektrycznej sondą EM38, b - oporu roboczego narzędzia wzorcowego

Do przeprowadzenia badań wybrano mobilny system pomiarowy umożliwiający pomiar pomiaru siły oporu roboczego narzędzia wzorcowego z częstotliwością 1 Hz [4].

Z taką samą częstotliwością pracowała sonda EM38 rejestrująca przewodności elektryczną gleby. W warunkach doświadczenia polowego jest to częstotliwość wystarczająca do osiągnięcia dokładności przestrzennego pomiaru (co 0,014m) i poprawności interpretacji wyników badań. Rejestrowane w obydwu pomiarach współrzędne geograficzne mierzonych punktów pozwalają na wykonanie map cyfrowych przestrzennej zmienności przewodności elektromagnetycznej gleby oraz przestrzennej zmienności oporów roboczych narzędzia wzorcowego. Sposób prowadzenia narzędzia wzorcowego oraz sondy EM38 w obrębie poligonu doświadczalnego przedstawiono na rysunku 2 (białe linie).



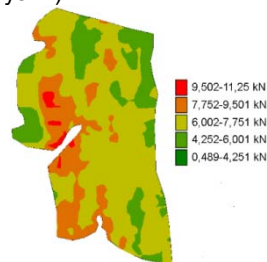
Rys. 2. Schemat prowadzenia narzędzia wzorcowego oraz sondy EM38 po powierzchni poligonu doświadczalnego

Pomiar wilgotności, podczas wykonywania pomiaru oporów roboczych głębosza wykonano wykorzystując sondę TDR. Badanie to polegało na wbiciu czujnika w warstwę gleby, na głębokość 0-10 cm oraz 10-20 cm i

wykonanie pomiaru wilgotności w przygotowanej wcześniej siatce punktów (rys. 4) wynikającej z reżimu metodycznego poruszania się narzędzia wzorcowego i sondy EM38. Do interpolacji mierzonych wielkości traktowanych jako zmienne deterministyczne wykorzystano metodę odwrotnych odległości IDW (Inverse Distance Weighted) a generowania map wektorowych i rastrowych, logicznego stosownych operacji na mapach w postaci logicznych zapytań i wynikającej z nich przestrzennej selekcji danych jak również nakładania wzajemnie zależnych danych poszczególnych map zrealizowano z wykorzystaniem oprogramowania ERSI ArcView GIS 3.3

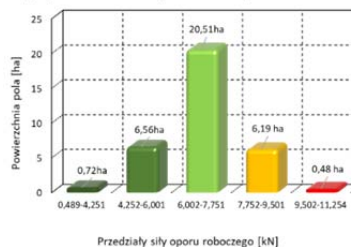
### Wyniki badań

Na rysunku 3 zwiualizowano wypadkową siłę oporu narzędzia wzorcowego pracującego ze stałą głębokością zarejestrowaną w obrębie poligonu doświadczalnego podczas jazdy wzdłuż poligonu doświadczalnego (północ-południe). Odnotowano, że obszar poligonu doświadczalnego był istotnie zróżnicowany pod względem mierzonej wielkości a obszary o najwyższym oporze usytuowane były w środkowo zachodniej części pola. Obszary charakteryzujące się najniższym oporem roboczym występowały w północno wschodniej części poligonu doświadczalnego. Maksymalna siła wypadkowa oporu roboczego miała charakter incydentalny i wynosiła 9,5 kN (kolor ciemnoczerwony), natomiast minimalna siła oporu roboczego wynosiła 0,48kN - 4,25 kN (kolor ciemnozielony) (rys. 4).



Rys. 3. Przestrzenne zróżnicowanie siły oporu roboczego narzędzia wzorcowego

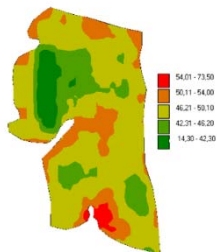
W konsekwencji pomiarów siły oporu narzędzia wzorcowego i umiejscowienia zróżnicowania przedmiotowej siły w obrębie badanego pola możliwe jest na podstawie map aplikacyjnych precyzyjne wykonanie działań eliminujących niekorzystne warunki glebowe. Dodatkowo archiwizacja działań z uwzględnieniem koordynatów geograficznych pozwala ocenić skutki przeprowadzonego zabiegu w kolejnych latach produkcji.



Rys. 4. Struktura siły oporu narzędzia wzorcowego na powierzchni poligonu doświadczalnego

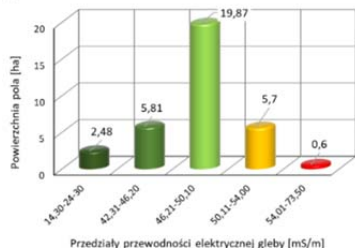
Stwierdzono, że zróżnicowanie przestrzenne siły oporu roboczego narzędzia wzorcowego nie jest wysokie, ponieważ zdecydowana większość powierzchni poligonu doświadczalnego (25,5 ha) charakteryzowała się siłą oporu roboczego mieszczą się w przedziale średnim tj. od 6 kN do 7,7 kN. Wykonana mapa przestrzennego zróżnicowania przewodności elektrycznej gleby sondą EM38 (rys. 5) charakteryzuje się znacznym podobieństwem. Najwyższą

przewodność elektryczną gleby w przedziale od  $54 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$  do  $73 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$  odnotowywano w miejscach w których siła oporu roboczego narzędzia wzorcowego była najczęściej średnia lub wysoka, czyli południowo zachodnia część powierzchni poligonu doświadczalnego.



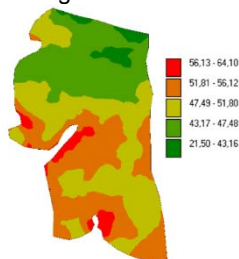
Rys. 5. Przestrzenne zróżnicowanie przewodności elektrycznej gleby w przypadku wzdłużnego prowadzenia czujnika EM38 po poligonie doświadczalnym

Najniższe wartości przewodności elektrycznej gleby odnotowano przede wszystkim na tych obszarach poligonu doświadczalnego, gdzie wartości siły oporu roboczego narzędzia wzorcowego były najwyższe, czyli środkowo zachodnią część poligonu doświadczalnego. Przeważająca przewodność elektryczna gleby mieściła się w przedziale od  $46,21 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$  do  $50,10 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$  zajmując 19,87 ha (rys. 6). Należy zaznaczyć, że odwzorowanie powierzchniowe w/w relacji jest bardzo wysokie, co można wytłumaczyć tym, że w zwilżonej glebie zmienia się jej struktura wodno-powietrzna (mniej wody i powietrza) w konsekwencji przewodność elektryczna spada.



Rys. 6. Struktura przewodności elektrycznej gleby na powierzchni poligonu doświadczalnego w przypadku wzdłużnego prowadzenia czujnika EM38

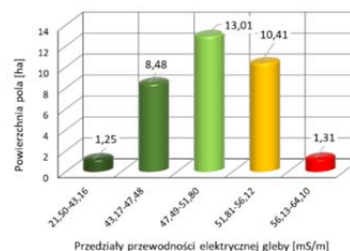
Na rysunku 7 przedstawiono wartość przewodności elektrycznej gleby mierzonej w czasie przejazdów w poprzek pola (kierunek wschód zachód). Odnotowano odmienną strukturę zmienności mierzonego parametru w obrębie poligonu doświadczalnego. Najniższe wartości przewodności elektrycznej gleby zidentyfikowano w północnej części pola a najwyższe przekraczające  $56 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$  w południowej i południowo zachodniej części poligonu doświadczalnego.



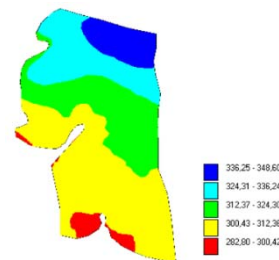
Rys. 7. Przestrzenne zróżnicowanie przewodności elektrycznej gleby w przypadku poprzecznego prowadzenia czujnika EM38 po poligonie doświadczalnym

Największa powierzchnia poligonu doświadczalnego charakteryzowała się przewodnością elektryczną z przedziału od  $47,49 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$  do  $51,80 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$  zajmując 13,01 ha (rys. 8).

Zaobserwowano, że przewodność elektryczna jest parametrem mniej stabilnym, ale bardziej czułym w stosunku do siły oporu roboczego narzędzia co wynika ze zróżnicowania wielkości powierzchni poszczególnych przedziałów analizowanej wielkości, które w przypadku przewodności elektrycznej są wyrównane (ok. 10 ha) z wyjątkiem skrajnych wartości, których sumaryczna powierzchnia nie przekraczała 2,6 ha. Zróżnicowanie wartości przewodności elektrycznej gleby wynikające z kierunku prowadzenia sondy EM38 może być wynikiem kierunku prowadzonej uprawy gleby i wynikającej z tego czynnika struktury profilu glebowego. Biorąc pod uwagę strukturę ukształtowania terenu (rys. 9) produkcyjny kierunek uprawy poligonu doświadczalnego mógł być wymuszony.

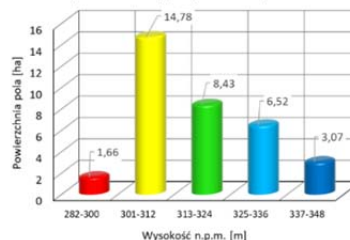


Rys. 8. Struktura przewodności elektrycznej gleby na powierzchni poligonu doświadczalnego w przypadku poprzecznego prowadzenia czujnika EM38



Rys. 9. Mapa ukształtowania terenu poligonu doświadczalnego

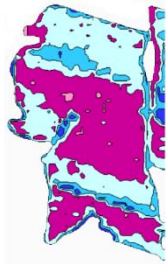
Odnotowano, że wysokość nad poziom morza z przedziału od 300 m do 312 m występowała na jednym obszarze usytuowanym w południowej części poligonu doświadczalnego (kolor złoty) o powierzchni 14,78 ha (rys.10). Należy zwrócić uwagę na powierzchnie poligonu doświadczalnego leżące najniżej – kolor czerwony (252 m.n.p.m) oraz maksymalne wartości przewodności elektrycznej gleby, które na siebie nachodzą. Świadczy to dużym uwilgotnieniu tych obszarów wynikające z usytuowania, co powoduje wysoką przewodność elektryczną profilu glebowego [17,18].



Rys. 10. Struktura wysokości powierzchni poligonu doświadczalnego nad poziom morza

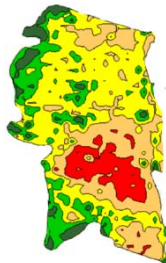
Obszary położone wyżej n.p.m charakteryzowały się niższą przewodnością elektryczną (pomiar w poprzek pola), co również mogło być wynikiem zróżnicowania wilgotności gleby. Potwierdza to analiza zróżnicowania wilgotności gleby w obrębie poligonu doświadczalnego (rys. 11). Kolorem różowym zaznaczono obszary o najwyższej wilgotności, natomiast kolorem jasnoniebieskim obszary,

gdzie wilgotność gleby była najniższa. Zmienność wilgotności mierzona sondą TDR w trakcie dokonywania pomiarów sił oporów roboczych głębosza wykazały, że wilgotność gleby różniła się pomiędzy dwoma mierzonymi poziomami profilu gleby tj. głębokość 0 m – 0,1 m, gdzie wynosiła 15,7% oraz głębokość 0,1 m – 0,2 m, gdzie wynosiła 20,2%.



Rys. 11. Przestrzenne zróżnicowanie wilgotności gleby

Należy stwierdzić, że w przypadku kilku obszarów wydzielonych w obrębie poligonu doświadczalnego istnieje silny związek pomiędzy przewodnością elektryczną gleby a oporem narzędzia wzorcowego. Dotyczy to głównie północno zachodniej części poligonu doświadczalnego oraz jego części północno wschodniej. Część południowa poligonu doświadczalnego charakteryzowała się większą wilgotnością w stosunku do pozostałej części poligonu, co przełożyło się na wynik przewodności elektrycznych w przeciwieństwie do wyników oporu roboczego narzędzia wzorcowego, którego wartość w mniejszym stopniu zależy od wilgotności miejscowej profilu glebowego. Na rysunku 12 przedstawiono zróżnicowanie przestrzenne wielkości plonu roślin (rzepak), który jest funkcją celu produkcji towarowej. Ponadto ten element procesu produkcyjnego weryfikuje wszystkie czynności wykonane w trakcie jego trwania, co pozwala optymalizować technologie w kolejnych cyklach produkcji.



Rys. 12. Przestrzenne zróżnicowanie wielkości plonu

Podobne stwierdzenie dotyczy relacji plonu z przewodnością elektryczną gleby, gdzie zróżnicowanie powierzchniowe plonu tylko w pewnym zakresie pokrywa się ze zróżnicowaniem w/w wielkości. Najniższe plony były charakterystyczne dla obszarów północnych poligonu doświadczalnego.

### Podsumowanie

Przeprowadzone Uzyskane wyniki badań dają podstawę do prowadzenia dalszych prac i walidacji metody pomiaru przewodności elektrycznej gleby w sposób umożliwiający jej praktyczne wykorzystanie nie tylko do określania chwilowej zmienności gleby, ale również do sterowania pracą maszyn uprawowych realizowanym w czasie rzeczywistym. Istnieje możliwość precyzyjnego wyekstrahowania miejsc w obrębie pola produkcyjnego w których podglebie wymaga ingerencji, ale należałoby zastosować obydwie metody jednocześnie. Innym rozwiązaniem może być identyfikacja konduktometryczna powierzchni o zróżnicowanej przewodności elektrycznej i na bazie tak powstałej mapy walidować te wskazania metodą inwazyjną wykorzystującą głębosz jako narzędzie wzorcowe.

### Autorzy:

dr hab. inż. Paweł Kielbasa, prof. UR, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: pawel.kielbasa@urk.edu.pl, dr inż. Mirosław ZAGÓRDA, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: Miroslaw.Zagorda@urk.edu.pl, doc. Ing. Maroš Korenko, PhD. Slovak University of Agriculture in Nitra Department of Quality and Engineering Technologies, e-mail: korenko@mech.uniaq.sk; Ing. Marián Bujna, PhD. Slovak University of Agriculture in Nitra Department of Quality and Engineering Technologies, Faculty of Engineering, e-mail: marian.bujna@centrum.sk

### LITERATURA

- [1] Walczykova M, Kielbasa P., Zagórda M. Pozyskanie i wykorzystanie informacji w rolnictwie precyzyjnym. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej 2016
- [2] Adamchuk V.I. Precision Agriculture: Does it make sense Better Crops, 2010, 94, 3, 4-6.
- [3] Zagórda M., Juliszewski T., Kielbasa P., Nawara P., Drózd T., Trzyniec K. Control of electrovalve assembly based on signal from trimble cfx-750 navigation panel with field-iq module. Przegląd Elektrotechniczny, (2017), nr 12, s. 199-203.
- [4] Kielbasa P. Zintegrowana metoda oceny nakładów energetycznych na uprawę podstawową w aspekcie mozaikowości gleby. Inżynieria Rolnicza, (2011), 3 (128).
- [5] Drózd T., Gąsiorowski A., Posytek Z. Wykorzystanie fal elektromagnetycznych do określania wilgotności biosuwrowców nieżywnościowych metodą falowodową: monografia, (2016), Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, 134 s.
- [6] Bah A., Balasundram S.K., Husni M.H.A. Sensor technologies for precision soil nutrient management and monitoring. American Journal of Agricultural and Biological Sciences, (2012) 7, 1, 43-49.
- [7] Duraj A., Korzeniewska E., Krawczyk A., Classification algorithms to identify changes in resistance. Przegląd elektrotechniczny, (2015), nr 12, s. 80-82.
- [8] Kielbasa P., Drózd T., Zagórda M. Kurpaska S., Posytek Z. Wykorzystanie tensometrii oporowej do przestrzennej identyfikacji zróżnicowania wybranych właściwości gruntu. Przegląd Elektrotechniczny, (2019), nr 1, s. 53-56,
- [9] Szczesny A., Korzeniewska E.: Dobór metody do pomiaru rezystancji uziemienia Przegląd Elektrotechniczny 2018, 94(12), pp. 178-181
- [10] Szczesny A., Korzeniewska E.: Validation of the method for measuring the effectiveness of residual current protection 2019 Applications of Electromagnetics in Modern Engineering and Medicine, PTZE 2019, 8781686, pp. 237-240
- [11] Akinsunmade A., Tomecka-Suchoń S., Pysz P., Karczewski J., Juliszewski T., Zagórda M., Kielbasa P. Analysis of the possibility of identifying the rheological structure of soil by the Ground Penetrating Radar and EM conductivity methods. 29th Applications of Electromagnetics in Modern Engineering and Medicine, PTZE; Janow Podlaski; Poland; 2019
- [12] Walczykova M. Zagórda M. Analiza właściwości gleby dla potrzeb rolnictwa precyzyjnego. Zesz. Naukowe UP we Wrocławiu (2007) VI, 552, s. 35-40.
- [13] Walczyk M., Zagórda M. Korelacja wybranych właściwości gleby z plonami. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, (2009) 543, s. 377-385.
- [14] Kielbasa P., Kurpaska S., Zagórda M., Drózd T.: System for automatic measurement of topsoil layer compaction and its spatial identification within the research area. Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE), IEEE Xplore, doi:10.1109/PTZE.2018.8503213,
- [15] Van Bergeijk J., Goense D., Speelman L. Soil tillage resistance as a tool to map soil type differences. J. agric. Engng Res. (2001), 79, ss.371-387.
- [16] Bajla J., Walczykova M., Štrba M., Benda I. Ocena poziomego oporu gleby z wykorzystaniem teorii procesów stochastycznych. Inżynieria Rolnicza, (2005), nr 10(70). s. 13-21.
- [17] Tóth J., Bajla J., Čičo M., Kučera M. The comparison of soil resistance measurements with horizontal and knife penetrometer. Traktori i pogonske mašine, 2009, 14, 1. s. 59-63.
- [18] Gołębiowski T., Juliszewski T., Kielbasa P., Tomecka-Suchoń S., Uhl T. Recent Advancement Approach For Precision Agriculture. In: Uhl T. (eds) Advances in Mechanism and Machine Science. IFTOMM WC 2019. vol 73.