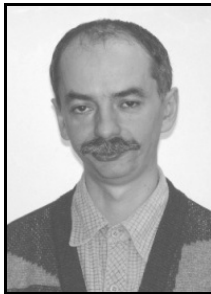
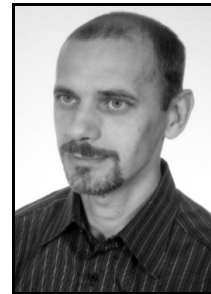


**Dariusz TOMKIEWICZ, Tomasz PISKIER**POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA  
ul. Raclawicka 15, 75-620 Koszalin**Metody on–line monitorowania zawartości składników mineralnych w roślinach****Dr inż. Dariusz TOMKIEWICZ**

Pracuje jako adiunkt w Katedrze Automatyki Politechniki Koszalińskiej. Stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie Budowa i Eksploatacja Maszyn, specjalność Automatyka i Robotyka uzyskał w 2000 roku. W zakresie jego zainteresowań znajdują się modelowanie i identyfikacja obiektów, inteligentne układy pomiarowe, algorytmy sztucznej inteligencji, sterowanie układami o parametrach rozłożonych.

e-mail: [dariusz.tomkiewicz@tu.koszalin.pl](mailto:dariusz.tomkiewicz@tu.koszalin.pl)**Dr hab. inż. Tomasz PISKIER**

Pracuje jako profesor nadzwyczajny w Katedrze Biologicznych Podstaw Rolnictwa. Stopień doktora nauk rolniczych w dziedzinie Agronomia uzyskał w 1997 roku, stopień dr hab. w dziedzinie Inżynieria Rolnicza specjalności Odnawialne Źródła Energii uzyskał w roku 2012. Obszar jego zainteresowań obejmuje: rachunek energetyczny w produkcji rolniczej, odnawialne źródła energii oraz systemy bezorkowej uprawy roli.

e-mail: [piskier@poczta.onet.pl](mailto:piskier@poczta.onet.pl)**Streszczenie**

Pomiar zawartości składników mineralnych w roślinach i opracowanie optymalnych metod dawkowania nawozów w zależności od uzyskanych wartości pomiarowych w czasie rzeczywistym jest jednym z kluczowych problemów w rolnictwie precyzyjnym. W artykule przedstawiono aktualny stan badań dotyczących metod pomiaru zawartości azotu w roślinach oraz stosowane w rolnictwie precyzyjnym urządzenia służące do pomiaru tej wielkości. Przedstawiono również badania dotyczące opracowania układu pomiarowego umożliwiającego pomiar stresu wywołanego w roślinach na skutek braku mineralnych składników pokarmowych. W odróżnieniu od większości współcześnie stosowanych metod bazujących na pomiarze natężenia promieniowania elektromagnetycznego w zakresie UV, VIS i NIR odbitego od powierzchni liści, opracowana metoda wykorzystuje spektroskopię impedancyjną do określenia aktualnego stanu roślin. Metoda ta została przetestowana i obecnie trwają prace związane z zastosowaniem tej metody pomiarowej w warunkach polowych.

**Słowa kluczowe:** rolnictwo precyzyjne, pomiar, zawartość azotu, spektroskopia impedancyjna

**On-line methods for monitoring mineral nutrient content in plants****Abstract**

Measuring the amount of mineral nutrients in plants and methods for optimal dosing of fertilizers according to the obtained measurement values in real-time is one of the key problems of the precision agriculture. The paper presents the current state of research on methods for estimation of nitrite content in plants used in precision agriculture equipment for this purpose. There is also presented a measuring system elaborated by the authors. This system enables measurement of the plant stress caused by the lack of mineral nutrients. Unlike most of the currently used methods based on the measurement of electromagnetic radiation in the UV, VIS and NIR reflected from the surface of leaves, the developed sensing method applies the impedance spectroscopy to determine the current status of the plant. Because the elaborated sensor is placed directly on the plant, it has potential to provide more accurate and timely information about the plant response to the nutrition stress. The proposed measurement method can also overcome limitations of traditional methods. This method has been tested and current research are associated with the use of this method in the field environment.

**Keywords:** precision agriculture, measurement, nitrogen content, impedance spectroscopy.

**1. Wstęp**

Nawożenie mineralne jest jednym z ważniejszych czynników decydujących o wzroście, rozwoju i plonowaniu roślin. Spośród powszechnie stosowanych składników pokarmowych dostarczanych roślinom w nawozach mineralnych za najbardziej plonotwórczy uznawany jest azot.

Nawożąc rośliny azotem, należy szczegółowo zapoznać się z zasadami jego stosowania, gdyż pierwiastek ten nie podlega sorpcji glebowej (za wyjątkiem sorpcji biologicznej) i jest łatwo wypłukiwany ze środowiska glebowego. Jednocześnie jego ilość w glebie musi być wystarczająca do zapewnienia prawidłowego żywienia roślin. Zjawisko to skłania rolników i ogrodników do stosowania dawek dzielonych azotu, których wielkość dostosowana jest do tempa wzrostu roślin.

Czynnikami decydującymi o wielkości poszczególnych dawek azotu są warunki klimatyczne takie jak opady i temperatura. Czynniki te w wyraźny sposób mogą modyfikować wielkość zaplanowanej dawki azotu decydują bowiem o tempie wzrostu roślin oraz wymywaniu azotu z gleby. Całkowite zapotrzebowanie na azot określane jest na podstawie przewidywanego plonu oraz zawartości azotu mineralnego w glebie. W praktyce rolniczej jedynie pierwsza dawka azotu stosowana jest w oparciu o tę zasadę. Kolejne dawki powinny ulegać znacznym modyfikacjom w zależności od zapotrzebowania roślin na ten składnik pokarmowy. Nadmiar azotu nie powoduje przyrostu plonu lecz w skrajnych przypadkach może doprowadzić do uszkodzenia roślin. Zbyt duża dawka powoduje zanieczyszczenie środowiska oraz zwiększa koszty uprawy.

Współcześnie w celu zapewnienia optymalnego nawożenia roślin stosuje się techniki z zakresu rolnictwa precyzyjnego. Rolnictwo precyzyjne (Precision Agriculture) jest to kierunek w rozwoju techniki rolniczej, wykorzystujący informacje z czujników oraz metody określania pozycji w przestrzeni, do celów takiego doboru metod uprawy, aby uwzględniona była przestrzenna i czasowa różnorodność biofizyczna roślin i gleby [6].

Decydującym czynnikiem umożliwiającym przeprowadzenie zabiegów związanych z nawożeniem w sposób dostosowany do zapotrzebowania roślin jest dostępność danych informujących o ich aktualnym zapotrzebowaniu na określone składniki mineralne.

Obecnie najczęściej stosowanymi metodami określania zapotrzebowania na składniki mineralne są metody należące do grupy metod off – line. Procedura pomiaru zapotrzebowania na składniki mineralne w tej metodzie polega na ręcznym pobraniu lub przy zastosowaniu specjalnych pojazdów próbek gleby lub roślin wraz z informacją o dokładnej lokalizacji przestrzennej każdej z pobieranych próbek. Do określenia położenia w przestrzeni wykorzystuje się odbiorniki nawigacji satelitarnej wraz z danymi ze stacjami korygujących DGPS (Differential GPS). Zebrane próbki przekazywane są do laboratorium, w którym określa się zawartość składników mineralnych. W przypadku prostych pomiarów analizę składu można dokonać na miejscu przy pomocy odpowiednich urządzeń przenośnych.

Dane o składzie poszczególnych próbek wraz z informacją o położeniu z jakiego zostały pobrane zostają wprowadzone do systemu informatycznego gospodarstwa. W systemie tym dzięki zastosowaniu oprogramowania umożliwiającego korzystanie z systemu GIS (Geographic Information Systems) opracowuje się mapę zasobności gleby.

Mapa zasobności gleby służy do analizy zapotrzebowania na poszczególne składniki mineralne i w kolejnym etapie jest przekształcana na polecenia dotyczące dawkowania nawozów mineralnych w określonych lokalizacjach i wprowadzona do komputera (Electronic Control Unit (ECU)) sterującego dawkowaniem nawozu w maszynie rolniczej. Maszyna na podstawie danych z zainstalowanego na niej odbiornika DGPS wysiewa dawkę nawozu mineralnego w ilości zgodnej z wartością znajdującą się w jej ECU w określonej lokalizacji.

Przedstawiona powyżej metoda określania dawki nawozu mineralnego charakteryzuje się dużą dokładnością jeżeli chodzi o określenie zasobności składników mineralnych (badanie składu gleby w wyspecjalizowanych laboratoriach). Wadą tego sposobu określenia zapotrzebowania na składniki mineralne jest duży koszt związany z pobraniem próbek, ich transportem oraz dokonywaniem analiz chemicznych.

W związku z dużą pracochłonnością i kosztami badania tego typu nie wykonywane są z dostateczną częstotliwością. Rolnicy najczęściej ograniczają się do jednokrotnych badań w ciągu rotacji plodozmianu (raz na cztery lata). Powoduje to niedostosowanie dawkowania nawozów mineralnych do aktualnych potrzeb roślin. W przypadku określania dawki azotu powyższa metoda nie odgrywa decydującej roli, gdyż zawartość azotu w glebie charakteryzuje duża zmienność w czasie.

Rozwiązaniem alternatywnym do metod pozyskiwania informacji o zawartości składników mineralnych w glebie metodą off-line jest stosowanie metod on – line. W metodach on – line maszyna dawkująca nawozy mineralne posiada odpowiednie czujniki pozwalające na pomiar zawartości składników mineralnych na bieżąco w trakcie przeprowadzania zabiegu. Układ sterownia maszyny potrafi w czasie rzeczywistym na podstawie wielkości pomiarowej obliczyć dawkę potrzebną roślinom i dawka ta jest dostarczana. Ten rodzaj pozyskiwania informacji o zawartości składników mineralnych jest szczególnie ważny w przypadku nawożenia azotem.

Metody pozyskiwania informacji o stanie uprawy w czasie rzeczywistym są dopiero opracowywane i trwają nad nimi intensywne badania.

W artykule zaprezentowano przegląd obecnie stosowanych metod on – line pomiaru zawartości składników mineralnych oraz przedstawiono opracowaną w Politechnice Koszalińskiej metodę pomiaru niedoboru składników mineralnych bazującą na pomiarze zmiany impedancji łodygi rośliny.

## 2. Metody monitorowania zawartości składników mineralnych w roślinach

Niedobór lub nadmiar składników pokarmowych wywiera wpływ na wzrost i rozwój roślin. Podstawowa metoda oceny stanu odżywienia roślin oparta jest o ocenę ich wyglądu zewnętrznego. Reakcja roślin na poszczególne składniki jest dość specyficzna i stosunkowo łatwa do interpretacji.

Niedobór azotu uwidacznia się jaśniejszym kolorem starszych liści i ich żółknięciem na końcach. Zjawisko to jest bezpośrednio związane z zawartością chlorofilu w tkankach roślinnych, który w roślinach poprawnie odżywionych azotem ma kolor intensywnie zielony. Zależność tą wykorzystuje się do bezinwazyjnych metod oceny zawartości azotu w roślinach.

Do pozyskiwania informacji o stanie uprawy najczęściej wykorzystuje się systemy umożliwiające przetwarzanie danych związanych z pomiarem odbicia lub transmisji wybranych częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego przeważnie w zakresie promieniowania widzialnego, ultrafioletu lub podczerwieni.

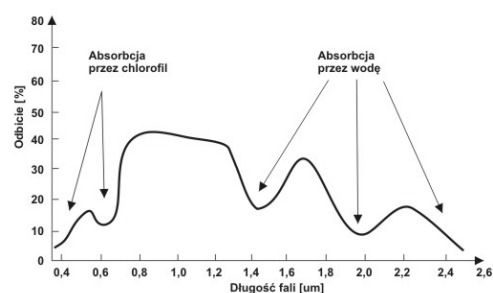
Promieniowanie elektromagnetyczne padające na roślinę częściowo zostaje zaabsorbowane i wykorzystane w procesach biochemicznych związanych z metabolizmem rośliny, częściowo powoduje wzrost temperatury liści i łodygi a częściowo zostaje odbite od powierzchni rośliny. Stosowane obecnie metody pomiaru zawartości składników mineralnych w roślinie oparte są na badaniu intensywności pochłaniania lub odbicia promieniowania elektromagnetycznego przez chlorofil.

Chlorofil, odpowiedzialny jest w roślinie za procesy związane z fotosyntezą. Do procesu fotosyntezy potrzebna jest energia zewnętrzna w postaci promieniowania elektromagnetycznego. Chlorofil pochłania promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie zbliżonym do zakresu VIS (od 400 nm do 700 nm) jednak intensywność absorpcji nie jest jednakowa w całym tym paśmie (rys. 1).

Absorpcja promieniowania jest bardziej intensywna w wybranych pasmach promieniowania a zakres częstotliwości tych pasm zależy od typu chlorofilu zawartego w liściach rośliny. Dla chlorofilu *a* pasma maksymalnej absorpcji promieniowania znajdują się wokół długości fal 430 nm oraz 660 nm. W przypadku chlorofilu *b* koncentracja absorpcji fotonów światła znajduje się wokół długości fal 450 nm oraz 640 nm.

Obecnie można wyróżnić dwa rodzaje metod pomiarowych wykorzystujących reakcję chlorofilu zawartego w liściach roślin na promieniowanie elektromagnetyczne.

Pierwszy rodzaj wykorzystuje intensywność pochłaniania wybranych kilku pasm częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego (metody multispektralne) lub całego pasma promieniowania VIS, NIR itd. (metody hyperspektralne).



Rys. 1. Intensywność pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego przez rośliny

Fig. 1. Intensity of electromagnetic radiation absorption by plants.

Drugi rodzaj metod wykorzystuje zjawisko fluorescencji chlorofilu w wybranych pasmach częstotliwości promieniowania. W metodach tych pobudza się chlorofil rośliny do reakcji na gwałtowną zmianę intensywności oświetlenia i analizuje się odpowiedź rośliny w postaci zjawiska fluorescencji (emisji promieniowania z powierzchni rośliny) [1].

W przypadku metod wykorzystujących pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego do najczęściej wykorzystywanych należą metody multispektralne. W metodach tych wykorzystuje się przeważnie pomiar intensywności odbicia światła w dwóch wybranych pasmach.

Na podstawie intensywności odbicia promieniowania elektromagnetycznego w wybranych pasmach opracowano szereg wskaźników opisujących zawartość chlorofilu w roślinach (tabela 1).

Stosowanie metod opartych o pomiary multispektralne mimo, że są to metody stosunkowo szybkie i łatwe do przeprowadzenia, napotyka na wiele problemów, szczególnie na etapie interpretacji uzyskanych wyników. Metody te bowiem badają intensywność wybarwienia chlorofilu.

Intensywność wybarwienia chlorofilu jest cechą odmianową, która ulega pewnym modyfikacjom w kolejnych sezonach wegetacyjnych oraz w zależności o aktualnej fazy wegetacji roślin, warunków pogodowych, stanu nawodnienia itd. [3, 4]. Należy w takiej sytuacji dostatecznie często dokonywać kalibracji urządzeń dostosowując je do cech odmianowych i wegetacyjnych roślin.

Obecnie na rynku dostępne są urządzenia umożliwiające pomiar zawartości azotu w roślinach na podstawie danych multispektralnych. Urządzenia te różnią się sposobem wykonania pomiaru i zależnościami wykorzystywanymi do określenia zawartości azotu w roślinach [4].

Systemy pomiarowe on – line zawartości azotu, które w chwili obecnej są najczęściej stosowane w warunkach polowych to: Yara N-Sensor, GreenSeeker oraz Crop Circle.

Czujnik Yara N-Sensor wykorzystuje skaner składający się ze spektrometrów umożliwiających analizę światła odbitego z powierzchni pola wynoszącej około 50 m<sup>2</sup>. Jako źródło promieniowania wykorzystuje się światło słoneczne lub oświetlenie ksenonowe zamontowane na czujniku (Active Light Source (ALS)).

Skaner służy do analizy odbitego od powierzchni roślin promieniowania w zakresie od 450 nm do 900 nm. Na podstawie pomiarów promieniowania odbitego od roślin oraz uwzględniając dane pochodzące ze skanera, który służy do pomiaru promieniowania otoczenia wyliczane są wskaźniki umożliwiające określenie optymalnej dawki nawozu.

Każdorazowo przed użyciem systemu Yara N-Sensor układ należy skalibrować na małym obszarze pola tak by wskaźniki określające intensywność wybarwienia chlorofilu pokrywały się z aktualnym zapotrzebowaniem na azot. Skaner ten jest montowany na dachu ciągnika i wraz z dostarczonym przez producenta układem wykonawczym umożliwia sterowanie procesem dawkowania azotu.

Zasada działania czujnika GreenSeeker oparta jest na pomiarze przy użyciu sensorów optycznych promieniowania elektromagnetycznego o długości 650 ± 10 nm oraz 770 ± 15 nm. Pomiar dokonywany jest na obszarze dużo mniejszym niż ma to miejsce w przypadku Yara N-Sensor (pomiar praktycznie punktowy). Badane pasma promieniowania pozwalają na wyznaczenie wskaźnika NDVI. W odróżnieniu od technologii zastosowanej w Yara N-Sensor, GreenSeeker posiada własne źródło promieniowania, które wysyła modulowany strumień światła. Promieniowanie po odbiciu od badanych roślin trafiają do detektora, w którym dokonywana jest filtracja pasmowa sygnału. Filtracja zapewnia usunięcie sygnałów pochodzących nie z modulowanego źródła. Dzięki tej operacji układ pomiarowy nie jest wrażliwy na sygnały pochodzące z innych źródeł promieniowania i możliwa jest tylko analiza tłumienia promieniowania wysyłanego z sensora.

Crop Circle działa na podobnej zasadzie jak czujnik GreenSeeker. Również w przypadku tego czujnika wykorzystywany jest modulowany sygnał. Analiza jest wykonywana w zakresie fal o długości 590 ± 5,5 nm oraz 880 ± 10 nm. W odróżnieniu od GreenSeekera Crop Circle pozwala na wyznaczenie wskaźnika Amber Normalised Difference Vegetation Index (ANDVI).

Tab. 1. Wybrane wskaźniki intensywności wybarwienia chlorofilu  
Tab. 1. Vegetation Indexes

Nazwa wskaźnika	Równanie opisujące wartość wskaźnika
Normalised Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\lambda(770) - \lambda(660)}{\lambda(770) + \lambda(660)}$
Amber Normalised Difference Vegetation Index	$ANDVI = \frac{\lambda(880) - \lambda(590)}{\lambda(880) + \lambda(590)}$

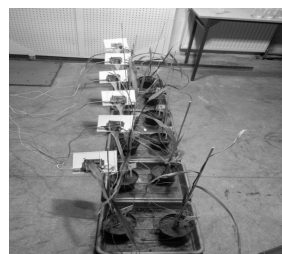
Stan chlorofilu można badać również za pomocą urządzeń określających właściwości fluorescencyjne chlorofilu z zastosowaniem promieniowania w zakresie UV. Metoda ta jest nowa, i na rynku nie ma praktycznie układów pozwalających na pomiar on – line z zastosowaniem tej technologii.

Interesującą alternatywą wobec wcześniej wymienionych metod pomiarowych jest zastosowanie czujników, które badają wpływ warunków zewnętrznych na zjawisko przewodzenia prądu wewnątrz rośliny.

Czynniki zewnętrzne takiej jak dostępność mineralnych składników pokarmowych, natężenie światła, dostępność wody, temperatura wpływają na procesy biochemiczne rośliny. Procesy te powodują zmianę takich właściwości w roślinach, jak zmiany: wartości pH, przepływu soków roślinnych, stężenia soków komórkowych, zmiany w strukturze komórkowej, zmiany potencjału membranowego i uwalnianie metabolitów.

Wszystkie te zmiany mają wpływ na zmianę właściwości elektrycznych rośliny takich jak przewodność i przenikalność tkanki roślinnej, stężenie jonów w soku komórkowym i inne. Tym samym stan roślin i ich odpowiedzi na bodźce zewnętrzne mogą być monitorowane przy zastosowaniu pomiarów właściwości elektrycznych roślin [2].

Spektrometria impedancyjna jest metodą powszechnie używaną do określenia właściwości elektrycznych substancji w wielu dziedzinach od medycyny do przetwórstwa spożywczego. W Politechnice Koszalińskiej został opracowany czujnik umożliwiający badanie zmian impedancji łodygi roślin dla różnych częstotliwości przepływu prądu [5]. Czujnik ten został laboratoryjnie przetestowany i potwierdzono możliwość zastosowania tej metody pomiarowej do badania zmian stężenia składników mineralnych wewnątrz łodygi rośliny. Obecnie trwają prace związane z przystosowaniem metody pomiarowej do zastosowania w warunkach polowych (rysunek 2).



Rys. 2. Stanowisko do badania czujników stężenia składników mineralnych w roślinie

Fig. 2. Test stand for testing mineral nutrient concentration in plant sensors

### 3. Podsumowanie

Przedstawione powyżej metody pomiarowe mają duże znaczenie praktyczne. Umożliwiają ocenę zawartości składników mineralnych w pojedynczych roślinach lub łąnie. Optymalizacja dawek nawożenia azotowego, po za korzyściami ekonomicznymi niesie za sobą wymierne skutki ekologiczne np. poprzez ograniczanie przenikania azotu poza zasięg systemu korzeniowego roślin i eutrofizację środowiska. Obecnie stosowane metody bazują na pomiarze natężenia odbitego promieniowania elektromagnetycznego w zakresie UV, VIS i NIR w celu określenia wybarwienia chlorofilu na powierzchni liści. Metody te wykazują jednak dużą zależność od wpływu na wybarwienie chlorofilu czynników związanych z właściwościami poszczególnych odmian roślin, pory roku, warunków pogodowych i innych. Alternatywnym rozwiązaniem może być zastosowanie czujnika opracowanego w Politechnice Koszalińskiej mierzącego stężenia składników mineralnych bezpośrednio w roślinie z zastosowaniem metod spektrometrii impedancyjnej.

### 4. Literatura

- [1] Baker, N. R., & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55(403).
- [2] Coster, H., Chilcott, T., & Coster, A. (1996). Impedance spectroscopy of interfaces, membranes and ultrastructures. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 40, 79–98.
- [3] Ruiz-Altisent, M., Ruiz-Garcia, L., Moreda, G. P., & Renfu, Lu. (2010). Sensors for product characterization and quality of specialty crops a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74, 176–194.
- [4] Samborski, S. M., Tremblay, N., & Fallon, E. (2009). Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agronomy Journal*, 101(4), 800–816.
- [5] Tomkiewicz D., Piskier T. (2012), A Plant Based Sensing Method for Nutrition Stress Monitoring, *Precision Agriculture*, Volume 13, Number 3 (2012).
- [6] Tomkiewicz D. (2010), Układy elektroniczne w maszynach i urządzeniach rolniczych, podręcznik akademicki pt. *Technologia prac maszynowych w rolnictwie ekologicznym*, pod redakcją Dulcet E., Fleszar J., Koszalin 2010.