

Jarosław PYTKA, Krystyna KONSTANKIEWICZ, Jarosław DĄBROWSKI

POLITECHNIKA LUBELSKA

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN W LUBLINIE

WOJSKOWY INSTYTUT TECHNIKI PANCERNEJ I SAMOCHODOWEJ W SULEJÓWKU

Metodyczne aspekty pomiarów naporu w materiałach rozdrobnionych**dr inż. Jarosław PYTKA**

Dr inż. Jarosław Pytka ukończył Politechnikę Lubelską w 1992 roku a dyplom magistra inżyniera uzyskał w specjalności Samochody i Ciągniki na Wydziale Mechanicznym. Stopień doktora nauk uzyskał w roku 1997 w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie. Od 1992 roku pracuje w Katedrze Pojazdów Samochodowych Politechniki Lubelskiej i zajmuje się zagadnieniami współpracy elementów jezdnych z nawierzchniami odkształcalnymi



e-mail: j.pytka@pollub.pl

dr inż. Jarosław DĄBROWSKI

Dr inż. ppłk Jarosław Dąbrowski ukończył Wojskową Akademię Techniczną uzyskując dyplom magistra inżyniera w specjalności Pojazdy Mechaniczne. Stopień doktora uzyskał w roku 2002 w Wojskowym Instytucie Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku, gdzie pełni funkcję Kierownika Zakładu Pojazdów Kołowych. Zajmuje się badaniami pojazdów wojskowych w aspekcie przejeźności i dostosowania do różnych warunków eksploatacji.



e-mail: zps@witpis.mil.gov.pl

prof. dr hab. Krystyna KONSTANKIEWICZ

Prof. dr hab. Krystyna Konstankiewicz ukończyła Wydział Mat-Fiz-Chem UMCS w Lublinie, uzyskując następnie stopień doktora, doktora habilitowanego oraz profesora nauk rolniczych. Aktualnie pełni funkcję Kierownika Zakładu Mikromechaniki i Struktury Biomateriałów w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie. Zajmuje się zagadnieniami zmian mikrostruktury materiałów rolniczych pod wpływem obciążeń zewnętrznych.



e-mail: konst@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie

Pomiary naporu w ośrodkach rozdrobnionych znajdują praktyczne zastosowanie w badaniach mechaniki gleb, gruntów, ziaren oraz materiałów sypkich. Specyfika tego rodzaju materiałów wymaga stosowania nietypowych metod pomiarowych. W referacie przedstawiono syntezę prowadzonych od lat wspólnych badań, w ramach których opracowano własne metody badawcze: przetworniki naporu, metody ich kalibracji, procedury pomiarowe. Przedstawiono opisy tych metod. Zamieszczono również przykładowe wyniki, uzyskane w ramach realizacji licznych projektów badawczych.

Słowa kluczowe: Czujniki naporu, materiały rozdrobnione, metody pomiaru.

Some methodological aspects of stress measurements in granular materials**Abstract**

Measurements of stresses in granular materials are of practical importance in soil, grains and powders mechanics. Those materials require special measuring methods and sensors. The paper presents a synthesis of authors' research on this field. Measuring methods, transducers, their calibration and procedures are presented and described in the work. Sample results obtained in numerous research projects.

Keywords: Pressure transducers, granular materials, measuring methods

1. Wprowadzenie

W badaniach mechaniki ośrodków rozdrobnionych istotne jest określenie tzw. równań konstytutywnych, czyli zależności pomiędzy odkształceniem a naprężeniem. Modelowanie tego typu ośrodków jest zadaniem trudnym, głównie ze względu na skomplikowaną budowę strukturalną, wielofazowość i zmienność

własności mechanicznych, np. na skutek zmian wilgotności. Parametryzacja i weryfikacja modeli ośrodków rozdrobnionych możliwa jest na podstawie wyników pomiarów naporu ośrodkach poddanych działaniu obciążeń zewnętrznych.

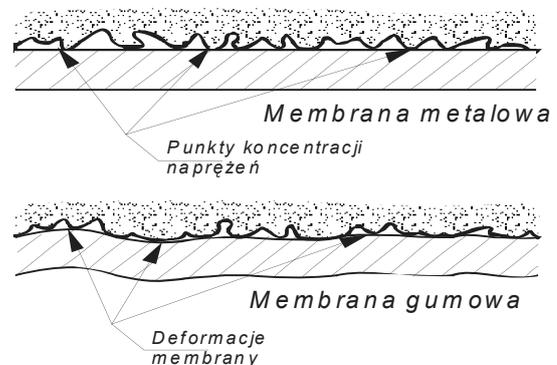
Celem pracy jest syntetyczne ujęcie własnych doświadczeń zakresu pomiarów naporu i przedstawienie najważniejszych wniosków wynikających z przeprowadzonych badań.

2. Czujniki naporu

W pomiarach naporu stosuje się różnego rodzaju czujniki, przy czym jako najczęściej stosowane wyróżnia się następujące:

- czujniki membranowe, w których przetwornik (tensometr, piezoelement) przytwierdzony jest do membrany sprężystej, na którą bezpośrednio oddziałuje napór badanego materiału;
- czujniki hydrauliczne, w których przetwornik mierzy zmiany ciśnienia cieczy roboczej, zamkniętej w hermetycznym układzie, a powierzchnia czynna pozostająca w kontakcie z badanym ośrodkiem podlega odkształceniom wywołanym naporem badanego materiału;
- inne konstrukcje czujników, w tym czujniki z układem struny drgającej, czujniki pneumatyczne.

Odmienność w funkcjonowaniu czujników membranowych i hydraulicznych wynika z różnicy sztywności membrany i powłoki gumowej. Pokazano to na rysunku 1.



Rys. 1. Różnice w funkcjonowaniu czujników naporu z różnymi membranami
Fig. 1. Differences in pressure transducers functions for two various membranes

W praktyce objawia się to zawyżaniem wyników pomiarów w przypadku czujników membranowych i zaniżaniem dla czujników hydraulicznych.

W literaturze zastosowanie powyżej opisanych czujników jest dobrze udokumentowane [1-7], m.in. w następujących badaniach :

- pomiary naporu w gruntach i glebach pod kołami jadących pojazdów i maszyn w celu opisu wzajemnego oddziaływania w układzie koło – podłoże odkształcalne;
- pomiary naporu w gruntach w warunkach statycznego obciążenia od konstrukcji budowlanych oraz drogowo-mostowych w celu opisu procesu osiadania gruntu i jego wpływu na statykę obiektów;
- pomiary naporu w złożach ziaren w silosach w celu określenia obciążeń konstrukcji zbiorników.

2.1 Czujniki membranowe

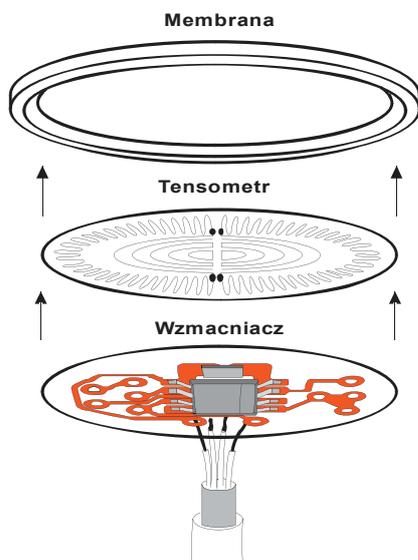
W badaniach prowadzonych przez autorów stosowano zarówno czujniki membranowe jak i hydrauliczne. Na podstawie doświadczeń własnych stwierdzono, iż czujniki membranowe posiadają przewagę nad hydraulicznymi, co można uzasadnić następująco:

- prostsza konstrukcja;
- łatwiejsza obsługa, zwłaszcza w warunkach pomiarów terenowych;
- brak konieczności napełniania cieczą i utrzymywania szczelności układu hydraulicznego;
- brak wrażliwości na zmiany położenia pionowego (zmiany ciśnienia hydrostatycznego w układzie hydraulicznym powodują zmiany sygnałów wyjściowych);
- znacznie wyższa odporność mechaniczna elementów współpracujących z badanym ośrodkiem;
- wyższy zakres górny mierzonych naporów.

Powyższe zalety sprawiły, że w opinii autorów czujniki membranowe są lepsze w opisywanych zastosowaniach i dlatego w artykule przedstawione będą wyniki badań z ich zastosowaniem.

Czujnik membranowy konstrukcji Pytki [8] składa się z membrany, przetwornika tensometrycznego oraz zintegrowanego układu wzmacniającego (rys.2). Zlokalizowanie wzmacniacza tensometrycznego w bezpośredniej bliskości przetwornika posiada następujące zalety:

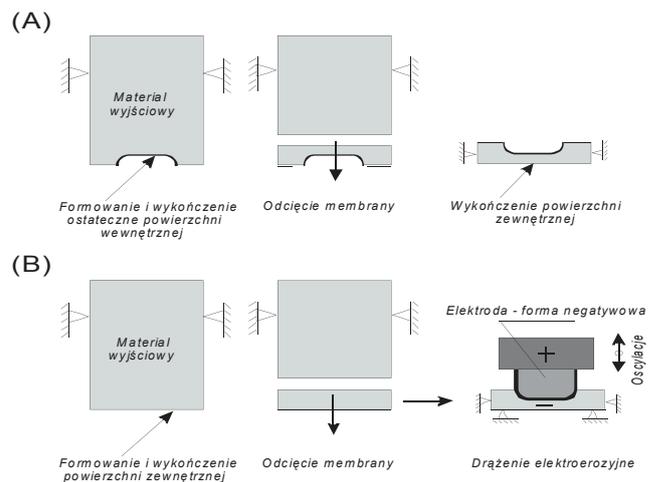
- eliminacja zakłóceń występujących na długich przewodach sygnałowych;
- zasilanie tensometru prądem stałym;
- uproszczone rozwiązanie wzmacniacza (układ o zasilaniu jednostronnym);
- mniejsza liczba przewodów łączących czujnik z układem akwizycji;
- znaczne uproszczenie układu pomiarowego.



Rys. 2. Schemat konstrukcji membranowego czujnika naporu
Fig. 2. A schematic of strain gage stress transducer

Zasadniczym elementem czujnika jest membrana, podparta pierścieniowo na obwodzie. Stanowi ona jednocześnie korpus, na którym mocowany jest wzmacniacz sygnałowy. Tensometr w układzie pełnego mostka klejony jest na wewnętrzną powierzchnię membrany. W technologii membran stosowano trzy rodzajem materiałów: duraluminium PA9, utwardzane dyspersyjnie i anodowane, stal 25 oraz tytan Ti5. Spośród wymienionych, najkorzystniejsze właściwości przy akceptowalnej niskiej cenie posiada duraluminium. Bardzo dobre właściwości zmęczeniowe tytanu stanowią ważną zaletę tego materiału w przypadku pomiarów dynamicznych, lecz trudności w uzyskaniu i wysoka cena materiału, a także problemy obróbkowe przesadzają o wyborze duraluminium.

Technologia wykonania membran powinna zapewnić wymagane parametry geometrii membrany: odchyłka wymiaru grubości membrany w granicach +/- 10µm, wskaźnik stanu powierzchni $R_A = 0,32$. W badaniach stosowano czujniki o trzech różnych wymiarach średnicy membrany: 10, 20 i 30 mm. Dla czujników 20 i 30 mm membrany posiadały grubość od 0,6 do 1,0 mm i wykonywano w technologii obróbki ubytkowej (rys.3A). W przypadku najmniejszych czujników, przeznaczonych do pomiarów naporu w śniegu, membrany posiadały grubość 0,3 mm ze względu na założony niski zakres pomiarowy (do 50 kPa). Tak cienkie i delikatne membrany były niewykonalne w technologii klasycznej, stąd zastosowano obróbkę drążenia elektroerozyjnego (rys.3B).



Rys. 3. Technologie wykonania membran czujników: (A) membrany grubościennych, (B) membrany cienkościennych
Fig. 3. Technology of the membranes (A) thick membranes, (B) thin membranes

Na fotografii (rys.4) przedstawiono przykładowy membranowy czujnik naporu do badań materiałów rozdrobnionych (awers i rewers).



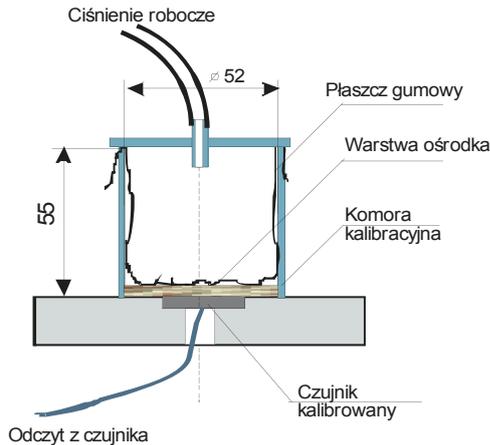
Rys. 4. Przykładowy czujnik naporu do pomiarów w materiałach rozdrobnionych
Fig. 4. A strain gage transducer for stress measurements in granular materials

Określenie grubości membrany jako podstawowego parametru przeprowadzono z wykorzystaniem poniższego wzoru [9]:

$$g = \sqrt{0,75PR_0 \frac{1-\nu^2}{e_0 E}} \quad (1)$$

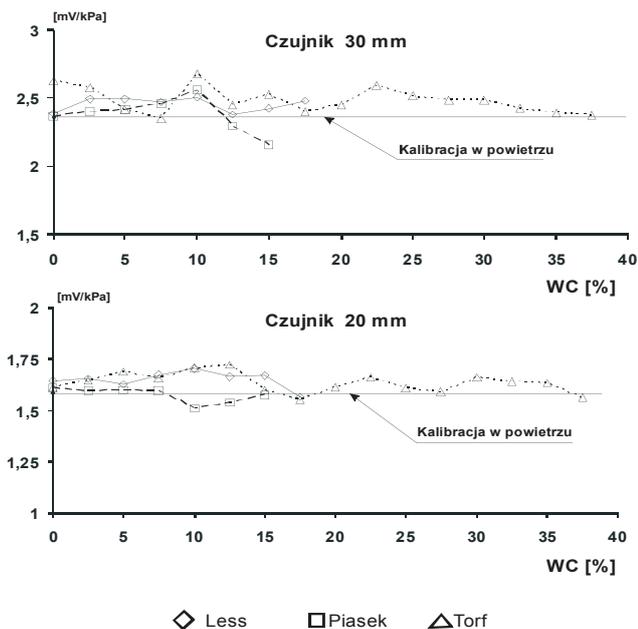
gdzie: g – grubość membrany [mm], P – napór zakładany [kPa], R_0 – promień membrany [mm], ν – współczynnik Poissona (dla duralu 0,285), e_0 – całkowity zakres odpowiedzi czujnika, E – moduł Younga (dla duralu 70 GPa).

Kalibrację czujników przeprowadza się na specjalizowanym stanowisku (rys.5). Opis stanowiska zawarto w publikacji [10].



Rys. 5. Stanowisko do kalibracji czujników naporu
Fig. 5. A test stand for calibration of strain gage transducers

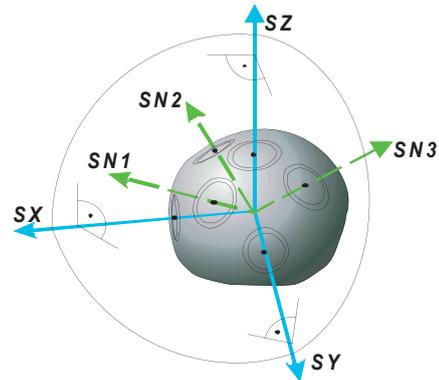
Opracowana metoda kalibracji pozwala wzorcować czujniki z użyciem docelowego materiału badanego. Oddziaływanie na czujnik następuje poprzez cienką warstwę ośrodka (ok. 3-5 mm), dzięki czemu wyjściowa charakterystyka czujnika uwzględnia specyficzne oddziaływania na styku czujnik – ośrodek. Na kolejnym rysunku pokazano wyniki kalibracji dla dwóch czujników 20 i 30 mm przeprowadzonych z użyciem trzech różnych materiałów (less, piasek i torf) przy różnej wilgotności.



Rys. 6. Wyniki kalibracji czujników 20 i 30 mm z użyciem trzech różnych materiałów gruntowych
Fig. 6. Calibrations results for two transducers 20 and 30 mm tests with the use of three different soils

3. Zastosowanie czujników naporu w praktyce badawczej

Głowica trójosiowa SST (Stress State Transducer) umożliwia pomiar sześciu napórów koniecznych do wyznaczenia (obliczenia) składowych stanu naprężenia w punkcie ośrodka [4]. W głowicach używanych przez autorów zastosowano powyżej opisane czujniki membranowe, przy czym każda głowica składa się z sześciu czujników o zbliżonych parametrach (zakres, charakterystyka kalibracyjna, itd.). Głowicę SST oraz jej schemat pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat i widok głowicy SST
Fig. 7. A schematic of the SST

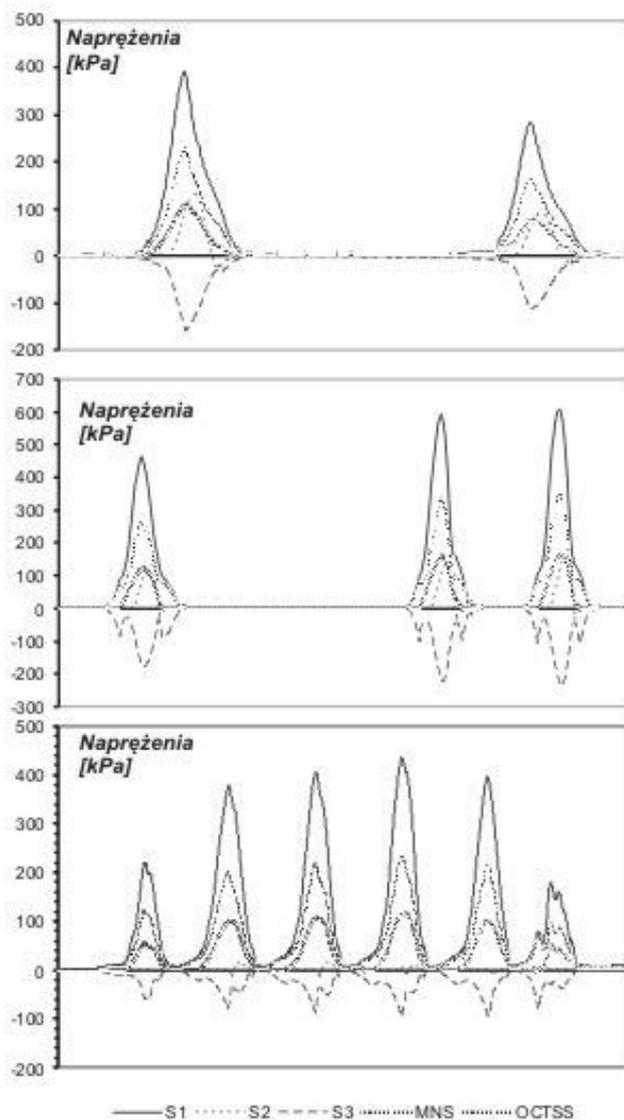
Czujniki zainstalowane w głowicy są połączone z układem rejestracji sygnałów za pośrednictwem wielożyłowego przewodu w ekranie. Głowica może być umieszczana na dowolnej głębokości w gruncie, przy czym metoda umieszczenia głowicy jest różna dla różnych rodzajów badanych materiałów. Generalnie umieszczenie głowicy na wybranej głębokości pomiarowej powoduje zniszczenie struktury gruntu, co wpływa znacząco na wyniki pomiarów. Dlatego też opracowano własne procedury umieszczania głowicy SST.

Najprostsza metoda poprzez wykopanie kanału pionowego, następnie umieszczenie głowicy i zasypanie gruntem z wykopu może być stosowana w gruntach piaszczystych. Tego rodzaju grunty nie tworzą stałej struktury i takie zabiegi nie wpływają na ich własności mechaniczne, przynajmniej nie na tyle, by mogło to powodować znaczące błędy pomiarowe. W przypadku gruntu lessowego, który tworzy strukturę o pewnej wytrzymałości, zaproponowano podobną metodę, lecz dodatkowo stosowane jest opóźnienie czasowe pomiaru po umieszczeniu i zasypaniu głowicy. Na podstawie literatury i badań własnych autorzy stwierdzili, że efekt czasowego wzmocnienia gleb i gruntów jest odczuwalny już po 3 godzinach, zaś po ok. 9-12 godzinach gleba wraca do pierwotnego stanu pod względem własności mechanicznych. Zalecany optymalny czas wynosi zatem ok. 6 godzin. Trzeci rodzaj gruntów badanych przez autorów, torf, wymaga innej metody instalowania głowicy przed pomiarem. Ze względu na dość silne wiązanie włókien oraz obecność korzeni i innych części roślin w torfie, nie jest możliwe wykonanie kanału pionowego i zsypanie go odspojonym gruntem be całkowitego

zniszczenia struktury. Dlatego też, zastosowano metodę polegającą na wycinaniu prostopadłościanu o wymiarach poziomych ok. 30x30 cm i wysokości równej zakładanej głębokości pomiaru, po czym następuje umieszczenie głowicy i przykrycie jej wyciętym gruntem. Tą metodę stosuje się również w przypadku innych niż torfowe grunty, gdy są one silnie ukorzenione lub zadarnione. Przedstawione powyżej metody zostały wielokrotnie sprawdzone i przetestowane w praktyce.

4. Przykładowe wyniki

Na poniższych wykresach przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów przeprowadzonych z użyciem opisanej w artykule metodyki.



Rys. 8. Przykładowe wyniki doświadczeń terenowych. Składowe stanu naprężeń w gruncie pod obciążeniem dwuosiowego pojazdu kołowego (graf górny), trójosiowego pojazdu kołowego (graf środkowy) i pojazdu gąsienicowego (graf dolny) Oznaczenia: S1, S2, S3 – naprężenia główne, MNS – średnie naprężenie normalne, OCTSS – naprężenie ścinające w układzie oktaedrycznym.

Fig. 8. Sample results from field experiments. Stress state components under loading of two axle wheeled vehicle (top), three axle wheeled vehicle (center) and a tracked vehicle (bottom). S1, S2, S3 – principal stresses, MNS – mean normal stress, OCTSS – octahedral shear stress.

Prezentowane wyniki zaczerpnięto z publikacji autorów referatu [11-16], w których zawarte są szczegółowe informacje z zakresu warunków badań, dane pojazdów badawczych oraz analiza i dyskusja wyników. Przedstawione grafy stanowią przykłady możliwych do uzyskania wyników w zakresie pomiarów naporu i wyznaczania składowych stanu naprężeń w

gruntach i glebach pod obciążeniem kół. Jest to jeden z wielu przykładów praktycznego wykorzystania prezentowanej metody.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodykę pomiarów naprężeń w ośrodkach rozdrobnionych, wraz z opisem stosowanych czujników, metod kalibracji oraz umieszczania czujników w ośrodkach badanych. Opisano najistotniejsze problemy metodyczne występujące w badaniach z tego zakresu oraz pokazano rozwiązania autorów. Jako najodpowiedniejsze do pomiarów naporu w badanych ośrodkach rozdrobnionych uznano czujniki membranowe z tensometrami elektrooporowymi. Przedstawiono konstrukcję własną takiego czujnika. Opisano również własne rozwiązania w zakresie kalibracji czujników, według którego kalibracja może odbywać się z użyciem cienkiej warstwy materiału badanego w celu tak, by uwzględnić wpływ rodzaju i stanu materiału na wyniki wzorcowania. Opisano również stosowane metody umieszczania czujników w ośrodkach gruntowych do pomiarów naporu pod kołami pojazdów. Przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane w doświadczeniach terenowych z użyciem opisanej metodyki badawczej.

6. Literatura

- [1] S. Kobiela: Przyrządy i metodyka pomiarów parcia materiałów rozdrobnionych w zbiornikach. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Seria Monografie, Nr, 1990
- [2] P.S. Balckwell, B.D. Soane: Deformable spherical device to measure stresses within field solids. *J.of Terramechanics*, 15(4), pp. 207-222
- [3] R. Horn, M. Lebert: Soil compactibility and compressibility. In: *Soil compaction in crop production*, Elsevier Press, Amsterdam 1994, pp.41-96
- [4] A.C. Bailey, A. Nichols, C.E. Johnson: A stress state transducer for soil. *Transaction of the ASAE*, 1987, No. 30, 1237-1241
- [5] H.D. Harris, D.M. Bakker: A soil stress transducer for measuring in situ soil stresses. *Soil & Tillage Research*, 29, 1994, pp. 35-48
- [6] B.P. Verma, A.C. Bailey, R.L. Schafer, J.G. Futral: A pressure transducer in soil compaction study. *Transactions of the ASAE*, 1976, pp.442 – 447
- [7] A.W. Cooper, G.E. Vanden Berg, H.F. McColly, A.E. Erickson: Strain gage cell measures soil stresses. *Agricultural Engineering*, April 1957, pp. 232 – 235
- [8] J. Pytka, K. Konstankiewicz: Metody wyznaczania naprężeń i przemieszczeń w glebie. *Acta Agrophysica* Nr 14, 1998, Wyd. Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie
- [9] Vishay Measurements Group, Inc., The Technical Staff of: Technical Note TN 510
- [10] J. Pytka, R. Rusinek, K. Konstankiewicz, M. Molenda: Wzorcowanie czujników naporu w materiałach rozdrobnionych. *Kongres Metrologii Politechnika Wroclawska*, 6-9 IX 2004
- [11] J. Pytka, J. Dąbrowski: Determination of the stress-strain relationship for sandy soil in field experiments. *Journal of Terramechanics*, 38, 2001 pp.185-200
- [12] J. Pytka, K. Konstankiewicz: A new optical method for soil stress and strain investigation. *Soil & Tillage Research*, 65, 2002, 243-251
- [13] J. Pytka, P. Tarkowski, J. Dąbrowski, S. Bartler, M. Kalinowski, K. Konstankiewicz, P. Pytka: Soil stress and deformation determination under a landing airplane on an unsurfaced airfield. *Journal of Terramechanics*, 40 (2004), 255 – 269
- [14] J. Pytka: Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. *Soil & Tillage Research* 82 (2005), pp. 77-88
- [15] J. Dąbrowski, J. Pytka, P. Tarkowski, M. Zajac: Advantages of all-season versus snow tyres for off-road traction and soil stresses. *Journal of Terramechanics*, 43 (2006), pp.163 - 175
- [16] J. Pytka, J. Dąbrowski, M. Zajac, P. Tarkowski: Effects of reduced inflation pressure and vehicle loading on off-road traction and soil stress and deformation state. *Journal of Terramechanics*, 43 (2006), pp. 469-485