Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie

ACTA AGROPHYSICA

14

Jarosław Pytka, Krystyna Konstankiewicz

METODY WYZNACZANIA NAPRĘŻEŃ I PRZEMIESZCZEŃ W GLEBIE POD OBCIĄŻENIEM

Lublin 1998

Komitet redakcyjny
prof. dr hab. Jan Gliński, czł. koresp. PAN
prof. dr hab. Krystyna Konstankiewicz
doc. dr hab. Ryszard Dębicki

Opiniował do druku
dr hab. inż. Jan Bronisław Dawidowski

Adres redakcji
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27
tel. (0-81) 744-50-61

Publikacja indeksowana przez
Polish Scientific Journals Contents - Agric. & Biol. Sci.
w sieci Internet pod adresem http://saturn.ci.uw.edu.pl/psjc/
lub http://ciuw.warman.net.pl/alf/psjc/

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr PB 7T07C 03313
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1997-1998

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 1998

ISBN 83-87385-15-8
ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 100 egz. Ark. wyd. 6,78
Skład komputerowy: inż. Maciej Zaczek
Druk: "Tekst", ul. 1 Maja 51, 20-410 Lublin

WSTĘP 5

1. PRZEGLĄD METOD DOŚWIADCZALNYCH
W BADANIACH STANU NAPRĘŻEŃ I PRZEMIESZCZEŃ W GLEBIE 8

2. PRZETWORNIK STANU NAPRĘŻEŃ W GLEBIE ORAZ SYSTEM
DO WYZNACZANIA PRZEMIESZCZEŃ 17
2.1 Wprowadzenie 17
2.2 Metodyka badawcza 18
2.3 Materiał badawczy 23
2.4 Wyniki badań z komentarzem 24
2.5 Podsumowanie 35

3. SYSTEM POMIAROWY DO WYZNACZANIA STANU NAPRĘŻEŃ
I PRZEMIESZCZEŃ W GLEBIE W UKŁADZIE PRZESTRZENNYM 36
3.1 Wprowadzenie 36
3.2 Metodyka badawcza 36
3.3 Głowica trójosiowa. 38
3.4 Konstrukcja przetworników ciśnienia. 40
3.5 Kalibracja czujników tensometrycznych 43
3.6 Układ kondycjonowania sygnałów pomiarowych 45
3.7 Laserowy system rejestracji przemieszczeń. 48
3.8 Materiał badawczy 48
3.9 Wyniki badań z komentarzami 51
3.10 Podsumowanie 53

4. SYSTEM POMIAROWY DO BADAŃ STANU NAPRĘŻEŃ
I ODKSZTAŁCEŃ POD KOŁAMI POJAZDÓW 55
4.1 Wprowadzenie 55
4.2 Metodyka badawcza 56
4.3 Koncepcja polowego stanowiska badawczego. 57
4.4 Mechatroniczny przetwornik naprężenia w glebie 58

4.5 Konstrukcja systemu pomiarowego przemieszczeń i odkształceń w glebie 62
4.6 Układ rejestracji obrazu, sterowania i akwizycji danych pomiarowych 63
4.7 Przygotowanie eksperymentów polowych 66
4.8 Przykładowe zastosowania w polowych badaniach naprężeń i odkształceń w glebie pod kołami pojazdów mechanicznych 68

5. SYSTEM POMIAROWY DO WYZNACZANIA NAPRĘŻEŃ I PRZEMIESZCZEŃ W GLEBIE Z ZASTOSOWANIEM MINICZUJNIKÓW I TECHNIKI ŚWIATŁOWODOWEJ 70
5.1 Wprowadzenie 70
5.2 Budowa i zasada działania czujnika do pomiaru ciśnienia w glebie 71
5.3 Kalibracja czujników ciśnienia z cieczą pośredniczącą 74
5.4. Budowa i zasada działania systemu do wyznaczania przemieszczeń w glebie 74
5.5. Zastosowanie miniczujników do badań laboratoryjnych i polowych 77
5.5. Podsumowanie 80

PROJEKTY PRZYSZŁOŚCI 81
1. Zastosowanie nanotechnologii w badaniach mechaniki gleb 82
2. Przetwornik trójosiowy do wyznaczania złożonego stanu naprężeń i przemieszczeń globalnych i lokalnych w glebie. Metoda inercjalna w połączeniu z telemetrią. 85
3. Metoda badań mikromechaniki procesu zagęszczania gleby 86
Podsumowanie. 89

Literatura 90

Summary 94

WSTĘP

Dynamiczny rozwój techniki, którego efekty obserwujemy i wykorzystujemy w każdej nieomal dziedzinie życia powoduje, że dzisiejsze rolnictwo przeżywa ewolucyjne zmiany i przede wszystkim podnosi się poziom mechanizacji prac polowych. Wysokie wymagania wydajności zmuszają do stosowania maszyn we wszystkich niemal rodzajach prac polowych, począwszy od przygotowania gleby, nawożenia, prac opryskowych aż po zbiory. Taki stan rzeczy sprawia, iż gleba, naturalny materiał o dużym stopniu rozdrobnienia, niskiej wytrzymałości mechanicznej i szczególnie dużej podatności na zagęszczanie, staje się podłożem trakcyjnym pojazdów uczestniczących w pracach polowych. Elementy jezdne wymagają określonych wartości naprężeń stycznych i nośności w celu uzyskania pożądanej siły trakcyjnej. Podstawowy problem polega na sprzeczności: z jednej strony oczekuje się luźnej struktury ośrodka glebowego, niskiego zagęszczenia i odpowiedniej wilgotności, z drugiej zaś strony optymalne podłoże trakcyjne cechuje duże zagęszczenie oraz możliwie niski poziom wilgotności. Co więcej, na ironię, prace polowe zmierzające do poprawienia stanu gleby, powodują obniżenie jej własności trakcyjnych i odwrotnie, korzystny stan podłoża trakcyjnego oznacza zawsze pogorszenie warunków wzrostu roślin. Niski poziom plonów może być skutkiem zagęszczenia gleby, ale także może być efektem niskiej sprawności prac polowych prowadzonych w warunkach wysokiej wilgotności gleby. Istnieje wiele zaleceń dla użytkowników ciągników i maszyn rolniczych, prowadzących do optymalizacji ich ruchu na podłożu naturalnym:

- stosowanie lekkich ciągników i maszyn - przeszkodą mogą być wymagania intensywności prac polowych, które pociągają za sobą konieczność stosowania odpowiednio mocnych a więc i ciężkich maszyn;

- stosowanie opon niskociśnieniowych, kół bliźniaczych, układów wieloosiowych - takie rozwiązania obniżają trakcyjne własności pojazdów w przypadku ruchu po drodze twardej, przez co zmniejszona jest ich uniwersalność;

- grupowanie prac agrotechnicznych i stosowanie agregatów wieloczynnościowych - często trudne do realizacji w praktyce ze względu na niską dostępność tego typu urządzeń;

Osobno można wyróżnić zadania jakie stoją przed konstruktorami pojazdów i maszyn dla rolnictwa:

- konstrukcje nowych rozwiązań opon, umożliwiających uzyskanie powiększonej powierzchni czynnego kontaktu z glebą oraz nowych rozwiązań bieżnika, którego zadaniem jest uzyskanie odpowiedniej wartości siły jazdy;

- konstrukcje agregatów, także niekonwencjonalne, których ruch jest realizowany bez kontaktu koła z glebą (szerokie ramy-suwnice), stosowanie agrolotnictwa, szczególnie do oprysków.

Wymienione powyżej zalecenia nie czynią zadość stawianym wymaganiom, co więcej ich stosowalność jest niejednokrotnie ograniczona. Skłania to do stwierdzenia, iż badania o charakterze podstawowym są w tej dziedzinie wielce uzasadnione, tym bardziej, że nie istnieje do dziś spójna teoria opisująca mechanikę procesu obciążania i odkształcania ośrodka glebowego.

Analiza prac badawczych prowadzonych od lat wykazuje duże trudności metodyczne przeprowadzania jednoczesnych pomiarów ciśnień i przemieszczeń w glebie pod kołami pojazdu mechanicznego. Budowa systemu pomiarowego do badań tego typu jest zadaniem trudnym, tym bardziej, że w grę wchodzi urządzenie wielokanałowe, o dużej częstości i dokładności pomiaru, a zarazem odporne na występujące w środowisku glebowym czynniki zewnętrzne (wilgotność, pył, możliwe udary mechaniczne). Zasadniczą trudność sprawia sam proces przeprowadzenia pomiaru, ściślej, wprowadzanie przetworników do badanego ośrodka. Winno się to odbywać przy minimalnym zakłóceniu i uszkodzeniu struktury gleby.

W pracy dokonano wyboru metody badawczej do wyznaczania stanu naprężeń i przemieszczeń w glebie pod obciążeniem oraz zrealizowano urządzenia badawczo-pomiarowe z zastosowaniem licznych rozwiązań autorskich, między innymi unikalna konstrukcją przetworników ciśnienia w glebie. Przeprowadzono badania stanu naprężeń i odkształceń w glebie pod obciążeniem z różnym sposobem oddziaływania: ustalona siła

nacisku oraz prędkość narastania. Wyniki tych badań potwierdziły zależność stanu naprężeń i odkształceń od czasu oraz parametrów procesu obciążania. Doświadczenia wykazały, że zbudowana aparatura spełnia postawione wymagania dotyczące dokładności pomiaru, obsługi i eksploatacji oraz odporności na warunki zewnętrzne.

Praktyczne zastosowanie otrzymanych wyników nie ogranicza się tylko do rozwiązania problemu optymalnego doboru warunków prac polowych. Stanowi bowiem doświadczalną weryfikację przyjętej metody badawczej jak również test zastosowanych rozwiązań technicznych. Skonstruowane przetworniki posiadają zdecydowane zalety w porównaniu do innych konstrukcji: prostota toru pomiarowego, poręczność użycia, szczególnie w warunkach polowych, odporność na udary mechaniczne, wilgoć, pył.

Istnieją również możliwości zastosowania wyników przeprowadzonych badań do wyznaczania trakcyjnych własności gleby a także do opracowania wytycznych konstrukcyjnych przy projektowaniu pojazdów terenowych: optymalizacja konstrukcji ich układów jezdnych oraz osiągów trakcyjnych.

W pracy autorzy po dokonaniu w Rozdziale 1 przeglądu dotychczasowych metod wyznaczania stanu naprężeń i przemieszczeń pod obciążeniem, przedstawiają wyniki własnych prac konstrukcyjnych i badawczych. Metodyka badawcza wyznaczania stanu naprężeń i przemieszczeń w glebie pod obciążeniem prezentowana jest w Rozdziale 2 Opisano rozwiązania aparatury badawczej a także przedstawiono i omówiono wyniki przeprowadzonych eksperymentów. W Rozdziale 3 zaprezentowano system pomiarowy do wyznaczania naprężeń i przemieszczeń w układzie przestrzennym oraz metodykę badawczą z uwzględnieniem licznych rozwiązań autorskich, rozszerzających możliwości aparatury pomiarowej o funkcję jednoczesnego pomiaru przemieszczeń. W Rozdziale 4 prezentowana jest polowa wersja stanowiska z głowicą trójosiową i optycznym układem rejestracji przemieszczeń i odkształceń. W pracy zamieszczono również najnowsze stanowisko do badań naprężeń i przemieszczeń w glebie uwzględniające opracowania autorskie Instytutu Agrofizyki PAN. Rozdział ostatni zawiera opisy wdrażanych metod pomiarowych, będących w fazie prób lub w trakcie projektowania. Przedstawione są również założenia dalszych prac badawczych.

1. PRZEGLĄD METOD DOŚWIADCZALNYCH W BADANIACH STANU NAPRĘŻEŃ I PRZEMIESZCZEŃ W GLEBIE

Badania naprężeń i odkształceń w ośrodkach glebowych poddanych działaniu sił zewnętrznych wymagają specjalistycznych metod pomiarowych głównie ze względu na właściwości badanego materiału. Wyznaczanie naprężeń i odkształceń w glebie jest możliwy za pomocą czujników, których konstrukcja pozwala na umieszczanie ich w dowolnym punkcie obiektu. Czujniki takie powinny zapewniać optymalny kontakt z cząstkami ośrodka przy uwzględnieniu rozkładu agregatowego i granulometrycznego badanej gleby, jej wilgotności i gęstości objętościowej. Wymiary przetworników winny być możliwe małe, szczególnie wówczas, gdy celem badań jest badanie wartości naprężeń w punktach ośrodka. Wymagane jest ponadto, by metodyka wprowadzania czujników i umieszczania ich w zakładanych punktach pomiarowych nie powodowała uszkodzeń struktury ośrodka badanego, które mogłyby znacząco wpływać na przebieg i wyniki pomiarów [19]. Powyższe uwarunkowania dotyczą szczególnie gleb agregatowych, w przypadku których struktura wpływa zasadniczo na ich mechaniczne właściwości, w odróżnieniu od gleb piaszczystych, dla których uszkodzenia powodowane instalacją czujników są mało znaczące [16, 21, 23, 41].

W ogólności czujnik naprężenia w glebie jest ciałem obcym o sztywności różnej od cząstek gleby. W przypadku, gdy membrana czujnika wykonana jest z materiału o większej sztywności niż gleba, otrzymamy wartości naprężeń wyższe od rzeczywistych. Czujnik taki charakteryzuje się wyższym progiem czułości a w trakcie pomiarów występować może zjawisko koncentracji naprężeń. W drugim przypadku, gdy membrana jest bardziej podatna niż gleba badana, wyniki pomiarów będą niższe od wartości rzeczywistych [19]. Membrana podatna zapewnia optymalny kontakt z cząstkami gleby badanej oraz niski próg czułości. Charakterystyki kalibracyjne obu typów czujników zależą głównie od parametrów konstrukcyjnych oraz użytych materiałów. W przeważającej większości w czujnikach naprężeń w glebach stosuje się czujniki z membranami odkształcalnymi, przy czym deformacje membrany mogą mieć charakter plastyczny lub sprężysty. Membrany plastyczne to przede wszystkim cylindry, kule lub

dyski wykonane z gumy, kauczuku lub silikonu, pracujące w układzie pneumatycznym lub hydraulicznym. Czujnik z membraną o plastycznym charakterze ugięcia mierzy średnie naprężenie normalne, pomiar naprężenia stycznego nie jest możliwy.

Zmianom ulegały stosowane materiały, z których wykonywano membrany: pneumatyczny czujnik Koglera z 1933 roku posiadał membranę gumową, na membrany czujników hydraulicznych stosowano gumę [7], silikon [45] lub stal [13]. Czujniki tego typu napełniano cieczą (woda, rzadki olej) lub powietrzem i wywoływano wstępne ciśnienie wewnętrzne (rzędu 100 kPa) przed osadzeniem w glebie. Miało to znaczący wpływ na charakterystykę czujnika oraz na mierzone wartości ciśnienia. Teoretycznie elastyczność membrany czujnika winna być jednakowa z elastycznością badanego ośrodka, co w przypadku gleby jest trudne do uzyskania. Generalnie, czujniki typu hydraulicznego
(pneumatycznego) z podatnymi membranami zaniżają pomiar ciśnienia w glebie.

Verma opracował czujnik hydrauliczno-pneumatyczny jako alternatywę dla przetworników tensometrycznych, które charakteryzowały się dużymi rozmiarami i sztywnością, przez co pomiar naprężenia jest zafałszowany, gdyż rozkład naprężenia na powierzchni czujnika nie jest stały, a ponadto przemieszczenia czujnika wraz z glebą powodują zmianę kierunku mierzonego naprężenia. Czujnik składa się z kulistej powłoki gumowej wypełnianej wodą o grubości 1,5 mm, wewnątrz której umieszczono hermetycznie zamknięty zasobnik powietrzny z czujnikiem ciśnienia. Pomiar naprężenia następuje z jednoczesnym odkształceniem powłoki, podczas gdy objętość się nie zmienia. Delikatna konstrukcja powłoki gumowej okazała się nieodpowiednia do zastosowań w badaniach polowych, dlatego też zastosowanie czujnika ograniczyło się do testów laboratoryjnych. Ponadto czujnik mierzył ciśnienie oddziaływujące na całą powierzchnię powłoki, a więc kierunkowo nieokreślone [45].

Rozwiązaniem powyższych problemów miał być czujnik opracowany przez Blackwella i Soane, w którym przetwornik ciśnienia znajdował się poza obszarem gleby badanej i był połączony przewodem z gumową kulą wypełnioną cieczą. Grubość ścianki kuli zakopanej w glebie wynosiła 3 mm, przez co zwiększono odporność mechaniczną, zaś sam przetwornik nie był już bezpośrednio narażony na obciążenia. W przypadku

przeprowadzania pomiarów z wykorzystaniem kilku czujników stosowano hydrauliczny układ rozdzielający, który jednak okazał się kłopotliwy i zawodny ze względu na uszczelnienia. Dodatkowym elementem był czujnik wyznaczający kierunek i stosunek wartości naprężeń głównego oraz bocznych. Zbudowany został z wykorzystaniem materiału mastycznego, to znaczy takiego, który w temperaturze pokojowej ulega trwałym deformacjom plastycznym. W prototypie zastosowano materiał SYLGLASS, zaś podobne własności posiada plastelina. Czujnik w formie kuli podlegał odkształceniom, a jego ostateczny kształt po ustąpieniu działania obciążenia zależał od kierunku i wartości naprężeń panujących w glebie. Przy identyfikacji wartości naprężeń i ich kierunków posługiwano się elipsoidą Lamego, zwaną inaczej elipsoidą obciążenia. Czujnik przybierał bowiem ostatecznie kształt elipsoidy i jej parametry
(oś wielka i mała, mimośród) wyznaczają stosunek wartości naprężeń bocznych do naprężenia pionowego, zmierzonego przez klasyczny czujnik opisany powyżej [7].

Zastosowanie czujników hydraulicznych opisuje Hammel. Cylindryczne czujniki o średnicy 100 mm i wysokości 28 mm wykonano jako sztywne korpusy zamknięte od góry elastyczną (gumową) diafragmą. Medium pośredniczącym był w tym przypadku olej, którego ciśnienie mierzono za pomocą przetwornika piezoelektrycznego. W metodyce pomiarowej autor założył, dla uniknięcia efektów brzegowych, że górna krawędź korpusu jest zaokrąglona. Przewód elastyczny o długości 50 cm służył do napełniania lub opróżniania czujnika olejem. Po zainstalowaniu czujnika w badanej glebie zwiększano ciśnienie w układzie hydraulicznym dla uzyskania kontaktu gleba-membrana wymaganego w pomiarach. Czujniki instalowano na głębokości 250 mm, jeden na linii centralnej, drugi 150, następny 300 mm prostopadle do kierunku ruchu [17].

W przypadku czujników o sztywnych membranach jako przetworniki stosuje się zazwyczaj elementy piezoczułe lub tensometry zmiennooporowe [3, 10, 12, 30-35]. Membrany czujników mogą być wykonywane ze stali, aluminium lub duraluminium. Moduł sprężystości tych materiałów jest znacznie wyższy niż w przypadku gleby. Według Peattie&Sparrow optymalny stosunek parametrów dla membrany i gleby winien wynosić 10:1. Względy praktyczne skłaniają do stosowania jako materiału na

membrany duralu ze względu na 3-krotna różnicę modułów sprężystości w stosunku do stali przy porównywalnej odporności mechanicznej, która jest cechą bardzo istotną w przypadku badań prowadzonych w glebie [19]. Większa odkształcalność duralu ma znaczenie dla uzyskiwanych dokładności pomiarowych ze względu na występujące zakresy zmian oporu tensometrów [38].

Bailey opisuje wytyczne konstrukcyjne dla czujników tensometrycznych, w myśl których stosunek grubości czujnika do jego średnicy nie powinien przekraczać 0.1, zaś powierzchnia czynna membrany winna stanowić co najwyżej 0.45 powierzchni całkowitej przetwornika. Zachowanie tych proporcji ma na celu minimalizację błędów pomiarowych wynikających z koncentracji naprężeń na krawędziach przetwornika [3].

Protoplastą czujników membranowych z tensometrami elektrooporowymi jako przetwornikami wielkości ugięcia membrany jest konstrukcja Vanden Berga. Ze względu na ówczesną niedostępność tensometrów membranowych w układzie pełnego mostka zastosowano mostek tensometryczny zestawiony z dwóch tensometrów pomiarowych, naklejonych na powierzchni membrany oraz dwóch dodatkowych, funkcjonujących jednocześnie jako pozostałe gałęzie mostka i kompensatory termiczne. Konsekwencją takiego rozwiązania były znaczne rozmiary czujnika [44].

Koolen opisuje pomiary wykonane przy pomocy platformy pomiarowej z zamontowanymi 5-cioma czujnikami kołowymi o średnicy 50 mm . Są to czujniki tensometryczne (Sensotec, Inc, USA) .Uzyskane wyniki posłużyły między innymi do weryfikacji doświadczalnej modelu zagęszczenia gleby SOCOMO [26]. Platformę pomiarową umieszczano na głębokości 15 i 30 cm pod powierzchnią gleby.

Blunden opisuje zastosowanie toru pomiarowego do pomiaru ciśnień w glebie z użyciem czujników EPC. Średnica membrany czujnika wynosi 12 mm, zaś jej grubość 0,2 mm, materiałem membrany jest aluminium. Jako przetwornik zastosowano tensometr firmy Micro Measurements, typ EA-13-5050P-350. Tensometry zostały połączone bezpośrednio złączem RS 323 z komputerem Laptop. Sygnał wyjściowy 2 mV/V przetworzony w 12-bitowym przetworniku AD daje maksymalną dokładność pomiaru 0,025 mV, co odpowiada 0,5 kPa przy zakresie pomiarowym 400 kPa [8].

W badaniach mechaniki ośrodka glebowego uzasadnione jest wyznaczanie naprężeń głównych, a także składowych opisujących występujące w glebie naprężenia styczne. Kompletna informacja na temat stanu naprężeń w glebie pod obciążeniem (naprężenia główne, naprężenia styczne) jest podstawą w opisie oddziaływania elementów jezdnych i roboczych ciągników i maszyn rolniczych na ośrodek glebowy. Takie pomiary możliwe są z zastosowaniem wieloczujnikowych głowic pomiarowych. Konstrukcję takiej głowicy prezentują Bailey i Nichols [3,4,5]. Głowica pomiarowa SST (Soil Stress Transducer) pozwala na pomiar 6 składowych naprężeń będących danymi wyjściowymi do wyznaczania składowych stanu naprężenia w glebie: naprężeń głównych S1, S2 i S3, średniego naprężenia normalnego na płaszczyźnie oktaedrycznej MNS oraz naprężenia stycznego na płaszczyźnie oktaedrycznej OCTSS. Głowica składa się z 6-cio ramiennej gwiazdy stanowiącej konstrukcję ustalająca położenie i kierunek 6-ciu czujników naprężenia . Czujniki te są zabudowane w ten sposób, że kierunki trzy z nich są wzajemnie prostopadłe, zaś trzy pozostałe, których kierunki są również wzajemnie prostopadłe tworzą układ obrócony o 45°. Zasadniczy problem stanowi dobór przetworników do pomiaru naprężenia. Zdecydowano użyć czujników tensometrycznych o średnicy membrany 7 mm, produkcji firmy Sensotec, Inc, USA. Pierwsze pomiary wykonano w kanale glebowym realizując obciążenie gleby przy pomocy koła ogumionego przetaczanego po powierzchni z różnymi prędkościami. W badaniach stosowano metodykę umieszczania głowicy w glebie polegającą na wybraniu w bocznej ściance kanału otworu dopasowanego do gabarytu głowicy, następnie wybierano glebę z kanału dopasowując kształt czoła otworu do kształtu głowicy. Przestrzeń pozostałą po wprowadzeniu głowicy wypełniano glebą. Wstępne próby wykazały, iż wolna przestrzeń pomiędzy czujnikami i ramą należy wypełnić, gdyż wówczas nie nastąpi zjawisko koncentracji naprężeń na krawędziach przetworników. Głowicę stosowano w polowych badaniach zależności stanu naprężeń od ciśnienia wewnętrznego w oponach oraz obciążenia pojazdu [5].

Ze względu na wielofazowość i niejednorodność ośrodków glebowych konieczne jest stosowanie niekonwencjonalnych technik kalibracji przetworników naprężenia w glebie. Dotyczy to szczególnie czujników z membranami elastycznymi, gdy są one

wykonane z metalu. W przypadku czujników hydraulicznych i pneumatycznych gumowe membrany odkształcalne pozwalają na uzyskanie pełniejszego kontaktu z glebą i dobrze dopasowują się do nieregularnych kształtów cząstek i agregatów glebowych.

Ogólnie metody kalibracji czujników naprężenia w glebie można podzielić ze względu na rodzaj medium, za pośrednictwem którego zadawane jest obciążenie:

- kalibracje w gazie;
- kalibracje w glebie.

Kalibracja w gazie polega na rejestrowaniu wskazań przetwornika, na który oddziałuje napór sprężonego czynnika gazowego. Czujnik umieszcza się w szczelnej komorze kalibracyjnej, którą wypełnia gaz. Tego typu kalibracje stosuje się do czujników hydraulicznych [7, 45, 46] oraz membranowych [3, 20, 25]. Sprężony gaz oddziałuje na membranę czujnika hydrostatycznie, co nie odwzorowuje sytuacji, gdy czujnik mierzy napór gleby. Dlatego też uzasadnione jest prowadzenie prób z użyciem gleby. Kalibracje w glebie zasadniczo prowadzi się przy użyciu standardowej celki ciśnieniowej aparatu trójosiowego ściskania. Problemem technicznym jest otoczenie cechowanego przetwornika glebą oraz zamknięcie go w cienkiej, gumowej osłonie tak, by gaz sprężony wywierał ciśnienie hydrostatyczne. Bailey kalibrował głowicę SST z 6-cioma czujnikami umieszczając całość urządzenia w otoczce z gleby o znanym rozkładzie agregatowym i wilgotności, zamkniętej gumowa osłoną [3,4]. Harris wykazał, że istnieje graniczna wilgotność wagowa gleby, przy której wyniki kalibracji w glebie są zbieżne z kalibracją w gazie. Wynosi ona ok. 45-55% (wagowa) w zależności od rodzaju gleby [18]. W Instytucie Agrofizyki PAN opracowano oryginalną metodę kalibracji czujników naprężenia w glebie w której wykorzystano specjalna komorę kalibracyjną, której konstrukcja umożliwia próby z użyciem gazu sprężonego oraz gleby jako medium wchodzącego w bezpośredni kontakt z membraną [25,46]. Szczegóły przedstawiono w dalszych rozdziałach niniejszej pracy .

Metodyka umieszczania przetworników naprężenia decyduje w znacznej mierze o rzetelności uzyskiwanych wyników. Dotyczy to szczególnie głowic wieloczujnikowych, gdy ich rozmiary są rzędu kilku centymetrów. W przypadku prowadzenia prób laboratoryjnych na glebie przesiewanej umieszczanie przetworników

może odbywać się w trakcie przygotowywania próbek glebowych [25, 30-34]. Natomiast w doświadczeniach na glebie naturalnej konieczne jest opracowanie specjalnej procedury oraz przygotowanie specjalistycznych narzędzi. Horn opisuje metodykę wprowadzania głowicy SST poprzez kanał w bocznej ścianie profilu lub rynny glebowej. Kanał wiercony jest za pomocą ręcznego świdra prowadzonego w rurze o przekroju zgodnym z przekrojem przetwornika. Czoło kanału dopasowywane jest dodatkowo w celu uzyskania optymalnego kontaktu z glebą [20,30]. Harris umieszcza głowicę pomiarową w kołowej osłonie gumowej wypełnionej glebą, a następnie całość wprowadza do kanału kołowego w bocznej ścianie profilu glebowego [18]. W przypadku pojedynczych czujników naprężenia wprowadzanie ich do gleby jest łatwiejsze i powoduje mniejsze zakłócenia w strukturze ośrodka. Król opisuje czujnik hydrauliczny o grubości korpusu 3 mm. W krótkim poziomym elemencie zabudowano zbiornikpłynu hydraulicznego, zamknięty obustronnie membranami gumowymi. Pionowy odcinek łączy czujnik z przetwornikiem odkształcenia, którym jest pozioma płytka stalowa z naklejonymi tensometrami. Czujnik taki można umieszczać w glebie będącej w stanie luźnym poprzez wcisk [27].

Wyznaczanie przemieszczeń i odkształceń punktów ośrodka glebowego pod obciążeniem wymaga stosowania specjalistycznych metod. Zazwyczaj są to rozwiązania niestandardowe, a ich skuteczność zależy w dużej mierze od specyficznych procedur badawczych, których powielenie jest niejednokrotnie bardzo trudne. Utrudnia to porównanie wyników badań prowadzonych różnymi metodami. Poniżej przedstawiono opis kilku sprawdzonych metod wyznaczania przemieszczeń i odkształceń w glebie.

Fotograficzna metoda wyznaczania odkształceń ośrodka glebowego została użyta przez Yu Qun [43]. Za pomocą kamery rejestrowano przemieszczenia punktów ośrodka zamkniętego w przeźroczystym boksie, po ścianie którego przesuwał się penetrometr stożkowy o połowicznym przekroju. W ten sposób możliwe było badanie odkształceń w środkowej płaszczyźnie przekroju poprzecznego badanej próbki gleby.

W metodzie znacznikowej wykorzystuje się znaczniki w postaci krótkich pręcików (3-5 cm) z tworzywa sztucznego, pomalowanych niekiedy farbą luminescencyjną. Umieszcza się je w różnych punktach profilu glebowego. Następnie,

przy użyciu aparatów fotograficznych, bądź kamer dokonuje się rejestracji kolejnych położeń poszczególnych znaczników. Stosowane są także barwniki, proszki, które rozsypuje się cienkimi warstwami na różnych głębokościach, np. co 5 cm. Po odsłonięciu wybranego przekroju uzyskujemy informacje o końcowym stanie odkształcenia w glebie.

Van der Akker, przedstawia wyniki pomiarów pierwsza metodą. Znaczniki umieszczano w profilu glebowym na powierzchni 1,0x0,5 m. co 5 cm. Rejestrowano ruch znaczników metoda fotograficzną w trakcie przejazdu ciągnika. Metoda ta nie pozwala na ciągłą rejestrację przemieszczenia w czasie - możliwe jest jedynie obserwowanie i analiza stanów początkowych i końcowych [1].

Inną metodę wyznaczania odkształceń ośrodka glebowego pod toczącym się kołem stosował Ochitin [29]. Pomiary polegały na umieszczeniu w glebie płaskich płytek, które miały możliwość przesuwania się z masą gleby w kierunku pionowym. Połączono je cięgnami z czujnikami zegarowymi . W ten sposób dokonywano pomiarów przemieszczeń gleby w kierunku pionowym pod kołem przejeżdżającego ciągnika. Zaletą metody jest prostota i skuteczność działania, lecz okupione możliwością rejestracji przemieszczeń tylko w jednym kierunku.

Metoda odwzorowująca polega na rejestracji ruchu sztywnego ramienia łączącego przetwornik umieszczony w glebie z mechanicznym układem rejestracji [20,25]. Urządzenie zostało zaprojektowane i wykonane przez Kuhnera, stosowane również przez autorów. Ruch głowicy w glebie jest odwzorowywany poprzez sztywne ramię z łożyskiem podparte w stałym punkcie. Możliwa jest rejestracja przemieszczeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. W połączeniu z przetwornikiem SST urządzenie umożliwia jednoczesny pomiar naprężeń i przemieszczeń w glebie . Sztywne zamocowanie głowicy na końcu ramienia powoduje, że trajektoria jej ruchu jest wymuszana i przebiega po wycinku okręgu. Jedynie dla małych wartości przemieszczeń głowicy, rzędu 0-50 mm, błąd wynikający z przybliżeń uzyskanych wyników jest do pominięcia. Inną wadą prezentowanej metody jest duży moment masowy bezwładności układu rejestratora mechanicznego wpływający znacząco na uzyskiwane wyniki [30-34].

Do pozostałych metod można zaliczyć:

- pomiar przemieszczenia pionowego na podstawie zmian ciśnienia hydrostatycznego cieczy w naczyniach połączonych ;
- metoda inercjalna, polegająca na rejestracji przyspieszeń czujnika umieszczonego w glebie i poruszającego się wraz z nią [34].

Przegląd dotychczas stosowanych metod doświadczalnych wykazuje, że nie są one doskonałe, a niskie dokładności uzyskiwanych wyników nie zawsze umożliwiają bezpośrednie wykorzystanie ich w badaniach teoretycznych lub do tworzenia baz informacyjnych dla konstruktorów i użytkowników pojazdów terenowych, ciągników i maszyn rolniczych.

Szczególnie daje się zauważyć brak skutecznej metody jednoczesnego pomiaru naprężeń i przemieszczeń w glebie, o ile pomiary poszczególnych wielkości są możliwe do realizacji z osobna. Niedoskonałość istniejących metod pomiaru przemieszczeń, wysoka cena urządzeń pomiarowych, poważnie ograniczająca ich stosowalność w badaniach a także znaczne gabaryty urządzeń pomiarowych i wynikająca stąd konieczność uwzględniania ich wpływu na uzyskiwane wyniki to podstawowe przesłanki, które skłoniły autorów do podjęcia prac nad metodyką doświadczalnego wyznaczania naprężeń i przemieszczeń w glebie pod obciążeniem. W kolejnych rozdziałach zostaną przedstawione stanowiska do jednoczesnego pomiaru naprężeń i przemieszczeń w układzie przestrzennym pod zróżnicowanym obciążeniem ze szczegółowym opisem zaprojektowanej i wykonanej aparatury oraz przykładowymi wynikami dla wybranych gleb. Przedstawione zostaną również założenia dalszych badań w tym zakresie oraz zaprezentowane najnowsze stanowiska Instytutu Agrofizyki PAN.

2. PRZETWORNIK STANU NAPRĘŻEŃ W GLEBIE ORAZ SYSTEM DO WYZNACZANIA PRZEMIESZCZEŃ

2.1 Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale zostanie zaprezentowana metodyka wyznaczania stanu naprężeń oraz rejestracji przemieszczeń w układzie przestrzennym w glebie pod obciążeniem. Przedstawione zostaną również wyniki badań doświadczalnych z użyciem gleby lessowej w czterech wariantach. Badanie składowych stanu naprężeń i przemieszczeń występujących w ośrodku glebowym pod obciążeniem możliwe jest do realizacji przy pomocy głowicy SST (Soil Stress Transducer) oraz rejestratora mechanicznego przemieszczeń [20]. Głowica pozwala na jednoczesny pomiar naprężeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach i to w dwóch płaszczyznach, obróconych względem siebie o 45°. Uzyskane wyniki pozwalają wyznaczyć wartości składowych tensora naprężenia S1, S2, S3 (naprężenia główne), MNS (średnie naprężenie normalne) oraz OCTSS (naprężenie ścinające na powierzchni oktaedrycznej). Oznaczenia powyższych wielkości przyjęto zgodnie z dotychczas stosowanymi w pracach [20, 25, 30-35, 39, 40].

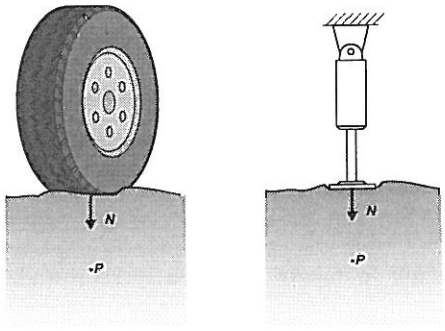
Rysunek 2.1 przedstawia model zjawiska oddziaływania elementu jezdnego pojazdu mechanicznego na glebę podczas ruchu. Przyjęto, że odwzorowaniem powierzchni elipsoidalnej kontaktu opony pneumatycznej z odkształcalną glebą jest okrąg. Youssef przeprowadzał testy ściskania gleby przy użyciu stempli o różnych kształtach : okrągły, eliptyczny, kwadratowy, prostokątny. Z wyników tych doświadczeń wynika, że błąd wynikający z zastąpienia stempla eliptycznego okrągłym nie przekracza 3% [42]. Uproszczenie to nie wpłynie na wyniki badań w sposób znaczący.

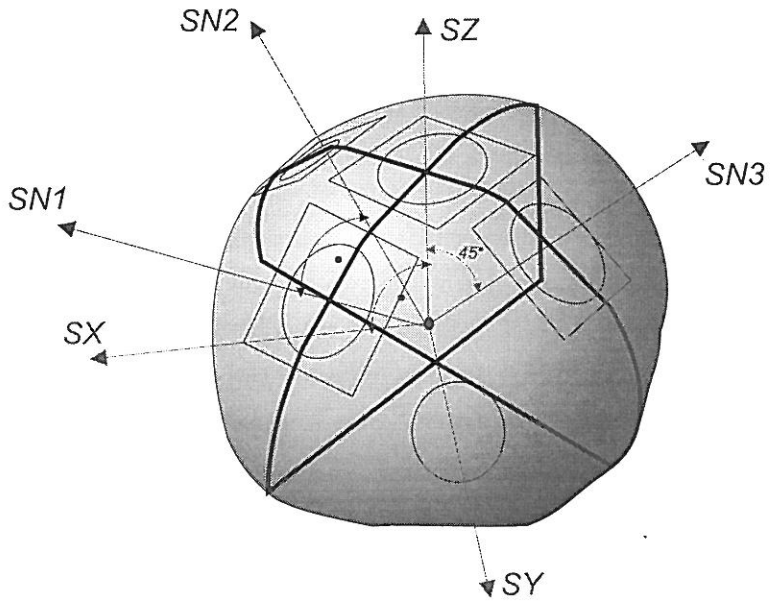
2.2 Metodyka badawcza

Głowica pomiarowa SST (Soil Stress Transducer) stanowiąca sztywny korpus dla 6-ciu czujników naprężenia w glebie została wykonana z aluminium. W celu uproszczenia wykonania głowicy zaprojektowano ją w formie wycinka pręta z frezowanym wnętrzem, zamykanego ścianką tylną, w której wbudowano gniazdo połączeniowe przewodów sygnałowych. Sztywne połączenie głowicy z układem rejestracji przemieszczeń zrealizowano przy pomocy pręta o przekroju kołowym, w którym poprowadzono przewody sygnałowe. Takie rozwiązanie chroni przewody przed uszkodzeniami mechanicznymi a także minimalizuje błędy pomiarowe wynikające z obecności ciał obcych w badanym ośrodku. Maksymalny zewnętrzny wymiar głowicy (gabaryt) wynosi 65 mm [20].

Czujniki naprężenia w glebie wykonano z użyciem tensometrów elektrooporowych. Średnica zewnętrzna stalowej membrany czujnika wynosi 20 mm. Wymiar średnicy czujnika optymalizowano ze względu na:

- minimalne rozmiary głowicy, wynikające z wymiaru czujnika oraz geometrii posadowienia 6 - ciu czujników;
- uzyskanie optymalnego kontaktu membrany czujnika z glebą, zależnego również od rozkładu agregatowego badanej gleby, jej wilgotności i zagęszczenia, a także od sposobu umieszczania głowicy w glebie;
- wielkość obszaru uśredniania, im większe czujniki i głowica, tym większy obszar uśredniania.





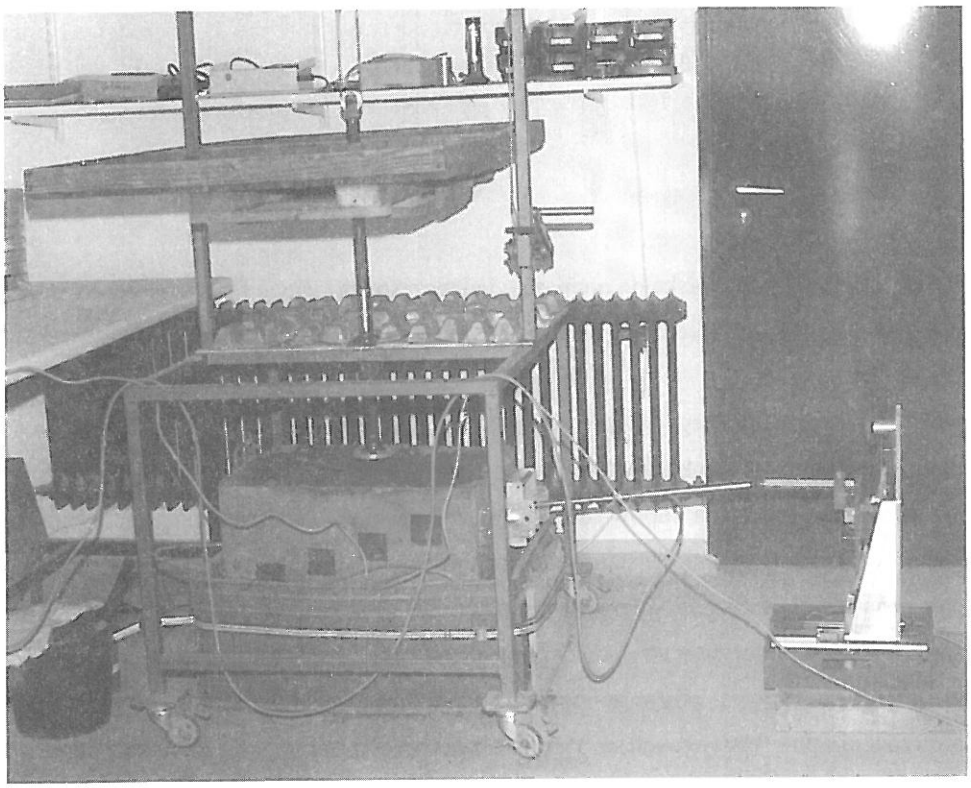
Rys.2.1 Schemat pomiaru składowych tensora naprężenia w glebie pod obciążeniem. Naprężenia mierzone tworzą dwa układy obrócone o kąt 45°: SZ-SX-SY (wzajemnie prostopadłe) oraz SN1-SN2-SN3 (wzajemnie prostopadłe).

Dobrana ostatecznie średnica czujników implikowała ostateczne rozmiary głowicy oraz geometrię całego systemu pomiaru przemieszczeń. Czujniki charakteryzują się niskim progiem czułości (ok. 0.1 kPa), a ich zakres wynosi 500 kPa. Wzmocnienie sygnału wychodzącego z niezrównoważonego mostka realizowane jest we wzmacniaczu na karcie przetwornikowej, dlatego też zadbano, by przewody sygnałowe były wysokiej jakości i posiadały skuteczne ekrany.

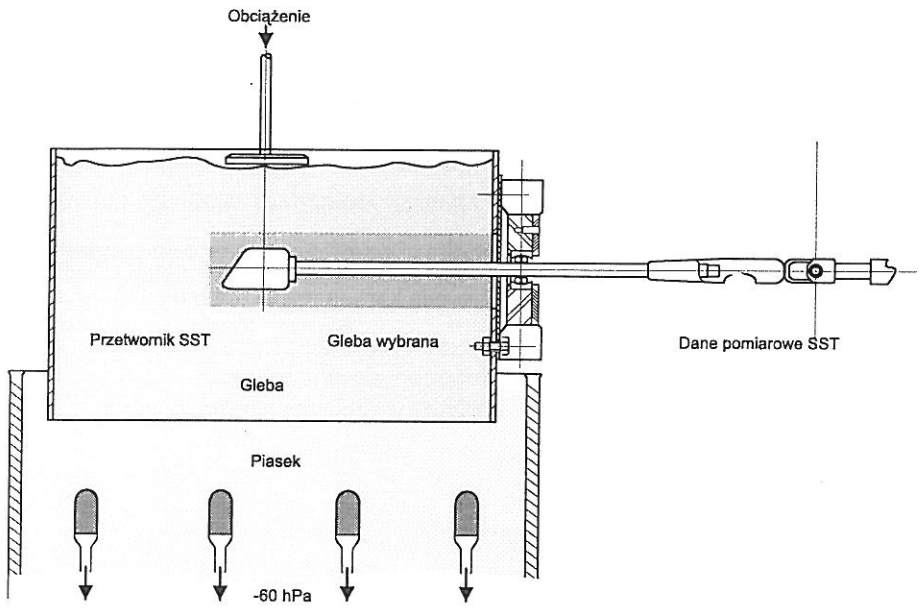
Kalibracje systemu pomiaru naprężeń przeprowadzano przed każdą serią pomiarów . Cechowano czujniki zabudowane w głowicy pomiarowej wykorzystując do tego celu standardową komorę ciśnieniową stanowiska do prób trójosiowego ściskania próbek glebowych. Jako czynnik roboczy stosowano sprężone powietrze. Uzyskiwano wyniki świadczące o liniowości charakterystyk czujników w zakresie roboczym naprężeń 10-500 kPa.

Pomiar przemieszczeń w glebie polega na rejestracji ruchu głowicy podczas działania obciążenia. Przy założeniu, że przemieszczenie głowicy może mieć miejsce w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, możliwe było zabudowanie ramienia łączącego głowicę z rejestratorem przemieszczenia. Rejestrator przemieszczeń zbudowano jako mechaniczny system rolkowo-cięgnowy, napędzany ruchem końca ramienia łączącego głowicę SST z głowica rejestratora. Ramię to podparte zostało w połowie długości, przez co ruch rejestratora jest przeciwny w stosunku do ruchu głowicy. Punkt podparcia stanowi łożysko kulkowe zapewniające możliwość wychyleń poprzecznych +/- 20° oraz ruchy wzdłużne. Ruch głowicy pomiarowej następujący w wyniku przemieszczania się gleby pod obciążeniem odwzorowywany jest poprzez układ prowadnic i rolek, które są połączone za pośrednictwem przekładni cięgnowych z wałkami precyzyjnych potencjometrów pomiarowych, spełniających role przetworników wielkości mierzonych. Przełożenie układu mechanicznego optymalizowano ze względu na dokładność pomiaru przemieszczeń w glebie. Wielkością wyjściową jest zmiana napięcia, która zostaje zarejestrowana w pamięci komputera. Jednocześnie mierzone są przemieszczenia w trzech kierunkach: pionowym, poziomym wzdłużnym i poprzecznym.

System pomiarowy stosowany do badań w kanale glebowym wymagał zaprojektowania i wykonania przeróbek dostosowujących do badań z użyciem próbek monolitycznych. Przekonstruowano zawieszenie punktu podparcia ramienia głowicy, zaprojektowano i wykonano wersje urządzenia obciążającego, które umożliwiało obciążanie gleby siłą quasistatyczną, a ponadto opracowano metodę umieszczania głowicy SST w monolicie glebowym. Głowicę pomiarową wprowadzano do gleby przez otwór w bocznej ściance ramy monolitu. Stosowano w tym celu specjalistyczne urządzenie do wybierania gleby i dopasowywania kształtu czoła otworu .



Fot. 2.1 Kompletne stanowisko gotowe do poimarów.



Rys.2.2 Schemat stanowiska do pomiarów jednoczesnych ciśnień i przemieszczeń z mechanicznym rejestratorem przemieszczeń.

Wszystkie zabiegi wykonywano z największą starannością, tak by możliwie minimalnie naruszać strukturę gleby sąsiadującej z kanałem wprowadzania głowicy. Po umieszczeniu głowicy na odpowiedniej głębokości wolną przestrzeń kanału uzupełniano glebą wybraną. Następnie instalowano przewody doprowadzające oraz aparaturę do pomiarów przemieszczeń. Należy zwrócić uwagę, iż pomimo wszelkich zabiegów nie zawsze uzyskiwano kontakt przetwornik-gleba. Było to związane z nietypowym kształtem głowicy, a także ze sposobem jej instalacji. Narzuca to konieczność prowadzenia prac badawczych w kierunku opracowania optymalnych metod instalacji przetworników w ośrodku glebowym w stanie nienaruszonym. Na Rysunku 2.2 przedstawiono kompletne stanowisko badawcze w przekroju.

Obciążenia zadawano za pośrednictwem metalowego stempla o średnicy 100 mm. Do stempla przykładano siłę , której wartość zmieniano przez dodawanie

obciążników . Obciążenie wzrastało skokowo: 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280 kg. Pojedynczy pomiar trwał 2 minuty, przy czym za reprezentatywne uznano pierwsze 10 sekund od momentu przyłożenia obciążenia. Po pomiarze podnoszono stempel w celu zwiększeniu obciążenia, następnie obciążano glebę powtórnie. Wykonano łącznie 5 serii pomiarów badając monolity gleby po orce i po glebogryzarce w stanie nienaruszonym oraz po manualnej homogenizacji. W sumie przeprowadzono 140 prób.

2.3 Materiał badawczy

W przeprowadzonych badaniach stosowano monolityczne próbki gleby piaszczystej o wymiarach 60×40×40 cm pobierane bezpośrednio z pola oraz przygotowywane w laboratorium. Miejsce poboru próbek ustalono w odległości ok.. 50 m od ścieżki dojazdowej.

Gęstość właściwa	Piasek	Cząstki ilaste	Pył	Substancje Organiczne
2.58 g/cm^3	58.5 %	25.9%	15.6%	0.89 %

Tabela 2.1 Zawartość frakcji w glebie piaszczystej

Metoda pozyskiwania monolitów polegała na:

- wprowadzeniu ramy monolitu o zaostrzonych krawędziach dolnych do gleby na głębokość maksymalną, czyli 40 cm;
- usunięciu objętości gleby wokół ramy;
- wprowadzeniu dna monolitu;
- wyjęciu i przetransportowaniu monolitu z zachowaniem ostrożności, pokład pojazdu transportowego wyłożony był materacami w celu uniknięcia wstrząsów podczas jazdy.

Każdorazowo pobierano dwa monolity, po jednym z części pola po orce pługiem i obróbce glebogryzarką (warianty A i C). Łącznie, w ramach pierwszej części eksperymenty pobrano 12 monolitów, przy czym pierwsza para była użyta do badań

wstępnych. Na polu, z którego pobierano monolity przeprowadzone zostały uprzedniej jesieni standardowe prace agrotechniczne: orka pługiem zwykłym oraz obróbka glebogryzarką. Okres poboru monolitów trwał od lutego do kwietnia 1994 roku.

Przygotowanie monolitów do badań polegało na umieszczeniu ich w wannach z drobnym piaskiem i nawadnianiu przez okres ok. 7-10 dni. Nawadnianie realizowano poprzez obfite podlewanie piasku. Następnie, załączano aparaturę podsiąkową z sączkami ceramicznymi umieszczonymi w piasku oraz pompką i zbiornikiem. Zawór sterujący ustawiano na zadane ciśnienie -60 hPa. Urządzenie pracowało w sposób ciągły przez okres co najmniej 7 dni (max. 10 dni), po czym kontrolowano wartość podciśnienia w monolitach na głębokości 15 cm przy pomocy miernika przenośnego. Po ustaleniu się wartości podciśnienia na poziomie 60 hPa monolity uważano za gotowe do badań. Każdorazowo badano również glebę po wykonaniu zabiegu manualnej homogenizacji (warianty B – po orce pługiem i D – po obróbce glebogryzarką), polegającej na rozdrobnieniu gleby przy użyciu narzędzi prostych oraz układaniu jej warstwami w ramie monolitu. Kolejne warstwy były wstępnie ugniatane, ich grubość dobrano drogą doświadczalną tak, by po umieszczeniu ostatniej warstwy powierzchnia gleby była na tej samej wysokości jak w przypadku monolitu w stanie naturalnym. Dawało to gwarancję uzyskania jednakowej gęstości objętościowej.

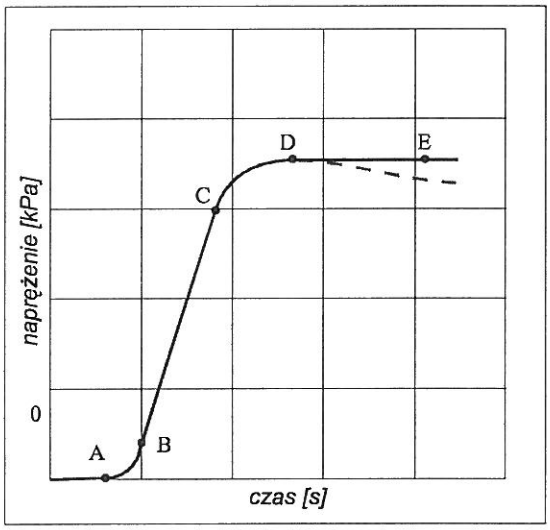
2.4 Wyniki badań z komentarzem

Jako wyniki badań eksperymentalnych otrzymano przebiegi ciśnień rejestrowanych przez poszczególne czujniki umieszczone w korpusie głowicy pomiarowej. Prawidłowe umieszczenie czujników w badanej glebie pozwoliło na otrzymanie pierwotnej informacji na temat składowych tensora naprężenia w glebie: z pomierzonych ciśnień metodami analitycznymi wyznaczano przebiegi składowych tensora . Głównym parametrem wpływającym na przebieg i wartość naprężenia S1 w rozpatrywanym eksperymencie jest obciążenie zewnętrzne przykładane za pośrednictwem stempla. Kąt nachylenia krzywej (odcinek B-C na Rys. 2.3) jest

największy w przypadku najmniejszego obciążenia. Może to nasuwać wniosek o nie przekroczeniu w tym przedziale wartości obciążenia granicznej nośności gleby, która decyduje o charakterystyce mechanicznej ośrodka. Nie mniej jednak, tak małe naciski, rzędu do 100 kPa podczas ruchu pojazdu praktycznie nie występują . Kąt nachylenia krzywej S1 maleje ze wzrostem obciążenia zewnętrznego. Oznacza to, że wartość naprężenia osiąga swoje maksimum w dłuższym czasie. Potwierdza to hipotezę, iż naprężenie w przypadku gleby jest również funkcją czasu.

Obciążenie [kPa]	A	**B**	**C**	**D**
50	51.33	35.70	19.91	18.79
100	76.92	122.80	83.71	64.63
150	175.60	216.56	116.70	141.60
200	227.03	246.60	201.26	174.93
250	263.16	287.14	281.40	214.30
300	342.26	357.10	308.90	275.90
350	375.10	371.25	332.50	299.0

Tabela 2.2 Wartości maksymalne naprężenia S1dla czterech wariantów gleby .



Rys.2.3 Typowy przebieg naprężenia S1

OZNACZENIA

O - A : Nie występują żadne naprężenia, nie ma obciążenia zewnętrznego

A : Stempel osiąga powierzchnię gleby, początek procesu obciążania

A - B : Faza ustalania prędkości narastania naprężenia, opóźnienie, bądź regresywny charakter krzywej jest wynikiem zjawisk czasowych w glebie

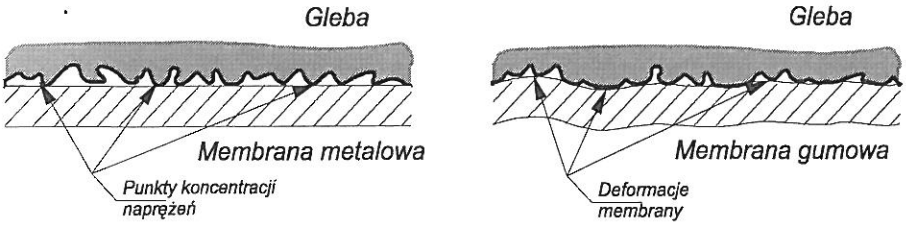
B - C : Część wykresu w przybliżeniu prostoliniowa, równomierny wzrost naprężenia w czasie, faza jednostajnej konsolidacji gleby.

C - D : Faza ustania konsolidacji gleby, naprężenie osiąga wartość maksymalną

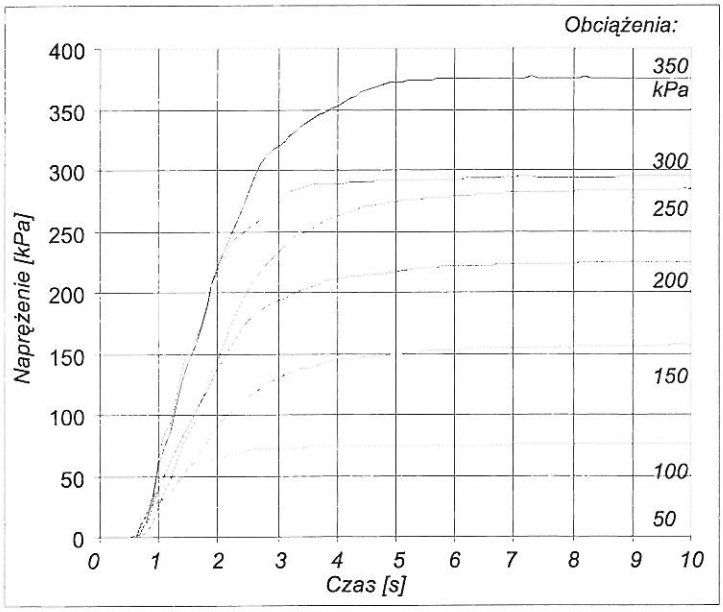
E : Obszar możliwego występowania relaksacji naprężenia. W tym obszarze gleba pozostawała jeszcze pod obciążeniem, dlatego też przytoczone zjawisko występuje z różnym nasileniem, zależnym od wartości obciążenia.

Naprężenie S1 jest wielkością decydującą o ruchu gleby w kierunku pionowym a także jej zagęszczenie. Zostało to udowodnione na podstawie wyników badań uzupełniających: zmian gęstości i przepuszczalności powietrznej [30].

Analiza wartości maksymalnych S1 nasuwa wniosek o istnieniu lokalnych punktów koncentracji naprężeń na powierzchni przetworników ciśnienia (wariant A, B i C). W przypadku przetworników membranowych taka sytuacja jest wielce prawdopodobna, gdyż wówczas nie ma możliwości, by warstwa kontaktowa gleby przylegała idealnie do powierzchni membrany. Sytuacja nieco inaczej wygląda w przypadku czujników z cieczą pośredniczącą, gdy w kontakt z glebą wchodzi membrana gumowa. Elastyczność membrany powoduje wówczas jej miejscowe odkształcenia ułatwiając w ten sposób dopasowanie się wzajemne powierzchni gleby i membrany. Niższe jest wówczas ciśnienie progowe czujnika – większa jest czułość. Należy jednak mieć na względzie zjawiska występujące w przypadku pomiaru ciśnienia czujnikiem z membraną gumową: wartość mierzonego ciśnienia jest pomniejszona o czynnik energii deformacji membrany, a wówczas, przeciwnie do sytuacji opisanej powyżej, mamy do czynienia z błędem pomiarowy o wartości ujemnej. Postulaty te wymagają weryfikacji doświadczalnej .



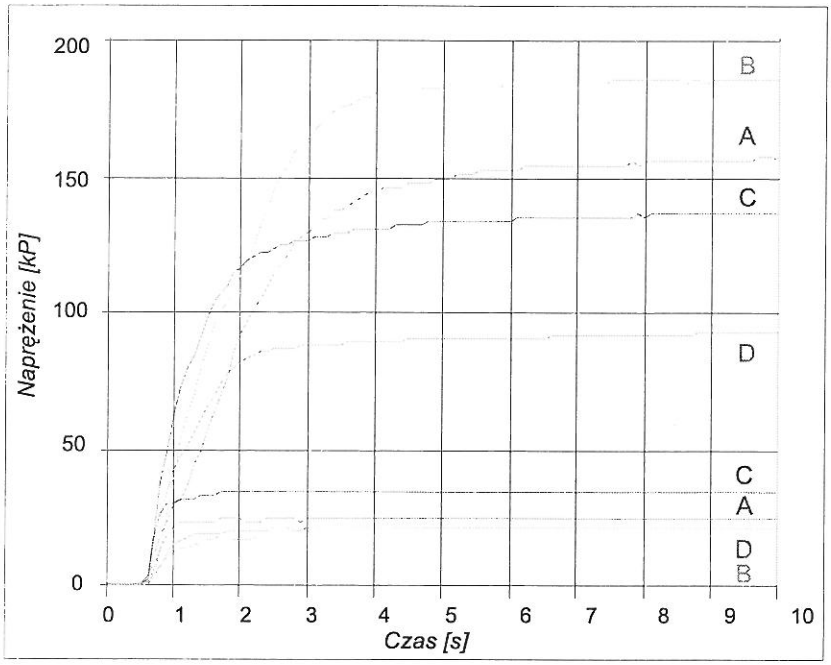
Rys.2.4 Różnice w funkcjonowaniu membrany duralowej i gumowej w kontakcie z fazą stałą gleby.



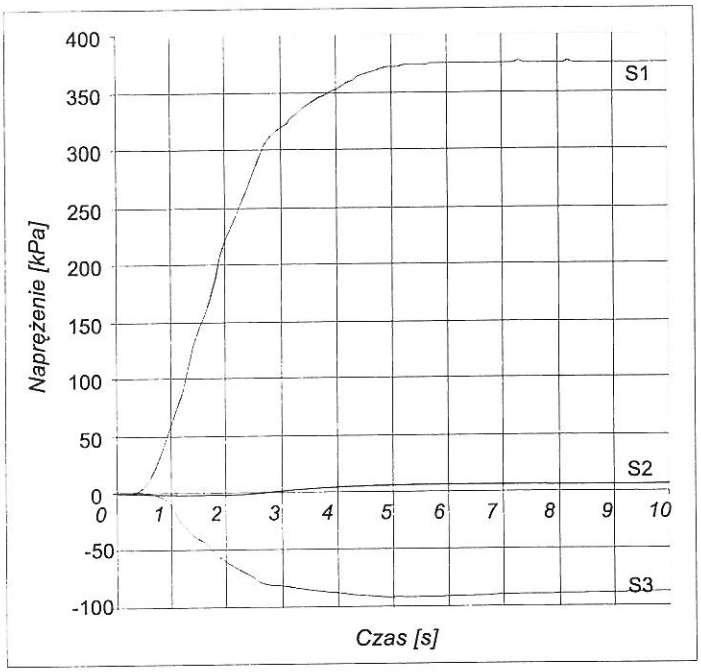
Rys.2.5 Przebiegi naprężenia głównego S1 dla różnych wartości obciążenia. Wariant A.

Uzyskane w badaniach wartości naprężenia głównego S2 są bliskie zeru, co jest potwierdzeniem teorii Boussinesqe [9], rozszerzonej przez Fröhlicha [14]. Zerowa wartość S2 świadczy o istnieniu w dwuosiowego stanu naprężeń, a więc przypadku, gdy

gleba jest obciążana siłą pionową i poziomą, działającą w jednym, stałym kierunku. Taki uproszczony stan naprężeń w glebie występuje w przypadku oddziaływania na jej powierzchnię siły pionowej, przekazywanej za pośrednictwem stempla. Należy się spodziewać, iż naprężenia S2 będą różne od zera w przypadku umieszczenia głowicy pomiarowej w miejscu innym niż



Rys.2.6. Przebiegi naprężenia S1 dla czterech wariantów gleby. Obciążenie 50 i 150 kP



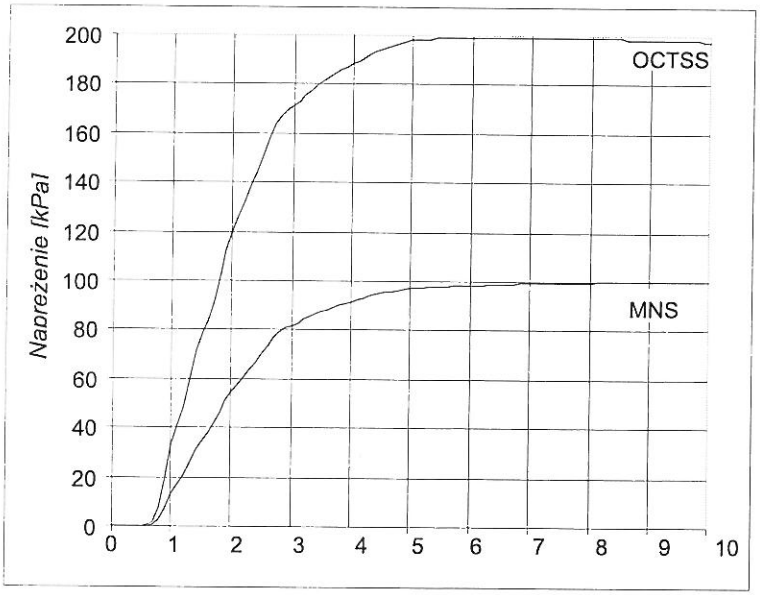
Rys.2.7. Stan naprężeń w glebie, wariant A. Ociążenie 350 kPa.

centralne oraz gdy będziemy podobne badania przeprowadzać pod kołem jadącego pojazdu . Wówczas stan naprężeń określimy jako przestrzenny.

Naprężenie S3 osiąga w świetle dokonanych pomiarów wartości ujemne . Świadczy to o kierunku ruchu gleby pod obciążeniem w okolicach głowicy pomiarowej. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na wpływ gabarytów i kształtu wprowadzanej do gleby głowicy pomiarowej na wartości uzyskiwanych wyników. Obecność ciała obcego, bardzo dużego w stosunku do pojedynczych cząstek gleby, jak również w stosunku do wielkości elementu obciążającego (stosunek wielkości głowicy pomiarowej do wielkości stempla wynosi ok. 7:10) nasuwa wniosek o istnieniu lokalnych przemieszczeń gleby w pobliżu głowicy trójosiowej. Jedynie przy pomocy metody fotograficznej bądź

roentgenowskiej albo symulacji komputerowej możliwe było by uzyskanie informacji o charakterze tych przemieszczeń.

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczano przebiegi naprężenia średniego normalnego MNS. Pochodną naprężenia średniego normalnego jest zagęszczenie gleby. Wartości MNS mogą precyzyjniej opisywać proces zagęszczenia gleby w badaniach przeprowadzanych na wielkogabarytowych próbkach gleby (monolitach), w odróżnieniu do testu prostego ściskania, w którym największy wpływ ma naprężenie główne w kierunku pionowym. Naprężenie MNS uwzględnia bowiem składowe działające w kierunkach innych niż pionowy.



Rys.2.8. Naprężenia MNS oraz OCTSS. Wariant A, obciążenie 350 kPa.

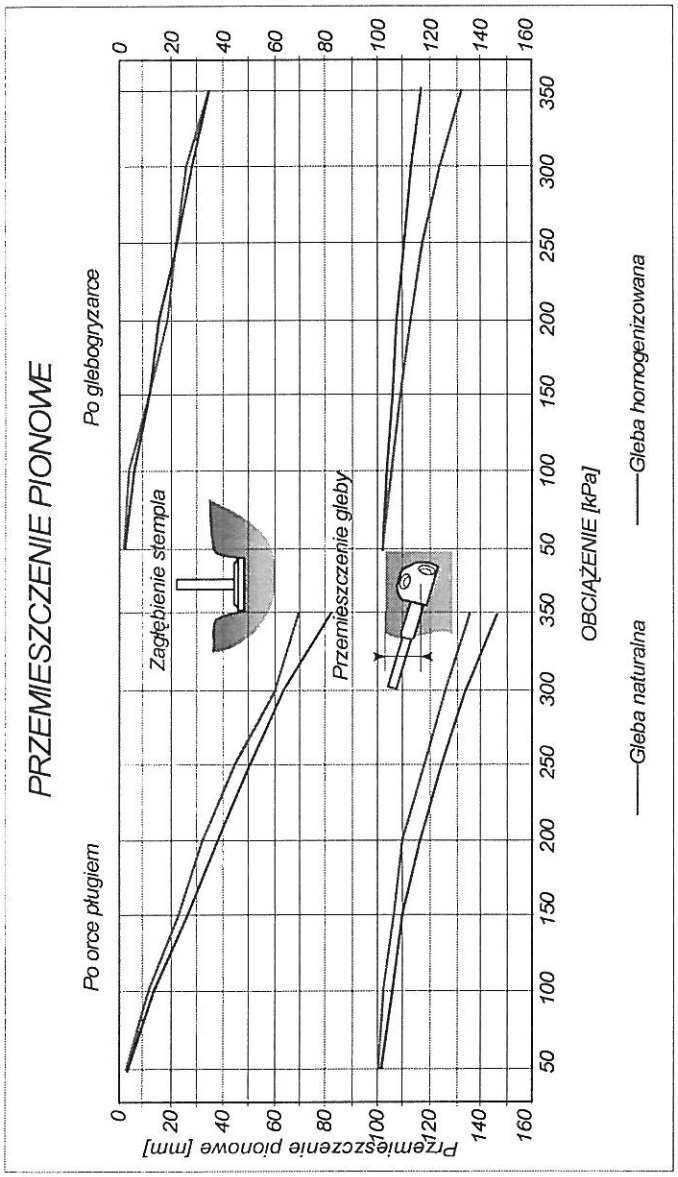
Wyraźnie większe wartości (przeciętnie o 90-120%) uzyskuje naprężenie ścinające OCTSS. Oznacza to, iż zmiany postaciowe, czyli zniszczenie struktury gleby przez rozkruszanie agregatów w opisywanym doświadczeniu ma większy udział, niż

Wyraźnie większe wartości (przeciętnie o 90-120%) uzyskuje naprężenie ścinające OCTSS. Oznacza to, iż zmiany postaciowe, czyli zniszczenie struktury gleby przez rozkruszanie agregatów w opisywanym doświadczeniu ma większy udział, niż przemieszczanie się cząstek (agregatów) do wnętrza porów. Jest jednak rzeczą oczywistą, że nie jesteśmy na podstawie tego typu badań rozgraniczyć obu zjawisk. Możemy jedynie wnioskować, że dla badanej gleby w danych warunkach proces jej zagęszczania objawia się bardziej zniszczeniem struktury niż dyslokacjami cząstek.

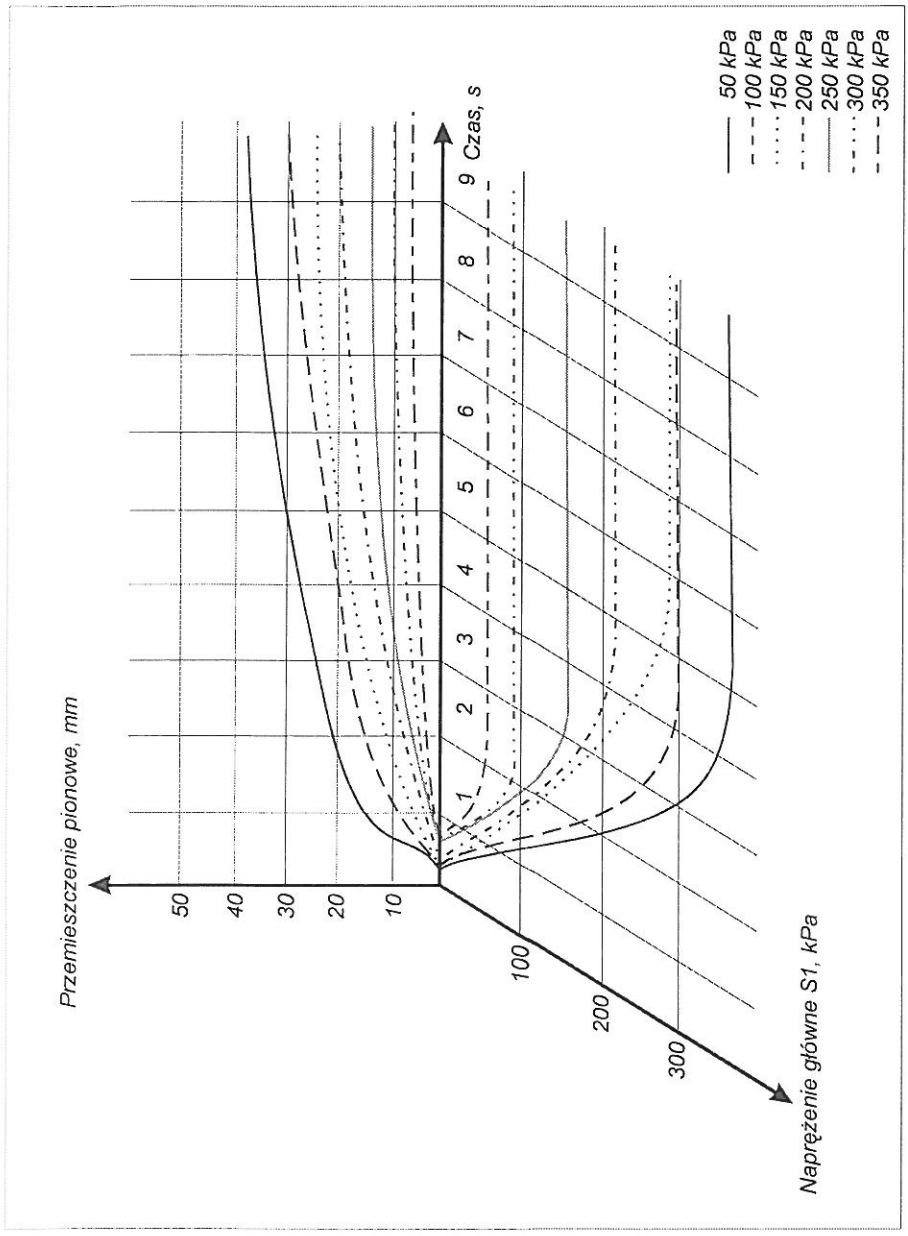
Istotną właściwością badanego materiału w doświadczeniach wytrzymałościowych jest przebieg zależności obciążenie-naprężenie . Tego typu zależności zostały opracowane na podstawie dokonanych pomiarów dla naprężenia głównego S1. Dla początkowych obszarów charakterystyk naprężenia generowane nie osiągają wartości obciążeń, natomiast w przypadku dużych obciążeń, naprężenia przekraczają ich wartości. Wytłumaczeniem tego jest zjawisko stopniowej konsolidacji i wzmacniania struktury gleby. Dla małych wartości obciążeń, gdy występują odkształcenia natychmiastowe wytrzymałość gleby jest za mała, by generowane w niej naprężenia osiągały wartości równe obciążeniu. Wraz ze wzrostem wartości przykładanego obciążenia następuje wzmocnienie struktury gleby. Występuje tu wspomniane w poprzednich paragrafach zjawisko koncentracji naprężeń. W przypadku obciążeń dużych (300, 350 kPa) należy zaznaczyć, iż proces ustalania się wartości maksymalnej naprężenia trwa znacznie dłużej niż dla obciążeń małych (50 kPa). Dla porównania można przytoczyć skrajne wartości: 0.85 sek. dla 50 kPa oraz 3.75 sek. dla 350 kPa [30]. Dodatkowo dowodzi to tezę, iż naprężenie w glebie jest funkcja obciążenia, stanu gleby i czasu

Obciążenie ma znaczący wpływ na wartość przemieszczenia, choć korelacja nie jest jednoznaczna. Stwierdzono, że rodzaj obróbki agrotechnicznej oraz stan gleby nie wpływa na charakter krzywych, stąd też prezentowane są wyniki wybranego wariantu jako reprezentatywne. Faza szybkiego przyrostu przemieszczenia trwa w zależności od obciążenia, od 0,5 do 2,5 sekundy, po czym następuje faza pełzania. Zjawisko to jest bardziej intensywne dla dużych wartości obciążenia zewnętrznego.

Pomiary przemieszczeń prowadzone były metodą odwzorowania ruchu głowicy, co pociągało za sobą konieczność stosowania stałego punktu podparcia. W efekcie, uzyskiwano wymuszony ruch głowicy po okręgu (o średnicy ok. 300 mm). Należy jednak nadmienić, iż błąd wynikający z geometrii układu mechanicznego dla maksymalnych przemieszczeń rzędu 50 mm nie przekraczał 3%. Stosowanie tej metody pomiaru wiąże się z nieoszacowanym błędem wynikającym z bezwładności układu rolkowego napędu potencjometrów pomiarowych. Błąd będzie duży, gdy opór ruchu układu mechanicznego będzie rzędu wielkości sił powodujących odkształcenia, szczególnie dla dużych prędkości odkształcenia [30].



Rys.2.9 Zagłębienie stempla i pionowe przemieszczenia głowicy w funkcji obciążenia w glebie naturalnej, uprawianej pługiem i glebogryzarką.



Rys. 2.10 Zależność naprężenie S1 – przemieszczenie pionowe – czas dla różnych wartości obciążenia. Gleba piaszczysta.

2.5 Podsumowanie

Przetwornik stanu naprężeń wraz z układem do rejestracji przemieszczeń w glebie stanowią praktycznie sprawdzony system pomiarowy do badań laboratoryjnych i polowych. Głowica SST umożliwia jednoczesny pomiar 6-ciu naprężeń jako danych wyjściowych do wyznaczenia składowych stanu naprężeń: S1, S2, S3, MNS oraz OCTSS.. Rejestracja przemieszczeń możliwa jest w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. W ten sposób uzyskuje się pełną informację o stanie naprężeń i przemieszczeń w glebie pod obciążeniem. Istotną zaletą układu jest jednoczesność pomiaru wszystkich wielkości. Zostało to okupione niską częstotliwością pomiaru, rzędu 100 Hz, co wynika z zastosowanych przetworników A/C. Czujniki naprężeń kalibrowane są w gazowej komorze ciśnieniowej. System zasadniczo przewidziany jest do badań ośrodków glebowych, lecz nie jest wykluczone stosowanie go w doświadczeniach z innymi mediami rozdrobnionymi, trójfazowymi. Spełniono wymogi dotyczące wodo- i pyłoszczelności w odniesieniu do podzespołów wchodzących w kontakt z glebą. Do umieszczania głowicy pomiarowej w zadanym miejscu służy specjalistyczne urządzenie - wybierak do gleby oraz kształtownik czoła otworu. Przyrządy te pozwalają wprowadzić głowicę na żądaną głębokość z zachowaniem poziomu oraz optymalnego kontaktu przetworniki-gleba. Jednostką sterująco-rejestrującą jest komputer przenośny Notebook, którego oprogramowanie, funkcjonujące w systemie DOS zapewnia podstawowe i rozszerzone menu w interfejsie użytkownika: wybór kanałów, wzmocnień, uwzględnianie przeliczników napięcie-wielkość mierzona, zapis w formacie Lotus 1-2-3. Prezentowane wyniki potwierdzają wysoka przydatność systemu do badań mechaniki ośrodka glebowego w badaniach laboratoryjnych. Z doświadczeń autorów wynika ponadto, że opisana aparatura może być z powodzeniem stosowana w badaniach polowych oraz w kanale glebowym.

3. SYSTEM POMIAROWY DO WYZNACZANIA STANU NAPRĘŻEŃ I PRZEMIESZCZEŃ W GLEBIE W UKŁADZIE PRZESTRZENNYM

3.1 Wprowadzenie

W kolejnym rozdziale prezentujemy własne rozwiązania metodyczne rozszerzające możliwości aparatury pomiarowej do jednoczesnego wyznaczania stanu naprężeń i przemieszczeń w glebie.

Występujące podczas ruchu koła pojazdu terenowego obciążenia generują w podłożu glebowym naprężenia i przemieszczenia o złożonym stanie. Badania współpracy elementów jezdnych z podłożem nieutwardzonym wymagają znajomości składowych naprężeń oraz odkształceń w układzie przestrzennym, gdyż znajomość tych wielkości pozwala na precyzyjne przewidywanie zagęszczania gleby, jak również określanie trakcyjnych osiągów pojazdu. Ze względu na to, że standardowe czujniki membranowe pozwalają na pomiar nacisków prostopadłych do płaszczyzny membrany, w badaniach stanu naprężeń stosuje się wieloprzetwornikowe urządzenia pomiarowe, w których poszczególne czujniki są umieszczone w płaszczyznach reprezentatywnych dla składowych tensora naprężenia. W niniejszym rozdziale przedstawiono rozwiązanie tego typu systemu, który dodatkowo wyposażono w układ do rejestracji przemieszczeń w glebie.

3.2 Metodyka badawcza

Aparatura pomiarowa przeznaczona do badań pól naprężeń i przemieszczeń w glebie powinna umożliwić jednoczesny pomiar 6-ciu składowych tensora naprężenia oraz składowych przemieszczenia podczas procesu obciążania gleby symulującego ruch koła maszyny rolniczej. Pomiar ciśnień występujących na założonych zgodnie z przyjętą metodyką badawczą płaszczyznach umożliwiają czujniki sztywno osadzone w korpusie zwanym głowicą trójosiową. Zastosowane przetworniki ciśnienia z założenia spełniają następujące warunki:

- odpowiedni zakres (0 - 500 kPa) oraz czułość (rzędu kilku kPa);
- odporność na udary mechaniczne, wilgotność, pył, zanieczyszczenia;
- kompensacja temperaturowa;
- dostępność, niska cena, prostota konstrukcji umożliwiająca zbudowanie ich w warunkach podręcznego warsztatu.

Wymagania te spełniły czujniki ciśnienia zbudowane z wykorzystaniem przetworników tensometrycznych.

Ważnym etapem w realizacji metodyki badawczej była budowa układu dopasowania sygnału elektrycznego uzyskanego z mostka tensometrycznego. Sygnał, o którym mowa waha się na poziomie 1 - 5 μV i wymaga wzmocnienia rzędu 1000 razy. Stawia to dodatkowe wymagania , mianowicie wzmacniacz powinien zapewnić selektywność w zakresie mierzonych napięć, jednocześnie wysokie tłumienie efektów ubocznych.

Drugi zasadniczy podsystem pomiarowy miał umożliwić pomiar odkształceń gleby obciążanej poprzez pomiar przemieszczeń głowicy trójosiowej. Z doświadczeń własnych wywnioskowano, iż największy udział mają odkształcenia-przemieszczenia w kierunku pionowym. Wiąże się to ze sposobem obciążania gleby - stempel porusza się w kierunku pionowym. O ile istnieją jakiekolwiek ruchy głowicy inne niż pionowe, to wynikają one z jej kształtu i rozmiarów i są pomijalnie małe. Należy przy tym nadmienić, iż badania w warunkach rzeczywistych wymagają założenia istnienia złożonego ruchu głowicy, wynikającego z ruchu ośrodka pod toczącym się kołem. W tym przypadku konieczne jest zastosowanie ulepszonej wersji urządzenia , która umożliwi pomiar przemieszczeń w układzie przestrzennym.

Projektując układ pomiaru przemieszczeń rozważano zastosowanie następujących metod pomiarowych:

- pomiar przemieszczenia mechaniczny, z wykorzystaniem indukcyjnego czujnika liniowego;
- pomiar przemieszczenia optyczny, z wykorzystaniem projektora laserowego i systemu rejestracji z kamerą CCD.

Ostatecznie adaptowano system optyczny.

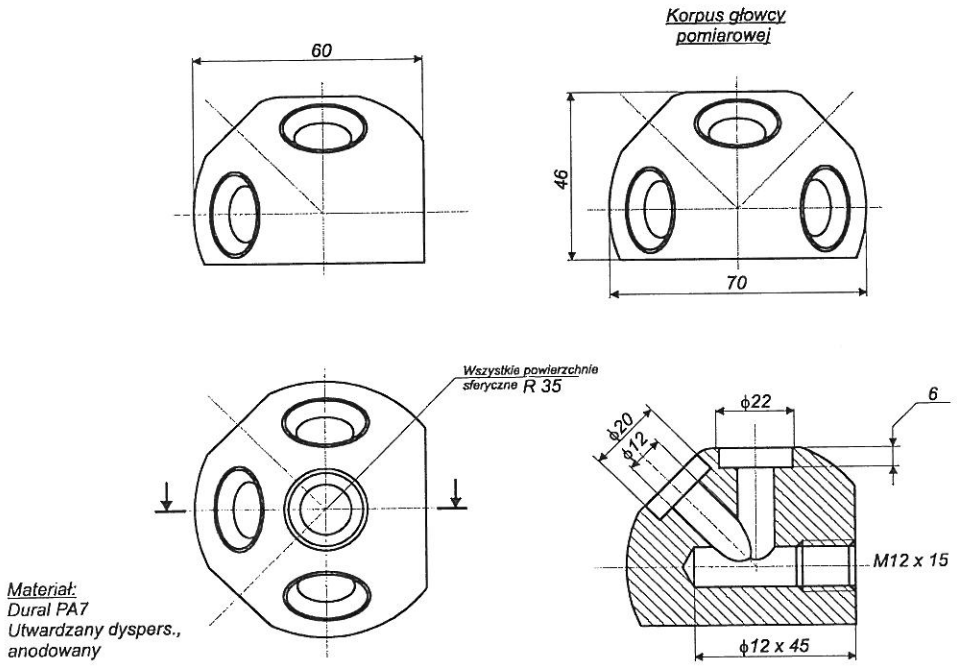
W kolejnych podrozdziałach przedstawiono szczegółowe opisy skonstruowanych urządzeń, ich charakterystyki i dane eksploatacyjne.

3.3 Głowica trójosiowa.

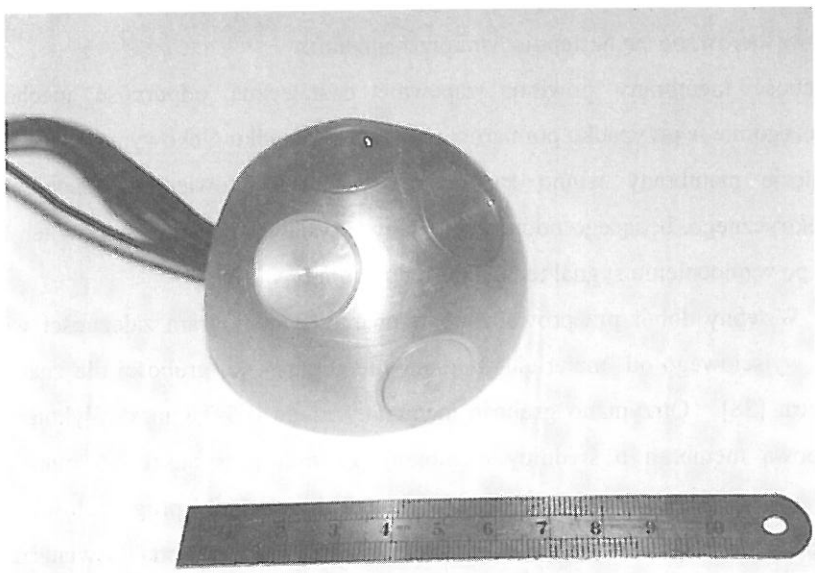
Przy opracowaniu projektu konstrukcyjno-technologicznego głowicy trójosiowej zachowano parametry geometryczne głowicy SST (Soil Stress Transducer) używanej w doświadczeniach opisanych w Rozdziale 2. Powielenie następujących parametrów:

- średnica kuli obwiedni 70 mm;
- średnica membran przetworników 20 mm

było uzasadnione w celu uzyskania porównywalności wyników badań, a także każdych innych badań prowadzonych z użyciem opisywanej aparatury. Rozważano trzy warianty konstrukcyjne, ostatecznie wybrano wersję , w której głowica jest monolitycznym wycinkiem kuli o średnicy 70 mm, zaś doprowadzenia przewodów łączących przetworniki z układem kondycjonowania sygnałów stanowią promieniowo wiercone kanały o odpowiedniej średnicy. Gniazda i korpusy przetworników pasowano luźno. Dodatkowym elementem rozłącznym jest uchwyt ramienia projektora laserowego, stanowiący również prowadzenie wiązki przewodów. Skomplikowana geometria głowicy skłoniła do zlecenia wykonania prototypu wysoko wykwalifikowanemu wykonawcy, jakim jest Zakład Narzędziowy WSK Świdnik. Jako materiał wybrano dural PA7, utwardzany dyspersyjnie i anodowany na kolor biały. Wybrany materiał charakteryzuje się niską masą właściwą, absolutną odpornością na korozję (ważne w przypadku użycia w wilgotnym środowisku gleby), łatwością obróbki (w razie przeróbek własnych) oraz odpornością mechaniczną. Poniżej przedstawiono rysunek konstrukcyjno-technologiczny oraz fotografię prototypu głowicy.



Rys. 3.1 Projekt konstrukcyjno-technologiczny głowicy trójosiowej.



Fot. 3.1 Głowica trójosiowa do pomiaru naprężeń w glebie.

3.4 Konstrukcja przetworników ciśnienia.

Jak już wcześniej wspomniano, spośród dostępnych przetworników ciśnienia wybrano przetworniki tensometryczne. Ich podstawowe zalety w porównaniu z innymi (piezoelektryczne, półprzewodnikowe) to między innymi:

- mała wrażliwość na zakłócenia pól elektromagnetycznych i akustycznych;
- możliwość montażu na membranie o dużej odporności mechanicznej;
- kompensacja temperaturowa;
- dostępność, niska cena.

Zdecydowano się na użycie mostków tensometrycznych typu membranowego. Ich średnica wynosi 15 mm, co umożliwia zastosowanie membrany o średnicy 16,5 - 18,0 mm. Dobór średnicy tensometrów był determinowany zewnętrzną średnicą korpusu czujnika.

Istotnym problemem był dobór geometrii membrany przy założeniu, że zostanie ona wykonana z duralu. Materiał ten posiada 3-krotnie wyższy od stali moduł sprężystości, co w przypadku czujników tensometrycznych jest bardzo istotne, gdyż wpływa na poziom sygnału uzyskiwanego w pomiarach [38]. Przy doborze grubości membrany kierowano się następującymi przesłankami:

- grubość membrany powinna zapewnić dostateczną odporność mechaniczną, szczególnie w przypadku pomiarów ciśnienia w ośrodku glebowym;
- ugięcie membrany winno zapewnić powstanie odpowiednio silnego sygnału elektrycznego, będącego pochodna zmiany rezystancji gałęzi mostka w ten sposób, że po wzmocnieniu sygnał ten będzie na poziomie voltów.

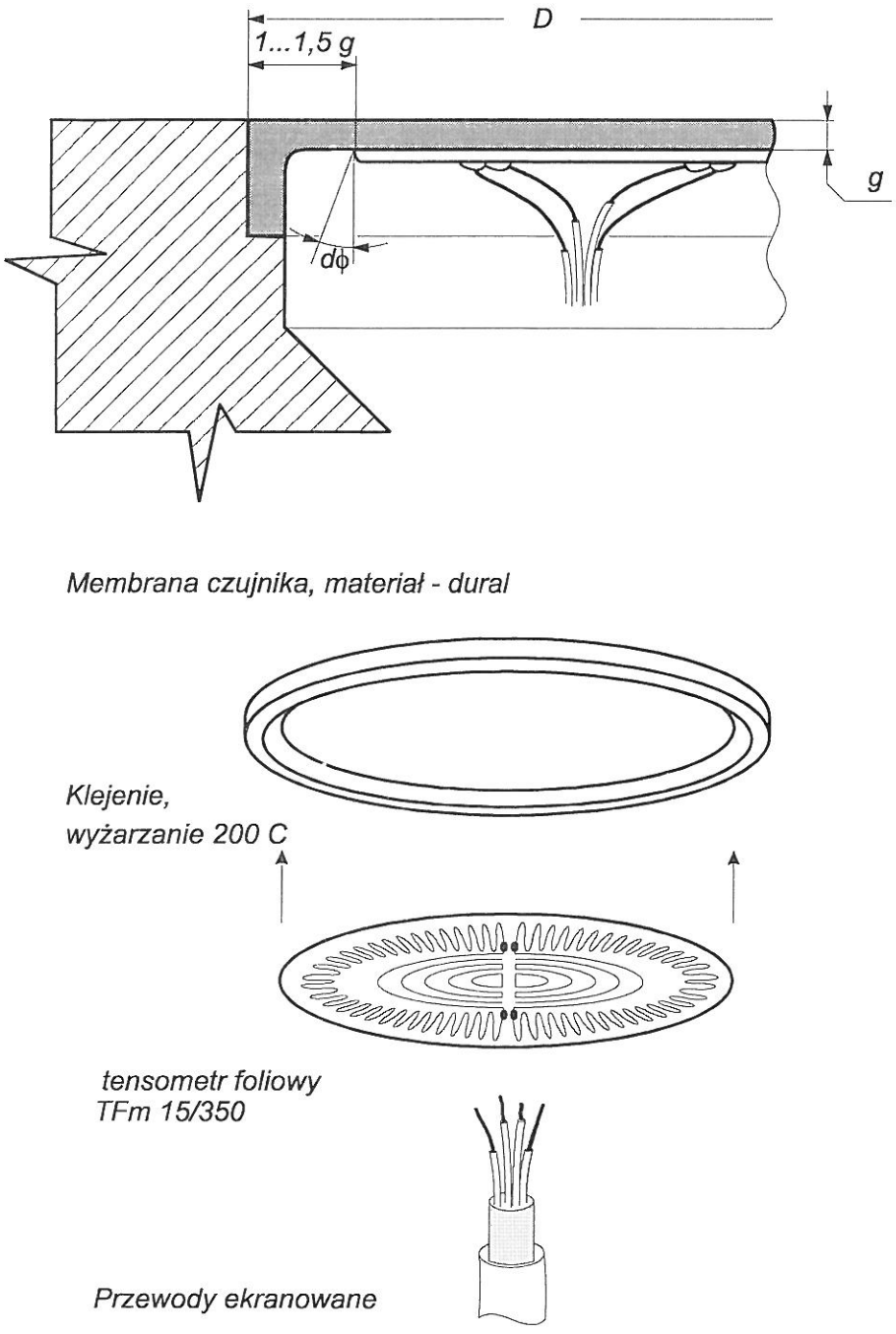
Wstępny dobór przeprowadzono w oparciu o nomogram zależności wielkości sygnału wyjściowego od materiału, średnicy membrany i jej grubości dla znanej stałej tensometru [38]. Otrzymano grubość membrany rzędu 0,5-0,8 mm. Wykonano serię prototypową membran o średnicy membrany 17 mm i grubości 0,6 mm. Czujnik zbudowany z użyciem takiej membrany wykazywał za wysoki próg czułości (ok. 50 kPa). Zdecydowano się prowadzić dobór geometrii membrany metodą doświadczalną.

Zbadano dwa inne czujniki o średnicy 17 i 17,5 mm oraz stałej grubości 0,5 mm. Stwierdzono wpływ średnicy membrany na charakterystykę czujnika: czujnik z membraną o średnicy 17 mm wykazywał charakterystykę regresywną. Ostatecznie dobrano średnicę membrany 17,5 mm , grubość 0,5 mm, stan powierzchni 0.32.

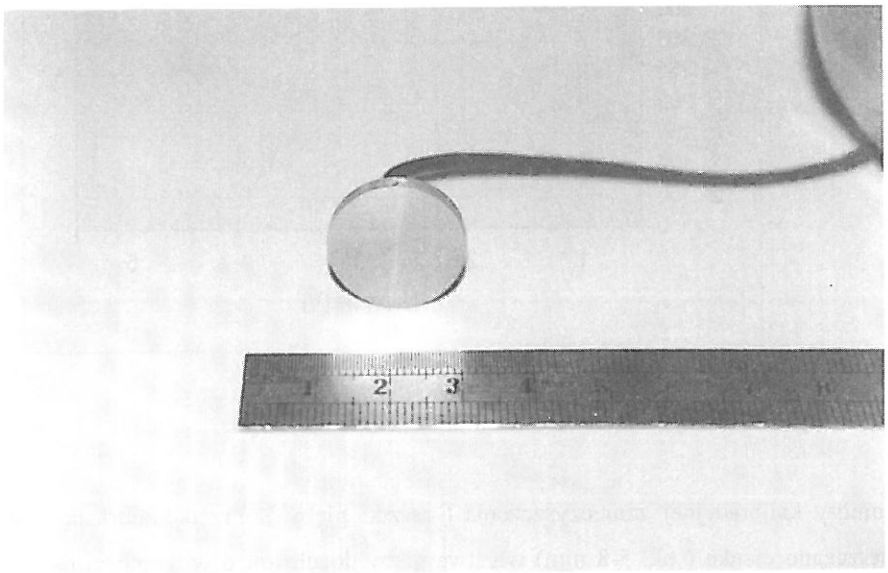
Wykonanie serii przetworników poprzedził dobór mostków tensometrycznych pod względem powtarzalności ich rezystancji. Zastosowano tensometry foliowe produkcji krajowej typ TFm 15/350. Dla uzyskania zadowalającej powtarzalności charakterystyk przetworników dobrano tensometry, których rezystancja różniła się między sobą nie więcej niż 0,5 %. Ważnym etapem w technologii czujników tensometrycznych jest naklejanie tensometrów foliowych. Ze względu na konieczność zachowania następujących warunków:

- docisk 200 N;
- czas klejenia 5 godzin;
- czas wygrzewania 473 K - 1 godzina;
- staranne przygotowanie powierzchni klejenia,

operację tą powierzono wysoko wykwalifikowanym specjalistom z Oddziału Prób Statycznych WSK Świdnik. Ścisłe przestrzeganie powyższych parametrów jest warunkiem prawidłowego funkcjonowania przetworników.



Rys. 3.2 Schemat konstrukcji przetworników ciśnienia.



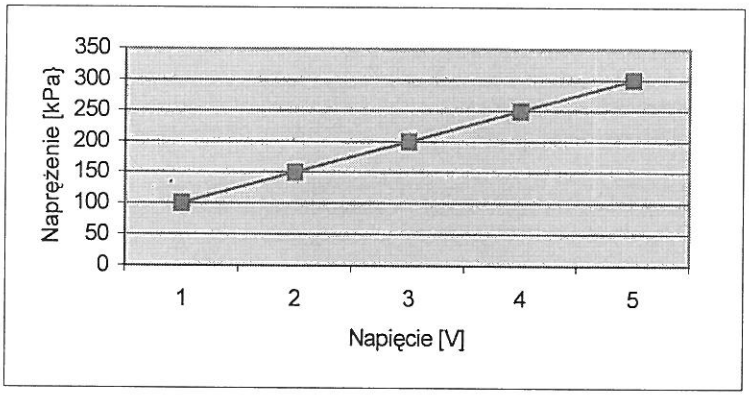
Fot. 3.2. Przetwornik naprężenia w glebie.

3.5 Kalibracja czujników tensometrycznych

Gotowe czujniki poddano próbom wstępnym i kalibracji. W tym celu zaprojektowano i zbudowano specjalistyczne urządzenie umożliwiające zdejmowanie precyzyjnych charakterystyk czujników w różnych warunkach:

- cechowanie w gazie obojętnym, temperatura otoczenia 293 K;
- cechowanie w glebie badanej, temperatura otoczenia 293 K;
- cechowanie dynamiczne w glebie badanej, temperatura 293 K;
- cechowanie temperaturowe, w zakresie od 283-303 K.

Przygotowanie stanowiska do pracy polegało na zainstalowaniu czujnika w gnieździe komory ciśnieniowej, następnie uszczelnieniu poprzez założenie gumowego pierścienia i dokręcenie śrub dystansowych z odpowiednią siła. Jeśli kalibrację przeprowadzano w atmosferze gazu obojętnego (hel, azot) należało usunąć



Rys. 3.4 Krzywa kalibracji czujnika tensometrycznego.

z komory kalibracyjnej zanieczyszczenia (resztki gleby). Przed kalibracją w glebie umieszczano cienką (ok. 5-8 mm) warstwę gleby docelowej o wilgotności ok. 12% , następnie wnętrze komory ciśnieniowej wyścielano cienką , elastyczną folią. Kalibrację temperaturową przeprowadzano w atmosferze gazu obojętnego ustalając temperaturę kalibratora przy użyciu łaźni wodnej. Kalibrowano w temperaturach 283, 288, 293, 298, 303 K. Kalibracje dynamiczne polegały na ciągłym pomiarze zadawanego ciśnienia i wyznaczaniu ewentualnego opóźnienia odpowiedzi czujnika.

Wyniki kalibracji pozostałych czujników wskazują odchylenia nie większe niż 3 %. Kalibracje temperaturowe wykazują nieznaczną zmianę wskazań (nie więcej niż 2%) w rozpatrywanym zakresie temperatur, podobnie kalibracja dynamiczna pozwala sądzić iż wpływ prędkości zadawanego obciążenia będzie nieznaczny (ok. 1 - 2 %).

Przeprowadzone próby kalibracji w ośrodku badanym wykazały zmniejszone wartości zmierzonego napięcia o ok. 40 %. Należy tu wymienić szereg czynników wpływających na wartości wskazywane przez czujnik:

- grubość warstwy gleby;
- sposób jej przygotowania i umieszczania w komorze ciśnieniowej;
- grubość i materiał użytej folii;
- czas do odczytu liczony od momentu zadania ciśnienia.

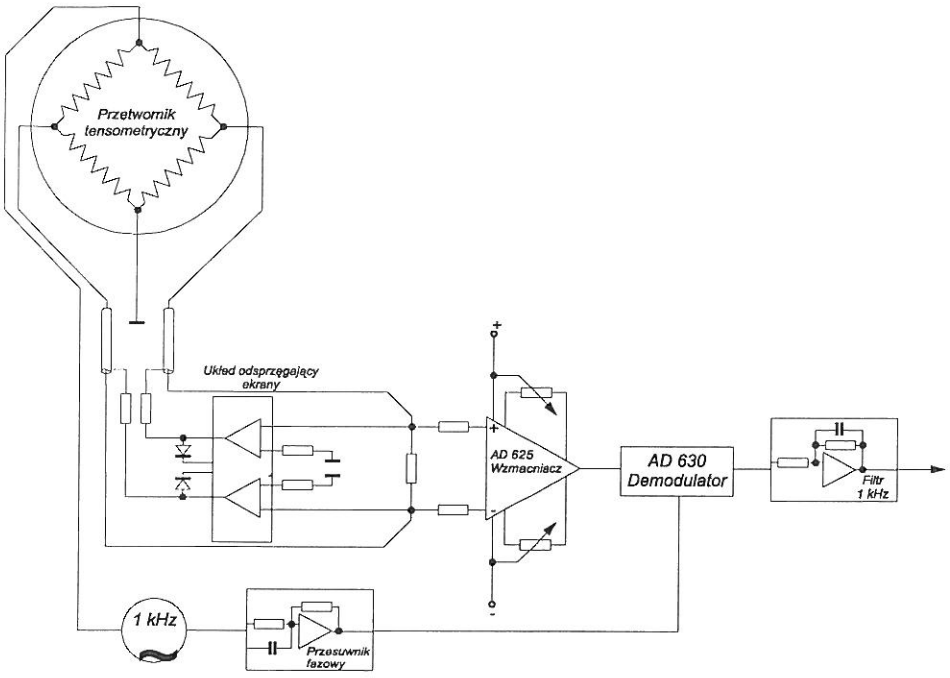
3.6 Układ kondycjonowania sygnałów pomiarowych

Uzyskane z mostka tensometrycznego sygnały są rzędu mikrovoltów. Rejestracja takich napięć rodzi istotne problemy, ponadto ich przesyłanie na odległość 1 - 1,5 m. Wiąże się z możliwością powstania zakłóceń i szumów, takich jak :

- zakłócenia pochodzące od lokalnych pół elektromagnetycznych;
- efekty termoelektryczne, połączenia lutowane działają jak termopary;
- zjawiska elektrochemiczne, tworzenie się mikroogniw na styku dwóch różnych metali (miedź -cyna);
- wahania napięcia zasilającego.

Efekty przytoczone powyżej mogą powodować powstawanie potencjałów , które w porównaniu do sygnałów mierzonych są znacząco duże. Ze względu na niski poziom sygnału mierzonego konieczne jest zastosowanie wzmacniacza o dużym wzmocnieniu, rzędu 1000. W celu wyeliminowania wpływu niekorzystnych zjawisk opisanych powyżej zaprojektowano układ wzmacniacza zmiennoprądowego z zasilaniem mostka tensometrycznego falą napięcia 1 kHz oraz demodulatorem. Tego typu układ, działający na zasadzie modulacji częstotliwości FM jest nieczuły na uboczne efekty napięciowe.

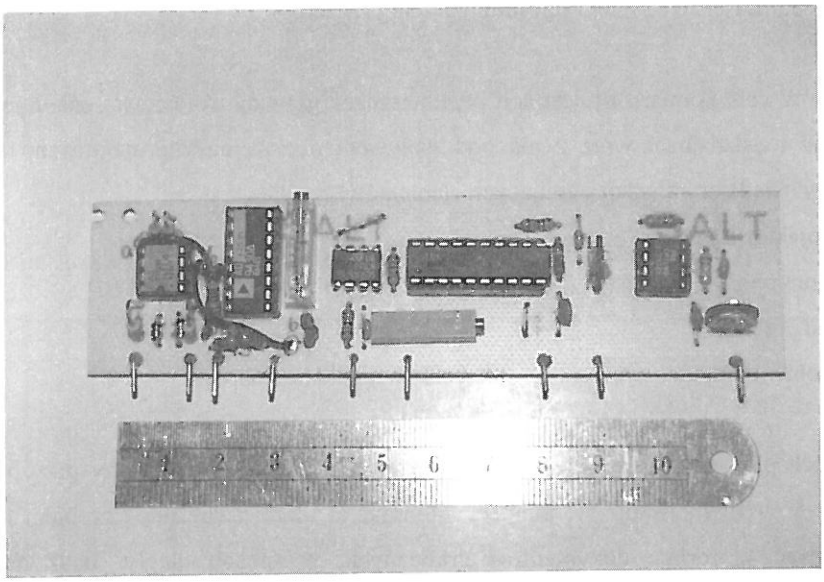
Sygnał z mostka tensometrycznego jest wzmacniany a następnie podlega demodulacji poprzez porównanie z odwróconym o 90 ° sygnałem wzorcowym. Na wyjściu demodulatora otrzymamy sygnał napięciowy proporcjonalny do zmian częstotliwości podnośnej wynikających ze zmian rezystancji gałęzi mostka. Dodatkowo stosuje się filtr częstotliwości podnośnej, w rozwiązaniu autora jest to filtr aktywny o wzmocnieniu neutralnym.



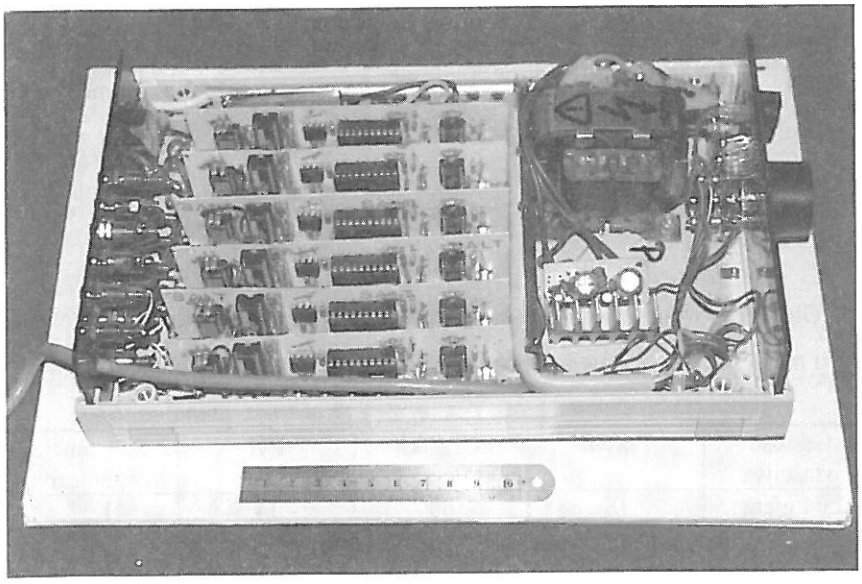
Rys. 3.5. Schemat wzmacniacza tensometrycznego.

W celu wyeliminowania innego efektu ubocznego, jakim jest wpływ pojemności przewodów ekranowanych (między przewodem a jego ekranem tworzy się kondensator, którego ładunek rozładowuje się , zakłócając sygnał mierzony) zastosowano układ odsprzęgania ekranu. Na rysunku pokazano schemat ideowy toru wzmacniacza dla pojedynczego kanału. Głównym podzespołem jest precyzyjny, niskoszumowy wzmacniacz zmiennoprądowy AD 625, produkcji Analog Devices, USA.

Dla każdego kanału pomiarowego wykonano wzmacniacz na osobnej płytce , całość zmontowano przy użyciu szybkozłączek stosowanych w układach avioniki lotniczej. Wzmacniacze wraz z zasilaczem symetrycznym +/- 12 V oraz kontrolnym przyrządem odczytowym umieszczono w szczelnej obudowie. Połączenia pomiędzy przetwornikami i układem kondycjonowania sygnału zrealizowano przy pomocy przewodów ekranowanych zakończonych wtykami firmy Canon. Przewidziano polową wersję urządzenia poprzez zamontowanie gniazda zasilania z akumulatora przenośnego.



Fot. 3.3 Wzmacniacz tensometryczny – widok zmontowanego modułu (pojedynczy kanał).



Fot. 3.4 Sześciokanałowy system kondycjonowania sygnałów pomiarowych.

3.7 Laserowy system rejestracji przemieszczeń.

W celu pomiaru i rejestracji przemieszczeń głowicy trójosiowej znajdującej się w glebie i osiadającej wraz z nią pod wpływem obciążenia zaprojektowano system laserowy składający się z następujących elementów:

- projektor laserowy;
- ekran półprzezroczysty ;
- kamera CCD;
- osobny komputer wraz oprogramowaniem do analizy obrazu.

Ruch plamki światła laserowego na ekranie jest stale rejestrowany przy pomocy kamery i archiwizowany w pamięci komputera. Zarejestrowane przebiegi można odczytywać w formie dokumentów graficznych, w sposób ciągły, bądź też jako współrzędne poszczególnych położeń plamki na ekranie. Projektor odwzorowuje ruch odwrotny głowicy jako, że ramię łączące uchwyt projektora i głowicę jest podparte w punkcie, którego położenie dobrano tak, by uzyskać geometryczne przełożenie 2:1 (1 mm przemieszczenia głowicy to 2 mm przemieszczenia plamki na ekranie. Ekran wykonany z kalki technicznej o podwyższonej jakości posiada nadruk współrzędnych i jest sztywno zamocowany do ramy monolitu za pośrednictwem elastomerów w celu uniknięcia drgań.

3.8 Materiał badawczy

Glebę lessową do badań laboratoryjnych pobrano z poletka doświadczalnego w miesiącu maju, przy czym miejsce poboru wybrano w obszarze aktualnej uprawy.

Gęstość właściwa	Piasek	Cząstki Ilaste	Pył	Substancje organiczne
2.64 g/cm^3	18	68	14	1.53

Tabela 3.1 Zawartość procentowa frakcji w glebie lessowej

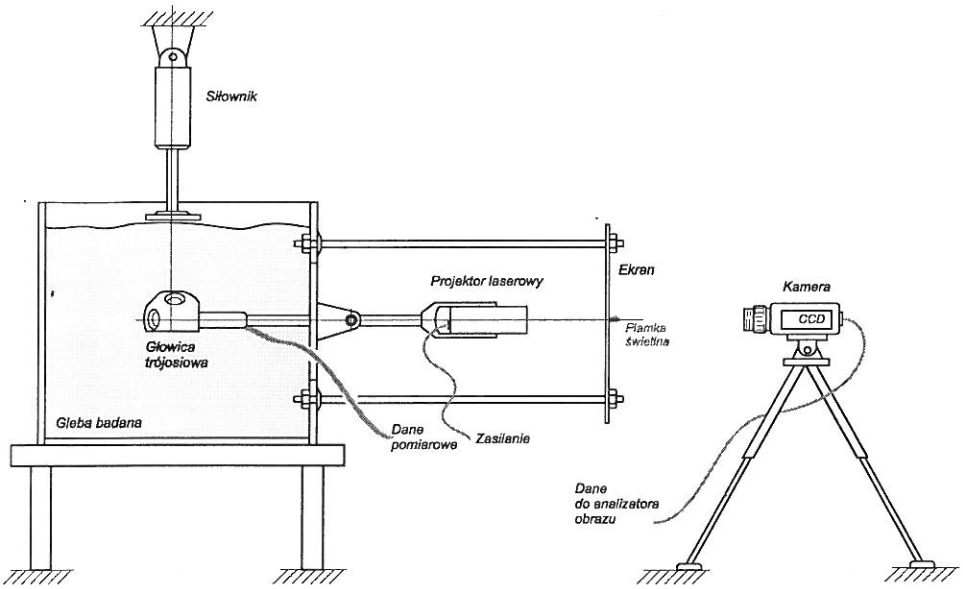
Po przewiezieniu w stanie luźnym do laboratorium przeprowadzono czynności przygotowawcze polegające na:

- rozdrobnieniu gleby przy użyciu narzędzi ręcznych;
- równomiernym nawilgoceniu za pomocą rozpryskiwacza, wilgotność wagowa wynosiła 11 %;
- umieszczeniu gleby w zamkniętym , hermetycznym pojemniku na okres 14 dni w celu wyrównania wilgotności.

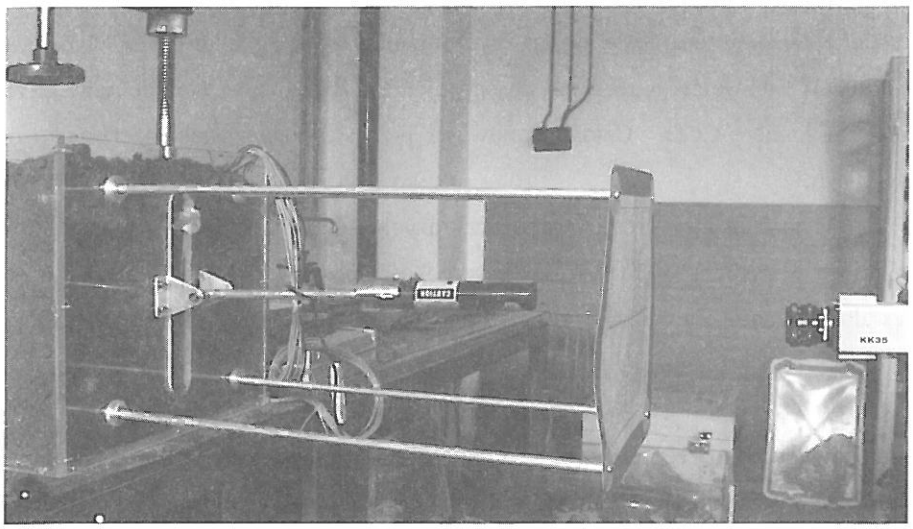
Tak przygotowaną glebę umieszczano porcjami o jednakowej masie w skrzynce monolitu o wymiarach 40×40×40 cm zagęszczając równomiernie układane warstwy pod naciskiem ok. 10-20 kPa. Po ułożeniu warstwy 15 cm od górnej krawędzi monolitu umieszczano głowicę pomiarową wraz z wyposażeniem dodatkowym. Następnie, szczególnie starannie układano kolejne warstwy gleby. Miało to na celu umożliwienie optymalnego kontaktu na styku czujnika z glebą. Metoda ta zdała egzamin, uzyskano znaczną poprawę lecz należy poczynić uwagę, iż w ten sposób nie można przeprowadzać badań gleby w stanie nienaruszonym.

Instalacje głowicy pomiarowej przeprowadzano w trakcie przygotowania gleby. Pozostałe elementy aparatury pomiarowej montowano po całkowitym wypełnieniu monolitu. W uchwycie mocowano laser półprzewodnikowy, następnie umieszczano ekran oraz kamerę CCD. Całość stanowiska przedstawiona została na rysunku oraz fotografiach.

Obciążanie gleby realizowano przy użyciu siłownika zakończonego stemplem metalowym o średnicy 100 mm. Zakres prędkości posuwu stempla regulowano od 1 mm/s do 40 cm/s. Za każdym razem zagłębiano stempel na jednakowa głębokość wynikającą z maksymalnego posuwu siłownika, stąd też czas pomiaru był różny dla różnych prędkości posuwu. Wykonano serię 5 powtórzeń dla 5 prędkości posuwu. Po każdorazowym pomiarze opróżniano monolit i przygotowywano glebę do badania z zachowaniem zaleceń metodycznych powyżej opisanej procedury.



Rys. 3.6 Stanowisko do badań naprężeń i przemieszczeń w glebie.



Fot. 3.5 Stanowisko badawcze do wyznaczania naprężeń i przemieszczeń w glebie. Projektor laserowy i kamera.

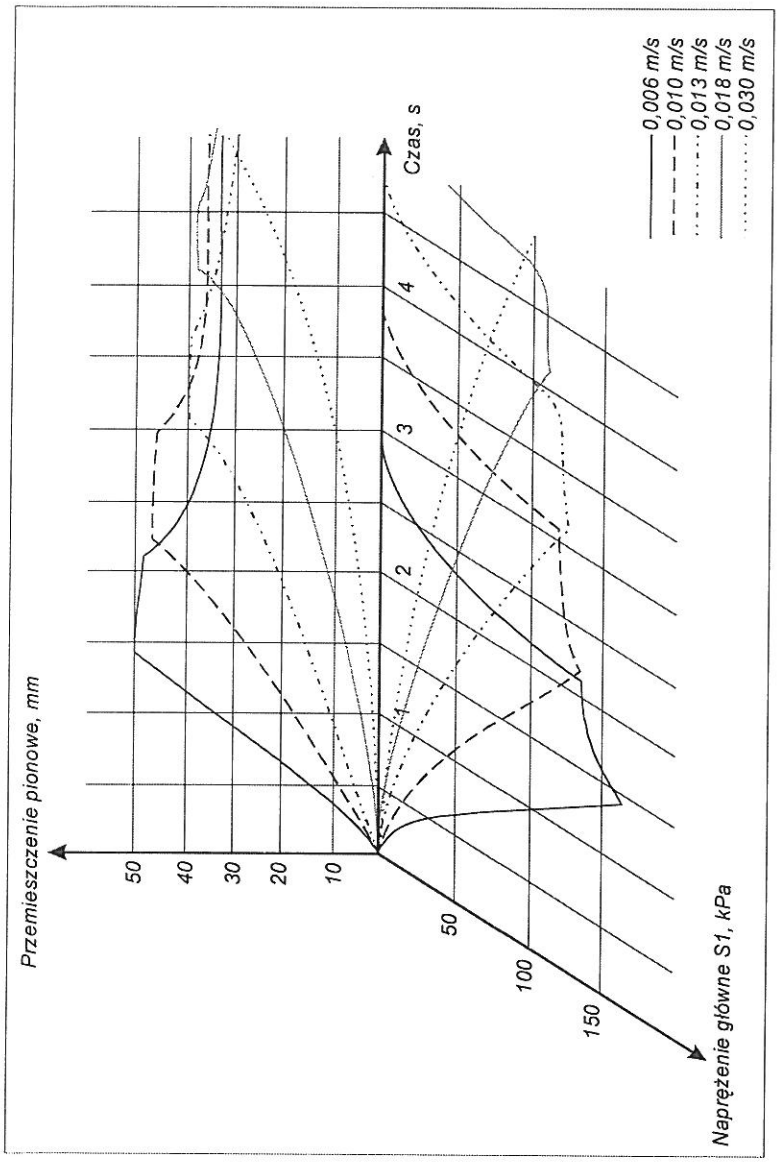
3.9 Wyniki badań z komentarzami

Prędkość obciążania wpływa na kształt przebiegów naprężenia głównego: widoczna jest korelacja prędkości stempla i nachylenia zbocza krzywej S1. Występuje faza relaksacji naprężeń, zaś na intensywność tego zjawiska wpływa wartość prędkości obciążania. Regresywny charakter przebiegu dla małych prędkości obciążania to efekt stopniowej konsolidacji i wzmocnienia struktury gleby. Wartości maksymalne naprężenia głównego S1 oraz naprężeń MNS i OCTSS mieszczą się w dość wąskim zakresie: 130-160 kPa dla S1, 60-80 dla MNS oraz 70-100 dla OCTSS. Wynika to z faktu, iż obciążenie następowało ze stałą w przybliżeniu siłą, zaś zmianę wartości maksymalnej oraz kształt przebiegu (nachylenie krzywej) determinowała prędkość odkształcania pionowego. Wartości naprężeń maleją aż do zera po ustąpieniu działania obciążenia . Zjawisko to świadczy o znaczącym wpływie sztywności zastosowanych membran czujników tensometrycznych: jest ona większa od naprężeń wewnętrznych w glebie co powoduje, że membrany powracają do położenia neutralnego mimo otaczającej gleby, która zostaje dodatkowo odkształcona sztywnością membrany.

Należy podkreślić łatwiejszą możliwość uzyskiwania kontaktu między membranami przetworników a glebą w porównaniu do eksperymentu , w którym stosowano metodykę wprowadzania głowicy poprzez kanał w bocznej ścianie monolitu. Naprężenia S2 i S3 uzyskiwały wartości dodatnie, aczkolwiek małe w porównaniu do S1 (25:1). Małe wartości naprężeń działających w płaszczyźnie poziomej mogą być wynikiem metody umieszczania głowicy w glebie oraz sposobu obciążania: poruszający się pionowo stempel generuje quasi-jednokierunkowy stan naprężeń. Głowica przemieszcza się z masą gleby, której granice wyznaczone są średnicą stempla i gabarytem przetwornika. W badaniach przyszłościowych konieczne jest wyznaczenie przemieszczeń lokalnych gleby pozostającej w bezpośredniej bliskości z głowicą.

Zastosowana metoda badawcza umożliwiła rejestrację przebiegu przemieszczenia z prędkością 25 próbek w ciągu sekundy. Wynika to z prędkości rejestracji obrazu kamerą CCD pracującej w standardzie telewizyjnych. Należy

zaznaczyć, iż przyjęta metoda umożliwia wprawdzie pomiar i rejestracją przemieszczeń w dwóch kierunkach na płaszczyźnie



Rys. 3.8 Zależność naprężenie S1 – przemieszczenie pionowe głowicy – czas dla różnych wartości prędkości obciążania. Gleba lessowa.

pionowej, jednak w doświadczeniu wykonanym w ramach pracy rejestrowano jedynie przemieszczenia w kierunku pionowym. Przemieszczenia w drugim kierunku uznano za pomijalnie małe.

Wartości przemieszczenia w kierunku pionowym mieściły się w zakresie 35-50 mm przy jednakowym maksymalnym skoku tłoka obciążającego wynoszącym 65 mm. Wynika stąd zależność odkształcenia pionowego gleby od prędkości odkształcania. Zostało to potwierdzone licznymi badaniami, gdy wyznaczano zagęszczenie gleby w wyniku ugniatania stemplem wprawianym w ruch o zróżnicowanej prędkości posuwu pionowego. Kształt krzywej, będącej wykresem zależności przemieszczenie pionowe-czas świadczy o istnieniu prostej korelacji prędkość narastania przemieszczenia-prędkość odkształcania. Stwierdzono występowanie relaksacji naprężeń: w momencie przytrzymania stempla (przemieszczenie ujemne rzędu kilku %), zaś po ustaniu działania obciążenia zewnętrznego (wycofanie stempla) głowica wykonuje ruch przeciwny, ok. 20% maksymalnej wartości przemieszczenia pionowego, przy czym intensywność tego zjawiska wzrasta wraz ze wzrostem wartości prędkości obciążania.

Podczas analiz zależności przemieszczenie - czas dla większych wartości prędkości stwierdzono występowanie drgań w momencie zaprzestania działania obciążenia. Drgania mają charakter gasnący, a ich istnienie może wynikać zarówno z reakcji ośrodka glebowego jak i wymuszenia pochodzącego od zaworu ciśnienia (włącza się on w momencie przełączenia maszyny wytrzymałościowej). Należy tu podkreślić wysoką czułość urządzenia do pomiaru przemieszczeń, która może być w tym przypadku źródłem kłopotliwych w ocenie zjawisk dodatkowych.

3.10 Podsumowanie

Przedstawiona aparatura pomiarowa do badań naprężeń i przemieszczeń w układzie przestrzennym wykorzystano do wyznaczania stanu naprężeń w glebie pod obciążeniem. W konstrukcji zastosowano liczne rozwiązania autorskie, w tym czujniki naprężenia, układ kondycjonowania sygnału mierzonego, stanowisko do kalibracji. Jako

przetworniki naprężenia w glebie zastosowano tensometry na membranach metalowych, ze względu na wysoką odporność mechaniczna i prawidłową charakterystykę tego typu czujników. Przemieszczenia wyznaczano na podstawie analizy obrazów plamki świetlnej rejestrowanych przez kamerę CCD. Zakres pomiarowy czujników naprężenia oraz systemu rejestracji przemieszczeń odpowiada wartościom spotykanym w warunkach rzeczywistych, pod kołami pojazdów mechanicznych, których ruch odbywa się po nawierzchni gleby. Pomiary laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku symulującym naciski koła. Wykazały one prawidłowość funkcjonowania aparatury, zgodnie z przyjętymi założeniami. Ważna cechą prezentowanego systemu jest możliwość przebudowy i adaptacji do badań polowych w warunkach rzeczywistych

4. SYSTEM POMIAROWY DO BADAŃ STANU NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ POD KOŁAMI POJAZDÓW

4.1 Wprowadzenie

W poniższym rozdziale przedstawiamy kolejny etap prac metodycznych nad wykorzystaniem opracowanych urządzeń do badań polowych oraz oryginalne opracowania systemu pomiarowego z przykładowymi wynikami i sugestiami dalszych prac w tym zakresie.

Badania rozkładu naprężeń i odkształceń w glebie pod kołami pojazdów mechanicznych prowadzone w warunkach polowych charakteryzują się szczególna wartością poznawczą. Przebiegi naprężeń i odkształceń w glebie wyznaczone w warunkach rzeczywistych obciążeń występujących pod kołem pojazdu stanowią źródło danych przydatnych do parametryzacji modeli zagęszczenia gleby oraz równań opisujących trakcyjne osiągi pojazdu terenowego. Prowadzenie takich eksperymentów wymaga odpowiedniego przygotowania aparatury pomiarowej oraz obrania swoistej strategii badawczej. Laboratoryjne stanowiska pomiarowo-badawcze adaptowane bezpośrednio do badań polowych zazwyczaj nie spełniają stawianych wymagań. Niska odporność na oddziaływanie czynników zewnętrznych takich, jak wilgoć, pył, promieniowanie UV zmniejszają znacznie operacyjne zdolności aparatury laboratoryjnej. Kompleksowe systemy pomiarowe zabudowane w laboratorium sprawiają problemy eksploatacyjne w polu ze względu na liczbę podzespołów, połączenia między nimi oraz konieczność zapewnienia stabilnych warunków pracy. Również gabaryty i masa powszechnie stosowanych podzespołów stanowisk badawczych, szczególnie komputerów są nie do przyjęcia ze względu choćby na trudności transportowe.

4.2 Metodyka badawcza

Podstawowe cechy wyróżniające aparaturę do badań polowych to:

- odporność wszystkich podzespołów na szkodliwe działanie wilgoci, pyłu i promieniowania, w pewnym zakresie również na udary mechaniczne i drgania, mała wrażliwość na zmiany temperatury otoczenia;
- minimalna liczba podzespołów, wysokosprawne połączenia elektryczne zabezpieczone przed przypadkowym rozłączeniem, przewody elektryczne zabezpieczone przed przetarciem czy przecięciem, małe gabaryty i masa;
- niezależność od stacjonarnych źródeł energii elektrycznej, pełna autonomiczność funkcjonowania liczona na czas przewidywanego eksperymentu z odpowiednio dużym zapasem.

Innym , nie mniej ważnym czynnikiem jest opracowanie szczegółowego planu przeprowadzania eksperymentów w warunkach polowych , ułatwiającej przygotowywanie i dokonywanie pomiarów. Na podstawie własnych doświadczeń oceniono, że prawidłowe rozplanowanie czynności w ramach eksperymentu pozwala skrócić czas wykonania nawet do 30%. Jest to niezwykle istotne w sytuacji, gdy program badań zakłada wykonanie dużej liczby powtórzeń. Można wówczas zaoszczędzić czas oraz środki finansowe przeznaczone na obsługę eksperymentu. Ponadto należy zdawać sobie sprawę z faktu, iż prowadzenie badań w warunkach polowych jest ściśle uzależnione od warunków atmosferycznych, co skłania do maksymalnie sprawnego wykorzystania okresu trwania dobrej pogody .

W tej części pracy opisana zostanie konwersja stanowiska badawczego na wersję polową oraz założenia strategii badawczej eksperymentu polowego. Trafność założeń konstrukcyjnych oraz metodologicznych przedyskutowana zostanie na przykładzie wyników testowych badań polowych.

4.3 Koncepcja polowego stanowiska badawczego.

Laboratoryjne stanowisko pomiarowe do wyznaczania naprężeń i przemieszczeń w glebie pod obciążeniem poddane zostało analizie w celu ustalenia zmian konstrukcyjnych niezbędnych do przystosowania aparatury do badań polowych. Stwierdzono co następuje:

- rozbudowany układ kondycjonowania sygnałów pomiarowych jest nieodpowiedni w warunkach polowych;
- komputerowe stanowisko sterowania i rejestracji danych pomiarowych nie posiada cechy niezależności od stacjonarnych źródeł zasilania;
- montaż systemu wsporczego dla projektora laserowego oraz kamery w wersji laboratoryjnej nie zdaje egzaminu w warunkach polowych, gdyż niemożliwe jest precyzyjne ustawienie osi optycznej kamery i lasera;
- pozytywnie oceniono pyło- i wodowszczelność oraz odporność mechaniczną elementów wchodzących w bezpośredni kontakt z glebą.

Wynikły stąd zasadnicze kierunki zmian konstrukcyjnych w istniejącym zestawie. Przede wszystkim należało zastąpić istniejący układ wzmacniaczy tensometrycznych. Oprócz nieporęczności użycia w warunkach polowych układ ten jest wrażliwy na zakłócenia zewnętrzne i nieodporny na przegrzanie. Kompleksowy system sterowania i rejestracji danych pomiarowych zbudowany na bazie stacjonarnego komputera PC zdecydowano zastąpić urządzeniem klasy PC Notebook z odpowiednim oprzyrządowaniem i oprogramowaniem. Problem stanowił system do rejestracji obrazu , który wymaga stosowania specjalnych podzespołów PC nie współpracujących z komputerami klasy Notebook. Istotnym elementem stanowiska jest konstrukcja wsporcza układu kinematycznego do wyznaczania przemieszczeń i odkształceń w glebie. Istotnym kryterium jest w tym przypadku sztywność układu, gdyż nawet minimalne drgania projektora, czy ekranu względem kamery powodują zakłócenia pomiaru. Ponadto myślą przewodnią w toku projektowania zmian konstrukcyjnych była prostota konstrukcji oraz łatwość i niezawodność użycia.

4.4 Mechatroniczny przetwornik naprężenia w glebie

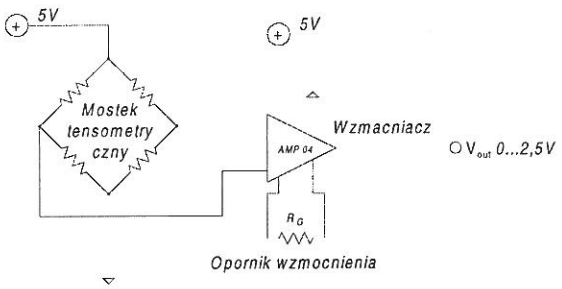
Doświadczenia z wstępnych prób układu pomiarowego naprężeń w glebie wykorzystano w opracowaniu doskonalszego pod względem parametrów pracy i znacznie prostszego w budowie czujnika ciśnienia . Główne problemy pojawiające się w trakcie prób układu pomiarowego polegały na

- zbyt dużej wrażliwości na zewnętrzne sygnały zakłócające, mimo zastosowania opisanych układów elektronicznych zabezpieczeń oraz wysokogatunkowego przewodu ekranowanego, rejestrowane przebiegi napięć mierzonych miały postać fali quasi sinusoidalnej, na którą nakładało się widmo mierzonej wielkości;
- kłopotliwej obsłudze urządzeń pomiarowych, dużej liczbie przewodów i konektorów - taka sytuacja prowadzi prawie zawsze do pomyłki w połączeniach, a w najlepszym przypadku stawia przed obsługującym dodatkowe wymagania szczególnej uwagi i ostrożności, co w przypadku badań polowych jest niewygodne.

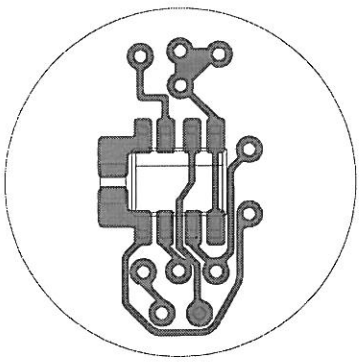
Pomysł zastosowania techniki mechatronicznej (*precision* ***mecha****nics and microelec****tronics***) polegał na zabudowie układu kondycjonowania mierzonego sygnału z mostka tensometrycznego w korpusie czujnika, w bezpośredniej bliskości końcówek tensometru. Zasadnicze korzyści wynikały same z siebie:

- minimalna odległość końcówek tensometru i układu wzmacniacza to możliwość rezygnacji ze skomplikowanych układów przeciwzakłóceniowych, ekranów, filtrów, również zasilanie tensometru można realizować z źródła prądu stałego, mniejsza jest też wrażliwość układu na efekty termoelektryczne i elektrochemiczne na granicy dwóch metali (miedź -cyna -miedź), gdyż takich połączeń jest znacznie mniej, podsumowując : polepszenie parametrów pracy przy jednoczesnym uproszczeniu konstrukcji;
- bezpośrednia bliskość tensometru i wzmacniacza to z drugiej strony małe wymiary, w rozwiązaniu prototypowym czujnik kompletny miał wymiary ∅20×4 mm .

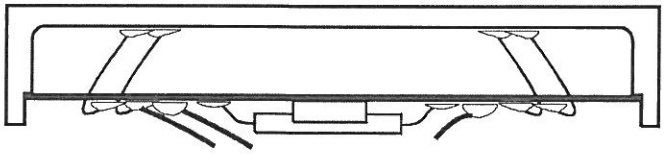
Realizację założeń konstrukcyjnych umożliwiło zastosowanie układu wzmacniacza pomiarowego AMP 04 (Analog Devices) w specjalnej obudowie do montażu powierzchniowego. Ze względu na wymogi precyzyjnego montażu powierzchniowego SMD zdecydowano się zastosować klej przewodzący do połączeń na płytce montażowej. Technologię tą wprowadziła w roku 1996 firma Tra-Con®, USA. Umożliwia łączenie bardzo precyzyjnych obwodów bez obawy o przegrzanie, możliwe w przypadku lutowania.



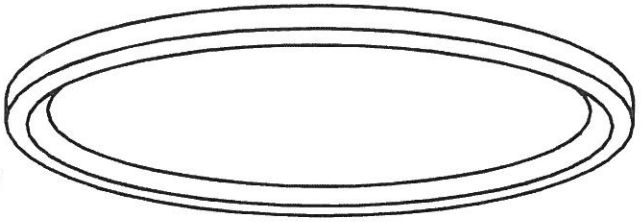
R_G	Wzmocnienie
100Ω	10 000
1 kΩ	100
10 kΩ	10



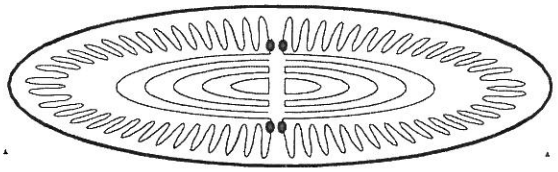
Rys.4.1 Schemat elektryczny oraz układ połączeń na płytce montażowej wzmacniacza tensometrycznego.



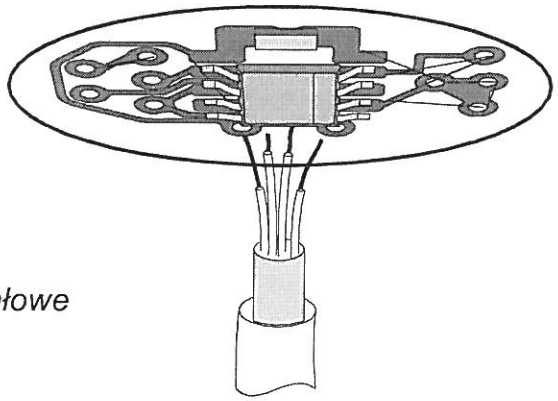
Przekrój poprzeczny



Membrana



Tensometr



Wzmacniacz

Przewody stgnałowe

Rys. 4.2 Schemat konstrukcji mechatronicznego przetwornika naprężenia w glebie

Układ AMP 04 zawiera wzmacniacz różnicowy o wysokiej impedancji wejściowej i regulowanym wzmocnieniu w zakresie od 1 do 1000. Wzmocnienie ustala się jednym elementem zewnętrznym, rezystorem, którego opór dobiera się na podstawie tabeli dostarczonej przez producenta. Rezystor wzmocnienia jest jedynym elementem zewnętrznym dla typowej aplikacji. W przypadku zastosowania rezystora SMD całość układu wzmacniającego mieści się w obudowie czujnika tensometrycznego.

Przedstawiony na rysunku przetwornik wymiarami nie różni się od bazowego czujnika tensometrycznego, dzięki czemu możliwe jest wbudowanie go w gniazdo głowicy trójosiowej bez jakichkolwiek zmian konstrukcyjnych. Takie rozwiązanie pozwoliło na całkowitą eliminację dotychczasowego układu kondycjonowania sygnałów pomiarowych:

- bezpośrednia bliskość tensometru i wzmacniacza nie wymaga stosowania przewodów ekranowanych, a co za tym idzie także układu odsprzęgania ekranów;
- możliwe jest zasilanie tensometru prądem stałym, wymagania dotyczące odporności na zakłócenia zewnętrzne oraz efekty termoelektryczne są nieistotne, gdyż długość przewodów łączących tensometr ze wzmacniaczem oraz liczba połączeń lutowanych są minimalne (nie występują elektryczne połączenia rozłączne, które są źródłem dodatkowych szumów w przypadku rozwiązania pierwotnego);
- eliminuje się takie podzespoły, jak generator 1 kHz, przesuwnik fazowy, demodulator i filtr częstotliwości podnośnej.

Z powyższego wynika, że mechatroniczny przetwornik naprężenia w glebie spełnia podwójną rolę: przetwornika wielkości mierzonej oraz układu kondycjonowania danych pomiarowych. Na wyjściu wzmacniacza otrzymujemy stabilny sygnał napięciowy, którego rejestracja możliwa jest przy użyciu standardowych układów przetwornikowych. Bardzo istotną zaleta układu AMP 04 jest zasilanie jednoimienne + 5V, co w odróżnieniu do dotychczas stosowanych wzmacniaczy różnicowych wymagających zasilania symetrycznego +/- 12 lub nawet 18 V sprawia, że układ ten jest szczególnie praktyczny w urządzeniach przenośnych.

4.5 Konstrukcja systemu pomiarowego przemieszczeń i odkształceń w glebie

Ustawienie i wypoziomowanie poszczególnych podzespołów stanowiska badawczego wymaga zastosowania specjalistycznej konstrukcji wsporczej. Jako podstawę zastosowano masywną płytę stalową z przytwierdzonymi bagnetami do kotwiczenia w glebie. Do podstawy montowane są poszczególne elementy konstrukcji: 2 sztywne ramiona wysięgników, wykonane z lekkiego metalu w formie profilu zamkniętego oraz kolumny do mocowania ekranu. Na końcach wysięgników znajdują się gwintowane gniazda do przykręcenia układu głowic przegubowych oraz kamery. Zadaniem głowic przegubowych jest umożliwienie ruchu sztywnych ramion projektorów laserowych. Ruch ten odbywa się w płaszczyźnie pionowej, w zakresie +/- 30°. Geometria zabudowy układu ramion projektorów ustala przełożenie optyczne układu, które może się mieścić w zakresie 0.7 – 1.3. Dodatkowo możliwa jest regulacja rozstawu pionowego głowic przegubowych w zakresie 10-15 cm. Zastosowanie drugiego projektora laserowego umożliwia jednoczesny pomiar przemieszczenia głowicy trójosiowej oraz zagłębienia opony, możliwe jest zatem wyznaczanie odkształcenia pionowego gleby znajdującej się między głowicą a oponą. Istotną cechą prezentowanego systemu jest możliwość dokonywania pomiarów bez konieczności wykonywania wykopu i szalowania go. Wystarczy bowiem tylko wybranie warstwy wierzchniej gleby do głębokości 25-30 cm. Narzuca to sposób umieszczania głowicy w glebie – jest ona wprowadzana pionowo z góry, a następnie obsypywana, co sprawia, że natychmiastowe pomiary będą miały miejsce w glebie o naruszonej strukturze. Takie rozwiązanie uznano za prawidłowe, ze względu na techniczna niemożliwość wprowadzenia głowicy przez otwór w bocznej ścianie profilu glebowego, gdy głębokość posadowienia głowicy ma wynosić 10-15 cm. Proponuje się natomiast prowadzenie pomiarów na 2-3 dni po osadzeniu głowicy. Jak bowiem wskazują doświadczenia autora, w przeciągu takiego czasu wytrzymałość gleby po naruszeniu struktury powraca w 80 % do stanu pierwotnego. Problem ten będzie dyskutowany w akapicie o strategii eksperymentu.

4.6 Układ rejestracji obrazu, sterowania i akwizycji danych pomiarowych

Zastosowanie komputera przenośnego wyeliminowało możliwość użycia posiadanych kart przetwornikowych, w tym karty pomiarowej o 64 kanałach oraz karty video, sprzęgającej komputer z kamerą CCD. Poszukiwania optymalnych rozwiązań prowadzono mając na względzie możliwość zastosowania kart PCMCIA, które w połączeniu z komputerem Notebook zapewniają szczególnie korzystne rozwiązanie systemowe. Jednocześnie, po gruntownej analizie doświadczeń nabytych w trakcie badań laboratoryjnych zdecydowano się uprościć tor rejestracji i analizy obrazu. Wynikły stąd następujące zmiany:

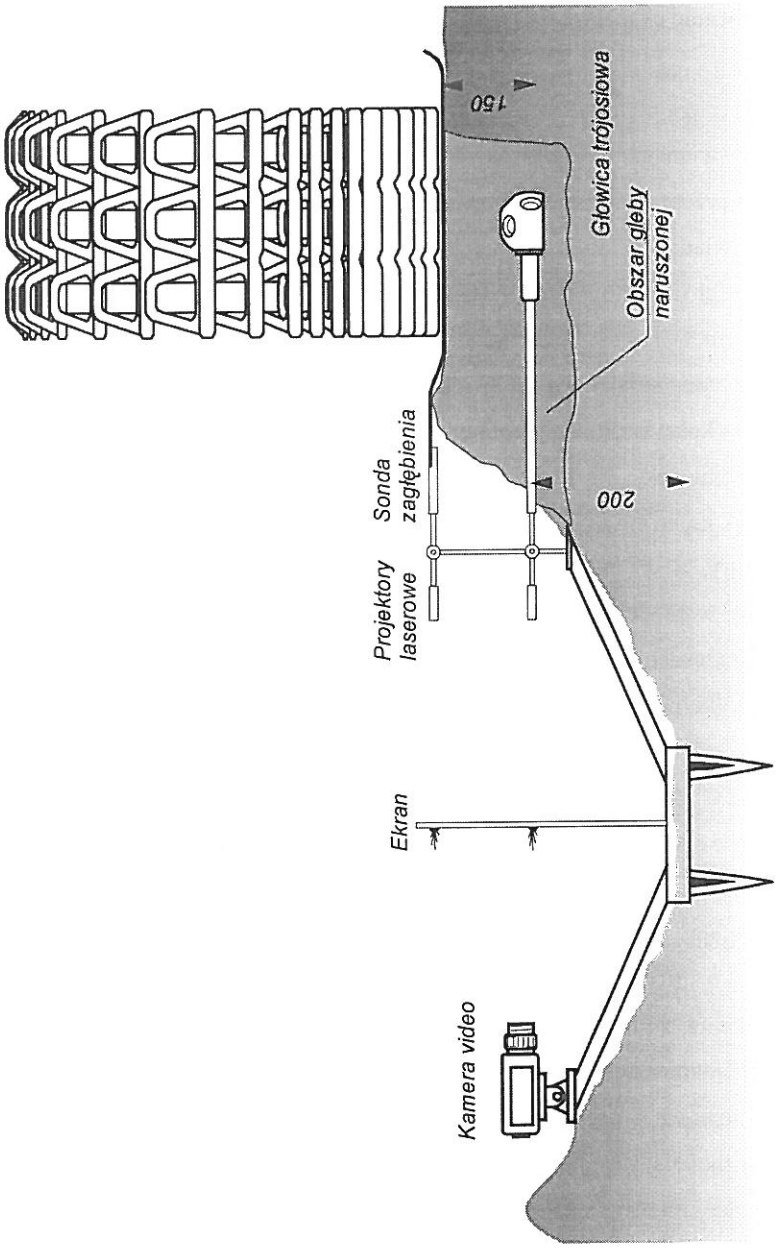
- użycie lasera półprzewodnikowego zasilanego z baterii 3V zamiast lasera zasilanego z sieci;
- zastąpienie kamery CCD z komputerowym układem rejestracji obrazu klasyczna kamerą video, w przyszłości celowe będzie zastosowanie kamery cyfrowej;

Zastosowanie miniaturowego lasera o zasilaniu bateryjnym zredukowało znacznie liczbę podzespołów systemu oraz zmniejszyło wymiary i masę. Jednocześnie stwierdzono, że nieznaczne obniżenie parametrów optycznych projektora nie wpłynie znacząco na dokładność wyników. Dodatkowo nowe rozwiązanie jest tańsze ok. 10-krotnie od pierwotnie stosowanego.

Zastosowanie kamery video V8 podyktowane było uzasadnioną koniecznością rezygnacji z systemu rejestracji obrazu, w skład którego wchodził komputer zasilany z sieci. Niedogodności związane z analogowym sposobem rejestracji obrazów w formie filmu video oraz konieczność konwersji przed obróbka cyfrową wydłużają wprawdzie czas obróbki wyników, jednak pełna autonomiczność kamery w warunkach polowych, jej poręczność i niezawodność to cechy nie do podważenia. Zastosowanie kamery cyfrowej będzie w przyszłości rozwiązaniem bezkompromisowym i zapewne wyprze dotychczas stosowane. Najkorzystniejsze będzie zastosowanie kamery z rejestracją obrazu na mini twardym dysku, zbudowanym w formie karty PCMCIA. Na takim nośniku można zarejestrować ok. 30 minut ciągłego filmu, lub, co wydaje się praktyczniejsze 2000

pojedynczych migawek. Tego typu rozwiązania są już ogólnodostępne, jednak póki co, ich cena nie koresponduje z przyjętą przez autora ideą minimalnych kosztów aparatury.

Rejestracja danych pomiarowych naprężenia zrealizowana przy użyciu komputera Notebook z kartą PCMCIA sprawdza się doskonale w warunkach polowych. Dostępne obecnie modele kart pomiarowych bazujących na standardzie PCMCIA umożliwiają zestawienie systemu w zależności od szczegółowych wymagań eksperymentu. W rozwiązaniu prototypowym zastosowano kartę o 16 kanałach i prędkości próbkowania 100 kHz, rozdzielczość karty wynosi 16 bitów. Komunikację z układem pomiarowym, sterowanie pomiarami, ustawienia programowe zapewnia pakiet Genie2.11, który pozwala na tworzenie indywidualnych aplikacji programowych w zależności od konkretnych zastosowań i programów badawczych. Obróbka danych pomiarowych jest możliwa z użyciem typowych programów naukowo-inżynierskich, dzięki szerokiemu wachlarzowi formatów zapisu danych.



Rys. 5.3 Polowe stanowisko badawcze do wyznaczania naprężen i odkształceń w glebie pod kołem

4.7 Przygotowanie eksperymentów polowych

Badania z użyciem materiałów o tak wysokiej niestabilności właściwości jakim, jest gleba rolnicza wymaga przeprowadzenia dokładnych analiz statystycznych. Konieczne jest zatem przeprowadzenie odpowiedniej liczby powtórzeń eksperymentu. O ile w przypadku doświadczeń laboratoryjnych problem sprowadza się zasadniczo do wzrostu czasochłonności i kosztów doświadczenia, to w badaniach polowych mamy do czynienia ze znaczącym wpływem warunków zewnętrznych na przebieg eksperymentu. Należy zatem dążyć do sprawnego przygotowania eksperymentu, tak by okresy sprzyjającej pogody wykorzystać maksymalnie.

Przeprowadzenie ok. 30 powtórzeń na obszarze badanego pola musi się odbywać w okresie jak najkrótszym ze względu na zmiany właściwości gleby związane z wahaniami temperatury, a co za tym idzie zmianami wilgotności gleby. Dokonanie wszystkich pomiarów w przeciągu kilku godzin nie jest możliwe bez zaangażowania odpowiedniej liczby przeszkolonych laborantów i pracowników pomocniczych oraz bez użycia kilku, czy kilkunastu kompletów stanowisk badawczych. Wiąże się to z olbrzymimi kosztami, które zasadniczo przekraczają możliwości finansowe przeciętnych projektów badawczych. Z drugiej strony, prowadzenie badań w dużej rozciągłości czasowej to nie tylko dodatkowe koszty wynikające z czasochłonności, a przede wszystkim trudne do oszacowania niedokładności pomiarowe wynikające z ciągłych zmian właściwości gleby pod wpływem czasu (aging), cyklicznych zmian polowej zawartości wody, zmian strukturalnych związanych z wysychaniem warstwy wierzchniej na skutek nasłonecznienia, zmian struktury wprowadzanych przez wzrost roślin. Zmiany właściwości gleby charakteryzują się wysoką dynamiką oraz dużym zakresem wartości przez co zaniedbywanie ich wpływu znacznie obniża wiarygodność wyników badań. Anderson badał zależność wytrzymałości gleby od czasu, jaki upływa od momentu opadów deszczu o znanej intensywności [2]. Po wystąpieniu obfitych opadów powrót do stanu pierwotnego trwać może do tygodnia. Zjawiska związane z intensywną ekspozycją słoneczną powodują wzrost wytrzymałości warstwy wierzchniej, zaś dynamika tego procesu może być wysoka także i w naszych szerokościach geograficznych .

Z powyższego wynikają podstawowe warunki prawidłowości prowadzenia eksperymentów polowych:

- okres prowadzenie badań nie dłuższy niż 7-10 dni;
- ustabilizowana pogoda, najkorzystniejsze są okresy wyżowe o niskich wahaniach temperatury dobowej i umiarkowanym zachmurzeniu (najlepiej ¼ - ½ Cu), umiarkowanym wietrze, bez opadów;
- prowadzenie badań o jednakowej porze dnia, najkorzystniej w godzinach rannych i późnym popołudniem.

Podane powyżej warunki meteorologiczne w Polsce występują w okresie maj-wrzesień, co znacząco utrudnia prowadzenie badań polowych w okresach prac uprawowych, których nasilenie występuje również w innych okresach. W przypadku prowadzenia badań związanych z uprawą gleby istotne jest zjawisko wzrostu wytrzymałości gleby w czasie. Procesy cementacji wzmacniają strukturę i powodują podnoszenie odporności mechanicznej gleby. Dla gleby piaszczystej oraz ciężkiej największa dynamika wzrostu wytrzymałości ma miejsce w okresie do 48 godzin po naruszeniu struktury wywołanej przez prace uprawowe. Zatem badania mechaniki gleby podczas uprawy musi odbywać się podczas lub bezpośrednio po zabiegach agrotechnicznych.

Dla każdego regionu konieczna jest dokładna analiza średnich warunków meteorologicznych pod względem liczby dni dobrej pogody, charakteru występujących zjawisk meteorologicznych, szczególnie opadów i mgieł siły i kierunków wiatru oraz zachmurzenia. W przypadku analizy wpływu intensywności nasłonecznienia dla naszego kraju można przyjąć wartość mocy powierzchniowej promieniowania słonecznego 500-800 w/m^2 w okresie kwiecień-październik. Dodatkowe informacje stanowią rodzaj prowadzonej uprawy oraz ewentualne nachylenie stoku.

Przeprowadzenie powtarzalnych badań w obrębie wybranego poletka doświadczalnego wymaga wyboru miejsc prowadzenia eksperymentu. Wymogi statystycznej metody analizy wyników determinują wybór tych miejsc. Przykładowe rozłożenie stanowisk pomiarów przedstawia Sołtyński, [36]. Dokładne wyznaczenie położenia poszczególnych punktów pomiarowych może sprawiać trudności, jeśli badane

pole jest dużych rozmiarów. Wówczas konieczne jest stosowanie specjalistycznych metod geodezji oraz pomoc wykwalifikowanego geodety. Podnosi to koszty i komplikuje realizację badań , dlatego też podjęto próby w celu opracowania innej metody wyznaczania punktów pola badawczego. Zastosowano metodę radionamierzania satelitarnego GPS – *Global Positioning System.* Polega ona na tym, że urządzenie odbiorcze, będące w miejscu, którego położenie jest poszukiwane, odbiera i analizuje sygnały radiowe wysyłane przez satelity. Wewnętrzny układ mikroprocesorowy oblicza współrzędne na podstawie namiarów względem trzech lub więcej satelitów. Urządzenie to pozwala na określenie położenia z dokładnością do kilku metrów.

4.8 Przykładowe zastosowania w polowych badaniach naprężeń i odkształceń w glebie pod kołami pojazdów mechanicznych

Prezentowana aparatura pomiarowa została użyta w testowych badaniach naprężeń i odkształceń w glebie pod kołami pojazdów mechanicznych. Próby przeprowadzono na poligonie doświadczalnym Wojskowego Instytutu Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku na gruntach piaszczystych . Wykorzystano samochód terenowy Tarpan Honker oraz pojazd-cysternę Jelcz. Rejestrowano przebiegi naprężeń i odkształceń w glebie przy różnych prędkościach jazdy: 5 km/h, 10 km/h, 15 km/h. Obciążenie kół dla samochodu Tarpan wynosiło 600/490 kg oraz dla samochodu Jelcz 1500/1350 kg (przód/tył). Przykładowe wyniki zamieszczono w Tabeli 4.1.

Tarpan			
	V = 5 km/h	V = 10 km/h	V = 15 km/h
Naprężenie S1[kPa]	3.53	7.35	6.34
Odkształcenie[mm]	40	65	80
Jelcz			
	V = 5 km/h	V = 10 km/h	V = 15 km/h
Naprężenie S1[kPa]	5.32	7.43	278.5
Odkształcenie[mm]	90	110	120

Zaskakująco niskie wartości maksymalne naprężenia S1 zmierzone pod kołami pojazdów można zinterpretować wpływem rodzaju badanej gleby na funkcjonowanie przetworników. Luźny piasek, o niskiej wilgotności wagowej nie zapewnia właściwego kontaktu z gładkimi powierzchniami membran przetworników. Mogą mieć miejsce intensywne przemieszczenia lokalne, także w bezpośredniej bliskości przetworników. Nasuwa to bardzo ważny wniosek: badania naprężeń w glebie pod obciążeniem wymagają doboru rodzaju przetworników z uwzględnieniem rodzaju badanej gleby. Zastosowane przetworniki funkcjonowały prawidłowo podczas badań z użyciem gleby lessowej, natomiast istnieje podejrzenie, iż w przypadku piasku konieczne są zmiany konstrukcyjne. Wstępnie założono, że naklejenie cienkich, gumowych membran na powierzchniach czujników polepszy kontakt czujnik-gleba. Będzie to praktycznie sprawdzane w dalszych etapach badań.

5. SYSTEM POMIAROWY DO WYZNACZANIA NAPRĘŻEŃ I PRZEMIESZCZEŃ W GLEBIE Z ZASTOSOWANIEM MINICZUJNIKÓW I TECHNIKI ŚWIATŁOWODOWEJ

5.1 Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale prezentujemy najnowsze stanowisko do badań naprężeń i przemieszczeń w glebie pod obciążeniem, opracowane w Instytucie Agrofizyki PAN. Naprężenia powstające w glebie na skutek zewnętrznego oddziaływania mechanicznego rozchodzą się i przyjmują różne wartości w punktach ośrodka. O sposobie i intensywności rozprzestrzeniania się naprężeń w glebie decyduje charakter obciążenia oraz właściwości ośrodka. Dlatego też rozkład naprężeń w dowolnym punkcie ośrodka może stanowić wielce przydatną informację do analiz mechaniki procesu odkształcania gleby. Pomiary ciśnień i przemieszczeń w punktach badanego ośrodka glebowego wymagają zastosowania przetworników, które wraz z całością toru pomiarowego winny spełniać wysokie wymagania:

- małe wymiary i kształt umożliwiający łatwe osadzanie w glebie;
- jednoczesność pomiaru dwóch wielkości: ciśnienia i przemieszczenia;
- odpowiednio niski próg czułości (rzędu kilku kPa) oraz duża rozdzielczość (0,1kPa/1mV);
- budowa systemu pomiarowego umożliwiająca zastosowanie w badaniach laboratoryjnych i polowych.

Jako spełnienie powyższych wymagań zaprojektowano, skonstruowano i zbudowano system pomiarowy, w którym zastosowano półprzewodnikowe przetworniki ciśnienia pracujące w układzie hydraulicznym z cieczą pośredniczącą oraz optoelektroniczny system pomiaru przemieszczeń z wykorzystaniem techniki laserowej i światłowodowej.

5.2 Budowa i zasada działania czujnika do pomiaru ciśnienia w glebie

Główne elementy, z których zbudowany jest czujnik ciśnienia pokazano na Rysunku 5.1, są to [24]:

- głowica pomiarowa z gumową membraną;
- kapilara;
- przetwornik ciśnienia;
- pompka mechaniczna .

Zasadniczą częścią czujnika ciśnienia jest głowica pomiarowa. Umieszcza się ją w glebie, w punkcie, w którym chcemy określić wartość ciśnienia, przy pomocy specjalnej prowadnicy, prostopadle do profilu glebowego. Kształt głowicy pomiarowej dobrano w ten sposób by pozwalał na łatwe wprowadzenie czujnika do gleby i jednocześnie by jak najmniej wpływał na pomiar ciśnienia. Konstrukcja głowicy umożliwia również umieszczenie w niej światłowodu do pomiaru przemieszczenia oraz cienkich linek wolframowych do wyciągnięcia głowicy z gleby.

W głowicy pomiarowej znajduje się zbiornik o objętości ok. 340 mm^3 wypełniony cieczą pośredniczącą i przykryty gumową membraną o grubości około 0,5 mm i średnicy 8 mm. Podczas pomiaru membrana styka się bezpośrednio z glebą. Zbiornik z cieczą pośredniczącą połączony jest przy pomocy metalowej, aczkolwiek giętkiej, kapilary o przekroju wewnętrznym około 0,5 mm i długości około 1,5 m, z piezoelektrycznym przetwornikiem ciśnienia. Przekrój wewnętrzny kapilary dobrano na drodze doświadczalnej w taki sposób by jej sztywność nie utrudniała instalacji i obsługi czujnika podczas pomiaru ciśnienia i jednocześnie tak, by zminimalizować opory przepływu oleju silikonowego.

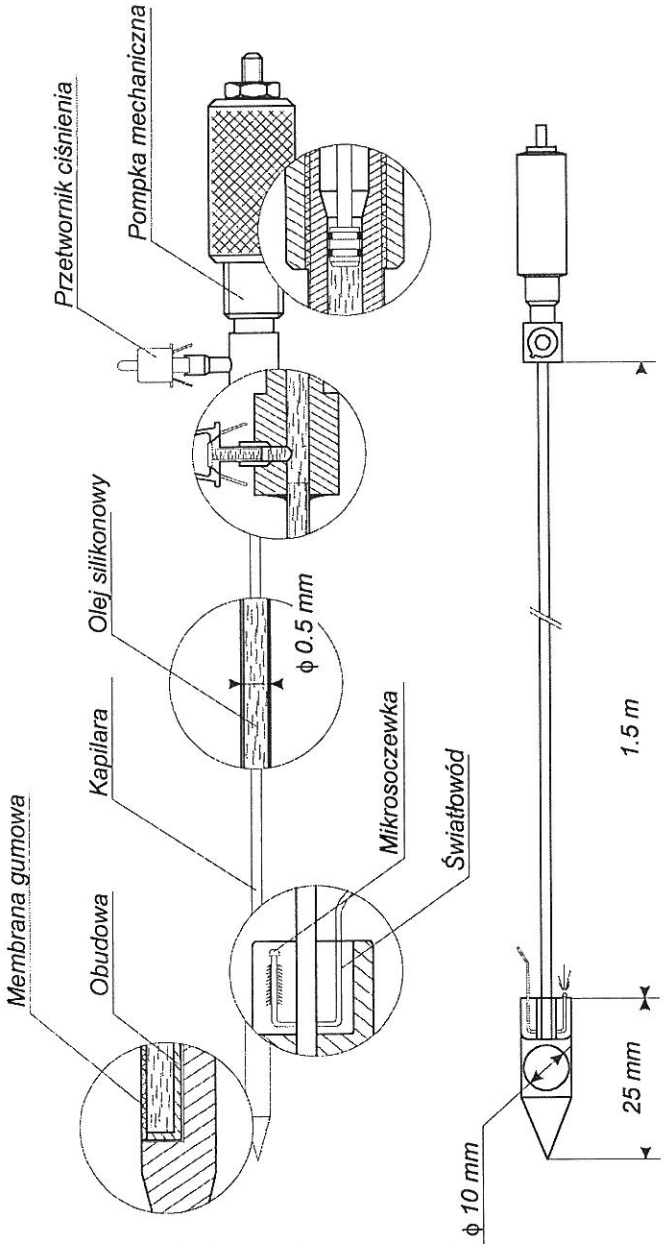
Półprzewodnikowy przetwornik ciśnienia służy do zamiany ciśnienia na wielkość elektryczną (napięcie). Ze względu na rozkład ciśnienia występującego w glebie, pod wpływem sił zewnętrznych, na różnych głębokościach zastosowano przetworniki o różnych zakresach pomiarowych: 40 kPa, 250 kPa i 600 kPa. Przetworniki zasilane są stałym napięciem 5 V, a napięciowy sygnał wyjściowy ma zakres około 100 mV. Przetworniki te charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami pracy. Ich klasa

wynosi odpowiednio dla zakresu 40 kPa- 0,01, a dla 250 kPa- 0,05. Pozostałe charakterystyki przetworników są cechą indywidualną konkretnego egzemplarza. Ogólnie ich nieliniowość nie przekracza -0,15% F.S.O. (full scale output), a błąd temperaturowy nie przekracza 2% F.S.O. (przy zmianie temperatury o 35°C), histereza ciśnienia wynosi około 0,05% F.S.O..

Pompka mechaniczna spełnia rolę zbiornika z zapasem cieczy pośredniczącej. Objętość cieczy w pompce, a tym samym i w całym czujniku, można regulować przy pomocy ruchomego tłoka. Regulację taką przeprowadza się, gdy chcemy przed wprowadzeniem czujnika do gleby, ustalić wartość początkową napięcia wskazywanego przez piezoelektryczny przetwornik ciśnienia. Drugą bardzo ważną korzyścią z takiej konstrukcji jest możliwość dopasowania gumowej membrany do kształtu powierzchni gleby. Czynność tę wykonujemy dopompowując ciecz do czujnika ciśnienia, powoduje to gwałtowny wzrost napięcia na wyjściu przetwornika ciśnienia w chwili najlepszego dopasowania do powierzchni gleby.

W celu uzyskania wymaganej szczelności połączeń rozłącznych w konstrukcji pompki mechanicznej zastosowano precyzyjne gwinty drobnozwojne. Było to podyktowane niewystarczającą szczelnością połączeń gwintem standardowym, co mogłoby powodować przecieki oleju i błędy pomiarowe.

Jako ciecz pośredniczącą użyto oleju metylo-silikonowego o oznaczeniu OM 200 i gęstości 0,97 kg/dm^3. Ciecz charakteryzuje się bardzo małą rozszerzalnością cieplną oraz jes



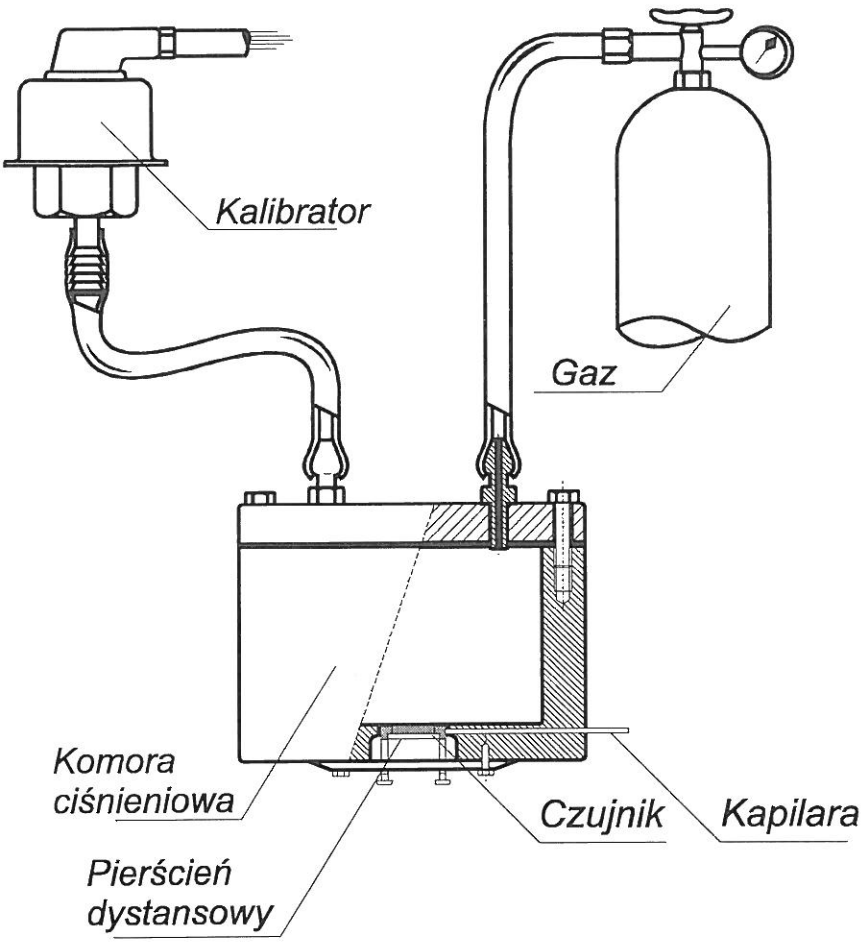
Rys. 5.1 Schemat konstrukcji czujnika naprężenia i przemieszczenia w glebie.

5.3 Kalibracja czujników ciśnienia z cieczą pośredniczącą

W celu wycechowania i wstępnego przebadania czujników ciśnienia wykonano serię badań dla dwóch czujników wyposażonych w przetworniki piezoelektryczne o różnych zakresach pomiarowych: 40 kPa i 250 kPa. Cechowanie czujników przeprowadzono na specjalistycznym stanowisku składającym się z następujących podzespołów:

- cylinder ciśnieniowy;
- kalibrator ciśnienia;
- źródło czynnika roboczego-gazu obojętnego;
- przewody.

Komorę ciśnieniową zaprojektowano w ten sposób, że do zamocowania kalibrowanego czujnika w gnieździe stosuje się pierścień pośredniczący, spełniający rolę dodatkowego uszczelnienia labiryntowego oraz umożliwiający zabudowę czujników o dowolnej średnicy z przedziału 0-20 mm. Ponadto, górna pokrywa komory jest przytwierdzana połączeniem rozłącznym, co z kolei umożliwia wprowadzanie do komory kalibracyjnej warstwę badanej gleby. Możliwe jest w ten sposób kalibrowanie czujników w glebie badanej, na warstwę której poprzez folię działa ciśnienie gazu. Po zdjęciu górnej osłony udaje się przeprowadzić test prostego ściskania, mocując komorę wypełniona glebą w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Jak widać, jednym z kryteriów w cyklu projektowym była uniwersalność zastosowań urządzenia.



Rys. 5.2. Stanowisko do kalibracji czujników ciśnienia z cieczą pośredniczącą.

Ciśnienie w komorze cylindra ustalane jest przy pomocy zaworu na butli ze sprężonym helem, natomiast wartość tego ciśnienia odczytywano za pomocą komercyjnego, wycechowanego czujnika ciśnienia. Krzywe cechowania przedstawiono na Rysunku 3a i 3b, odpowiednio dla czujnika o zakresie 40 kPa i 250 kPa. Ponieważ, jak wykazało doświadczenie, zmiany ciśnienia w funkcji różnicy wysokości są dla badanych czujników zależnością linową, cechowanie czujników ciśnienia wykonano w pozycji poziomej.

Otrzymane wykresy cechowania mają w całym swoim zakresie pracy charakter liniowy. Współczynnik korelacji regresji liniowej dla obu czujników wynosi ponad 0,9996 i 0,99998 odpowiednio dla czujników o zakresie 40 kPa i 250 kPa. Błąd standardowy wynikający z zastosowania równania regresji liniowej wynosi odpowiednio 0,47 kPa i 0,43 kPa i jest głównie wynikiem dokładności odczytu na mierniku ciśnienia, przy pomocy którego dokonywano cechowania. Jednocześnie nie zaobserwowano zjawiska histerezy podczas cechowania czujników przy wzroście ciśnienia, a następnie jego spadku.

5.4. Budowa i zasada działania systemu do wyznaczania przemieszczeń w glebie

Głowica pomiarowa czujnika zawiera dwa sensory (ciśnienia i przemieszczenia) wbudowane w metalowy korpus. Czujnik przemieszczenia został wykonany ze światłowodów gradientowych i elementów mikrooptyki typu SELFOC. Użyto światłowodu gradientowego o średnicy rdzenia 50 μm średnicy płaszcza 125 μm w pokryciu miękkim i wytrzymałościowym o całkowitej średnicy 900 (μm). Światło z lasera He-Ne o długości fali 624 nm poprzez układ optyczny jest wprowadzane do światłowodu a następnie do głowicy pomiarowej. Wiązka światła wychodząca z rdzenia poprzez prostokątną szczelinę i soczewkę gradientową jest rzutowana na ekran. Obraz uzyskanej plamy świetlnej jest rejestrowany za pomocą kamery CCD-HDD. Komputerowy program analizy obrazu wylicza zmianę współrzędnych położenia głowicy. W jednym z rozwiązań prototypowych zastosowano uproszczona metodę analizy ruchu plamki świetlnej otrzymywanej bezpośrednio z końcówki światłowodu. W tym przypadku plamka nie jest aktywnym źródłem promieniowania i jej przemieszczenia są rejestrowane bezpośrednio przez kamerę, bez rzutowania na ekran.

Istotą zastosowanej metody pomiaru przemieszczeń w ośrodkach niejednorodnych a szczególnie w glebach jest sprzęgnięcie za pomocą toru optycznego o określonej aperturze numerycznej zawartej pomiędzy wartościami (0,0 - 0,25 wyłącznie) pomiędzy głowicą pomiarową , umieszczoną w glebie badanej a elementem światłoczułym kamery poprzez ekran pośredniczący . Przemieszczenie, kształt i rozkład

amplitudowy uzyskanej plamy świetlnej na matrycy CCD są wykorzystywane do wyznaczania przemieszczeń źródła światła, czyli głowicy przemieszczającej się z masą gleby [24].

Dokładność pomiaru przemieszczenia zależy od następujących czynników:

- rozdzielczość matrycy CCD w kamerze;
- szybkość akwizycji obrazu w liczbie klatek na sekundę;
- średnica rdzenia światłowodu oraz średnica soczewki.

W rozwiązaniu prototypowym dokładność pomiaru wyniosła szacunkowo 0,01 mm i nie jest to wielkość graniczna dla tej metody, lecz przyjmuje się, iż dalsze podnoszenie dokładności jest nieuzasadnione metodycznie, zważywszy że rozmiary głowicy pomiarowej są o 3 rzędy wielkości większe. Zastosowana kamera CCD umożliwiała rejestracje maksymalnie 25 obrazów na sekundę, co w przypadku dynamicznych obciążeń jest parametrem krytycznym. Stąd wynika potrzeba zastosowania szybszej kamery, szczególnie w przypadku podejmowania badań polowych [27].

Główną zaletą prezentowanej metody jest optyczne, czyli bezkontaktowe sprzężenie przetwornika znajdującego się w glebie z układem rejestracji. W porównaniu do metod stosowanych daje to wielka korzyść , polegającą na wyeliminowaniu zakłóceń pomiarów wynikających z obecności sztywnych elementów łączących przetworniki z rejestratorami.

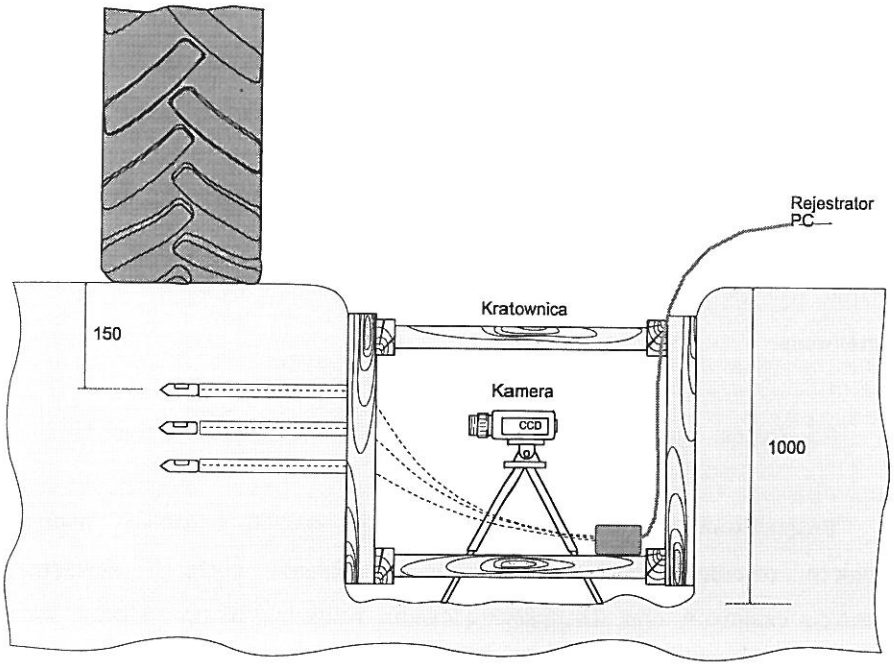
5.5. Zastosowanie miniczujników do badań laboratoryjnych i polowych

Prezentowany system pomiarowy nadaje się do badaniach naprężeń i odkształceń ośrodka glebowego poddanego działaniu obciążeń zewnętrznych. Konstrukcja czujników oraz ich oprzyrządowanie pozwalają na prowadzenie badań w warunkach laboratoryjnych oraz polowych.

Zaprojektowano stanowiska badawcze do pomiarów z użyciem przedstawionych czujników. Jedno ze stanowisk składa się z siłownika hydraulicznego do zadawania obciążeń oraz monolitu glebowego. Stanowisko do badań modelowych współpracy koła ogumionego z nawierzchnią gleby zaprojektowano jako kanał glebowy. Wyposażono go

w urządzenie symulujące ruch koła po powierzchni gleby (demonstrator koła) składające się z wózka poruszającego się na prowadnicach wzdłuż kanału oraz koła jezdnego 350×120, zamontowanego wahliwie na ramie wózka. Na osi koła przytwierdzano obciążniki w celu uzyskania różnego nacisku powierzchniowego. Urządzenie wprawiane jest w jednostajny ruch postępowy o regulowanej prędkości [39].

Do przeprowadzenia eksperymentu polowego zaprojektowano stanowisko przedstawione na Rys.5.3. Przygotowanie stanowiska wymaga wykopania szańca o wymiarach 1.0 (głębokość)×1.0 (szerokość)×2.0 (długość) m oraz wykonanie oszalowania. W przypadku doświadczeń polowych konieczne jest zastosowanie dodatkowego wyposażenia, m.in. przenośnego agregatu prądotwórczego, ekranu przeciwsłonecznego dla poprawienia warunków pracy systemu optycznego.



Rys. 5.3. Przekrój stanowiska badawczego do badań polowych.

We wszystkich opisywanych eksperymentach czujniki wprowadzać do gleby można przy użyciu specjalnego urządzenia - lokalizera, dzięki któremu możliwe jest zagłębianie czujników do ok.50 cm. Lokalizer pozwala precyzyjnie pozycjonować czujniki na planie profilu glebowego. Wiele uwagi poświęcono problemowi wprowadzania czujników do gleby, gdyż jest to moment decydujący o dokładności i rzetelności prowadzonych pomiarów.

Nieprecyzyjne osadzenie czujnika może wpływać na wyniki pomiarów w następujący sposób:

- czujnik osadzony skośnie: mierzone ciśnienie nie jest ciśnieniem normalnym;
- czujnik zakleszczony: możliwość uszkodzenia membrany gumowej;
- zbyt duży otwór wsadowy: luz między glebą i membraną, brak kontaktu, uszkodzenia struktury gleby.

Jedynie w przypadku gleby piaszczystej o strukturze nieagregatowej można zaniedbać zmiany wytrzymałości gleby wynikające z naruszenia jej struktury podczas wprowadzania czujników metodami klasycznymi. W pozostałych przypadkach konieczne jest wprowadzanie czujników kanałem o jak najmniejszym przekroju, równolegle do powierzchni gleby. Wówczas mamy pewność, że gleba nad czujnikiem pozostaje nienaruszona. Szczególna ostrożność jest wskazana w przypadku umieszczania czujnika płytko pod powierzchnią oraz gdy ma on być umieszczony w dużej odległości od ściany wykopu . Na tę okoliczność przygotowano specjalne urządzenie składające się z wiertarki elektrycznej, wiertła długiego (40 cm) oraz profilu o przekroju prostokątnym. Wiertło pracuje wewnątrz profilu, który jest stopniowo zagłębiany w glebę, zachowując przy tym pożądaną pozycję poziomą dzięki lokalizerowi.

5.5. Podsumowanie

Prezentowana aparatura pomiarowa służy do jednoczesnego pomiaru ciśnień i przemieszczeń w materiałach trójfazowych, a w szczególności w glebie rolniczej poddanej działaniu obciążeń zewnętrznych. Pomiary mogą być dokonywane przy minimalnym uszkodzeniu struktury próbki materiału badawczego, zaś objętość mierzona jest najmniejsza z dotychczas uzyskanych. Wysokie dokładności oraz niewysokie, a zarazem ściśle szacowane błędy pomiarowe wyróżniają prezentowany system wśród znanych z literatury. Konstrukcja i integracja systemu pomiarowego umożliwia zastosowanie w warunkach laboratoryjnych, w kanale glebowym oraz w badaniach polowych. Spełnienie założeń wynikających z wymagań metodycznych pomiaru jednoczesnego ciśnień i przemieszczeń w ośrodkach trójfazowych zmusiło autorów pracy do podjęcia interdyscyplinarnych prac badawczo-rozwojowych, uwzględniających wielorakie czynniki wpływające na wyniki pomiaru wspomnianych wielkości. Uwzględniano cechy charakterystyczne przewidywanych do badań ośrodków (w szczególności gleba rolnicza), własności mechaniczne materiałów konstrukcyjnych na elementy przetworników, optymalizowano procedury pomiarowe ze względu na minimalizację uszkodzeń struktury ośrodka. Dzięki zasilaniu z przenośnego agregatu prądotwórczego system charakteryzuje się pełna niezależnością w warunkach badań polowych. Modułowa konstrukcja pozwala na transport elementów na miejsce badań a montaż jest łatwy i nie wymaga użycia żadnych specjalistycznych narzędzi. Testowanie systemu przeprowadzone w doświadczeniach laboratoryjnych i polowych potwierdziło trafność założeń projektowych i dowiodło przydatności w badaniach ciśnień i przemieszczeń w glebie pod obciążeniem.

PROJEKTY PRZYSZŁOŚCI

Złożoność i wielofazowość ośrodka glebowego są głównymi przyczynami trudności metrologicznych w badaniach agrofizycznych. Stosowane w badaniach własności mechanicznych gleby metody tradycyjne są niewystarczająco dokładne i kłopotliwe w praktyce polowej. Skłania to do poszukiwania alternatywnych rozwiązań technicznych.

Prezentowane w poprzednich rozdziałach systemy pomiarowe do badań mechanicznych własności gleby pod obciążeniem mimo zastosowania wielu nowatorskich rozwiązań nie są wolne od znacznych ułomności. Przede wszystkim rozmiary wprowadzanych do gleby urządzeń pomiarowych są głównym źródłem błędów pomiarowych. Należy dążyć do minimalizacji obszaru uśredniania czujnika, by można było mówić o pomiarze np. naprężenia w punkcie ośrodka. Im mniejszy przetwornik, tym mniejszy obszar uśredniania i wynik pomiaru bliższy rzeczywistej wartości mierzonej wielkości w zakładanym punkcie. Inną przeszkodą w dążeniu do doskonałości systemów pomiarowych jest konieczność naruszania struktury ośrodka badanego w momencie wprowadzania przetwornika oraz obecność elementu łączącego czujnik pozostający w glebie z układem odbioru danych pomiarowych. Zastosowanie metody badań z odroczeniem pomiaru (aż do uzyskania pierwotnego stanu struktury gleby) może zapobiec błędom wynikającym z uszkodzeń ośrodka przy umieszczaniu przetwornika, wiąże się jednak ze złożonym procesem przeprowadzania eksperymentu, co może być nie do zaakceptowania. Po trzecie wreszcie, źródłem błędów jest reakcja ośrodka na obecność przetwornika, szczególnie o dużych rozmiarach, objawiająca się występowaniem przemieszczeń lokalnych, nierejestrowalnych przez zastosowane metody pomiarowe. Jest to sytuacja paradoksalna: przetwornik przemieszczenia, który ma za zadanie rejestrować ruch gleby pod obciążeniem powoduje dodatkowe przemieszczenia gleby w swoim otoczeniu, których nie może wykryć.

W ostatnim rozdziale niniejszego opracowania przedstawione zostaną nowe urządzenia i metody w badaniach mechaniki gleby będące w fazie prototypu bądź

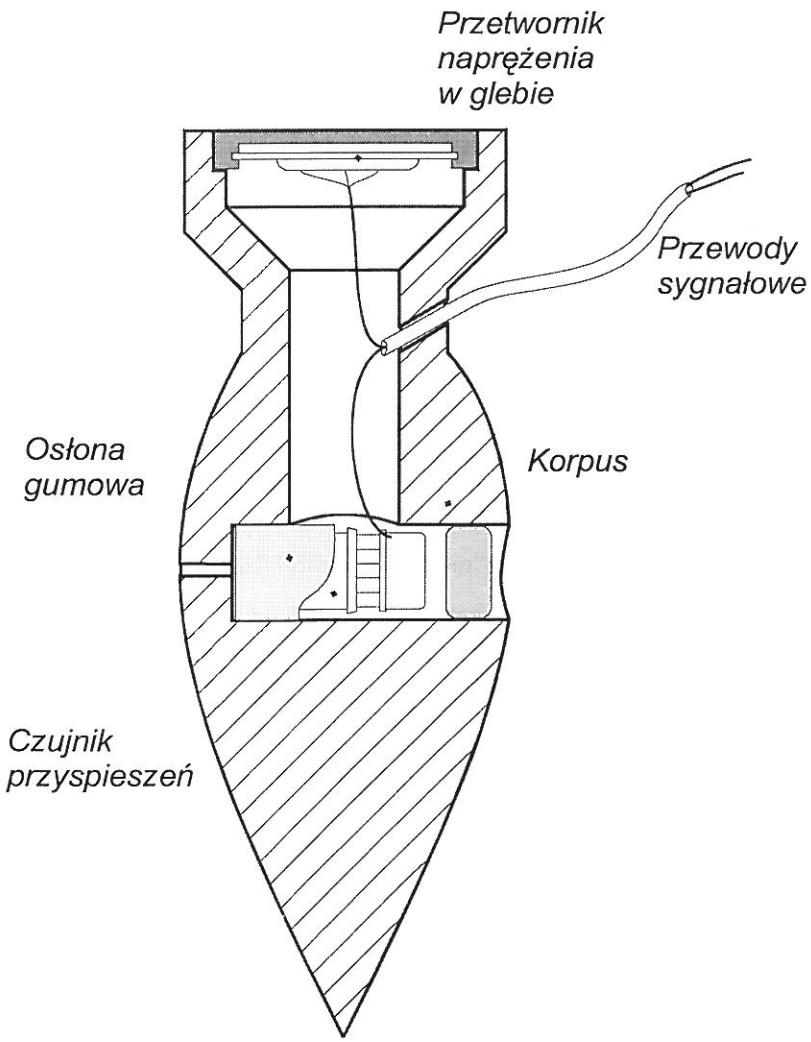
projektu. Są to: przetworniki nanotechnologiczne, przetwornik przemieszczeń lokalnych, telemetria oraz metoda mikromechaniki procesu zagęszczania

1. Zastosowanie nanotechnologii w badaniach mechaniki gleb

Mikro i nanotechnologie umożliwiają konstruowanie i budowę urządzeń elektronicznych i elektromechanicznych (mechatronicznych), których zastosowanie w badaniach agrofizycznych jest wielce uzasadnione, głównie ze względu na ich małe wymiary. Przykładem tego typu aplikacji jest urządzenie skonstruowane i zbudowane przez autora prezentowanej pracy.

W urządzeniu tym wykorzystano mechatroniczny przetwornik ciśnienia według koncepcji i projektu autora oraz bezwładnościowy czujnik przyspieszenia, produkowany z wykorzystaniem nanotechnologii przez firmę Analog Devices, USA. Całość skonstruowano jako penetrator w kształcie umożliwiającym łatwe wprowadzenie do gleby. Jedynym elementem pozostającym na zewnątrz badanego ośrodka jest cienki elastyczny przewód elektryczny, którym sygnały mierzone doprowadzane są do układu rejestracji.

W badaniach wstępnych użyto gleby lessowej , której próbkę w formie monolitu poddano obciążeniu metalowym stemplem. Czujnik umieszczano na głębokości 150 mm. Przykładowy przebieg ciśnienia, jak również wielkości charakteryzujących ruch ośrodka pod stemplem (przyspieszenie, prędkość, droga) przedstawiono w formie wykresu.



Rys. 1. Przetwornik do jednoczesnego pomiaru naprężeń i przemieszczeń metodą inercyjną.

Proponowana metoda może służyć do badań laboratoryjnych jak i polowych. Na podstawie przeprowadzonych wstępnych badań laboratoryjnych stwierdzono wysoką czułość przetwornika przyspieszenia na drgania, co objawiało się wysokim poziomem szumów pochodzących od napędu maszyny wytrzymałościowej (silnik elektryczny powodujący stałe wymuszenie o częstotliwości wynikającej z aktualnej prędkości obrotowej wirnika). Należy więc opracowując program badań wyeliminować nadmierną podatność przetwornika na tego typu zakłócenia. Wstępnie zaprojektowano gumową osłonkę izolującą obudowę czujnika od penetratora.

Inna wersja przetwornika, będąca w fazie projektu zakłada minimalizację jego wymiarów poprzez umieszczenie czujnika inercyjnego bezpośrednio przy obudowie czujnika ciśnienia. Urządzenie to ma projektowane wymiary ∅20×12 mm, znacznie mniejsze niż penetrator. Ze względu na nieopływowe kształty nie ma możliwości bezpośredniego wprowadzania takiego przetwornika do gleby i musi się to odbywać poprzez umieszczenie go na odpowiednim poziomie oraz zasypanie glebą. Wynika stąd ograniczenie zastosowania do gleby homogenizowanej. Niezależnie od oceny przydatności metody inercjalnej do wyznaczania przemieszczeń cząstek gleby planuje się użyć czujników przyspieszenia do badań drgań występujących pod kołami pojazdu będącego w ruchu z włączonym napędem. Przewiduje się znaczący wpływ drgań przenoszonych przez elementy jezdne na zagęszczenie gleby. Wymuszenia pochodzą z układu napędowego pojazdu: głównie silnika, skrzyni biegów i innych urządzeń z elementami wirującymi. Brak resorowania w ciągnikach rolniczych sprawia, że amplituda oraz energia ruchu drgającego całego ciągnika jest duża.

Nowoczesne technologie stwarzają nowe możliwości w metrologii agrofizycznej. Obecne zaawansowanie technologiczne pozwala na zbudowanie czujnika wielofunkcyjnego
(pomiar ciśnienia, przemieszczenia, temperatury) z układem bezprzewodowej transmisji danych i zasilaniem w formie kuli o średnicy rzędu kilku milimetrów. Podstawowym materiałem w konstrukcji takiego urządzenia może być krzem. Wytrzymałość mechaniczna jest na tyle duża, by z krzemu wykonany był korpus czujnika oraz

niezbędne elementy podzespołów mechanicznych. Ponadto krzem stanowi doskonały materiał wyjściowy na ogniwa elektryczne oraz, rzecz jasna jest niezastąpiony w technologii układów elektroniki oraz struktur przetworników ciśnienia, przyspieszenia i kąta obrotu, temperatury. Z powodzeniem można z krzemu skonstruować elementy układu poziomującego czujnik względem zadanej płaszczyzny odniesienia (aktuatory) oraz antenę do transmisji danych pomiarowych i odbioru sygnałów sterujących. Zastosowanie jednego tylko materiału ułatwi znaczenie proces wytwarzania, a także umożliwi zbudowanie przetwornika o minimalnych wymiarach. Taki przetwornik nie naruszał by struktury badanego materiału. Niewykluczone jest również zastosowanie tego typu przetwornika do badań przepływów wody glebowej: tak mały czujnik byłby wówczas unoszony , a jego położenie informowało by o procesach przepływu. Inne potencjalne możliwości zastosowania to badania własności mechanicznych części roślin, nasion czy nawet ścian komórkowych.

2. Przetwornik trójosiowy do wyznaczania złożonego stanu naprężeń i przemieszczeń globalnych i lokalnych w glebie. Metoda inercjalna w połączeniu z telemetrią.

Duże rozmiary głowicy trójosiowej skłaniają do przypuszczeń o istnieniu lokalnych przemieszczeń gleby, które nie są możliwe do wyznaczenia. Zaprojektowano nowa wersję głowicy, w której czujniki naprężeń mocowane są do końcówek teleskopowych przetworników przemieszczenia liniowego. Urządzenie to pozwala mierzyć jednocześnie następujące wielkości:

- sześć składowych tensora naprężenia;
- sześć składowych tensora odkształcenia;
- przemieszczenie całkowite głowicy w glebie.

W innej wersji urządzenia przewiduje się zastosowanie układu telemetrycznego do przesyłu mierzonych sygnałów drogą radiową lub w systemie cyfrowym, pojedynczym przewodem ekranowanym. Wielokanałowe systemy telemetryczne, stosowane w

badaniach amunicji spełniają wymagania, jeśli chodzi o małe rozmiary: w przypadku głowicy trójosiowej elektroniczny układ kodera i nadajnika nie może zajmować więcej niż 5-6 cm^3. W połączeniu z metodą inercjalną uzyskamy kompleksowy przetwornik wielkości mechanicznych w glebie osadzany niezależnie w glebie. Jest to wielce istotny krok naprzód, gdyż możliwe jest wyeliminowanie w ten sposób zakłóceń powodowanych obecnością sztywnego ramienia łączącego głowicę z projektorem lub mechanicznym układem rejestracji przemieszczeń oraz wielożyłowych, ekranowanych przewodów pomiarowych. Taki przetwornik to niejako protoplasta nanoczujnika, o którym mowa w poprzednim akapicie.

3. Metoda badań mikromechaniki procesu zagęszczania gleby

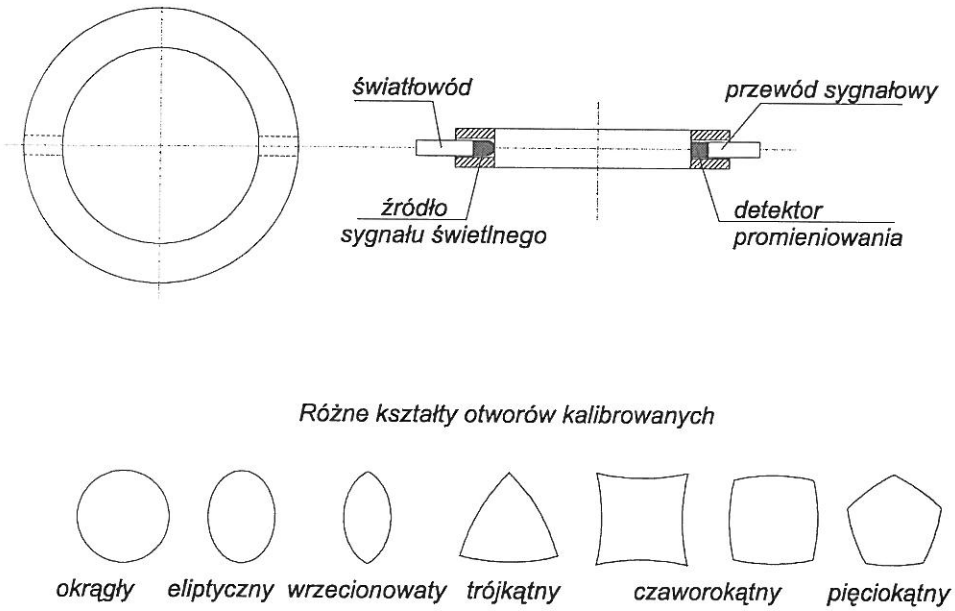
Proponowana metoda jest przeznaczona do wyznaczania sił oddziaływania międzycząsteczkowego oraz monitorowania procesu zapełniania porów w glebach piaszczystych. Zastosowano w niej kwarcowe czujniki siły o rozmiarach typowych cząstek gleby piaszczystej oraz detektory wypełnienia porów skonstruowane z użyciem złącz optycznych. Oba czujniki są minimalnych wymiarów a ich obecność nie wpływa na pomiar. Dane pomiarowe transmitowane są cienkimi elastycznymi przewodami (kabel elektryczny oraz światłowód). Ze względu na wstępną fazę projektu poniżej przedstawione zostaną podstawowe założenia metody oraz proponowane rozwiązania techniczne. Ostateczna ocena metody będzie możliwa po przeprowadzeniu badań testowych.

Zasada działania projektowanego czujnika siły opiera się na własnościach mechanicznych kwarcu: działanie sił zewnętrznych powoduje powstawanie różnicy potencjałów na przeciwległych końcach kryształu, gdy siła działa w płaszczyźnie prostopadłej. Generowana różnica potencjałów jest proporcjonalna do wartości siły działającej, jednak zależność nie jest prosta i w tym miejscu tkwi podstawowy problem metodyczny. Konieczne jest indywidualne kalibrowanie każdego czujnika kwarcowego. Sporządzenie czujnika polega na wykonaniu stałego połączenia elektrycznego między

końcówkami przewodów (miedź) i kryształem. Wymaga to zastosowania niekonwencjonalnej technologii, napawania, czy klejenia przewodzącego. Przewody sygnałowe muszą posiadać wystarczająca elastyczność, by nie powodować niepożądanych przemieszczeń czujnika, a jednocześnie zachować odporność na złamanie. Wprowadzanie czujników może odbywać się w trakcie przygotowywania próbek glebowych: po umieszczeniu czujników na wymaganej głębokości usypywana jest kolejna warstwa gleby. Małe wymiary przetworników pozwalają na prowadzenie badań w próbkach o mniejszych wymiarach niż dotychczas stosowane monolity, a ponadto możliwe jest umieszczenie w próbce kilkudziesięciu czujników bez obawy o niekorzystny wpływ efektu „uzbrojenia" gleby, jak to ma miejsce, gdy w glebie znajduje się duża liczba czujników o konwencjonalnych wymiarach.

Monitorowanie procesu zagęszczania gleby można przeprowadzić stosując optyczny czujnik zbudowany w formie pierścienia z kalibrowanym otworem o kształcie kołowym lub innym. W płaszczyźnie pierścienia wykonane są dwa współosiowe kanały, w których umieszczone są: końcówka światłowodu oraz detektor promieniowania (mikrofotodioda lub inny). Jeśli po umieszczeniu w glebie będącej w stanie luźnym (nie zagęszczonym) w kalibrowanym otworze nie ma cząstek gleby, obwód optyczny jest zamknięty. Jeżeli w wyniku oddziaływania obciążenia gleba ulega zagęszczaniu i w otworze kalibrowanym znajdzie się cząstka gleby, wówczas obwód optyczny zostaje przerwany. Ruch cząstki glebowej do środka otworu kalibrowanego jest odpowiednikiem elementarnego procesu zagęszczania: wypełnienie poru glebowego przez cząstkę fazy stałej. W badanej próbce gleby można umieścić czujniki o różnych średnicach otworów – wówczas w wyniku uzyskamy rozkład funkcji gęstości średnicy cząstek – porów podlegających procesowi zagęszczania. Natychmiastowa reakcja układu optycznego pozwala ponadto na badanie dynamiki procesu zagęszczenia, wpływu czasu i opóźnienia reakcji ośrodka. W metodzie tej możliwe jest badanie próbek gleby przygotowywanych laboratoryjnie. Orientacja czujników nie wpływa na wyniki pomiarów, gdyż podczas dyslokacji cząstek gleby nie występują uprzywilejowane kierunki w skali wielkości cząstek. Małe rozmiary, podobnie jak w przypadku kwarcowych przetworników siły

umożliwiają prowadzenie badań w małych próbkach gleby. Optymalny kształt otworu a także wykończenie brzegów otworu zostaną dobrane w zależności od kształtu cząstek gleby. Przewiduje się, że prezentowana metoda sprawdzi się najlepiej w badaniach gleby laboratoryjnej o ściśle określonym rozkładzie granulometrycznym.



Rys.2. Czujnik do monitorowania procesu zagęszczania gleby. Różne kształty otworów kalobrowanych.

Wersja rozwojową powyżej opisanego urządzenia jest czujnik jednoczesnego pomiaru siły wzajemnego oddziaływania i dynamiki przemieszczania się cząstek. Składa się on z pierścienia i tłoczka, który zawieszony jest sprężyście, a jego ruch względem pierścienia płynnie zamyka optoelektrozłącze. Ruch tłoczka wywoływane jest przez nacisk przemieszczającej się cząstki gleby . Płynne zamykanie złącza możliwe jest dzięki zastosowaniu przesłonki o kształcie trójkąta. Siłę wzajemnego oddziaływania cząstek mierzy przetwornik piezzoelektryczny, zabudowany na tłoczku.

Podsumowanie.

Doskonalenie metod wyznaczania naprężeń i przemieszczeń w glebie wymaga przede wszystkim stosowania nowoczesnych rozwiązań technicznych, które umożliwią realizację następujących zadań:

- miniaturyzacja czujników z jednoczesnym optymalizacją konstrukcji ze względu na kontakt czujnik – gleba, z uwzględnieniem trójfazowości ośrodka glebowego;
- integracja przetworników z układami kondycjonowania sygnałów pomiarowych;
- wprowadzenie systemów telemetrycznych, ułatwiających przesyłanie danych pomiarowych;
- realizacja pomiaru przemieszczeń w glebie metodami inercjalnymi, uwzględniającymi ruch cząstek o 6 stopniach swobody;
- optymalizacja metod wprowadzania przetworników do gleby, głównie ze względu na minimalizację uszkodzeń struktury ośrodka badanego.

Właściwa ocena metody badawczej, niezależnie od rozwiązań technicznych, wymaga szerokiej pracy eksperymentalnej z uwzględnieniem:

- różnych rodzajów gleb, zarówno w badaniach laboratoryjnych jak i polowych, a także ich stanu fizycznego: wilgotności, wstępnego zagęszczenia;
- różnych warunków obciążania: nacisków, prędkości ruchu pojazdu, rodzajów elementów jezdnych.

Wszystkie wspomniane problemy badawcze planujemy sukcesywnie rozwiązywać, także we współpracy z zainteresowanymi tego typu badaniami.

Literatura

1. van der Akker, J.J.H., Stuiver, H.J., 1989, A sensitive method to measure and visualize deformation and compaction of the subsoil with a photographed piont grid, Soil&Tillage Research, 14(1989), pp. 209-217
2. Anderson M.G., 1983, On the applicability of soil water finite difference Models to operational trafficability models, J. of Terramechanics, Vol. 20, No. 3/4, pp. 139-152
3. Bailey, A.C., Nichols, A., Johnson, C.E., 1987, A stress stste transducer for soil, Transaction of the ASAE, No. 30, 1237-1241
4. Bailey, A.C., Nichols, A., Johnson, C.E., 1988, Soil stress state determination under wheel loads, Transaction of the ASAE, No. 31, 872-879
5. Bailey, A.C., Raper, R.L., Way, T.R., Burt, E.C., Johnson C.E., 1996, Soil stress under a tractor tire at various loads and inflation pressures, J.of Terramech. Vol 33, No1, pp.1-11
6. Bekker, M.G., 1969, Introduction to Terrain-Vehicle Systems, The University of Michigan Press, Arbor, Michigan
7. Blackwell, P.S. , Soane, B.D., 1978, Deformable spherical device to measure stresses within field soils, J.ofTerramech. Vol. 15, No 4, pp 207-222
8. Blunden, B.G., McLachlan, C.B., Kirby, J.M., 1992, A system for measuring in situ soil stresses due to traffic, Soil&Tillage Research, 25, 35-42
9. Boussinesq, J. 1885, Application des potentieles a' l'etude de l'equilibre et du movement des solides elastique, Gauthier Villais, Paris
10. Burt, E.C., Bailey, A.C., Wood, R.K., 1987, Effects of soil and operational parameters on soil tire interfaces stress vectors, J. of Terramechanics, Vol. 24, No. 3, pp. 235-246
11. Dawidowski, B., Lerink, P., Koolen, A.J., 1990. Controlled distortion of soil samples with reference to soil physical effects. Soil&Tillage research, Vol.17, No. 1-2, pp. 15-30
12. Dexter, A.R., 1988, Pressure transmission beneath wheels in soils on the Eyre Peninsula of South Australia, J. of Terramechanics, Vol. 25, No. 2, pp. 135-147

13. Franz, G. 1958 Pressure distribution in soil , Der Bauingenieur, 33, 190-195
14. Frohlich, O.K. 1934, Druckverteilung im Baugrunde, Verlag Julius Springer, Wien
15. Gee-Clough, D., 1991, Soil - vehicle interaction, J. of Terramechanics, Vol. 28, No. 4, pp.289-296
16. Gill, W.R., Van der Berg, G.E., 1967, Soil Dynamics in Tillage and Traction, USDA, Agricultural Handbook 316
17. Hammel, K. 1994, Soil stress distribution under lugged tires, Soil&Tillage Research 32, 163-181
18. Harris, H.D., Bakker D.M., 1994, A soil stress transducer for measuring in situ soil stresses, Soil&Tillage Research, 29, 35-48
19. Horn, R., Lebert, M. 1995, Soil compactibility and compressibility, Elsevier Science
20. Horn, R., Semmel, H., 1992, Raumliche Spannungsmessungen mit dem Stress State Transducer (SST) in ungesattigten aggregierten Boden - theoretische Betrachtungen und erste Ergebnisse, Z.Pflanzenern. Bodenkund. 155, 269-274
21. Hovland, H.J., 1973, Soil inertia in wheel-soil interaction, J. of Terramechanics, Vol. 10, No. 3, pp. 47-65
22. Hunter, A.G.M., 1991, Soil - vehicle interaction, J. of Terramechanics, Vol. 28, No.4, pp.297-308
23. Kezdi, A. 1969, Soil Mechanics Handbook, VEB Verlag, Berlin , Vol. 1, 259 pp., Vol.2, 309 pp., Vol. 3, 274 pp.
24. Konstankiewicz, K., Król, A., Pukos, A., 1996, Sposób pomiaru zmian ciśnienia w ośrodkach niejednorodnych, a szczególnie w glebie i urządzenie do stosowania tego sposobu, Biuletyn Urzędu Patentowego RP, 1996
25. Konstankiewicz, K., Pytka, J., 1997, Studies on the fields of stresses and transitions in the soil taking into account the dynamics of the loading process, 6 ICA, Book of Abstracts, Volume II, pp. 253
26. Koolen, A. Et al., 1992, Prediction of aspects of soil - wheel systems, Soil&Tillage Research 24, 381-396
27. Król, A., 1997, Badania przemieszczeń w ośrodkach glebowych, Materiały Szkoły Agrofizyki, IA PAN Lublin

28. Król, A., Pukos, A., Tarkiewicz, S., 1997, Sposób pomiaru przemiszczeń w ośrodkach niejednorodnych, a szczególnie w glebie i urządzenie do stosowania tego sposobu, Biuletyn Urzędu Patentowego RP, 1997
29. Othikin, A.A., Lipiec, J., Tarkiewicz, S., Sudakov, A.V., 1991, Deformation on silty loam soil under the tractor tyre, Soil&Tillage Research, 19(1991) pp.187-195
30. Pytka, J. Horn, R., Kuhner, S., Semmel, H., Błażejczak, D. 1995, Soil stress state determination under static load, International Agrophysics, 9, 219-226
31. Pytka, J. 1995, Symulacja współpracy elementów jezdnych pojazdów terenowych z nieutwardzoną nawierzchnią naturalną, Materiały V Międzynarodowej Konferencji *Badania symulacyjnę w technice motoryzacyjnej*, Kazimierz Dolny
32. Pytka, J. 1995 , Wyznaczanie trakcyjnych własności podłoża nieutwardzonego, Materiały Konferencyjne Autoprogress, Jahranka
33. Pytka, J. 1996, Wyznaczanie stanu naprężeń w glebie obciążonej statycznie, Z.Probl. Post.N. Roln., Zeszyt 245, str. 203-208
34. Pytka, J., 1997, An example of the use of nanotechnology in agrophysics research, 6 ICA, Book of Abstracsts, Volume II, pp. 303
35. Pytka, J., 1997, Badania pól naprężeń i przemieszczeń w glebie z uwzględnieniem dynamiki procesu obciążania. Praca doktorska. Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie.
36. Sołtyński, A., Mechanika układu pojazd – teren, WMON Warszawa 1966
37. Schwanghart, H., 1991, Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil, J. of Terramechanics, Vol. 28, No. 4, pp. 309-318
38. Stryburski, W., 1970, Przetworniki tensometryczne, WNT Warszawa
39. Tarkiewicz, S., Król, A., Pytka, J., 1997, Preliminary investigations of stresses and strains in the soil under wheel, 6 ICA , Book of Abstracts , Volume II, pp.348
40. Tarkiewicz, S., Pytka, J., 1997, Model investigations of interactions of tyre wheel with the surface of agricultural soil, 6 ICA, Book of Abstracts, Volume II, pp.349
41. Tjink, F.G.J., 1988, Load - bearing processes in agricultural wheel-soil systems, Wageningen
42. Youssef, A.F.A., Ali, G.A., 1982, Determination of soil parameters using plate test, J. of Terramechanics, Vol. 19, No.2, pp.129-147

43. Yo Qun, Shen Jie, Dai Xianbin, 1992, Camera tracing and image processing system for soil deformation, J.of Terramech., Vol.29, No 4/5, pp.423-431
44. Vanden Berg, G.E., Cooper, A.W., McColly, H.F., Erickson, A.E., 1957. Strain gage cell measures soil pressure. Agricultural Engineering, April 1957, pp.232-237.
45. Verma, B.P., Bailey, A.C., Schafer, R.L. Futral, J.G., 1976, A pressure transducer in soil compaction study, Transactions of the ASAE, No 75-1034, pp.442-447
46. Zdunek, A., 1997, Kalibracja czujników z cieczą pośredniczącą, Biuletyn LTN, Mechaniczne właściwości materiałów rolniczych. Materiały Konferencji Naukowej 6ICA, Lublin.

METHODS OF SOIL STRESS AND DEFORMATIONS DETERMINATIONS UNDER LOADS

Soil, as a tractive surface for agricultural tractors as well as military and off-road vehicles, is required to withstand dynamic loads occuring under wheels or tracks. Mechanical properties of soil medium result in dependence between load , velocity of sytain and strees – deformation realtionships. These informations are of the major importance when considering soil compaction as well as tractive performances of the vehicles.

Having analysed results published by many researchers, the authors of this work have concluded the lack of a proper method for soil stress-deformation measurements. Therefore, the aim of the work is to design and research some new methods of soil stress-deformation measurements.

In the second chapter results of experimental research with a SST transducer are shown. The transducer allows to measure strasses for complete soil stress state calculations. Additionally, a mechanical system was used for soil deformations measurements in the three direction in space. The thidr chapter contains numerous details on design of an improved version od the measuring system with an triaxal head. Soil deformations are measured with a novel mehtod, which uses laser and a CCD camera. The next chapter describes another version, which is suitable for field experiments. Detailed descriptions of field procedures are given. A system for soil stress-deformation measurements developed with laser and optical fibers is shown in the last numbered chapter. There are also described some future designs, containing nanotechnology and telemetrics.

Keywords: Soil stress and deformations, soil - wheel interactions.