

## Automatyzacja badania próbnego obciążenia kolumn wzmocniających podłoże gruntowe

Próbne statyczne obciążenia pali fundamentowych są uważane za najbardziej wiarygodną metodę kontroli ich nośności oraz za metodę pomocną w ich projektowaniu [1]. Również badania statyczne kolumn (sztywnych inkluzy) [8] – ze względu na brak krajowych wytycznych wykonuje się według analogicznych zasad. Zazwyczaj obciążenie pali i kolumn jest różne, ale nie wpływa to na ogólny sposób badania, który jest bardzo podobny. Podstawowe rodzaje próbnych obciążeń statycznych wykonuje się:

- z użyciem balastu; z uwagi na duży koszt transportu i obsługi dźwigowej takie obciążenia stosuje się w przypadku braku pali kotwiących w sąsiedztwie pala obciążanego lub ich niewystarczającej nośności na wyciąganie;
- z użyciem pali kotwiących (tzw. metoda belki odwróconej); w tym badaniu stosuje się sztywne belki ze stali wysokiej wytrzymałości; umożliwiają obciążanie (ściśkanie) badanego pala przy jednoczesnym wyciągnięciu pali kotwiących;
- metodą mieszaną stanowiącą kombinację dwóch powyższych metod.

Dotychczas badania były przeprowadzane w sposób manualny, z odczytem wskaźników przez operatora z mechanicznych czujników analogowych. Podczas badania, które trwa średnio 6 h, operator musi utrzymywać siłę o określonej wartości (według programu badań).

Automatyzacja badań ma na celu zarówno poprawę jakości ich wykonywania, jak i ograniczenie ewentualnych błędów ludzkich. Bardziej wiarygodne wyniki testów mogą stanowić podstawę do prowadzenia prac badawczych na kolumnach betonowych wkręcanych [3].

### Stanoisko badawcze

Próbne obciążenia statyczne pali/kolumn są wykonywane na specjalnie do tego przygotowanym stanowisku badawczym, w miejscu budowy. Przykładowe stanowisko do obciążenia statycznych metodą mieszaną (pale kotwiące plus obciążenie balastowe) pokazano na rys. 1 (por. też [1]).



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe do obciążenia statycznych metodą mieszaną (fot. archiwum Menard Polska Sp. z o.o.)

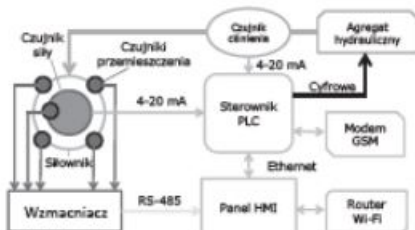
W skład układu badawczego wchodzi: siłownik hydrauliczny, pompa hydrauliczna o napędzie ręcznym lub elektrycznym, manometr hydrauliczny, mechaniczne czujniki przemieszczenia, belki główne i pomocnicze, elementy kotwiące (pręty) lub balastujące (najczęściej płyty).

Dotychczas badania były prowadzone w sposób manualny przez operatora, który włączając i wyłączając pompę utrzymywał ciśnienie w układzie hydraulicznym na przyjętym poziomie, zapisując jednocześnie wartości odczytane z czujników mechanicznych. Badania były więc żmudne i obarczone błędami odczytu wartości z czujników. Ponadto wyniki nie były precyzyjne ze względu na straty ciśnienia w układzie hydraulicznym oraz przeliczanie wartości ciśnienia na wartość siły obciążającej.

### Struktura systemu

Automatyczny układ pomiarowo-sterujący [2, 6] do przeprowadzania badania próbnego obciążenia pali umożliwia sterowanie pracą agregatu hydraulicznego w taki sposób, aby uzyskać stabilizację nacisku siłownika hydraulicznego. W systemie sterowania wykorzystano sygnały cyfrowe, analogowe (4+20 mA) oraz magistrale Ethernet i RS-485 i transmisję po sieci Wi-Fi.

Strukturę układu sterowania podano na rys. 2 [7]. Głównym elementem układu jest sterownik PLC wraz z panelem HMI. Funkcję wykonawczą pełni zestaw hydrauliczny, składający się z agregatu, czujnika ciśnienia oraz siłownika. Przemieszczenie obciążonego pala jest mierzone za pomocą zestawu czterech czujników przemieszczenia oraz wzmocniacza sygnałów w LVDT. Ze względów bezpieczeństwa (możliwość wysunięcia pala kotwiącego) wprowadzono dodatkowy pomiar wysunięcia siłownika za pomocą piątego czujnika przemieszczenia.



Rys. 2. Struktura systemu sterowania

System sterowania może być bezprzewodowo – za pośrednictwem sieci Wi-Fi – połączony z komputerem PC lub laptopem. Dodatkowo układ sterowania jest wyposażony w moduł powiadomienia GSM, który informuje o stanach awaryjnych występujących podczas badań. System jest konfigurowalny w zakresie nastaw, a parametry badania są wprowadzane w panelu HMI przez operatora.

Układ sterowania umieszczono w walizce transportowej (rys. 3).



Rys. 3. Walizka z układem sterowania (fot. M. Woszczyński)

### Funkcje systemu

System pomiarowo-sterujący umożliwił przeprowadzenie – w trybie manualnym i automatycznym – standardowych badań obciążania, badań ze stałą prędkością osiadania (CRP) oraz próby Utop Pal (przykładanie siły powodującej wsunięcie pala w podłoże).

Na ekranie głównym panelu HMI (rys. 4) przedstawiono próbę standardową w trybie automatycznym. W lewej części ekranu są podane wartości z czujników przemieszczenia, siły i ciśnienia w układzie hydraulicznym, a część prawa zawiera wyniki obliczenia średniego przemieszczenia pala, różnicę przemieszczenia pala względem poprzedniego stopnia pomiarowego oraz zadane w ustawieniach obciążenie nominalne.



Rys. 4. Główny ekran panelu operatorskiego

Na ekranie są też podawane wskaźniki działania pompy hydraulicznej (pompowanie, spuszczenie ciśnienia), numer aktualnie wykonywanego stopnia w postaci paska postępu, temperatura wewnątrz walizki sterowniczej oraz informacje tekstowe o uruchomieniu badania i czasie trwania aktualnego stopnia badania.

W trybie automatycznym badanie jest prowadzone zgodnie z wytycznymi normy [4]. Przykład automatycznego obciążenia pali z uwzględnieniem wyłącznie wciśnięcia podano w tablicy.

Badania można prowadzić również według scenariusza indywidualnego. Taki scenariusz jest najczęściej realizowany w czasie obciążenia kolumn wzmocniających podłoże lub w czasie obciążenia pali (według [5]). Do tego jest wykorzystywany manualny tryb pracy, którego ustawienia zaprezentowano na rys. 5. W tym trybie należy za pomocą klawiatury numerycznej wprowadzić liczbę stopni badania oraz wartości obciążenia w poszczególnych stopniach. Wartości siły we wszystkich pozostałych stopniach są automatycznie zerowane. Każdy stopień badania może być wykonywany ze stabilizacją lub bez stabilizacji.

### Przykład badania (wciśkanie)

Obciążenie obliczeniowe $N = 1040$ kN Maksymalna wartość obciążenia $Q_{max} = 1580$ kN Współczynnik przecięcia $1,5$		
Wartość nośności obliczeniowej $N$ , %	Wartość obciążenia, kN	Stabilizacja
<b>Cykł I (100%)</b>		
12,50	130	tak
25,00	260	tak
37,50	390	tak
50,00	520	tak
62,50	650	tak
75,00	780	tak
87,50	910	tak
100,00	1040	tak
75,00	780	nie
50,00	520	nie
25,00	260	nie
0,00	0	tak
<b>Cykł II (150%)</b>		
25,00	260	nie
50,00	520	nie
75,00	780	nie
100,00	1040	nie
112,50	1170	tak
125,00	1300	tak
137,50	1430	tak
150,00	1560	tak
125,00	1300	nie
100,00	1040	nie
75,00	780	nie
50,00	520	nie
25,00	260	nie
0,00	0	tak



Rys. 5. Okno ustawień w panelu HMI

Parametry wspólne dla wszystkich prób są wprowadzane w ustawieniach ogólnych. Są to: czas utrzymania siły przy stabilizacji i bez stabilizacji, dopuszczalna różnica przemieszczenia między kolejnymi stopniami badania oraz dopuszczalna różnica przemieszczenia siłownika i kolumny.

Układ umożliwia prowadzenie badań ze stałą prędkością osiadania pala/kolumny. Służą do tego tryb CRP (Constant Rate of Penetration – rys. 6), który polega na takim obciążeniu badanego elementu, aby osiadał on z określoną prędkością, podaną przez operatora. W tym badaniu należy określić prędkość osiadania [mm/min], maksymalną wartość osiadania [mm] oraz cykl zapisu danych [s].

Dodatkowo w systemie sterowania zaimplementowano funkcję Utop pal (rys. 7), która umożliwia działanie na pal/kolumnę z określoną siłą, bez kontroli warunku dopuszczalnego przemieszczenia.



Rys. 6. Ekran trybu CRP



Rys. 7. Ekran funkcji Utop pal

System sterowania umożliwił również podgląd historii prowadzonych badań. W głównej tabeli są zapisywane: data i czas, obciążenie aktualne i założone, ciśnienie, przemieszczenia pala, średnie przemieszczenie pala, różnica przemieszczenia, przemieszczenie siłownika oraz prędkość osiadania w trybie CRP.

Lista badań umożliwiła wyświetlenie w tabeli zapisanych wartości o poprzednio prowadzonych badań. Dodatkowo na ekranie jest podawana informacja o dostępnym wolnym miejscu (w [kB]) w pamięci USB.

#### Oprogramowanie wizualizacyjne

W ramach projektu opracowano program umożliwiający wizualizację wyników badań (rys. 8). Do komunikacji ze sterownikiem PLC wykorzystano protokół MODBUS TCP/IP. Głównym zadaniem programu jest prezentacja wyników próbnego obciążenia pali, interpretacja tych wyników, informowanie o stanach alarmowych oraz archiwizacja danych pomiarowych.

W celu prawidłowego nawiązania połączenia ze sterownikiem PLC umożliwiono wprowadzanie danych dotyczących adresu IP sterownika oraz miejsca zapisu danych. Informacje te, dotyczące zapisanego adresu sterownika PLC, z którym aplikacja podejmuje próbę łączenia się, oraz folder lokalizacji zapisywanych plików są wyświetlane na peasku stanu aplikacji.



Rys. 8. Ekran wizualizacji

Kluczowym elementem głównego okna programu jest układ trzech zakładek: Dane, Wyniki, Wykres. W zakładce Dane umieszczono zestaw komponentów prezentujących pobierane ze sterownika PLC wartości poszczególnych parametrów. Wyświetlane są bieżące informacje z badania, tj. wartości z czujników przemieszczenia, siły i ciśnienia w układzie hydraulicznym oraz wartości średniego przemieszczenia pala i różnicy przemieszczenia pala względem poprzedniego stopnia pomiarowego. Na ekranie umieszczono również symbole informujące użytkownika o statusie połączenia ze sterownikiem PLC, zapisie danych, działaniu pompy hydraulicznej, trybie prowadzonego badania oraz o tym, czy w sterowniku została uruchomiona funkcja Utop pala. W zakładce Wyniki umieszczono tabelę z zarejestrowanymi danymi. Program umożliwił eksport oraz import danych do/z Excela. Zakładka Wykres zawiera wykresy wygenerowane z wyników badań. Istotne komunikaty informujące o stanie połączenia ze sterownikiem PLC oraz wszystkie stany zgłoszonych przez PLC alarmów są wyświetlane w tabeli Log zdarzeń.

#### Podsumowanie

Opracowany układ pomiarowo-sterujący jest eksploatowany od kilku miesięcy na budach w Polsce. Automatyzacja badań próbnego obciążenia kolumn usprawniła pracę badawczą, zwiększając precyzję wyników, jednocześnie znacznie odciążając operatorów od wymogu ciągłej obserwacji badanego obiektu. Stała obserwacja siły, ciśnienia, przemieszczenia kolumny oraz wysunięcia siłownika umożliwiła wykrywanie sytuacji awaryjnych, takich jak awaria pompy, wysunięcie kolumny kotwiącej, „popłynięcie” badanego elementu oraz awaria czujników. W przypadku wystąpienia stanów awaryjnych operator jest natychmiast powiadamiany poprzez wysłanie SMS-a.

Dane są rejestrowane za pośrednictwem sieci Wi-Fi na komputerze oraz na podłączonej pamięci USB. Operator może na bieżąco śledzić przebieg badania w programie wizualizacyjnym, bez konieczności przebywania bezpośrednio przy obciążanym obiekcie. Dzięki bezprzewodowej komunikacji pomiędzy wielką sterowniczą a komputerem, zwiększono bezpieczeństwo operatora oraz komfort jego pracy, szczególnie w warunkach zimowych.

Budowa systemu wpisuje się w strategię podnoszenia jakości nie tylko wykonywanych elementów, ale także ich badania.

\* \* \*

Badania były częściowo finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) umowa PBS3/B2/18/2015 – Projektowanie bezpośrednie kolumn GMC na podstawie badań polowych realizowanych przez konsorcjum Politechnika Gdańska oraz Menard Polska sp. z o.o.

#### PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Gwizdała K.: Fundamenty palowe, część 1 i 2. PWN, Warszawa 2013.
- [2] Jasiulek D., Jendryk S., Rogala-Rojek J., Stankiewicz K., Woszczyński M.: Control and identification systems in the mining industry. 22nd World Mining Congress and Expo, Istanbul, 14-16 September 2011, Volume II.
- [3] Krasinek A.: Pale przemieszczeniowe wkręcane. Współpraca z niespoistym podłożem gruntowym. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Monografie nr 134, 2013.
- [4] PN-B-02482:1983 Fundamenty budowlane – Nośność pali i fundamentów palowych.
- [5] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.
- [6] Stankiewicz K., Jasiulek D., Rogala-Rojek J., Woszczyński M.: Prace badawcze Instytutu Techniki Górniczej KOMAG w zakresie innowacyjnych rozwiązań mechatronicznych. „Maszyny Górnicze” nr 4, 2010.
- [7] Sprawozdanie z wewnętrznej pracy statutowej ITG KOMAG „System rejestracji i sterowania do próbnego obciążania pali”. KOMAG, 2018.
- [8] ASIRI. Projekt National: Amélioration des Sols par Inclusions Rigides. English version: Recommendations for the design, execution and control of rigid inclusion ground improvements, 2012.