

**INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW**  
**Zakład Diagnostyki Nawierzchni**

**ZAŁĄCZNIK 4**  
**PROCEDURY KALIBRACYJNE DLA LABORATORIUM**  
**KONTROLNEGO**

Zleceniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad  
Umowa Nr 28/12/2005 z dnia 25.10.2005

Warszawa, grudzień 2005

Poniżej przedstawiono procedury kalibracyjne, według których Laboratorium Kontrolne powinno wykonywać kalibrację sprzętu. Częstotliwość oraz rodzaj wykonywanych badań kalibracyjnych opisano w Planie Kalibracji FWD.

Niniejszy poziom kalibracji składa się z pięciu procedur opisanych w protokołach:

1. Protokół LK1-2005 Dynamiczna kalibracja czujnika siły FWD,
2. Protokół LK2-2005 Kalibracja laboratoryjna czujników ugięć FWD,
3. Protokół LK3-2005 Kalibracja in-situ zdemontowanych czujników ugięć,
4. Protokół LK4-2005 Procedura harmonizacji FWD in-situ
5. Protokół LK5-2005 Statyczna kalibracja czujnika siły FWD.

# Protokół LK1-2005

## Dynamiczna kalibracja czujnika siły FWD

NINIEJSZY PROTOKÓŁ ZOSTAŁ WYDANY POD STAŁYM OZNACZENIEM „PROTOKÓŁ LK1”. LICZBA ZNAJDUJĄCA SIĘ BEZPOŚREDNIO ZA OZNACZENIEM WSKAZUJE ROK WPROWADZENIA PROTOKOŁU W ŻYCIĘ.

### 1. Zakres

Niniejszy protokół przedstawia sposób określenia współczynnika kalibracji czujnika siły FWD poprzez wykonanie szeregu zrzutów z różnych wysokości, przy czujniku siły zamontowanym na płycie naciskowej FWD.

### 2. Dokumenty związane

Protokół LK4; Procedura harmonizacji FWD in situ.

### 3. Znaczenie i stosowanie

- 3.1. Dynamiczna kalibracja czujnika siły FWD stosuje się, aby mieć pewność, że przyrząd precyzyjnie mierzy szczytową wartość impulsu obciążającego. Stosuje się różne wysokości zrzutu w celu wykrycia nieliniowości wyników generowanych przez czujnik siły.
- 3.2. Niniejszy protokół musi być stosowany z częstotliwością wskazaną w Planie Kalibracji lub częściej, według uznania użytkownika FWD. Jeżeli wyniki zastosowania tej procedury dadzą podstawy do dalszych badań i/lub naprawy lub serwisowania części, to protokół ten należy powtórzyć po wykonaniu naprawy.
- 3.3. Niniejszy protokół można stosować do weryfikowania dokładności czujnika siły FWD w dowolnej procedurze harmonizacyjnej FWD in-situ (patrz protokół LK4). W takim przypadku należy stosować „wersję skróconą”. We wszystkich innych przypadkach konieczne jest stosowanie „wersji normalnej”.

### 4. Przyrządy

- Ugięciomierz FWD.
- Sztywna nawierzchnia testowa.
- Platforma wzorcowego czujnika siły o średnicy minimalnej 300 mm i maksymalnej 450 mm. Platforma musi zawierać trzy czujniki siły lub jeden, indywidualnie przygotowany czujnik siły o szerokiej podstawie, umieszczony pomiędzy dwiema płytami, tak by otrzymać stabilną platformę. Górna płyta musi być wykonana z lekkiego metalu. Płyta dolna może być wykonana ze stali nierdzewnej.
- Platforma musi w warunkach statycznych spełniać poniższe wymagania:
  - zakres błęd, obejmujący nieliniowość, powtarzalność i histerezę:  $\pm 0,2$  kN dla pełnego zakresu skali, jeżeli maksymalne obciążenie FWD w próbie (badaniu) jest mniejsze niż 150 kN, w innych wypadkach  $\pm 0,4$  kN dla pełnego zakresu skali.
  - przedział temperatury użytkowania od 0 do 40°C
- Odpowiednie urządzenie przetwarzające sygnały, z funkcją zapamiętywania maksimum.
- Odpowiednie wyposażenie do odczytu/pobierania danych.
- Poziomica

- Termometr

## 5. Procedura

### Wersja normalna i skrócona (5.1 – 5.4)

- 5.1. Do arkusza kalibracji należy wpisać poniższe dane:
  - Użytkownik FWD
  - Producent FWD
  - Typ/numer seryjny/numer identyfikacyjny FWD
  - Numer seryjny czujnika siły FWD
  - Maksymalne obciążenie robocze czujnika siły FWD
  - Numer seryjny (numery seryjne) wzorcowego czujnika siły
  - Obecny współczynnik wzmocnienia czujnika siły FWD
  - Nazwisko osoby kalibrującej
  - Data ostatniego kalibrowania wzorcowego czujnika siły
  - Miejsce kalibrowania
  - Data i godzina ostatniego kalibrowania
  - Data i godzina kalibrowania
- 5.2. Platformę wzorcowego czujnika siły ustawić tak, by dolna płyta znalazła się na gładkiej, sztywnej powierzchni, gdzie ugięcie w osi płyty naciskowej wynosi mniej niż 1 mm pod obciążeniem 70 kN. Sprawdzić czy pod platformą nie ma piasku lub innych luźnych zanieczyszczeń. W razie potrzeby użyć plastra, aby uzyskać pewne zamocowanie. Poziomicą sprawdzić, czy platforma jest pozioma.
- 5.3. Do platformy wzorcowego czujnika siły podłączyć elektroniczny układ sterujący i przetwarzający sygnały oraz system odczytywania danych. Płytę naciskową FWD umieścić nad platformą wzorcowego czujnika siły, tak by platforma wzorcowego czujnika siły i płyta naciskowa FWD były w jednej osi.
- 5.4. Sprawdzić, czy płyta naciskowa FWD prawidłowo spoczywa na platformie. Należy sprawdzić, a w razie potrzeby wyczyścić i mocno wcisnąć, wszystkie złączki.

### Wersja normalna (5.5 – 5.10)

- 5.5. Przed przystąpieniem do badań należy wyłączyć wszelkie filtry danych w FWD. Należy sprawdzić, czy wyłączona została funkcja wygładzania. Bezpośrednio przed rozpoczęciem kalibrowania należy wykonać serię 10 zrzutów, tak by mieć pewność, że gumowe odbojniki odpowiednio się rozgrzały.
- 5.6. Jeżeli próba jest wykonywana w pomieszczeniu zamkniętym, należy dać czas na wyrównanie się temperatury FWD z temperaturą pomieszczenia, jeżeli FWD znajdował się na zewnątrz, przy temperaturze powietrza niższej niż +5°C lub wyższej niż +25°C. Jeżeli próba jest przeprowadzana na dworze, to temperatura powietrza musi mieścić się w przedziale +5°C do +25°C.
- 5.7. Wybrać trzy wysokości zrzutu. Wielkość zrzutu dobrać tak, by wartości maksymalne obciążeń uzyskać przy wysokości 2 – typowej dla obciążeń maksymalnych w normalnych próbach. Dolna wysokość zrzutu nie powinna być mniejsza niż 20 % pełnej wysokości zrzutu.

- 5.8. Opuścić płytę naciskową i wykonać poniższą sekwencję zrzutów, rejestrując wartości maksymalne obciążeń czujnika siły FWD i wzorcowego czujnika siły:
- 3 zrzuty przygotowujące z wysokości 2 (bez rejestrowania danych), po których następuje przerwa
  - 6 zrzutów z wysokości 1, z pauzą po każdym zrzucie
  - 6 zrzutów z wysokości 2, z pauzą po każdym zrzucie
  - 6 zrzutów z wysokości 3, z pauzą po każdym zrzucie, z wyjątkiem ostatniego.
  - Zatrzymanie po ostatnim zrzucie (płyta naciskowa FWD pozostaje opuszczona).
- 5.9. Dobrą praktyką jest zaprogramowanie sześciu zrzutów z każdej wysokości, a nie pięciu, tak by jeden mieć „w zapasie” na wypadek, gdyby któryś zrzut nie został zarejestrowany przez przyrządy systemu wzorcowego. Jeżeli pierwszych pięć zrzutów uda się, to dane szóstego zrzutu można pominąć.
- 5.10. Serie zrzutów przedstawione w poprzednich punktach opisać jako „Próba 1”. Opisaną procedurę powtórzyć i opisać ją jako „Próba 2”.

#### **Wersja krótka (5.11 – 5.14)**

- 5.11. Przed rozpoczęciem badań należy upewnić się, że filtrowanie danych i wygładzanie wartości maksymalnych wzorcowego czujnika siły są podobne jak w badanym czujniku siły FWD. Bezpośrednio przed rozpoczęciem weryfikacji wykonać serię dziesięciu zrzutów w celu rozgrzania gumowych odbojników.
- 5.12. Wysokość zrzutu ustalić tak, by uzyskać wartości obciążenia jak w procedurze harmonizacji FWD In-situ (protokół LK4).
- 5.13. Opuścić płytę naciskową FWD i wykonać poniższą sekwencję zrzutów, rejestrując wartości maksymalne obciążeń czujnika siły FWD i wzorcowego czujnika siły:
- 3 zrzuty przygotowujące przy zadanym obciążeniu (bez rejestrowania danych), po których następuje przerwa
  - 6 zrzutów przy zadanym obciążeniu (z pauzą po każdym zrzucie).
- 5.14. Dobrą praktyką jest zaprogramowanie sześciu zrzutów, a nie pięciu, tak by jeden mieć „w zapasie” na wypadek, gdyby któryś zrzut nie został zarejestrowany przez przyrządy systemu wzorcowego. Jeżeli pierwszych pięć zrzutów uda się, to dane szóstego zrzutu można pominąć.

## **6. Analiza**

### **Wersja normalna (6.1 – 6.4)**

- 6.1. Należy zapoznać się z wykresem przebiegów czasowych, aby przed odrzuceniem danych weryfikacyjnych ustalić, czy zakłócenia nie powodują problemów. Jeżeli tak, to trzeba wskazać ich źródło i zgłosić uzyskany wynik.
- 6.2. Dla każdego zrzutu obliczyć stosunek obciążenia wzorcowego do obciążenia FWD (równanie 8.1). Określić współczynnik korygujący dla czujnika siły FWD (równanie 8.2), korzystając z danych z próby 1. Procedurę powtórzyć dla danych z próby 2. Jeżeli różnica pomiędzy wynikami obu prób nie przekracza 0,003, to nie ma potrzeby przeprowadzania trzeciej próby. Uśrednić wyniki pierwszych dwóch prób, a uzyskaną średnią określić jako współczynnik kalibracji czujnika siły FWD.

- 6.3. Błąd standardowy współczynnika korygującego dla czujnika siły FWD (równanie 8.3) większy niż 0,0020 dyskwalifikuje kalibrację czujnika siły FWD. Przyczynę problemu należy znaleźć i usunąć, po czym powtórzyć procedurę kalibrowania czujnika siły FWD.
- 6.4. W wypadku przeprowadzenia trzech prób należy obliczyć średnią i odchylenie standardowe wszystkich trzech wyników (równania 8.4 i 8.5). Jeżeli odchylenie standardowe nie jest większe niż 0,003, to obliczoną średnią przyjmuje się jako współczynnik kalibracji czujnika siły FWD. Jeżeli standardowe odchylenie jest większe niż 0,003, to trzeba powtórzyć całą próbę. Należy też zweryfikować błąd standardowy z poprzedniego punktu (kroku).

#### **Wersja krótka (6.5 – 6.6)**

- 6.5. Należy zapoznać się z wykresem przebiegów czasowych, aby przed odrzuceniem danych weryfikacyjnych ustalić, czy zakłócenia nie powodują problemów. Jeżeli tak, to trzeba wskazać ich źródło i zgłosić uzyskany wynik.
- 6.6. Dla każdego zrzutu obliczyć stosunek obciążenia wzorcowego do obciążenia FWD (równanie 8.1). Określić współczynnik korygujący dla czujnika siły FWD (równanie 8.2) korzystając z zebranych danych.

### **7. Symbole**

$i$	=	Etykieta zrzutu
$k$	=	Etykieta wysokości zrzutu
$m$	=	Etykieta próby
$NK$	=	Liczba zrzutów (= 5)
$NH$	=	Liczba wysokości zrzutów (= 3 w wersji normalnej; 1 w wersji krótkiej)
$NT$	=	Liczba prób (= 2 lub 3 w wersji normalnej; 1 w wersji krótkiej)
$F_{ikm}$	=	Wielkość obciążenia FWD przy zrzucie $i$ , z wysokości $k$ , w próbie $m$ (kN)
$F_{ikm,ref}$	=	Wielkość obciążenia wzorcowego przy zrzucie $i$ , z wysokości $k$ , w próbie $m$ (kN)
$F_{km}$	=	Wielkość obciążenia FWD dla wysokości zrzutu $k$ , uśredniona dla $NK$ zrzutów w próbie $m$ (kN)
$R_{ikm}$	=	Stosunek obciążenia wzorcowego do obciążenia FWD w zrzucie $i$ , przy wysokości $k$ , w próbie $m$ .
$R_{im}$	=	Stosunek obciążenia wzorcowego do obciążenia FWD w zrzucie $i$ , niezależnie od wysokości zrzutu, w próbie $m$
$R_m$	=	Współczynnik korygujący czujnika siły FWD na podstawie danych z próby $m$
$R_{mean}$	=	Współczynnik korygujących czujnika siły FWD na podstawie danych z $NT$ prób
$sR_m$	=	Błąd standardowy współczynnika korygującego dla czujnika siły FWD w próbie $m$
$sT$	=	Odchylenie standardowe współczynnika korygującego czujnika siły FWD w $NT$ próbach

## 8. Równania

8.1. Obliczenie, dla każdego zrzutu, dla każdej wysokości zrzutu i dla każdej próby, stosunku obciążenia wzorcowego do obciążenia FWD:

$$R_{ikm} = \frac{F_{ikm,ref}}{F_{ikm}}$$

8.2. Obliczenie, dla każdej próby, współczynnika korygującego dla czujnika siły FWD.

$$R_m = \frac{\sum_{k=1}^{NH} \sum_{i=1}^{NK} R_{ikm}}{NH \cdot NK}$$

8.3. Obliczenie błędu standardowego współczynnika korygującego czujnika siły FWD:

$$sR_m = \sqrt{\frac{NK \cdot NH \cdot \sum_{i=1}^{NK \cdot NH} R_{im}^2 - \left( \sum_{i=1}^{NK \cdot NH} R_{im} \right)^2}{NK \cdot NH \cdot (NK \cdot NH - 1)}}$$

8.4. Obliczenie średniej współczynników korygujących ogniów obciążnikowych FWD dla wszystkich trzech prób:

$$R_{mean} = \frac{\sum_{m=1}^{NT} R_m}{NT}$$

8.5. Obliczenie odchylenia standardowego współczynników korygujących czujnika siły FWD dla trzech prób.

$$sT = \sqrt{\frac{NT \cdot \sum_{m=1}^{NT} R_m^2 - \left( \sum_{m=1}^{NT} R_m \right)^2}{NT \cdot (NT - 1)}}$$

## 9. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać co najmniej:

- Dane arkusza kalibracyjnego
- Wyniki badań
- Wyniki analizy

# Protokół LK2-2005

## Kalibracja laboratoryjna czujników ugięć FWD

NINIEJSZY PROTOKÓŁ ZOSTAŁ WYDANY POD STAŁYM OZNACZENIEM „PROTOKÓŁ LK2”. LICZBA ZNAJDUJĄCA SIĘ BEZPOŚREDNIO ZA OZNACZENIEM WSKAZUJE ROK WPROWADZENIA PROTOKOŁU W ŻYCIĘ.

### 1. Zakres

- 1.1. Niniejszy protokół przedstawia sposób przeprowadzenia oceny zdolności wykorzystania czujnika ugięć z elektroniką przetwarzającą sygnały do generowania wartości maksymalnych ugięć, gdy czujnik ugięć jest poddawany pojedynczym impulsom ugięć o różnej amplitudzie i czasach.
- 1.2. Protokół obejmuje ustalenie współczynnika kalibracji czujnika ugięć dla standardowo stosowanych czasów trwania impulsu.

### 2. Znaczenie i stosowanie

- 2.1. Celem niniejszej procedury jest ustalenie, czy elektronika FWD przetwarzająca sygnały jest w stanie generować prawidłowe wartości maksymalne ugięcia w przypadkach zmiennych amplitud i czasów trwania impulsów ugięć. W procedurze tej czujnik ugięć jest zainstalowany na stole wibracyjnym. Czujnik jest poddawany różnym seriom impulsów uginających, składających się z różnych kombinacji amplitud przemieszczenia i czasów narastania impulsu uginającego. Sygnał wyjściowy czujnika jest porównywany z sygnałem wyjściowym przyrządu wzorcowego. Jeżeli rozrzut i różnice pomiędzy danymi wyjściowymi wykraczają poza podane granice, to konieczne jest znalezienie przyczyny tego problemu. Jeżeli okaże się, że czas narastania impulsu uginającego ma szczególnie wpływ na zależność między ugięciem wskazywanym przez czujnik a ugięciem wskazywanym przez przyrządy wzorcowe, to czujnik i elektronikę przetwarzającą sygnały powinien skontrolować producent FWD w celu usunięcia tego problemu. Także niedokładności danych z czujnika ugięć wykraczające poza podane wartości wymagają skontrolowania sprzętu przez producenta FWD. Po usunięciu problemu przez producenta badania wg niniejszego protokołu należy powtórzyć. We wszystkich innych przypadkach oblicza się współczynniki wzmocnienia, tak by uzyskane z czujnika ugięć dane dostosować do danych wyjściowych z przyrządów wzorcowych.
- 2.2. Drugim celem tej procedury jest ustalanie współczynnika kalibracji badanego czujnika ugięć. Współczynnik ten oblicza się na podstawie stosunku wartości szczytowych ugięć, wskazanych przez badane czujniki ugięć i przez wzorcowy przetwornik przemieszczenia bądź przez równorzędne przyrządy wzorcowe. Współczynnik ten określa się dla zazwyczaj stosowanego czasu trwania impulsu obciążenia. Do obliczenia współczynnika kalibracji wykorzystuje się dane impulsu zmierzone w przedziałach czasowych w granicach 25% zazwyczaj stosowanego czasu trwania impulsu obciążającego.



- 2.3. Niniejszy protokół musi być stosowany z częstotliwością wskazaną w Planie Kalibracji lub częściej, tak jak to uzna użytkownik FWD. Jeżeli wyniki zastosowania tej procedury dadzą podstawy do dalszych badań i/lub naprawy lub serwisowania części, to protokół ten również musi zostać powtórzony po wykonaniu naprawy lub serwisu.

### **3. Aparatura**

- Ugięciomierz FWD
- Betonowy blok inercyjny lub stabilna, mocna podłoga o drganiach tła mniejszych niż 1  $\mu\text{m}$ .
- System badania drgań (wstrząsarka + wzmacniacz sygnału). System musi mieć możliwość generowania pojedynczych impulsów uginających do 2 mm, o różnych amplitudach, kształtach i czasach trwania, odpowiadających impulsom uginającym generowanym przez FWD.
- Wzorcowy przetwornik przemieszczenia lub wzorcowy serwoakcelerometr.
- Odpowiednia aparatura do przetwarzania sygnałów, z funkcją zapamiętywania maksimum.
- Odpowiednie wyposażenie do odczytu/pobierania danych.
- Programowany generator funkcji lub równorzędny, mogący generować pojedyncze impulsy udarowe.
- Poziomica.
- Zaciski do zamontowania czujników ugięć do cewki wstrząsarki. Należy stosować metale lekkie, aby jak najbardziej zmniejszyć efekty bezwładnościowe.

### **4. Przygotowanie**

- 4.1. Sprawdzić, czy wzorcowy przetwornik przemieszczenia i wszystkie urządzenia pomocnicze działają prawidłowo. Jeżeli nie jest możliwe, by przetwornik pracował płynnie i dokładnie, to weryfikację kalibracji należy przerwać. Treść dalszej części tego protokołu dotyczy stosowania przetwornika przemieszczenia do pomiaru przemieszczenia wzorcowego. Jeżeli do pomiaru przemieszczenia wzorcowego użyto serwoakcelerometru to treść dalszych punktów należy odpowiednio zinterpretować.
- 4.2. Sprawdzić czy wzorcowy system kalibracyjny jest umieszczony na pewnie podpartym bloku betonowym bądź na stabilnym urządzeniu do prób – w obu tych przypadkach zapewniona musi być możliwie najskuteczniejsza izolacja od drgań pochodzących z budynku. Wzorcowy przetwornik przemieszczenia zamocować w uchwycie w systemie wzorcowym, tak by znalazł się w pobliżu punktu zerowego (np. zerowego napięcia wyjściowego). Poziomicą sprawdzić, czy system wzorcowy jest poziomy oraz czy przetwornik jest ustawiony pionowo w swych uchwycie. Jeżeli warunki te nie są spełnione, skorygować ustawienia systemu i uchwytu, tak by osiągnąć poziom i pion.
- 4.3. Czujniki ugięć zdjąć z uchwytów na belce nośnej. Sprawdzić, czy na czujnikach nie ma brudu, który mógłby niekorzystnie wpłynąć na ich osadzenie w uchwycie czujników w systemie wzorcowym. Dla pewności podstawę czujnika wyczyścić.
- 4.4. Czujniki ugięć umieścić w uchwytach czujników ugięć w systemie wzorcowym i zacisnąć je w systemie, tak by obudowa czujnika ugięć nie mogła się w systemie przesunąć pod wpływem impulsów udarowych.

- 4.5. Czujniki ugięć przyłączyć do elektroniki sterującej FWD i przetwarzającej sygnały, po czym ją wyzerować. Sprawdzić, czy system wyzwalający działa prawidłowo.

## 5. Procedura

- 5.1. Do arkusza kalibracji należy wpisać poniższe dane:
- Użytkownik FWD
  - Producent FWD
  - Typ/numer seryjny/numer identyfikacyjny FWD
  - Numery seryjne czujnika ugięć FWD
  - Obecne współczynniki kalibracji czujników ugięć FWD
  - Zadany czas impulsu
  - Lokalizacja stanowiska kalibrującego
  - Nazwisko osoby kalibrującej
  - Data i godzina kalibrowania
  - Data ostatniego kalibrowania
  - Numer seryjny wzorcowego przetwornika przemieszczeń lub wzorcowego serwoakcelerometru.
  - Data ostatniej kalibracji wzorcowego przetwornika przemieszczeń lub wzorcowego serwoakcelerometru.

### Wersja normalna (6.2 – 6.4)

- 5.2. Przed przystąpieniem do jakichkolwiek prac kalibracyjnych trzeba wyłączyć wszelkie filtry w FWD. Należy przykładać pojedyncze impulsy obciążeń o różnym poziomie ugięć i czasie narastania, tak jak to pokazano w Tabeli 1. Każdą kombinację poziomu ugięcia i czasu narastania impulsu należy powtórzyć trzykrotnie. Zarejestrować należy przebiegi czasowe ugięć z wzorcowego przetwornika przemieszczeń i ze wszystkich zamontowanych czujników ugięć. Sprawdzić, czy przebiegi czasowe są wolne od zakłóceń. Przyczyny zakłóceń usunąć, a jeżeli jest to niemożliwe, to nie kontynuować kalibrowania.

**Tabela 1 Kombinacje poziomu ugięć i czasu narastania impulsu**

Poziom ugięcia ( $\mu\text{m}$ )	Czas narastania impulsu (ms)			
	5-10	10-15	15-20	20-25
50-200	TAK	TAK	TAK	TAK
200-400	TAK	TAK	TAK	TAK
400-600	NIE	TAK	TAK	TAK

Kombinacji krótkiego czasu impulsu i wysokiego poziomu ugięcia nie stosuje się, gdyż większość wstrząsarek może mieć trudności z wygenerowaniem tego rodzaju pojedynczego impulsu udarowego.

- 5.3. W całości zrealizować sekwencję pojedynczych impulsów obciążeń wg Tabeli 1: po każdym impulsie udarowym musi nastąpić pauza. Dla każdego impulsu zarejestrować:
- numer kolejny impulsu udarowego
  - czas narastania we wzorcowym przetworniku przemieszczeń
  - wartość maksymalną ugięcia (w  $\mu\text{m}$ ) zmierzona przez wzorcowy przetwornik przemieszczeń.
  - wartość maksymalną ugięć (w  $\mu\text{m}$ ) zmierzona przez czujniki ugięć.

Mogą pojawić się problemy przy dokładnym ustalaniu czasu narastania impulsów

udarowych, gdyż punkt początkowy impulsu nie jest dokładnie zdefiniowany. Wskazane

jest przyjęcie jako punktu początkowego tego momentu, w którym ugięcie zarejestrowane

po stronie narastania impulsu przez wzorcowy przetwornik przemieszczenia osiągnie

wartość dwóch procent swej wartości maksymalnej.

- 5.4. Sprawdzić, czy wszystkie dane z próby zostały prawidłowo zapisane. Dane nieprawidłowe z powodu zakłócających drgań tła należy odrzucić.

#### **Wersja krótka (6.5 – 6.7)**

- 5.5. Przed przystąpieniem do jakichkolwiek prac kalibracyjnych należy wyłączyć wszelkie filtry w FWD. System wibracyjny nastawić na generowanie pojedynczych impulsów udarowych o czasie trwania leżącym w przedziale 25% wokół czasu impulsu obciążającego zazwyczaj stosowanego w badanym FWD.

- 5.6. Przykładać pojedyncze impulsy udarowe o przynajmniej dziesięciu poziomach ugięcia w zakresie od 50  $\mu\text{m}$  do 600  $\mu\text{m}$ . Dla każdego poziomu ugięcia próbę powtórzyć trzykrotnie. Po każdym impulsie udarowym musi nastąpić pauza. Dla każdego impulsu zarejestrować:

- numer kolejny impulsu udarowego
- czas narastania we wzorcowym przetworniku przemieszczeń
- wartość maksymalną ugięcia (w  $\mu\text{m}$ ) zmierzona przez wzorcowy przetwornik przemieszczeń.
- wartość maksymalną ugięć (w  $\mu\text{m}$ ) zmierzona przez czujniki ugięć.

- 5.7. Zarejestrować należy przebiegi czasowe ugięć z wzorcowego przetwornika przemieszczeń i ze wszystkich zamontowanych czujników ugięć. Sprawdzić, czy przebiegi czasowe są wolne od zakłóceń. Dane nieprawidłowe z powodu zakłócających drgań tła należy odrzucić.

## **6. Analiza**

### **Wersja normalna (7.1 – 7.4)**

- 6.1. Dla każdego ważnego impulsu udarowego obliczyć różnicę pomiędzy wartościami maksymalnymi ugięć wskazanymi przez czujnik ugięć FWD i wzorcowy przetwornik

ugięć. Obliczyć stosunek tej różnicy do wartości szczytowej ugięcia wygenerowanej przez przetwornik wzorcowy (równanie 9.1). Stosunek ten nosi nazwę „współczynnika odchylenia”.

- 6.2. Dla każdego czujnika ugięć, dla wszystkich współczynników odchylenia, przeprowadzić regresję metodą najmniejszych kwadratów, gdzie zmienną zależną będzie współczynnik odchylenia badanego czujnika, a zmienną niezależną czas narastania impulsu we wzorcowym przetworniku przemieszczenia, wyrażony w [ms] (równania 9.2 i 9.3). Nachylenie linii regresji  $\beta_1$  reprezentuje wrażliwość systemu na dokładność wartości maksymalnej ugięcia w zależności od zmian czasu narastania impulsu.
- 6.3. Wartość bezwzględna nachylenia linii regresji nie powinna być większa niż 0,0010 m/m/ms. Większe wartości wskazują na istnienie nie dających się pominąć oddziaływań czasu trwania impulsu obciążającego na wartość maksymalną ugięcia. W wypadku przekroczenia tej wartości producent FWD powinien sprawdzić czujnik ugięć FWD oraz elektronikę przetwarzającą sygnały w celu usunięcia tego problemu. Po skorygowaniu tego problemu przez producenta FWD procedurę kalibrowania należy przeprowadzić ponownie.
- 6.4. Błąd standardowy nachylenia linii regresji (równanie 9.4) większy niż 0,0025 dyskwalifikuje wyniki badania czujnika ugięć. Przyczynę problemu należy znaleźć i usunąć, po czym próbę kalibracji powtórzyć. Utrzymywanie się braku dokładności danych z czujnika ugięć na poziomie wykraczającym poza podane wartości pociąga za sobą konieczność zbadania sprzętu przez producenta FWD w celu usunięcia tego problemu. Po skorygowaniu problemu przez producenta niniejszą procedurę weryfikującą należy przeprowadzić ponownie.

#### **Wersja normalna i krótka (7.5 – 7.6)**

- 6.5. Dla każdego ważnego impulsu obciążającego, o czasie trwania 25% zazwyczaj stosowanego czasu impulsu obciążającego, obliczyć stosunek wartości maksymalnej z wzorcowego przetwornika przemieszczenia do wartości maksymalnej ugięcia z czujnika ugięć FWD (równanie 9.5). Obliczyć wartość średnią wyliczonych proporcji (równanie 9.6). Uzyskaną średnią definiuje się jako „współczynnik kalibracji czujnika ugięć”.
- 6.6. Błąd standardowy współczynnika kalibracji in-situ czujnika ugięć (równanie 9.7) przekraczający 0,0020 dyskwalifikuje kalibrację czujnika ugięć. Źródło problemu należy znaleźć, usunąć je, po czym powtórzyć procedurę kalibrowania.

## **7. Symbole**

$i$	=	Etykieta próby
$j$	=	Etykieta próby dla prób o czasie impulsu w obrębie 25% wokół zazwyczaj stosowanego czasu impulsu obciążającego
NK	=	Liczba prób na jedną kombinację poziomu ugięcia i czasu narastania
NS	=	Całkowita liczba prób
NT	=	Całkowita liczba prób o czasie impulsu 25% zazwyczaj stosowanego czasu impulsu obciążającego
$d_i$	=	Ugięcie zmierzone przez czujnik ugięć w próbie $i$
$d_{i,ref}$	=	Ugięcia zmierzone przez wzorcowy przetwornik przemieszczenia w próbie $i$
sd	=	Standardowe odchylenie ugięć mierzonych przez czujnik ugięć w NK próbach

$sd_{ref}$	= Standardowe odchylenie ugięć mierzonych przez wzorcowy przetwornik przemieszczenia w NK próbach
$D_i$	= Współczynnik ugięcia czujnika ugięć w próbie $i$
$R_j$	= Współczynnik ugięcia jako stosunek wyniku z wzorcowego przetwornika ugięć do wyniku z czujnika ugięć w próbie $j$
$R_{mean}$	= Współczynnik kalibracyjny czujnika ugięć w NT próbach
$sR_{mean}$	= Błąd standardowy współczynnika kalibracyjnego ugięcia in-situ
$x_i$	= Czas narastania impulsu zmierzony przez przetwornik wzorcowy w próbie $i$
$\beta_0$	= Punkt przecięcia prostej regresji liniowej z osią współrzędnych
$\beta_1$	= Nachylenie linii regresji liniowej
$s_{\beta_1}$	= Błąd standardowy współczynnika nachylenia

## 8. Równania

8.1. Obliczenie współczynnika ugięcia dla czujnika ugięć:

$$D_i = \frac{d_i - d_{i,ref}}{d_{i,ref}}$$

8.2. Obliczenie punkt przecięcia prostej regresji z osią współrzędnych:

$$\beta_0 = \frac{\sum_{i=1}^{NS} D_i \sum_{i=1}^{NS} x_i^2 - \sum_{i=1}^{NS} x_i \sum_{i=1}^{NS} x_i D_i}{NS \cdot \sum_{i=1}^{NS} x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^{NS} x_i \right)^2}$$

8.3. Obliczenie nachylenia linii regresji:

$$\beta_1 = \frac{NS \cdot \sum_{i=1}^{NS} x_i D_i - \sum_{i=1}^{NS} x_i \sum_{i=1}^{NS} D_i}{NS \cdot \sum_{i=1}^{NS} x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^{NS} x_i \right)^2}$$

8.4. Obliczenie błędu standardowego współczynnika nachylenia:

$$s_{\beta_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NS} D_i^2 - \beta_0 \cdot \sum_{i=1}^{NS} D_i - \beta_1 \cdot \sum_{i=1}^{NS} x_i D_i}{NS \cdot \sum_{i=1}^{NS} x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^{NS} x_i \right)^2} \cdot \frac{NS}{NS - 2}}$$

8.5. Obliczenie stosunku ugięcia wzorcowego do ugięcia badanego czujnika:

$$R_j = \frac{d_{j,ref}}{d_j}$$

8.6. Obliczenie średniego współczynnika kalibracji czujnika w NT próbach:

$$R_{\text{mean}} = \frac{\sum_{j=1}^{NT} R_j}{NT}$$

8.7. Obliczenie błędu standardowego współczynnika kalibracji czujnika ugięć:

$$sR_{\text{mean}} = \sqrt{\frac{NT \cdot \sum_{j=1}^{NT} R_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{NT} R_j\right)^2}{NT \cdot (NT - 1)}}$$

## 9. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać co najmniej:

- Dane arkusza kalibracyjnego
- Wyniki badań
- Wyniki analizy

# Protokół LK3-2005

## Kalibracja in-situ zdemontowanych czujników ugięć

NINIEJSZY PROTOKÓŁ ZOSTAŁ WYDANY POD STAŁYM OZNACZENIEM „PROTOKÓŁ LK3”. LICZBA ZNAJDUJĄCA SIĘ BEZPOŚREDNIO ZA OZNACZENIEM WSKAZUJE ROK WPROWADZENIA PROTOKOŁU W ŻYCIĘ.

### 1. Zakres

Niniejszy protokół przedstawia sposób określenia in-situ współczynnika kalibracji czujników ugięć poprzez wykonanie szeregu zrzutów z różnych wysokości, przy czujniku zdemontowanym z belki i zamontowanym w uchwycie badawczym.

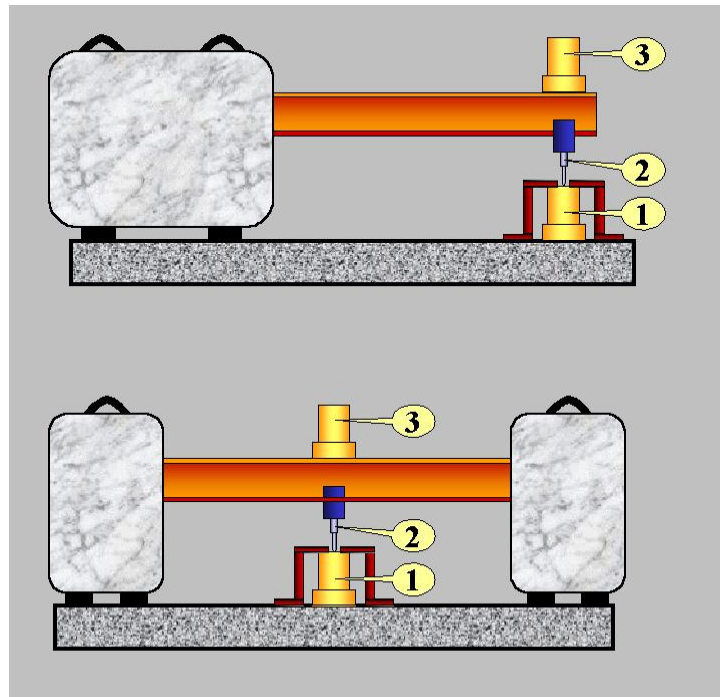
### 2. Dokumenty związane

Protokół LK2; Kalibracja laboratoryjna czujników ugięć FWD

### 3. Znaczenie i stosowanie

- 3.1. Celem tej procedury jest sprawdzenie czy badany czujnik ugięć dokładnie mierzy wartości maksymalne ugięć przy użyciu FWD, jako generatora obciążeń, w serii wielu zrzutów z różnych wysokości. W procedurze tej czujnik ugięć FWD jest zdemontowany i umieszczony w uchwycie (nr 1 na rysunku poniżej) znajdującym się w pewnej odległości od płyty naciskowej ugięciomierza, na nawierzchni lub podłodze. Czujnik pozostaje przyłączony do elektroniki FWD. Rusztowanie dla instrumentów jest ustawione nad uchwytem próbnym w taki sposób, że nie ma z nim kontaktu (patrz rysunek). Dwa instrumenty pomiarowe są zamontowane na rusztowaniu i odpowiednio ustawione względem czujnika ugięć. Pierwszy instrument mierzy maksymalną wzorcową wartość ugięcia (nr 2 na rysunku), drugi instrument (nr 3 na rysunku) sprawdza, czy rusztowanie samo zaczyna się poruszać lub drgać dopiero po zarejestrowaniu wartości maksymalnego ugięcia przez oprzyrządowanie wzorcowe i badany czujnik. Badanie to pokazuje, czy uwolnienie masy FWD wpływa na dokładność odczytów ugięć, oraz czy drgania związane z uwolnieniem są wystarczająco szybko tłumione. Przedwczesne drgania rusztowania, poprzedzające odczytanie wartości maksymalnych ugięcia przez oprzyrządowanie wzorcowe, dyskwalifikują próbę. Współczynnik kalibracyjny in-situ oblicza się na podstawie ważnych wyników z prób. Jeżeli uwolnienie masy spadającej i powstałe w ten sposób drgania wywierają widoczny, zakłócający wpływ na zarejestrowane ugięcia, to czujniki i elektronika przetwarzająca sygnały muszą zostać skontrolowane przez producenta FWD w celu usunięcia problemu. Także niedokładności danych z czujnika ugięć FWD wykraczające poza podane wartości wymagają skontrolowania sprzętu przez producenta FWD. Po usunięciu problemu przez producenta FWD niniejszy protokół należy ponownie zrealizować. We wszystkich innych przypadkach nieprawidłowości oblicza się współczynniki wzmocnienia, tak by dane wyjściowe z czujnika ugięć dostosować do danych wyjściowych z przyrządów wzorcowych.
- 3.2. Badane czujniki ugięć powinny zostać wykalibrowane przed zrealizowaniem tego protokołu, zgodnie z procedurą wskazaną w Protokole LK2.
- 3.3. Niniejszy protokół musi być stosowany z częstotliwością wskazaną w Planie Kalibracji lub częściej, tak jak to uzna użytkownik FWD. Jeżeli wyniki zastosowania tej procedury

dadzą podstawy do dalszych badań i/lub naprawy lub serwisowania części, to protokół ten również musi zostać powtórzony po wykonaniu naprawy lub serwisu.



#### 4. Aparatura

- Ugięciomierz FWD
- Uchwyt badawczy do zamontowania czujnika ugięć na nawierzchni lub podłodze badawczej.
- Rusztowanie z mocnymi podporami i poziomą belką oraz uchwytem badawczym na końcu lub w środku belki służące do zamontowania przyrządów wzorcowych. Jego konstrukcja musi dawać możliwość zamontowania czujnika ugięć do pomiaru drgań pionowych. Rusztowanie musi być tak zbudowane, by jego podpory dawały odpowiednie przesunięcie fazowe, tak by rusztowanie poruszało się pod wpływem wywołanych przez FWD obciążeń później niż wynosi czas osiągnięcia wartości maksymalnej ugięcia rejestrowanego przez czujnik w uchwycie badawczym.
- Wzorcowy przetwornik przemieszczenia.
- Wzorcowy czujnik ugięć o wysokiej dokładności.
- Odpowiednia aparatura do przetwarzania sygnałów, z funkcją zapamiętywania maksimum.
- Odpowiednia aparatura do odczytu/pobierania danych.
- Zaciski do mocowania czujników ugięć na rusztowaniu i uchwycie badawczym.

#### 5. Procedura

5.1. Do arkusza kalibracji należy wpisać poniższe dane:

- Użytkownik FWD
- Producent FWD
- Typ/numer seryjny/numer identyfikacyjny FWD
- Numer seryjny czujnika ugięć FWD



- Obecne współczynniki kalibracji dla czujników ugięć FWD
  - Lokalizacja stanowiska kalibracyjnego
  - Nazwisko operatora stanowiska kalibracyjnego
  - Data ostatniej kalibracji
  - Numer seryjny wzorcowego przetwornika przemieszczeń lub przyrządu równorzędnego.
  - Data ostatniej kalibracji wzorcowego przetwornika przemieszczeń lub przyrządu równorzędnego
  - Numer seryjny wzorcowego czujnika ugięć.
  - Data ostatniej kalibracji wzorcowego czujnika ugięć.
- 5.2. Do przeprowadzenia próby wybrać gładkie, poziome, mocne podłoże, bez żadnych widocznych pęknięć, gdzie można uzyskać maksymalne ugięcie rzędu 600  $\mu\text{m}$  przy zrzucie z wysokości 3.
- 5.3. Osobny uchwyt czujnika ugięć umieścić w odległości do 1 m od płyty naciskowej. Czujnik ugięć zdjąć z uchwytu na belce FWD i zamontować go w dodatkowym uchwycie. Uchwyt ten powinien być prawidłowo osadzony na podłożu. Czujnik ugięć połączyć z elektroniką sterującą i przetwarzającą sygnały w FWD. Sprawdzić, czy wyzwalanie odbywa się prawidłowo.
- 5.4. Rusztowanie umieścić nad uchwytem. Na urządzeniu zamontować wzorcowym przetwornik przemieszczeń. Sprawdzić czy przyrządy wzorcowe są prawidłowo ustawione i stykają się z badanym czujnikiem ugięć, tak by były poddawane takim samym ugięciom.
- 5.5. Wzorcowy czujnik ugięć zamontować na belce rusztowania, tak by mierzyć reakcję rusztowania. Czujnik ten ma mierzyć ruchy i drgania rusztowania, wywołane przez obciążenie generowane przez FWD. Czujnik musi być prawidłowo ustawiony względem obu przyrządów opisanych w poprzednim punkcie.
- 5.6. Przed przystąpieniem do jakichkolwiek prac kalibracyjnych trzeba wyłączyć wszelkie filtry danych w FWD. Należy sprawdzić, czy wyłączona została funkcja wygładzania. Bezpośrednio przed rozpoczęciem kalibracji należy wykonać serię 10 zrzutów w celu rozgrzania gumowych odbojników.
- 5.7. Wybrać trzy wysokości zrzutu tak, by wartości maksymalne obciążeń uzyskać przy wysokości 2 – typowej dla obciążeń maksymalnych w normalnych próbach. Dolna wysokość zrzutu nie powinna być niższa niż 20 % pełnej wysokości zrzutu.
- 5.8. Obniżyć płytę naciskową i wykonać poniższą sekwencję zrzutów, rejestrując wartości maksymalne ugięcia dla badanego czujnika i przyrządów wzorcowych:
- 3 zrzuty przygotowujące z wysokości 2 (bez rejestrowania danych), po których następuje przerwa
  - 6 zrzutów z wysokości 1, z pauzą po każdym zrzucie
  - 6 zrzutów z wysokości 2, z pauzą po każdym zrzucie
  - 6 zrzutów z wysokości 3, z pauzą po każdym zrzucie, z wyjątkiem ostatniego
  - Zatrzymanie po ostatnim zrzucie (płyta naciskowa FWD pozostaje u dołu).

Dla każdego zrzutu i dla wszystkich trzech przyrządów zarejestrować nie tylko maksymalną wartość ugięcia, ale także przebieg czasowy ugięć.

- 5.9. Dobrą praktyką jest zaprogramowanie sześciu zrzutów z każdej wysokości, a nie pięciu, tak by jeden mieć „w zapasie” na wypadek, gdyby któryś zrzut nie został zarejestrowany przez przyrządy systemu wzorcowego. Jeżeli pierwszych pięć zrzutów uda się, to dane szóstego zrzutu można pominąć.

## 6. Analiza

- 6.1. Należy zapoznać się z wykresami przebiegów czasowych dla czujnika ugięć urządzenia do prób oraz dwóch pozostałych przyrządów aby ustalić, czy urządzenie poruszyło lub obróciło się bądź wpadło w drgania przed zarejestrowaniem maksymalnego ugięcia przez badany czujnik ugięć i wzorcowym przetwornik przemieszczeń. Maksymalne tolerowane ugięcie czujnika rusztowania w momencie pomiaru maksymalnych ugięć wynosi  $2\ \mu\text{m}$ . Ugięcia przekraczające tę wartość dyskwalifikują badanie. W takiej sytuacji badanie należy powtórzyć. Jeżeli źródłem problemu jest ustawienie rusztowania, to przed powtórzeniem próby należy zmienić jego ustawienie.
- 6.2. Dla każdego ważnego zrzutu obliczyć stosunek wartości maksymalnej ugięcia wskazanego przez wzorcowym przetwornik ugięć do ugięcia badanego czujnika (równanie 8.1). Obliczyć „współczynnik kalibracji in-situ czujnika ugięć”, który jest średnią obliczonych wartości.
- 6.3. Błąd standardowy współczynnika kalibracji in-situ czujnika ugięć (równanie 8.3) przekraczający 0,0020 dyskwalifikuje wzorcowe kalibrację czujnika ugięć. Przyczynę problemu należy znaleźć, usunąć ją i powtórzyć procedurę kalibrowania.
- 6.4. Obliczony współczynnik kalibracji in-situ czujnika ugięć o wartości od 0,995 do 1,005 włącznie uważa się za równy współczynnikowi 1.000 - nie są potrzebne żadne korekty. Wartość współczynnika kalibracji in-situ czujnika ugięć mniejsza niż 0,98 lub większa niż 1,02 sygnalizuje uszkodzenie czujnika ugięć i konieczność jego wymiany lub naprawy.

## 7. Symbole

$i$	=	Etykieta zrzutu
$k$	=	Etykieta wysokości zrzutu
$NK$	=	Liczba zrzutów z danej wysokości zrzutu (= 5)
$NH$	=	Liczba wysokości zrzutu (= 3)
$u_{ik}$	=	Ugięcie FWD w zrzucie $i$ z wysokości $k$ ( $\mu\text{m}$ )
$u_{ik,ref}$	=	Ugięcie wzorcowe w zrzucie $i$ z wysokości $k$ ( $\mu\text{m}$ )
$R_{ik}$	=	Stosunek ugięcia wzorcowego do ugięcia FWD w zrzucie $i$ z wysokości $k$
$R_{mean}$	=	Współczynnik kalibracji in situ czujnika ugięć
$sR_{mean}$	=	Błąd standardowy współczynnika kalibracji in situ czujnika ugięć

## 8. Równania

8.1. Obliczenie stosunku ugięcia wzorcowego do ugięcia dla zrzutu i wysokości zrzutu:

$$R_{ik} = \frac{u_{ik,ref}}{u_{ik}}$$

8.2. Obliczenie współczynnika kalibracji in situ czujnika ugięć:

$$R_{mean} = \frac{\sum_{k=1}^{NH} \sum_{i=1}^{NK} R_{ik}}{NH \cdot NK}$$

8.3. Obliczenie błędu standardowego współczynnika kalibracji in situ czujnika ugięć:

$$sR_{mean} = \sqrt{\frac{NK \cdot NH \cdot \sum_{i=1,k=1}^{NK \cdot NH} R_{ik}^2 - \left( \sum_{i=1,k=1}^{NK \cdot NH} R_{ik} \right)^2}{NK \cdot NH \cdot (NK \cdot NH - 1)}}$$

## 9. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać co najmniej:

- Dane arkusza kalibracyjnego
- Wyniki pomiarów
- Wyniki analizy

# Protokół LK4-2005

## Procedura harmonizacji FWD in-situ

NINIEJSZY PROTOKÓŁ ZOSTAŁ WYDANY POD STAŁYM OZNACZENIEM „PROTOKÓŁ LK4”. LICZBA ZNAJDUJĄCA SIĘ BEZPOŚREDNIO ZA OZNACZENIEM WSKAZUJE ROK WPROWADZENIA PROTOKOŁU W ŻYCIĘ.

### 1. Zakres

- 1.1. Przedstawiona metoda pozwala określić in-situ współczynnik harmonizacji dla ugięciomierzy FWD uczestniczących w badaniach porównawczych.
- 1.2. Niniejszy protokół omawia sposób ustalenia wzorcowej czaszy ugięć na podstawie danych z grupy zakwalifikowanych ugięciomierzy, które są kwalifikowane przez Nadzór Badań, przed rozpoczęciem prób.
- 1.3. Niniejszym protokołem objęta jest ocena powtarzalności wielkości obciążenia i ugięć FWD.

### 2. Dokumenty związane

Protokół LK1; Dynamiczna kalibracja czujnika siły FWD  
Protokół U1; Weryfikacja pozycji czujników ugięć  
Protokół U2; Weryfikacja powtarzalności FWD

### 3. Znaczenie i stosowanie

- 3.1. W procedurze tej wyniki badań grupy FWD są porównywane z wynikami uzyskanymi przez wzorcową grupę FWD, będącej częścią całej badanej grupy. Operacja ta będzie w tym protokole nosić nazwę testu odtwarzalności. W dniu wykonania testu określana jest także powtarzalność każdego FWD (patrz krok 3.3). Procedury gromadzenia danych są realizowane na różnych nawierzchniach, o różnych podłożach, różniących się między sobą nośnością. Wszystkie przyrządy FWD należy przed próbami sprawdzić pod kątem prawidłowości działania i wykalibrować wg wzorców.
- 3.2. W badaniach odtwarzalności na każdym stanowisku wykonuje się pięć zrzutów (z czego cztery są analizowane) przy użyciu wcześniej zadanego obciążenia w celu zebrania danych o ugięciach. Ugięcia normalizuje się do poziomu obciążenia zadanego, a następnie porównuje z danymi wzorcowymi. Współczynniki harmonizacji ugięć oblicza się metodą regresji liniowej, tak by ugięcia wzorcowe ustalić z możliwie największą dokładnością na podstawie danych z pomiarów wykonanych FWD. Jeżeli spełnione są wymagania co do rozproszenia danych, to współczynniki harmonizacji FWD in-situ oblicza się dla wszystkich FWD uczestniczących w badaniu.
- 3.3. Niniejszy protokół jest przeznaczony do stosowania dla ugięciomierzy generujących impuls obciążający o podobnej długości. Użycie impulsów o różnych długościach spowoduje powstanie ugięć, których różnice mogą być spowodowane różnicami struktury nawierzchni i podłoża. W takich warunkach ustalenie odpowiednich współczynników harmonizacji FWD in-situ dla wszystkich ugięciomierzy objętych testem wymaga użycia bardziej skomplikowanych technik konwersji.

- 3.4. Celem badania powtarzalności jest ustalenie, czy badany FWD jest w stanie generować spójne wyniki na kolejnych trzech stanowiskach badawczych. W procedurze tej powtarzalność FWD jest weryfikowana w serii dwunastu kolejnych zrzutów wykonywanych na jednym stanowisku bez podnoszenia płyty naciskowej. Pierwsze dwa zrzuty są w analizie pomijane. Wszystkie ugięcia są normalizowane do średniej wartości przekazanego obciążenia. Standardowe odchylenia obciążenia i znormalizowane ugięcia powinny być ze sobą zgodne w podanych granicach. Jeżeli wyniki nie spełnią wymagań, to próbę należy powtórzyć. FWD spełnia wymagania, jeżeli pełna zgodność zostanie osiągnięta na co najmniej dwóch stanowiskach badawczych.
- 3.5. Niniejszy protokół musi być realizowany z częstotliwością wskazaną w Planie Kalibracji lub częściej, według uznania użytkownika FWD. Użytkownik FWD powinien prowadzić dokumentację czynności weryfikacyjnych i harmonizujących opisanych w tym protokole.
- 3.6. Wskazane jest, by na początku dnia badań przeprowadzić, w celu sprawdzenia dokładności odczytów obciążenia FWD, dynamiczną weryfikację wzorcową czujników siły FWD we wszystkich FWD. Protokół LK1 (wersja krótka) zawiera wszystkie szczegóły tej procedury i jest przeznaczony do użycia w połączeniu z niniejszym protokołem.
- 3.7. Badania prowadzi Nadzór Badań, który decyduje o zadanym poziomie obciążenia, wybiera grupę FWD zakwalifikowaną do badań odtwarzalności i sprawdza, czy realizowane procedury są zgodne z planem przedstawionym w tym protokole. Nadzór Badań sprawdza wyniki analiz pod kątem ich dokładności.

#### **4. Przyrządy**

- Ugięciomierz FWD.
- Liniął mierniczy o długości 1,2 m do pomiaru pochylenia poprzecznego, gradientu i głębokości kolein.
- Poziomica
- Taśma miernicza i/lub miarka składana
- Wiertarka elektryczna
- Termometr i termometr wzorcowy
- Zegar

#### **5. Przygotowanie**

- 5.1. Przed dniem badań należy wybrać co najmniej 12 stanowisk badawczych o nawierzchni asfaltowej, na których będzie można zbadać reakcję FWD na różne kombinacje struktury nawierzchni i podłoża drogi. Sztywność podłoża i grubość warstwy asfaltu i podbudowy powinna być różna. Do badań odtwarzalności trzeba wybrać co najmniej dziewięć stanowisk badawczych. Podczas badania stanowiska te muszą być wykorzystane dwukrotnie. Do badania powtarzalności trzeba wybrać co najmniej trzy stanowiska badawcze. Na każdym z nich badanie odbywa się tylko raz.
- 5.2. Przy wyborze stanowisk badawczych należy kierować się takimi czynnikami jak łatwość dostępu i bezpieczeństwo pracy. Stanowiska badawcze powinny być zlokalizowane na terenie zamkniętym lub na drogach o małym ruchu pojazdów. Każde

ze stanowisk badawczych powinno mieć jednorodną nawierzchnię i nie powinno być na przemian zacieniane i nasłoneczniane, w sposób utrudniający dokładne ustalenie temperatury nawierzchni. Na odcinku 5 metrów w każdą stronę od stanowiska badawczego nie mogą być widoczne żadne pęknięcia. Ich obecność może sprawić, że czasza ugięć będzie nadmiernie zmienna pomiędzy urządzeniami. Pochylenie poprzeczne i gradient na każdym ze stanowisk badawczych nie powinny przekraczać 4%.

- 5.3. Głębokość koleiny na odcinku drogi gdzie zlokalizowano stanowisko badawcze nie powinna być większa niż 2 mm. Każde stanowisko badawcze należy zaznaczyć kołem o średnicy 0,4 m.
- 5.4. Na każdym stanowisku badawczym należy wywiercić wąskie otwory służące do pomiaru temperatury nawierzchni w dniu badań. Otwory muszą być wywiercone do połowy głębokości warstwy asfaltu, nigdy jednak głębiej niż na 100 mm.
- 5.5. Płyta naciskowa FWD powinna być ustawiona oznaczonym miejscu wykonanym na każdym ze stanowisk badawczych. Kolejność pomiarów na stanowiskach podczas próby odtwarzalności powinna być ustalana losowo dla każdego stanowiska. Kolejność badań w drugiej próbie powinna być inna niż w pierwszej.
- 5.6. We wszystkich FWD uczestniczących w badaniu muszą być użyte płyty naciskowe o średnicy 300 mm; wszystkie FWD powinny mieć wyposażenie zazwyczaj stosowane w nich podczas pracy. Należy użyć co najmniej 5 czujników ugięć. Jeżeli czujników ugięć jest więcej niż siedem, to analizuje się tylko dane uzyskane z pierwszej serii (grupy) siedmiu czujników. Czujniki ugięć rozstawić co 300 mm od centrum obciążenia, niezależnie od ustawień powszechnie używanych w rutynowych badaniach. W przypadku sześciu czujników ugięć pomija się odległość 1500 mm. Przy pięciu czujnikach ugięć pomija się odległości 1200 mm i 1500 mm.
- 5.7. Przed dniem badań Nadzór Badań wytypuje urządzenia do ustalenia wzorca porównawczego. Normalnie tylko dane zebrane przez zakwalifikowane FWD mogą służyć jako dane wejściowe do określenia wzorcowej czaszy ugięć. Wzorcowa czasza ugięć jest średnią ugięć zarejestrowanych przez zakwalifikowane FWD. Do określenia ugięcia wzorcowego wybiera się tylko te zakwalifikowane ugięciomierze, które spełniają warunki w zakresie zmienności.

## **6. Procedura**

- 6.1. Dla każdego FWD do arkusza kalibracji należy wpisać poniższe dane:
  - Użytkownik FWD
  - Producent FWD
  - Typ/numer seryjny/numer identyfikacyjny FWD
  - Numery seryjne czujników ugięć FWD
  - Średnica płyty naciskowej FWD
  - Odległości czujników ugięć FWD
  - Obecne współczynniki kalibracji czujników ugięć FWD
  - Miejsce badań
  - Data i godzina badań
  - Nazwisko członka/członków Nadzoru Badań
  - Data ostatnie harmonizacji FWD in-situ

- Data ostatniej weryfikacji powtarzalności FWD

- 6.2. Jeżeli jest to możliwe, to przed kalibracją należy, na pierwszym stanowisku badawczym, sprawdzić prawidłowość wartości maksymalnych obciążenia w każdym FWD, używając do tego metody dynamicznej kalibracji czujnika siły FWD (patrz protokół LK1).
- 6.3. Sprawdzić, czy czujniki ugięć są zamontowane w podanych odległościach. W wypadku niezgodności czujniki ugięć należy przesunąć do prawidłowych miejsc. Dopuszczalna jest tolerancja 5 mm przesunięcia. W każdym FWD uczestniczącym w badaniu można dowolnie wybrać stronę, w którą będzie skierowana belka z czujnikami ugięć.
- 6.4. Na pierwszym stanowisku badawczym wybrać zadane obciążenie. Jeżeli przy normalnych badaniach stosowane są funkcje osiągnięcia zadanego obciążenia i wygładzania wartości szczytowych, to powinny być one użyte także w badaniach odtwarzalności i powtarzalności.
- 6.5. W badaniu odtwarzalności wykonać jeden zrzut przygotowujący, bez rejestrowania danych, a następnie cztery identyczne zrzuty z rejestracją wartości maksymalnych obciążenia i ugięcia (oraz, o ile to możliwe, całego przebiegu czasowego ostatniego zrzutu). W analizie zostaną wykorzystane tylko ostatnie cztery zrzuty. Podczas badania nie wolno unosić płyty naciskowej FWD.
- 6.6. Każdy FWD uczestniczący w badaniu odtwarzalności musi mierzyć temperaturę powierzchni w otworach wywierconych na wszystkich stanowiskach roboczych. Nadzór Badań musi przeprowadzić niezależną kontrolę temperatury co najmniej trzykrotnie pomiędzy badaniem pierwszego i ostatniego FWD. Temperaturę zawsze notuje się w [°C] z dokładnością do jednego miejsca po przecinku. Dokładność urządzenia do pomiaru temperatury powinna wynosić  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Czas pomiaru temperatury musi być zanotowany z podaniem godziny (w systemie 24-godzinnym) i minut (np. 14:35).
- 6.7. W badaniu powtarzalności wykonać jeden zrzut przygotowujący, bez rejestrowania danych, a następnie dziesięć identycznych zrzutów z rejestracją wartości maksymalnych obciążenia i ugięcia. W analizie zostaną wykorzystane tylko ostatnich dziesięć zrzutów. Podczas badania nie wolno unosić płyty naciskowej FWD.
- 6.8. Dane obciążenia i ugięcia, zapisane wcześniej uzgodnionym formacie, należy przekazać Nadzorowi Badań na zakończenie dnia badań. Przekazać należy także kopię danych o temperaturze.

## **7. Analiza**

- 7.1. Nadzór Badań oblicza przebieg zmian temperatury powierzchni w każdym z wywierconych otworów, wykorzystując do tego metodę interpolacji liniowej i niezależne odczyty temperatury. Obliczenia te służą do oszacowania temperatury powierzchni przy każdym pomiarze FWD na stanowisku. Temperatury te zastępują wartości zanotowane przez poszczególne FWD.

- 7.2. Dane ugięcia bada się pod kątem obecności wartości izolowanych. Analityk zgłasza wartości izolowane wraz z zaleceniami co do sposobu potraktowania tych danych przez Nadzór Badań, który bierze pod uwagę te zalecenia i podejmuje stosowną decyzję, przedstawiając ją w raporcie.

### **Badanie odtwarzalności**

- 7.3. Wszystkie ugięcia, dla każdego FWD i dla każdego stanowiska badawczego, należy znormalizować metodą interpolacji liniowej do poziomu zadanego obciążenia (równanie 9.1). Obliczyć wartość średnią znormalizowanego ugięcia dla każdego czujnika ugięć, w każdym FWD i dla każdego stanowiska badawczego korzystając z grupy czterech zrzutów (równanie 9.2).
- 7.4. W wypadku tych stanowisk badawczych, gdzie temperatura nawierzchni pomiędzy FWD zmieniła się o ponad 3°C, ugięcie pod płytą naciskową nie powinno być uwzględniane w analizie.
- 7.5. Zakwalifikowane FWD uszeregować, dla każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć, według wartości średniego znormalizowanego ugięcia. Jeżeli zakwalifikowanych jest co najmniej pięć FWD, to tymczasowo ze zbioru należy usunąć, dla każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć, FWD zajmujące najwyższe i najniższe miejsce (równania 9.3 i 9.4). Korzystając z pozostałych danych obliczyć ugięcie średnie ważone dla każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć (równanie 9.5).
- 7.6. Dla każdego zakwalifikowanego FWD (także dla tymczasowo usuniętych w poprzednim punkcie), dla każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć, obliczyć różnicę między średnią wartością ugięcia zarejestrowanego przez poszczególne FWD a ugięciem średnim ważonym. Obliczyć stosunek tej różnicy do ugięcia średniego ważonego – współczynnik odchylenia.
- 7.7. Dla każdego zakwalifikowanego FWD, dla każdego czujnika ugięć i dla wszystkich stanowisk badawczych, obliczyć odchylenie standardowe współczynnika odchylenia (równanie 9.7). Jeżeli odchylenie standardowe badanego FWD przekracza wartość 0,090 w przypadku co najmniej jednego czujnika ugięć, to ten ugięciomierz należy wycofać z listy zakwalifikowanych FWD.
- 7.8. W wypadku czterech lub mniej zakwalifikowanych FWD (po punkcie 7.7) należy obliczyć średnie ugięcie dla każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć we wszystkich zakwalifikowanych FWD (równanie 9.8). Ugięcia wyrażane w [ $\mu\text{m}$ ] należy zaokrąglić do najbliższej liczby całkowitej. Uzyskane w ten sposób czasy ugięć są wzorcowymi czasami ugięć.
- 7.9. W wypadku zakwalifikowania co najmniej pięciu FWD (po punkcie 7.7) odczyty z poszczególnych stanowisk badawczych i czujników ugięć należy uszeregować według wartości średniego znormalizowanego ugięcia. Usunąć z zbioru danych każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć największy i najmniejszy odczyt (równania 9.3 i 9.4). Korzystając z pozostałych danych obliczyć średnie ugięcie dla każdego stanowiska badawczego i każdego czujnika ugięć (równanie 9.8). Ugięcia wyrażane w [ $\mu\text{m}$ ] należy zaokrąglić do najbliższej liczby całkowitej. Uzyskane w ten sposób czasy ugięć są wzorcowymi czasami ugięć.



- 7.10. Dla wszystkich FWD (zakwalifikowanych i niezakwalifikowanych), dla każdego stanowiska badawczego i dla każdego czujnika ugięć obliczyć stosunek ugięcia wzorcowego do ugięcia średniego zarejestrowanego w FWD (równanie 9.9). Obliczyć średnią (równanie 9.10) i odchylenie standardowe (równanie 9.11) tych stosunków dla każdego FWD i czujnika ugięć. Obliczone średnie są „współczynnikiem harmonizacji in-situ czujnika ugięć”. Współczynniki ugięcia mniejsze niż 0,80 i większe od 1,20 wskazują na nieprawidłowe wykalibrowanie wzorcowe czujnika ugięć FWD lub na jego uszkodzenie – oznacza to, że czujnik należy wymienić lub naprawić, i nie może być on zaakceptowany. Czasy trwania impulsu obciążającego odbiegające od występujących w grupie wzorcowej również mogą prowadzić do uzyskania współczynników harmonizacji in-situ czujników ugięć o wartościach wykraczających poza zakres tolerancji.
- 7.11. Wystąpienie odchylenia standardowego współczynnika harmonizacji in-situ czujnika ugięć o wartości ponad 0,090 dyskwalifikuje wyniki testu badanego FWD i czujnika ugięć. Przyczynę problemu należy znaleźć, usunąć i (o ile jest to możliwe) ponownie obliczyć współczynnik harmonizacji in-situ czujnika ugięć. Utrzymywanie się nieprawidłowości dyskwalifikuje dane zebrane przez badany FWD i skutkuje stwierdzeniem niezgodności ze specyfikacjami całej procedury opisanej w tym protokole.
- 7.12. Obliczyć średnią współczynników harmonizacji in-situ czujników ugięć dla całego zestawu czujników ugięć używanych przez poszczególne FWD (równanie 9.12). Średnia ta jest zdefiniowana jako „współczynnik harmonizacji FWD in-situ”. Współczynniki o obliczonych wartościach od 0,995 do 1,005 włącznie uważa się za równoważne współczynniki 1,000 - nie jest potrzebna żadna regulacja.

### **Badanie powtarzalności**

- 7.13. Wszystkie ugięcia znormalizować metodą interpolacji liniowej do poziomu obciążenia zadanego (równanie 9.1). Dla grupy 10 zrzutów obliczyć wartość średnią ugięcia każdego z czujników ugięć.
- 7.14. Obliczyć odchylenie standardowe wszystkich obciążeń (równanie 9.13) i odchylenie standardowe wszystkich znormalizowanych ugięć dla wszystkich czujników ugięć (równanie 9.14).
- 7.15. Na każdym stanowisku badawczym odchylenie standardowe obciążenia zanotowanego w serii 10 zrzutów nie powinno być większe niż 2% średniej zanotowanych wartości. Jeżeli rzeczywiste odchylenie standardowe nie spełnia tego wymagania, to kryterium weryfikacji powtarzalności na stanowisku badawczym nie jest spełnione.
- 7.16. Na każdym stanowisku badawczym odchylenie standardowe znormalizowanych ugięć zarejestrowanych w serii dziesięciu zrzutów nie powinno być większe niż 2  $\mu\text{m}$  gdy średnia znormalizowanych ugięć nie jest większa niż 40  $\mu\text{m}$ . Odchylenie standardowe znormalizowanych ugięć, zarejestrowanych w serii dziesięciu zrzutów, nie powinno być większe niż suma 1,5  $\mu\text{m}$  i 1,25 % średniej zarejestrowanych wartości znormalizowanych gdy ta średnia jest większa niż 40  $\mu\text{m}$ . Jeżeli rzeczywiste odchylenie standardowe przynajmniej jednego czujnika ugięć jest większe od podanych wartości to

kryterium weryfikacji powtarzalności nie jest spełnione przez odnośne badane stanowisko badawcze i badany czujnik (czujniki).

7.17. FWD spełnia kryteria akceptacji wariacji obciążenia i ugięcia jeżeli na co najmniej dwóch stanowiskach badawczych uzyskana zostanie pełna zgodność z wymaganiami dotyczącymi zarówno obciążenia jak i wszystkich czujników obciążenia.

## 8. Symbole

$i$	=	Etykieta zrzutu
$j$	=	Etykieta czujnika ugięć
$k$	=	Etykieta stanowiska badawczego
$m$	=	Etykieta FWD
$n$	=	Etykieta wzorcowego FWD
NK	=	Liczba zrzutów (=4 w badaniu odtwarzalności, =10 w badaniu powtarzalności)
NG	=	Liczba czujników ugięć
NM	=	Liczba stanowisk badawczych
NN	=	Liczba zakwalifikowanych FWD
NR	=	Liczba wzorcowych FWD
$F_{ikm}$	=	Wielkość obciążenia w zrzucie $i$ , na FWD $m$ , na stanowisku badawczym $k$
(kN)		
$F_{ref}$	=	Wstępnie wybrane obciążenie zadane (kN)
$u_{ijkm}$	=	Ugięcie nieznormalizowane, zmierzone w zrzucie $i$ przez czujnik ugięć $j$ na FWD $m$ , na stanowisku badawczym $k$
$d_{ijkm}$	=	Ugięcie znormalizowane, zmierzone w zrzucie $i$ przez czujnik ugięć $j$ na FWD $m$ , na stanowisku badawczym $k$
$d_{jkm}$	=	Ugięcie znormalizowane, zmierzone przez czujnik ugięć $j$ na FWD $m$ , uśrednione dla NK zrzutów na stanowisku badawczym $k$
$d_{jkn}$	=	Ugięcie znormalizowane, zmierzone przez czujnik ugięć $j$ na FWD $n$ , uśrednione dla NK zrzutów na stanowisku badawczym $k$
$d_{jk,max}$	=	Maksymalne ugięcie czujnika ugięć $j$ w zakwalifikowanej grupie FWD, na stanowisku badawczym $k$
$d_{jk,min}$	=	Minimalne ugięcie czujnika ugięć $j$ w zakwalifikowanej grupie FWD, na stanowisku badawczym $k$
$d_{jk,wmean}$	=	Średnia ważona ugięcia czujnika ugięć $j$ na stanowisku badawczym $k$
$d_{jk,ref}$	=	Wzorcowe ugięcie czujnika ugięć $j$ na stanowisku badawczym $k$
$D_{jkm}$	=	Odchylenie ugięcia znormalizowanego dla średniego ugięć ważonego
$sD_{jm}$	=	Odchylenie standardowe odchyleń od średniego ugięcia ważonego w poszczególnych czujnikach ugięć i FWD
$R_{jkm}$	=	Stosunek ugięcia wzorcowego do ugięcia zmierzonego przez FWD $m$ , dla czujnika ugięć $j$ i stanowiska badawczego $k$
$R_{jm}$	=	Współczynnik harmonizacji in-situ czujnika ugięć w FWD $m$
$R_m$	=	Współczynnik harmonizacji in-situ FWD dla FWD $m$
$sd_{jkm}$	=	Odchylenie standardowe znormalizowanych ugięć, zmierzonych przez czujnik ugięć $j$ w FWD $m$ w NK zrzutach na stanowisku badawczym $k$
$sF_{km}$	=	Odchylenie standardowe obciążenia w FWD $m$ w NK zrzutach na stanowisku badawczym $k$
$sR_{jm}$	=	Odchylenie standardowe odchyleń stosunku ugięcia wzorcowego do ugięcia zmierzonego na stanowisku $m$ , dla czujnika ugięć $j$ na wszystkich stanowiskach badawczych w badaniu odtwarzalności.

Zakwalifikowane FWD należy ponumerować od 1 do NN włącznie; pozostałe FWD ponumerować od NN+1 do NF włącznie.

## 9. Równania

9.1. Normalizacja ugięć do wstępnie wybranego poziomu obciążenia zadanego:

$$d_{ijkm} = \frac{50}{F_{ikm}} \cdot u_{ijkm}$$

9.2. Obliczenie średniego ugięcia dla danego stanowiska badawczego, danego czujnika ugięć i danego FWD:

$$d_{jkm} = \frac{\sum_{i=1}^{NK} d_{ijkm}}{NK}$$

9.3. Znalezienie maksymalnej wartości wyniku z punktu 9.2 dla danego stanowiska badawczego i danego czujnika ugięć, w grupie zakwalifikowanych FWD:

$$d_{jk,max} = \text{Maximum} (d_{jk1} \dots d_{jkNN})$$

9.4. Znalezienie minimalnej wartości wyniku z punktu 9.2 dla danego stanowiska badawczego i danego czujnika ugięć, w grupie zakwalifikowanych FWD:

$$d_{jk,min} = \text{Minimum} (d_{jk1} \dots d_{jkNN})$$

9.5. Obliczenie średniego ugięcia dla danego czujnika ugięć i danego stanowiska badawczego, z wyłączeniem wartości maksymalnych i minimalnych znalezionych w poprzednim punkcie. Uzyskany wynik jest średnim ugięciem ważonym.

$$d_{jk,wmean} = \frac{\left( \sum_{m=1}^{NN} d_{jkm} \right) - d_{jk,max} - d_{jk,min}}{NN - 2}$$

9.6. Obliczenie, dla wszystkich zakwalifikowanych FWD, dla danego FWD i stanowiska badawczego, odchylenia ugięcia od średniego ugięcia ważonego:

$$D_{jkm} = \frac{d_{jkm} - d_{jk,wmean}}{d_{jk,wmean}}$$

9.7. Obliczenie, dla wszystkich zakwalifikowanych FWD, odchylenia standardowego zbioru wyników z punktu 9.6 dla danego czujnika ugięć:

$$sD_{jm} = \sqrt{\frac{NM \cdot \sum_{k=1}^{NM} D_{jkm}^2 - \left( \sum_{k=1}^{NM} D_{jkm} \right)^2}{NM \cdot (NM - 1)}}$$

- 9.8. Zmiana numeracji zakwalifikowanych FWD od n=1 do NR. Obliczenie odchyłeń wzorcowych i zaokrąglenie wyników do najbliższej liczby całkowitej (w  $\mu\text{m}$ ). Poniższe obliczenia dotyczą NR nie większego niż 4:

$$d_{jk,\text{ref}} = \frac{\sum_{n=1}^{NR} d_{jkn}}{NR}$$

Poniższe obliczenia dotyczą NR równego co najmniej 5:

$$d_{jk,\text{ref}} = \frac{\left( \sum_{n=1}^{NR} d_{jkn} \right) - d_{jk,\text{max}} - d_{jk,\text{min}}}{NR - 2}$$

- 9.9. Obliczenie stosunku ugięcia wzorcowego do ugięcia zmierzonego:

$$R_{jkm} = \frac{d_{jk,\text{ref}}}{d_{jkn}}$$

- 9.10. Obliczenie średniej stosunków ugięcia wzorcowego do ugięcia zmierzonego dla grupy NM stanowisk badawczych. Uzyskana średnia jest współczynnikiem harmonizacji in-situ czujnika ugięć:

$$R_{jm} = \frac{\sum_{k=1}^{NM} R_{jkm}}{NM}$$

- 9.11. Obliczenie odchylenia standardowego stosunków ugięcia wzorcowego do ugięcia zmierzonego dla grupy NM stanowisk badawczych:

$$sR_{jm} = \sqrt{\frac{NM \cdot \sum_{k=1}^{NM} R_{jkm}^2 - \left( \sum_{k=1}^{NM} R_{jkm} \right)^2}{NM \cdot (NM - 1)}}$$

- 9.12. Obliczenie średniej wartości współczynników harmonizacji in-situ czujników ugięć:

$$R_m = \frac{\sum_{j=1}^{NG} R_{jm}}{NG}$$

- 9.13. Obliczenie odchylenia standardowego obciążeń dla poszczególnych stanowisk badawczych w badaniu powtarzalności:

$$sF_{km} = \sqrt{\frac{NK \cdot \sum_{i=1}^{NK} F_{ikm}^2 - \left( \sum_{i=1}^{NK} F_{ikm} \right)^2}{NK \cdot (NK - 1)}}$$

9.14. Obliczenie odchylenia standardowego znormalizowanych ugięć dla poszczególnych stanowisk badawczych w badaniu powtarzalności:

$$sd_j = \sqrt{\frac{NK \cdot \sum_{i=1}^{NK} d_{ij}^2 - \left( \sum_{i=1}^{NK} d_{ij} \right)^2}{NK \cdot (NK - 1)}}$$

## 10. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać co najmniej:

- Dane arkusza kalibracyjnego
- Wyniki badań
- Wyniki analizy
- Deklarację mówiącą, czy badany FWD spełnia wymogi specyfikacji.
- Zatwierdzenie i autoryzację przez Nadzór Badań

# Protokół LK5-2005

## Statyczna kalibracja czujnika siły FWD

NINIEJSZY PROTOKÓŁ ZOSTAŁ WYDANY POD STAŁYM OZNACZENIEM „PROTOKÓŁ LK5”. LICZBA ZNAJDUJĄCA SIĘ BEZPOŚREDNIO ZA OZNACZENIEM WSKAZUJE ROK WPROWADZENIA PROTOKOŁU W ŻYCIĘ.

### 1. Zakres

Niniejszy protokół przedstawia sposób ustalenia współczynnika kalibracji czujnika siły FWD w cyklu następujących po sobie etapów obciążania czujnika siły FWD zamontowanego szeregowo, współosiowo z wzorcowym czujnikiem siły.

### 2. Dokumenty związane

Protokół LK1; Dynamiczna kalibracja czujnika siły FWD

### 3. Znaczenie i stosowanie

- 3.1. Statyczna kalibracja czujnika siły FWD ma na celu sprawdzenie, czy urządzenie dokładnie mierzy wartość maksymalną impulsu obciążającego. W celu wykrycia wszelkich nieliniowości sygnału wyjściowego czujnika siły FWD stosuje się różnorodne etapy obciążania.
- 3.2. Procedura ta może być stosowana w wypadku, gdy dynamicznej kalibracji czujnika siły FWD (patrz protokół LK1) nie można przeprowadzić z powodu braku przyrządów wzorcowych w miejscu, w którym znajduje się system FWD.
- 3.3. Niniejszy protokół musi być stosowany z częstotliwością wskazaną w Planie Kalibracji lub częściej, tak jak to uzna użytkownik FWD.

### 4. Przyrządy

- Zdemontowany czujnik siły.
- Sztwna rama pozwalająca współosiowo zamontować czujnik siły FWD i wzorcowy czujnik siły.
- Prasa hydrauliczna pozwalająca wytworzyć obciążenie przekraczające maksymalny poziom obciążenia czujnika siły FWD.
- Wzorcowy czujnik siły, który powinien, w warunkach statycznych, spełniać wymagania:
  - przedział błędów, obejmujący nieliniowość, powtarzalność i histerezę:  $\pm 0,2$  kN dla pełnego zakresu skali, jeżeli maksymalne obciążenie badanego FWD jest mniejsze niż 150 kN, w przeciwnym razie  $\pm 0,4$  kN dla pełnego zakresu skali.
  - przedział temperatury użytkowania od 0 do 40°C
- Odpowiednie urządzenie przetwarzające sygnały i odczytujące dane.

### 5. Procedura

- 5.1. Do arkusza kalibracji należy wpisać poniższe dane:
  - Użytkownik FWD
  - Producent FWD

- Typ/numer seryjny/numer identyfikacyjny FWD
  - Numer seryjny czujnika siły FWD
  - Numer seryjny wzorcowego czujnika siły
  - Obecny współczynnik wzmocnienia dla czujnika siły FWD
  - Nazwisko osoby kalibrującej
  - Data ostatniego kalibrowania wzorcowego czujnika siły
  - Miejsce kalibracji
  - Data i godzina ostatniej kalibracji
  - Data i godzina kalibracji
- 5.2. Wzorcowy czujnik siły i badany czujnik siły FWD zamontować w ramie, tak by oba ogniwa były właściwie wyosiuwane. Oba ogniwa połączyć ze sprzętem do przetwarzania sygnałów i zbierania danych.
- 5.3. Siłownik prasy hydraulicznej opuścić tak, by lekko dotknął górnego czujnika siły, a na zespół czujników siły nie było wywierane zewnętrzne obciążenie. Jeżeli prasa hydrauliczna jest zamontowana pod oboma czujnik, należy wykonać podobną procedurę. Oba czujniki wyzerować.
- 5.4. Powoli zwiększać ciśnienie w prasie hydraulicznej, aż do osiągnięcia nominalnego zakresu dla badanego czujnika siły. Na co najmniej 10 poziomach obciążenia, rozłożonych na cały zakres, zanotować równoczesne wskazania wzorcowego czujnika siły i czujnika siły FWD.
- 5.5. Serię badań opisanych w poprzednim punkcie oznaczyć jako „próba 1”. Powtórzyć opisaną procedurę a uzyskane wyniki oznaczyć jako „próba 2”.

## **6. Analiza**

- 6.1. Dla każdej próbki obliczyć stosunek obciążenia wzorcowego do obciążenia FWD (równanie 8.1). Ustalić współczynnik korygujący czujnika siły FWD (równanie 8.2) korzystając z danych z próby 1. Procedurę powtórzyć dla danych z próby 2. Jeżeli różnica pomiędzy wynikami obu prób nie przekracza 0,003, to nie ma potrzeby przeprowadzania trzeciej próby. Uśrednić wyniki pierwszych dwóch prób, a uzyskaną średnią określić jako współczynnik kalibracji czujnika siły FWD. Jeżeli wyniki obu prób różnią się o więcej niż 0,003, to konieczne jest wykonanie trzeciej próby.
- 6.2. Błąd standardowy współczynnika korygującego dla czujnika siły FWD (równanie 8.3) większy niż 0,0020 dyskwalifikuje kalibrację czujnika siły FWD. Przyczynę problemu należy znaleźć i usunąć, po czym powtórzyć procedurę kalibrowania czujnika siły FWD.

6.3. W wypadku przeprowadzenia trzech prób należy obliczyć średnią i odchylenie standardowe dla wszystkich trzech wyników (równania 8.4 i 8.5). Jeżeli standardowe odchylenie nie jest większe niż 0,003, to obliczoną średnią z trzech prób nazywa się współczynnikiem kalibracji czujnika siły FWD. Jeżeli standardowe odchylenie jest większe niż 0,003, to trzeba powtórzyć całą próbę. Należy też zweryfikować błąd standardowy z poprzedniego punktu.

## 7. Symbole

$i$	=	Etykieta próbki
$m$	=	Etykieta próby
$NS$	=	Liczba próbek
$NT$	=	Liczba prób (= 2 lub 3)
$F_{im}$	=	Wielkość obciążenia FWD w próbce $i$ , w próbie $m$ (kN)
$F_{im,ref}$	=	Wielkość obciążenia wzorcowego w próbce $i$ , w próbie $m$ (kN)
$R_{im}$	=	Stosunek obciążenia wzorcowego do obciążenia FWD w próbce $i$ , w próbie $m$
$R_m$	=	Współczynnik korygujący czujnika siły FWD na podstawie danych z próby $m$
$R_{mean}$	=	Współczynnik korygujących czujnika siły FWD na podstawie danych z prób NT
$sR_m$	=	Błąd standardowy współczynnika korygującego dla czujnika siły FWD w próbie $m$
$sT$	=	Odchylenie standardowe współczynnika korygującego czujnika siły FWD w NT próbach

## 8. Równania

8.1. Obliczenie, dla każdej próbki  $i$  i dla każdej próby, stosunku obciążenia wzorcowego do obciążenia FWD:

$$R_{im} = \frac{F_{im,ref}}{F_{im}}$$

8.2. Obliczenie, dla każdej próby, współczynnika korygującego dla czujnika siły FWD:

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^{NS} R_{im}}{NS}$$

8.3. Obliczenie błędu standardowego współczynnika korygującego czujnika siły FWD:

$$sR_m = \sqrt{\frac{NS \cdot \sum_{i=1}^{NS} R_{im}^2 - \left( \sum_{i=1}^{NS} R_{im} \right)^2}{NS \cdot (NS - 1)}}$$



8.4. Obliczenie średniej współczynników korygujących ogniów obciążnikowych FWD dla wszystkich trzech prób:

$$R_{\text{mean}} = \frac{\sum_{m=1}^{NT} R_m}{NT}$$

8.5. Obliczenie odchylenia standardowego współczynników korygujących czujnika siły FWD dla trzech prób.

$$sT = \sqrt{\frac{NT \cdot \sum_{m=1}^{NT} R_m^2 - \left( \sum_{m=1}^{NT} R_m \right)^2}{NT \cdot (NT - 1)}}$$

## 9. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać co najmniej:

- Dane arkusza kalibracyjnego
- Wyniki badań
- Wyniki analizy