

dr inż. Janusz Kubiak*

dr inż. Aleksy Łodo*

dr inż. Jarosław Michałek*

Metodyka badań żerdzi elektroenergetycznych z betonu

*The experimental studies methodology of concrete
electrical power engineering poles*

Konstrukcje wsporcze dla napowietrznych linii elektroenergetycznych średnich i niskich napięć wykonuje się obecnie z jednej lub dwóch strunobetonowych żerdzi wirowanych typu E [2, 3] lub żelbetonowych ŻN [4]. Badania słupów z tych żerdzi przeprowadzane są w warunkach laboratoryjnych lub poligonowych [1, 5 ÷ 8]. W pracy [5] podano kompleksowy przegląd i ocenę różnych sposobów badania słupów elektroenergetycznych z betonu oraz omówiono programy stosowanych obciążeń próbnych i kryteria oceny wyników badań.

Do czasu ukazania się normy zharmonizowanej PN-EN 12843:2008 [10] podstawą sprawdzenia nośności i sprężystości słupów elektroenergetycznych była PN-B-03265:1987 [9].

Norma zharmonizowana [10] określa wymagania dotyczące tolerancji wymiarowych i właściwości użytkowych żerdzi z betonu oraz podaje metodę ich badania i ocenę zgodności. Zgodnie z normą [10] wytrzymałość gotowych żerdzi może być deklarowana na podstawie obliczeń, obliczeń popartych badaniami lub wyłącznie badań. Norma [10] nie wymaga obowiązkowego wykonywania badań słupów elektroenergetycznych z betonu wprowadzanych po raz pierwszy na rynek (tak jak to było w normie [9]). Obowiązek przeprowadzenia badań wybranego typu słupa może wprowadzić jednostka certyfikująca zakładową kontrolę produkcji. Przepisy normy [10] stanowią, że producent powinien wykazać zgodność wyrobu z wymaganiami normowymi, przeprowadzając tzw. badania typu wraz z odpowiednimi obliczeniami i prowadzić certyfikowaną zakładową kontrolę produkcji.

* Politechnika Wroclawska

Dla słupów (żerdzi) elektroenergetycznych z betonu norma [10] wskazuje w tablicy ZA.2 system atestacji zgodności 2+, co oznacza, że producent deklaruje podstawowe właściwości wyrobu – nośność i stateczność. Atestację zgodności z uwagi na wymagania podstawowe wskazane w tablicy ZA.1 należy przeprowadzić na podstawie procedury oceny zgodności wskazanej w tablicy ZA.3, wynikającej ze stosowania odpowiednich rozdziałów normy [10] i [11]. Procedura ta polega na wykonaniu wstępnych badań typu i prowadzeniu certyfikowanej zakładowej kontroli produkcji oraz badaniu próbek pobranych w zakładzie produkcyjnym zgodnie z ustalonym planem. Certyfikacja zakładowej kontroli produkcji musi być przeprowadzona przez uprawnioną jednostkę notyfikowaną na podstawie wstępnej inspekcji zakładu i zakładowej kontroli produkcji, a także ciągłego nadzoru, oceny i akceptacji zakładowej kontroli produkcji.

Jeśli zostanie wykazana zgodność podstawowych cech wyrobu z warunkami określonymi w normie [10] i jednostka notyfikowana wydała wspomniany certyfikat zakładowej kontroli produkcji, producent lub jego upoważniony przedstawiciel powinien przygotować i przechowywać deklarację zgodności, która upoważnia do nanieśnięcia na wyrobie lub etykietce oznakowania CE z wymaganym zestawem informacji o wyrobie. Do deklaracji zgodności należy załączyć certyfikat zakładowej kontroli produkcji.

Stanowiska do badań wytrzymałościowych żerdzi

Słupy elektroenergetyczne jako konstrukcje wsporcze linii napowietrznych stanowią elementy wspornikowe osadzone w gruncie. Główne ob-

ciążenia słupów (zginanie dla kombinacji podstawowej i skręcanie ze zginaniem w sytuacji obciążeń wyjątkowych) przekazywane są z przewodów, których wypadkowa usytuowana jest na poziomie średniej wysokości ich zawieszenia. Podczas badań bardzo często oddziaływanie wiatru na żerdź sprowadza się także do poziomej siły wierzchołkowej. Fundament słupów elektroenergetycznych pracuje głównie na zginanie, a siły i naprężenia powstające w podłożu gruntowym są przenoszone przez trzon słupa i ewentualnie belki lub płyty ustojowe. Wartości obciążeń pionowych działających na słup są małe, dlatego najczęściej w obliczeniach i podczas badań żerdź traktuje się jako element zginany (ewentualnie skręcany ze zginaniem). Uwarunkowania te uwzględnia się przy konstruowaniu stanowisk do badań wytrzymałościowych żerdzi. Warunki pomieszczeń najczęściej wymuszają poziome usytuowanie takiego stanowiska. W pracach [1, 5] przedstawiono kilka rozwiązań konstrukcyjnych poziomych standów do badań wytrzymałościowych żerdzi. Ich podstawową cechą jest możliwie duża sztywność układu podporowego, decydująca o poprawności zamodelowania zamocowania słupa w gruncie i pomiaru ugięcia oraz nośności żerdzi.

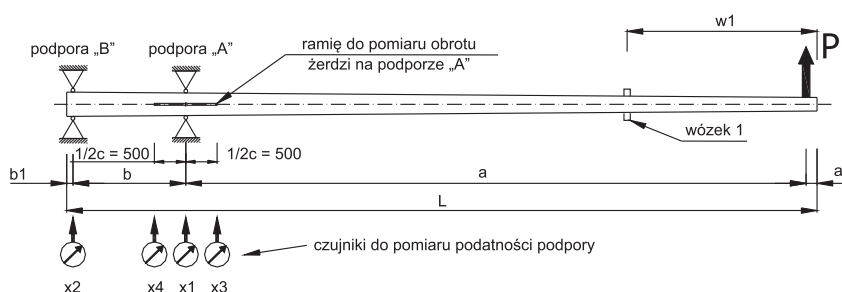
W Instytucie Budownictwa Politechniki Wroclawskiej do badań żerdzi elektroenergetycznych na zginanie zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, pozwalające na przeprowadzanie obciążeń próbnych w położeniu poziomym. Składa się ono z dwóch stalowych podpór (uchwytów) zakotwionych w kanałach żelbetonowej podłogi. Rozstaw podpór można regulować (dla żerdzi wirowanych typu E najczęściej wynosi 1,8 m).

Trzecią podporą przesuwaną minimalizującą wpływ ciężaru własnego elementu na wynik badań jest wózek podpierający słup w odległości $L/3$ od szczytu (L – długość badanej żerdzi). Pozioma siła wierzchołkowa realizowana jest za pomocą liny przełożonej przez bloczek i zaczepionej do haka wciągarki suwnicy. W poziomą część liny wpięto siłomierz tensometryczny. Podczas założonego obciążenia wykonywane są pomiary ugięcia wierzchołka żerdzi, rejestracja odkształceń jednostkowych betonu i stali oraz pomiar szerokości rozwarcia rys. W chwili zniszczenia rejestruje się obciążenia graniczne oraz sposób zniszczenia elementu. Po badaniach wytrzymałościowych dokonuje się pomiarów położenia zbrojenia, grubości ścianek przekroju i otuliny.

Próba na skręcanie ze zginaniem odbywa się na opisanym wyżej stanowisku (fotografia 1). Moment skręcający realizuje się za pomocą liny zaczepionej w założonej odległości od osi słupa do specjalnego ramienia zacisniętego na wierzchołku żerdzi. Tak jak poprzednio w linę wpięty jest siłomierz tensometryczny. Kąt skręcenia żerdzi mierzy się za pomocą precyzyjnych poziomic warsztatowych. Podczas badań rejestruje się przemieszczenia kątowe, odkształcenia i zarysowania betonu oraz obserwuje zachowania badanego elementu. Podpora mocująca badaną żerdź powinna modelować zamocowanie w gruncie (realizacja idealnie sztywnego utwierdzenia). Ponieważ każde rzeczywiste stanowisko ma pewną podatność, w zmierzonych ugięciach żerdzi a_0 należy wprowadzić poprawkę uwzględniającą obrót i przemieszczenie elementu na podporze, wykorzystując do tego celu czujniki przemieszczeń $x_1 \div x_4$ (rysunek).



Fot. 1. Stanowisko laboratoryjne do badania żerdzi elektroenergetycznych na zginanie i skręcanie ze zginaniem



Mierniki przemieszczeń $x_1 \div x_4$ do obliczenia poprawek wartości ugięcia wierzchołka żerdzi

Z zależności geometrycznych wprowadzono wzory na wartości a_1 i a_2 poprawionego ugięcia wierzchołka żerdzi, gdzie:

- $a_1 = a_0 - (a/b)(x_1 - x_2) - x_1$ – ugięcie żerdzi w szczycie zredukowane o wartość liniowego przemieszczenia podpór A i B w kierunku działania siły P;
- a_0 – wartość ugięcia żerdzi w szczycie zmierzona podczas jej obciążania siłą wierzchołkową P;
- $a_2 = a_0 - (a/c)(x_3 - x_4) - (a/b)(x_1 - x_2) - x_1$ – ugięcie żerdzi w szczycie zredukowane o kątowy obrót badanego elementu na podporze A i przemieszczenia na podporze A i B;
- x_1, x_2, x_3 i x_4 – wartości przemieszczeń na podporach A i B (rysunek) należy przyjąć ze znakiem (+), jeśli są one zgodne z kierunkiem ugięcia a_0 .

Obciążenia próbne żerdzi

Próba na zginanie wg normy **PN-B-03265:1987 [9]**. Norma ta w odniesieniu do prefabrykowanych żerdzi z betonu przeznaczonych do masowego stosowania przewidywała przeprowadzenie próbnego obciążenia na zginanie, składającego się z próby sprężystości i próby do zniszczenia. W próbie tej przewidziano trzy poziomy obciążenia: charakterystyczne P_k , rysujące P_{cr} (element sprężony) lub z przeciążeniem do $1,3 P_k$ (element żelbetowy lub częściowo sprężony) i niszczące P_n . W przypadku żerdzi żelbetowej lub częściowo sprężonej po poddaniu jej obciążeniu charakterystycznemu i pozostawieniu pod obciążeniem przez 10 min należało zmierzyć ugięcie wierzchołka a_k i rozwartość rys w_k . Następnie po zwiększeniu obciążenia do $1,3 P_k$, po 2 min należało zmierzyć ugięcie $a_{1,3P_k}$ i żerdź odciążyć. Po 15 min mierzono ugięcie trwałe a_t . Kryteria pozytywnej oceny próby spręży-

stości były następujące: $a_t \leq 0,1 a_{1,3P_k}$ (warunek trwałych efektów obciążenia), $a_k \leq a_{lim}$, $w_k \leq w_{lim}$ (a_{lim} , w_{lim} – wartości dopuszczalne ugięcia i szerokości rozwarcia rys wg normy [9]). W przypadku żerdzi sprężonej po upływie 10 min od chwili przyłożenia obciążenia P_k mierzono strzałkę ugięcia a_k . Następnie po zwiększeniu obciążenia do wartości rysującej P_{cr} należało zmierzyć wartość a_{cr} i w_{cr} , a następnie żerdź odciążyć i zmierzyć ugięcie trwałe a_t . Próbę uznawano za pozytywną, jeżeli: $a_t \leq 0,1 a_{cr}$ i $a_k \leq a_{lim}$, $w_k(P_k) = 0$.

Po próbie sprężystości wykonywano próbę na zniszczenie. Wynik próby należy uznać za pozytywny, jeżeli stwierdzona doświadczalnie nośność żerdzi będzie nie mniejsza od nośności obliczonej według wzorów teoretycznych dla średniej wytrzymałości betonu i stali zbrojeniowej ($P_{n,d} \geq P_{n,o}(f_c, f_s)$). Ponadto dla słupa sprężonego obciążenie niszczące powinno być co najmniej o 15% wyższe od obciążenia rysującego ($P_n \geq 1,15 P_{cr}$), a ugięcie przed zniszczeniem powinno być co najmniej dwukrotnie większe od ugięcia przy sile rysującej ($a_n \geq 2 a_{cr}$ – warunek sygnalizacji zniszczenia poprzez zarysowanie i ugięcie).

Próba na skręcanie ze zginaniem. Przyjmowana długość ramienia skręcającego r jest równa połowie długości poprzecznika stosowanego w słupach mocnych linii SN (wynosi $r_1 = 1,0$ m dla trójkątnego i $r_2 = 1,8$ m dla płaskiego układu przewodów [3, 8]). Program obciążeń żerdzi na skręcanie ze zginaniem jest odmienny od przebiegu obciążeń próbnych na zginanie. Pojawienie się pierwszych rys ukośnych w żerdziach wirowanych typu E oznacza praktycznie zniszczenie żerdzi.

Jak widać na fotografii 2, zniszczenie żerdzi nastąpiło w części wierzchoł-



Fot. 2. Zniszczenie wierzchołkowej części żerdzi wirowanej typu E w próbie na skręcanie ze zginaniem

kowej, w miejscu przyłożenia momentu skręcającego. Zniszczenie żerdzi na skręcanie, zachodzące w momencie pojawienia się pierwszych rys ukośnych, wynika z faktu, że prawie cały moment skręcający przenosi pierścieniowy przekrój betonu. Nośność na skręcanie zbrojenia poprzecznego (spiralka z drutu \varnothing 3,5 mm o skoku 100 mm) oraz cięgien sprężających nie są wysokie (ze względu na niski stopień zbrojenia poprzecznego i niepełną długość zakotwienia zbrojenia sprężającego w szczycie żerdzi), ale wystarczające do przeniesienia momentu skręcającego T_{Ed} w sytuacji obciążeń wyjątkowych [7, 8].

Teoretyczną nośność strunobetonowego elementu o przekroju pierścieniowym (np. żerdź wirowana E) na skręcanie T_{Rd} można wyznaczyć ze wzoru podanego w pracy [7]:

$$T_{Rd} = W_{ct} \times f_{ctd} \times (1 + \sigma_{cp}/f_{ctm})^{0,5} \geq T_{Ed} \quad (1)$$

gdzie:

W_{ct} – wskaźnik skręcania przekroju pierścieniowego;

f_{ctd} – wytrzymałość obliczeniowa betonu na rozciąganie;

σ_{cp} – naprężenia w betonie wywołane sprężeniem w odległości $l = 0,20$ m od szczytu, mniejszej niż długość zakotwienia zbrojenia sprężającego;

f_{ctm} – średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie.

Badania wytrzymałościowe żerdzi wg normy PN-EN 12843:2008. Nośność słupów (żerdzi) elektroenergetycznych należy sprawdzać na podstawie obliczeń lub obliczeń wspomaganymi badaniami [10]. Badania nośności mechanicznej żerdzi wykonane wg punktów 5.5.2 i 5.5.3 PN-EN 12843:2008 [10] mogą być elementem składowym tzw. badań typu wyrobów przeprowadzanych przez producenta. Wiek ba-

danych słupów powinien wynosić co najmniej 28 i nie więcej niż 40 dni. W badaniach elementów sprężonych należy określić m.in. obciążenie odpowiadające pojawieniu się pierwszej rysy prostopadłej i umiejscowienie jej na długości żerdzi. Jeśli w określonych przez użytkownika specjalnych ustaleniach uzupełniających dotyczących oddziaływań na słup są dwa (lub więcej) obciążenia w stosunku do każdej osi symetrii, to wg normy [10] analiza zachowania się badanego elementu powinna zawierać co najmniej dwa z następujących przypadków obciążeń:

- obciążenie wywołujące zginanie wraz z dopuszczalnym odkształceniem (ugięciem);

- obciążenie wywołujące zginanie przy zniszczeniu lub obciążenie w stanie granicznym użyteczności;

- obciążenie wywołujące skręcanie ze zginaniem oraz odpowiednie kryteria zgodności.

Według normy [10] próbę na zginanie należy przeprowadzać na żerdzi umieszczonej poziomo, sztywno zamocowanej na podporach, z redukcją wpływu ciężaru własnego. Długość zamocowania żerdzi powinna być określona przez producenta lub odbiorcę. Obciążenie powinno się przykładać pod kątem $90^\circ \pm 5^\circ$ w stosunku do nieodkształconej osi żerdzi, a szybkość przykładanego obciążenia nie powinna przekraczać 100 N/s, bez wstrząsów i uderzeń. Dokładność przykładanych obciążeń i mierzonych ugięć powinna wynosić $\pm 3\%$. W próbie sprężystości norma [10] zaleca rozpoczynanie pomiarów od przyłożenia niewielkiej siły początkowej P_0 w celu ustabilizowania układu pomiarowego. Zależność ugięcia od siły wierzchołkowej $a(P_k)$ porównać należy z wynikami obliczeń (wartości ugięć dopuszczalnych określa producent lub odbiorca). Po próbie sprężystości żerdź należy obciążyć aż do zniszczenia.

W próbie czystego skręcania (określenie T_n) badania wg [10] należy przeprowadzić na żerdzi umieszczonej poziomo, w taki sposób, aby był możliwy swobodny obrót szczytu żerdzi bez ugięcia (sprawa dyskusyjna). Narastanie momentu skręcającego powinno być nie większe niż 100 Nm/s bez wstrząsów i uderzeń. Moment skręca-

jący należy przykładać w odległości 0,25 m od szczytu żerdzi, a wymagana dokładność przykładanych obciążeń powinna wynosić $\pm 3\%$.

Abstract

In the paper the experimental studies methodology of concrete electrical power engineering poles was presented. The loads programs are being applied in elastic and failure tests of concrete poles were discussed. The criteria of strains, cracking and load capacity assessment were described. In the paper the method of testing of poles subjected to torsion and bending was also described. The experimental set-up in Institute of Building Engineering of Wrocław University of Technology was shown.

Literatura

- [1] Rodgers E. T.: Prestressed Concrete Poles-State of the Art. PCI Journal, September/October 1984, vol. 29, no. 5, p. 52 – 103.
- [2] Kubiak J., Łodo A.: Sprężone i częściowo sprężone żerdzie elektroenergetyczne z betonu wirowanego. Inżynieria i Budownictwo, nr 1/1996, s. 24 – 26.
- [3] Arciszewski A., Kiwiłł W., Zawodniak J.J.: Strunobetonowe żerdzie wirowane w opracowaniach typizacyjnych i w praktycznym zastosowaniu. Przegląd Budowlany nr 6/2011, s. 35 – 40.
- [4] Kubiak J., Łodo A., Michałek J.: Żerdzie żelbetowe ŻN/200 i ŻN/300 dla elektroenergetycznych linii niskich napięć. Przegląd Budowlany nr 6/2011, s. 40 – 44.
- [5] Kubiak J., Łodo A.: Ocena metod badania żerdzi elektroenergetycznych z betonu. Materiały III Konferencji Naukowo-Technicznej „Betonowe konstrukcje cienkościennie”. Wrocław – Karpacz 1993, s. 345 – 352.
- [6] Kubiak J., Łodo A., Michałek J.: Badania dwuczłonowych, sprężonych żerdzi wirowanych o długości 24,0 m. Praca zbiorowa. Badania materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2004, s. 401 – 408.
- [7] Szczygielski A., Mazarczuk R.: Badania doświadczalne i weryfikacja obliczeniowa częściowo sprężonych żerdzi wirowanych na skręcanie połączone ze zginaniem i ścinaniem. Prace ITB 2/2007.
- [8] Łodo A., Michałek J., Kubiak J.: Nośność na skręcanie strunobetonowych żerdzi wirowanych. Przegląd Budowlany nr 6/2011, s. 86 – 91.
- [9] PN-B-03265:1987 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Żelbetowe i sprężone konstrukcje wsporcze. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [10] PN-EN 12843:2008 Prefabrykaty z betonu. Maszty i słupy.
- [11] PN-EN 13369:2005 Wspólne wymagania dla prefabrykatów z betonu.