

# Dwugałęziowe, strunobetonowe żerdzie elektroenergetyczne

Dr inż. Janusz Kubiak, dr inż. Aleksy Łodo, dr inż. Jarosław Michałek,  
Politechnika Wrocławska

## 1. Wprowadzenie

Do budowy napowietrznych linii elektroenergetycznych średnich napięć od 1 do 30 kV wykorzystuje się obecnie przede wszystkim strunobetonowe żerdzie wirowane typu E o długościach  $L = 9\text{--}15$  m i siłach wierzchołkowych  $P_k = 4,3\text{--}15$  kN [1, 2]. W związku z tym występuje obecnie małe zainteresowanie żerdziami strunobetonowymi typu BSW-12/350 i BSW-14/350, które w latach 1970–90 były podstawowymi elementami do budowy konstrukcji wsporczych w liniach SN [3]. Obecnie używane są one sporadycznie do wymiany żerdzi uszkodzonych.

Strunobetonowe żerdzie dwugałęziowe BSW-12/350 i BSW-14/350 charakteryzują się dobrymi parametrami wytrzymałościowymi w stosunku do swojej masy i niewielkiego zużycia stali. Stosowane były jako słupy przelotowe (pojedyncze) lub odporowe (z kilku żerdzi). Prostokątny przekrój tych żerdzi pozwalał na łączenie ich w konstrukcje złożone, np. bliźniacze, strzałkowe, rozkraczone (A-owe, X-owe), kozłowe (piramidowe – trojak, czworak), portalowe (bramowe) lub w układy konstrukcyjne (słup z zastrzałem albo odciągami) [4].

Konstrukcja typowej żerdzi BSW-14/350 o długości  $L = 14,0$  m i nośności użytkowej  $P_k = 3,5$  kN, będącej przedmiotem niniejszej pracy była w przeszłości kilkakrotnie zmieniana. Dokonywano modyfikacji kształtu części nasadowej (zamiana przekroju dwuteowego na ceowy) oraz rodzaju i liczby cięgien sprężających (zamiana drutów  $20\varnothing 5$  mm na sploty  $36 \times 2\varnothing 2,5$  mm i  $32 \times 2\varnothing 2,5$  mm lub na 8 drutów  $\varnothing 7,5$  mm według propozycji autorów w 1997 roku).

W związku z wprowadzanymi w strunobetonowych żerdziach dwugałęziowych typu BSW licznymi zmianami konstrukcyjnymi, w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej pod koniec lat osiemdziesiątych minionego wieku przeprowadzono badania żerdzi BSW-14/350 sprężonych 32-ma splotami  $2\varnothing 2,5$  (wersja zbrojenia nr 3 – tab. 1) i w 1997 roku ośmioma drutami  $\varnothing 7,5$  mm ze stali St1470/1670 (wersja zbrojenia nr 4 – tab. 1). W pracy przedstawiono wybrane wyniki wykonanych badań oraz opracowane na ich

podstawie wnioski i uwagi dotyczące dalszej eksploatacji żerdzi sprężonych BSW-12/350 i BSW-14/350.

## 2. Opis żerdzi

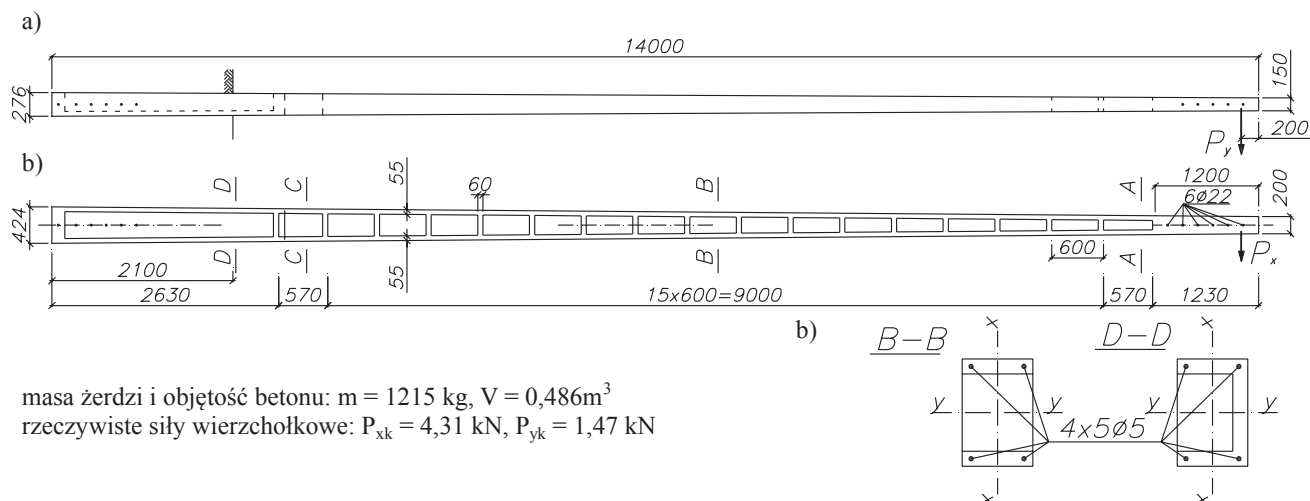
Żerdź strunobetonowa BSW-14/350 jest elementem prefabrykowanym o konstrukcji dwugałęziowej zbieżnym na długości. W części wierzchołkowej żerdź ma przekrój prostokątny, w części środkowej dwugałęziowy (17 otworów w płaszczyźnie większego wymiaru), a w części nasadowej – ceowy (rys. 1). Nośność użytkową żerdzi BSW-14/350 określa znamionowa siła charakterystyczna  $P_{yk} = 350$  dN = 3,5 kN (płaszczyzna większej sztywności) przyłożona w miejscu zamocowania poprzeczника (około 0,2 m od góry). W płaszczyźnie mniejszej sztywności nośność charakterystyczna żerdzi wynosi  $P_{yk} = 0,3 \times P_{yk} = 1,05$  kN. Rzeczywiste siły wierzchołkowe są nieco większe (rys. 1).

Analizę obliczeniową żerdzi przeprowadzono przyjmując cztery wersje zbrojenia sprężającego podane w tabeli 1. Do obliczeń przyjęto beton klasy C35/45 [5]. Parametry stali sprężającej w postaci wysokowęglowych drutów  $\varnothing 5$  mm i splotów  $2\varnothing 2,5$  mm oraz drutów zimno ciągnionych, profilowanych  $\varnothing 7,5$  mm przyjęto według normy [5].

**Tabela 1.** Przekroje i liczba cięgien sprężających w różnych wersjach zbrojenia żerdzi BSW-14/350

Numer wersji zbrojenia	Liczba i rodzaj cięgien	Przekrój cięgien	Charakterystyczna siła zrywająca cięgna	Uwagi
		$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_{pk}$ [kN]	
1	$20\varnothing 5$ mm	392,0	654	żerdź typowa
2	$36 \times 2\varnothing 2,5$ mm	352,8	684	stal wg normy PN-B-03264:1984
3	$32 \times 2\varnothing 2,5$ mm	313,6	608	stal gat. St1470/1670
4	$8\varnothing 7,5$ mm	353,2	590	

Z danych zawartych w tabeli 1 wynika, że najmniejszy przekrój mają cięgna wersji nr 3 ( $32$  sploty  $2\varnothing 2,5$  mm).



masa żerdzi i objętość betonu:  $m = 1215 \text{ kg}$ ,  $V = 0,486 \text{ m}^3$   
 rzeczywiste siły wierzchołkowe:  $P_{xk} = 4,31 \text{ kN}$ ,  $P_{yk} = 1,47 \text{ kN}$

**Rys. 1.** Żerdź BSW-14/350 sprężona cięgnami  $20\phi 5 \text{ mm}$ : a) kształt podłużny, b) przekroje i rozmieszczenie zbrojenia sprężającego

Najmniejszą siłą zrywającą charakteryzują się cięgna z drutów  $8\phi 7,5 \text{ mm}$ . Ten ostatni typ cięgien jest bardzo korzystny ze względów technologicznych. Cięgna  $\phi 7,5 \text{ mm}$  z drutu profilowanego spełniają wymagania normy [6] w zakresie minimalnej ciągliwości granicznej stali przy zerwaniu.

### 3. Obliczanie sił wewnętrznych

Siły podłużne i poprzeczne oraz momenty zginające w gałązkach i przewiązkach żerdzi strunobetonowej BSW-14/350 obciążonej w szczycie siłami zastępczymi  $M_{Ed}$ ,  $N_{Ed}$  i  $V_{Ed}$  (rys. 2c) można wyznaczyć przyjmując schemat statyczny żerdzi w postaci ramy wielokondygnacyjnej (część środkowa ażurowa) połączonej na górze z prętem zbieżnym o przekroju prostokątnym, a na dole z prętem o przekroju ceowym (część przyziemna). Schemat ten nadaje się również do wyznaczenia ugięcia sprężystego w szczycie żerdzi, pochodzącego od obciążenia zastępczą siłą poziomą  $P_k = 3,5 \text{ kN}$  (w rzeczywistych układach konstrukcyjnych linii elektroenergetycznej przyjmuje się  $M_{Ed} = 0$  i  $N_{Ed} \approx 0$ ).

W stanach granicznych nośności siły w gałązkach i przewiązkach (część ażurowa żerdzi BSW-14/3,5) można wyznaczyć przyjmując schemat uproszczony z przegubami w miejscach zerwania się momentów (rys. 2a). Siły osiowe  $N_{1z}$  i  $N_{2z}$  w gałązkach oraz tnące i momenty zginające w gałązkach i przewiązkach w środkowej części żerdzi BSW-14/350 (rys. 2) określają wzory:

$$M_z = z \cdot V_{Ed} + M_{Ed} = z \cdot \gamma_f \cdot P_k + M_{Ed}$$

$$N_{1z} = \frac{M_z}{c_z} + \frac{N_{Ed}}{2}, \quad N_{2z} = -\frac{M_z}{c_z} + \frac{N_{Ed}}{2}$$

$$M_g = \frac{V_{Ed} \cdot a_p}{4}, \quad V_g = \frac{V_{Ed}}{2},$$

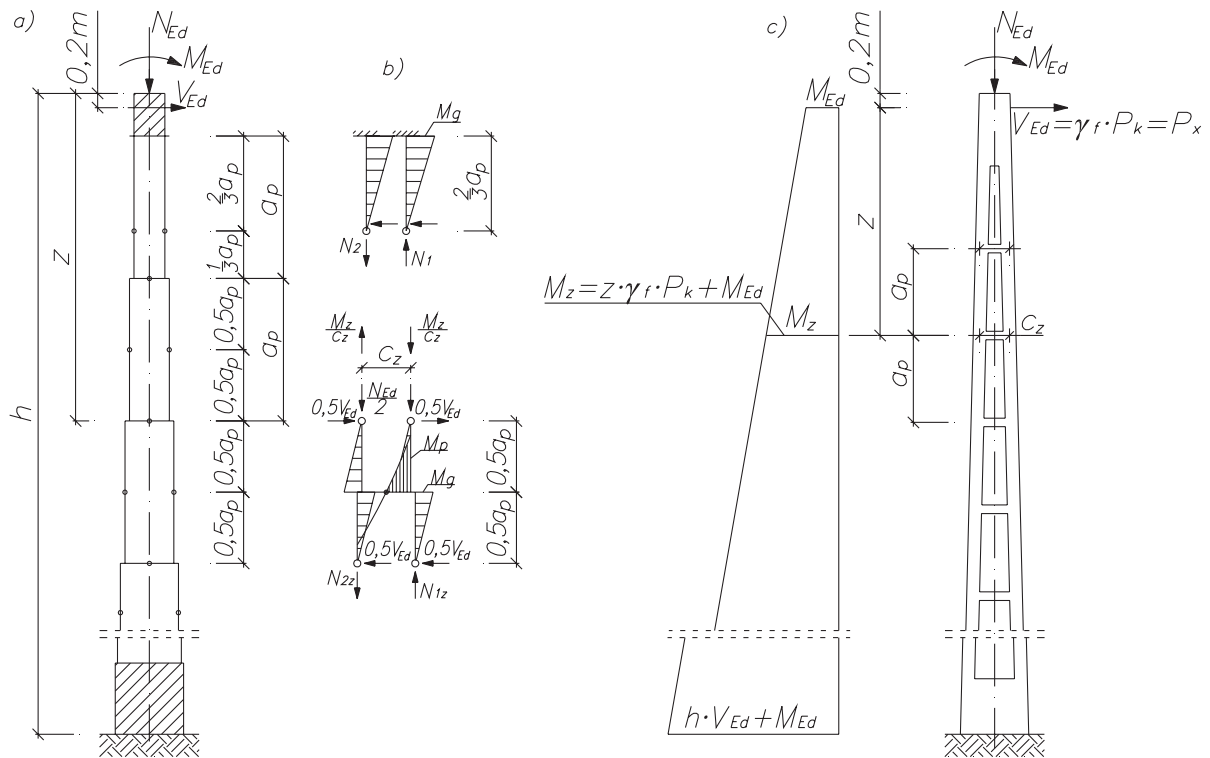
$$M_p = 2M_g = \frac{V_{Ed} \cdot a_p}{2}, \quad V_p = \frac{2M_p}{c_z} = \frac{V_{Ed} \cdot a_p}{c_z}$$

W gałązkach skrajnych moment ma wartość  $M_g = V_{Ed} \times a_p / 3$ . Ze względu na zmienność kształtu elementu i zmianę sił wewnętrznych, sprawdzenie nośności należy przeprowadzić w kilku przekrojach. W żerdziach elektroenergetycznych z reguły przyjmujemy  $M_{Ed} = 0$ , a siłę  $N_{Ed} \approx 2,5 \text{ kN}$  (ciężar przewodów, izolatorów i poprzecznika) pomijamy jako nieistotną przy bardzo dużym mimośrodku  $e_s = M_z / N_{Ed}$  w stosunku do wymiarów poprzecznych żerdzi. Schematem statycznym konstrukcji wsporczej w napowietrznych liniach elektroenergetycznych jest więc długi wspornik (wieża) obciążony w szczycie zastępczą siłą wierzchołkową  $\gamma_f \times P_k$ , gdzie  $\gamma_f$  jest współczynnikiem obciążenia (obecnie dla wiatru  $\gamma_f = 1,5$ ).

### 4. Sprawdzenie stanów granicznych nośności i użyteczności

Obliczenia nośności, rysoodporności i ugięcia żerdzi BSW-14/350 obciążonej zastępczą siłą wierzchołkową  $P_x = \gamma_f \times P_k$  wykonano w oparciu o przepisy norm [5, 6, 7]. W obliczeniach uwzględniono cztery rodzaje zbrojenia elementu (tab. 1). Miarodajne do obliczeń cztery przekroje żerdzi oznaczono na rysunku 1a jako A-A, B-B, C-C i D-D. Obliczenia sprawdzające wykonano:

- w sytuacji przejściowej w zakresie sprawdzenia stanu naprężenia i nośności gałązek na ściskanie osiowe wywołane siłą sprężającą,
- w sytuacji trwałej:
  - sprawdzenie stanu granicznego nośności na mimośrodkowe rozciąganie i ściskanie gałązek z uwzględnieniem siły sprężającej  $P_{m,t}$



**Rys. 2.** Schemat statyczny do analizy obliczeniowej żerdzi dwugałęziowej typu BSW: a) schemat zastępczy żerdzi w wersji uproszczonej, b) siły osiowe i tnące oraz momenty zginające w gałązkach i przewiązkach, c) schemat do obliczenia momentów zginających żerdzi

- sprawdzenie stanu granicznego nośności na zginanie i ścinanie przewiązek,
  - sprawdzenie stanu granicznego nośności na zginanie i zarysowanie przekroju ceowego w części nasadowej i całej żerdzi w płaszczyźnie mniejszej sztywności (zginanie siłą wierzchołkową  $P_y \approx 0,3 P_x$ ),
  - sprawdzenie stanu granicznego pojawienia się rys w gałązkach mimośrodowo rozciąganych,
  - sprawdzenie stanu granicznego ugięcia z zastosowaniem metody dokładnej i uproszczonej.
- Obliczenia wykonywane w oparciu o przepisy różnych norm [5, 6, 7] niewiele się między sobą różniły.

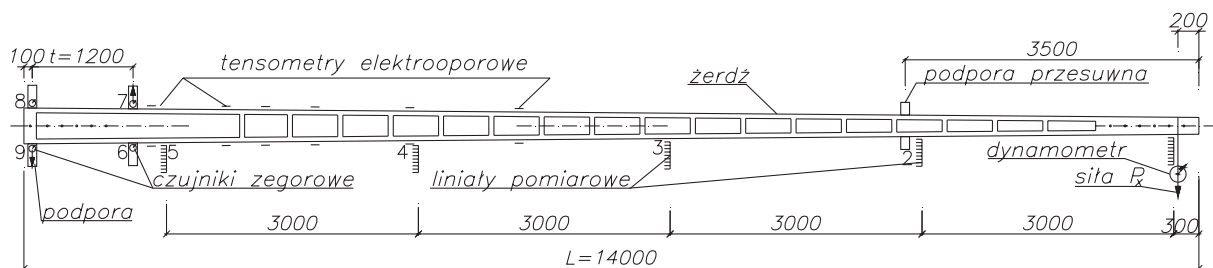
### 5. Badania doświadczalne

Doświadczalne badania wytrzymałościowe żerdzi typu BSW-14/350 przeprowadzono w Laboratorium Badawczym Instytutu Budownictwa Politechniki

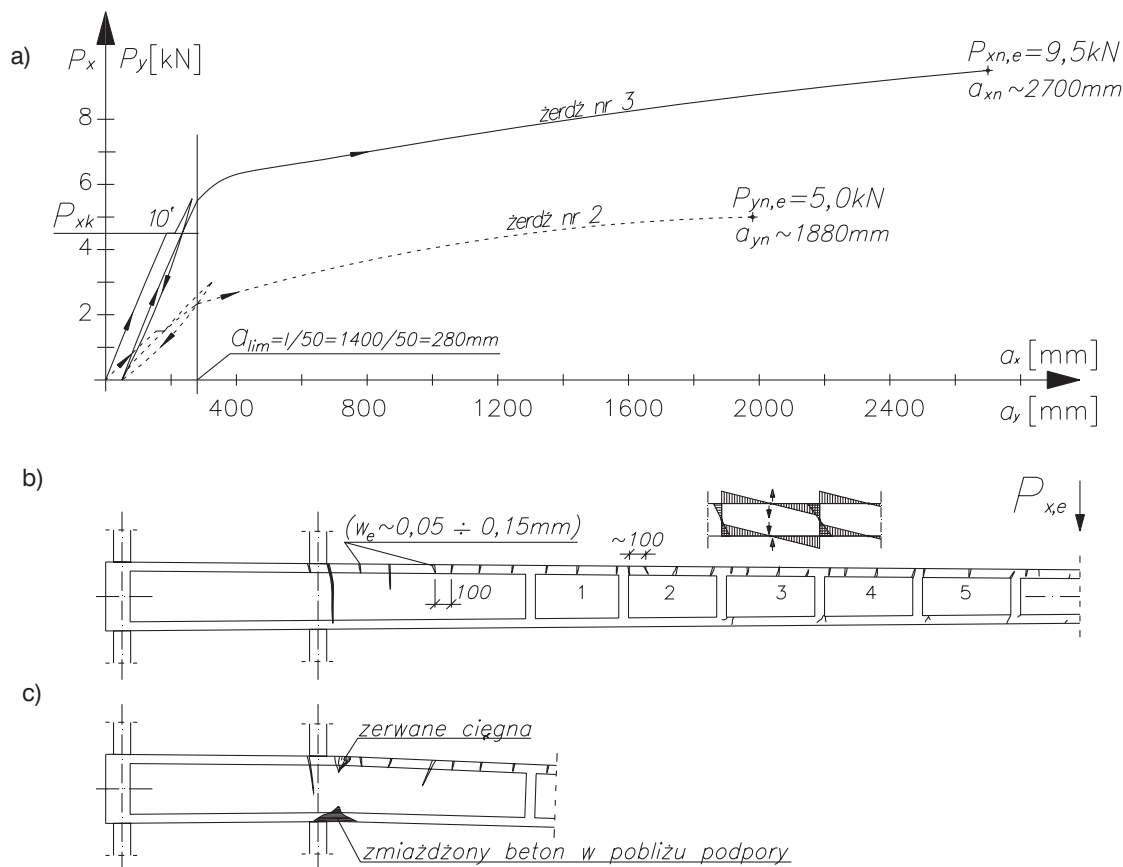
Wrocławskiej na specjalnym stanowisku pokazanym na rysunku 3.

Do badań wybrano losowo cztery żerdzie w zakładzie stosującym zbrojenie w wersji 3 (tab. 1) i jedną żerdź ze zbrojeniem według wersji 4. Badane elementy na stanowisku badawczym podpierano za pomocą stalowych wsporników zamocowanych do posadzki. Siłą wierzchołkową realizowano przy użyciu liny, w którą wpięto siłomierz. Linę zaczepiono do wciągarki suwnicy. Aby zredukować wpływ ciężaru własnego, badane żerdzie podpierano w środkowej części specjalnym wózkiem. Przyjęto program obciążeń składający się z próby sprężystości i próby na zniszczenie [7]. W ramach badań materiałowych wyznaczono podstawowe cechy betonu i stali.

W trakcie obciążania żerdzi mierzono odkształcenia jednostkowe na powierzchni betonu oraz ugięcia i zarysowanie (rejestrowano siłę rysującą i siłę odpowiadającą



**Rys. 3.** Szkic stanowiska do badań żerdzi BSW-14/350 na zginanie w płaszczyźnie większej sztywności



**Rys. 4.** Wyniki badań żerdzi nr 3 i nr 2: a) wykresy ugięcia wierzchołka żerdzi nr 3 w funkcji siły  $P_x$  działającej w płaszczyźnie większej sztywności i żerdzi nr 2 w funkcji siły  $P_y$  działającej w płaszczyźnie mniejszej sztywności, b) położenie i szerokość rozwarcia rys ( $w_e$ ) zmierzone w elemencie nr 3 przy sile  $P_{x,e} = 6,0$  kN, siła rysująca wynosiła  $P_{x,c,r} = 5,0$  kN c) miejsce zniszczenia żerdzi nr 3

cą otwieraniu i zamykaniu się rys, a także położenie i szerokość rozwarcia rys). Wyniki badań żerdzi nr 2 i 3 przedstawiono w formie graficznej na rysunku 4.

Na rysunku 4a przedstawiono wykresy ugięcia wierzchołka żerdzi  $a_x$  w funkcji przyłożonej siły  $P_x$  dla elementu nr 3 i ugięcia  $a_y$  w funkcji siły  $P_y$  dla elementu nr 2. Na rysunku 4b podano rozmieszczenie i szerokości rozwarcia rys przy sile  $P_x = 6,0$  kN, a na rysunku 4c sposób i miejsce zniszczenia żerdzi nr 3. Z wykresu ugięć  $a_x$  i  $a_y$  widać, że badane żerdzie charakteryzują się dużą odkształcalnością po zarysowaniu (ugięcie maksymalne przy zniszczeniu wynosiło odpowiednio około 2,70 m w kierunku siły  $P_x$  i 1,88 m w kierunku siły  $P_y$ , co należy uznać za cechę dodatnią żerdzi BSW.

W tabeli 2 podano wybrane wyniki badań doświadczalnych żerdzi BSW-14/350 oraz współczynniki charakteryzujące nośność, rysoodporność i ugięcie elementów. Najważniejsze parametry wymagane w chwili projektowania żerdzi [3], według obowiązującej wówczas normy podano w kolumnach: 6 – współczynnik pewności na zarysowanie  $s_{cr} = P_{cr,e} / P_{k,t} \geq 1,25$  (niespełniony dla kierunku siły  $P_x$ ); 7 – współczynnik pewności na zniszczenie  $s_n = P_{n,e} / P_{k,t} \geq 1,80$  (spełniony) i 9 – ugięcie przy sile charakterystycznej  $a_e(P_{k,t})$

$\leq a_{lim} = L / 50 = 14000 / 50 = 280$  mm (spełniony). W kolumnach 8 i 14 zamieszczono tzw. współczynniki sygnalizacji zniszczenia w odniesieniu do siły rysującej  $P_{n,e} / P_{cr,e} \geq 1,15$  i w odniesieniu do ugięcia przy sile rysującej  $a_n / a_{cr,e} \geq 2,0$  (warunki są spełnione). W kolumnie 13 podano wartość współczynnika trwałych efektów zginania  $a_{trw} / a_{cr,e} \leq 0,1$ , który jest zbliżony do wartości normowej [7].

## 6. Wnioski

Na podstawie analizy obliczeniowej i badań doświadczalnych strunobetonowych żerdzi dwugałęziowych typu BSW-14/350 sformułowano następujące wnioski:

1. Wszystkie sprawdzane obliczeniowo żerdzie zbrojone w różny sposób (tab. 1) spełniają normowe warunki nośności w sytuacji przejściowej (obciążenie siłą sprężającą) i w sytuacji trwałej (obciążenie parciem wiatru na żerdź i siłą wierzchołkową). Nośność określona doświadczalnie dla elementu ze zbrojeniem 3 (tab. 1) jest wystarczająca (współczynnik pewności na zniszczenie  $s_n > 1,8$  – kol. 7, tab. 2).
2. Badane elementy spełniają teoretyczne i doświadczalne warunki odkształcalności w zakresie: ugięcia

granicznego  $a_e(P_{k,t}) \leq a_{lim} = L / 50 = 280$  mm wywołanego siłą  $P_{k,t} = 4,31$  kN, współczynnika sygnalizacji zniszczenia określonego przez stosunek ugięć  $a_n / a_{cr,e} \geq 2,0$  i względnej wartości ugięcia trwałego  $a_{trw} / a_{cr,e} \leq 0,1$ .

3. Z wykonanych obliczeń wynika niedobór rysoodporności elementów w sytuacji trwałej (otrzymano  $N_{Sk} > N_{cr}$  w gałęzi rozciąganej w przekroju środkowym B-B i dolnym C-C – rys. 1). Zakładając, że momenty zginające żerdź (pochodzące od parcia wiatru na izolatory, poprzecznik i żerdź) są obciążeniem krótkotrwałym, można złagodzić wymóg rysoodporności, przyjmując zgodnie z normami [5, 6, 9] możliwość pojawienia się rys prostopadłych pod obciążeniem użytkowym.

4. Doświadczalnie stwierdzono niedostateczną rysoodporność badanych żerdzi w świetle starych przepisów [3]. Pojawienie się pierwszych rys na odcinku nasadowym (przekrój ceowy) i w dolnej strefie dwugałęziowej następowało przy sile  $P_{x,cr,e} \cong 5,0$  kN, co odpowiada współczynnikowi  $s_{cr} = P_{x,cr,e} / P_{k,t} = 1,16 < 1,25$ . W świetle norm [5, 6, 9] obecnie sytuacja taka jest dopuszczalna w przypadku obciążeń krótkotrwałych.

5. Strunobetonowe żerdzie dwugałęziowe typu BSW-12/350 i BSW-14/350 eksploatowane w napowietrznych liniach elektroenergetycznych spełniają wymagania wytrzymałościowe i odkształcalnościowe polskich norm [5, 6, 7, 9] jako słupy przelotowe. Gorzej natomiast zachowują się jako słupy mocne w układach wiełożerdziowych ze względu na małą odporność na skręcanie, co uwidacznia się podczas występowania obfitych opadów mokrego śniegu lub sady katastroficznej w postaci zniszczenia całych pręseł naciągowych. Pozostawienie żerdzi BSW-12/350 i BSW-14/350 przy

remontach kapitalnych linii jest więc niewskazane, tym bardziej że posiadamy w kraju całą gamę żerdzi wirowanych typu E, które mogą je zastąpić.

6. W świetle wymagań trwałości, żerdzie BSW-12/350 i BSW-14/350 w środowisku XC4 [5, 6, 9] mają zbyt małą otulinę zbrojenia sprężającego (grubość gałązek wynosi zaledwie 55 mm – rys. 1, co daje  $c_{nom} = 20^{e5}$  mm, czyli  $c_{min} = 15$  mm). Według normy [5], żerdzie BSW nie mają więc zagwarantowanego minimalnego, 30-letniego okresu użytkowania.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Kubiak J., Łodo A., Sprężone i częściowo sprężone żerdzie elektroenergetyczne z betonu wirowanego. Inżynieria i Budownictwo Nr 1/96, s. 24–26
- [2] Kubiak J., Łodo A., Michałek J., Żerdzie z betonu wirowanego. Materiały Budowlane Nr 11/2001, s. 79–80 i 116
- [3] Prahł F., Album prefabrykatów żelbetowych i strunobetonowych dla linii niskich i średnich napięć. Symbol T-3808. Tom I i II z aneksami, Biuro Studiów i Projektów Energetycznych ENERGOPROJEKT w Poznaniu, Poznań 1978
- [4] Kończykowski S., Mayzel B., Konstrukcje wsporcze linii napowietrznych. Arkady, Budownictwo – Sztuka – Architektura, Warszawa 1962
- [5] PN-B-03264:2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [6] PN-EN 1992-1-1:2008. (z aneksem Ap1:2010, NA:2010) Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [7] PN-87/B-03265. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Żelbetowe i sprężone konstrukcje wsporcze. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [8] Kubiak J., Łodo A., Badania cech odkształcalnościowych i wytrzymałościowych żerdzi strunobetonowych BSW-14/350. Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, seria SPR 68/1989, Wrocław 1989
- [9] PN-EN 12843:2008. Prefabrykaty z betonu. Maszty i słupy

**Tabela 2.** Zestawienie wyników badań

Numer elementu, kierunek obciążania	Wartości teoretyczne		Wartości i wskaźniki doświadczalne (indeks e)										
	$P_{k,t}$	$P_{n,t}$	$P_{n,e}$	$P_{cr,e}$	$s_{cr}$	$s_n$	$P_{n,e} / P_{cr,e}$	$a_e(P_{k,t})$	$a_{cr,e}$	$a_{trw}$	$a_n$	$a_{trw} / a_{cr,e}$	$a_n / a_{cr,e}$
	kN				–	–	–	mm					–
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1, $P_x$	4,31	7,75	9,6	5,0	1,16	2,23	1,92	155	248	26	2300	0,10	9,27
2, $P_y$	1,47	2,65	5,0	3,4	2,24	3,40	1,52	150	350	20	1880	0,06	5,37
3, $P_x$	4,31	7,75	9,5	5,0	1,16	2,20	1,90	215	275	30	2700	0,11	9,82
4, $P_x$	4,31	7,75	8,6	5,0	1,16	2,00	1,72	160	200	20	1850	0,10	9,25

Oznaczenia w tabeli:

$P_{k,t}$  – teoretyczna siła charakterystyczna z obliczeń,

$P_{n,t}$ ,  $P_{n,e}$  – teoretyczna siła niszcząca z obliczeń i siła niszcząca z badań (eksperymentalna),

$P_{cr,e}$  – siła rysująca z badań,

$s_{cr} = P_{cr,e} / P_{k,t} \geq 1,25$  – współczynnik pewności na zarysowanie wg norm w czasie projektowania [3],

$s_n = P_{n,e} / P_{k,t} \geq 1,80$  – współczynnik pewności na zniszczenie,

$P_{n,e} / P_{cr,e} \geq 1,15$  – stosunek siły niszczącej i rysującej (współczynnik sygnalizacji zniszczenia przez zarysowanie),

$a_e(P_{k,t})$  – ugięcie wierzchołka (doświadczalne) przy sile charakterystycznej  $P_{k,t}$  nie większe od  $a_{lim}$ ,

$a_{cr,e}$  – ugięcie przy obciążeniu rysującym,

$a_{trw}$  – ugięcie trwałe pozostające po próbie sprężystości,

$a_n$  – ugięcie maksymalne tuż przed zniszczeniem,

$a_{trw} / a_{cr,e} \leq 0,1$  – współczynnik trwałych efektów obciążania,

$a_n / a_{cr,e} \geq 2,0$  – stosunek ugięcia przy zniszczeniu do ugięcia przy sile rysującej  $P_{cr,e}$  (współczynnik sygnalizacji niszczenia).