

dr inż. Jarosław Michalek^{1)*}

ORCID: 0000-0002-4242-9054

dr inż. Piotr Koziol¹⁾

ORCID: 0000-0001-5205-1983

Hybrid steel-concrete poles for high-voltage overhead lines

Słupy hybrydowe stalowo-betonowe do napowietrznych linii wysokiego napięcia

DOI: 10.15199/33.2026.09.09

Abstract. This paper presents a new type of hybrid pole used in 110 kV high-voltage lines, comparing it with poles currently in use both domestically and abroad. A hybrid pole consists of a prestressed concrete core manufactured using spun concrete technology and a galvanized steel lattice head bolted to it. Hybrid poles can be used both in newly constructed lines and for the reconstruction of existing ones.

Keywords: overhead high-voltage power line; power pole; hybrid pole; spun concrete.

Streszczenie. W artykule omówiono nowy typ słupów hybrydowych stosowanych w liniach wysokiego napięcia 110 kV na tle słupów dotychczas stosowanych w kraju i za granicą. Słupy hybrydowe składają się ze strunobetonowego trzonu wykonanego w technologii betonu wirowanego oraz dokręcanej do niego stalowej, ocynkowanej głowicy kratowej. Słupy hybrydowe można zastosować zarówno w nowo budowanych liniach, jak i przebudowywanych.

Słowa kluczowe: napowietrzna linia energetyczna wysokiego napięcia; słup elektroenergetyczny; słup hybrydowy; beton wirowany.

The transmission of electrical energy from power plants to end users is enabled by an extensive network of transmission lines and substations; however, this process is inherently associated with energy losses. The principal method of reducing these losses is to increase the transmission voltage. Depending on the distance over which the energy must be transmitted, different voltage levels are applied:

- **in transmission networks:** 220, 400, and 750 kV – referred to as extra-high-voltage (EHV) lines – used for long-distance transmission of electrical energy between power plants and major transformer substations, primarily within domestic and cross-border (international) transmission systems; and 110 kV – referred to as high-voltage (HV) lines – used for medium-distance transmission, typically not exceeding several dozen kilometers, linking major transformer substations with regional distribution centers;

- **in distribution networks:** 1 ÷ 110 kV – referred to as medium-voltage (MV) lines, commonly 15, 20, or 30 kV – used for supplying larger industrial and commercial consumers, feeding local transformer substations that step down the voltage to levels suitable for end users; and below 1 kV – referred to as low-voltage (LV) lines, most commonly 230/400 V – used at the final stage of energy distribution, supplying individual consumers and small enterprises directly.

In Poland, the combined length of transmission lines operating at 110, 220, and 400 kV exceeds 15,000 km, constituting the backbone of the national power transmission system. A notably short section – only 114 km – consists of overhead transmission lines operating at 750 kV, connecting the 750/400/110 kV substation located in Widelka, near

Przesył energii z elektrowni do odbiorcy możliwy jest dzięki rozległej sieci linii i stacji elektroenergetycznych, ale wiąże się ze stratami. Podstawowy sposób zmniejszenia tych strat polega na zwiększeniu napięcia elektroenergetycznych linii przesyłowych. W zależności od odległości, na jaką ma być przesyłana energia, stosuje się różne napięcia:

- **w sieciach przesyłowych:** 220, 400 i 750 kV – tzw. linie najwyższego napięcia NN – w przypadku przesyłania energii na dużą odległość pomiędzy elektrowniami a głównymi stacjami transformatorowymi, przede wszystkim w liniach krajowych i międzynarodowych; 110 kV – tzw. linie wysokiego napięcia WN – w przypadku przesyłania energii na średnią odległość nieprzekraczającą kilkudziesięciu kilometrów, łącząc większe stacje transformatorowe z regionalnymi centrami dystrybucji;

- **w sieciach dystrybucyjnych (rozdzielczych):** 1 ÷ 110 kV – tzw. linie średniego napięcia SN, często 15, 20, 30 kV – w przypadku linii przeznaczonych do zasilania większych odbiorców przemysłowych i komercyjnych (zasilających lokalne stacje transformatorowe, które obniżają napięcie do poziomów użytecznych dla końcowych odbiorców); do 1 kV – tzw. linie niskiego napięcia nn, najczęściej 230/400 V – stosowane w końcowym etapie dystrybucji energii, bezpośrednio do odbiorców indywidualnych i małych przedsiębiorstw.

W Polsce łączna długość linii przesyłowych o napięciu 110, 220 i 400 kV przekracza 15000 km, stanowiąc kręgosłup przesyłu energii. Na odcinku zaledwie 114 km są linie elektroenergetyczne napowietrzne o napięciu 750 kV, łączące stację elektroenergetyczną 750/400/110 kV w miejscowości Widelka niedaleko Kolbuszowej z elektrownią jądrową Chmielnicka w Ukrainie. Zakończenie budowy linii nastąpiło w 1985 r., ale od 1993 r. nie była ona eksplo-

¹⁾ Politechnika Wrocławska; Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Correspondence address: jaroslaw.michalek@pwr.edu.pl

Kolbuszowa, with the Khmelnytskyi Nuclear Power Plant in Ukraine. Construction of this line was completed in 1985; however, it remained out of operation from 1993 onward. In 2022, a decision was made to restore the line to service, and in May 2023 it was put back into operation at a reduced voltage of 400 kV. Globally, transmission lines operating at voltages as high as 1,100 kV have already been implemented, examples of which include: the 432 km Ekibastuz–Kokshetau line in Kazakhstan [1]; the 240 km Kita-Iwaki line in Japan [2]; and the 3,324 km Changji–Guquan line in China [3].

General characteristics of power transmission poles

Power transmission support structures are used to support or support overhead electrical conductors at a safe distance from the ground and surrounding objects. Owing to differences in line voltage, they vary in construction and line fittings. Different types of support structures are used for low-voltage lines than for high-voltage lines. Structures may also be multi-voltage, which allows for a reduction in the land area (right-of-way) occupied by the power line. Another category consists of so-called crossing towers, used at river crossings, and cable transition poles, at which an overhead line transitions into an underground line. Overhead transformer stations are constructed as pole-mounted substations (LV/MV), i.e., a transformer is installed on a dedicated platform mounted on the pole.

With respect to construction technology, support structures can be classified as follows:

- wooden and composite (LV lines);
- pre-tensioned spun concrete pole with a solid cross-section (e.g., type BSW) or a ring (hollow) cross-section (e.g., type E) of small outer diameter, as well as reinforced concrete poles (LV and MV lines [4]);
- steel lattice towers (Photo a) and tubular steel towers with circular or polygonal cross-sections (Photo b);

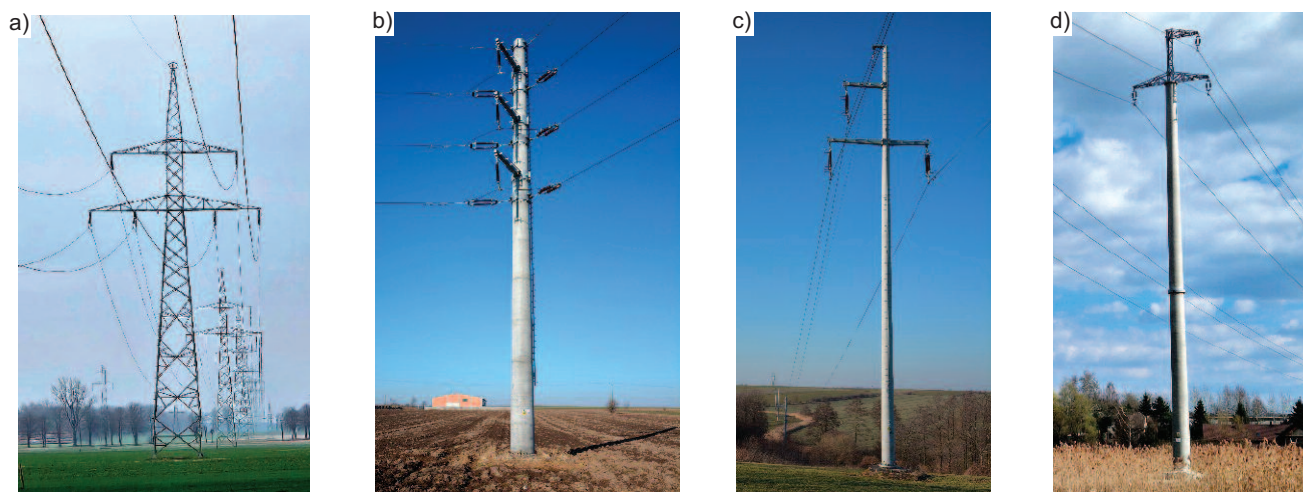
atowana. W 2022 r. podjęto decyzję o przywróceniu jej do użyteczności, a w maju 2023 r. uruchomiono linię o napięciu 400 kV. Na świecie są już linie przesyłowe o napięciu nawet 1100 kV, jak np. linia Jekybastuz–Kokczetaw o długości 432 km w Kazachstanie [1]; linia Kita-Iwaki o długości 240 km w Japonii [2]; linia Changji–Guquan o długości 3324 km w Chinach [3].

Charakterystyka ogólna słupów energetycznych

Słupy elektroenergetyczne stosuje się do podtrzymywania lub mocowania napowietrznych przewodów elektrycznych w bezpiecznej odległości od ziemi i obiektów. Ze względu na napięcie linii mają one różną konstrukcję oraz osprzęt liniowy. Inne rodzaje słupów stosuje się w przypadku małego napięcia, a inne dużego. Słupy mogą być również wielonapięciowe, co pozwala na oszczędność pasa terenu zajmowanego przez linię energetyczną. Innym rodzajem słupów są tzw. słupy przekroczeniowe stosowane w przypadku prowadzenia linii nad rzeką oraz słupy kablowe, których linia napowietrzna przechodzi w linię podziemną. Napowietrzne stacje transformatorowe wykonywane są jako stacje słupowe (nn i SN), tzn. na specjalnym podeście słupa umieszczony jest transformator.

Ze względu na technologię wykonania słupy można podzielić na:

- drewniane i kompozytowe (linie nn);
- strunobetonowe o przekroju pełnym (np. typu BSW) lub pierścieniowym (np. typu E) o niewielkiej średnicy zewnętrznej oraz żelbetowe (linie nn i SN [4]);
- stalowe kratownicowe (fotografia a) i rurowe o przekroju kołowym lub wielokątnym (fotografia b);
- kablobetonowe i strunobetonowe (np. typu ES – fotografia c) o przekroju pierścieniowym i dużej średnicy zewnętrznej [5, 6] (linie WN i NN).



Classification of high-voltage and extra-high-voltage poles by construction type: a) steel lattice pole; b) steel tubular pole; c) prestressed concrete pole; d) hybrid pole

Podział słupów linii WN i NN ze względu na technologię wykonania: a) stalowy słup kratowy; b) stalowy słup rurowy; c) słup strunobetonowy; d) słup hybrydowy

Photo a, c – J. Michalek, b – P. Kozioł, d – M. Lipniak

Fot. a, c – J. Michalek, b – P. Kozioł, d – M. Lipniak

• post-tensioned and pre-tensioned spun concrete pole (e.g., type ES - Photo c) with a ring cross-section and large outer diameter [5, 6] (HV and EHV lines).

Steel-concrete hybrid poles are now increasingly being introduced into the HV line sector; these consist of a shaft made from spun (centrifugally cast) pre-tensioned spun concrete pole, topped with a steel lattice head/crossarm assembly (Photo d). The lattice construction of the pole head allows for flexibility in adapting to the dimensional (clearance) requirements of individual pole types used on 110 kV lines (Figure 1).

The height of support structures depends on the type of power line and is, respectively: for LV lines – $5 \div 12$ m, for MV lines – $10 \div 18$ m, and for HV and EHV lines – $18 \div 50$ m (standard). The tallest power transmission tower in Poland, of steel lattice construction, stands 127 m high and is located along the 220 kV high-voltage transmission line running from Miłosna to Warsaw, in Nowodwory (the Białoleka district of Warsaw). Its unusual height results from the need to ensure adequate clearance above the surface of the Vistula River. The tallest tower of this type in Europe, by comparison, stands 227 m high and is located along the 380 kV Elbekreuzung 2 transmission line near Hamburg, Germany, while the tallest steel lattice towers in Asia – and indeed in the world – exceeding 380 m in height, are used on the 800 kV DC transmission line crossing the Yangtze River in China.

Currently, in the course of expanding HV and EHV networks, the construction of overhead steel lattice-type transmission towers is being planned. It is also possible to use concrete poles on high-voltage lines, such as the 60 m tall angle/corner tower along the 380 kV Innerktkirchen-Littau-Mettlen line in Switzerland (the tallest prefabricated concrete pole in the world) [8].

Hybrid poles (Figure 1) are intended for new and modernized 110 kV power lines and may serve as replacements for typical steel lattice towers. They can be used

W obszar linii WN wkraczają obecnie słupy hybrydowo-stalowo-betonowe, składające się ze strunobetonowych żerdzi wirowanych stanowiących trzon słupa oraz stalowej głowicy kratowej (fotografia d). Kratowa konstrukcja głowicy słupa pozwala na elastyczność w dostosowaniu się do wymagań gabarytowych w przypadku poszczególnych typów słupów linii 110 kV (rysunek 1).

Wysokość słupów zależy od typu linii energetycznej i wynosi odpowiednio: w przypadku linii nn – $5 \div 12$ m, linii SN – $10 \div 18$ m, linii WN i NN – $18 \div 50$ m (standardowo). Najwyższy słup energetyczny w Polsce o stalowej konstrukcji kratowej ma wysokość 127 m i znajduje się w ciągu linii elektroenergetycznej wysokiego napięcia 220 kV rełacji Miłosna – Warszawa w Nowodworach (dzielnica Białoleka w Warszawie). Jego nietypowa wysokość wynika z konieczności zapewnienia odpowiedniego prześwitu nad lustrem rzeki Wisły. Z kolei najwyższy w Europie tego typu słup ma wysokość 227 m i jest zlokalizowany w ciągu linii przesyłowej 380 kV Elbekreuzung 2 w okolicy Hamburga w Niemczech, natomiast najwyższe w Azji (i jednocześnie na świecie) słupy o stalowej konstrukcji kratowej mierzące ponad 380 m zastosowano w linii przesyłowej ultra wysokiego napięcia prądu stałego 800 kV nad rzeką Jangcy w Chinach.

Obecnie przy rozbudowie sieci WN i NN planuje się budowę napowietrznych słupów przesyłowych typu kratownicowego stalowego. Możliwe jest zastosowanie w liniach wysokiego napięcia także słupów betonowych, jak np. narożny wysokości 60 m w ciągu linii 380 kV Innerktkirchen – Littau – Mettlen w Szwajcarii (najwyższy na świecie betonowy słup prefabrykowany) [8].

Słupy hybrydowe (rysunek 1) są przeznaczone do nowych linii energetycznych, i modernizowanych o napięciu 110 kV oraz mogą zastępować typowe stalowe słupy kratowe. Można je sto-

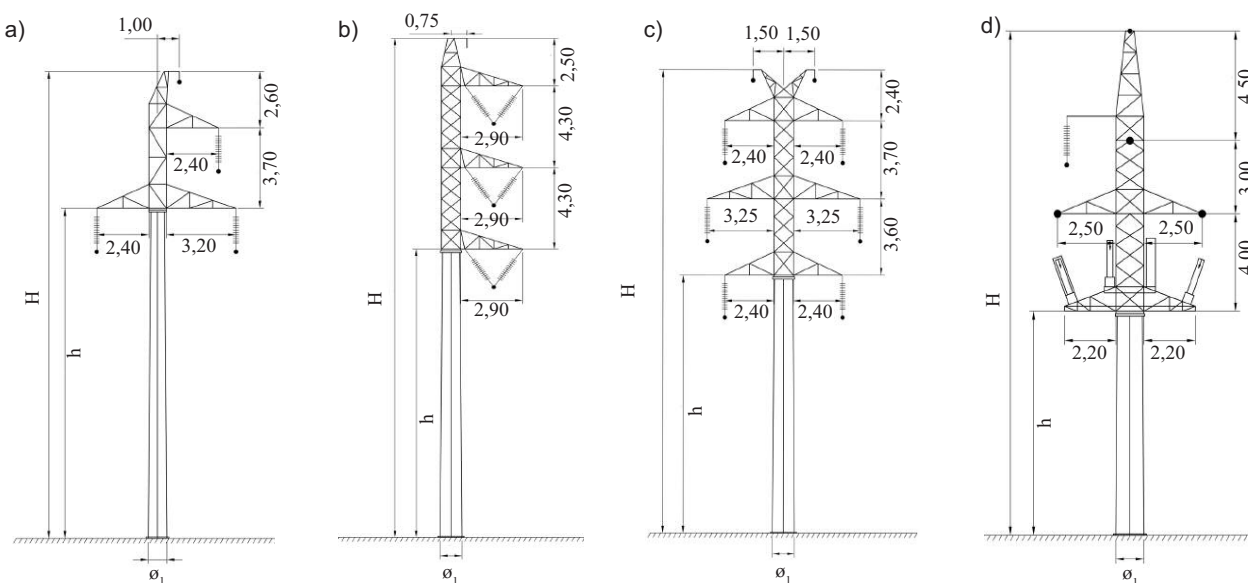


Fig. 1. Schematic view of selected hybrid poles [7]: a) single-track through pole P1k; b) single-track forest through pole PLk1; c) double-track through pole P1Dk; d) special single-track end-cable pole KKk (drawings without a scale bar)

Rys. 1. Profile wybranych słupów hybrydowych [7]: a) jednorodowy słup przelotowy P1k; b) jednorodowy słup przelotowy leśny PLk1; c) dwutorowy słup przelotowy P1Dk; d) słup specjalny jednorodowy krańcowo-kablowy KKk (rysunki bez skali porównawczej)

as suspension and tension/anchor structures on single-circuit lines, as suspension structures on double-circuit lines, and in special applications (Table). Almost every standard pole type, in addition to its nominal height, has 2 ÷ 4 height variants, allowing the line to be routed over uneven terrain or over obstacles/structures. Height variants of the poles are achieved by varying the height of the concrete pole shaft (Table). Hybrid poles with the parameters given in the Table can be safely installed across nearly the entire territory of Poland, within wind load zone I and ice-loading zones S1 and S2 [9].

Technical specifications of hybrid poles

Parametry techniczne słupów hybrydowych

Pole type/Typ słupa			Deflection angle/ Kąt za- łomu [°]	Total pole height/Wyso- kość całkowi- ta słupa [m]	Span length [m]/ Długość przęsła [m]			Dimensions of concrete section/ Wymiary części betonowej		
					wind span ¹⁾ / wiatrowe ¹⁾	clearance span ²⁾ / gabary- towe ²⁾	weight span ³⁾ / cięża- rowe ³⁾	height above ground level n.p.t. [m] /wysokość n.p.t. [m]	base diame- ter [mm] średnica pod- stawy [mm]	top diameter [mm]/średnica wierzchołka [mm]
P1k+0,+3,+6+9*+12*	single- circuit/ jedno- torowy	suspension pole/ słup przelotowy	180 – 178	21,47 – 33,47	330 – 350	330 – 380	350 – 400	15,17 – 27,17	848 – 1028	623
P1w+1,+4+7*,+10*,+13*				22,47 – 34,47				16,17 – 28,17	893 – 1073	
PL1k+0,+3,+6+9			180 – 178	23,28 – 32,28	300 – 360	300 – 360	330 – 380	12,18 – 21,18	983 – 1118	803
PL1w+1,+4+7		24,28 – 30,28		13,18 – 19,18				1028 – 1118		
PL2k+0,+3,+6+9		180 – 178	forest suspen- sion pole/słup przelotowy leśny	22,88 – 31,88	250 – 300	250 – 300	270 – 330	12,18 – 21,18	983 – 1118	803
PL2w+1,+4+7				23,88 – 29,88				13,18 – 19,18	1028 – 1118	
ML3k+0,+3		180 – 150		24,9 – 27,9	300 – 360	300 – 360	330 – 380	12,3 – 15,3	1298 – 1343	1118
ML3w–2,+1				22,9 – 25,9				10,3 – 13,3	1298 – 1343	
M3k+0,+3,+6,+9		180 – 150		19,7 – 28,7				12,2 – 21,2	1163 – 1298	983
M3w2,+1,+4,+7,+10				17,7 – 29,7				10,2 – 22,2	1163 – 1343	
M6k+0,+3		150 – 120	anchor pole/ słup mocny	19,7 – 22,7				12,2 – 15,2	1298 – 1343	1118
M6w–2,+1				17,7 – 20,7				10,2 – 13,2	1298 – 1343	
M9k+0		120 – 90		19,7	330 – 350	330 – 380	350 – 400	12,2	1298	1118
M9w–2				17,7				10,2	1343	
KRk+0,+3			dead-end pole/słup mocny krańcowy	0-20	19,7 – 22,7			12,2 – 15,2	1298 – 1343	1118
KRw–2,+1	17,7 – 20,7			10,2 – 13,2						
P1Dk+0	double-cir- cuit/dwu- torowy	suspension pole/ słup przelotowy	180 – 178	24,88	330 – 350	330 – 380	350 – 400	15,18	1298	1073
P1Dw–2				22,88				13,18		
BLk–3,+0,+3	special- purpose/ spec- jalny	single-shaft cable brid- ge pole/jednotrzono- wy most linkowy	–	21,9 – 27,9	–	–	–	9,3 – 15,3	1253 – 1343	1118
BLw–2,+1				11,3 – 14,3				10,3 – 13,3	1298 – 1343	
PKk+0,+3		pole-mounted cable platform/słupowa platforma kablowa	–	7 – 10	–	–	–	6 – 9	1208 – 1253	1118
PKw+1,+4				8 – 11				7 – 10	1253 – 1298	
KKk+0		single-circuit cable terminal pole/jedno- torowy słup krań- cowo kablowy	0 – 20	23,7	330 – 350	330 – 380	350 – 400	12,2	1343	1163

k – version for bolted connection to the foundation, w – version inserted/embedded into a caisson foundation, * – two-segment version of the concrete shaft; ¹⁾ wind span determines the permissible distance between poles based on wind pressure/loading; ²⁾ clearance span determines the permissible distance between poles required to maintain a safe distance between the conductor and the ground; ³⁾ weight span determines the permissible distance resulting from the vertical (gravitational) load of the conductors/k – wersja do śrubowego mocowania do fundamentu, w – wersja wpuszczana w fundament studniowy, * – dwusegmentowa wersja trzonu betonowego; ¹⁾ – przęsło wiatrowe wyznacza dopuszczalną odległość między słupami ze względu na napór wiatru; ²⁾ – przęsło gabarytowe wyznacza dopuszczalną odległość między słupami, aby zachować bezpieczną odległość przewodów od ziemi; ³⁾ – przęsło ciężarowe oznacza dopuszczalną odległość między słupami wynikającą z pionowego ciężaru przewodów

Foundation of Hybrid Poles

The foundations of hybrid poles for single- and double-circuit high-voltage lines are most commonly constructed as **monolithic caisson-type foundations, either of pole (shaft) type or block type** (Figure 2).

Direct connection of the spun concrete pole shaft to a caisson foundation (Figure 2a) is problematic due to the absence of a typical socket, which is normally used to plumb the pole into a vertical position. In the case of a caisson foundation, as shown in Figure 2a, concreting is carried out within rings that serve as lost formwork, in two stages. First, the lower part of the foundation is concreted up to the level of the pole base; then, after the concrete mix has partially set, the pole is positioned and the rings are filled with concrete mix up to a level of at least 0.15 m above ground level (Figure 2a). The embedment depth of the pole shaft within the caisson foundation is 2.0 m. Installation of the HV line conductors on the pole can therefore only take place after the concrete has cured, theoretically after 28 days. Foundation preparation is even more labor-intensive under unfavorable geotechnical conditions that preclude the use of a caisson foundation; in such cases, the time required to achieve full concrete strength must be extended by the time needed to install foundation piles [7].

The solution shown in Figure 2b requires very precise positioning of anchor bolts over the section corresponding to the base of the spun concrete pole. It enables rapid installation of poles on previously prepared foundations, with plumb-line adjustment (rectification) performed using nuts above the pole base. This solution can be applied to the foundation of a steel lattice tower on a 110 kV power line scheduled for reconstruction/upgrading.

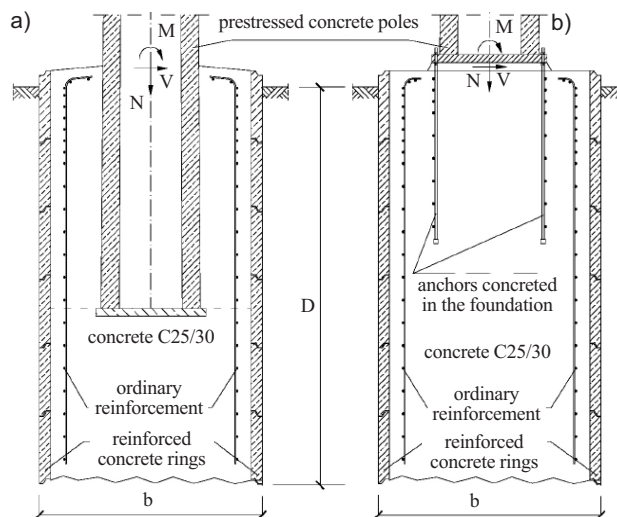


Fig. 2. Drilled pier foundations and block foundations of the well type: a) pile shaft anchored in the foundation block; b) bolted connection between the pile and the foundation [10]

Rys. 2. Fundamenty słupowe i blokowe typu studniowego: a) trzon słupa zakotwiony w bryle fundamentu; b) mocowanie słupa z fundamentem za pomocą śrub [10]

Posadowienie słupów hybrydowych

Fundamenty słupów hybrydowych linii jedno- i dwutorowych wysokiego napięcia wykonywane są najczęściej jako **studniowe konstrukcje monolityczne typu słupowego lub blokowego** (rysunek 2).

Bezpośrednie połączenie trzonu słupa wirowanego z fundamentem studniowym (rysunek 2a) jest kłopotliwe ze względu na brak typowego kielicha, który jest wykorzystywany do ustawienia słupa w pionie. W przypadku fundamentu studniowego jak na rysunku 2a betonowanie odbywa się w kręgach traktowanych jako szalunek tracony w dwóch etapach. Najpierw betonuje się część dolną fundamentu do poziomu podstawy słupa, a następnie po częściowym związaniu mieszanki betonowej ustawia się słup i wypełnia kręgi mieszanką do poziomu co najmniej 0,15 m n.p.t. (rysunek 2a). Głębokość zamocowania trzonu słupa w fundamencie studniowym wynosi 2,0 m. Montaż przewodów linii WN na słupie może więc nastąpić dopiero po związaniu betonu, teoretycznie po 28 dniach. Jeszcze bardziej pracochłonne jest przygotowanie fundamentu w niekorzystnych warunkach geotechnicznych

wykluczających posadowienie na studni. W takiej sytuacji czas osiągnięcia pełnej wytrzymałości betonu należy wydłużyć o czas potrzebny na zrealizowanie pali fundamentowych [7].

Rozwiązanie pokazane na rysunku 2b wymaga bardzo precyzyjnego rozmieszczenia śrub kotwowych na odcinku odpowiadającym podstawie słupa wirowanego. Umożliwia szybki montaż słupów na wcześniej przygotowanych fundamentach i ich rektyfikację nakrętkami nad podstawą słupa. Rozwiązanie to może być stosowane do wykonywania fundamentów słupowych w obrębie czterech nóg stalowego słupa kratowego czynnej linii elektroenergetycznej 110 kV przeznaczonej do przebudowy.

Construction of Hybrid Poles

The shaft of the hybrid pole is a pre-tensioned spun concrete element with a ring (annular) cross-section, resulting from the adopted manufacturing technology, in which the concrete is spun (centrifugally cast) in conical molds [5]. Spinning allows for a high degree of concrete compaction and a smooth outer surface, ensuring that the prefabricated elements achieve high durability and an aesthetically pleasing appearance. The top of the pole shaft is connected to a steel head, used to connect the pole to the three-dimensional steel lattice structure by means of prestressing bolts.

Budowa słupów hybrydowych

Trzon słupa hybrydowego jest strunobetonowym elementem wirowanym o przekroju pierścieniowym, wynikającym z przyjętej technologii jego wytwarzania metodą wirowania betonu w formach stożkowych [5]. Wirowanie pozwala uzyskać wysoki stopień zagęszczenia betonu i gładką powierzchnię zewnętrzną, co gwarantuje elementom prefabrykowanym dużą trwałość i estetyczny wygląd. Trzon słupa w szczycie zakończony jest stalową głowicą służącą do połączenia słupa z kratową, przestrzenną konstrukcją stalową za pomocą śrub sprężających.

The three-dimensional lattice structure is built from bolted, hot-dip galvanized steel sections made of S235JR steel (mainly single equal-leg angle sections), similar to conventional steel lattice poles. The use of galvanized lattice components, together with transport and assembly considerations, has led to a complete departure from welded connections in favor of bolted connections. The three-dimensional lattice structures differ in shape, in the arrangement of phase conductor and shield (earth) wire suspension points, and in their intended application (Table 1 and Figure 1).

The shaft of the hybrid pole is longitudinally reinforced with prestressing tendons of relaxation class 2 ($p_{1000} = 2.5\%$), in the form of seven-wire strands, $\varnothing 15.5$ mm, made of Y1860S7 steel [11]. At the top damage to and theft of steel angle sections of the shaft, the Y1860S7 prestressing strands are anchored in conical sockets within the steel head by means of three-part wedge grips (jaws), while at the base they are anchored through bond (adhesion) between the steel and the concrete. The initial prestressing force in the $\varnothing 15.5$ mm strand was assumed equal to $P_{01} = 0.70 \cdot F_{pk} = 0.70 \cdot 272 = 190.4$ kN. In order to protect the structure against the effects of cracking, the pole shaft was designed [12] under the assumption that crack resistance is ensured by prestressing and by the tensile strength of the concrete.

The ordinary (non-prestressed) reinforcement consists of ribbed bars of class C steel, with a characteristic yield strength of $f_{yk} = 500$ MPa. At the connection point between the pole shaft and the steel head, which links it to the lattice top section (Figure 1), in addition to the prestressing reinforcement, additional single-end threaded ribbed steel bars of type PH A [13] were used, with a characteristic yield strength of $f_{yk} = 500$ MPa, tightened to the steel head at a specified torque [14]. The transverse reinforcement of the pole shaft consists of a spiral made of smooth wire, $\varnothing 5.5$ mm, of steel with a characteristic yield strength of $f_{yk} \geq 500$ MPa, running along the entire length of the spun element. The spiral pitch in the central section of the pole shaft is $s = 100$ mm. At the top of the shaft and at the base, in the strand anchorage zone, the spiral pitch is reduced (densified). The thickness of the outer concrete cover over the spiral is $c_{nom} = 25^{+10}_{-5}$ mm, while the nominal thickness of the outer cover over the prestressing tendons and the longitudinal reinforcement in the pole shaft was assumed to be at least $c_{nom} = 30^{+10}_{-5}$ mm. This cover thickness ensures a 50-year service life for spun concrete power pole structures.

The prestressed concrete shaft of the hybrid pole uses spun concrete of class C50/60, based on washed crushed aggregate (granite, basalt) as well as natural gravel and sand. To ensure proper placement of the concrete mix, aggregate with a maximum grain size of $d_g = 20$ mm was used. The concrete mix was produced using CEM I 52.5 class cement, intended for concrete exposed to atmospheric conditions. The cement should additionally satisfy the criterion of good compaction of the concrete mix during the spinning process, which must be verified experimentally.

Przestrzenna konstrukcja kratowa zbudowana jest ze skręcanych, ocynkowanych na gorąco kształtowników ze stali S235JR (głównie pojedyncze kątowniki równoramienne), podobnie jak w przypadku słupów kratowych. Wprowadzenie ocynkowanych elementów kratownicy, a także możliwości transportowe i montażowe spowodowały, że odstąpiono całkowicie od połączeń spawanych na rzecz śrubowych. Przestrzenne konstrukcje kratowe różnią się kształtem, układem zawieszenia przewodów fazowych i odgromowych oraz przeznaczeniem (tabela i rysunek 1).

Trzon słupa hybrydowego zbrojony jest podłużnie cięgnami sprężającymi o 2 klasie relaksacji ($p_{1000} = 2.5\%$) w postaci splotów siedmiodrutowych $\varnothing 15.5$ mm ze stali Y1860S7 [11]. Sploty sprężające typu Y1860S7 w szczycie trzonu zakotwione są w gniazdach stożkowych w głowicy stalowej za pomocą szczęk trójdzielnych, natomiast w nasadzie przez przyczepność stali do betonu. Początkową siłę sprężającą w splocie $\varnothing 15.5$ mm przyjęto równą $P_{01} = 0.70 \cdot F_{pk} = 0.70 \cdot 272 = 190.4$ kN. W celu zabezpieczenia konstrukcji przed skutkami zarysowania trzon słupa zaprojektowano [12] przy założeniu, że rysoodporność zabezpieczona jest przez sprężenie i wytrzymałość betonu na rozciąganie.

Zbrojenie zwykle stanowią pręty żebrowane ze stali klasy C o charakterystycznej granicy plastyczności $f_{yk} = 500$ MPa. W miejscu połączenia trzonu słupa z głowicą stalową, łączącą z kratową częścią wierzchołkową (rysunek 1), oprócz zbrojenia sprężającego zastosowano dodatkowe jednostronnie gwintowane pręty ze stali żebrowanej typu PH A [13] o charakterystycznej granicy plastyczności $f_{yk} = 500$ MPa, przykręcane określonym momentem [14] do głowicy stalowej. Zbrojenie poprzeczne trzonu słupa stanowi spirala z drutu gładkiego $\varnothing 5.5$ mm ze stali o charakterystycznej granicy plastyczności $f_{yk} \geq 500$ MPa przebiegająca przez całą długość elementu wirowanego. Skok spirali na odcinku środkowym trzonu słupa wynosi $s = 100$ mm. W szczycie trzonu oraz w nasadzie w strefie kotwienia splotów spiralę zagęszczono. Grubość zewnętrznej otuliny spirali wynosi $c_{nom} = 25^{+10}_{-5}$ mm, natomiast grubość nominalna otuliny zewnętrznej cięgien sprężających i stali podłużnej w trzonie słupa przyjęto co najmniej $c_{nom} = 30^{+10}_{-5}$ mm. Wartość otuliny gwarantuje 50-letnią trwałość konstrukcji słupów elektroenergetycznych z betonu wirowanego.

W strunobetonowym trzonie słupa hybrydowego stosowany jest beton wirowany klasy C50/60 na bazie łamanego kruszywa płukanego (granit, bazalt) oraz żwiru i piasku naturalnego. Ze względu na właściwe ułożenie mieszanki betonowej używa się kruszywa o ziarnach nieprzekraczających $d_g = 20$ mm. Do wykonania mieszanki betonowej stosuje się cement klasy CEM 52,5, przeznaczony do betonu narażonego na oddziaływanie czynników atmosferycznych, spełniający dodatkowo kryterium dobrego zagęszczania mieszanki betonowej w procesie wirowania, co należy sprawdzić doświadczalnie.

Summary

A hybrid concept has been proposed, combining a prestressed spun concrete structure, forming the pole shaft, with a three-dimensional steel lattice structure serving as its head. This solution has enabled the elimination of commonly encountered problems such as damage to and theft of steel angle sections (which weakens pole stability) and corrosion of the lower elements of steel lattice poles, as well as minimizing the land area required for pole foundations and reducing the mass of the pole's steel components. The concrete shaft prevents unauthorized persons from freely climbing the hybrid pole, which, in the case of steel lattice poles, may pose a serious safety hazard due to the risk of electric shock and falls from height. The materials used, the production technology, the thickness of the concrete cover over the reinforcement in the pole shaft, hot-dip galvanizing, and the bolted connections of the elements forming the pole's three-dimensional lattice head are intended to provide a design working life of 50 years for the hybrid structure, subject to the specified design, manufacturing, installation, and maintenance conditions.

Received: 13.04.2026
Revised: 28.05.2026
Published: 23.09.2026

Podsumowanie

Zaproponowano hybrydową koncepcję połączenia konstrukcji strunobetonowej z betonu wirowanego stanowiącej trzon słupa oraz przestrzennej kratowej konstrukcji stalowej jako jego głowicy. Takie rozwiązanie umożliwiło eliminację często spotykanych uszkodzeń i kradzieży kątowników (co osłabia stabilność słupa) oraz korozji dolnych elementów słupa kratowego, minimalizację zajęcia terenu do posadowienia słupów, a także ograniczenie masy elementów stalowych słupa. Trzon betonowy uniemożliwia swobodne wchodzenie na słupy hybrydowe przez osoby nieuprawnione, co w przypadku słupów kratowych nadal stanowi śmiertelnie niebezpieczny problem (porażenia prądem, upadki z wysokości). Zastosowane materiały, technologia produkcji, grubości otuliny zbrojenia betonowego trzonu słupa, cynkowanie ogniowe oraz połączenia śrubowe elementów przestrzennej kratowej głowicy słupa gwarantują 50-letnią trwałość konstrukcji hybrydowej.

Artykuł wpłynął do redakcji: 13.04.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 28.05.2026 r.
Opublikowano: 23.09.2026 r.

Literature

- [1] Kutuzova NB. Experience in the Design and Operation of 1150 kV Overhead Line Ekibastuz-Ural from the Point of View of Influence on the Environment (In Russian). 2007. Available: <https://web.archive.org/web/20110812223757/http://www.energo-info.ru/images/pdf/Kutuzova.pdf>.
- [2] Acosta JS, Tavares MC. Multi-objective optimization of overhead transmission lines including the phase sequence optimization. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105495>.
- [3] Gu S, Wan S, Liu Z, Li J, Wu M, Cao W. Development and Application of the ± 1100 kV UHV DC Transmission Line Arrester. 2023 12th Asia-Pacific International Conference on Lightning, Langkawi, Malaysia, pp. 1 – 5. DOI: 10.1109/APL57308.2023.10182012.
- [4] Michalek J, Michalek A. Steel crosspieces for medium voltage lines on spun concrete poles. Transportation Research Procedia. 2026; <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.12.016>.
- [5] Michalek J. Concrete prestressed poles in the high voltage lines. Journal of Physics. Conference Series. 2020. DOI:10.1088/1742-6596/1614/1/012011.
- [6] Empelmann M, Remitz J. Schleuderbetonmaste aus ultrahochfestem Beton – Versuche an grobformatigen Prototypen. Bauingenieur. 2018. DOI: 10.37544/0005-6650-2018-10-82.
- [7] Rybak J. Some Remarks on Foundation Pile Testing Procedures. IOP Conf. Ser. Mat. Sci. Eng. 2017; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/2/022092>.
- [8] Krumm B. Aussergewöhnliche Lösungen im Leitungsbau: ein rekordverdächtiger Betonfreileitungsmast. Schweizer Ingenieur und Architekt. 1992; <http://dx.doi.org/10.5169/seals-77933>.
- [9] PN-EN 50341-2-22:2022-06. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2-22: Krajowe Warunki Normatywne (NNA) dla Polski (oparte na EN 50341-1:2012).
- [10] Łodo A, Michalek J, Wójcik S. Fundamenty strunobetonowych wież i słupów wysokich napięć. Materiały Budowlane. 2014; 6: 46 – 47.
- [11] Krajowa Ocena Techniczna ITB-KOT-2018/0382 (wydanie 2): Stalowe sploty sprężające D&D Drótáru Ipari és Kereskedelmi Zrt. z drutów gładkich (data ważności: 15.02.2028 r.).
- [12] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [13] ETA-20/0259 PFEIFER Rebar Coupler System PH, Deutsches Institut für Bautechnik 2020, (www.j-p.pl).
- [14] PN-EN 14399-1:2015-04. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 1: Wymagania ogólne.