

dr inż. **Krzysztof Dutka**¹

dr hab. inż. **Józef Pelc**, prof. UWM¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 26.06.2014;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 10.05.2015;

Opublikowany/Published/Опубликована: 30.06.2015;

Metoda oceny bezpieczeństwa i prognozy żywotności kratownicowych konstrukcji wsporczych linii elektroenergetycznej²

Safety Evaluation Method and Lifespan Prediction for Overhead Power Line Truss Pylons

Метод оценки безопасности и прогнозирование долговечности конструкционной ферменной опоры линий электропередачи

ABSTRAKT

Cel: Opracowanie metody oceny aktualnego bezpieczeństwa eksploatowanych przez kilkadziesiąt lat kratownicowych słupów linii elektroenergetycznych i szacowanie dalszego czasokresu bezpiecznej pracy tych konstrukcji.

Metoda: Analizowano stopień korozyjnego zużycia elementów konstrukcyjnych słupów na podstawie próbek pobranych do badań laboratoryjnych z prętów wytypowanych konstrukcji. Metodą trawienia usuwano produkty korozji i wyznaczano rzeczywiste wymiary przekrojów prętów. Wykonano badania metalograficzne, składu chemicznego i wytrzymałościowe materiału próbek. Badaniom metalograficznym i ocenie wytrzymałości poddano także materiał śrub. Słupy z prętami osłabionymi korozją poddano analizie wytrzymałościowej za pomocą specjalistycznego, autorskiego programu komputerowego bazującego na metodzie elementów skończonych. We wszystkich normowo wymaganych wariantach obciążeń analizowano warunki nośności prętów słupów poddanych działaniu obciążeń własnych, wiatru, szadzi i naciągu przewodów (w przypadku słupów odporowych).

Wyniki: Wżery korozyjne na powierzchniach półek kątowników słupów sięgają na głębokość średnio 0,29 mm. Nie stwierdzono procesów korozyjnych wewnątrz lub na granicach ziaren stali. Analiza składu chemicznego wskazuje, że jako materiał konstrukcyjny słupów zastosowano stal spawalną o podwyższonej odporności korozyjnej i podwyższonej wytrzymałości w gatunku 10H. Badania wytrzymałościowe wykazały, że materiał spełnia wymagania określone dla stali 10H. Badania śrub nie wykazały obecności wad wewnętrznych typu mikropęknięcie lub korozji wewnętrznej, a ich klasa wytrzymałości jest w zakresie 5.6–5.8. W niektórych wariantach obciążeń pręty osłabione korozją nie spełniają warunków bezpieczeństwa wytrzymałościowego. Wynik prognozy wskazuje na możliwość bezpiecznej pracy słupów w okresie kolejnych 20 lat pod warunkiem wzmocnienia nielicznych prętów zidentyfikowanych jako niebezpieczne.

Wnioski: Przedstawiona metoda określania korozyjnego zużycia elementów słupów i analizy wytrzymałościowej osłabionych konstrukcji za pomocą specjalistycznego programu autorskiego umożliwi ocenę bezpieczeństwa wytrzymałościowego eksploatowanych linii elektroenergetycznych. Możliwe jest również prognozowanie dalszego czasu bezpiecznej pracy konstrukcji wsporczych. Okresowej ocenie żywotności powinny być poddawane zwłaszcza słupy odporowo-naróżne, bowiem ich awarie na ogół skutkują zniszczeniem całej sekcji linii.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo wytrzymałościowe, linia elektroenergetyczna, słup, korozja, żywotność, metoda elementów skończonych
Typ artykułu: studium przypadku – analiza zdarzeń rzeczywistych

ABSTRACT

Aim: Development of a method to evaluate the current safety of overhead power line truss pylons, which have been in use for decades, and prediction of remaining lifespan for the continuous safe use of such structures.

Method: The degree of corrosive wear of pylon structural elements was analyzed from samples taken for laboratory testing from cross members of selected structures. Corroded structure rods were removed by etching and cross member section profiles were measured. Metallographic tests, identification of the chemical composition and durability measurements were performed on material samples.

¹ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie / University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland; dutkak@uwm.edu.pl; Wkład merytoryczny w powstanie artykułu / Percentage contribution: K. Dutka – 40%, J. Pelc – 60%;

² Artykuł został wyróżniony przez Komitet Redakcyjny / The article was recognised by the Editorial Committee

Securing bolts were also exposed to such tests. Pylons, with cross members weakened by corrosion, were subjected to an endurance evaluation with the aid of the author's specialist computer programme, which is based on the finite element method. In all load bearing standard conditions, an analysis was performed on the load bearing capacity of pylon cross member rods exposed to consequences of their own weight, wind, icing and impact of overhead cable tension (where supported pylons are used).

Results: On average, corrosion pitting of angled flange surfaces achieved a depth of 0.29 mm. There was no corrosive processes found inside or at the granular boundary of steel. Analysis of the chemical composition indicates that pylons were constructed from steel, which can be exposed to welding, with increased corrosion resistance and strength grade of 10H. Durability tests revealed that the material meets the requirements specified for steel 10H. Examination of securing bolts did not reveal internal defects such as micro-cracks or corrosion and their durability is categorised within the range of 5.6–5.8. In some variations of load bearing capacity it was revealed that corroded rod cross members failed to fulfil safe endurance requirements. Resulting forecasts indicate a safe usage of pylons for the next 20 years, subject to the strengthening of some rod cross members, which were identified as unsafe.

Conclusions: The described method for determining the corrosive wear of tower elements and stress analysis of weakened structures, using the author's specialized computer programme, enables the assessment of durability for the safe exploitation of overhead power lines. It is also possible to forecast remaining lifespan for the safe use of supporting structures. A periodic lifespan assessment should be performed, specifically for supporting corner pylons, because their failure will culminate in the failure of an entire section of the power line.

Keywords: durability, power line, pylon, corrosion, lifespan, finite element method

Type of article: case study – analysis of actual events

АННОТАЦИЯ

Цель: Разработка метода оценки актуальной безопасности эксплуатируемых на протяжении нескольких десятков лет ферменных столбов линий электропередачи и оценка дальнейшего периода безопасной эксплуатации этих сооружений.

Метод: Проанализирована степень коррозионного износа конструктивных элементов столбов на основе взятых для лабораторных исследований образцов со стрежней выбранных конструкций. При использовании метода травления были удалены продукты коррозии и определены реальные размеры сечений стрежней. Были проведены металлографические исследования, исследования химического состава и прочности материала образцов. Металлографическим исследованиям и оценке прочности был также подвержен материал винтов. Столбы со стрежнями, ослабленными коррозией, были подвержены анализу прочности при помощи специализированной, авторской программы, базирующейся на методе конечных элементов. Во всех вариантах нагрузок, соответствующих стандартам, были проанализированы условия грузоподъемности стрежней столбов, подверженных воздействию собственной нагрузки, а также ветра, изморози и напряжению проводов (в случае анкерных столбов).

Результаты: Точечная коррозия на поверхности полук уголков достигает средней глубины 0,29 мм. Коррозионные процессы внутри или на границах зерен стали не обнаружены. Анализ химического состава показывает, что в качестве строительного материала для столбов использовали сварочную сталь с высокой коррозионной стойкостью и высокой прочностью для типа 10H. Исследования прочности показали, что материал соответствует требованиям, предъявляемым к стали 10H. Исследования винтов не выявили никаких внутренних дефектов таких как микротрещины или внутренней коррозии, а их класс прочности находится в пределах 5,6–5,8. В некоторых вариантах нагрузок стрежни, ослабленные коррозией, не соответствуют условиям безопасности относительно прочности. Результаты прогноза указывают на возможность безопасной работы столбов в течение ближайших 20 лет, при условии, что несколько столбов, определенных как опасные, будут укреплены.

Выводы: Представленный метод определения коррозионного износа столбов и анализа прочности ослабленных конструкций с использованием специализированного авторского программного обеспечения позволяет оценивать безопасность линий электропередач относительно их прочности. Стало возможным также прогнозировать дальнейшее безопасное время использования несущих конструкций. Особое внимание в периодической оценке долговечности стоит уделить опорно-уголовым столбам, потому что их аварии, как правило, приводят к разрушению целой секции линии.

Ключевые слова: прочностная безопасность, линия электропередачи, столб, коррозия, долговечность, метод конечных элементов

Вид статьи: тематическое исследование – анализ реальных событий

1. Wprowadzenie

Na obecnym etapie rozwoju cywilizacyjnego prawidłowe funkcjonowanie społeczeństw wymaga dostarczania energii elektrycznej do odbiorców w sposób ciągły. Przerwy w zasilaniu, zwłaszcza dłuższe trwające, wywołują niebezpieczne sytuacje o znamionach sytuacji kryzysowych. Ważną rolę w bezpiecznym przesyłaniu energii elektrycznej spełniają konstrukcje wsporcze napowietrznych linii elektroenergetycznych. Ich znaczenie jest tym bardziej istotne, że również większość kablowych sieci światłowodowych została poprowadzona wzdłuż linii elektrycznych wysokiego napięcia, więc awaria takiej konstrukcji może spowodować zerwanie kabla i utratę łączności cyfrowej przez wielu użytkowników (szpitale, urzędy administracji,

banki). Konstrukcje wsporcze, zwane potocznie słupami, mają za zadanie utrzymywać przewody w odpowiednim położeniu bez względu na warunki atmosferyczne (silny wiatr, oblodzenie). Na ogół są to konstrukcje kratownicowe wykonane z kątowników i posadowione na stopach fundamentowych. Na etapie projektowania zakłada się bezpieczną pracę takich konstrukcji w okresie dziesiątków lat. Trudno jednak dokładnie przewidzieć warunki, w jakich będą pracowały, ze względu na globalne zmiany klimatu, zanieczyszczenie powietrza oraz lokalny mikroklimat, np. częste występowanie mgieł w rejonie linii. Trudne warunki atmosferyczne, jak również wady materiałowe często stanowią przyczynę przyspieszonej korozji elementów konstrukcyjnych słupów. Istnieje więc uzasadniona potrzeba diagnostyki słupów dokonywanej po pewnym

czasie eksploatacji linii w celu oceny ich bezpieczeństwa wytrzymałościowego i oszacowania czasu dalszej, bezpiecznej pracy. Artykuł ten dotyczy metody analizy słupów linii elektroenergetycznej wykonywanej w celu oceny ich aktualnej wytrzymałości i prognozowania ich żywotności. Opracowano odpowiednią metodę analizy, którą zastosowano do oceny słupów linii jednotorowej 110 kV o długości ok. 30 km, usytuowanej w północno-wschodniej Polsce, eksploatowanej przez okres 20 lat.

Podczas eksploatacji słupów linii wysokiego napięcia, w wyniku korozyjnego zużywania się, zmniejszają się współczynniki bezpieczeństwa wytrzymałościowego poszczególnych elementów konstrukcyjnych. O szybkości procesu korozji atmosferycznej decydują: wilgotność względna, zanieczyszczenie atmosfery i dobowe wahania temperatury powodujące skraplanie pary wodnej na powierzchniach metalu. Wśród zanieczyszczeń atmosfery bierze się pod uwagę zawartość substancji gazowych, głównie SO_2 , NO_x , H_2S , CO_2 i chlorków [1]. Zależnie od warunków korozji struktura produktów korozji jest różna – łuski, ziarna, lub rzadziej szczelna, przywarta warstwa. Według [2] objętość produktów korozji jest o ok. 60% większa od objętości metalu, z którego powstały. Stale trudnordzewiejące są stalami niskostopowymi o zawartości węgla mniejszej niż 0,2% wag., do których wprowadzono Cu, Cr, Ni, P, Si i Mn jako składniki stopowe w ilości nieprzekraczającej łącznie 3–5% wag. Zwiększona odporność na korozję w stosunku do zwykłej stali węglowej jest spowodowana tworzeniem w atmosferach o niskiej i średniej agresywności szczelnych i dobrze przylegających warstw produktów korozji zwanych patyną [3]. Skutecznie hamuje ona przebieg dalszego procesu rdzewienia stali. Budowa warstwy patyny na stali cortenowskiej zależy nie tylko od składu chemicznego stali, lecz również od warunków atmosferycznych. Ekspozycja na słońce i deszcz tworzy mocno przylegające warstwy, podczas gdy powierzchnie osłonięte mają tendencje do tworzenia luźnych słabo przylegających tlenków. Powierzchnie od strony północnej ulegają patynowaniu znacznie wolniej, a w środowisku o bardzo wysokim poziomie zanieczyszczeń powietrza (atmosfera morska) czy w warunkach ciągłej wilgotności, patyna może się w ogóle nie uformować [4]. Czas stabilizacji szczelnej warstwy patyny zależy od korozyjności atmosfery i szacowany jest na 6–8 lat w atmosferach o kategorii korozyjności [5] (C2–C3) i 4–6 lat w atmosferach o korozyjności (C3–C5) [6]. Zgodnie z literaturą [7] ubytek korozyjny stali trudnordzewiejącej typu corten wyniósł 0,05 mm w ciągu 20 lat pracy, podczas gdy ubytek stali węglowej, w tych samych warunkach, był 5-krotnie wyższy. Również inne procesy, zachodzące w stalach podczas długotrwałej eksploatacji (zmęczenie, starzenie), mogą być przyczyną degradacji budowy strukturalnej i obniżenia właściwości mechanicznych materiału [8]. Dzięki swoim właściwościom stal trudnordzewiejąca znalazła zastosowanie w wielu konstrukcjach cywilnych takich jak mosty, kładki i inne konstrukcje drogowe, instalacje dachowe, maszty, wieże, elementy architektoniczne oraz słupy linii elektroenergetycznych [6].

W ocenie bezpieczeństwa analizowanych konstrukcji wsporczych za punkt odniesienia przyjęto przepisy

normowe obowiązujące w czasie budowy linii. Takie podejście umożliwiło ocenę samego wpływu korozji na wskaźniki bezpieczeństwa konstrukcji, niezaburzoną wpływem zmian przepisów normowych.

2. Metody

W celu oceny bezpieczeństwa i prognozy żywotności eksploatowanych konstrukcji kratownicowych przyjęto metodę postępowania polegającą na:

- określeniu wielkości zużycia korozyjnego elementów nośnych konstrukcji,
- szacowaniu stopnia degradacji mikrostruktury i właściwości mechanicznych materiału,
- przeprowadzeniu obliczeń wytrzymałościowych, uwzględniających rzeczywisty i prognozowany stan elementów konstrukcji.

Realizując zadanie z konstrukcji, pobrano materiał badawczy i określono jego skład chemiczny i mikrostrukturę oraz wyznaczono parametry wytrzymałościowe. Po określeniu wielkości ubytków korozyjnych, uwzględniając osłabione przekroje prętów kratownic, wykonano obliczenia wytrzymałościowe najbardziej obciążonych słupów.

Opierając się na publikowanych wynikach badań szybkości korozji w czasie użytkowania obiektów, przedstawiono warunki bezpiecznej eksploatacji słupów badanej linii w kolejnych 20 latach.

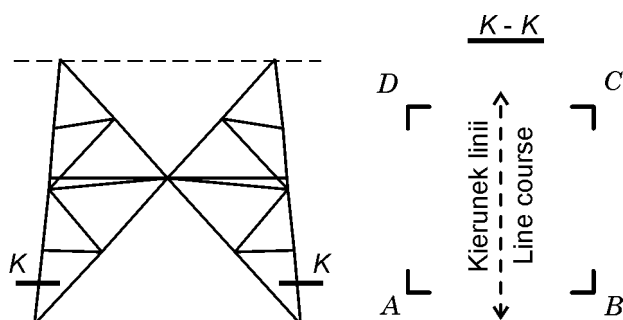
2.1. Pomiar poprzecznych wymiarów elementów konstrukcyjnych słupów

W trakcie szczegółowej inspekcji słupów analizowanej linii wytypowano te, które pracują w ekstremalnie trudnych warunkach środowiskowych (mokra dła, obniżenie terenu). W sumie z całej linii wybrano 11 słupów. Stwierdzono, że najbardziej skorodowane elementy znajdują się w dolnych częściach słupów (ryc. 1). W związku z tym za pomocą suwmiarki wykonano pomiary rzeczywistej grubości i szerokości ramion na elementach dostępnych z ziemi. Pomiaram poddano kolejne krawężniki (A, B, C, D) i najniżej usytuowane ukośniki ścian prostopadłych (P) i równoległych (R) do linii (ryc. 2).



Ryc. 1. Widok skorodowanych kątowników słupa
Fig. 1. A view of corroded pylon metal angle brackets

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Ryc. 2. Strefa pomiarów kątowników K-K oraz schemat oznaczenia krawężników słupa A, B, C, D

Fig. 2. Measurement area for pylon angle brackets K-K and outline revealing pylon feet A, B, C and D

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

2.2. Badania laboratoryjne pobranego materiału

Ze ścian równoległych i prostopadłych do linii energetycznej wytypowanych słupów pobrano w sposób losowy łącznie 5 kątowników przeznaczonych do szczegółowych badań laboratoryjnych. Próbki odcięte z kątowników opisano kolejnymi numerami od 1–5. Z każdego odcinka kątownika wycięto próbki do badań metalograficznych, oceny składu chemicznego oraz właściwości wytrzymałościowych.

2.3. Określenie stopnia zużycia elementów pobranych do badań

W celu określenia charakteru zużycia próbki pobrane z kątowników poddano działaniu roztworu wodnego kwasu siarkowego i urotropiny [9]. Przy użyciu głębokościomierza czujnikowego dokonywano pomiarów głębokości wżerów korozyjnych. W celu oceny rzeczywistej głębokości wżerów powierzchnię próbek poddano obróbce mechanicznej, a następnie mierzono grubości korygowane g_k . Na każdym z dwóch ramion próbki grubość mierzono 10-krotnie, a za wartość grubości elementu przyjęto średnią z uzyskanych rezultatów.

Ocenę różnic między wartościami średnimi grubości i ubytków korozyjnych dokonano testem T Studenta.

2.4. Badania metalograficzne i składu chemicznego

Mikrostrukturę oceniano na zglądach nietrawionych i trawionych Nitaliem (2-proc. roztworem HNO_3), za pomocą optycznego mikroskopu metalograficznego EPITYP. Szczególnie starannie analizowano strefę przypowierzchniową zglądów na ewentualność wystąpienia procesów korozyjnych wewnątrz lub na granicach ziaren stali.

Skład chemiczny stali określono za pomocą spektrometru ARL 3460 i metodami chemii klasycznej.

2.5. Badania wytrzymałości na rozciąganie

Właściwości wytrzymałościowe wyznaczano przez zastosowanie próbek płaskich o powierzchniach naturalnych oraz obrobionych mechanicznie. Próbki zorientowane były równoległe do kierunku obróbki plastycznej kształtującej wyrób hutniczy. Badanie próbek użytkowanych z obecnymi produktami korozji miało na celu określenie wielkości obniżenia wytrzymałości elementów konstrukcji

spowodowanej 20-letnią eksploatacją. Próbki przygotowano zgodnie z zaleceniami normy [10]. Zrywanie przeprowadzono na maszynie ZDTe-J30 zgodnie z [11].

2.6. Badanie stanu śrub montażowych

W celu oceny stanu śrub poddano je zabiegowi trawienia. Zglądy metalograficzne wykonano na przekrojach wzdłużnych dwóch śrub (w tym jednej z odłamanym łbem).

Wytrzymałość materiału śrub określono metodą pośrednią, tj. przez pomiar twardości na przekrojach wzdłużnych i na łbach śrub. Pomiary przeprowadzono metodą Vickersa zgodnie z zaleceniami PN-EN ISO 6507-1 [12].

2.7. Obliczenia wytrzymałościowe słupów z uwzględnieniem zużycia korozyjnego

Na podstawie analizy trasy jednotorowej linii 110 kV wybrano do obliczeń konstrukcje wsporcze najbardziej wyczerpane, a więc obciążone przęsłami o największej rozpiętości. W związku z tym obliczeniom statycznym i wytrzymałościowym poddano trzy słupy serii B2, tj. po jednym ze wszystkich typów występujących w analizowanej linii. Były to słupy:

- przelotowy P+5,
- przelotowy PL+10 (odmiana leśna),
- odporowo-naróżny M3+10.

Etapy typowej analizy słupa kratownicowego to:

- przygotowanie modelu obliczeniowego,
- wyznaczenie obciążeń w poszczególnych wariantach obciążenia,
- zadanie obciążeń i wyznaczenie sił w prętach kratownicy,
- analiza warunków nośności poszczególnych prętów.

U podstaw analizy wytrzymałościowej słupa leży opracowanie modelu obliczeniowego realnej konstrukcji. Analizowane słupy traktowano jako przestrzenne kratownice, w których pręty połączone są przegubowo. W modelu rozważono osie geometryczne prętów przedstawiane w formie odcinków, którym przypisano parametry geometryczne: pole przekroju poprzecznego, minimalny moment bezwładności i współczynnik długości wybojeniowej. Wartości pól i momentów bezwładności przekrojów poprzecznych prętów wyznaczono z uwzględnieniem ubytków korozyjnych, których wielkość określono na podstawie wcześniej przedstawionej analizy materiałowej.

Obciążenie słupa stanowią: ciężar własny, parcie wiatru i ciężar szadzi oraz naciągi przewodów w przypadku słupa odporowego. Zgodnie z przepisami obowiązującymi dla tych konstrukcji, w zależności od typu słupa, badano jego nośność w kilku wariantach obciążenia.

W celu oceny bezpieczeństwa pracy konstrukcji wsporczych analizie wytrzymałościowej poddano wszystkie trzy typy słupów, jednak niżej przedstawiono tylko przebieg analizy w odniesieniu do słupa odporowo-naróżnego typu M3+10 serii B2. Nośność słupa odporowo-naróżnego sprawdzano w czterech wariantach obciążenia, w których wyspecyfikowano następujące składniki (ryc. 3):

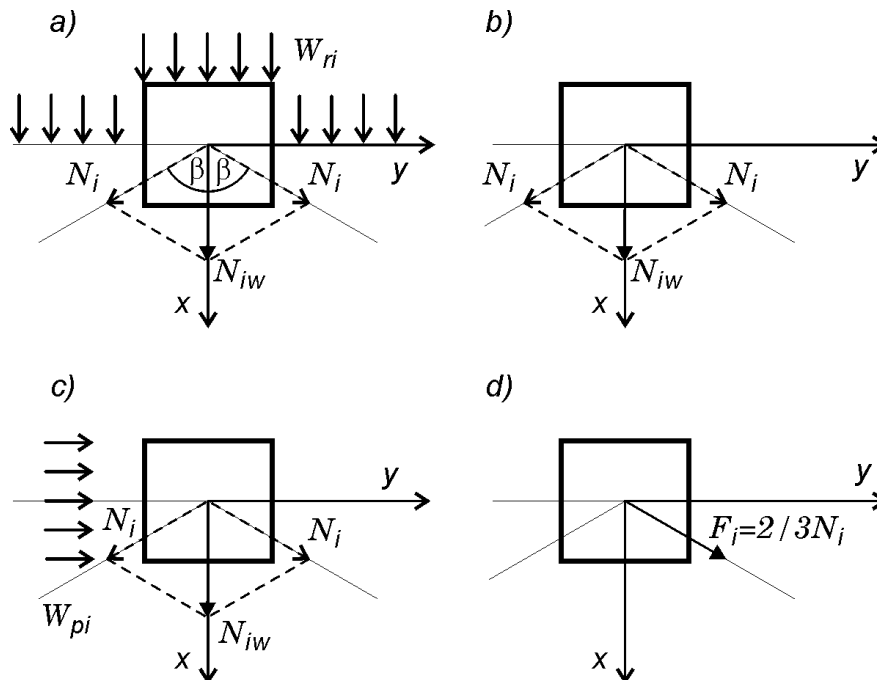
- Ciężar własny słupa, ciężary przewodów (V_i), parcie wiatru na przewody (H_{ix}), siły naporu wiatru na konstrukcję (W_{ri}) i poziome siły naciągów obliczeniowych (N_{iw}) o kierunkach dwusiecznej kąta załomu linii.

II. Ciężar własny konstrukcji, ciężar szadzi (V_{is}) i siły naciągów obliczeniowych (N_{iw}) o kierunkach dwusiecznej kąta załomu linii.

III. Ciężar własny słupa, ciężary przewodów (V_p), siły naporu wiatru na konstrukcję kratową (W_{pi}) wiejącego prostopadle do dwusiecznej kąta załomu linii, siły

naciągów obliczeniowych (N_{iw}) działających w kierunku dwusiecznej kąta załomu linii.

IV. Ciężar własny, ciężary przewodów (V_p) i siły F_i naciągu umownego równe 2/3 sił całkowitych naciągów przewodów (N_i).



Ryc. 3. Warianty obciążeń słupa odporowo-naróżnego: a) – I, b) – II, c) – III, d) – IV

Fig. 3. Pylon load bearing variations for supporting corner pylons: a) – I, b) – II, c) – III, d) – IV

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Obciążenia słupów kratownicowych określono dla I nizinnej strefy klimatycznej, w której w całości znajduje się analizowana linia. Uwzględniono szadź normalną. Wartości wyznaczonych sił wprowadzono do modelu obliczeniowego słupa zgodnie z wyspecyfikowanymi wariantami.

Wartości sił w prętach słupa obliczono za pomocą autorskiego programu komputerowego wyposażonego w procedurę inteligentnego wykrywania i automatycznego blokowania węzłów płaskich [13]. Program ten, oparty na metodzie elementów skończonych [14], ma również zgodne z obowiązującymi przepisami normowymi procedury automatycznego sprawdzania warunków nośności poszczególnych prętów. Miarę bezpieczeństwa konkretnego pręta stanowi wartość współczynnika bezpieczeństwa wytrzymałościowego definiowanego jako:

- dla prętów ściskanych: iloraz wytrzymałości obliczeniowej R materiału pręta do naprężenia obliczeniowego pomnożonego przez odpowiedni współczynnik wybozczeniowy pręta [15],
- dla prętów rozciąganych: iloraz wytrzymałości obliczeniowej R materiału pręta do normalnego naprężenia obliczeniowego.

2.8. Prognoza trwałości linii energetycznej

Według badań przeprowadzonych przez *American Society for Testing Materials* [16], [17], szybkość korozji podczas eksploatacji obiektów w czasie pierwszego roku

jest stosunkowo wysoka. W następnych latach zmniejsza się dzięki oddziaływaniu ochronnemu warstw produktów korozji, a ubytki materiału stają się coraz mniejsze. Ta zależność jest szczególnie widoczna w stalach cortenowskich.

Biorąc pod uwagę granicę plastyczności stali bez uszkodzeń wywołanych korozją oraz wyniki badań kątowników, w których występowały efekty korozji spowodowanej warunkami eksploatacji, wyprowadzono równanie przedstawiające zmianę tego parametru w zależności od czasu eksploatacji linii energetycznej. Zależność aproksymowano transformowaną funkcją paraboliczną, której ogólne równanie przedstawia się następująco:

$$R_{\tau}^{\zeta} = \frac{R_e^0 g}{g - a \sqrt{\tau}} \quad (1)$$

gdzie:

g – grubość próbki (mm),

a – współczynnik zależny od warunków eksploatacyjnych linii,

τ – czas eksploatacji (lata),

R_e^0 – granica plastyczności materiału elementu w czasie wykonania słupa ($\tau = 0$).

Zastosowany model zużycia korozyjnego i zmiany nośności konstrukcji jest typowym modelem heurystycznym (opartym na doświadczeniu). Jest to najbardziej intuicyjne podejście do przewidywania korozji pozwalające na

prognozowanie zachowania systemu w przyszłości przyjmując, że nie ulegną zmianie warunki eksploatacji [6], [18].

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Pomiar poprzecznych wymiarów elementów konstrukcyjnych słupów

Charakterystykę kontrolowanych części konstrukcji oraz rezultaty badań zestawiono w tabeli 1.

Rezultaty badań porównano z danymi zawartymi w dokumentacji technicznej. Stwierdzono:

- występowanie niezgodności grubości kształtowników z dokumentacją (krawężniki o cieńszych ściankach niż wymiary nominalne, a kątowniki ścian grubsze),
- szerokość ramion krawężników dwóch słupów z odchyłką ujemną większą od dopuszczanej przez normę PN-69/H-93401: Stal walcowana – Kątowniki równoramienne [19].

Tabela 1. Wymiary rzeczywiste sprawdzanych kątowników słupów
Table 1. Measurement results for tested pylon angle brackets

Nr słupa/ Pylon No	Typ słupa/ Pylon type	Miejsce pomiaru/ Location of measurement	Wymiar ramion/ Flanges dimension (mm)	Grubość rzeczywista g_{rz} / Actual thickness g_{rz}			g_{nom} (mm)	Wymiar wg dokumentacji/ Dimension in documentation (mm)
				Nr pomiaru/Measurement No				
				1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)		
25	M3+10	A	88 x 86	6,3	6,0	6,0	6,0	90 x 8
		B		6,5	6,2	6,0	6,0	90 x 8
		C		6,5	6,5	6,4	6,0	90 x 8
		D		6,0	6,3	6,2	6,0	90 x 8
		U	51 x 51	5,5	5,3	5,0	5,0	50 x 4
26	M3+10	A	90 x 90	6,3	6,2	6,3	6,0	90 x 8
		B		6,1	6,0	6,5	6,0	90 x 8
		C		6,2	6,0	5,9	6,0	90 x 8
		D		9,0	9,1	8,9	8,0	90 x 8
		U	50 x 50	5,0	5,0	5,1	5,0	50 x 4
32	M3+10	A	88 x 88	6,0	6,0	5,8	6,0	90 x 8
		B		6,0	6,2	6,3	6,0	90 x 8
		C	88 x 90	5,8	6,2	6,5	6,0	90 x 8
		D	89 x 89	6,0	6,0	6,2	6,0	90 x 8
		U	51 x 51	5,2	5,2	5,0	5,0	50 x 4
54	M3+2,5		90 x 90	8,2	8,4	8,3	8,0	90 x 8
55	P+5	U	75 x 75	6,2	6,6	6,9	6,0	75 x 5
			45 x 45	5,5	5,3	5,3	5,0	45 x 4
56	P+5	A	75 x 75	6,4	6,3	6,5	6,0	75 x 5
		B		8,2	8,2	8,0	8,0	75 x 5
		C		6,4	6,5	6,4	6,0	75 x 5
		D		6,4	6,5	6,5	6,0	75 x 5
		U	46 x 46	5,0	5,4	5,3	5,0	45 x 4
		U	50 x 50	5,4	5,3	5,3	5,0	50 x 5
57	P+2,5	A	75 x 75	6,7	6,8	6,5	6,0	75 x 5
		B		8,2	7,9	8,0	8,0	75 x 5
		C		6,4	6,0	6,4	6,0	75 x 5
		D		6,4	6,6	6,2	6,0	75 x 5
		U	35 x 35	4,5	4,2	4,8	4,0	35 x 4
		U	45 x 45	4,4	4,3	4,2	4,0	45 x 4
		U	50 x 50	5,3	5,3	5,4	5,0	50 x 4
73	P+5	U	75 x 75	6,1	6,4	6,0	6,0	75 x 5
			45 x 45	5,5	5,3	5,4	5,0	45 x 4

Nr słupa/ Pylon No	Typ słupa/ Pylon type	Miejsce pomiaru/ Location of measurement	Wymiar ramion/ Flanges dimension (mm)	Grubość rzeczywista g_{rz} / Actual thickness g_{rz}			g_{nom} (mm)	Wymiar wg dokumentacji/ Dimension in documentation (mm)
				Nr pomiaru/Measurement No				
				1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)		
75	M3+2,5	U	88 x 89	8,2	8,0	8,4	8,0	90 x 8
			50 x 50	5,8	5,8	5,6	5,0	50 x 4
76	M3+2,5	A	90 x 90	6,6	6,6	5,6	6,0	90 x 8
		B		6,4	6,2	6,3	6,0	90 x 8
		C		6,6	6,1	6,5	6,0	90 x 8
		D		8,2	8,3	8,5	8,0	90 x 8
		U	50 x 50	5,5	5,3	5,4	5,0	50 x 4
77	P+2,5		89 x 89	7,0	7,1	7,4	6,0	75 x 75

U – Ukośnik/Diagonal bracing

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Zmierzona grubość rzeczywista g_{rz} elementów konstrukcyjnych w większości przypadków jest większa od nominalnej. Jest to spowodowane obecnością szczelnej warstwy produktów korozji. Lokalne zmniejszenie grubości obserwowano jedynie na poziomie górnej krawędzi stopy zawiasowej nałożonej na krawężnik. Bardzo często w rejonie tym występuje szczelina między powierzchnią zewnętrzną krawężnika i powierzchnią wewnętrzną spawanego kątownika zawiasu. Tworzenie szczeliny jest wynikiem niedokładności wykonania stóp fundamentowych oraz błędów montażowych powodujących deformację ramion i skręcenie krawężnika.

Z danych literaturowych wynika, że zarówno procesy wytwarzania, jak i zużycie powodują wahania w grubościach ścianek elementów, które można aproksymować rozkładem normalnym [20]. Traktując więc poszczególne zbiory grubości jako materiał statystyczny, obliczono wartości średnie i odchylenia standardowe charakteryzujące rzeczywiste grubości poszczególnych kątowników (tabela 2). Ocenę prowadzono grupując rezultaty pomiarów grubości w zbiory, których wyróżnikiem jest grubość nominalna g_{nom} .

Tabela 2. Średnia rzeczywista grubość kątowników g_{rz} słupów w przedziałach wymiarowych grubości nominalnej g_{nom} (dla danych z tab. 1)

Table 2. Average thickness g_{rz} for pylon angle brackets at intervals of nominal thickness g_{nom} (for data in table 1)

g_{nom} (mm)	Liczność/Lot size n	g_{rz} (mm)	Odchylenie standardowe/Standard deviation, S (mm)
10	3	10,23	0,21
8	27	8,43	0,33
6	69	6,30	0,32
5	33	5,32	0,22
4	12	4,36	0,19

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

3.2. Badania laboratoryjne pobranego materiału

Obserwacje powierzchni pobranych próbek potwierdziły słusność ustalonego podczas wizji lokalnej poglądu o charakterze korozji. Na powierzchni stali występowały dwie warstwy: zewnętrzna – luźna i wewnętrzna – silnie przylegająca do podłoża.

3.3. Określenie stopnia zużycia elementów pobranych do badań

Wyniki pomiarów grubości ramion kątowników wskazują na to, że efektywność oddziaływania środowiska wykazywała nieznaczne różnice (tabela 3 oraz ryc. 4).

Powierzchnię próbek oczyszczoną z produktów korozji przedstawiono na ryc. 5. W procesie trawienia z powierzchni usunięto średnio ok. 0,26 mm produktów korozji (tabela 4). Pomiary głębokości wżerów wykazały, że sięgają one na głębokość średnio 0,29 mm.

Oceniając różnice między wartościami średnimi grubości i ubytków korozyjnych, stwierdzono, że ze statystycznego punktu widzenia można je uznać za nieistotne, przy założonym poziomie ufności $\alpha = 0,05$.

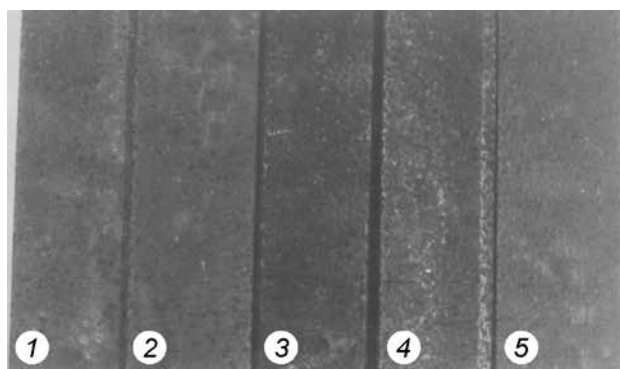
Tabela 3. Wymiary kątowników pobranych do badań laboratoryjnych
Table 3. Dimensions of angle brackets selected for laboratory testing

Nr kątownika/ Angle bracket No	Rodzaj/ Type	Grubość g_{rz} przed trawieniem (mm) Thickness g_{rz} before etching (mm)					Średnia Average $g_{rz\ sr}$	S	Grubość po szlifowaniu/ Thickness after grinding			S
		Nr pomiaru/Measurement No							Ramię/Flange		$g_{k\ sr}$	
		1	2	3	4	5			1	2		
1	50 x 5	5,8	5,6	5,4	5,4	5,5	5,54	0,15	4,26	4,28	4,27	
2	50 x 5	5,6	5,3	5,4	5,2	5,2	5,34	0,15	4,36	4,38	4,34	
3	45 x 5	5,3	5,4	5,3	5,1	5,2	5,26	0,10	4,38	4,29	4,33	
4	45 x 5	5,5	5,3	5,3	5,1	5,3	5,30	0,13	4,35	4,36	4,35	
5	50 x 5	5,3	5,5	5,4	5,3	5,3	5,36	0,08	4,40	4,38	4,39	
Wartość średnia grubości rzeczywistej/ Average value of actual thickness							5,36		Średn. grubość korygowana/ Corrected ave- rage thickness		4,34	0,05
S												

S – odchylenie standardowe/Standard deviation

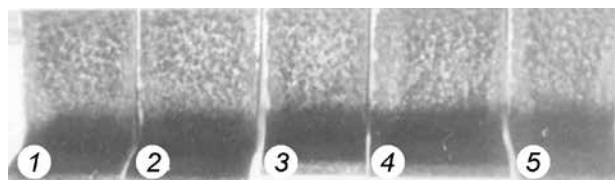
Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 4. Powierzchnie kątowników pobranych do badań
Fig. 4. Angle brackets surfaces of samples selected for laboratory testing

Źródło: Opracowanie własne.
 Source: Own elaboration.



Ryc. 5. Próbkki po usunięciu produktów korozji
Fig. 5. Samples after removal of corrosion sources

Źródło: Opracowanie własne.
 Source: Own elaboration.

Tabela 4. Wyniki pomiaru grubości kątowników po trawieniu
Table 4. Angle brackets thickness measurement results after etching

Nr kątownika/ Angle bracket No	Grubość po trawieniu/ Thickness after etching g_{traw} (mm)			Grubość średnia po trawieniu Average thickness after etching (mm) $g_{sr\ traw}$	Grubość rdzy/ Rust thickness (mm) $g_{sr} - g_{sr\ traw}$
	Nr pomiaru/Measurement No				
	1	2	3		
1	5,20	5,30	5,25	5,25	0,29
2	5,05	5,05	5,10	5,06	0,28
3	4,90	4,95	5,00	4,95	0,31
4	5,00	5,15	5,05	5,10	0,20
5	5,10	5,15	5,10	5,12	0,24
				5,10	0,26

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

3.4. Badania metalograficzne i składu chemicznego

Badania metalograficzne wykazały, że w materiale nie występują mikropęknięcia bądź nieciągłości, które mogłyby obniżać nośność konstrukcji podczas dalszej eksploatacji. Korozji wewnętrznej nie stwierdzono.

Rezultaty badań składu chemicznego przedstawiono w tabeli 5. Analiza tych wyników wskazuje, że jako materiał konstrukcyjny słupów zastosowano stal spawalną

o podwyższonej odporności korozyjnej i podwyższonej wytrzymałości w gatunku 10H. Stal ta jest zaliczana do III klasy odporności na korozję atmosferyczną, co oznacza, że ubytki korozyjne tej stali w identycznych warunkach powinny być 3 do 5-krotnie niższe niż dla stali 18G2A [21].

We wszystkich kształtownikach zawartość fosforu była niższa niż wymagana przez normę, zaś w kątowniku nr 1 stwierdzono przekroczenie zawartości siarki o 0,002% powyżej górnej odchyłki.

Tabela 5. Wyniki badania składu chemicznego materiału kątowników pobranych do badań oraz zawartość pierwiastków wg [3] dla stali w gat. 10 H

Table 5. Test results for chemical composition of examined angle brackets and element content by [3] for 10 H grade steel

Nr kątown./ Angle bracket No	Zawartość pierwiastka/Element content (%)									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo
1	0,14	0,70	0,39	0,021	0,057	0,55	0,04	0,25	0,052	0,006
2	0,17	0,80	0,56	0,014	0,037	0,75	0,05	0,28	0,10	0,008
3	0,11	0,67	0,37	0,020	0,037	0,60	0,06	0,26	0,062	0,013
4	0,14	0,70	0,42	0,027	0,038	0,73	0,05	0,27	0,069	0,010
5	0,17	0,76	0,52	0,014	0,036	0,74	0,05	0,28	0,094	0,008
10 H:		0,4–0,03	0,25–0,03	0,06–0,01		0,5–0,05	–	0,25–0,05	min	–
	max 0,15 + 0,2	÷ 0,9 + 0,05	÷ 0,6 + 0,05	÷ 0,1 + 0,01	max 0,05 + 0,005	÷ 1,0 + 0,05	–	÷ 0,50 + 0,05	0,02– 0,005	–

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

3.5. Badania wytrzymałości na rozciąganie

Wyniki badania próbek na rozciąganie, tj. granicy plastyczności R_p , granicy wytrzymałości R_m i wydłużenia

po zerwaniu A_5 zestawiono w tabeli 6. Wartości podane w nawiasach dotyczą próbek szlifowanych.

Tabela 6. Wyniki badania właściwości wytrzymałościowych kątowników pobranych do badań laboratoryjnych oraz właściwości stali w gat. 10 H określone dla kategorii wytrzymałości E 355

Table 6. Test results for mechanical properties of angle brackets used in laboratory tests and properties of 10 H grade steel categorised for durability in accordance with E 355

Nr kątownika-próbka/ Angle bracket No – sample	Wymiar próbki/ Sample dimension (mm)	R_p MPa	R_m MPa	A_5 %
1-A	5,4 x 19,9 (4,7 x 20,0)	363 (406)	472 (518)	28,5 (29,0)
1-B	5,5 x 19,9 (4,7 x 20,0)	354 (402)	466 (515)	28,0 (29,5)
2-A	5,2 x 19,9 (4,4 x 20,0)	391 (424)	522 (576)	27,5 (28,5)
2-B	5,2 x 19,9 (4,4 x 20,0)	382 (419)	515 (572)	28,0 (28,0)
3-A	5,1 x 19,9 (4,4 x 20,0)	346 (398)	455 (504)	29,7 (30,0)
3-B	5,1 x 19,9 (4,4 x 20,0)	346 (396)	452 (498)	29,0 (30,0)
4-A	5,1 x 19,9 (4,4 x 20,0)	355 (406)	479 (525)	26,0 (28,0)
4-B	5,3 x 19,9 (4,4 x 20,0)	350 (401)	478 (528)	26,0 (27,5)
5-A	5,3 x 19,9 (4,4 x 20,0)	392 (423)	514 (576)	24,3 (26,0)
5-B	5,3 x 19,9 (4,4 x 20,0)	395 (421)	520 (584)	26,5 (26,5)
Wartości średnie/Average values		367 (410)	487	
Odchylenie standardowe/Standard deviation S		19 (10)		
Właściwości materiału referencyjnego/ Reference material properties	Wg [3]/According to [3]	min. 355	490–20 630+10	min. 22,0

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Średnia wartość granicy plastyczności ($R_e = 367$ MPa) dla populacji próbek pobranych z kątowników jest wyższa od wartości normowej wynoszącej 355 MPa. Jedynie w kątowniku nr 3 obie próbki wykazały granicę plastyczności nieznacznie poniżej R_{emin} . Biorąc pod uwagę występujące w próbkach wady powierzchniowe, można stwierdzić, że materiał kątowników spełnia wymagania określone w normie [3] dla stali 10H. Wyniki badania wykonane na próbkach po zeszlifowaniu wad powierzchniowych (wzórów) wykazały R_e na poziomie 410 MPa, co potwierdza, że materiał we wnętrzu kątowników nie wykazuje osłabienia związanego z 20-letnią eksploatacją. Zarówno R_m , jak i A_5 mieszczą się w zakresie wymagań określonych w normie [3].

3.6. Badanie stanu śrub montażowych

Pobrane do badań śruby czarne M16 i M12 wykazują objawy korozyjne podobne do materiałów kształtowników. Śruby nie mają na łbach oznaczenia klasy wytrzymałości. Badania metalograficzne nie wykazały obecności wad

wewnętrznych typu mikropęknięcie lub korozja wewnętrzna, ani w obrębie gwintu, ani w przejściu trzpienia do łba śruby.

Badania twardości materiału śrub dały wynik rzędu 150–190 HV, który pozwala zakwalifikować je do klasy właściwości mechanicznych 5.6 lub 5.8, tj. wytrzymałości na rozciąganie rzędu 500 MPa [22].

3.7. Obliczenia wytrzymałościowe słupów z uwzględnieniem zużycia korozyjnego

Podstawowe dane dotyczące analizowanych słupów zestawiono w tabeli 7. W obliczeniach wytrzymałościowych uwzględniono normowo wymagane ekstremalne warunki pracy konstrukcji, występujące w I nizinnej strefie klimatycznej Polski. Biorąc pod uwagę ciężar przewodów, izolatorów i szadzi oraz aerodynamiczne oddziaływanie wiatru na elementy linii, a także naciągi przewodów (dot. słupa odporowo-naróżnego) określono wartości sił obciążających konstrukcję (tabela 8).

Tabela 7. Podstawowe dane do obliczeń statycznych wytypowanych słupów serii B2

Table 7. Basic data for static calculations of selected B2 series pylons

Wyszczególnienie/Specification	Typ słupa/Pylon type		
	P+5	PL+10	M3+10
Szadz/Rime	Normalna/Normal		
Ciśnienie wiatru (Pa) na wysokości/Wind pressure at height:			
0–10 m	491		
10–16 m	537		
16–40 m	688		
Przewód roboczy/Main conductor	3xAFL-6 240 mm ²		
Przewód odgromowy/Ground wire	1xAFL-1,7 70 mm ²		
Wysokości słupa/Pylon height (m)	25,45	34,80	27,10
Ciężar słupa/Pylon weight (kN)	16,50	27,30	31,03
Izolatory/Insulators:			
Typ/Type	3xŁP 75/17	3xLPV	3xŁP75/17
Ciężar/Weight (kN)	0,38	1,38	0,38
Wysokość łańcucha/String height (mm)	1459	1814	1459
Rozpiętość łańcucha/String span (mm)	3400	3400	3400
Max. rozpiętość przęsła/Max. span (m)	355	350	390
Kąt załomu linii/Line refraction angle (2β , ryc./fig. 3a) (rad)	–	–	2,616

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Tabela 8. Zestawienie obciążeń słupów serii B2

Table 8. Load specification for B2 series pylons

Źródło obciążenia/Source of load Rodzaj obciążenia/Kind of load	Wartość siły/Force value (kN)		
	Typ słupa/Pylon type		
	P+5	PL+10	M3+10
Przewód roboczy z izolatorem/Main conductor and insulator			
Składowa pionowa od ciężaru własnego/Vertical component of the weight V_R	4,15	4,12	4,49
Składowa pozioma od naporu wiatru/Horizontal component of wind pressure H_{Rx}	4,16	4,08	4,56
Składowa pionowa ciężar własny + szadz/Vertical component of the weight + rime V_{RS}	7,21	7,14	7,86

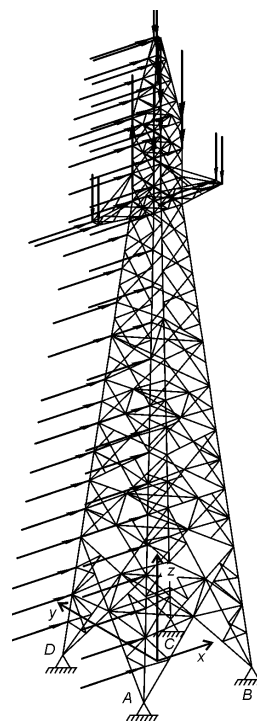
Źródło obciążenia/Source of load Rodzaj obciążenia/Kind of load	Wartość siły/Force value (kN)		
	Typ słupa/Pylon type		
	P+5	PL+10	M3+10
Naciąg całkowity/Total tension N_R			15,29
Wypadkowa naciągu/Resultant tension N_{Rw}			7,94
Składowa umownego naciągu/Conventional tension component F_{Rx}			2,64
Składowa umownego naciągu/Conventional tension component F_{Ry}			9,85
Przewód odgromowy/Ground wire			
Składowa pionowa od ciężaru własnego/Vertical component of the weight v_o	2,10	2,07	2,31
Składowa pozioma od naporu wiatru/Horizontal component of wind pressure H_{Ox}	2,24	2,20	2,42
Składowa pionowa ciężar własny + szadź/Vertical component of the weight + rime v_{OS}	4,15	4,09	4,57
Naciąg całkowity/Total tension N_o			5,50
Wypadkowa naciągu/Resultant tension N_{Ow}			2,85
Składowa umownego naciągu/Conventional tension component F_{Ox}			0,95
Składowa umownego naciągu/Conventional tension component F_{Oy}			3,54
Konstrukcja słupa/Pylon structure			
Wieżyczka/Turret	0,73	0,80	1,15
Kolumna/Column I	3,12	3,12	3,93
Kolumna/Column II		3,75	
Człon/Segment I	4,10	3,93	3,46
Człon/Segment II + 0	4,85	4,82	2,80
Człon/Segment III + 5	5,98	4,46	4,59
Człon/Segment IV + 10		4,58	4,64

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Zgodnie z wymaganymi wariantami obciążeń, słupy były poddawane działaniu wyżej podanych sił. Na ryc. 6 przedstawiono model słupa M3+5 z siłami działającymi w I wariantcie obciążenia. Strzałki przedstawiające siły parcia wiatru na przewody uwzględniają również siły naciągu przewodów wynikające z załamania linii, gdyż wypadkowa naciągów pokrywa się z osią x – dwusieczną kąta załomu linii.

W przypadku słupów przelotowych pomiary wykazały, że zastosowano kątowniki o grubszych ściankach niż wymiary podane w dokumentacji technicznej tych konstrukcji. W związku z tym w stanie obecnym, tj. po 20-letniej eksploatacji, w słupie P+5 nie stwierdzono prętów nadmiernie wyciągniętych, zaś w słupie PL+10 tylko jeden pręt (nr 696) nie spełnia wymogów bezpieczeństwa. Obliczona wartość współczynnika bezpieczeństwa dla tego pręta wynosi 0.92. W przypadku tego słupa pręt niebezpieczny wystąpił tylko w II wariantcie obciążenia, tj. podczas oddziaływania szadzi. W konstrukcji słupa M3+10 w stanie obecnym zidentyfikowano osiem prętów niebezpiecznych w I wariantcie obciążenia i dwa pręty w III wariantcie. Otrzymane wartości współczynników bezpieczeństwa N_b podano w tabeli 9.



Ryc. 6. Siły działające na słup odporowo-narożny M3+10 w I wariantcie obciążenia

Fig. 6. Forces applied to M3+10 supporting corner pylon in the first load variation

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

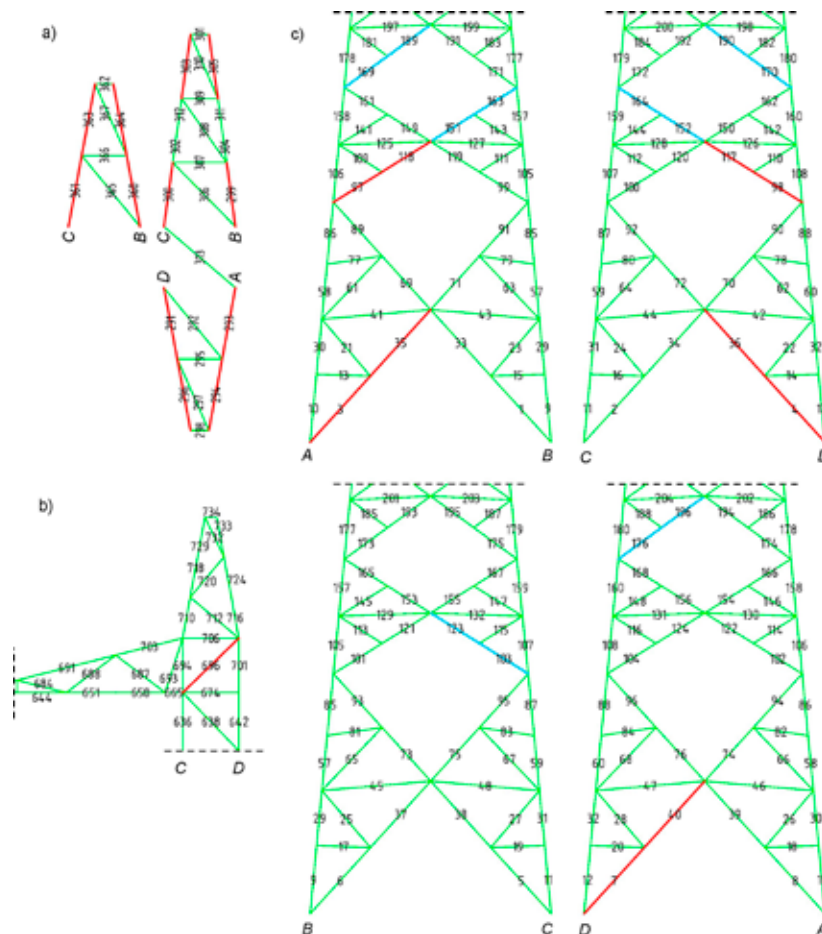
Tabela 9. Zestawienie prętów niebezpiecznych (stan aktualny)
Table 9. Collection of hazardous rod elements (current state)

Słup/Pylon:		PL+10							
Wariant obc./Load variation		II							
Nr pręta/Rod element No.	696								
N_b	0,92								
Słup/Pylon:		M3+10							
Wariant obc./Load variation		I							
Nr pręta/Rod element No.	3	4	35	36	97	98	117	118	
N_b	0,81	0,81	0,81	0,81	0,85	0,85	0,85	0,85	
Słup/Pylon:		III							
Nr pręta/Rod element No.	7	40							
N_b	0,95	0,96							

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

Wartość współczynnika bezpieczeństwa mniejsza niż jeden oznacza, że pręt jest zagrożony zniszczeniem i powinien zostać wymieniony na mocniejszy lub odpowiednio wzmocniony, np. przez dodanie pręta bliźniaczego.

Wyniki analizy konstrukcji nośnych są generowane przez program autorski zarówno w formie wartości liczbowych, jak i w formie rysunków ścian/poprzeczników słupa z prętami niebezpiecznymi oznaczonymi odpowiednim kolorem [23] (ryc. 7).



Ryc. 7. Usytuowanie prętów niebezpiecznych w słupach: po 20 latach eksploatacji – kolor czerwony, prognoza po 40 latach eksploatacji – kolor czerwony i niebieski; a) P+5, b) PL+10, c) M3+10

Fig. 7. Location of hazardous pylon rod elements; after 20 years of use – red, forecast after 40 years of use – red and blue; a) – P +5, b) – PL+10, c) – M3+10

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

3.8. Prognoza trwałości linii energetycznej

Korzystając ze wzoru (1), przy warunkach granicznych (por. tabela 6):

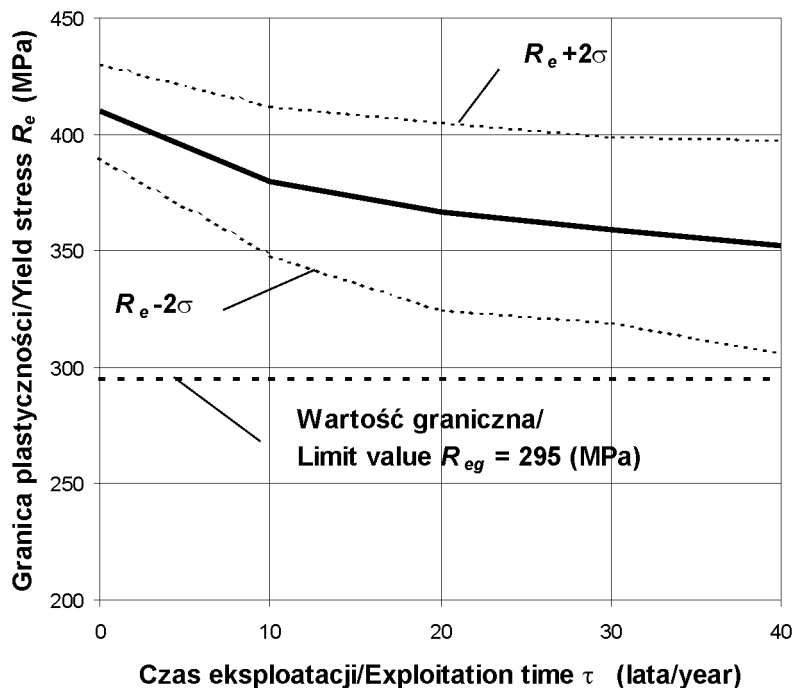
$$R_e^{20} = 367 \pm 38 \text{ MPa},$$

$$R_e^0 = 410 \pm 20 \text{ MPa},$$

obliczono wartość współczynnika $a = -0,13$. W tej sytuacji równanie przedstawiające zmiany granicy plastyczności w czasie eksploatacji R_e^τ obiektu przyjmuje postać:

$$R_e^\tau = \frac{R_e^0 g}{g + 0.13 \sqrt{\tau}} \quad (2)$$

Wykres przedstawiający zmiany analizowanej cechy dla elementu konstrukcyjnego o grubości ścianki $g = 5 \text{ mm}$ z granicami dwusigmowego przedziału ufności Neumana przedstawiono na ryc. 8.



Ryc. 8. Zmiana granicy plastyczności materiału słupa w czasie eksploatacji

Fig. 8. Yield strength variation of the pylon material during use

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Po uwzględnieniu prognozowanego zużycia korozyjnego prętów analizowanych kratownic, które wystąpi po kolejnych 20 latach eksploatacji linii, tj. po 40 latach od jej budowy, na podstawie obliczeń stwierdzono, że w konstrukcjach wystąpią pręty nie spełniające warunku bezpieczeństwa wytrzymałościowego. Ich numery i wartości współczynników bezpieczeństwa zebrano w tabeli 10, zaś ich usytuowanie w konstrukcjach przedstawiono na ryc.

7. W celu zapewnienia bezpiecznej pracy słupów na okres kolejnych 20 lat należy wzmocnić lub wymienić na mocniejsze wszystkie pręty zaznaczone na wspomnianej rycinie kolorem czerwonym i niebieskim. Po stosownej modyfikacji analizowanych konstrukcji należałoby wykonać obliczenia sprawdzające, żeby upewnić się, czy wszystkie pręty spełniają warunki bezpieczeństwa.

Tabela 10. Zestawienie prętów niespełniających warunku bezpieczeństwa (prognoza na 20 lat)

Table 10. Collection of rod elements, which fail safety requirements (forecast for 20 years)

Słup/Pylon:	P+5											
Wariant obc./Load variation	II											
Nr pręta/Rod element No.	300	299	303	305	291	293	294	296	360	361	363	364
N_b	0,90	0,91	0,91	0,91	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Słup/Pylon:	PL+10											
Wariant obc./Load variation	II											
Nr pręta/Rod element No.	696											
N_b	0,76											

Słup/Pylon:	M3+10											
Wariant obc./Load variation	I											
Nr pręta/Rod element No.	3	4	35	36	97	98	117	118	169	170	189	190
N_b	0,63	0,63	0,63	0,63	0,65	0,65	0,65	0,65	0,79	0,79	0,80	0,80
Nr pręta/Rod element No.	151	152	163	164								
N_b	0,92	0,92	0,92	0,97								
Wariant obc./Load variation	III						IV					
Nr pręta/Rod element No.	7	40	176	196	103	123	176	196				
N_b	0,76	0,77	0,92	0,93	0,94	0,94	0,96	0,97				

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Ze względu na bezpieczeństwo linii elektroenergetycznej norma [24] narzuca ograniczenia na maksymalne wychylenia punktów szczytowych słupów. W związku z tym obliczono maksymalne wartości przemieszczeń szczytowych węzłów konstrukcji kratownicowych, uwzględniając osłabienie przekrojów poprzecznych prętów kratownicy korozją po 40-letniej eksploatacji. Odnosząc te wartości do wartości dopuszczalnych wyspecyfikowanych w normie, otrzymano następujące wartości współczynników dla analizowanych słupów: P+5 – 0.32, PL+10 – 0.53, M3+10 – 0.33. Największą wartość otrzymano dla słupa odmiany leśnej, jednak jest ona daleka od wartości granicznej równej jedności. Warunki sztywności konstrukcji będą spełnione z dużym zapasem.

4. Podsumowanie

Zaproponowana metodologia oceny bezpieczeństwa pracy konstrukcji wsporczych linii elektroenergetycznych ma dwa etapy: badań materiałowych i analizy wytrzymałości.

Przyjęta metoda badań materiałowych elementów eksploatowanych słupów linii elektroenergetycznych umożliwia weryfikację jakości zastosowanych materiałów i zgodności wymiarów kształtowników z projektem, jak również określenie głębokości wżerów korozyjnych, co jest niezbędne do określenia stopnia osłabienia przekrojów poprzecznych prętów kratownic. Alternatywą dla badań metalograficznych i wytrzymałościowych może być wykorzystanie metod NDT do oceny ubytków korozyjnych i właściwości mechanicznych elementów konstrukcyjnych słupów.

Autorski program komputerowy dedykowany do analizy wytrzymałościowej słupów kratownicowych umożliwia

sprawne obliczenia przy różnych wariantach obciążeń wymaganych przez przepisy normowe. Ocena bezpieczeństwa wytrzymałościowego konstrukcji po pewnym czasie eksploatacji polega na uwzględnieniu w obliczeniach osłabienia zużyciem korozyjnym przekrojów poprzecznych prętów kratownic. Program automatycznie generuje siatki prętów ścian słupów i poprzeczników, na których pręty niebezpieczne są oznaczane odpowiednim kolorem, co umożliwia ich łatwą lokalizację.

Na podstawie prognozy postępów korozji możliwa jest identyfikacja prętów niebezpiecznych po dowolnym czasie eksploatacji konstrukcji.

Wskazanie prętów niebezpiecznych umożliwia służbom technicznym odpowiedzialnym za eksploatację linii ich wzmocnienie lub wymianę na mocniejsze tak, aby nie dopuszczać do sytuacji niebezpiecznych związanych z postępami korozji.

Badania diagnostyczne i obliczenia słupów linii energetycznych budowanych w poprzednim wieku powinny być przeprowadzane również ze względu na zdarzające się przypadki stosowania zamienników, tj. prętów o przekrojach odbiegających nieco od wymagań projektowych lub materiałów o niższej odporności korozyjnej. W owych czasach takie postępowanie wynikało na ogół z chwilowych braków materiałowych z równoczesnym dążeniem do zachowania planowanego terminu realizacji inwestycji. Okresowej ocenie żywotności powinny być poddawane zwłaszcza słupy odporowo-narozne, bowiem ich awarie na ogół skutkują zniszczeniem całych sekcji linii.

Należy podkreślić, że otrzymane wyniki w znacznym stopniu zależą od warunków środowiskowych, w których usytuowane były słupy, i nie mogą być uogólniane na konstrukcje pracujące w innych warunkach.

Literatura

- [1] Głuszko M., *Zagadnienia ochrony antykorozyjnej konstrukcji stalowych oraz urządzeń elektroenergetycznych eksploatowanych w warunkach atmosferycznych*, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2008.
- [2] Ziółko J., Włodarczyk W., Mendera Z., Włodarczyk S., *Stalowe konstrukcje specjalne*, ARKADY, Warszawa 1995.
- [3] PN-83/H-84017: *Stal konstrukcyjna trudno-rdzewiejąca – niskowęglowa z niewielkim dodatkiem Cr i Cu. Spawalna.*
- [4] Leygraf C., Graedel T., *Atmospheric Corrosion, Electrochemical Society Series*, J. Wiley & Sons, New York 2000.
- [5] PN-EN ISO 12944-2:2000 *Klasyfikacja atmosferycznych środowisk korozyjnych dla klimatu umiarkowanego.*

- [6] Morcillo M., Chico B., Díaz I., Cano H., de la Fuente D., *Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review*, "Corrosion Science" Vol. 77, 2013, pp. 6–24.
- [7] Schreir L.L., *Korozja. Poradnik*, Metalurgija, Moskwa 1981.
- [8] Wielgosz A., *Badania zmian zachodzących w eksploataowanych stalach*, XII Konfer. Metaloznawcza Katowice–Kozubnik, 1987, 267.
- [9] PN-78/M-04610: *Korozja metali. Metody oceny badań korozyjnych*.
- [10] PN-84/H-04308: *Pobieranie próbek do badań własności mechanicznych*.
- [11] PN-80/H-04310: *Próba statyczna rozciągania metali*.
- [12] PN-EN ISO 6507-1: *Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Cz. 1. Metoda badań*.
- [13] Pelc J., *A strategy for automatic elimination of mechanical instability in structural analysis of spatial truss tower model*, "Technical Sciences" Issue 15(2), 2012, pp. 319–330.
- [14] Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T., *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2000.
- [15] PN-80/B-03200: *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [16] Larrabee C.P., *Corrosion Handbook*, ed. by Uhlig, Wiley and Sons, New York 1948, 124.
- [17] Uhlig H.H., *Korozja i jej zapobieganie*, WNT, Warszawa 1976, 172.
- [18] Simillion H., Dolgikh O., Terryn H., Deconinck J., *Atmospheric corrosion: A review focussed on modeling*. "Corrosion Reviews", Vol. 32 Issue 3–4, 2014, pp. 73–100.
- [19] PN-69/H-93401: *Stal walcowana – Kątowniki równoramienne*.
- [20] Chorafas D.N., *Statistical Processes and Reliability Engineering*, D. Van Nostrand Comp. Inc., 1976.
- [21] Kubac R., Pilarczyk S., Pronobis A., *Tablice stali zwykłej jakości*, Śląsk, Katowice 1981.
- [22] PN-82/M-82054.03: *Własności mechaniczne śrub i wkrętów*.
- [23] Pelc J., *Komputerowe wspomaganie analizy wytrzymałościowej kratownicowych słupów linii elektroenergetycznych*, „Przegląd Mechaniczny”, Vol. 71 Issue 4, 2012, pp. 30–34.
- [24] PN-84/B-03205: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Stalowe konstrukcje wsporcze. Obliczenia statyczne i projektowanie*.

* * *

dr inż. Krzysztof Dutka – absolwent Wydziału Metalurgicznego Politechniki Częstochowskiej. Od 1976 r. jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, obecnie na stanowisku asystenta. Zajmuje się tematyką dotyczącą inżynierii materiałowej, ze szczególnym uwzględnieniem procesów degradacji materiałów konstrukcyjnych.

dr hab. inż. Józef Pelc – absolwent Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Od 1982 r. jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, obecnie na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Zajmuje się zagadnieniami wytrzymałości konstrukcji inżynierskich i metodami komputerowymi mechaniki ciał odkształcalnych, w szczególności analizą bezpieczeństwa wytrzymałościowego wielkich konstrukcji kratownicowych.