

Tadeusz KNYCH¹, Andrzej MAMALA¹, Beata SMYRAK¹, Grzegorz KIESIEWICZ¹, Wiesław NOWAK², Waldemar SZPYRA², Rafał TARKO², Jacek SNAMINA³, Tadeusz WSZOŁEK⁴, Andrzej KOWALCZYK⁵, Irena KUCZKOWSKA⁵, Krzysztof LENARCZYK⁵, Marek SZCZECHOWICZ⁵, Halina ARGASIŃSKA⁶, Piotr DEŃCA⁶, Danuta DYMEK⁶, Ewa NOWAK⁶, Krzysztof ŚCIOBŁOWSKI⁶, Zbigniew WYSZOGRODZKI⁶

AGH w Krakowie, Katedra Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych (1), AGH w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki (2), AGH w Krakowie, Katedra Automatyzacji Procesów (3), AGH w Krakowie, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki (4), Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. (5), Energoprojekt Kraków (6)

doi:10.15199/48.2017.11.45

Nowe rozwiązania niskostratnych przewodów do napowietrznych linii elektroenergetycznych najwyższych napięć

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących nowych rozwiązań niskostratnych przewodów przewidzianych do stosowania w napowietrznych liniach przesyłowych 400 kV. Omówiono materiałowe i technologiczne aspekty projektowania przewodów oraz zagadnienia mechaniczne i elektryczne dotyczące zarówno przewodów jak i linii. Dokonano wielokryterialnej analizy 80 projektów nowych typów przewodów. Zastosowanie w liniach przesyłowych nowych przewodów pozwoli na redukcję strat nawet o ponad 25%, w porównaniu z obecnie stosowanymi przewodami.

Abstract. The article presents results of studies carried out on the construction of new, low-loss conductors intended for use in overhead 400 kV transmission lines. We discuss the material and technological aspects of designing conductors and issues relating to mechanical and electrical conductors on the line. Developed and treated multi-criteria analysis of new types of conductors. We examined 80 projects of conductors. The use of the transmission lines with new low-loss conductors allows the reduction of energy losses in transmission lines by up to 25%, compared to the actually used conductors. **New solutions of low-loss conductors for high voltage overhead transmission lines**

Słowa kluczowe: elektroenergetyczne linie przesyłowe, przewody do linii napowietrznych, projektowanie linii, straty energii elektrycznej

Keywords: power transmission lines, conductors for overhead lines, reduction of energy losses.

Wprowadzenie

Typowe przewody fazowe elektroenergetycznych linii przesyłowych 400 kV wybudowanych po 2000 roku mają wiązki 3-przewodowe wykonane z przewodów AFL-8 350 (357-AL1/46-ST1A) i wykazują znamionową obciążalność prądową na poziomie 2,5 kA. Wiązki mają kształt trójkąta równobocznego o długości boku 400 mm i wierzchołku skierowanym w dół. Na dominującej części powierzchni kraju, w strefie S1 i W1 w przypadku linii dwutorowych 400 kV standardowo wykorzystuje się konstrukcje wsporcze serii E33, które zostały zaprojektowane zgodnie z normami europejskimi wprowadzonymi przez Polski Komitet Normalizacyjny w związku ze wstąpieniem Polski do Unii Europejskiej. Taka konstrukcja linii, chociaż spełnia wszystkie wymogi techniczne, oraz zapewnia wystarczającą przepustowość linii i spełnienie wymagań przepisów dotyczących ochrony środowiska, przestała być zadowalająca wobec rosnących oczekiwań w zakresie poprawy efektywności energetycznej przesyłania energii elektrycznej. Dlatego w PSE S.A. podjęto działania mające na celu zwiększenie efektywności energetycznej sieci przesyłowej. Działania te ukierunkowano m. in. na opracowanie i wdrożenie innowacyjnej konstrukcji przewodu fazowego dla nowobudowanych linii 400 kV. Z tego powodu w 2013 r. zaprojektowano i włączono do stosowania nowy przewód składowy wiązki (408-AL1F/34-UHST) o obniżonej w stosunku do AFL-8 350 rezystancji liniowej. Jego wdrożenie w liniach 400 kV umożliwiło zmniejszenie obciążeniowych (podłużnych) strat energii nawet o 15%, bez potrzeby dokonywania zmian konstrukcyjnych pozostałych elementów składowych linii.

Poszukiwanie dalszych możliwości ograniczania strat energii wymaga bardziej kompleksowego podejścia. W związku z tym PSE S.A. uruchomiło długofalowy program badawczy nakierowany na opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych umożliwiających dalsze obniżenie strat energii. Podejście to wymagało jednak przeprowadzenia analiz w zakresie głębszych zmian technicznych w liniach 400 kV. W roku 2016 pojawiła się

również inna zasadnicza przesłanka do wprowadzenia zmian w nowoprojektowanych liniach w postaci nowelizacji norm dotyczących projektowania linii napowietrznych. Stosowane dotychczas słupy E33 nie spełniają wymagań aktualnych norm, zaś opracowanie założeń do zaprojektowania nowych standardowych słupów do dwutorowych linii 400 kV stworzyło okazję do rozważenia zastosowania przewodów fazowych w postaci innych wiązek trójprzewodowych (większa średnica przewodów składowych, inne rozstawienie przewodów) lub wiązek czteroprzewodowych z wykorzystaniem nowej generacji przewodów niskostratnych. W kolejnych rozdziałach artykułu zostały omówione badania wykonane w tym zakresie.

Projekty przewodów niskostratnych

Badania polegały na opracowaniu i wielokryterialnej analizie nowych typów przewodów stalowo-aluminiowych (ACSR), jednorodnych ze stopów na osnowie aluminium (AAAC), stopowo-aluminiowych (ACAR) oraz wykorzystujących nośno-przewodzące rdzenie wykonane ze stopów na bazie miedzi, przewidzianych do stosowania w wiązkach 3-przewodowych na istniejących konstrukcjach słupów oraz w wiązkach 3- i 4-przewodowych na nowych słupach. Łącznie przeanalizowano 80 różnych konstrukcji przewodów. Nowo opracowywane przewody i zaprojektowane na ich kanwie wiązki podzielono na trzy grupy:

- przewody niskostratne i wykonane z nich wiązki 3-przewodowe kompatybilne ze słupami serii E33 (rozwiązania gwarantujące wymagane przepisami odległości przewodów od innych obiektów przy nieprzekroczeniu wartości granicznych projektowych obciążeń mechanicznych działających na konstrukcje i zachowaniu nominalnej rozpiętości przęsła),
- przewody niskostratne i wykonane z nich alternatywne wiązki 3-przewodowe oddalające ograniczenia limitowane przez konstrukcje wsporcze E33 (rozwiązania umożliwiające bardziej elastyczne podejście zorientowane

na maksymalizację korzyści wynikających z ograniczania strat przesyłu),

– przewody niskostratne i wykonane z nich wiązki 4-przewodowe (grupa obejmująca nowe rozwiązania wiązek przewodowych oraz nowe konstrukcje wsporcze wraz z posadowieniami).

Do nowych przewodów niskostratnych wykorzystano jako materiały przewodzące aluminium (o czystości min. 99,5%), konwencjonalne stopy aluminium oraz nowoczesne stopy aluminium o podwyższonej przewodności elektrycznej (np. EHC - Extra High Conductivity), wysokowytrzymałe i wysoko przewodzące stopy aluminium i inne. Najczęściej są to wyselekcjonowane gatunki stopów AlMgSi. Ponadto rozpatrywano przewody wykorzystujące wysokowytrzymałe i wysokoprzewodzące stopy miedzi, druty bimetalowe miedziane aluminiowane lub aluminiowe miedziane, stalowe aluminiowane. Do rdzeni stalowych wykorzystywano klasyczne gatunki stali wykorzystywanych do przewodów napowietrznych jak również stale ekstra-wysokowytrzymałe i ultra-wysokowytrzymałe (o wytrzymałości blisko 40% wyższej niż standardowe druty na rdzenie) [1].

Rozpatrywano przewody niskostratne wykonane z drutów okrągłych i profilowych (druty trapezowe, Z-owe z zamkiem na „jaskółczy ogon”). Zastosowanie różnych kształtów drutów pozwoliło na ocenę wpływu falistości powierzchni przewodu na wymianę ciepła z otoczeniem oraz rozkład pola elektromagnetycznego, a także na minimalizację średnicy zewnętrznej przewodu, która z kolei decyduje o poziomach obciążeń mechanicznych pod działaniem wiatru i oblodzenia oraz o poziomie ulotu i hałasu. Zaprojektowano przewody o parzystych i nieparzystych liczbach warstw rdzenia i oplotu, co pozwoliło na wnikliwe analizy wpływu konstrukcji na rezystancję przewodu przy prądzie przemiennym oraz podatności na drgania eolne. Opracowano rozwiązania o różnych proporcjach przekroju poprzecznego części oplotu przewodu do przekroju poprzecznego rdzenia. W odniesieniu do przewodów dwumateriałowych stalowo-aluminiowych generuje to rozwiązania o różnych masach liniowych, modułach sprężystości wzdłużnej i współczynnikach wydłużenia termicznego. To z kolei

decyduje o odmiennym zachowaniu się takich przewodów w pręślach linii napowietrznej.

Wylimitowanie w przewodach jednorodnych wykonanych ze stopów aluminium słabo przewodzącego stalowego rdzenia nośnego, dzięki zastosowaniu nowoczesnych gatunków stopów, przy powiększonym przekroju elektrycznie czynnym przewodu pozwala uzyskać rozwiązania cechujące się bardzo dobrymi parametrami elektrycznymi. Walorem tej grupy przewodów jest również mniejszy wzrost rezystancji z temperaturą, co dodatkowo przekłada się na konkurencyjne obciążalności prądowe. Przewody stopowo-aluminiowe dzięki charakterystycznej konstrukcji wykorzystującej aluminium i stopy aluminium pozwalają uzyskać rezystancję na poziomie nieosiągalnym dla innych rozwiązań, przy zachowaniu porównywalnych do tradycyjnych przewodów stalowo-aluminiowych wytrzymałości mechanicznych. Dzięki możliwości wykorzystania drutów profilowych również w rdzeniu (w części stopowej) uzyskuje się najwyższe możliwe współczynniki wypełnienia.

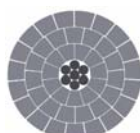
Jako przewody specjalne zakwalifikowano projekty przewodów o konstrukcji nie stosowanej na masową skalę, ale realną do osiągnięcia przy aktualnym stanie techniki. W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry przykładowych przewodów niskostratnych wybranych do dalszych analiz po dokonaniu wstępnej selekcji, w której ważną rolę odegrała konsultacja z krajowymi wytwórcami przewodów. Projekty przewodów wykonano zgodnie z wymaganiami obowiązujących norm przedmiotowych [2-3]. W tabeli 1 podano: oznaczenie przewodu, średnicę zewnętrzną przewodu D_p , masę jednostkową przewodu m (dla przewodów z rdzeniem stalowym podano masę przewodu ze smarem), znamionową siłę zrywania RTS (ang. Rated Tensile Strength), moduł sprężystości wzdłużnej E , współczynnik wydłużenia cieplnego α , znamionową rezystancję jednostkową przewodu R w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ i $+80^{\circ}\text{C}$, (przez zacięniowanie wyróżniono przewody wybrane do obliczeń konstrukcji nowych słupów). Natomiast na rysunku 1 pokazano widoki przekroju poprzecznego przewodu referencyjnego (408AL1F/34-UHST) oraz przewodów wybranych do obliczeń konstrukcji nowych słupów.

Tabela 1. Wybrane parametry przewodów niskostratnych wybranych do dalszych analiz

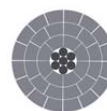
Oznaczenie przewodu	468/24-A1F/UHST-261	502-A5F-261	159/352-A1F/A5F-261	437 AL1/46 CuAg	471/39-A1F/EHS T-265	522-AL5	203/335-A1F/A5F-273	475 AL1/53 CuAg	350/24-AL1F/UHST-227	357-A5F-222	225/137-A1F/A4F-224	403 AL1/52 14EHS
Typ	ACSR	AAAC	ACAR	Specjalny	ACSR	AAAC	ACAR	Specjalny	ACSR	AAAC	ACAR	Specjalny
D_p [mm]	26,1	26,1	26,1	26,1	26,49	29,7	27,26	27,3	22,7	22,19	17,6	25,2
m [kg/km]	1484,9	1402,5	1420,0	1624,6	1617,0	1441,9	1496,0	1822,0	1158,9	988,4	1007,2	1492,0
RTS [kN]	112,878	148,051	124,707	118,419	134,684	153,911	126,232	135,159	94,291	105,359	95,723	141,162
E [GPa]	61,646	57,7	58,3	57,7	65,4	58,3	58,3	61,7	63,7	58,9	58,3	66,9
α [1/K]	$21,26 \times 10^{-6}$	$23,0 \times 10^{-6}$	$23,0 \times 10^{-6}$	$23,0 \times 10^{-6}$	$20,4 \times 10^{-6}$	$23,0 \times 10^{-6}$	$23,0 \times 10^{-6}$	$22,0 \times 10^{-6}$	$20,8 \times 10^{-6}$	$23,0 \times 10^{-6}$	$23,0 \times 10^{-6}$	$20,0 \times 10^{-6}$
R_{20} [Ω /km]	0,06216	0,06434	0,06101	0,05909	0,06155	0,06121	0,05752	0,05360	0,08239	0,08954	0,08770	0,06943
R_{80} [Ω /km]	0,07719	0,07824	0,07471	0,07309	0,07643	0,07443	0,07054	0,06627	0,10231	0,10888	0,10573	0,08616
Przeznaczenie	Wiązka 3-przewodowa na słupach serii E33				Wiązka 3-przewodowa na nowej serii słupów (S3)				Wiązka 4-przewodowa na nowej serii słupów (S4)			



408AL1F/34-UHST



468/24-AL1F/UHST-261



350/24-AL1F/UHST-227

Rys. 1. Przekrój poprzeczny przewodu referencyjnego oraz przewodów wybranych do obliczeń konstrukcji nowych słupów

Mechanika przewodów

Na etapie projektowania napowietrznych linii elektroenergetycznych bardzo istotne jest określenie maksymalnych zwisów przewodów fazowych dla założonej

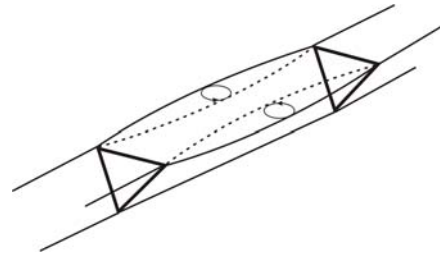
temperatury pracy przewodów w celu zapewnienia wymaganej przez normę odległości pomiędzy przewodami fazowymi (będącymi pod napięciem), a ziemią i obiektami krzyżowanymi. Wartość zwisu przewodu zależy od wielu

czynników, które można podzielić na dwie zasadnicze grupy tj. czynniki materiałowe (konstrukcyjne) i czynniki środowiskowe. Odpowiednio dobierając materiał, z którego wykonany jest rdzeń przewodu oraz część przewodząca (oplot) uzyskuje się różne wartości zwisów poszczególnych konstrukcji przewodów. Do najistotniejszych parametrów mechanicznych (materiałowych) przewodu należy zaliczyć: moduł elastyczności, współczynnik wydłużenia termicznego, średnicę, ciężar, przekrój obliczeniowy oraz znamionową wytrzymałość na rozciąganie *RTS*. Do istotnych czynników środowiskowych należy zaliczyć: temperaturę, prędkość i kierunek wiatru względem przęsła oraz ciężar oblodzenia.

W celu porównania poszczególnych konstrukcji przewodów wykonano obliczenia zwisów przy następujących założeniach: długość przęsła 450 m, temperatura pracy przewodu 80°C. Sposób rozmieszczenia przewodów obliczono przy wykorzystaniu programu PLS-CADD zgodnie z obowiązującą normą PN-EN 50341-2-22:2016 [4]. Obliczenia wykonano dla różnych stref klimatycznych, zdefiniowanych w tej normie.

W wyniku obliczeń określone zostały dopuszczalne naciągi dla poszczególnych analizowanych przewodów, przy założeniu pełnego wykorzystania ich parametrów wytrzymałościowych. W przypadku przewodów dedykowanych do słupów istniejącej serii E33 podstawowym kryterium przy określaniu naciągu podstawowego było niedopuszczenie do przekroczenia dopuszczalnych obciążeń, na jakie słupy te zostały zaprojektowane. Spośród poszczególnych typów opracowanych przewodów do dalszej analizy wybrano te, które charakteryzowały się najmniejszą rezystancją oraz jednocześnie korzystnym zwisem.

Przewody elektroenergetycznych linii napowietrznych są narażone na drgania, które mogą być przyczyną poważnych uszkodzeń prowadzących do kosztownych awarii linii, dlatego przeanalizowano również wpływ konstrukcji przewodów na ich odporność na drgania. Zasadniczą rolę przy ograniczaniu szkodliwych zjawisk związanych z drganiami i ruchem falowym w przewodach linii elektroenergetycznych odgrywa tłumienie wewnętrzne będące wynikiem procesów dyssypacji energii wewnątrz przewodu. Ocena odporności projektowanych przewodów na drgania została oszacowana na podstawie obliczeń i analizy współczynników samotłumienności wynikających z zaproponowanej konstrukcji przewodów. Powietrze opływające przewód wytwarza za nim obszar o szczególnych cechach aerodynamicznych. Rozkład ciśnienia w tym obszarze powoduje, że na przewód zawietrzny wiązki przewodów działa siła aerodynamiczna będąca przyczyną powstawania zaburzeń stanu równowagi przewodów. Propagacja tych zaburzeń powstających w przewodach zawietrznych może powodować drgania całego podpręsła (odcinka wiązki pomiędzy sąsiednimi odstępnikami lub pomiędzy skrajnym odstępnikiem a uchwytem przewodu w miejscu zamocowania na słupie). Ocena niekorzystnego oddziaływania wiatru na przewody zawietrzne, będącego przyczyną powstawania drgań odcinkowych wiązki została wykonana na podstawie obliczeń i analizy maksymalnych wartości współczynników siły nośnej w śladzie aerodynamicznym przewodów nawietrznych. Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie drgania odcinkowe dwóch górnych przewodów podpręsła wiązki trójprzewodowej powstające w wyniku omawianych zjawisk aerodynamicznych. Obliczenia zostały wykonane dla czterech odległości między przewodami w wiązkach.



Rys. 2. Drgania odcinkowych w górnych przewodach podpręsła wiązki trójprzewodowej

Uwzględniając powyżej opisane aspekty spośród opracowanych typów przewodów do dalszej analizy wybrano te, które charakteryzowały się najmniejszą rezystancją oraz jednocześnie korzystnym zwisem i możliwą do zaakceptowania odpornością na drgania.

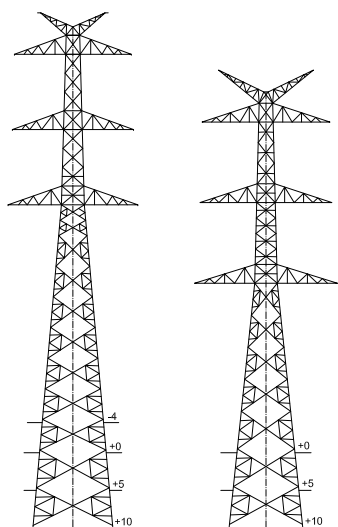
Konstrukcje słupów i fundamenty

Do obliczeń słupów i fundamentów wskazane zostały przewody 468/24-A1F/UHST-261 oraz 350/24-AL1F/UHST-227. Dla tych przewodów wykonano obliczenia wytrzymałości izolatorów przeznaczonych dla łańcuchów odciągowych ŁO2 oraz łańcuchów przelotowych ŁP dla wiązki 3-przewodowej i 4-przewodowej oraz zaprojektowano nowe sylwetki słupów przelotowych P i mocnych M3 dla linii dwutorowych. Obliczenia wykonano dla różnych stref klimatycznych tj. S1W1, S2W2 i S3W3 określonych w normie PN-EN 50341-2-22:2016. Na podstawie ww. obliczeń dobrano wymaganą wytrzymałość izolatorów z uwzględnieniem typu łańcucha, strefy klimatycznej i konstrukcji wiązki. Stosowanie nowych przewodów, o większej wytrzymałości na zerwanie *RTS*, wymusza konieczność zastosowania izolatorów o większej wytrzymałości niż stosowane dotychczas 160 kN i 210 kN, szczególnie dla wiązki czteroprzewodowej i strefy obciążenia oblodzeniem S2 i S3. W takim przypadku należy zastosować izolatory o wytrzymałości 300 kN, a nawet 400 kN. Wykonano również analogiczne obliczenia słupów i fundamentów dla aktualnie stosowanego przewodu 408-AL1F/34-UHST, w celu określenia wpływu zastosowania ww. normy na masę słupów i fundamentów. Sylwetki (gabaryty) słupów zostały tak zaprojektowane, aby była możliwość zastosowania łańcuchów izolatorowych z izolatorami porcelanowymi i szklanymi. Sylwetki zaprojektowanych słupów przedstawiono na rysunku 3.

Dla tak opracowanych sylwetek słupów oraz wyznaczonych obciążeń od przewodów fazowych i odgromowych wykonano obliczenia konstrukcyjne (wytrzymałościowe) projektowanych słupów. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych. Sprawdzone stany graniczne nośności oraz użyteczności. Konstrukcje słupów kratowych zostały zamodelowane, jako przestrzenne układy prętowe złożone z elementów kratowych i belkowych, a ich masy zestawiono w tabeli 2.

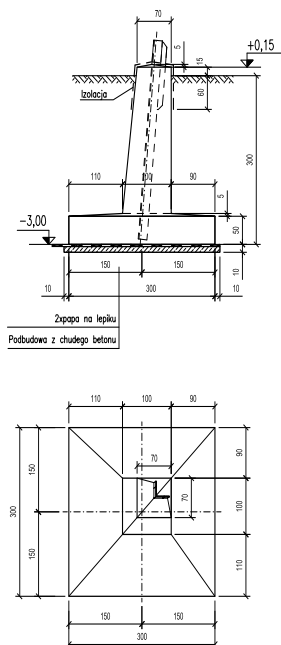
Tabela 2. Masy słupów w zależności od zastosowanej wiązki przewodów

Wiązka przewodów	Masa słupa [t]	
	przelotowego P+10	mocnego M3+10
3x3 408-AL1F/34-UHST	21,56	46,69
3x3 468/24-A1F/UHST-261	21,64	45,55
3x4 350/24-A1F/UHST-227	23,14	49,58



Rys. 3. Sylwetka słupa przelotowego i mocnego

Po zaprojektowaniu konstrukcji słupów wykonano obliczenia fundamentów dla każdego typu słupa. W obliczeniach przyjęto występowanie gruntów typowych „średnich”. Są to grunty o parametrach geotechnicznych tak dobranych, że wyznaczona nośność fundamentów odpowiada nośności w gruntach kwalifikowanych, jako grunty nośne spójne i niespójne. Wszystkie fundamenty zaprojektowano jako monolityczne posadowione na głębokości 3 m poniżej poziomu terenu (dla słupów przelotowych P) oraz na głębokości 3,5 m (dla słupów mocnych M3). Na konstrukcję każdej stopy fundamentowej składają się: żelbetowy cokół, żelbetowa płyta i kątownikowa kotwa fundamentowa. Fundamenty ustawione są na warstwie podbudowy z betonu C8/10 (B10) o grubości 0,1 m. Górny poziom cokołów stóp fundamentowych znajduje się na wysokości 0,15 m nad poziomem terenu. Przekrój pionowy i widok z góry fundamentu pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny i widok z góry fundamentu słupa

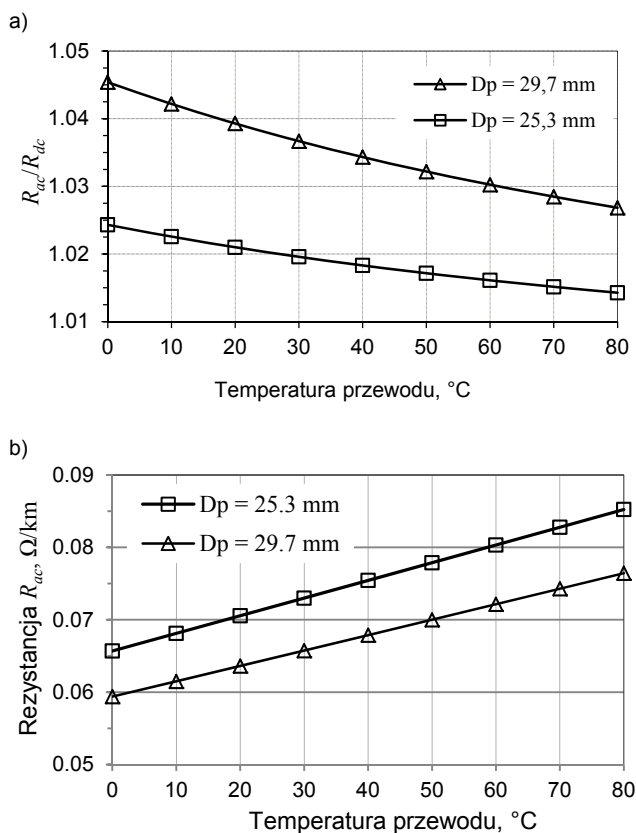
Obliczenia parametrów elektrycznych przewodów i linii

Podstawowym parametrem charakteryzującym stosowane w elektroenergetycznych liniach napowietrznych nieizolowane przewody jest rezystancja jednostkowa. Wartość tej rezystancji decyduje o stratach mocy i energii w linii, w której zastosowano dany przewód.

Rezystancja jednostkowa przewodu zależy od rezystywności ρ materiału, z którego przewód jest wykonany oraz od jego przekroju poprzecznego. Ponieważ rezystywność materiału zależy od temperatury, to również rezystancja zmienia się wraz ze zmianą temperatury przewodu.

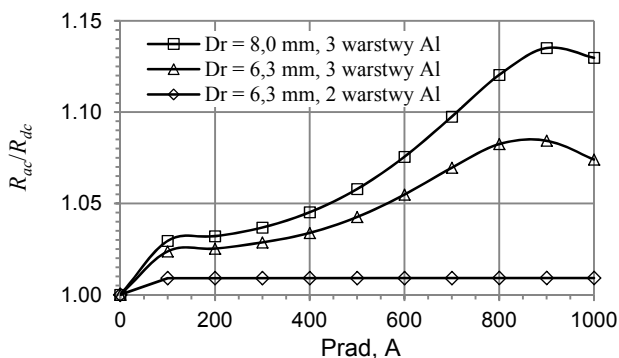
Gdy przewodem płynie prąd przemienny, wówczas konieczne jest uwzględnienie zjawisk wynikających z oddziaływania zmiennego pola elektromagnetycznego, do których należą efekt naskórkowości, a w przypadku przewodów z rdzeniem stalowym również straty w rdzeniu (prądy wirowe, histereza) oraz zmiana gęstości prądu w poszczególnych warstwach przewodu w wyniku oddziaływania zmiennego pola elektromagnetycznego.

Naskórkowość jest efektem wzajemnego oddziaływania pola magnetycznego wytwarzanego przez prąd przemienny płynący w przewodzie z polem elektrycznym [8, 9]. W wyniku tych oddziaływań zmienia się gęstość prądu w poszczególnych warstwach przewodu, co skutkuje wzrostem rezystancji przewodu w stosunku do rezystancji dla prądu stałego. Wpływ naskórkowości jest tym większy im większa jest średnica przewodu i mniejsza rezystywność stali, pomija się wpływ naskórkowości na rezystancję rdzenia stalowego. Ponieważ rezystywność rośnie ze wzrostem temperatury, współczynnik naskórkowości maleje – ilustruje to wykres na rysunku 5a.



Rys. 5. Wpływ temperatury i średnicy przewodu na rezystancję dla prądu przemiennego: a) zależność stosunku rezystancji dla prądu przemiennego do rezystancji dla prądu stałego R_{ac}/R_{dc} ; b) zależność rezystancji przewodu dla prądu przemiennego R_{ac} od temperatury

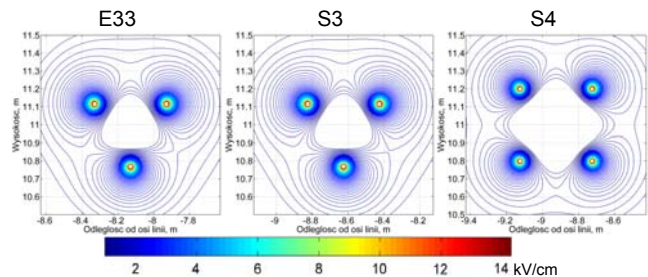
W przewodach ACSR, rdzeń składający się z jednego lub większej liczby drutów stalowych, jest otoczony jedną lub kilkoma warstwami oplotu z drutów wykonanych najczęściej z aluminium. Druty w kolejnych warstwach są nawinięte w przeciwnych kierunkach. Prąd płynący w poszczególnych warstwach wytwarza zmienne pole elektromagnetyczne, którego efektem jest powstanie w rdzeniu strumienia magnetycznego – podobnie jak ma to miejsce w rdzeniu transformatora. W przypadku przewodów z parzystą liczbą warstw aluminiowych strumienie magnetyczne pochodzące od poszczególnych warstw praktycznie wzajemnie się znoszą, i pozostaje niewielki strumień szczytkowy. W przypadku nieparzystej liczby warstw, aluminiowych, strumień magnetyczny w rdzeniu osiąga znaczną wartość, tym większą im większa wartość prądu. Efektem dużej wartości strumienia magnetycznego w rdzeniu są prądy wirowe oraz histereza, co podobnie jak w transformatorze, powoduje dodatkowe straty mocy w rdzeniu. Dodatkowym, niekorzystnym zjawiskiem jest zmiana rozplywu prądu pomiędzy poszczególne warstwy aluminiowe (prąd płynący w poszczególnych warstwach nie jest proporcjonalny do konduktancji tych warstw) – jest to tzw. „efekt transformatorowy” [8, 9]. W wyniku nierównomiernego rozplywu prądu pomiędzy warstwy, powstają dodatkowe straty mocy w przewodzie. Sposób obliczania rezystancji dla prądu przemiennego przewodu z rdzeniem stalowym podano m.in. w [9]. Zależność stosunku rezystancji dla prądu przemiennego do rezystancji dla prądu stałego R_{ac}/R_{dc} od wartości prądu płynącego w przewodzie, przy różnych średnicach rdzenia stalowego dla przewodu z rdzeniem stalowym i dwoma oraz trzema warstwami przewodzącymi pokazano na rysunku 6.



Rys. 5. Zależność stosunku R_{ac}/R_{dc} od prądu płynącego w przewodzie przy różnych średnicach rdzenia stalowego i liczbie warstw oplotu aluminiowego

Wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodów linii elektroenergetycznych jest niezbędna do oceny skutków ulotu elektrycznego, takich jak poziom hałasu, poprzeczne straty mocy oraz zakłócenia radioelektryczne. Do analizy zastosowano metodę symulacji ładunków, która polega na zastąpieniu przewodników o zadanych wartościach potencjałów ładunkami dobranymi tak, aby ich pole elektryczne było identyczne z polem wyjściowym. Obliczenia największych wartości natężenia pola elektrycznego na powierzchni projektowanych przewodów, wykonano przy różnych odległościach przewodów w wiązce (dla dwóch wariantów rozmieszczenia przewodów na słupach, tj. przy założeniu, że dolne fazy przewodów są jednoimienne oraz różnoimienne. Wyniki te zostały wykorzystane do obliczeń poziomu hałasu powodowanego przez ulot. Przykładowe rozkłady natężenia pola elektrycznego w otoczeniu najniższej położonej wiązki 3-przewodowej wykonanej z przewodu 408-AL1F/34-UHST (referencyjnego) na słupie serii E33

(wariant E33) i z przewodu 468/24-A1F/UHST-261 na nowym słupie (wariant S3) oraz czteroprzewodowej z przewodu 350/24-A1F/UHST-227 (wariant S4) pokazano na rysunku 7. Natomiast w tabeli 3 zestawiono maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego, napięcia początkowego ulotu oraz poprzecznych strat mocy.



Rys. 7. Rozkład natężenia pola elektrycznego wokół dolnej wiązki przewodów

Tabela 3. Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego, początkowe międzyfazowe napięcie ulotu oraz jednostkowe poprzeczne straty mocy

Wyszczególnienie	Natężenie pola elektrycznego, kV/cm dla wariantu					
	E33		S3		S4	
	FDJ ¹⁾	FDR ²⁾	FDJ	FDR	FDJ	FDR
Przewód odgromowy	9,42	3,46	9,41	3,60	10,46	4,17
Wiązka fazy górnej	13,73	15,25	13,77	15,19	12,64	14,12
Wiązka fazy środkowej	15,15	15,14	15,17	15,17	13,97	13,97
Wiązka fazy dolnej	14,26	15,22	14,30	15,16	13,33	14,14
Napięcie początkowe ulotu, kV	369	366	368	368	400	395
Poprzeczne straty mocy, kW/km	16,6	18,3	17,1	17,3	2,9	4,4

¹⁾ FDJ – fazy dolne jednorodne, ²⁾ FDR – fazy dolne różnoimienne

Do obliczeń i analiz stanów nieustalonych linii elektroenergetycznych wykorzystuje się parametry schematu zastępczego linii dla składowych symetrycznych (zgodnej i zerowej). Wartości tych parametrów zależą od parametrów przewodów roboczych i odgromowych, ich odległości względem siebie oraz od ziemi, a także od rezystancji gruntu (założono, że rezystywność gruntu wynosi 100 Ω m). Obliczenia parametrów wykonano wykorzystując program EMTP-ATP [10, 11]. Wyniki obliczeń dla wariantów E33, S3 i S4 zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry schematu zastępczego dwutorowych linii 400 kV dla składowej symetrycznej zgodnej i zerowej

Parametr	Wariant		
	E33	S3	S4
Rezystancja zgodna jednego toru, Ω /km	0,0245	0,0216	0,0215
Reaktancja zgodna jednego toru, Ω /km	0,2917	0,2919	0,2742
Pojemność zgodna jednego toru, nF/km	12,50	12,50	13,30
Rezystancja zerowa jednego toru, Ω /km	0,1687	0,1664	0,1655
Reaktancja zerowa jednego toru, Ω /km	0,7988	0,7986	0,7708
Pojemność zerowa jednego toru, nF/km	6,90	6,90	7,30
Rezystancja wzajemna zerowa torów I-II, Ω /km	0,1444	0,1449	0,1442
Reaktancja wzajemna zerowa torów I-II, Ω /km	0,4330	0,4253	0,4213
Pojemność wzajemna zerowa torów I-II, nF/km	0,73	0,67	0,73

Obliczenia strat energii w linii

Jednym z głównych czynników decydujących o wyborze przewodów były straty energii w linii. Chwilowe straty mocy są proporcjonalne do rezystancji, a ta zależy zarówno od temperatury przewodu jak i natężenia prądu płynącego przewodem, dlatego obliczenie strat wymaga znajomości obu tych wielkości. Średnie wartości prądu płynącego w liniach przesyłowych są rejestrowane w interwałach 15 lub 60 minutowych. Temperatura przewodów zależy od prądu płynącego w przewodzie oraz od warunków atmosferycznych w otoczeniu linii. Wyznaczenie temperatury przewodu wymaga rozwiązania równania bilansu mocy ciepłej dostarczonej i oddanej z powierzchni przewodu:

$$(1) \quad P_{ac} + P_S - P_C - P_R = 0$$

gdzie: P_{ac} – moc wydzielona w przewodzie w wyniku prądu płynącego przez przewód, w W/m, P_S – moc zaabsorbowana przez przewód na skutek promieniowania słonecznego, w W/m, P_C – moc oddawana z przewodu poprzez konwekcję, w W/m, P_R – moc oddawana z przewodu poprzez promieniowanie, w W/m.

Moc wydzielona w przewodzie w wyniku prądu płynącego przez przewód, zależy od kwadratu wartości prądu oraz rezystancji przewodu. W przypadku prądu przemiennego konieczne jest uwzględnienie zjawisk wynikających z oddziaływania zmiennego pola elektromagnetycznego takich jak efekt naskórkowości, a w przypadku przewodów z rdzeniem ferromagnetycznym straty w rdzeniu (prądy wirowe, histereza) oraz zmianę gęstości prądu w poszczególnych warstwach przewodu w wyniku oddziaływania pola elektromagnetycznego.

Moc cieplna zaabsorbowana przez przewód w wyniku promieniowania słonecznego zależy od szeregu czynników, takich jak: intensywność promieniowania padającego na powierzchnię przewodu, intensywność promieniowania rozproszonego, absorpcyjności powierzchni przewodu, refleksyjności otoczenia linii elektroenergetycznej i zmienia się w szerokim zakresie w zależności od pory doby, dnia roku, szerokości geograficznej i usytuowania linii w przestrzeni oraz stanu powierzchni przewodu (wieku linii). Ilość ciepła oddawanego przez przewód w wyniku konwekcji zależy od temperatury przewodu i otoczenia, prędkości i kierunku wiatru, a moc wypromieniowana drogą radiacji zależy od temperatury przewodu oraz od emisyjności jego powierzchni [5, 6, 12].

Numeryczne rozwiązanie równania bilansu ciepłego, przy znanej wartości prądu płynącego w przewodzie oraz znanych warunkach atmosferycznych w otoczeniu linii, pozwala obliczyć moc wydzieloną w przewodzie w wyniku prądu płynącego przewodem. Całkowite straty mocy w jednym torze linii oblicza się jako iloczyn liczby faz, liczby przewodów w wiązce L_{pw} i mocy P_{ac} wydzielonej w pojedynczym przewodzie:

$$(2) \quad \Delta P_L = 3 \cdot L_{pw} \cdot P_{ac}$$

Straty energii w okresie T są całką z chwilowych strat mocy po czasie:

$$(3) \quad \Delta E = \int_{t=0}^{t=T} \Delta P(t) \cdot \Delta t$$

gdzie: $\Delta P(t)$ – straty mocy w chwili t . Przyjmując $\Delta t = 1$ godz. oraz zakładając, że wartość prądu płynącego linią jest stała w czasie Δt , wówczas całkę w wyrażeniu (3) można zastąpić sumą:

$$(4) \quad \int_{t=0}^{t=T} \Delta P(t) \cdot 1 = \sum_{t=1}^{t=T} \Delta P(t)$$

Jeśli za okres analizy przyjąć 1 rok ($T = 8760$ godz.) oraz $\Delta P(t) = P_{ac}(t)$, wówczas wyrażone w kWh, roczne, podłużne straty energii w odcinku linii o długości 1 km będą równe:

$$(5) \quad \Delta E_L = 3 \cdot L_{pw} \cdot \sum_{t=1}^{t=8760} P_{ac}(t)$$

Obliczenia podłużnych strat w linii z projektowanymi przewodami wykonano zakładając, że linia w poszczególnych interwałach czasu jest obciążona analogicznie jak rzeczywista linia 400 kV. Do obliczeń przyjęto dostarczone przez operatora sieci obciążenia trzech linii 400 kV: Kozienice – Miłosna (KOZ-MIL), Rogowiec – Płock (ROG-PLO) i Płock – Grudziądz (PLO-GRU), zarejestrowane w 60-minutowych interwałach czasowych w okresie od 1 grudnia 2014 r. do 30 listopada 2015. Do obliczeń przyjęto warunki atmosferyczne zaczerpnięte ze strony internetowej Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa [13] w postaci plików zawierających dane typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych dla obszaru Polski dla stacji meteorologicznych położonych najbliżej linii, dla których wykonywano obliczenia. Obliczenia strat wykonano dla 9 konstrukcji przewodów wytypowanych przez operatora sieci. Wyniki porównania podłużnych strat energii w liniach z wiązką 3 przewodową wykonaną z przewodu 468/24-A1F/UHST-261 i czteroprzewodową wykonaną z przewodu 350/24-A1F/UHST-227 ze stratami w liniach z wiązką 3 przewodową wykonaną z przewodu referencyjnego oraz w liniach z obecnie stosowanymi wiązkami 2 x AFL 8- 525 i 3 x AFL 8-350 zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Porównanie strat w liniach z przewodami wybranymi ze stratami w liniach przewodami referencyjnymi

	Przewody referencyjne			Przewody wybrane	
	AFL 8-525	AFL 8-350	408-AL1F/34-UHST	468/24-A1F/UHST-261	350/24-A1F/UHST-227
Linia	Straty energii w linii, [MWh/km/rok]				
KOZ-MIL	211,6	198,9	175,0	153,0	148,5
ROG-PLO	245,3	230,8	203,0	177,7	172,8
PLO-GRU	101,0	95,1	83,6	73,3	71,4
	Ograniczenie strat w stosunku do strat w linii z przewodami 3 x 2 x AFL 8-525, [%]				
KOZ-MIL	–	6,0	17,3	27,7	29,8
ROG-PLO	–	5,9	17,2	27,6	29,6
PLO-GRU	–	5,8	17,2	27,4	29,3
	Ograniczenie strat w stosunku do linii z przewodami 3 x 3 x AFL 8-350, [%]				
KOZ-MIL	–	–	12,0	23,1	25,4
ROG-PLO	–	–	12,0	23,0	25,1
PLO-GRU	–	–	12,1	22,9	25,0
	Ograniczenie strat w stosunku do linii z przewodami 3 x 3 x 408-AL1F/34-UHST [%]				
KOZ-MIL	–	–	–	12,6	15,1
ROG-PLO	–	–	–	12,5	14,9
PLO-GRU	–	–	–	12,4	14,7

Z danych zestawionych w tablicy 5 wynika, że dzięki zastosowaniu nowych, niskostratnych przewodów możliwe jest ograniczenie obciążeniowych strat energii w liniach przesyłowych o około 12% do 15%, w stosunku do linii z przewodami 3 x 408-AL1F/34-UHST, a w stosunku do linii przewodami 3 x AFL 8-350 o 23% do ponad 25%.

Hałas od przewodów i linii

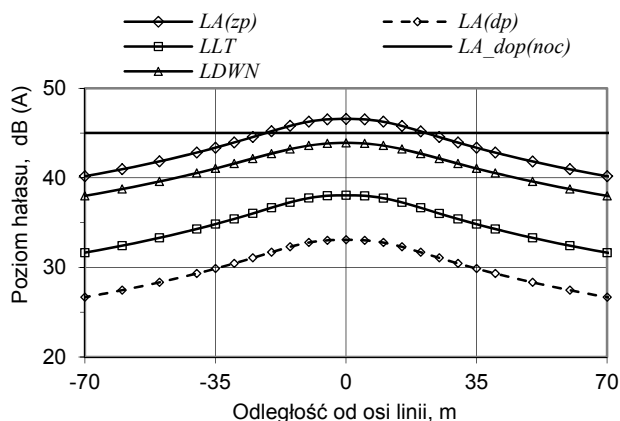
Hałas w liniach elektroenergetycznych najwyższych napięć pochodzi głównie od ulotu elektrycznego. Do czynników wywołujących ulot, a zatem i związany z nim hałas, można zaliczyć napięcie robocze linii oraz geometrię układu faz, geometrię wiązki przewodów fazowych oraz konstrukcję przewodów składowych wiązki. Pozostałe czynniki mające charakter losowy to warunki pogodowe, stan techniczny i zabrudzenie powierzchni przewodów i innych elementów toru przesyłowego, będących pod napięciem. W danym układzie geometrycznym czynnikami decydującymi o emisji hałasu będą zatem: rodzaj przewodu, jego stan techniczny, zabrudzenie oraz warunki pogodowe. W celu zbadania wpływu samych przewodów składowych wiązki na poziom emitowanego hałasu, do obliczeń przyjęto pozostałe parametry jako stałe, takie same dla wszystkich analizowanych wariantów.

Podstawowym parametrem charakteryzującym źródło hałasu jest moc akustyczna, a w przypadku obiektu liniowego – jednostkowa moc akustyczna, LWA . Rozkład mocy akustycznej zależy od położenia przewodów danej fazy, kolejności faz w układach wielotorowych, a także wysokości zawieszenia nad ziemią. Jednostkowa moc akustyczna (dla odcinka o długości 1 m) jest obliczana oddzielnie dla każdej fazy w warunkach dobrej i złej pogody. Obliczenia wykonano dla 3- i 4-przewodowej wiązki z odstępem przewodów wynoszącym 400 mm. Obliczenia prowadzono dla średniej ilości opadów deszczu 1,2 mm/h oraz bez opadów, dla przewodów suchych przy zabrudzeniu 0,6 w skali $0,4 \div 1,0$ (czyli dla przewodów lekko zabrudzonych w dobrym stanie technicznym). Jednostkową moc akustyczną wyznaczono w środku przęsła dla zgodnej i przeciwniej kolejności faz, oddzielnie dla każdej fazy. Wyznaczono też moc sumaryczną pochodzącą od wszystkich faz. Rozkłady wskaźników hałasu wyznaczono dla wszystkich rozważanych konstrukcji przewodów niskostratnych w przekrojach poprzecznych w środku przęsła na wysokości dolnej fazy 10 m nad poziomem terenu, a dla nowych konstrukcji słupów także przy innych wysokościach. Obliczono także prognozowane wartości wskaźników hałasu na granicy pasa technologicznego (35 m od osi linii) oraz zasięgami izofony 45 dBA, tj. najczęściej przyjmowanej dopuszczalnej wartości emisji hałasu w porze nocnej. Wszystkie obliczenia rozkładów wskaźników hałasu wykonano w punktach odbioru na wysokości 4 m nad poziomem terenu.

Otrzymane wartości poziomu hałasu były podstawą do porównania badanych przewodów między sobą, a także z przewodem referencyjnym (408-AL1F/34-UHST). Rozkład wskaźników hałasu w czasie dobrej, $LA(dp)$ i złej pogody, $LA(zp)$ oraz wskaźników długookresowych, LLT i dziennowieczorowo-nocnych $LDWN$ [14, 15] pokazano na rysunku 7. Otrzymane wyniki obliczeń wskazują, że zdecydowana większość analizowanych przewodów w układzie wiązki 3 przewodowej charakteryzuje się poziomami mocy akustycznej niższymi niż 71,4 dBA (tylko w nielicznych przypadkach wartości te były przekroczone). Przy innych wysokościach zawieszenia dolnej fazy, jak również w innej geometrii układu faz wartość ta będzie inna. I tak w wariantach E33 oraz S3 i wysokości zawieszenia dolnej wiązki 17,4 m, $LWA(gr) = 71,8$ dBA, natomiast w wariantach S4 i wysokości zawieszenia przewodu 16,1 m, $LWA(gr) = 71,6$ dBA. Linie w układach z wiązką czteroprzewodową generalnie charakteryzują się niższym o kilka dB poziomem emitowanego hałasu przy podobnej obciążalności linii.

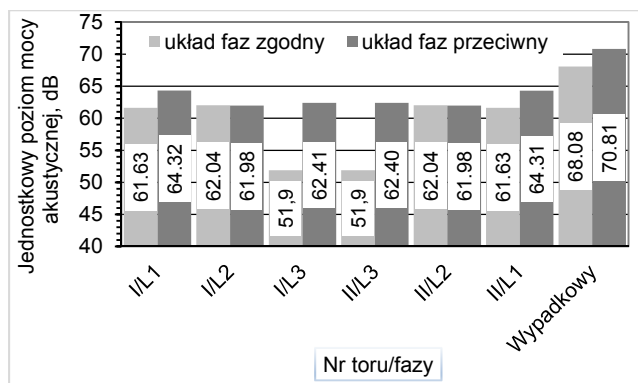
Zbadano też wpływ odległości przewodów wiązki na poziom generowanej mocy akustycznej, zmieniając tą odległość w zakresie od 300 mm do 500 mm ze skokiem co 50 mm. Wraz ze wzrostem tej odległości zwiększa się poziom jednostkowej mocy akustycznej od 68,8 dBA przy

odległości 300 mm do 72,6 dBA przy odległości 500 mm. Przy standardowej odległości 400 mm, jednostkowa moc akustyczna wynosi 70,8 dBA.



Rys. 7. Prognozowany rozkład hałasu od ulotu elektrycznego na wysokości 4 m nad poziomem terenu w środku przęsła 2-torowej linii 400 kV z 3-przewodową wiązką przewodów wykonaną z przewodu 468/24-A1F/UHST-261

Innym, wykorzystanym do celów porównawczych parametrem, jest sumaryczna moc akustyczna, której wartość graniczna, $LWA_{(gr)}$, w przyjętym układzie geometrycznym zawieszenia faz, jak na słupach serii E33, nie powinna przekraczać 71,4 dBA. Wartości jednostkowych mocy akustycznych poszczególnych faz w układzie zgodnym i przeciwnym kolejności faz pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Wpływ kolejności faz na sąsiednich torach na poziom jednostkowej mocy akustycznej

Wnioski

1. Ograniczenie strat energii elektrycznej w przewodach napowietrznych linii przesyłowych można dokonać w sposób intensywny (nowe materiały przewodzące o wyższej konduktywności, nowoczesne konstrukcje przewodów) lub ekstensywny (wzrost przekroju elektrycznie czynnego na drodze powiększenia średnicy przewodów). W analizowanych w artykule przewodach niskostratnych wykorzystano koncepcję intensyfikacji przesyłu energii poprzez ograniczenie strat wykorzystując nowe materiały nośne i przewodzące oraz korzystną budowę geometryczną przewodów.

2. Zastosowanie nowoczesnych gatunków ultra wysokowytrzymałej stali pozwala zmniejszyć przekrój czynny rdzenia nośnego i zwiększyć przekrój czynny oplotu co skutkuje zmniejszeniem rezystancji liniowej przy zachowaniu wytrzymałości, średnicy i masy porównywalnej do tradycyjnych przewodów stalowo-aluminiowych.

3. Wyeliminowanie słabo przewodzącego stalowego rdzenia nośnego i wykorzystanie zaawansowanych stopów na osnowie aluminium w przewodach AAAC i ACAR przy równoczesnych zmianach konstrukcyjnych przewodu pozwala uzyskać rozwiązania o najkorzystniejszej proporcji wytrzymałości do masy i nieosiągalnych dla przewodów stalowo-aluminiowych, wartościach rezystancji linii. Równocześnie przewody takie z uwagi na swoje parametry fizyczne wykazują większą podatność na drgania eolskie i większy przyrost zwisu w przęśle wraz ze wzrostem temperatury w porównaniu z przewodami stalowo-aluminiowymi.

4. W ramach badań opracowano projekty nowych oryginalnych przewodów niskostratnych, których zastosowanie w liniach przesyłowych pozwala na redukcję strat w porównaniu do przewodów referencyjnych (aktualnie stosowanych lub dopuszczonych do stosowania) nawet o 30%.

5. Zastosowanie nowego przewodu niskostratnego, 468/24-A1F/UHST-261, dedykowanego dla wiązki 3-przewodowej praktycznie nie powoduje zmian masy słupów (P i M3) w stosunku do słupów dedykowanych dla przewodu referencyjnego.

6. Pełne wykorzystanie zwiększonej wytrzymałości na zerwanie *RTS* nowych przewodów może spowodować konieczność zastosowania izolatorów o większej wytrzymałości niż stosowane dotychczas tzn. 160 kN i 210 kN.

7. Analizując odporność zaproponowanych przewodów na drgania, grupą przewodów najlepiej ocenianych z punktu widzenia samotłumienności jest grupa przewodów stopowo-aluminiowych. Dobre właściwości tłumienia wewnętrznego wynikają z zastosowanych materiałów i konstrukcji przewodów. W tej grupie szczególnie należy wyróżnić przewody przeznaczone do zastosowania w wiązkach czteroprzewodowych.

8. Z punktu widzenia minimalizacji wymuszenia drgań odcinkowych korzystniejsze są większe odległości między przewodami w wiązkach, jednak wzrost odległości powyżej ok. 45 cm nie daje już znaczących korzyści. Siły aerodynamiczne w wiązce 4 przewodowej są mniejsze niż w wiązce 3 przewodowej (przy zachowaniu tej samej odległości między przewodami). Biorąc pod uwagę podział ze względu na budowę przewodów korzystnie prezentują się przewody stopowe i stopowo-aluminiowe przeznaczone do zastosowania w wiązkach 4 przewodowych.

9. Poziom jednostkowej mocy akustycznej od ulotu elektrycznego w danym układzie geometrycznym faz, konstrukcji wiązki przewodów fazowych oraz warunków pogodowych, zależy od średnicy i stanu powierzchni przewodu składowego wiązki. Przewody o średnicy 26,1 mm z zewnętrzną warstwą z drutów okrągłych charakteryzują się wyższym o 3,4 dBA poziomem jednostkowej mocy akustycznej niż przewody o takiej samej średnicy z zewnętrzną warstwą drutów trapezowych.

10. W danym układzie geometrycznym i konstrukcyjnym linii obniżenie hałasu można uzyskać zwiększając wysokość zawieszenia przewodów (ok. 1-2 dBA), a w przypadku linii wielotorowych, stosując przeciwną kolejność faz (ok. 2,7 dBA).

Autorzy

Tadeusz Knych, e-mail: tknych@agh.edu.pl

Andrzej Mamala, amamala@agh.edu.pl

Akademia Górniczo-Hutnicza

Katedra Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych

30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,

Wiesław Nowak, wieslaw.nowak@agh.edu.pl

Waldemar Szpyra, wspyra@agh.edu.pl

Rafał Tarko, rtarko@agh.edu.pl

Akademia Górniczo-Hutnicza

Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki,

30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30

Andrzej Kowalczyk, andrzej.kowalczyk@pse.pl

Irena Kuczkowska, irena.kuczkowska@pse.pl

Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.

05-520 Konstancin-Jeziorna, ul. Warszawska 165

Halina Argasińska, H.Argasinska@energo.krakow.pl

Krzysztof Ściobłowski, k.scioblowski@energo.krakow.pl

Biuro Studiów i Projektów Energetycznych

Energoprojekt-Kraków SA

ul. Mazowiecka 21, 30-019 Kraków

LITERATURA

1. Knych T.: Elektroenergetyczne przewody napowietrzne. Teoria – materiały – aplikacje, Wydaw. Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, 2010.
2. PN-EN PN-EN50182:2002 Przewody do linii napowietrznych - Przewody z drutów okrągłych skręconych współosiowo.
3. PN-EN 62219:2003 Przewody elektryczne do linii napowietrznych - Przewody skręcone warstwowo z drutów profilowych.
4. PN-EN 50341-2-22:2016 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV - Część 2-22: Krajowe Warunki Normatywne (NNA) dla Polski.
5. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines, CIGRE Technical Brochure 601, Paris, December 2014, ISBN: 978-2-85873-302-6.
6. IEEE 738-2012, Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors.
7. Morgan V.T. and Price C.F.: "Magnetic properties in axial 50 Hz fields of steel core wire for overhead conductors", Proc. IEE, Vol. 116, No. 10, pp. 1681-1694, 1969.
8. Zaborszky J.: "Skin and Spiraling Effect in Stranded Conductors", AIEE Trans. PAS, Vol 72, January 1953, pp. 599-603, ISSN: 0097-24-60, DOI: 10.1109/AIEEPAS.1953.4498672.
9. Alternating current resistance of helically stranded conductors, CIGRE Technical Brochure 345, Paris, April 2008 ISBN: 978-2-85873-033-9.
10. Electromagnetic Transients Program. Theory Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, 1995.
11. Alternative Transients Program. Rule Book. Canadian/American EMTP User Group, 1987-92.
12. Wydra M., Kacejko P.: "Power System State Estimation Accuracy Enhancement Using Temperature Measurements of Overhead Line Conductors, Metrology and Measurement Systems, Vol. 23 (2016), No. 2, pp. 183-192, DOI: 10.1515/mms-2016-0014.
13. http://mib.gov.pl/2-Wskazniki_emisji_wartosci_opalowe_paliwa.htm (dostęp w dniu 31.03.2016).
14. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2002/49/WE z dnia 25 czerwca 2002 r. odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku, Dz. U. L 189 z 18.7.2002, s. 5, 12.
15. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 7 listopada 2007 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie ustalania wartości hałasu L(DWN), Dz.U. Nr 210, poz. 1534 i 1535.