

WPŁYW ULOTU NA HAŁAS EMITOWANY PRZEZ LINIE ELEKTROENERGETYCZNE WYSOKIEGO NAPIĘCIA

The Influence of the Corona Effect on High-Voltage Line Noise Emissions

Zbigniew ENGEL, Tadeusz WSZOŁEK

Akademia Górniczo-Hutnicza

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań hałasu linii elektroenergetycznych prądu przemiennego WN spowodowanego zjawiskiem ulotu. Dotyczą one linii 400kV w dwóch podstawowych układach istniejących w Polsce: jednotorowym płaskim (na słupach serii Y52) oraz dwutorowym pionowym (na słupach serii Z52). Badania środowiskowe w warunkach rzeczywistych prowadzone były w cyklu całorocznym metodą short-term. Oprócz wyników tych badań w pracy omówiono także rezultaty badań laboratoryjnych. Przeanalizowano wpływ parametrów konstrukcyjnych oraz środowiskowych na poziom i kształt widma emitowanego hałasu. Uwzględniono wpływ stanu powierzchni przewodów oraz warunków atmosferycznych na parametry emitowanego hałasu. Dokonano oceny jego wpływu na klimat akustyczny środowiska.

Przeanalizowano możliwości zastosowania znanych procedur obliczeniowych do prognozowania hałasu ulotu linii w warunkach polskich oraz przedstawiono własną postać empirycznego modelu akustycznego linii z możliwością prognozowania hałasu w funkcji opadów deszczu.

Summary: The paper presents the results of investigations of audible noise (AN) of alternating current ultra-high voltage (AC UHV) transmission lines caused by the corona effect. The investigation results concern 400kV lines in two basic layouts used in Poland: single horizontal and double vertical. Environmental investigations were conducted during a whole-year cycle by the short-term method. Apart from the results of the environmental investigations the paper also contains laboratory investigation results. The influence of construction design and environmental parameters on the emitted AN was analysed, taking into account the influence of the conductor surface state and weather conditions on the AN emission parameters. The influence of line AN on the acoustic climate of the environment was evaluated.

The possibilities of using well known computational procedures to predict audible line noise caused by the corona effect in Polish conditions was analysed. An original line acoustic model able to predict audible noise as a function of rainfall is presented.

1. WSTĘP

Pracująca napowietrzna linia elektroenergetyczna prądu przemiennego najwyższych napięć jest źródłem hałasu spowodowanym zjawiskiem ulotu. W widmie hałasu linii wyróżnić można dwa charakterystyczne elementy: składową szerokopasmową — szum w zakresie od około 1 do 15kHz, opisywany na przemian jako „smażenie”, „trzaskanie”, „syczenie”, oraz składowe tonalne w zakresie do 200Hz, które są wyższymi harmonicznymi częstotliwości sieciowej [12]. Za najbardziej zauważalne traktuje się „buczenie” drugiej harmonicznej (*hum noise*).

Szum szerokopasmowy spowodowany jest mikrowyładowaniami elektrycznymi (na skutek ulotu) na powierzchni przewodów. Dopóki natężenie pola elektrycznego na powierzchni przewodu jest niższe od krytycznego (natę-

żenia początkowego jonizacji), pojawiają się pojedyncze (losowe) mikrowyładowania z różnych źródeł. Brak jest wówczas składowych tonalnych w widmie hałasu. Pojawiają się one w czasie intensywnego ulotu, kiedy występują regularne wyładowania, a w zjonizowanej przestrzeni wokół przewodu występuje ruch dodatnich i ujemnych jonów na przemian przyciąganych i odpychanych przez przemienne pole elektryczne, dwukrotnie w ciągu okresu. Ten ruch jest źródłem fali akustycznej o podwójnej częstotliwości sieciowej (w Polsce jest to 100Hz) decydującej o uciążliwości hałasu linii dla środowiska.

W prawidłowo zaprojektowanej linii prądu przemiennego ulot występuje jedynie podczas tzw. złych warunków atmosferycznych, do których zaliczono deszcz, mgłę, mokry śnieg oraz dużą wilgotność. W pracy przedstawiono wyniki badań hałasu emitowanego przez linie elektro-

nergetyczne 400kV pracujące w Polsce oraz przeanalizowano ich wpływ na klimat akustyczny środowiska.

Do realizacji badań opracowano własną metodę pomiarową, uwzględniającą pewne cechy charakterystyczne hałasu linii, a w szczególności kształt widma oraz dużą zależność od warunków atmosferycznych. Na podstawie badań całorocznych wyznaczono typowe zasięgi uciążliwości linii w różnych warunkach atmosferycznych (dobra pogoda, duża wilgotność, lekki, średni i intensywny deszcz, mgła, mokry śnieg) dla środka przęsła oraz dla osi słupów typu ON (odporowo-naróżnych).

W pracy przedstawiono pewne cechy charakterystyczne widma hałasu ulotu linii, pokazano typowe rozkłady poziomu dźwięku wzdłuż przęsła oraz przeanalizowano parametry mające dominujący wpływ na jego poziom.

W Polsce do inwestycji szczególnie uciążliwych dla środowiska zaliczono linie 400kV [10]. Przechodzą one coraz częściej przez tereny zurbanizowane, chronione przed nadmierną emisją hałasu. Powoduje to konieczność przewidywania oddziaływania hałasu linii na środowisko na etapie projektowania. W pracy przeanalizowano krótko możliwości zastosowania istniejących procedur obliczeniowych do prognozowania hałasu linii oraz przedstawiono własny, empiryczny model akustyczny linii uwzględniający intensywność opadów deszczu.

2. ŹRÓDŁA HAŁASU LINII WN

Hałas linii elektroenergetycznych spowodowany zjawiskiem ulotu zależy jest od następujących parametrów [10]:

- parametrów technicznych linii — napięcia fazowego, geometrii układu przesyłowego,
- parametrów środowiskowych — warunków atmosferycznych, terenowych,
- stanu technicznego linii — stanu powierzchni przewodów, wieku przewodów.

Z punktu widzenia emisji hałasu najważniejsza jest znajomość maksymalnego natężenia pola elektrycznego, jakie może wystąpić na powierzchni przewodu, gdyż stanowi ono podstawową daną przy określaniu spodziewanego poziomu emitowanego hałasu. Znanych jest kilka metod obliczeniowych natężenia pola [11], jednak ze względów praktycznych najchętniej jest stosowana metoda Markta i Mengela z różnymi adaptacjami. W niniejszej pracy wykorzystano jedną z adaptacji powyższej metody [5], wg której zależność określająca maksymalną wartość pola elektrycznego na powierzchni przewodów ma następującą postać:

$$E = \frac{U}{\sqrt{3} nr \ln \frac{2h_s b_s}{H_s \sqrt[n]{rc^{n-1}}}} \left\{ 1 + \frac{r}{c} \left[2(n-1) \sin \frac{\pi}{n} \right] \right\} \quad (1)$$

gdzie:

- E — natężenie pola elektrycznego na powierzchni przewodu, kV/cm;
- U — napięcie międzyprzewodowe linii, kV;
- h_s — średnia geometryczna wysokość zawieszenia przewodów nad ziemią, m;

b_s — średnia geometryczna odległość między przewodami, cm;

H_s — średnia geometryczna z odległości zwierciedlanego odbicia przewodów rzeczywistych linii trójfazowej, m;

r — promień przewodu, cm;

n — liczba przewodów w wiązce;

c — odstęp przewodów w wiązce, cm.

Jak widać z powyższej zależności, wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodów zależy od napięcia fazowego, promienia przewodu, liczby przewodów i odległości między nimi w wiązce, odległości pomiędzy przewodami fazowymi oraz wysokości zawieszenia. Zjawisko ulotu, a więc i emitowany hałas, wystąpi intensywnie wówczas, gdy natężenie pola elektrycznego na powierzchni przewodu przekroczy tzw. wartość krytyczną E_0 . Wartość ta zależy ściśle od napięcia krytycznego linii U_0 , które wyraża się wzorem podanym przez Peekę [5]:

$$U_0 = 48,9 m_a m_p \sigma r \log \frac{b_s}{r} \quad (2)$$

gdzie:

U_0 — napięcie fazowe, krytyczne linii, kV;

m_a — współczynnik zależny od stanu pogody: pogoda sucha, słoneczna — $m_a = 1$, pogoda mglista, deszczowa — $m_a = 0,8$;

m_p — współczynnik zależny od stanu powierzchni przewodu: przewód jednodrutowy gładki — $m_p = 1$, przewód jednodrutowy szorstki — $m_p = 0,93-0,98$, przewód wielodrutowy — $m_p = 0,85$, itp;

σ — gęstość powietrza, względna;

r — promień przewodu (dla przewodów wiązkowych promień zastępczy), cm;

b_s — średnia geometryczna odległość między przewodami, cm.

Ulot może pojawiać się także w miejscach o dużej nierównomierności powierzchni spowodowanej uszkodzeniem (np. zadrapania powstałe podczas montażu, rozwarstwienia przewodu, itp) lub zabrudzeniem (pył, martwe insekty na przewodzie, itp). Także sam ulot działa niszcząco na przewód, gdyż sprzyja powstawaniu związków azotowych na jego powierzchni.

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania doświadczalne hałasu linii prowadzono w warunkach rzeczywistych, wzdłuż linii 400kV istniejących w Polsce.

3.1. Aparatura i metoda pomiarowa

Z uwagi na brak aktualnie w Polsce odrębnych przepisów określających sposób pomiarów hałasu linii energetycznych, przy opracowywaniu metody skorzystano z normy ANSI/IEEE Std 658-1985 [1,13].

Aparatura pomiarowa. Podstawowym instrumentem zastosowanym do pomiaru poziomu dźwięku był sonometr firmy Bruel & Kjaer typu 2231. Umożliwia on po-

miar m. in. poziomów L_{min} , L_{eq} w pełnym paśmie akustycznym częstotliwości oraz poziomów ważonych za pomocą filtrów A, C, LIN; dynamika pomiarów 70dB w zakresie od 24 do 130dB. Pomiary widma hałasu wykonano w układzie przedstawionym na rysunku 1, przy czym w przypadku badań laboratoryjnych sygnał wprowadzono bezpośrednio do analizatora częstotliwości typu 2133.

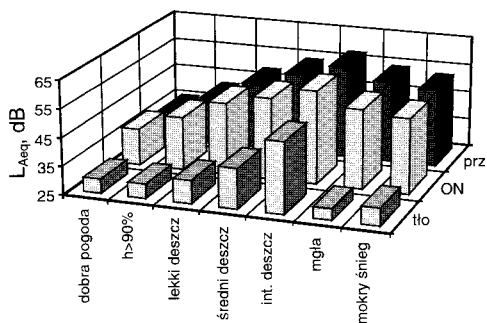
W przypadku badań środowiskowych sygnał rejestrowano na magnetofonie pomiarowym NAGRA IV-SJ.

Analizę widmową sygnału prowadzono w pasmach 1/3 lub 1/12-oktawowych.



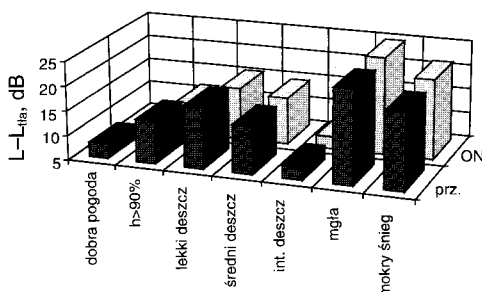
Rys. 1. Schemat toru pomiarowego do rejestracji i analizy sygnału akustycznego

	tło	ON	prz.
dobra pogoda	30	38,0	35,1
h>90%	30	43,7	41,4
lekki deszcz	33	50,4	48,5
średni deszcz	39	53,7	53,5
int. deszcz	50	57,8	57,5
mgła	29	53,0	53,7
mokry śnieg	31	51,5	52,2



Różnice poziomu hałasu linii i tła akustycznego od opadów atmosferycznych

	prz.	ON
dobra pogoda	8,0	5,1
h>90%	13,7	11,4
lekki deszcz	17,4	15,5
średni deszcz	14,7	14,5
int. deszcz	7,8	7,5
mgła	24,0	24,7
mokry śnieg	20,5	21,2



Rys. 2. Wyniki pomiarów poziomu dźwięku A hałasu ulotu linii 400kV na słupach serii Z52 podczas różnych warunków atmosferycznych w odległości 15m od rzutu skrajnego przewodu

Metoda pomiarowa. W przypadku badań środowiskowych stosowano metodę short-term, polegającą na pomiarach akustycznych w charakterystycznych warunkach atmosferycznych, istotnych pod względem emitowanego hałasu.

Punkty pomiarowe lokalizowano w odległościach 15, 30 i 60m od rzutu skrajnej fazy na środku przęsła oraz na osi słupów typu ON (odporowo-narożnych). Wykonano także pomiar rozkładu widma i poziomu dźwięku A wzdłuż różnych przęseł.

3.2. Badania w warunkach rzeczywistych

Badania w warunkach rzeczywistych przeprowadzono głównie pod kątem oceny wpływu hałasu linii elektroenergetycznej na środowisko oraz określenia parametrów wpływających na jego uciążliwość. Wykonano także badania widmowe w celu wyznaczenia rozkładu charakterystycznych składowych widma hałasu ulotu wzdłuż przęsła podczas dobrych i złych warunków atmosferycznych.

Na rysunku 2 pokazano wyniki pomiarów hałasu linii 400kV na środku przęsła oraz na osi słupa typu ON dla różnych warunków atmosferycznych. W dolnej części rysunku zamieszczono wyniki porównania tych rezultatów z poziomami tła akustycznego.

Jak widać z przedstawionych rezultatów linia podczas dobrej pogody jest na ogół cicha, często ulot jest niesłyszalny, a średni poziom dźwięku A w odległości 15m wynosi od 35dB na środku przęsła do około 38dB na osi słupa typu ON. Wahania poziomu hałasu podczas dobrej pogody są jednak dość duże i wynoszą od około 32 do 44dB. Wraz z pogarszaniem się pogody poziom hałasu rośnie i podczas średnich opadów deszczu (1–2mm/h), mokrego śniegu, intensywnej mgły wynosi 53–54dB, a podczas intensywnego deszczu przekracza nawet 57dB. Największe różnice pomiędzy poziomem hałasu linii, a tłem akustycznym występują podczas intensywnej mgły, mokrego śniegu oraz lekkiego deszczu (mżawki). Ze względu na rzadkość występowania takich zjawisk, jak intensywna mgła, mokry śnieg, w porównaniu z opadami deszczu, w rzeczywistości hałas linii ma największy wpływ na klimat akustyczny w środowisku podczas opadów deszczu, lekkich i średnich. Warto także zwrócić uwagę na podwyższony poziom hałasu linii w czasie pogodnych letnich nocy z dużym opadem rosy (h > 90%). Wówczas, pomimo relatywnie niewielkiego jego poziomu, może on być uciążliwy ze względu na niski poziom tła, jak i często pootwierane okna w budynkach mieszkalnych podczas letnich nocy.

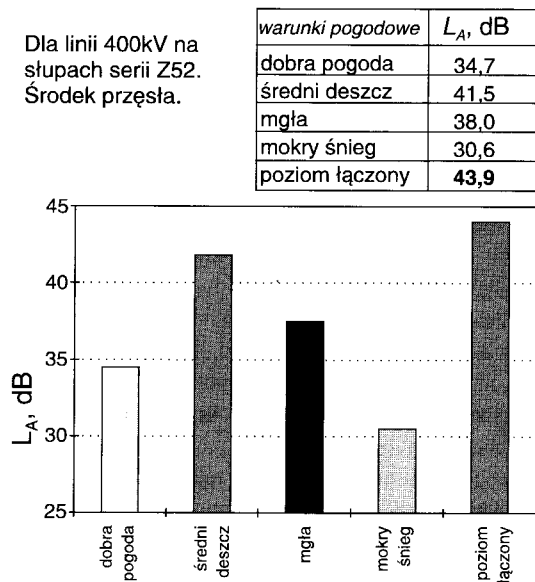
$$L_{Aeq,r} = 10 \log \left(\frac{t_i}{T_r} \cdot 10^{(0,1 \cdot L_{Ai})} \right) \quad (3)$$

gdzie:

- $L_{Aeq,r}$ — poziom równoważny dźwięku dla okresu rocznego, dB;
- t_i — łączny czas trwania danych warunków atmosferycznych w ciągu roku, h;
- L_{Ai} — średni poziom ekwiwalentny podczas danych warunków atmosferycznych, dB;
- T_r — czas odniesienia ($T_r = 8760h$ w ciągu roku).

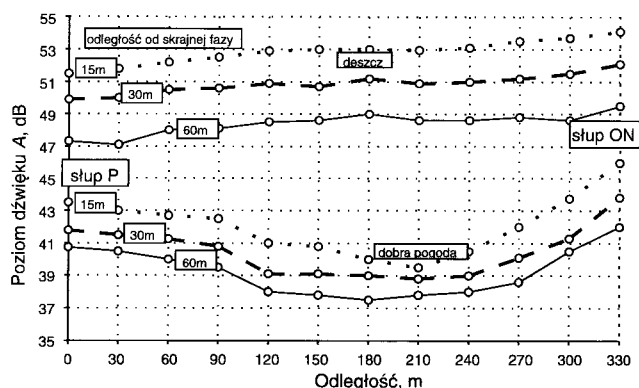
Warto dodać, że wg normy [6], w przypadku oceny uciążliwości hałasów o charakterze okresowym, zalecane jest wyznaczenie poziomów ekwiwalentnych długookresowych, np. rocznych.

Pokazane na rysunku 3 poziomy ekwiwalentne roczne, wyznaczone wg zależności (3) wykazują, iż największy wpływ na klimat akustyczny w środowisku mają warunki deszczowe (średni deszcz) oraz mgła. Wynika to z poziomu emitowanego hałasu oraz czasu ekspozycji.



Rys. 3. Równoważne roczne poziomy dźwięku A dla różnych warunków atmosferycznych

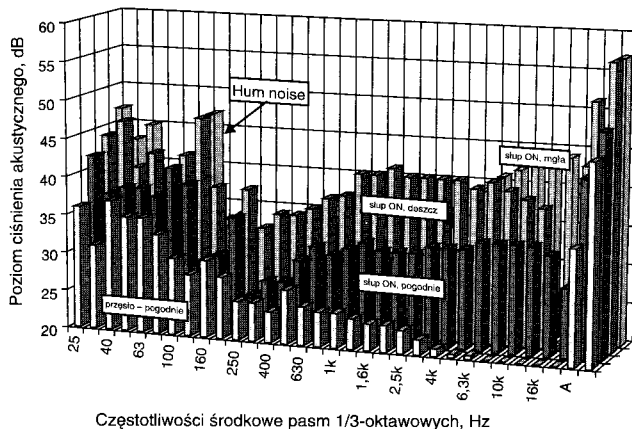
Różne tendencje rozkładu poziomu dźwięku wzdłuż przęsła podczas dobrej i złej pogody pokazano na rysunku 4. Zauważyć można tutaj duże fluktuacje poziomu podczas dobrej pogody z wyraźnym podwyższeniem poziomu na osi słupów, a szczególnie na osi słupa typu ON. Wynika to z dużej koncentracji osprzętu o dużych krzywiznach na słupach tego typu, jak również z mniejszą (na ogół) ich wysokością w stosunku do słupów przelotowych. Podczas deszczu z kolei linia jest zdecydowanie bardziej jednorodnym źródłem hałasu wzdłuż przęsła, wówczas, bowiem deszcz (kropki na powierzchni prze-



Rys. 4. Rozkłady poziomu dźwięku A podczas dobrych i złych warunków atmosferycznych wzdłuż linii 400kV, na słupach serii Z52

wodu) decyduje o intensywności zjawiska ulotu, a zatem o poziomie emitowanego hałasu.

Na rysunku 5 pokazano widma hałasu linii dla różnych warunków atmosferycznych: dobrej pogody, deszczu oraz intensywnej mgły, przy czym dla dobrej pogody są to widma na osi słupa oraz na środku przęsła, dla pozostałych warunków tylko na osi słupa.



Rys. 5. Widma 1/3-oktawowe hałasu linii 400kV podczas różnych warunków atmosferycznych

Takie zestawienie widm podyktowane jest brakiem istotnych różnic, podobnie jak przy rozkładzie poziomu dźwięku wzdłuż przęsła, pomiędzy widmami na osi słupa i na środku przęsła podczas złej pogody. W przedstawionych spektrogramach widoczne są wyraźne cechy hałasu ulotu w przypadku złej pogody (składowa „hum” oraz szerokopasmowa) oraz dla dobrej pogody na osi słupa typu ON. Brak tych cech w widmie hałasu dla środka przęsła wskazuje na brak regularnych wyładowań w tej części przęsła (praktycznie jest to widmo tła akustycznego). Dość charakterystyczne jest natomiast przesunięcie widma w zakresie wyższych częstotliwości w przypadku intensywnej mgły przy podobnym charakterze w zakresie składowych tonalnych.

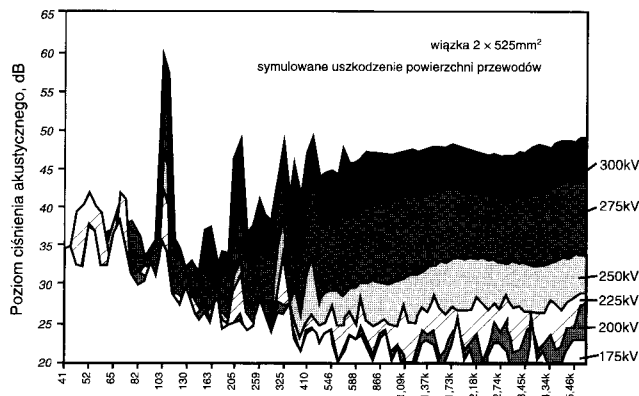
3.3. Badania w warunkach laboratoryjnych

Badania laboratoryjne przeprowadzono w Zakładzie Wysokich Napięć Instytutu Energetyki w Warszawie. Ich celem była weryfikacja doświadczalna przewidywanego efektu obniżenia poziomu emitowanego hałasu przez zastosowanie wiązki trójprzewodowej $3 \times 350\text{mm}^2$ w miejsce istniejącej, dwuprzewodowej $2 \times 525\text{mm}^2$ na liniach 400kV nowo projektowanych. Drugim celem było badanie wpływu symulowanych uszkodzeń powierzchni przewodów na kształt widma hałasu [8].

Badania odbywały się w hali, gdzie powieszona była wiązka przewodów o oryginalnych rozmiarach i osprzęcie, jak na liniach rzeczywistych. Był to układ jednej fazy. Pomiary realizowano dla następujących wariantów:

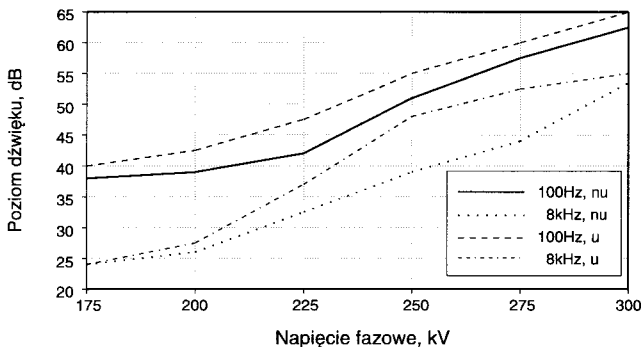
- przewody suche
- przewody mokre (po opadach)
- opady deszczu, ok. 0,8 mm/min
- przewody suche, zasymulowane uszkodzenie jednego przewodu.

Dla wiązki dwuprzewodowej badania prowadzone były dla napięć fazowych 17–300kV, natomiast dla wiązki trójprzewodowej dla napięć 175–350kV. Na rysunku 6 pokazano widma hałasu wiązki dwuprzewodowej z suchymi przewodami z zasymulowanym uszkodzeniem, z napięciem fazowym 175–300kV, tj ok. 303–520kV napięcia międzyfazowego, jak na liniach rzeczywistych.



Rys. 6. Widma 1/12-oktawowe hałasu jednej wiązki przewodów z zasymulowanym uszkodzeniem powierzchni subprzewodu

Widać na nim pojawienie się wyraźnych cech widma hałasu ulotu (składową „hum” oraz szerokopasmową, już przy napięciu 225kV, $U = 390kV$), nieco wcześniej niż dla przewodów z nie uszkodzoną powierzchnią, co uwiadczenia wyraźniej rysunek 7, gdzie pokazano przebiegi składowej A oraz 8kHz w paśmie 1,3-oktawowym.



Rys. 7. Przebiegi składowych 100Hz i 8kHz z uszkodzoną (u) i nieuszkodzoną (nu) powierzchnią subprzewodu

4. MODELOWANIE I PRZEWIDYWANIE

Istniejące modele akustyczne linii na ogół są modelami empirycznymi. Dotyczą hałasu emitowanego przez przewody podczas złych warunków atmosferycznych [2].

$$L_A = k_1 f_1(E) + k_2 f_2(n) + k_3 f_3(d) + k_4 f_4(l) + L_0 + K \quad (4)$$

gdzie:

L_A — prognozowany poziom dźwięku A , dB;

- n — liczba przewodów (subprzewodów) w wiązce;
- d — średnica subprzewodu, cm;
- l — odległość punktu obserwacji od przewodu;
- L_0 — poziom odniesienia dźwięku A , dB;
- K — współczynnik dopasowujący, zależny od parametrów technicznych linii.

Współczynniki k_{1-4} oraz funkcje f_{1-4} wyznaczane są empirycznie na podstawie eksperymentów pomiarowych.

Próba zastosowania wprost istniejących modeli akustycznych do prognozowania hałasu linii istniejących w Polsce wykazała dość duże rozbieżności z rezultatami pomiarowymi. Wyniki te są zaniżone nawet do około 7dB, ponadto odnoszą się do określonych opadów deszczu (średnich lub intensywnych). Nieprecyzyjność określenia intensywności opadów deszczu — średnie, intensywne — oraz duża wrażliwość hałasu linii na opady może być źródłem znaczących błędów, gdyż różnica poziomów emitowanego hałasu podczas lekkich i intensywnych opadów deszczu wynosi blisko 10dB. Stąd uwzględnienie w modelu ich intensywności jest celowe.

Znanych jest kilka prac podejmujących zagadnienie wpływu opadów deszczu na poziom emitowanego hałasu przez linie [7, 8]. Badania takie podjęto także w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH.

Przedstawiony w niniejszej pracy model w części uwzględniającej wpływ opadów deszczu oparto na modelu teoretycznym H. Kirghama i W. J. Jr Gajdy [7] wprowadzając pewne zmiany w części wykładniczej, umożliwiające lepsze dopasowanie modelu do wyników pomiarowych. Postać ogólna modelu jest następująca [13]:

$$L_A = 10 \log \left[E^{8,5} \left(1 - \exp \left(-k\rho \frac{E_0}{E} (E - E_0)^{1,33} \right) \right) \right] + 45 \log d + 18 \log n - 11,4 \log l - L_0 \quad (5)$$

gdzie:

L_A — prognozowany poziom dźwięku A od przewodów jednej fazy, dB;

ρ — intensywność opadów deszczu;

k — współczynnik dobierany doświadczalnie, uwzględniający stan powierzchni przewodu.

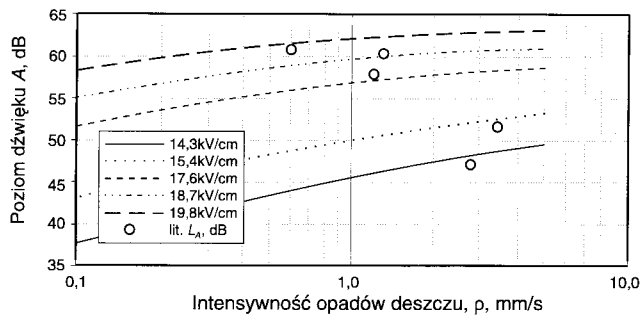
Dopasowanie modelu prowadzono głównie na podstawie wyników badań w warunkach rzeczywistych, na liniach 400kV istniejących w Polsce, dla lekkich, średnich i intensywnych opadów deszczu. Najlepsze dopasowanie uzyskano, stosując metodę najmniejszych kwadratów jako miarę dopasowania, dla wartości współczynnika $k = 0,15$ oraz natężenia krytycznego $E_0 = 11,9kV/cm$, dla środka pręśla.

Na rysunku 8 pokazano porównanie obliczeń poziomu emitowanego hałasu wg zależności (5) z danymi zaczerpniętymi z literatury [8]. Dobra zgodność wyników obliczeniowych z doświadczalnymi wskazuje na możliwość zastosowania modelu do obliczeń hałasu linii dla innych konfiguracji, także występujących za granicą.

Analiza dotychczasowych badań hałasu linii wykazuje, iż możliwa jest adaptacja modelu linii do osi słupów typu ON. Zgodnie ze wzorem Peeka (2) należy oczekiwać ob-

E, kV/cm	ρ , mm/h	lit. L_A , dB	$L_{A, \text{obr}}$, dB	$L_{A, \text{obr}} - L_{A, \text{lit}}$, dB
14,3	2,7	47,4	48,2	0,8
15,4	3,4	51,9	52,6	0,7
17,6	1,2	57,4	57,2	-0,2
18,7	1,3	60,6	60,0	-0,6
19,8	0,6	60,8	61,5	0,7

0,996 współczynnik korelacji
0,63 odchylenie standardowe



Rys. 8. Porównanie wyników prognozowanych wg (5) z danymi literatury zaczerpniętymi z pracy [8]

niżenia napięcia początkowego ulotu, natomiast postać ogólna modelu pozostanie taka sama (5). Dla słupów odporowych (ON) rzeczywiście najlepsze dopasowanie uzyskano dla $E_0 = 10,6 \text{ kV/cm}$, a więc o $1,3 \text{ kV/cm}$ niższym niż dla przewodów.

5. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań sformułować można następujące wnioski:

1. Badane linie elektroenergetyczne AC 400kV są uciążliwym źródłem hałasu, szczególnie podczas złych warunków atmosferycznych. Do warunków tych zaliczono: lekki i średni deszcz, mżawkę, mgłę oraz w mniejszym stopniu mokry śnieg i dużą wilgotność. Podczas intensywnych opadów występuje efekt nasycenia i przy zanikającym hałasie emitowanym przez linię rośnie hałas padającego deszczu — hałas linii staje się porównywalny z hałasem samych opadów już w odległości około 30m. Podczas złych warunków poziom L_{Aeq} w odległości 15m od skrajnego przewodu waha się od 50 do 54dB.
2. Pozostałe z wymienionych złych warunków atmosferycznych — śnieg, duża wilgotność — mają mniejszy wpływ na uciążliwość akustyczną w środowisku z dwóch powodów: (1) występują rzadziej niż opady deszczu oraz (2) emitują niższy poziom hałasu, gdyż przewody są na ogół wówczas tylko mokre. Podczas mgły krople wody deformujące powierzchnię tworzą się dopiero po dłuższym czasie (1–2 godz.). Dotyczy to szczególnie linii o mniejszych natężeniach pola na powierzchni przewodu oraz starych przewodach, jakimi są właśnie przebadane linie.
3. Podczas dobrych warunków atmosferycznych linia jest na ogół cicha, a jej hałas jest porównywalny z poziomem tła środowiska. Poziom L_{Aeq} w odległości 15m najczęściej waha się w granicach 34–36dB, lokalnie występują jednak duże zróżnicowania. Niekiedy wzrost tego poziomu dochodzi do 45dB.

Wszystkie przyczyny tych nierównomierności nie są dokładnie zbadane, choć zaliczyć do nich można uszkodzenia powierzchni przewodów, osprzętu, zabrudzenia, osiadające owady, a także lokalne podwyższenie wilgotności powietrza.

4. W widmie hałasu linii wyróżniono składowe tonalne 100 i 200Hz, pojawiające się podczas intensywnego ulotu, ale i niekiedy w czasie dobrej pogody w rejonie słupów ON. Wskazywać to może na złą jakość osprzętu, stan techniczny, czy silne zabrudzenia.
5. Przedstawiono, opracowany w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH, model akustyczny linii dla środka przęsła oraz dla słupów typu ON. Uwzględniono w nim parametry techniczne linii — napięcie, konfigurację wiązki przewodów — oraz w odróżnieniu od istniejących w świecie, znanych autorom, modeli wprowadzono elementy uwzględniające intensywność opadów deszczu i stan powierzchni przewodu. Dobrano doświadczalnie współczynniki umożliwiające zastosowanie modelu wprost do obliczeń inżynierskich prognozowania hałasu linii w funkcji intensywności opadów deszczu, przy zastosowaniu dowolnego arkusza kalkulacyjnego.
6. Porównanie wyników badań modelowych z danymi literatury wskazuje na możliwość zastosowania modelu także do innych układów linii, nie tylko w Polsce, ale również w innych krajach.

LITERATURA

1. An American National Standard: *IEEE Standard for the measurement of audible noise from overhead transmission lines* — AN SI/IEEE Std 656–1985.
2. Chartier V.L., Stearns R.D.: *Formulas for predicting audible noise from overhead high-voltage AC and DC lines*. IEEE Trans. on Power App. and Systems, PAS-100, January 1981, 1, 121–129.
3. Engel Z., Wszolek T.: *Analysis of parameters influencing the noise emitted by high-voltage power transmission lines*. Archives of Acoustics 1993, 18, 2, 249–261.
4. Engel Z., Wszolek T., Kowal J.: *Possibility of prediction of the acoustic noise caused by the transmission lines corona effect in Polish conditions*. INTERNOISE 94, Yokohama, 1994, 551–554.
5. Handke A.: *Sieci elektroenergetyczne. Szkodliwe zjawiska towarzyszące przesyłaniu energii elektrycznej*. Poznań 1987, 103–110.
6. ISO 1996 Acoustics — *Description and measurement of environmental noise*.
7. Kirkham H., Gajda W.J.Jr.: *A mathematical model of transmission line audible noise, Part I: Background and model development*. IEEE Trans. on Power App. and Systems, PAS-102, March 1983, 3, 710–717.
8. Larson C., Hallberg B., Israelsson S.: *Long-term audible noise and radio noise performance from an operating 400kV transmission line*. IEEE Trans. on Power Delivery, October 1988, 3, 4, 1842–1846.
9. Mikulski J.L., Wszolek T.: *Badanie laboratoryjne hałasu linii elektroenergetycznych nn z przewodami wiązkowymi*. Instytut Energetyki, Zakład Wysokich Napięć, Warszawa 1993.
10. Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 13 maja 1995r. w sprawie określenia rodzaju inwestycji szkodliwych dla środowiska i zdrowia ludzi oraz ocen oddziaływania na środowisko.
11. Timascheff A.S.: *Fast calculation of gradients for the center phase of a three — phase bundle conductor line with any number of subconductors. Part I*. IEEE Trans. on Power App. and Systems, PAS-90, January/February 1971, 1, 157–164.
12. *Transmission reference book 345 kV and above*. Electric Power Research Institute, CA Palo Alto 1976.
13. Wszolek T.: *Źródła i sposoby redukcji hałasu linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia*, Praca doktorska, biblioteka AGH, 1995, 13–15, 59–78.



Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Engel

Urodzony w 1933 r., ukończył Wydział Politechniczny AGH w Krakowie. Od 44 lat pracownik AGH. Doktoryzował się w roku 1962, habilitował w 1966. Od 1973 jest profesorem mechaniki i wibroakustyki AGH. Twórca nowej dziedziny wiedzy — wibroakustyki. Działalność naukowa związana jest głównie z problemami zwalczania hałasu i wibracji w maszynach i w środowisku. Autor i współautor ponad 300 monografii naukowych. Członek Akademii Inżynieryjnej w Polsce, w Nowym Jorku członek Akademii Nauk oraz wielu innych towarzystw krajowych i zagranicznych.



Dr inż. Tadeusz Wszolek

Urodzony w 1953 r., ukończył Wydział EAiE AGH w Krakowie w 1978 r. Doktorat — 1995. Od ukończenia studiów pracuje w AGH w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki. Główne zainteresowania związane są z zagadnieniami hałasu i wibracji maszyn i urządzeń oraz ich wpływu na środowisko. Od kilku lat zajmuje się problematyką hałasu ulotu linii elektroenergetycznych WN, z czym związany był także temat pracy doktorskiej.