

# REFERAT KONFERENCYJNY

## XXXI KONFERENCJA

SZKOLENIOWO-TECHNICZNA  
ELEKTROENERGETYCZNE SIECI  
KABLOWE I NAPOWIETRZNE

**KABEL**  
2026 ▲

10 – 13 marca 2026 r.

Świeradów-Zdrój Elements Hotel & Spa \*\*\*\*\*

**Autor:** Marcin Kocik

**Firma:** TELE-FONIKA Kable S.A., Zakład Bydgoszcz

**KABEL**  
2026 ▲

**Tytuł:** *Kable elektroenergetyczne z gładką, spawaną powłoką aluminiową*



CENTRUM SZKOLENIOWO-KONFERENCYJNE  
"ENERGETYK" S.C.

20-867 Lublin, ul. Sudecka 73

✉ [biuro@energetyk.lublin.pl](mailto:biuro@energetyk.lublin.pl)

🌐 [www.energetyk.lublin.pl](http://www.energetyk.lublin.pl)

## 1. Wprowadzenie

Żyłka powrotna (ekran metaliczny) stanowi kluczowy element konstrukcyjny kabli wysokiego napięcia pełniąc jednocześnie funkcje elektryczne i mechaniczne. Rozwiązania wykorzystujące powłokę ze stopu ołowiu zapewniają wysoką szczelność i odporność na aspekty środowiskowe, jednak ich istotnymi ograniczeniami są duża masa oraz negatywne aspekty ekologiczne. Alternatywę stanowią kable z korugowaną powłoką aluminiową, które cechują się mniejszą masą, lecz wykazują ograniczoną obciążalność prądową oraz większą średnicę zewnętrzną, co wpływa na logistykę i parametry instalacyjne.

W odpowiedzi na te uwarunkowania opracowano konstrukcję kabla z gładką spawaną powłoką aluminiową spełniającą rygorystyczne wymagania w zakresie wodoszczelności, odporności korozyjnej oraz niezawodności eksploatacyjnej. Technologia produkcji obejmująca zintegrowany proces formowania i spawania taśmy aluminiowej wraz z jednoczesnym wytłaczaniem powłoki polietylenowej zapewnia wysoką jakość i powtarzalność parametrów.

## 2. Proces produkcyjny

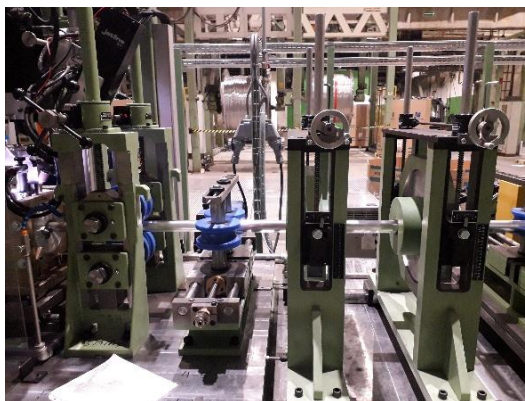
Kable z gładką spawaną powłoką aluminiową wykonywane są na linii technologicznej do wytłaczania powłok zewnętrznych. Operacja nakładania taśmy wykonywana jest w linii wyposażonej w segment do wzdłużnego spawania aluminium. Ośrodek kabla ze zdawacza kierowany jest razem z taśmą aluminiową na układ rolek, gdzie ma miejsce jej formowanie. Ośrodek wraz z uformowaną taśmą metaliczną kierowany jest do spawarki, gdzie w sposób ciągły wykonywany jest spaw wzdłużny. Linia wyposażona jest w system kontrolowania szczelności (ciągłości) spawu. Następnie ma miejsce dogniatanie - kompaktowanie lub korugowanie rury. Dalej nakładana jest powłoka podobnie jak ma to miejsce w przypadku niezależnego wytłaczania powłoki zewnętrznej.

Linia produkcyjna zawiera:

- zdawacz ośrodka kabla,
- urządzenie podające i docinające taśmę do odpowiedniej szerokości oraz formujące taśmę na ośrodku (rysunek 1),
- spawarkę taśmy aluminiowej,
- wytłaczarkę powłoki zewnętrznej,
- nawijarkę gotowego kabla.

Oznacza to, że powłoka metaliczna i wytłaczana powłoka zewnętrzna wykonywane są w tym samym procesie produkcyjnym na jednej linii.

Wykonanie tych procesów niezależnie niesie za sobą zwiększone ryzyko powstawania pofalowania powłoki metalowej podczas nawijania. Aby dodatkowo zapobiec powstawaniu niekontrolowanego falowania powłoki aluminiowej projektuje się rdzenie bębnow z odpowiednią średnicą, która jest większa niż w przypadku standardowych konstrukcji.



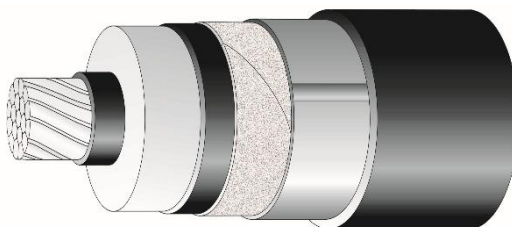
Rys. 1. Układ formowania taśmy

Aby zapewnić najwyższą jakość kabla, w procesie produkcyjnym niezbędne jest zastosowanie pomiaru prądów wirowych. Takie urządzenie umożliwia sprawdzenie stanu spawu w sposób ciągły.

Ważnym aspektem konstrukcji z aluminium spawanym jest adhezylność taśmy metalicznej i powłoki zewnętrznej - muszą one być spojone. Z tego powodu wytłaczarka do kleju PE znajduje się pomiędzy narzędziem do nakładania taśmy a wytłaczarką do powłoki zewnętrznej.

### 3. Własności powłoki SWAS

Gładka spawana powłoka aluminiowa SWAS (ang. *Smooth Welded Aluminium Sheath*) jest stosowana w nowoczesnych kablach energetycznych wysokiego (HV) i najwyższego napięcia (EHV), ponieważ oferuje doskonałą ochronę przy jednoczesnej optymalizacji kosztów i masy. Stanowi zaawansowaną alternatywę przede wszystkim dla tradycyjnych powłok ołowianych lub wytłaczanych korugowanych powłok aluminiowych.



Rys. 2. Kabel z powłoką typu SWAS

Konstrukcja typowego kabla wysokiego napięcia została przedstawiona na rysunku 2. Gładka spawana powłoka aluminiowa składa się z taśmy aluminiowej nałożonej wzdłużnie na ośrodek kabla, ukształtowanej wokół niego i zespawanej w kierunku wzdłużnym. Zewnętrzna powłoka polietylenowa jest trwale połączona z powłoką aluminiową, co zapewnia kablowi nieprzepuszczalną barierę wodną i odporność mechaniczną. Ponadto warstwa adhezyjna pomiędzy powłoką aluminiową a powłoką zewnętrzną zabezpiecza przed wzdłużną migracją wilgoci, która może przeniknąć przez powłokę zewnętrzną, zwiększając w ten sposób obszary korozji.

W odniesieniu do powłok korugowanych przewaga konstrukcji SWAS jest również widoczna w postaci braku szczeliny powietrznej pod powłoką metalową, co skutkuje mniejszą średnicą kabla i zwiększa dopuszczalność obciążalność prądową.

Do dodatkowych zalet należą mniejsza masa kabli, co pozwala zwiększyć maksymalne długości dostarczanych odcinków, łatwość instalacji, a także aspekty zdrowotne i środowiskowe.

Głównymi zadaniami ekranu metalicznego w postaci powłoki aluminiowej są: utrzymanie potencjału zera po zewnętrznej stronie izolacji, bezpieczne odprowadzanie prądów zwarciovych oraz przewodzenie prądu pojemnościowego. Dodatkowo tworzy on promieniową barierę wodną chroniącą izolację kabla.

Przekrój powłoki aluminiowej zależy od wymagań dotyczących prądu zwarciovego, ale też i materiału. Każdy z metali – miedź, ołów czy aluminium – ma swoje zalety i wady. Na przykład ołów stanowi znacznie bezpieczniejszą barierę wodną, ponieważ jest bezszwowo wytłaczany na kablu, ale ze względu na swoją wysoką gęstość sprawia, że kabel jest bardzo ciężki. Miedź jest zdecydowanie najdroższym z trzech materiałów w przeliczeniu

na kilogram, ale ma najlepszą przewodność. Aluminium jest lekkie, stosunkowo tanie i nadal zapewnia akceptowalną wartość przewodności.

W tabeli 1 przedstawiono aspekty konstrukcyjne różnych ekranów metalicznych kabla 110 kV z żyłą roboczą miedzianą o przekroju 1600 mm<sup>2</sup> i zaprojektowane tak, aby wytrzymały prąd zwarcia 31,5 kA/s [1].

Tab. 1. Porównanie parametrów różnych ekranów metalicznych

Właściwość	Ołów	Miedź	Aluminium
Prąd zwarcia [kA/s]	31,5	31,5	31,5
Grubość [mm]	4,2	1,95 (druć)	1,1
Przekrój [mm <sup>2</sup> ]	1230	165	310
Masa [kg/km]	13950	1650	837

Z powyższych danych wynika, że aluminium wydaje się najlepszym rozwiązaniem, jeśli chodzi o zachowanie masy i grubości ekranu metalicznego. Aby utrzymać ten sam prąd zwarcia, potrzeba o połowę mniej aluminium niż miedzi i ponad szesnaście razy mniej niż ołowiu. Przyjmując aktualne ceny jest to zdecydowanie najbardziej ekonomiczne rozwiązanie spośród trzech przedstawionych.

#### 4. Kwalifikacja kabla z powłoką SWAS

Normy IEC 60840 [2] i 62067 [3] definiują typy ekranów metalicznych, które pokrywają swoim zakresem. Zawierają one ekrany, które zapewniają promieniową wodoszczelność jak i te, które jej nie zapewniają. We wszystkich przypadkach jednak muszą one zapewnić zdolność do przenoszenia prądów zwarcia.

Konstrukcje, które zapewniają wzdłużną wodoszczelność:

- bezszwowe powłoki metalowe (wytłaczane),
- wzdłużnie nakładane folie bądź taśmy metalowe spójone z powłoką zewnętrzną
  - CD (ang. *combined design*) - ekran metaliczny w postaci taśmy metalowej klejonej bądź spawanej, która przenosi w całości lub częściowo prąd zwarcia,
  - SD (ang. *separate design*) - ekran metaliczny złożony z laminowanej folii metalicznej do celów wodoszczelności promieniowej i drutów metalowych do przenoszenia w całości prądów zwarcia.

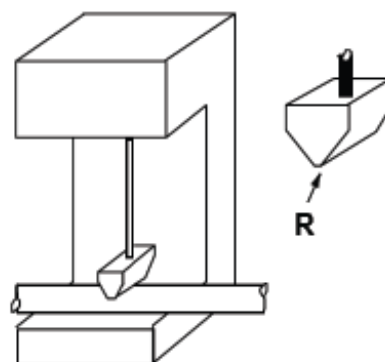
Podczas procesu rozwojowego kabli z wzdłużnie nałożoną folią bądź taśmą spojona z powłoką zewnętrzną wspomniane normy rekomendują przeprowadzenie badań dodatkowych opisanych w normie IEC 61901 [4], która powstała na bazie rekomendacji CIGRE wydanych w broszurze technicznej 446 [5]. Badanie te mogą być rozszerzeniem badań typu zdefiniowanych w normach IEC 60840 i 62067 i często są sprecyzowane jako niezbędne do wykonania w procesie kwalifikacji systemów kablowych u brytyjskich operatorów systemów dystrybucyjnych.

Rekomendowane badania w normie IEC 61901 jak i w broszurze technicznej CIGRE 446 dotyczą badań rozwojowych, badań typu, badań na próbkach jak i badań rutynowych. Poniżej przedstawione zostaną bardziej szczegółowo te, które z punktu widzenia doświadczeń autora są najbardziej istotne.

#### 4.1 Badanie odporności na uderzenie (ang. *Impact test*)

Wśród badań rozwojowych kabli z metalową powłoką laminowaną przeprowadzonych na samym kablu możemy wyróżnić badanie odporności na uderzenie. Badanie to ma na celu określenie jak powłoka laminowana zachowuje się pod wpływem nagłego obciążenia mechanicznego (uderzenia). Informacja ta jest kluczowa dla określenia trwałości i bezpieczeństwa kabli w trudnych warunkach instalacyjnych.

W konstrukcjach typu CD ekran metaliczny w postaci taśmy metalowej pełni rolę zarówno elektryczną jak i mechaniczną. Istnieje obawa, że mechaniczne uderzenie w laminowaną powłokę może uszkodzić element metalowy i zmienić funkcjonalność elektryczną ekranu. Dlatego odporność laminowanej powłoki na uderzenia musi być najwyższa.



Rys. 3. Aparatura testowa dla badania odporności na uderzenie

#### 4.1.1 Przebieg badania

Warunki przeprowadzenia dla konstrukcji typu CD są dużo wyższe niż dla konstrukcji typu SD. Test należy przeprowadzić używając obciążonego metalowego klina o masie 27 kg, spadającego na kabel z wysokości 0,27 m. Klin powinien mieć promień krzywizny R wynoszący 1 mm w punkcie uderzenia, a jego oś powinna być prostopadła do osi kabla (rysunek 3). Dla porównania w konstrukcjach typu SD stosuje się metalowy klin o masie 5 kg, wysokość 1 m, promień krzywizny 2 mm. Uderzenia powinny nastąpić w miejscach spawu bądź sklejenia zakładki taśmy i na przeciwległej stronie.

#### 4.1.2 Ocena wyniku

Po uderzeniach próbkę należy przeciąć wzdłuż dwóch linii pod kątem 90° od punktów uderzenia. Wewnętrzną stronę metalowego ekranu należy poddać oględzinom.

W miejscach uderzeń nie powinny być zaobserwowane przebicia taśmy. Należy wykonać nacięcia wzdłużne przez miejsca uderzenia i ocenić czy ekran półprzewodzący na izolacji nie wnika do izolacji na grubość większą niż 1 mm.

Nie jest to sprecyzowane w standardzie, jednak przyjmuję się, że przeprowadzenie powyższego badania wykonuje się na kablu z typoszeregu o najmniejszej grubości taśmy metalicznej.

## 4.2 Badanie zwarciove (ang. *Short circuit test*)

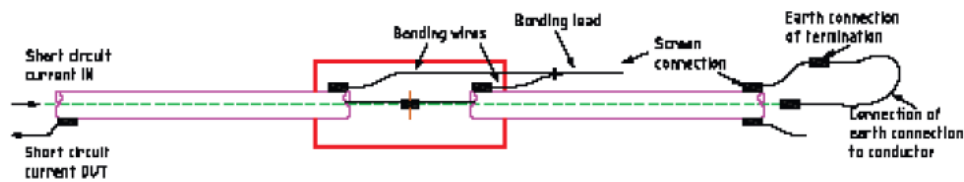
Z punktu widzenia badań rozwojowych kabli z metalową powłoką laminowaną przeprowadzonych na systemie kablowym najbardziej istotne jest badanie zwarciove.

Podczas pracy kabla, w przypadku wystąpienia zwarcia jednofazowego prąd może płynąć przez ekran metaliczny, połączenie ekranu metalicznego z akcesoriami lub przewód łączeniowy np. z uziemieniem.

Niniejszy test został zaprojektowany w celu prostego przetestowania tych komponentów i połączeń. Weryfikuje on jednocześnie kabel, połączenie z akcesoriami, akcesoria, połączenie uziemiające oraz przewody łączeniowe.

Jeśli żądany prąd zwarciovy jest wyższy niż 50 kA i nie ma dostępnego odpowiedniego sprzętu, przyłożony prąd może wynosić co najmniej 50 kA, a czas osiągnięcia obliczonej temperatury może być dłuższy.

Badana próbka kabla musi mieć długość przynajmniej 5 m.



Rys. 4. Układ testowy do badania prądów zwarciovych

Przewidywana obciążalność zwarciova musi zostać skalkulowana zgodnie z metodologią opisaną w normie IEC 60949 [1] z założeniami dla konstrukcji typu CD:

- maksymalny czas trwania zwarcia 5 s,
- uwzględnienie nieadiabaticznej wymiany ciepła – punkt 6.1,
- współczynnik F określający skuteczność spojenia z powłoką 0,9,
- maksymalna temperatura zwarcia 250 °C wynikająca z zastosowanego materiału powłokowego (HDPE)

#### 4.2.1 Przebieg badania

Badany obiekt należy poddać pięciu zwiarciovom z warunkami:

- przed próbą należy podgrzać i ustabilizować temperaturę żyły roboczej kabla do wartości z przedziału 90-95 °C,
- zwiarciovom należy oddzielić od siebie w odstępie czasu wystarczającym na schłodzenie ekranu metalicznego w zakresie 5 K od jego temperatury początkowej.

#### 4.2.2 Ocena wyniku

Próbkę 1-metrową należy rozebrać i poddać oględzinom. Próbka nie powinna wykazywać pęknięć ani rozwarstwień taśmy metalowej ani uszkodzeń innych części kabla. Nie może być śladów pogorszenia połączenia mufa - kabel ani innych elementów łączeniowych. Należy również sprawdzić spojenie taśmy metalowej z powłoką zewnętrzną za pomocą badania wytrzymałości na odrywanie.

#### 4.2.3 Zasada kwalifikacji

Kabel (system kablowy) będzie zakwalifikowany do innych przekrojów i napięć pod warunkiem, że obliczona temperatura końcowa zwarcia i maksymalny prąd (jeżeli jest niższy niż 50 kA) będą niższe lub równe wartości testowanej.

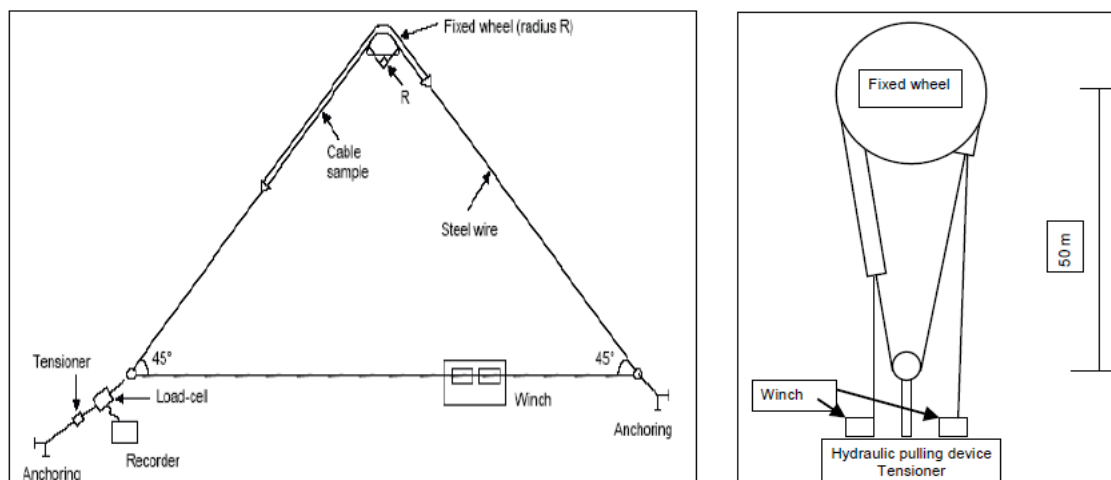
### 4.3 Badanie dopuszczalnego nacisku bocznego (ang. *Sidewall pressure test*)

Badanie należy przeprowadzić, jeżeli przewidywana wartość nacisku bocznego na kabel podczas instalacji będzie wyższa od 25 kN/m oraz pod warunkiem, że kabel pomyślnie przeszedł badania odporności na uderzenie (4.1) i ścieranie [3]. W przypadku konstrukcji kabla, gdy elementy optyczne są zintegrowane z ekranem metalicznym zaleca się przeprowadzenie testu nawet jeśli nacisk na ścianę boczną podczas instalacji nie przekracza wartości podanych normie.

Maksymalna wartość nacisku bocznego definiowana jest jako stosunek naprężenia rozciągającego kabel ( $T$ ) do wartości promienia gięcia ( $R$ ) nie większego niż zastosowanego podczas próby przeginania (np. w IEC 60840 [2], 12.3.3).

#### 4.3.1 Przebieg badania

Próbkę kabla o długości 15 m należy poddać badaniu przy użyciu jednego z układów testowych pokazanych na rysunku 5.



Rys. 5. Stanowiska do badania nacisku bocznego na kabel

Kabel powinien zostać poddany jednemu przejściu do przodu i jednemu przejściu do tyłu wokół nieruchomego koła pod zadaniem nacisku na ścianę boczną ( $T/R$ ), obliczonym na podstawie naprężenia drutu stalowego ( $T$ ) i promienia koła ( $R$ ). Kabel powinien stykać się z kołem przez co najmniej  $90^\circ$  podczas próby. Smar należy nałożyć w punkcie styku na kole.

#### 4.3.2 Ocena wyniku

Próbkę o długości 1 m poddaną naciskowi bocznego należy rozciąć i poddać oględzinom. Próbka nie powinna wykazać pęknięć ani rozwarstwień taśmy metalowej z laminowaną powłoką ani szkodliwych uszkodzeń innych części kabla.

### 5. Obciążalność

Najważniejszą publikacją zawierającą wytyczne do obliczania obciążalności prądowej kabli elektroenergetycznych jest norma IEC 60287-1-1 [6]. Obciążalność prądową  $I$  wyznacza się ze wzoru:

$$I_c = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \cdot [0.5 \cdot T_1 + (T_2 + T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + R \cdot T_2 \cdot (1 + \lambda_1) + R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)}} \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta\theta$  – dopuszczalny długotrwały przyrost temperatur [°C],

$I_c$  – dopuszczalny prąd [A],

$R$  – rezystancja AC żyły roboczej [ $\Omega/m$ ],

$T_1$  – rezystancja cieplna obszaru między żyłą roboczą a ekranem metalicznym [ $K \cdot m/W$ ],

$T_2$  – rezystancja cieplna obszaru między ekranem metalicznym a pancerzem [ $K \cdot m/W$ ],

$T_3$  – rezystancja cieplna powłoki zewnętrznej kabla [ $K \cdot m/W$ ],

$T_4$  – rezystancja cieplna między powierzchnią kabla a otoczeniem [ $K \cdot m/W$ ],

$W_d$  – straty w izolacji [ $W/m$ ],

$\lambda_1$  – stosunek strat w ekranie metalicznym do łącznych strat w żyłach roboczych,

$\lambda_2$  – stosunek strat w pancerzu do łącznych strat w żyłach roboczych.

Rezystancje cieplne  $T_1 \div T_3$  poszczególnych elementów konstrukcyjnych kabla oblicza się na podstawie znajomości ich wymiarów geometrycznych oraz rezystywności cieplnych materiałów, z których są one wykonane. Pozostają niezienne w przypadku zastosowania różnych konstrukcji ekranów metalicznych.

$$T_x = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{2 \cdot t_x}{d_x} \right] \quad (2)$$

gdzie:

$\rho_T$  – rezystywność cieplna danego obszaru [ $K \cdot m/W$ ],

$d_x$  – średnica pod danym obszarem [mm],

$t_x$  – grubość danego obszaru [mm].

Obliczenie obciążalności prądowej kabla opiera się na zrównoważeniu szybkości generowania ciepła w kablu z szybkością rozpraszania ciepła przez różne elementy kabla i ostatecznie do otoczenia. Oprócz strat w postaci ciepła wygenerowanego przez prąd roboczy mogą wystąpić również straty w ekranie metalicznym.

Bezpośredni wpływ na wynik obciążalności prądowej z punktu widzenia zastosowanego ekranu metalicznego ma parametr  $\lambda_1$ , który określa stosunek strat w ekranie metalicznym do łącznych strat w żyłach roboczych. Przedstawiony został przykład obliczeniowy kabli o dwóch konstrukcjach ekranów metalicznych - tradycyjnej z drutami miedzianymi nałożonymi spiralnie wokół ośrodka kabla oraz z gładką spawaną powłoką aluminiową. Założono ułożenie kabli w układzie płaskim bezpośrednio w ziemi. W dalszych rozważaniach przedstawiono formuły obliczeniowe dla takiego właśnie układu.

Straty w ekranach metalicznych wyznacza się z dwóch składowych:

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 \quad (3)$$

gdzie:

$\lambda'_1$  – straty związane z prądami cyrkulującymi,

$\lambda''_1$  – straty związane z prądami wirowymi.

Prądy cyrkulujące występują głównie w sytuacji, gdy ekrany metaliczne są uziemione obustronnie (ang. BE, *Both-Ends bonding*). Zgodnie z metodyką opisaną w normie IEC 60287-1-1 [6], tylko dla takich przypadków uwzględnia się te straty. Współczynnik  $\lambda'_1$  wówczas wyznacza się ze wzoru:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R_c} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (4)$$

gdzie:

$R_c$  – rezystancja AC żyły roboczej w temperaturze pracy [ $\Omega/m$ ],

$R_s$  – rezystancja DC ekranu metalicznego w temperaturze pracy [ $\Omega/m$ ],

$X$  – reaktancja ekranu metalicznego, [ $\Omega/m$ ],

Straty związane z prądami wirowymi występują w kablach jednożyłowych z ekranami metalicznymi uziemionym jednostronnie, obustronnie jak i w cross-bondingu.

Dla systemu z ekranami uziemionymi jednostronnie jak i w przypadku cross-bondingu współczynnik  $\lambda''_1$  wyznacza się ze wzoru:

$$\lambda''_1 = \frac{R_s}{R_c} \cdot [C_{gs} \cdot \lambda_0 \cdot (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 \cdot t_s)^4}{12 \cdot 10^{12}}] \quad (5)$$

gdzie:

$$C_{gs} = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s}\right)^{1,74} \cdot (\beta_1 \cdot D_s \cdot 10^{-3} - 1,6);$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{107 \cdot \rho_s}};$$

$\rho_s$  – rezystywność powłoki metalicznej w temperaturze pracy [ $\Omega \cdot m$ ],

$D_s$  – średnica zewnętrzna powłoki metalicznego, [mm],

$$\omega = 2\pi f;$$

Współczynniki  $\lambda_0$ ,  $\Delta_1$ , i  $\Delta_2$  dla układu płaskiego są wyznaczone odpowiednio dla każdej z 3 faz (gdzie  $m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$ , dla  $m \leq 0,1$ ,  $\Delta_1$  i  $\Delta_2$  mogą być pominięte):

a) dla kabla środkowego:

$$\lambda_0 = 6 \cdot \left(\frac{m^2}{1+m^2}\right) \cdot \left(\frac{d}{2s}\right)^2$$

$$\Delta_1 = 0,86m^{3,08} \cdot \left(\frac{d}{2s}\right)^{(1,4m+0,7)} \quad (6)$$

$$\Delta_2 = 0$$

b) dla kabla zewnętrznego (faza wyprzedzająca):

$$\lambda_0 = 1,5 \cdot \left(\frac{m^2}{1+m^2}\right) \cdot \left(\frac{d}{2s}\right)^2$$

$$\Delta_1 = 4,7m^{0,7} \cdot \left(\frac{d}{2s}\right)^{(0,16m+2)} \quad (7)$$

$$\Delta_2 = 21m^{3,3} \cdot \left(\frac{d}{2s}\right)^{(1,47m+5,06)}$$

c) dla kabla zewnętrznego (faza opóźniona):

$$\lambda_0 = 1,5 \cdot \left(\frac{m^2}{1+m^2}\right) \cdot \left(\frac{d}{2s}\right)^2$$

$$\Delta_1 = -\frac{0,74(m+2)m^{0,5}}{2+(m-0,3)^2} \cdot \left(\frac{d}{2s}\right)^{(m+1)} \quad (8)$$

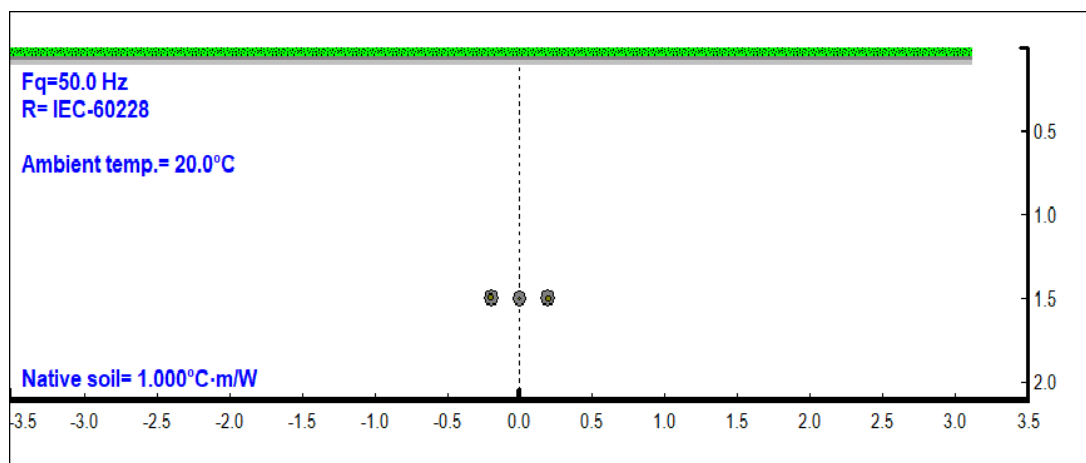
$$\Delta_2 = 0,92m^{3,7} \cdot \left(\frac{d}{2s}\right)^{(m+2)}$$

Dla systemu z ekranami uziemionymi obustronnie współczynnik  $\lambda_1''$  jest ignorowany, z wyjątkiem kabli posiadających żyły robocze typu Milliken. Uwzględnia się wówczas specjalny współczynnik, którego wyznaczenie opisane jest w punkcie 5.3.6 normy IEC 60287-1-1 [6].

## 5.1 Przykład obliczeniowy

W analizowanym przypadku zastosowano system kablowy 110 kV z żyłami roboczymi segmentowymi miedzianymi o przekroju znamionowym 1600 mm<sup>2</sup>. Obliczenia wykonano przy użyciu programu CYMCAP 9.1. Dla celów porównawczych w opcji pierwszej zastosowano ekran metaliczny z drutów miedzianych wraz ze spiralą przeciwskrętną, a jako promieniową barierę przeciwwilgociową zastosowano cienką folię aluminiową. Opcja ta odpowiada konstrukcji ekranu metalicznego typu SD zgodnie z nomenklaturą wyjaśnioną w punkcie 3. W drugiej opcji ekran metaliczny zbudowany jest z gładkiej spawanej powłoki aluminiowej, która pełni rolę zarówno elektryczną jak i zapewnia wodoszczelność promieniową. Mówimy tutaj o konstrukcji ekranu metalicznego typu CD. Jako kryterium doboru przekrojów ekranów metalicznych został założony prąd zwarcia 1 fazowy o wartości 31,5 kA/s. Prąd zwarcia o takiej wartości może być przeniesiony przez ekran metaliczny z drutów miedzianych o przekroju 165 mm<sup>2</sup> i odpowiednio ekran metaliczny w postaci gładkiej taśmy aluminiowej o przekroju znamionowym 310 mm<sup>2</sup>.

Kable układane są bezpośrednio w ziemi w układzie płaskim. Osie kabli znajdują się na głębokości 1,5 m i oddalone są od siebie o 0,2 m zgodnie z rysunkiem 6. Pozostałe warunki środowiskowe przyjęte są jak w standardowych ułożeniach przyjmowanych w kraju.



Rys. 6. Ułożenie kabli 110 kV (program Cymcap)

W tabeli 2 umieszczono wyniki symulacji obliczeń obciążalności prądowej wraz z odpowiednimi parametrami.

Tab. 2. Wyniki symulacji obciążalności prądowej analizowanego przypadku

Sposób uziemienia ekranów metalicznych	Obciążalność prądowa	Straty w ekranie metalicznym	Straty całkowite	Prąd indukowany w ekranie metalicznym	Wsp. strat w ekranie metalicznym
	I [A]	Ws [W/m]	Wt [W/m]	Is [A]	$\lambda_1$
<b>SWAS</b>					
<b>BE</b>	787	43,8	55,1	554	4,02
	787	21,7	32,9	384	1,99
	787	30,6	41,8	466	2,84
<b>SPB</b>	1406	1,0	35,8	0	0,03
	1406	4,1	39,3	0	0,12
	1406	1,1	36,0	0	0,03
<b>Druty Cu + folia Al</b>					
<b>BE</b>	778	43,9	55,0	607	4,12
	778	23,0	34,1	438	2,16
	778	29,9	40,8	505	2,83
<b>SPB</b>	1445	0,2	37,1	0	0,01
	1445	1,0	38,2	0	0,03
	1445	0,3	37,1	0	0,01

Do analizy przypadku przyjęto kable o stosunkowo dużych przekrojach ekranów metalicznych, co w praktyce wyklucza praktycznie zastosowanie uziemienia ekranów metalicznych z obu stron. Jest to bardzo dobry przykład do lepszego zobrazowania zachodzących zjawisk.

Uzyskane wartości obciążalności w przypadku uziemienia obustronnego ekranów są w dużym przybliżeniu o połowę mniejsze niż w przypadku uziemienia jednostronnego. Wiąże się to z indukowanymi prądami w ekranie i generowanym przez to ciepłem. Prądy te nie są związane z prądem roboczym w żyłce roboczej, a więc są zupełnie niepożądane. Porównując obie konstrukcje, współczynniki strat w ekranach metalicznych i wartości strat są w przybliżeniu na tym samym poziomie, co w efekcie daje różnicę w obciążalności prądowej na poziomie 1 %.

W przypadku uziemienia jednostronnego można zaobserwować już większą różnicę. Wynosi ona około 3 %. Różnica ta jest wynikiem ok. 4-krotnie wyższych strat w ekranie metalicznym. Mimo że straty w ekranie są stosunkowo niskie w odniesieniu do strat całkowitych to przy tak dużych prądach roboczych ostatecznie ta różnica jest odczuwalna. Dla uziemienia jednostronnego ekranów metalicznych procedury obliczeniowe zakładają brak strat związanych z indukowanym prądem cyrkulującego, jednak straty związane z prądami wirowymi w analizowanych przypadkach występują niezależnie od sposobu uziemienia. Dokładna zależność pokazana jest w tabeli 3.

Tab. 3. Współczynnik strat w ekranie metalicznym

	Rez. DC taśmy Al	Rez. DC drutów Cu	Wsp. strat w ekranie metalicznym	Wsp. strat związany z prądami cyrkulującymi	Wsp. strat związany z prądami wirowymi
	R's [Ω/km]	R'w [Ω/km]	$\lambda_1$	$\lambda_1'$	$\lambda_1''$
<b>SWAS</b>					
<b>BE</b>	0,142	-	<b>4,02</b>	4,00	0,02
	0,142	-	<b>1,99</b>	1,92	0,07
	0,140	-	<b>2,84</b>	2,82	0,02
<b>SPB</b>	0,136	-	<b>0,03</b>	0,00	0,03
	0,139	-	<b>0,12</b>	0,00	0,12
	0,136	-	<b>0,03</b>	0,00	0,03
<b>Druty Cu + folia Al</b>					
<b>BE</b>	0,646	0,146	<b>4,12</b>	4,11	0,01
	0,643	0,145	<b>2,16</b>	2,14	0,02
	0,634	0,143	<b>2,83</b>	2,82	0,01
<b>SPB</b>	0,621	0,140	<b>0,01</b>	0,00	0,01
	0,630	0,142	<b>0,03</b>	0,00	0,03
	0,621	0,140	<b>0,01</b>	0,00	0,01

W analizowanym przykładzie, gdzie konstrukcja ekranów jest zoptymalizowana z punktu widzenia zależności wymogu prądu zwarciovego i przekroju ekranu metalicznego, można zauważyć minimalne różnice w obciążalnościach prądowych. Dobór samej konstrukcji może być dość swobodnie determinowany wymogami środowiskowymi, a nie elektrycznymi. Lecz w przypadku, gdzie mamy do czynienia z prądami zwarciovymi o niskich wartościach, różnice w obciążalnościach mogą być już zdecydowanie większe. Dotyczy to szczególnie przypadków z uziemieniem obustronnym ekranów metalicznych. Wiąże się to

z ograniczeniami produkcyjnymi w zakresie spawania taśmy aluminiowej – musi ona mieć minimalną grubość ok. 0,8-1 mm.

## 6. Podsumowanie

Kable elektroenergetyczne z gładką spawaną powłoką aluminiową typu SWAS stanowią nowoczesną i efektywną alternatywę dla tradycyjnych konstrukcji z powłoką ołowianą oraz ekranem z drutów miedzianych z folią aluminiową. Zastosowanie wzdłużnie formowanej i spawanej taśmy aluminiowej, trwale połączonej z powłoką polietylenową, pozwala uzyskać konstrukcję spełniającą wysokie wymagania w zakresie wodoszczelności promieniowej i wzdłużnej, odporności mechanicznej oraz zdolności do przenoszenia prądów zwarciovych.

Analiza właściwości materiałowych wykazuje, że aluminium stanowi optymalny kompromis pomiędzy masą, kosztem i przewodnością elektryczną. W porównaniu z ołowiem i miedzią umożliwia znaczną redukcję masy kabla przy zachowaniu wymaganej wytrzymałości zwarciowej, co przekłada się na łatwiejszy transport, montaż oraz możliwość dostarczania dłuższych odcinków fabrycznych.

Proces kwalifikacji kabli z powłoką SWAS zgodnie z wymaganiami norm IEC obejmuje szereg badań rozwojowych i typu, w tym badanie odporności na uderzenie, badanie zwarciowe oraz badanie dopuszczalnego nacisku bocznego. Testy te potwierdzają, że konstrukcja typu SWAS zapewnia zarówno funkcję elektryczną jak i mechaniczną ekranu metalicznego przy zachowaniu integralności powłoki nawet w warunkach ekstremalnych obciążeń.

Przeprowadzone analizy obciążalności prądowej dla systemu 110 kV wykazały, że przy optymalnym doborze przekrojów ekranów metalicznych różnice w dopuszczalnym prądzie między konstrukcją SWAS a tradycyjnym ekranem z drutów miedzianych są niewielkie i mieszczą się w granicach kilku procent.

Podsumowując, kable z gładką spawaną powłoką aluminiową łączą wysokie parametry techniczne z korzyściami eksploatacyjnymi i ekonomicznymi. W wielu zastosowaniach ich dobór może być determinowany przede wszystkim względami środowiskowymi i logistycznymi przy zachowaniu porównywalnych parametrów elektrycznych względem konstrukcji tradycyjnych. Technologia SWAS stanowi zatem perspektywiczny kierunek rozwoju kabli wysokiego i najwyższego napięcia.

## 7. Literatura

- [1] IEC 60949:1988, „ Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects”.
- [2] IEC 60840:2022, “Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ( $U_m = 170$  kV) up to 500 kV ( $U_m = 550$  kV) – Test methods and requirements”.
- [3] IEC 62067:2020, “Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ( $U_m = 36$  kV) up to 150 kV ( $U_m = 170$  kV) – Test methods and requirements”.
- [4] IEC TR 61901:2016 „ Tests recommended on cables with a longitudinally applied metal foil for rated voltages above 30 kV ( $U_m = 36$  kV) up to and including 500 kV ( $U_m = 550$  kV)”.
- [5] Technical Brochure 446, WG B1.25, “Advanced design of metal laminated coverings: recommendation for tests, guide to use, operational feed back” (2011)
- [6] IEC 60287-1-1:2023, “Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General”