



Michał PSTRĄGOWSKI, Ryszard POLAŃSKI

Telefonika Kable SA - Zakład w Bydgoszczy

Kable elektroenergetyczne 6kV do 400kV - nowe konstrukcje i wymagania

Streszczenie. Przedstawiony niżej tekst opisuje, w oparciu o wymagania klientów oraz norm krajowych i zagranicznych, stosowane obecnie konstrukcje dla kabli ŚN oraz WN i EWN o izolacji z polietylenu usieciowanego (XLPE). Przedstawiono wykonane próby i badania systemów oraz poziom naprężeń jako funkcję grubości izolacji, omówiono metody produkcji kabli wg wymagań norm i przepisów krajowych i zagranicznych. Przedstawiono także obecnie możliwości produkcyjne kabli o izolacji XLPE w Telefonika Kable SA oraz wskazano na kierunki rozwoju.

Abstract: (6kV up to 400kV Power Cables - New constructions and requirement). Presented below text describe, on the basis of client's and national & international standards requirements, presently used constructions of MV, HV & EHV cables with cross-linked (XLPE) insulation. The results of systems tests & investigations and stress level are presented as a function of insulation thickness. Discussed are methods of cables production, according to standards requirements and national and international regulations. Presented are also current production possibilities of cables with XLPE insulation at Telefonika Kable SA and indicated are directions of development.

Słowa kluczowe: kabel, elektroenergetyczny, XLPE, naprężenie
Keywords: power cable, XLPE, stress

Wstęp

Historia kabli elektroenergetycznych w izolacji z polietylenu usieciowanego w Polsce zaczęła się w roku 1980, początkowo były to konstrukcje na średnie napięcia, ale już w roku 1987 wyprodukowano pierwszy odcinek kabla na napięcie 110 kV a w roku 1997 możliwe stało się wykonanie kabla z żyłą do 2000mm² na napięcie do 400 kV.

Kable średnich napięć

Podstawowe normy wg których wykonywane są kable średnich napięć (ŚN) to: IEC 60502-2; BS 66622; HD 620; VDE 0276-620 oraz ZN-TF-500

Wymagania odbiorców ciągle rosną. Chodzi przede wszystkim o możliwość przesyłania wielkich mocy przy minimalnych stratach, pojawiły się także wymagania w zakresie uszczelnień oraz parametrów użytkowych kabli - w tym również stałej ich kontroli. Aktualnie niemożliwe stało się jednoznaczne oznaczenie konstrukcji za pomocą ich nazwy, dlatego tradycyjna nazwa powinna być wzbogacona opisem tekstowym albo też poprzez wskazanie odpowiedniej normy precyzującej konstrukcję. W ostatnim okresie opracowano szereg zmian konstrukcyjnych a modyfikacje i udoskonalenia obejmują wszystkie elementy kabla.

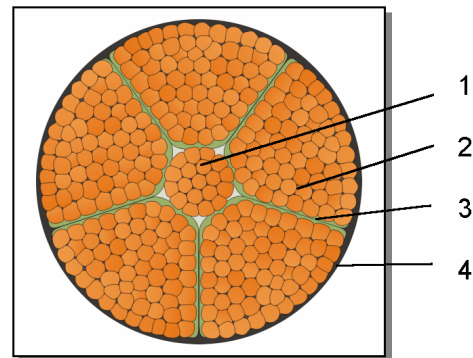
Żyła robocza

- żyły okrągłe jednodrutowe - RE (do 630mm² Al).
- żyły okrągłe wielodrutowe skręcane oznaczone jako RM (dla Al do 1200mm²; dla Cu do 1000mm²)
- żyły Al segmentowe pełne (solid) oznaczone jako SE (Kable 3-żyłowe na napięcie 10kV do 300mm²)
- żyły segmentowe typu Millikena (dla Al oraz Cu do 2000mm² w wersji 5 segmentowej i rdzeniem w środku)

Wolne przestrzenie w żyłach drutowych typu RM oraz Millikena (rys. 1) mogą być wypełnione proszkiem lub pastą blokującą przed wzdłużną penetracją wody.

Obwój taśmą półprzewodzącą żyły roboczej

Żyły skręcane okrągłe oraz żyły konstrukcji Millikena mogą być produkowane w wersji zwykłej lub uszczelnionej. W wersji uszczelnionej przekładki z taśmy izolacyjnej oraz taśmy półprzewodzącej mają zdolność blokowania wody (*non and semi-conductive swelling tape*).



Rys. 1 Żyła Millikena 2000mm² (5x376/72+120)

- 1) linka centralna 120mm² – 18 drutowa
- 2) linka sektorowa 376/72 – 60 drutowa
- 3) przekładka z taśmy izolacyjnej
- 4) taśma półprzewodząca

Ekran wytłaczany na żyłę roboczej

Wytłaczany jest półprzewodzący polietylen spełniający wymagania rezystywności skośnej oraz gładkości określonych w odpowiednich normach.

Izolacja XLPE

Według większości norm europejskich izolacja XLPE jest 'zwykłej' jakości. Normy amerykańskie wymagają odporności izolacji na drzewienie wodne i oznaczają ją jako TR-XLPE. W każdym przypadku wytłoczona izolacja musi spełniać wymogi czystości i gładkości.

Ekran wytłaczany na izolacji

Ekran ten może być spojony z izolacją lub łatwo usuwalny z izolacji. Jest to wymagane przez niektóre normy i jest standardem dla kabli 3-żyłowych sektorowych – gdzie siłę odrywania określono na poziomie do 40N. Siła odrywania może być większa (18÷80N *strippable insulation screen*) lub mniejsza (3÷20N *Easy-strippable insulation screen*). Upowszechnił się także termin – ekran na izolacji typu 'skórka banana' lub po prostu – banan. Wytłaczany półprzewodzący polietylen musi spełniać wymagania rezystywności skośnej oraz gładkości określonych w odpowiednich normach.

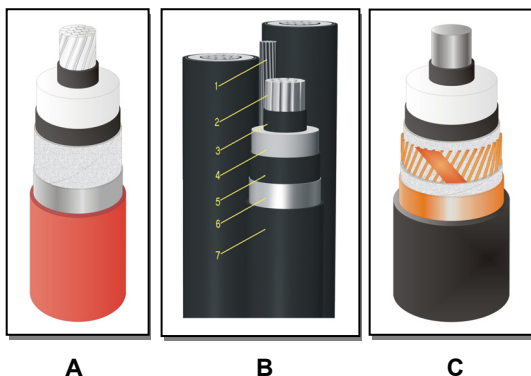
Obwój z taśmy półprzewodzącej na ekranie izolacji

Niektóre normy nie wymagają takiego obwoju, jednak normy, które zalecają stosowanie obwoju pozwalają na zwiększenie prądu zwarcia, który dla żyły powrotnej z miedzi może osiągnąć 350 °C, natomiast bez obwoju tylko 250 °C (wzrost o 18%). W przypadku kabla uszczelnionego wzdłużnie (np.: XUHKXS; N2XS(F)2Y) taśma ta zawiera dodatkowo proszek zapobiegający wzdłużnej penetracji wody. Producenci dostarczają także taśmy o wysokim współczynniku puchnięcia. Jest to szczególnie istotne w kablach na wysokie napięcia, gdzie żyły powrotne mogą być wykonane z drutów o dużej średnicy.

Żyła powrotna (ekran metaliczny)

Żyłę powrotną stanowią mogą:

- spiralnie nałożone druty z obwojem z taśmy miedzianej stanowiącej kontakt elektryczny między drutami.
- taśma lub taśmy miedziane
- wytłoczona powłoka ołowiu (np. RUHKXS)
- wzdłużnie ułożona taśma aluminiowa (np. XRUHKXS; N2XS(FL)2Y)
- wzdłużnie ułożona taśma miedziana (np. XRmUHKXS ; N2XS(FB)2Y)



Rys. 2 Przykłady konstrukcji kabli średnich napięć

A. Kabel na 20kV wg normy francuskiej NF C 33-226 z żyłą powrotną w postaci taśmy Al, stanowiącej jednocześnie uszczelnienie promieniowe.

B. Kabel samonośny XRAUHAKXS + Fe

1. linka nośna FeZn o średnicy 9,2mm
2. żyła robocza – aluminiowa skręcana, uszczelniona
3. ekran na żyłę roboczej
4. izolacja XLPE
5. ekran na Izolacji + taśma półprzewodząca blokująca wodę
6. żyła powrotna z taśmy aluminiowej
7. powłoka polietylenowa

C. Kabel wg BS 7870-4.12 z żyłą pełną typu solid i z uszczelnioną wzdłużnie żyłą powrotną z drutów Cu i uszczelnienia promieniowego w postaci taśmy miedzianej

Powłoka zewnętrzna

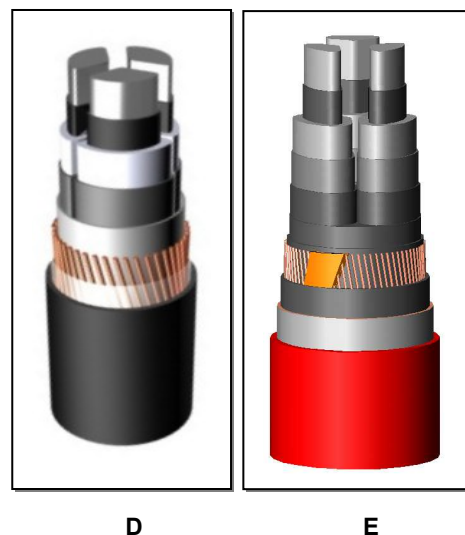
- Polwinit zastosowany na powłokę kabli, w zależności od warunków, w których kabel będzie pracował, może być modyfikowany na przykład w kierunku zmniejszenia palności poprzez zwiększenie indeksu tlenowego, zmniejszenia kwasowości, korozyjności oraz toksyczności dymów, zwiększenie odporności na oleje, na promieniowanie ultrafioletowe a nawet uodpornienie na owady i grzybnie, którymi są np. termity czy szczury.

- Polietylen również może być modyfikowany w celu zmniejszenia palności. W zależności od zastosowania kabli wymagany może być polietylen niskiej gęstości LDPE (LE6022-czarny o wysokiej elastyczności), średniej gęstości MDPE np. ME6060; ME6058 – o niskim współczynniku skurczu (*low shrinkage*), wysokiej gęstości HDPE (HE6062 – o niskim współczynniku skurczu; HE6067 – o bardzo niskim współczynniku skurczu – *very low shrinkage*) lub coraz częściej polietylen o strukturze liniowej (*Linear Low Density Polyethylene LLDPE*) (LE8707-czarny; LE8706-naturalny odporny na UV). Wszystkie te polietyleny posiadają wysoka odporność na wnikanie wilgoci.
- Materiały bezhalogenowe o indeksie tlenowym powyżej 35 i zmniejszonej kwasowości, korozyjności oraz toksyczności emitowanych dymów.

Powłoka półprzewodząca na powłoce zewnętrznej

Powłokę ta stanowią może wtarty grafit, ale z powodów praktycznych wytłaczana jest często powłoka z półprzewodzącego polietyleny lub polwinitu.

TELEFONIKA regularnie dostarcza na rynek skandynawski kable TSLF na 12 oraz 24kV. Charakterystyczną cechą tej konstrukcji jest wytłoczona powłoka z półprzewodzącego polietyleny na właściwej powłoce, którą stanowi polietylen barwy naturalnej.



Rys. 3 Przykłady konstrukcji kabli 3-żyłowych średnich napięć z żyłami sektorowymi pełnymi (solid)

D. ((N)A2XS2Y 3x240SE/35 10kV wg HD 620; VDE 0276-620 kabel trzyżyłowy z żyłami sektorowymi pełnymi i wspólną żyłą powrotną.

E. ((N)A2XS(FL)2Y 3x240SE/50 10kV HD 620; VDE 0276-620 kabel trzyżyłowy z żyłami segmentowymi pełnymi, z uszczelnioną wzdłużnie wspólną żyłą powrotną oraz uszczelnieniem promieniowym w postaci wzdłużnie ułożonej taśmy aluminiowej pod powłoką z czerwonego polietyleny średniej gęstości

Z analizy zamówień kabli średnich i wysokich napięć wynika, że klienci zainteresowani są przede wszystkim kablami uszczelnionymi i to w różnych wersjach, o których mówiono powyżej. Opierając się na danych opublikowanych przez znaną australijską firmę Olex uszczelnienie kabla w sposób zasadniczy zwiększa jego żywotność – Tabela 1.

Tabela 1. Wpływ rodzaju uszczelnienia kabla na jego żywotność w ziemi

Rodzaj uszczelnienia przed wilgocią	Przewidywany czas życia
Kable bez żadnego uszczelnienia	15 ÷ 25 lat
Kable z uszczelnieniem wzdłużnym	20 ÷ 30 lat
Kable z izolacją TR-XLPE	30 ÷ 35 lat
Kable uszczelnione wzdłużnie z izolacją TR-XLPE	35 ÷ 40 lat
Kable uszczelnione promieniowo np. powłoka ołowiu	Ponad 60 lat

Kable wysokich napięć

Kable elektroenergetyczne wysokich napięć (WN) stanowią istotną rolę w infrastrukturze energetycznej. Wysoki koszt budowy linii kablowych WN powoduje, że inwestor oczekuje wyrobu spełniającego jego oczekiwania głównie w obszarze jakości i niezawodności. Dla producenta kabli WN to główny powód ciągłego doskonalenia wyrobu, dostosowywanie go do różnych warunków eksploatacyjnych oraz rozwijania metod badawczych.

Produkcja kabli WN o izolacji XLPE odbywa się w zakładzie w Bydgoszczy w dwóch halach produkcyjnych wyposażonych w sześć nowoczesnych linii łańcuchowych firmy MAILLEFER (rok produkcji 2003) oraz szereg nowoczesnych linii towarzyszących pozwalających na produkcję kabli o przekroju żył roboczych Cu i Al do 2000 mm² i napięciu aż do 400 kV. Produkcja tych kabli wymaga nie tylko doświadczonej kadry, wysokiej klasy sprzętu produkcyjnego, ale także nowoczesnych laboratoriów i optymalnych metod badawczych. Należy podkreślić, że zakład w Bydgoszczy spełnia wszystkie te warunki.

W zakładzie w Bydgoszczy od ponad 17 lat produkuje się kable elektroenergetyczne WN o izolacji z polietylenu usieciowanego (XLPE). W okresie tym wyprodukowano setki kilometrów kabli na napięcie od 30 kV do 400 kV nie tylko na rynek krajowy, ale także - szczególnie w ostatnich latach - na szereg rynków zagranicznych. Zbudowano z nich wiele kilometrów linii kablowych.

Systematycznie kable te wraz z systemami kablowymi zostały przebadane nie tylko w nowoczesnych laboratoriach w Bydgoszczy, ale także w niezależnych laboratoriach w kraju i zagranicą. Badania te są kontynuowane.

Stosowane konstrukcje kabli WN o izolacji XLPE

Podkreślenia wymaga fakt, że w Europie nie istnieje norma, która definiowałaby budowę kabli WN o izolacji XLPE. Definiowane są jedynie metody badań i oczekiwane wymagania. Producenci wykonują kable i badania w oparciu o własne założenia oraz obowiązujące przepisy i normy.

Kable WN w zakładzie w Bydgoszczy są produkowane i badane wg Norm:

- **ZN-BFK-021: 1998 + zmiana 1** – Kable elektroenergetyczne o izolacji z polietylenu usieciowanego na napięcia znamionowe wyższe od 18/30(36) kV do 230/400(420)kV
- **IEC 60840 Third edition 04.2004** – Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV (Um = 36 kV) up to 150 kV (Um = 170 kV) – Test methods and requirements.
- **IEC 62067 First edition 10.2001** – Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV (Um = 170 kV) up to 500 kV (Um = 550 kV) – Test methods and requirements.
- **HD 632 S1** - Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV (Um = 36 kV) up to 150 kV (Um = 170 kV) – General test requirements.

- **SFS 5702** – XLPE-insulated cables for rated voltage 64/110 kV. Design and Testing.
- **AS/NZS 1429.2:1998** – Electric cables – Polymeric insulated. Part 2: For working voltages above 19/33(36) kV up to and including 76/132(1450) kV.
- **HN 33-S-52** – Cables unipolaires a isolation syntetique de tensions assignees 36/63(72.5) kV et 52/90(100) kV (et jusqu'a a 87/150(170) kV).
- **HN 33-S-53** – Cables unipolaires a isolation syntetique de tensions assignees superieures a 87/150(170) kV et jusqu'a a 290/500(525) kV.
- **SS 424 14 17** – Power cables – XLPE-insulation cables with extruded oversheath and rated voltage 12-420 kV – Testing.
- **DIN VDE 0276-632** – Power cables with extrude insulation and their accessories for rated voltage above 36 kV (Um = 42 kV) up to 150 kV (Um = 170 kV). German version HD 632 S1 Parts 1, 3D, 4D and 5D: 1998.
- **BEWAG** – przepisy niemieckie obowiązujące w połączeniu z HD 632 S1.
- **NEK 395** – Power cables. Test for cables for 36 to 420 kV AC.

Analizując budowę kabli w oparciu o różne wymagania i przepisy należy podkreślić, że kable WN o izolacji XLPE mają w znacznej większości, a w zakresie napięć ≥ 110 kV prawie całkowicie, zarówno uszczelnienie wzdłużne jak i promieniowe, zabezpieczające kabel przed wnikaniem i rozprzestrzenianiem się wody w obrębie ekranu metalicznego.

O ile uszczelnienie wzdłużne jest wykonywane w postaci kombinacji taśm pęczniących pod wpływem wilgoci, to uszczelnienie promieniowe wykonywane jest w różnych wersjach np. powłok metalicznych Al, Cu lub Pb wytłaczanych gładkich lub karbowanych taśm Al a także Cu ułożonych wzdłużnie pod powłoką kabla i całkowicie z nią spojonych.

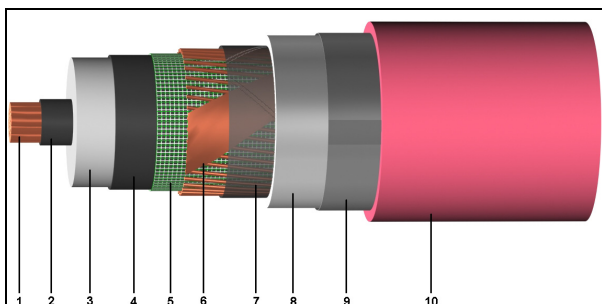
Uszczelnienia – w zakładzie w Bydgoszczy wykonywane są kable WN z uszczelnieniem promieniowym w postaci:

- wzdłużnie nałożonych pod powłoką zewnętrzną taśm Al lub Cu pokrytych kopolimerem polietylenu lub warstwą PVC i spojonych z tą powłoką.
- wytłaczanych gładkich powłok ołowianych. W przypadku powłok ołowianych powłoka ta może spełniać jednocześnie rolę ekranu metalicznego (żyły powrotnej).

Żyły robocze kabli WN w zakresie 95 ÷ 1000 mm² wykonywane są zazwyczaj jako skręcone i kompaktowane linki wielodrutowe a przekroje od 1000 ÷ 2000 mm² jako żyły 5-segmentowe Millikena, przeważnie bez uszczelnienia wzdłużnego przed rozprzestrzenianiem się wody w obrębie drutów żyły. Rzadko wykonywane są żyły uszczelnione wzdłużnie przed rozprzestrzenianiem się wody w obrębie drutów żyły. Telefonika ma zamiar w roku 2005 wprowadzić nowy sposób uszczelnienia żył roboczych półprzewodzącą pastą. (o którym wspomniano powyżej w części dotyczącej kabli ŚN)

Grubości izolacji XLPE - stosowane w zakładzie w Bydgoszczy grubości izolacji XLPE w kablach WN zależą od wymagań norm, przepisów klienta lub wg uznania i doświadczenia producenta, w tym przypadku zakładu w Bydgoszczy. W roku 2005 zmieniliśmy, opierając się na doświadczeniach innych producentów oraz własnych badaniach systemów kablowych, wymagania normy ZN-BFK-021:1998 + zmiana 1 odnośnie minimalnych

przekrojów żył roboczych = $f(\text{napięcia})$, grubości izolacji XLPE = $f(\text{przekroju i napięcia})$, maksymalnych temperatur zwarć dla ekranów metalicznych oraz maksymalnych naprężeń elektrycznych na ekranie na żyłę roboczej jak i izolacji = $f(\text{napięcia})$. Ma to na celu ujednoczenie konstrukcji i wymagań kabli wykonywanych na rynek krajowy i na eksport.



Rys. 4 Przykładowa konstrukcja z uszczelnieniem promieniowym w postaci wytłoczonej powłoki ołowianej

1. żyła robocza Cu lub Al.
2. ekran półprzewodzący na żyłę roboczej
3. izolacja XLPE
4. ekran półprzewodzący na izolacji
5. taśma półprzewodząca blokująca wodę
6. ekran metaliczny
7. taśma półprzewodząca blokująca wodę
8. powłoka ołowiana
9. taśma poliestrowa lub polipropylenowa
10. powłoka zewnętrzna

Odcinki produkcyjne – w roku 2005 jest planowany inwestycyjnym zakup i zainstalowanie urządzeń pozwalających na nawijanie gotowych odcinków kabli na bębny o średnicy tarcz 3600 mm (obecnie max 3200 mm). To przedsięwzięcie pozwoli na zwiększenie długości odcinków ok. 2÷3 krotnie. Ma to szczególne znaczenie w kablach EWN, które produkowane są w odcinkach stosunkowo krótkich. Przedsięwzięcie to będzie miało znaczny wpływ na zmniejszenie kosztów i skrócenie czasu budowy linii kablowych (mniej muf).

Badania kabli i systemów kablowych

Badania kabli i systemów kablowych WN oparte są głównie o standardy i przepisy przedstawione powyżej. W zakładzie w Bydgoszczy w celach badawczych zostały bezpośrednio na wydziałach produkcyjnych zbudowane laboratoria wyposażone w nowoczesny sprzęt i ekranowane komory Faraday'a.



Rys. 5 Laboratorium – sterownia, komora Faraday'a - badanie systemów kablowych

Zostało także wybudowane specjalne laboratorium EWN wyposażone w nowoczesny sprzęt oraz dwie duże ekranowane komory Faraday'a, w których przeprowadza się badania długotrwałe kabli jak i systemów kablowych.

Badania systemów kablowych jak i opis tych laboratoriów był przedstawiany i opisywany niejednokrotnie na poprzednich konferencjach.

W ostatnim okresie w laboratoriach Zakładu w Bydgoszczy wykonano szereg badań systemów kablowych.

W latach ubiegłych - wykonane zostały pełne badania kabli i systemów kablowych na napięcia 110 kV i 132 kV z wykorzystaniem muf i głowic SEFAGixosil oraz Elastimold (omawiane na poprzednich konferencjach).

Rok 2004 i 2005 - przeprowadzono i są kontynuowane badania kabli i systemów kablowych dla kabli (szczegóły badań i uzyskane wyniki były omówione w oddzielnym referacie konferencji „Kabel 2005”)

- Kabel N2XS(FL)2Y 1x630RM/120 mm² 127/220 ÷230(245) kV z izolacją o grubości 22 mm wg wymagań IEC 62067 + PN-EN-50266-2-2 z powłoką z polietylenu nie rozprzestrzeniającego płomienia – uzyskano pozytywne wyniki badań wiązek kabli na nie rozprzestrzenianie się płomienia w kategoriach A i C wg PN-EN-50266-2-2.
- System N2XS(FL)2Y 1x630RM/120 mm² 127/220 ÷230(245) kV z izolacją o grubości 22 mm wg wymagań IEC 62067 – wynik badania pozytywny
- System N2XS(FL)2Y 1x630RM/35 mm² 64/110 ÷115(123) kV z izolacją o grubości 18 mm wg wymagań BEWAG – wynik badania pozytywny
- System XRUHKXS 1x630RMC/95 mm² 64/110 ÷115(123) kV z izolacją o grubości 15 mm wg wymagań ZN-BFK-021:1998 + IEC 60840 – wynik badania pozytywny
- Kabel Cu/XLPE/CWS/LT/PVC 1x1000Milliken/251 mm² 161 kV – wynik badania pozytywny
- System N2XS(FL)2Y 1x2000Milliken/95 mm² 64/110÷115(123)kV i 76/132 ÷138(145) kV z izolacją o grubości odpowiednio 15 mm i 17 mm i wg wymagań IEC 60840 – w trakcie badania

Wyniki badań zakończonych są dostępne w Zakładzie w Bydgoszczy.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wrywkowo i w skrócony sposób cały zakres prac i działań zmierzających do uzyskania produktu jak najlepszej jakości, wysokiej niezawodności a zarazem w miarę taniego. Z perspektywy przeszło 25 lat doświadczeń w produkcji kabli XLPE należy stwierdzić, że ogromnie wiele zagadnień technicznych i organizacyjnych zostało zrealizowanych, niemniej wiele jeszcze zagadnień należy rozwiązać.

Kolejne prace naukowo-badawcze powinny dotyczyć głównie modyfikowania materiałów, konstrukcji i technologii, w celu otrzymania produktu wysokiej niezawodności, o wyższych możliwościach przesyłowych, przy minimalizacji wymiarów i kosztów. Powinny być także przeprowadzone dalsze badania systemów kablowych, głównie w zakresie wysokich napięć.

Autorzy: mgr Michał Pstrągowski, Telefonika Kable S.A. – Zakład w Bydgoszczy, ul. Fordońska 152, 85-957 Bydgoszcz, E-mail: mpstragowski@bfk.com.pl;
inż. Ryszard Polański, Telefonika Kable S.A. – Zakład w Bydgoszczy, ul. Fordońska 152, 85-957 Bydgoszcz, E-mail: polanski@bfk.com.pl