

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Ukazuje się od 1919 roku

10'16

Organ Stowarzyszenia Elektryków Polskich • Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.

Aleksandra RAKOWSKA

Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki

doi:10.15199/48.2016.10.01

Linie elektroenergetyczne WN i NN – światowe rekordy

Streszczenie. Na całym świecie obserwuje się dynamiczny rozwój linii napowietrznych i kablowych na coraz wyższe napięcia. W artykule opisano linie elektroenergetyczne AC i DC, które stanowią rekordy światowe pod względem wysokości napięcia roboczego i długości.

Abstract. In all over the world it can be observed the dynamic development of overhead and cable high voltage power lines. The paper describes AC and DC power lines which have very long lengths and work with extra high voltage (HV and EHV power lines – a world records).

Słowa kluczowe: linie napowietrzne AC, linie napowietrzne DC, linie kablowe AC, linie kablowe DC

Keywords: AC overhead lines, DC overhead lines, AC cable lines, DC cable lines

Wstęp

Rozwój sieci elektroenergetycznej to nie tylko budowa linii na coraz wyższe poziomy napięć. W publikacjach naukowo-technicznych coraz częściej można znaleźć informacje o oddawaniu do eksploatacji linii elektroenergetycznych, których wybrane parametry techniczne stanowią przełamywanie kolejnych barier techniczno-technologicznych. Na całym świecie obserwuje się bardzo dynamiczny rozwój sieci elektroenergetycznej – choć oczywiście w niektórych krajach rozwój ten ma szczególnie duże tempo, a niektóre z inwestycji energetycznych mogą budzić zachwyty. Dotyczy to zarówno budowy coraz dłuższych linii napowietrznych, jak i linii kablowych charakteryzujących się coraz wyższymi zdolnościami przesyłowymi. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na silny wzrost zainteresowania liniami energetycznymi prądu stałego, a przecież należy przypomnieć, że historia wykorzystywania energii elektrycznej rozpoczęła się właśnie od prądu stałego. Także i pierwsze linie do przesyłu energii były liniami prądu stałego (DC – *Direct Current*). Pierwsza stacja energetyczna zaprojektowana przez Thomasa A. Edisona w Nowym Jorku została oddana do eksploatacji w 1882 i z niej zasilano w energię elektryczną fragment miasta w promieniu około 1,6 km. Z kolei francuski inżynier M. Rene Thury opracował i zaprojektował system przesyłowy DC, który został uruchomiony w 1883 roku [1, 2]. Najśłynniejszym zaprojektowanym przez Thury'ego był system Moutiers-Lyon, oddany do eksploatacji w 1906 roku o zdolności przesyłowej 4,5 MW (przy napięciu 60 kV DC i prądzie 75 A). Długość linii wynosiła 180 km i została trochę przebudowana w roku 1912, gdy podwyższono napięcie do 125 kV. Linia ta pracowała do połowy lat trzydziestych poprzedniego wieku [2].

Informacji o oddawaniu do eksploatacji nowych, spektakularnych w swoich parametrach, linii energetycznych jest bardzo dużo. Nie jest możliwe przedstawienie wszystkich, tym bardziej, że każdego dnia można znaleźć na stronach internetowych informacje o kolejnych inwestycjach planowanych i realizowanych. Dlatego może warto zwrócić uwagę na kilka linii, których

parametry w różnych kategoriach stanowią swoisty światowy rekord techniczny.



Rys.1. Fragment linii 1200 kV AC [4]



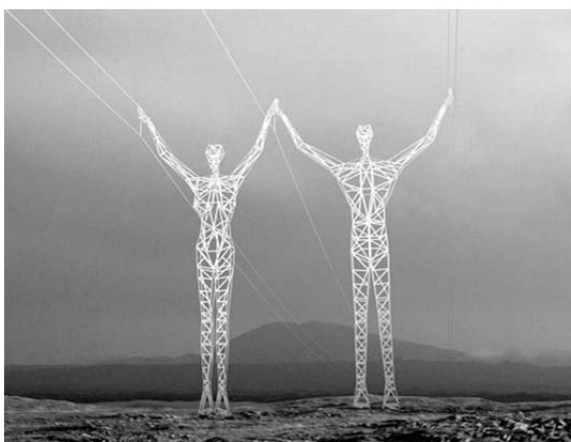
Rys.2. Linia 1000 kV Jindongnan-Jingmen [5]

Linie napowietrzne AC

Rozpoczynając przegląd linii napowietrznych prądu przemiennego (AC) konieczne jest wspomnienie

doświadczalnej linii na napięciu 1200 kV, uruchomionej w Indiach w mieście Bina w stanie Madhya Pradesh. Linia ta zbudowana jest w dwóch odcinkach: 1,1 km linii jednotorowej i 800 m linii dwutorowej (rys. 1). Zakładana moc przesyłowa to 6000-8000 MW [3]. Natomiast już nie jako doświadczalna linia, od 2008 r. eksploatowana w Chinach jest linia na napięciu 1000 kV. Jest to linia Jindongnan-Jingmen o zdolności przesyłowej 3000 MW i długości 640 km (rys.2).

W ostatnich latach coraz bardziej narastają protesty społeczne przeciwko budowie nowych linii napowietrznych wysokich i najwyższych napięć. Wśród zabiegów mających na celu zmniejszenie niechęci społecznej do linii napowietrznych coraz częściej stosuje się upiększanie konstrukcji wsporczych czyli słupów poprzez ich dekorowanie lub specjalne różnokolorowe oświetlenie. Przewodzi w tym francuski operator sieci energetycznej EDF od lat współpracując z artystką Eleną Parouchevą. Wiele jej zrealizowanych projektów jest znanych na całym świecie. Jednakże jeden z najsłynniejszych projektów, na którego realizację czeka wielu energetyków i „fanów” linii napowietrznych, to projekt który zdobył pierwsze miejsce w ramach ogłoszonego przez Landsnet Islandii międzynarodowego konkursu na unikatowe konstrukcje słupów dla terenów bardzo atrakcyjnych turystycznie w Islandii. Zarówno komisja konkursowa, jak i społeczeństwo jednomyślnie wskazało zwycięzcę tego konkursu (wśród kilkudziesięciu nadesłanych prac) nagradzając pierwszą nagrodą projekt o nazwie „The Land of Giant's is a poem for the eyes” czyli „Kraina Olbrzymów jest poematem dla oczu”, opracowany przez Jin Choi i Thomasa Sine z pracowni architektonicznej w Bostonie [6]. Autorzy projektu zaproponowali słupy w postaci ludzkich sylwetek w pozycji zależnej od ukształtowania terenu oraz od tego – czy jest to linia jedno czy dwutorowa – rysunek 3.



Rys.3. Słupy z Krainy Olbrzymów – Islandia [7]

Linie napowietrzne DC

Rozwój linii napowietrznych HVDC datuje się od roku 1979, gdy oddano do eksploatacji linię Cabora Bassa w Mozambiku na napięciu ± 500 kV o długości 1400 km, choć zdecydowanie najsłynniejszą jest linia Itaipu w Brazylii. Zdolność przesyłowa tej linii wynosi 6300 MW i przez wiele lat był to rekord światowy pod względem poziomu napięcia stałego wynoszącego ± 600 kV. Linia jest linią dwutorową, z wodnej elektrowni Itaipu (Foz do Iguaçu) do systemu zasilającego São Paulo (San Rogu). Zdolność przesyłowa każdego z obwodów jest taka sama i sumarycznie wynosi 3150+3150 MW (przy prądzie 2625 A). Kolejne etapy oddawania do eksploatacji tej linii to lata 1984-1987. Długość linii to 796,5 km + 816 km [1].

Dynamiczny rozwój linii napowietrznych HVDC został „przyspieszony” budową elektrowni wodnej Three Gorges (Trzech Przełomów) w Chinach i konicznością wyprowadzenia energii m.in. liniami ± 500 kV: Three Gorges – Shanghai (zdolność przesyłowa 3000 MW; rok oddania do eksploatacji 2007), Three Gorges – Changzhou (3000 MW) i Gezhouba – Shanghai (1200 MW) [8]. W Chinach również zbudowano linię Xiangjiaba–Shanghai, która, oddana do użytku w połowie 2010 roku, przez 3 lata była najdłuższą linią napowietrzną ultra wysokiego napięcia stałego (UHVDC) ponieważ jest linią o długości 2071 km, o zdolności przesyłowej 6400 MW (pełna zdolność wynosi aż 7200 MW) przy napięciu ± 800 kV.

Obecnie najdłuższą linią napowietrzną DC jest oddana do eksploatacji w 2013 r. linia Rio Madeira HVDC o długości 2375 km. Linia ta jest linią dwutorową na napięciu ± 600 kV (3150 MW/tor) i łączy stacje przekształtnikowe Porto Velho i Araraquara w San Paulo (rys.4). Linia ta służy do wyprowadzenia energii elektrycznej z dwóch elektrowni wodnych Jirau i Santo Antonio. Elektrownia Jirau, której budowę rozpoczęto w roku 2013 będzie posiadała zdolność wytwórczą na poziomie 3750 MW. Natomiast w elektrowni wodnej Santo Antonio ma pracować 50 turbin o mocy 71,5 MW, a pierwsza turbina została uruchomiona w marcu 2012 r.



Rys.4. Linia Rio Madera [8]

Należałoby wspomnieć również i o innych spektakularnych liniach napowietrznych DC, między innymi w Indiach oddano do eksploatacji w ostatnich latach kilka linii HVDC. Można tutaj wymienić linie na napięciu ± 765 kV: Angul-Srikakulam-Vemagiri, Warda-Nizamabad-Hyderabad, Warora Pool-Warangal oraz najnowsze linie Džule-Raighar (± 600 kV, 4000 MW o długości 1000 km) i Kurushetra-Champa. Oddanie ostatniej z wymienionych linii zaplanowano na sierpień 2016. Linia ta jest realizacją drugiego etapu połączenia pomiędzy stacją Champa w centralnej części kraju i stacją Kurukshetra. Parametry tej linii to ± 800 kV, 3000 MW i długość 1365 km. Plany rozwoju linii HVDC w Indiach są imponujące – podobnie jak linie przewidziane do uruchomienia w Chinach w latach najbliższych [9].

Autorka niniejszego artykułu swoim zainteresowaniem liniami energetycznymi o rekordowych parametrach zachęcała jedną ze swoich Dyplomatek do zajęcia się tym tematem, która w swojej pracy dyplomowej zwróciła uwagę na inne ciekawe linie i opisała również pierwsze z wybudowanych linii najwyższych napięć, które poprzednio uznawano za rekordy światowe [10].

Linie kablowe AC

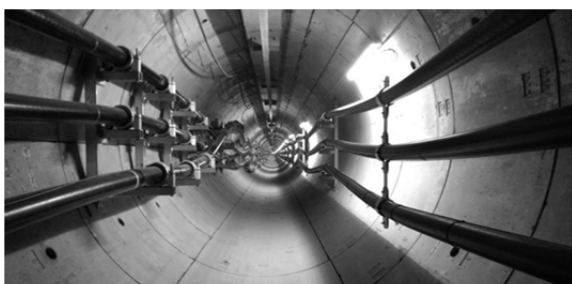
Przez wiele lat kable wysokich i najwyższych napięć to były kable o izolacji papier+olej, jednak od kilkudziesięciu lat stosowane są przede wszystkim kable o izolacji z polietylenu usieciowanego (XLPE) ze względu na bardzo dobre właściwości tej izolacji i bardzo pozytywne doświadczenia z eksploatacji linii kablowych ułożonych kablami o izolacji XLPE. Już w roku 2010 podczas Sesji CIGRE na jednym ze stoisk zaprezentowano kable na napięcie przemienne 800 kV (rys.5), jednakże jeszcze nie ma informacji o ułożeniu linii z wykorzystaniem tego typu kabla. Obecnie najwyższy poziom napięcia linii kablowych (z izolacją XLPE) to 500 kV – to warto wspomnieć o kilku szczególnych liniach 400 kV – są to linie:

- Metropolitan Project – linia w Kopenhadze, w której ułożono w sumie 102 km kabli,
- Jutland Line – linia, w której m.in. część linii dwutorowej ułożona jest na dnie malowniczego Mariager Fjord i przecina dolinę rzeki Gudena oraz dolinę Indkilde,
- Madrid Barajas – linia dwutorowa, w której zastosowano po raz pierwszy kable o przekroju żyły 2500 mm² i na dodatek w każdym torze ułożono kable o innej konstrukcji (z litą powłoką metalową oraz tylko z folią aluminiową jako uszczelnieniem promieniowym) [3].



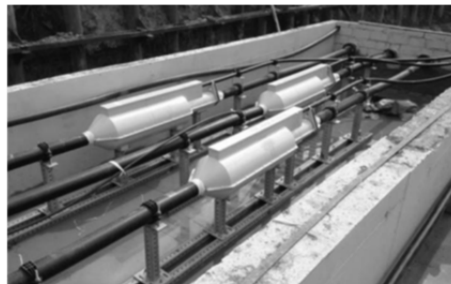
Rys.5. Próbkę kabla XLPE, 800 kV, 630 mm² (fot. autorka)

Wśród ciekawych projektów linii kablowych 400 kV należy wspomnieć projekt rozbudowy sieci w Londynie. Należy tutaj podkreślić że w Londynie poprzednio instalowano już kable 400 kV, lecz były to przede wszystkim kable o izolacji papier+olej i nie były układane w tak głęboko zlokalizowanych tunelach. Pierwszą linią kablową ułożoną kablami o izolacji XLPE była linia 400 kV o długości 20 km, ułożona w tunelu na maksymalnej głębokości 38 m i oddana do eksploatacji w 2005 r. Obecnie realizowana jest szeroko rozbudowa sieci kablowej 400 kV w stolicy wielkiej Brytanii w ramach *London Power Tunnel Project*. W marcu 2015 do eksploatacji oddano 4 pierwsze odcinki linii z 10 zaplanowanych – rysunek 6. W sumie planowane jest ułożenie około 196 km linii 400 kV w tunelach zlokalizowanych na głębokości od 30 do 60 m w centrum Londynu. Linie układane są kablami o izolacji XLPE o grubości 25 mm, a zakładana zdolność przesyłowa tych linii to 2555 A (zimą) i 2310 A (latem) – przy zastosowaniu wymuszonej wentylacji [11].



Rys.6. Tunel kablowy - linie 400 kV w Londynie [11]

Jak wspomniano, najwyższy poziom napięcia linii obecnie układanych kablami o izolacji wytłaczanej XLPE to 500 kV. Pierwszą dłuższą linią na ten poziom napięcia była oddana do eksploatacji w 2000 roku dwutorowa linia Shin-Keiyo – Toyosu w centrum Tokio o długości 39,8 km i zdolności przesyłowej 1200 MW/tor [12]. Inna linia 500 kV to oddana do eksploatacji w maju 2012 r linia dwutorowa Moskwa-Skolkovo, w której ułożono prawie 70 km kabla o przekroju żyły roboczej 2500 mm², o grubości izolacji 27,5 mm i średnicy zewnętrznej 150 mm. Linia zakopana jest w ziemi wraz z komorami, w których zlokalizowano mufy – rysunek 7 [11].



Rys.7. Mufy kablowe w linii 500 kV Moskwa-Skolkovo [11]

Linie kablowe DC

Dokonując przeglądu linii kablowych DC należy zwrócić uwagę, że ich dynamiczny rozwój w ostatnich latach związany jest m.in. z opracowaniem izolacji wytłaczanej z polietylenu usieciowanego, zmodyfikowanego do zastosowań w układach prądu stałego (XLPE-DC). Podczas Sesji Generalnej CIGRE w roku 2014, koncern ABB zaprezentował kabel na napięcie 525 kV, oczywiście z izolacją XLPE-DC. Zdolność przesyłowa tego kabla, w zależności od materiału żyły i jej przekroju, jest naprawdę imponująca (tabela 1, rys.8).

Tabela 1. Zdolność przesyłowa kabla o izolacji XLPE-DC na napięcie 525 kV DC

Przekrój [mm ²]	Zdolność przesyłowa kabla o żyłce	
	Al	Cu
1600	1,4 GW	1,8 GW
3000	2,0 GW	2,6 GW



Rys.8. Próbkę kabli 525 kV DC (fot. autorka)

Pozostając przy kablach o izolacji wytłaczanej, wśród linii o rekordowych parametrach należy wymienić przede wszystkim linie w technologii Light, opatentowanej przez koncern ABB. Najdłuższą linią kablową lądową HVDC w systemie Light jest ciągle linia Murraylink w Południowej Australii uruchomiona w 2002 r. Jest to linia o długości prawie 180 km (czyli 2 x 177 km kabla) na napięcie ±150 kV, o mocy przesyłowej 200 MW i prądzie

maksymalnym DC równym 1400 A [13]. Wśród linii morskich ciągle najdłuższą linią jest linia NorNed (Norwegia-Holandia) – ułożona kablami o izolacji tradycyjnej – czyli papier+syciwo (parametry tej linii to: ±450 kV, 700 MW, 580 km – oddana do eksploatacji w grudniu 2007). Na liście najdłuższych linii morskich DC musi się znaleźć linia NordBalt – łącząca system elektroenergetyczny Szwecji i Litwy. Jest ona najdłuższą obecnie linią HVDC Light. Parametry linii NordBalt to: zdolność przesyłowa 700 MW, napięcie ±300 kV, długość linii:

- o 2 x 400 km HVDC morski kabel Light (Al)
- o 2 x 40 km HVDC ziemny kabel Light (Al)
- o 2 x 13 km HVDC ziemny kabel Light (Al) [14, 15].

Linia została oddana do eksploatacji wiosną 2016 r.

Potwierdzeniem ważności tematyki linii kablowych DC jest fakt, że organizatorzy największej kablowej konferencji światowej Jicable, odbywającej się tradycyjnie co cztery lata (od 1981 r.) w Wersalu, złamali po raz pierwszy tę zasadę i zdecydowali się na zorganizowanie w 2013 r. dodatkowego, trzydniowego seminarium poświęconego tylko liniom DC. Po zakończeniu konferencji Jicable, od niedawna, odbywa się World Energy Transmission System Workshop WETS, na który zapraszana jest wybrana niewielka grupa ekspertów z całego świata. Podczas WETS w 2015 r. liniom kablowym prądu stałego poświęcono również bardzo dużo uwagi. Przedstawiono m.in. imponującą listę projektów budowy linii morskich HVDC, których realizacja planowana jest do roku 2020 [16]. Przewidywane jest układanie kabli o izolacji tradycyjnej (papier+syciwo), o izolacji PPL+olej i o izolacji XLPE-DC. Kablowe linie morskie o izolacji XLPE-DC coraz powszechniej układane są w połączeniach farm wiatrowych off-shore z systemem elektroenergetycznym danego kraju. Natomiast wśród planowanych spektakularnych linii morskich z kablami o izolacji papier+syciwo należy wymienić linię Monita (połączenie Włochy-Czarnogóra, 500 kV, 415 km – 2017 r.), NordLink (Norwegia-Niemcy, 525 kV, 568 km – 2019 r.), North Sea Link (Norwegia-Wielka Brytania, 750 km – 2021 r.), IceLink (Islandia-Wielka Brytania, ponad 1500 km – 2022 r.) oraz NorNed 2 (Norwegia-Holandia, ponad 550 km) i Euro-Asia Interconnectors (Grecja-Izrael, 1000 km) planowane do uruchomienia po 2020 roku.

Podsumowanie

Potwierdzeniem faktu, że ostatnie lata to dynamiczny rozwój nie tylko linii napowietrznych, ale także linii kablowych wysokich i najwyższych napięć są dane zawarte w raporcie CIGRE WG B1.47, przedstawionym podczas WETS'15 w czerwcu 2015 r w Wersalu [17]. Lista oddanych do eksploatacji linii 400 oraz 500 kV jest coraz dłuższa. Obecnie można już nawet mówić o „długich liniach” kablowych pracujących na napięcie w zakresie 380-500 kV. Jako linie charakteryzujące się „*long length*” przyjęto linie o długości powyżej 40 km dla napięcia poniżej 220 kV, a dla linii na napięcie powyżej 220 kV – o długości powyżej 20 km. Natomiast, gdy przeanalizuje się liczbę linii o znaczących długościach – posiadanych i planowanych do oddania do eksploatacji do roku 2019 – to Wielka Brytania z liczbą linii i sumaryczną długością tych linii 1157 km wysuwa się na czołówkę krajów rozwijających linie kablowe wysokich napięć. Oceniając sumaryczną długość linii kablowych w zakresie napięcia powyżej 60 kV i zaliczanych do „*długich linii*”, kolejne przodujące w tym zakresie kraje to: Japonia (590 km), Hiszpania (422 km), Norwegia (399 km) i Dania (355 km). Tylko w latach 2012-2015 oddano do eksploatacji 22 linie zaliczane do linii o znacznej długości, a sumaryczna długość ułożonych w tym okresie kabli to 1947 km [17].

W ramach ostatniej Sesji Generalnej CIGRE 2014 głównymi tematami dyskusji były:

- ekologiczne rozwiązania urządzeń i innych elementów systemu elektroenergetycznego,
- rozwój rozwiązań technicznych i technologicznych dla systemów prądu stałego (DC),
- monitoring w czasie rzeczywistym parametrów urządzeń i systemu elektroenergetycznego,
- uzyskiwanie społecznej akceptacji dla inwestycji elektroenergetycznych.

Doceniając ważność chociażby ostatniego z wymienionych problemów – należy w najbliższej przyszłości spodziewać się szczególnie dynamicznego rozwoju linii kablowych – linii na coraz wyższe poziomy napięcia i zapewniających coraz wyższe zdolności przesyłowe [11].

Podsumowując należy stwierdzić, że linie napowietrzne to:

- coraz wyższe poziomy napięcia,
- linie o coraz większych długościach,
- coraz wyższa obciążalność przewodów,
- innowacyjne konstrukcje wsporcze,
- izolacyjne poprzeczniki,
- ochrona środowiska (pole magnetyczne, aspekt społeczny i aspekt wizualny),
- dynamiczny rozwój linii HVDC,

a linie kablowe to:

- coraz wyższe poziomy napięcia,
- linie o coraz większych długościach,
- coraz większe przekroje żył roboczych,
- rozwój osprzętu kablowego,
- ochrona środowiska (pole magnetyczne, pas techniczny),
- dynamiczny rozwój linii HVDC.

Autorka: prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: aleksandra.rakowska@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Haimbl W., Compendium of HVDC schemes throughout the World, (1987) *CIGRE TB 003-17*
- [2] Rakowska A., Linie kablowe prądu stałego – wybrane zagadnienia, *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej* (2011)
- [3] Rakowska A., Elektroenergetyczne linie WN i EWN, *Energia Elektryczna*, PTPIREE (2015), Nr 10
- [4] Development of UHV Network in India, *INMR*, (2015) March 6
- [5] <https://www.google.pl/search?q=Jindongnan-Jingmen+Line+line>
- [6] Rakowska A., Konstrukcje wsporcze wysokonapięciowych linii napowietrznych – nowe koncepcje, *Wiadomości Elektrotechniczne* (2015) Nr 9
- [7] http://www.choishine.com/port_projects/landsnet/landsnet.html
- [8] <http://www.power-technology.com/projects/gorges>
- [9] DC power transmission poised for explosive growth, *INMR*, (2014), July No 2
- [10] Puzzkarek D., Wysokonapięciowe linie napowietrzne i linie kablowe AC i DC – porównanie zdolności przesyłowych, *praca dyplomowa IE PP* (2015)
- [11] Weinlein A., Peters U., Laage U., Memmer H., Worldwide experiences and challenges with EHV XLPE cable projects 330 kV to 500 kV, *JICABLE* (2015), paper A1.1
- [12] Rakowska A., Rozwój linii kablowych wysokich i najwyższych napięć, *Wiadomości Elektrotechniczne*, (2014) Nr 1
- [13] Worzyk T., Jeroense M., Farr M., Sörqvist T., The Murraylink project – the first commercial 150 kV extruded HVDC cable system, Versailles, *JICABLE* (2003), paper A.7.4
- [14] Ronström L., Hoffstein M L., Pajo R., Lahtinen M., The Estlink HVDC Light Transmission System, *CIGRE Regional Meeting*, June 18-20 (2007), Tallinn
- [15] <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/nordbalt>
- [16] Penserini P., HVDC Projects, *WETS'15* (2015) Wersal
- [17] Barber K., Issues related to long length HVAC cables – reliability of supply, *WETS'15* (2015) Wersal