

Rozwój linii kablowych wysokich i najwyższych napięć a badania odbiorcze

Streszczenie. *Rozwój linii kablowych napięcia przemiennego i stałego na coraz wyższe napięcia wymaga wykonywania badań odbiorczych tych linii i stosowania urządzeń umożliwiających uzyskać odpowiednie parametry probiercze*

Słowa kluczowe: linie kablowe wysokich i najwyższych napięć, badania odbiorcze

Wprowadzenie

Dane opublikowane przez jedną z Grup Roboczych CIGRE [1] potwierdzają, że linie elektroenergetyczne wysokich (WN) i najwyższych napięć (NN) układane w ostatnich latach, to prawie wyłącznie linie z kablami o izolacji z polietylenu usieciowanego (XLPE). Bardzo pozytywne doświadczenia uzyskane z eksploatacji tego typu kabli utwierdzają projektantów o słuszności wyboru XLPE jako izolacji kabli WN i NN. W instalowanych aktualnie liniach kablowych obserwowany jest nie tylko wzrost poziomu napięcia (wiele linii 500 kV), ale i obciążalności (coraz częściej układane są kable z żyłami o przekroju 2500 i 3000 mm²). W kilku państwach realizowane są prace modernizacyjne, które polegają na zastępowaniu kabli o izolacji papier+olej kablami o izolacji XLPE w liniach eksploatowanych przez wiele lat. Między innymi coraz ostrzejsze wymagania środowiskowe doprowadziły w Japonii do zastąpienia, w wybranych liniach, kabli o izolacji papier+olej – kablami o izolacji XLPE, co opisano w artykule [2]. Dotyczyło to linii ułożonych w tunelach i kanałach, przypadków dla których nie było możliwe zwiększenie obciążalności lub wymiarów istniejących tras kablowych, a czasami aby dodatkowo uzyskać odpowiednią obciążalność linii 154 kV i 275 kV zastosowano specjalne systemy wodnego chłodzenia.

Podczas Sesji Generalnej CIGRE zawsze organizowana jest wystawa techniczna. W roku 2010 mimo, że na wystawie królowało hasło „*Smart Grid*”, to i tak kilkanaście stoisk poświęconych było kablom elektroenergetycznym i osprzętowi kablowemu. Na jednym z nich zaprezentowano między innymi kable na napięcie przemiennego 800 kV, oczywiście o izolacji XLPE (rys.1) – co dowodzi pokonania kolejnej bariery technologicznej.

Na tej wystawie również po raz pierwszy pokazano kable lądowe prądu stałego typu Light na napięcie 320 kV. Co dowodzi, że jest także dynamiczny rozwój kabli prądu stałego z izolacją wytłaczaną w zakresie kabli zarówno lądowych jak i morskich – rys. 2. Izolację w kablach DC typu Light stanowi polietylen usieciowany zmodyfikowany (XLPE-DC) w celu zwiększenia odporności tej izolacji na tworzenie się ładunku przestrzennego w polu elektrycznym. Główną zaletą kabli HVDC linii Light, w porównaniu z równoważnymi kablami HVAC, jest między innymi ich mniejsza masa i średnica. Prowadzi to do wzrostu tzw. gęstości przesyłanej mocy energii elektrycznej. Należy pamiętać, że system prądu przemiennego składa się z trzech kabli, a system prądu stałego z dwóch kabli.



Rys. 1. Próbkę kabla XLPE, 800 kV, 630 mm² (fot. autorka)



Rys. 2. Kable HVDC Light; kabel lądowy ± 320 kV oraz kabel morski z linii East West Interconnector (± 200 kV, 500 MW) (fot. autorka)

Badania prototypowego kabla HVDC Light na napięciu 320 kV wykonano w systemie kablowym składającym się z odcinka kabla z żyłą aluminiową o przekroju 1200 mm² oraz z osprzętu kablowego wykonanego w technologii prefabrykowanej (mufa i głowice). Przyjęto maksymalną temperaturę pracy 70°C. Podczas badań przyjęto zwiększony współczynnik krotności napięcia probierczego podczas cykli obciążeniowych i zastosowano napięcie $2,0 \times U_0$. Wyniki testu długotrwałego wykonanego z użyciem pełnowymiarowego systemu 320 kV i przeprowadzonego zgodnie z rekomendacjami CIGRE były pozytywne [3].

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Przykładowe linie kablowe NN

Konieczność rozbudowy linii kablowych na terenie wielkich metropolii wiąże się z układaniem coraz dłuższych linii kablowych WN i NN w tunelach. Przykładowo w publikacji [4] omówiono technologię układania linii 400 kV w Londynie na trasie Beddington – Rowdown Tunnel. Linię ułożono w tunelu o długości około 10 km i średnicy 3 m. Najdłuższe odcinki fabryczne kabla o przekroju żyły roboczej 2500 mm² miały 1176 m (co jak dotychczas jest rekordem w Wielkiej Brytanii). Kable układane były w układzie pionowym, przy zachowaniu pomiędzy fazami odległości 500 mm i podparciu linii co około 7,2 m. Przy projektowaniu ułożenia linii kablowej w tunelu należy pamiętać o oszacowaniu rozszerzalności termicznej wzdłużnej kabla. Dlatego wskazane jest układanie kabli linią „węzową”, co oczywiście zostało zachowane także przy układaniu omawianej linii. Bardzo ważny jest także prawidłowy montaż osprzętu kablowego, ze szczególnym zachowaniem nakazanych przez producenta osprzętu procedur oraz super czystości. Na rys.3 pokazano wewnątrz namiotu do montażu muf. W namiotach tych zastosowano okna, pozwalające na nadzór nad wykonywanymi pracami bez konieczności wchodzenia do wewnątrz.



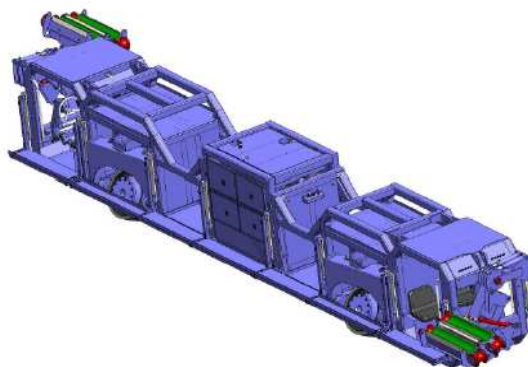
Rys. 3. Montaż muf kablowych wewnątrz namiotu [4]

Dla prawidłowego montażu linii w tunelu opracowano modułowy pojazd przemieszczający się wewnątrz tunelu i umożliwiający zmechanizowanie oraz maksymalne uproszczenie czynności instalacyjnych (rys. 4).

W Polsce już możemy pochwalić się również faktem, że jest eksploatowana linia kablowa na napięcie 400 kV. Na świecie jednakże coraz częściej prezentowane są informacje na temat kolejnych, oddawanych do eksploatacji linii kablowych na napięcie 500 kV. Oczywiście linie te układane są w ostatnich latach wyłącznie kablami o izolacji wytłaczanej.

Przykładowo w Szanghaju zainstalowano, pierwszą w tej metropolii, linię 500 kV ułożoną w tunelu na głębokości około 30 m [5]. Zdolność przesyłowa jednego toru linii to 1550 MVA i jest ona równoważna do zdolności przesyłowej 3-4 linii 220 kV. Ułożone kable posiadają przekrój żyły roboczej 2500 mm². Wyposażonej w 69 muf prefabrykowanych i 6 głowic (w systemie GIS) długość linii wynosi 17,2 km. Kable

dostarczane były w odcinkach około 720-metrowych, a montaż całej linii trwał 12 miesięcy. Oddanie linii do eksploatacji odbyło się w kwietniu 2010 roku, czyli miesiąc przed otwarciem World Expo 2010. Na rysunku 5 pokazano ułożenie kabli w tunelu oraz widok mufy prefabrykowanej. Wymiary tunelu to 3,5×5,5 m. Ułożenie kabli w trójkąt utrzymywane jest dzięki założonym opaskom nylonowym [5]. Badania odbiorcze linii przeprowadzono napięciem przemiennym w etapie wstępnym przez 24 godziny przy wartości U_0 , a następnie jako badanie odbiorcze dość nietypowo przyłożono to samo napięcie, lecz przez okres 72 godzin. Podczas tych badań kontrolowano poziom wyładowań niezupełnych we wszystkich głowicach i mufach kablowych.



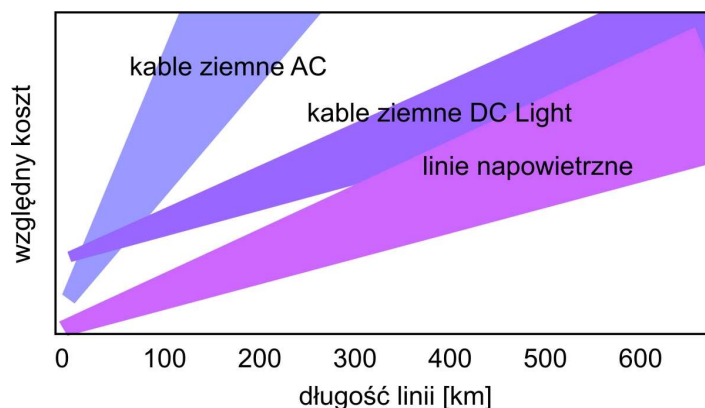
Rys. 4. Pojazd do montażu linii kablowej w tunelu [4]



Rys. 5. Ułożenie linii kablowej 500 kV w tunelu – Szanghaj [5]

Należy spodziewać się także szybkiego rozwoju linii kablowych DC w systemie Light, gdy spojrzemy na porównanie kosztów budowy linii HVDC Light z kosztami budowy równoważnych linii HVAC oraz linii napowietrznych (rys.6).

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 6. Względny koszt budowy linii wykonanych z zastosowaniem różnych technologii – łącznie z kosztem instalacji (wg 6)

Rozwój wysokonapięciowych linii kablowych prądu stałego to nie tylko linie lądowe i morskie w technologii Light, ale także budowanie nowych linii – szczególnie morskich – o izolacji i konstrukcji tzw. tradycyjnej, czyli o izolacji papier+syciwo. Jedną z najdłuższych linii kablowych prądu stałego jest linia NorNed, ułożona kablami o takiej izolacji. Zadaniem tej linii jest umożliwienie przesyłu energii pochodzącej z norweskich elektrowni wodnych do Holandii, a w okresach suchych lub w porze nocnej – przesyłu energii w kierunku odwrotnym, czyli z Holandii do Norwegii [7]. Dodatkowo praca tej linii stabilizuje pracę systemu elektroenergetycznego podczas podłączania kolejnych farm wiatrowych. Jest to linia o zdolności przesyłowej 700 MW przy napięciu DC ± 450 kV i natężeniu prądu 824 A. Długość linii wynosi 580 km, a głębokość ułożenia na niektórych odcinkach – do 410-420 m. Inwestorami linii były firmy Statnett (Norwegia) i TenneT (Holandia), a koszt inwestycji oszacowano na 495 milionów euro [8]. Realizację projektu NorNed rozpoczęto w styczniu 2005 roku, układanie kabla wiosną 2006 roku, a linię oddano do eksploatacji 31 grudnia 2007 roku. Interesującym faktem jest to, że planowana jest już budowa linii NorNed 2 [9].

Badania odbiorcze linii kablowych

Należy zwrócić uwagę, że układanie linii kablowych na coraz wyższe napięcia robocze wymaga dostosowania układów probierczych do wykonywania badań odbiorczych tych linii. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy zestaw probierczy do badań odbiorczych kabli WN i NN.

Ponieważ w naszym kraju nadal linie kablowe prądu stałego są bardzo nieliczne (połączenie Polska-Szwecja, linie kablowe w górnictwie odkrywkowym) w artykule skupiono się tylko na badaniach linii AC. Można tylko zanotować, że po ułożeniu linii kablowych DC z reguły na okres 15 minut należy przyłożyć napięcie $1,45 \times U_0$ o biegunowości ujemnej.

Badania odbiorcze linii kablowych prądu przemiennego zazwyczaj wykonuje się zgodnie ze standardem IEC 62067 (*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*). W normie tej przedstawiono wymagania dotyczące badań elektrycznych podczas badań odbiorczych (ang. *electrical tests after installation*). Napięcie stałe zostało wymienione jedynie jako napięcie do badania powłoki zewnętrznej (ang. *DC voltage test of the oversheath*) – w polskiej nomenklaturze nazywane jako badanie szczelności powłoki. Natomiast próba napięciowa izolacji wg tej normy może być wykonywana jedynie napięciem przemiennym (ang. *AC voltage test of the insulation*). Wskazywana jest częstotliwość napięcia zmiennego od 20 Hz do 300 Hz. Wartości zalecanego napięcia probierczego podano w tablicy 1. W normie IEC 60840 dopuszczono także możliwość alternatywnego zastosowania badania napięciem równym napięciu znamionowemu linii przez 24 godziny. Jednakże ten sposób badania (o ile jest zrozumiały ze względu na trudności techniczne wykonywania badań odbiorczych linii kablowych na coraz wyższe napięcia) budzi wiele kontrowersji i oceniany jest jako próba, która tak naprawdę nie potrafi wykryć ewidentnych nawet wad zainstalowanych elementów linii kablowej.



Rys. 7. Badanie linii kablowej 400 kV w Katarze [10]

Tablica 1. Napięcia probiercze podczas prób odbiorczych [11]

Lp.	Napięcie znamionowe	Napięcie probiercze (faza- ziemia)
	[kV]	[kV]
1	45-47	52
2	60-69	72
3	110-115	128
4	132-138	132
5	150-161	150

Standardy IEC definiują parametry napięcia probierczego dla prób odbiorczych dla linii kablowych. Należy stosować napięcie probiercze o wartości zgodnej z wartościami podanymi w tablicach 1 i 2 lub zastosować napięcie probiercze o wartości dobranej do specyficznych warunków eksploatacyjnych.

W konkretnych warunkach odbioru danej linii można stosować (za zgodą producenta i inwestora) inne wartości napięcia probierczego. Dla wyższych poziomów napięć linii kablowych poziom napięcia probierczego zmniejsza się i wynosi wówczas: $1.4 \times U_0$ (220-230 kV), $1.3 \times U_0$ (275-345 kV), $1.2 \times U_0$ (380-500 kV) i $1.1 \times U_0$ dla kabli 500 kV. Akceptowalny jest także test przy $1 \times U_0$ przez okres 24 godzin. Każdorazowo dla kabli najwyższych napięć wymagane jest wspólne opracowanie zakresu badań przez

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

producenta i inwestora (odbiorcę, właściciela linii). Jak dotychczas w zaleceniach nie stawiany jest wymóg przeprowadzania pomiaru wyładowań niezupełnych w ramach prób odbiorczych.

Tablica 2. Napięcie probiercze podczas badań odbiorczych linii kablowych WN i NN [12]

Napięcie znamionowe		Napięcie probiercze (faza- ziemia) [kV]
U [kV]	U ₀ [kV]	
220 do 230	127	180
275 do 287	160	210
330 do 345	190	250
380 do 500	220	280
500	290	320

W przypadku prób odbiorczych po remontach lub usuwaniu uszkodzenia można stosować niższe napięcia lub krótsze czasy prób w zależności od wieku, dotychczasowej „historii eksploatacyjnej” i stanu linii.

Wydaje się, że słusznym i zgodnym z trendami standardów i doświadczeń międzynarodowych jest zapis umieszczony w najnowszej „Instrukcja eksploatacji elektroenergetycznych linii kablowych” opracowanej przez Zespół ds. kabli elektroenergetycznych Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej – przytoczony poniżej. Instrukcja ta została wstępnie przygotowana na konferencję kablową w Toruniu w 2009 roku, lecz stwierdzono, że ówczesny zapis nie spełnia wymagań międzynarodowych i ostateczna wersja została zatwierdzona na konferencji PTPiREE w Łodzi w roku 2011, a w dyskusji zasugerowano autorom przygotowywanej przez PKN modyfikacji normy SEP-owskiej, aby uwzględnili te zapisy. Dyskusja nad rodzajem stosowanych napięć oraz procedur prowadzenia prób odbiorczych linii kablowych w naszych krajowych warunkach dotyczy głównie testów prowadzonych na liniach 110 kV.

Tablica 3. Zalecane metody probiercze i diagnostyczne [13]

Napięcie linii	Rodzaj izolacji kabla	DC	VLF 0,1 Hz	AC 20-300 Hz	DAC
SN 6- 30 kV	XLPE i PE	TAK ^{*)}	TAK	TAK	TAK
	pap+syciwo	TAK	TAK	TAK	TAK
WN 31-110 kV	XLPE i PE	NIE ^{*)}	NIE	TAK	TAK
	pap+syciwo	NIE	NIE	TAK	TAK

**) Według norm międzynarodowych stosowanie do próby napięcia DC może być szkodliwe zarówno dla izolacji XLPE kabli WN jak i osprzętu kablowego, przy czym szczególnie zagrożona jest izolacja wyłaczana kabli już eksploatowanych. Zaleca się, aby zgodnie z międzynarodową normą IEC 60840 i IEC 62067, w przypadku linii WN z izolacją XLPE napięcie próby było sinusoidalne o częstotliwości w zakresie 20 – 300 Hz. W przypadku wykonania próby napięciem DC ze względu na zagrożenie uszkodzenia linii kablowej spowodowane obecnością ładunków przestrzennych pozostałych po próbach DC, kable bezpośrednio po próbie napięciowej muszą zostać rozładowane i skutecznie uziemione. Rozładowanie to powinno być wykonane wolno poprzez uziemienie żyły roboczej z włączonym szeregowo rezystorem. Po rozładowaniu kabla żyły robocze i żyły powrotne poszczególnych faz powinny być zwarte i trwale uziemione do czasu tuż przed podłączeniem linii do sieci, ale nie krócej niż 3 godziny.*

W tablicy 3 pojawia się skrót DAC, czyli możliwość wykonywania badań odbiorczych przy użyciu systemów OWTS (ang. *Oscillating Wave Test System*). System ten pozwala uzyskać tłumione napięcie przemiennie (ang. *Damped Alternating Current Voltage – DAC*) o czasie trwania kilkudziesięciu okresów i częstotliwości do kilkuset Hz. System ten znany jest już od dawna [14], a aparatura probiercza budowana jest na coraz wyższe napięcia [15]. Także i w Polsce użytkowanych jest wiele systemów OWTS do badania linii napięcia średniego oraz wykonano pilotażowe badania na liniach 110 kV [16]. Ponadto użycie tego systemu pomiarowego może w łatwy sposób pomóc w badaniu wylądowań niezupełnych i lokalizacji miejsca ich występowania, zgodnie z zaleceniami normy IEC 60270. Wykonywanie prób napięciowych napięciem DAC jest zgodny z wymaganiami IEC 60840, IEC 62067 oraz IEEE 400: *Guide for Field testing and evaluation of the insulation of shielded power cable systems rated 5 kV and above, a także HD 632 S2 (CENELEC): Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV (Um=42 kV) up to 150 kV (Um= 170 kV)*.

W szczególności, normy IEC 60840 i IEC 62067 zalecają, aby napięcie probiercze miało kształt sinusoidalny o częstotliwości w zakresie 20-300 Hz. Napięcie wytwarzane przez opisywany system pomiarowy spełnia oba te wymagania i dlatego może on być wykorzystywany do prób kabli elektroenergetycznych *on-site* [17]. A normy IEEE 400 i IEEE 400.3 wręcz zalecają stosowanie napięcia DAC do wykonania prób napięciowych i badania wnz.

Podsumowanie

Prawidłowe przeprowadzenie badań linii kablowych powinno w sposób czytelny i jednoznaczny ocenić jej jakość oraz zdolność do pracy w sieci elektroenergetycznej. Należy jednak pamiętać, że zbyt wysokie wymagania dotyczące badań linii kablowych mogą prowadzić do zmniejszenia żywotności czy nawet uszkodzenia kabla – czyli efektu odwrotnego niż zamierzony. Testy mają być nieniszczącymi badaniami układu. Prawidłowa ocena przeprowadzonych badań powinna w sposób jednoznaczny określić stan izolacji układu – jednakże warunki przeprowadzenia tych badań nie mogą w badanej linii kablowej. W badaniach odbiorczych linii należy przyjąć zapis sformułowany w najnowszej wersji *Instrukcji eksploatacji linii kablowych*, pamiętając, że badania napięciowe wykonywane tłumionym napięciem probierczym przemiennym DAC mogą być stosowane jako alternatywne do prób wykonywanych tradycyjnym napięciem przemiennym AC. najmniejszym stopniu wpływać na skrócenie czasu życia (prawidłowej eksploatacji)

LITERATURA

- [1] Rosevear R.D., Choquette M., Mampeay B., Rakowska A., Waschk V., Update of service experience of HV underground and submarine cable systems, CIGRE TB 379, April 2009, ISBN 978-2-85873-066-7, s. 1-84
- [2] Tsuchiya S., Kiguchi T., Nishiuchi M., Katakai S., Nakajima T., Owashi M., The new technologies for replacement and uprating of EHV cable lines in Japan, CIGRE Session 2010, paper B1-102
- [3] Jeroense M., Bergkvist M., Gustafsson A., Svahn J., Increase voltage for the HVDC Light product range – a complete solution, in: JICABLE, Versailles, 2007, paper B.4.7
- [4] Christensen P., Nielsen J.L., Hanekom A., Cheale D., Improved installation methodologies for EHV cables in underground tunnels, JICABLE 2011, paper A.1.6

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

- [5] Wong H.N., Yamamoto S., Torai Y. Yang W., Technical solution to completion of the world first 500 kV XLPE underground cable system in Shanghai, JICABLE 2011, paper A.3.3
- [6] Jeroense M., Gustafsson A., Bergkvist M., HVDC Light cable system extended to 320 kV, in: CIGRE Session, Paris, 2008, paper B1-304
- [7] Rakowska A., Linie kablowe prądu stałego – wybrane zagadnienia, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2011
- [8] <http://www.abb.com/cawp/gad02181/8c5558c304d0eb13c1256f77003a33a1.aspx>
The NorNed HVDC link (5.08.2010)
- [9] Achievement and experience in service of long length high voltage electric links by AC and DC insulated power cables, World Energy Transmission System, Workshop WETS'11, Versailles, 2011
- [10] Schreiter F., Schierig S., Coors P., Alternatives for HVAC testing of long HV cables in the factory and on-site, JICABLE 2011, paper A.8.5
- [11] IEC 60840-2011 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
- [12] IEC 62067 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
- [13] Instrukcja eksploatacji elektroenergetycznych linii kablowych, PTPIREE, maj 2011
- [14] Aucourt C., Boone W., Kalkner, W., Naybour R.D. Ombello, F., Recommendations for a New After Laying Test Method for High Voltage Extruded Cable Systems, CIGRE Paper No. 21-105, August, 1990
- [15] Seitz P.P., Quak B., Gulski E., Smit J.J., Cichecki P., de Vries P., Petzold F., Novel Method for On-site Testing and Diagnosis of Transmission Cables up to 250kV, Proceedings JICABLE'07, 7th Intern. Conf. Insulated Power Cables, Versailles, France, Paper 16, 2007
- [16] Gulski E., Rakowska A., Siodła K., Cichecki P., Pots D., Smit J., Implementation of modern methods of on-site testing and diagnosis of HV power cables, JICABLE, Versailles, France, June 2011, paper D.3.4
- [17] Gulski E., Lemke E., Gockenbach E., Hauschild., Experiences in partial discharge detection of distribution power cable systems, CIGRE, Vol 208 Electra, pp. 34-43, 2003

Autor: *prof.nadz. PP dr hab. inż. Aleksandr Rakowska; Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, e-mail: aleksandra.rakowska@put.poznan.pl*