

## POMIARY I MODELOWANIE WPLYWU PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH NA WYSTĘPUJĄCE W NICH ZJAWISKA FALOWE

Paweł ZYDRON, Józef ROEHRICH

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel: 012 6172886 fax: 012 6345721 e-mail: pzydron@agh.edu.pl, roehrich@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Kable elektroenergetyczne charakteryzują się dużą różnorodnością wykonania, zarówno jak chodzi o ich geometrię, strukturę poszczególnych elementów funkcjonalnych w przekroju kabla, jak również stosowane materiały konstrukcyjne. Ma to wpływ na właściwości transmisji sygnałów elektrycznych, w szczególności sygnałów szybkozmiennych, co z kolei w wielu praktycznie spotykanych sytuacjach ma znaczenie dla poprawności analizy rejestrowanych przebiegów falowych.

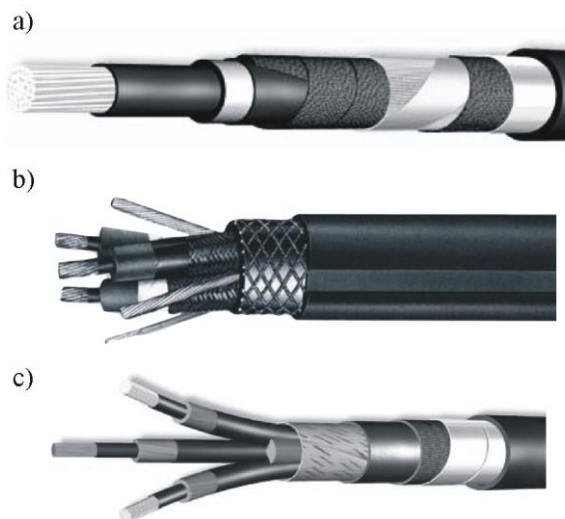
Właściwości transmisyjne, w tym prędkość propagacji fali, impedancja falowa, tłumienność itd. mają znaczenie zarówno przy analizie sygnałów o dużych amplitudach – charakterystycznych dla fal przepięciowych pojawiających się w układach elektroenergetycznych, jak również przy sygnałach o niewielkich energiach, ale o bardzo krótkich czasach trwania – występujących np. podczas pomiarów impulsów wyładowań niezupełnych, powstających w defektach izolacji kablowej lub w osprzęcie kablowym.

Celem artykułu jest: 1) przedstawienie wpływu konstrukcji kabli na występujące w nich zjawiska falowe na przykładzie wyników pomiarów prędkości propagacji impulsów wykonanych na wybranych, różnych rodzajach kabli, 2) opis modeli kabli stosowanych dla szacowania właściwości transmisyjnych – opartych na schematach zastępczych, uwzględniających poszczególne elementy ich konstrukcji.

**Słowa kluczowe:** kable elektroenergetyczne, parametry falowe, prędkość propagacji

### 1. WPROWADZENIE

Zgodnie ze stosowanymi w Polsce określeniami kabel elektroenergetyczny jest to: wyrób przemysłowy składający się z jednej lub większej liczby żył izolowanych, zaopatrzonej w powłokę metalową lub niemetalową oraz ewentualnie – w zależności od warunków układania i eksploatacji – w osłonę ochronną i pancerz; przystosowany do układania bezpośrednio w ziemi, wodzie lub kanałach podziemnych, albo też do zawieszenia w powietrzu. Konstrukcja kabla, liczba i przekrój żył, rodzaj zastosowanej izolacji, zastosowanie ekranów ochronnych itp. są zależne m.in. od wartości napięcia roboczego, na jakie kabel jest projektowany. Na rysunku 1 przedstawiono przykłady współczesnych kabli elektroenergetycznych.



Rys 1. Przykładowe konstrukcje kabli elektroenergetycznych średniego napięcia: a) kabel typu XRUHAKXS o izolacji z polietylenu usieciowanego XLPE, b) kabel górniczy typu SHD-GC o izolacji z gumy etylenowo-propylenowej EPR, c) kabel typu HAKnFty o izolacji papierowej przesyconej syciwem nieściekającym (na podstawie [12, 13])

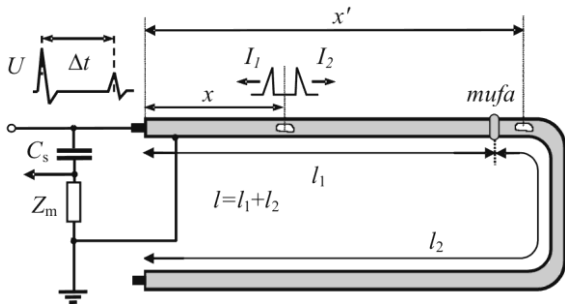
W badaniach diagnostycznych kabli elektroenergetycznych oraz lokalizacji ich uszkodzeń często zachodzi konieczność posiadania informacji na temat wartości parametrów falowych kabla, w tym przede wszystkim prędkości propagacji fali  $v$ . Informacja ta jest niezbędna we wszystkich metodach bazujących na pomiarze różnicy czasów propagacji impulsów: bezpośredniego i odbitego, określanym mianem metod reflektometrycznych lub metod TDR (ang. *Time Domain Reflektometry*).

Prędkość propagacji ma również wpływ na warunki powstawania przepięć w kablach zasilających urządzeń z układami przekształtnikowymi PWM.

Wpływ na prędkość propagacji  $v$  mają zarówno parametry dielektryka stanowiącego izolację żyły kabla, jak również inne elementy jego konstrukcji, na przykład stosowane od pewnego poziomu napięcia ekrany półprzewodzące na żyły i na izolacji.

## 2. PRĘDKOŚĆ PROPAGACJI IMPULSÓW W KABLU – PROBLEMY PRZYKŁADOWE

W badaniach diagnostycznych kabli, podczas lokalizacji uszkodzeń oraz wykrywania defektów występujących w izolacji kabla lub mufach kablowych stosowane są metody reflektometryczne [1-4]. Na rysunku 2 przedstawiono przypadek lokalizacji źródeł wyładowań niepełnych (wnz) w linii kablowej składającej się z dwóch odcinków kabli o różnej izolacji. Hipotetyczny defekt jest zlokalizowany w odległości  $x$  lub  $x'$  od jednego z końców linii, do którego podłączono górnoprzepustowy układ detekcyjny.



Rys. 2. Lokalizacja źródeł wnz w linii kablowej – układ modelowy

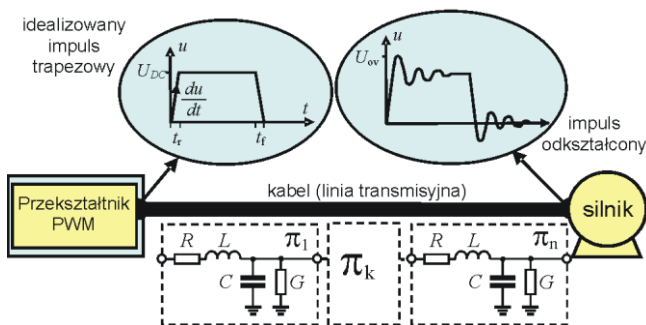
Lokalizacja defektu bazuje na pomiarze różnicy czasu  $\Delta t$  pomiędzy impulsem docierającym bezpośrednio ze źródła sygnału (defektu), a impulsem odbitym od drugiego końca linii. Czas te można opisać wzorami:

$$\Delta t = \frac{2l_2}{v_2} + \frac{2(l_1 - x)}{v_1} \quad (1)$$

$$\Delta t' = \frac{2(l - x')}{v_2} \quad (2)$$

dla których obliczenia konieczna jest dokładna znajomość prędkości propagacji  $v_1$  i  $v_2$ .

Prędkość propagacji impulsów napięciowych w kablu  $v$  ma wpływ na powstawanie przepięć przy zasilaniu silników z przetworników PWM generujących sekwencje impulsów o modulowanej szerokości (Rys. 3).



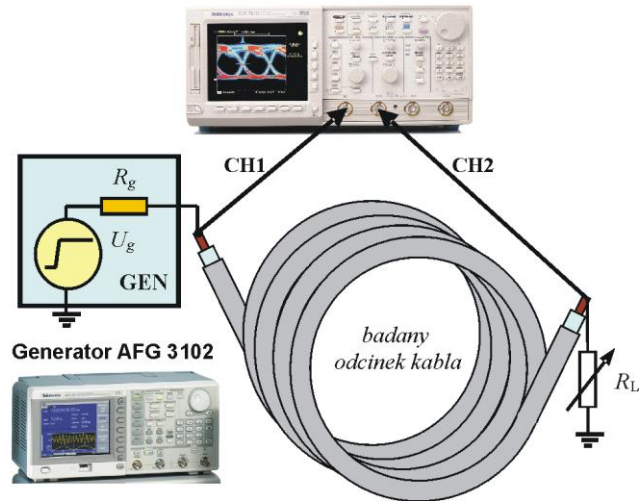
Rys. 3. Model układu przetwornik PWM–kabel–silnik

Ze względu na właściwości falowe kabla oraz wzajemny stosunek jego impedancji falowej i impedancji silnika może dojść do powstawania przepięć zależnych m.in. od czasu narastania  $t_r$  impulsu napięciowego na wyjściu przetwornika PWM [5]. Krytyczną długość kabla  $l_{cr}$ , powyżej której dochodzi do powstawania znaczących przepięć można szacować jako równą połowie odległości pokonywanej przez impuls propagujący z prędkością  $v$  w czasie równym  $t_r$ :

$$l_{cr} = (t_r \cdot v) / 2 \quad (3)$$

## 3. OPIS UKŁADU POMIAROWEGO

Podczas badań laboratoryjnych dokonano rejestracji czasów propagacji impulsów napięciowych w kilku rodzajach kabli o różnej izolacji. Na tej podstawie dla każdego z nich wyznaczono charakterystyczne prędkości propagacji. Rysunek 4 przedstawia układ pomiarowy, który zastosowano podczas badań.



Rys. 4. Układ do wyznaczania prędkości propagacji impulsów

Elementami układu pomiarowego do badania parametrów falowych kabli były:

- 1) generator programowany Tektronix AFG 3102,
- 2) oscyloskop szerokopasmowy Tektronix TDS784D
  - pasmo analogowe 1 GHz
  - częstotliwość próbkowania do 4 GHz
  - tryb pracy: wielokrotne uśrednianie.
- 3) bezindukcyjny rezystor dekadowy  $R_L$ .

oraz nie przedstawiony na rysunku:

- 4) komputer z kartą interfejsową IEEE-488 (GPIB) i programem Tektronix WaveStar

Generator programowany AFG-3102 umożliwia m.in. generację impulsów napięciowych o czasie narastania poniżej 5 ns oraz o szerokości połówkowej 8 ns. Ma to znaczenie w przypadku badania krótkich odcinków kabli.

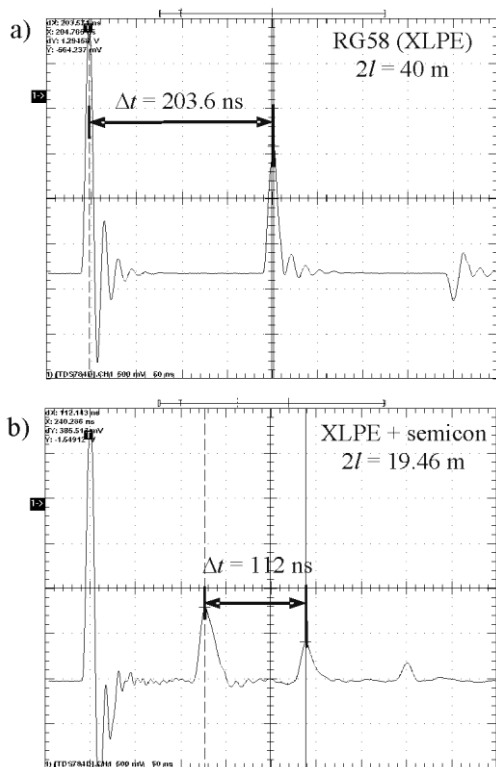
W tabeli 1 przedstawiono zasady wyznaczania czasów propagacji fali metodami: jedno- i dwukanałową.

Tabela 1. Metody pomiaru prędkości propagacji fali w kablu

	Metoda 1-kanałowa	Metoda 2-kanałowa
Propagacja zbrocza	<p>a) fala pierwotna      powrót fali odbitej</p> <p>czas <math>\Delta t'</math></p> <p>czas <math>t</math></p>	<p>b) początek linii      koniec linii</p> <p>czas <math>\Delta t'</math></p> <p>czas <math>t</math></p>
Propagacja impulsu	<p>c) fala pierwotna      powrót fali odbitej</p> <p>czas <math>\Delta t'</math></p> <p>czas <math>t</math></p>	<p>d) początek linii      koniec linii</p> <p>czas <math>\Delta t'</math></p> <p>czas <math>t</math></p>

#### 4. WYNIKI POMIARÓW

Podczas badań wykonano pomiary czasów propagacji impulsów i wyznaczono prędkości ich propagacji w kilku kablach różnego typu. Dla porównania, poza trzema kablami elektroenergetycznymi wyznaczono prędkości propagacji w kablach koncentrycznych typu RG58 i RG59 z izolacją XLPE. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe oscylogramy zarejestrowane podczas pomiarów wykonanych dla kabla RG58 oraz dla kabla typu XRUHAKXS posiadającego wytłoczone ekrany półprzewodzące na żyłę i na izolacji.



Rys. 5. Przykładowe oscylogramy propagacji impulsu zarejestrowane podczas pomiarów: a) kabla RG58, b) kabla średniego napięcia typu XRUHAKXS

Bardzo często, podczas obliczeń inżynierskich przyjmuje się, że prędkość propagacji fali w kablu można szacować wzorem:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \Big|_{\mu_r=1} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

gdzie:  $c$  – prędkość fali E-M w próżni,  $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$  – elektryczna i magnetyczna przenikalność względna

W tabeli I zebrano wyznaczone na podstawie pomiarów prędkości propagacji impulsów w badanych kablach oraz oszacowaną na podstawie (4) wartość zastępczej przenikalności elektrycznej względnej izolacji  $\epsilon_r^*$ .

Tabela 2. Wyniki pomiarów prędkości propagacji impulsów

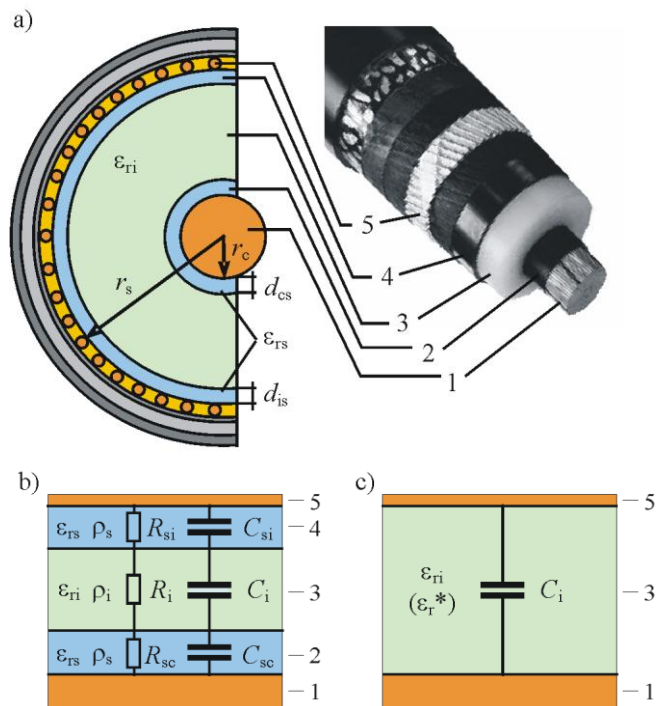
Lp.	Typ kabla	Izolacja	Ekran półprzewodzące	Prędkość propagacji [m/s]	$\epsilon_r^*$
1.	RG58	XLPE	Nie	$1,97 \cdot 10^8$	2,32
2.	RG59	XLPE	Nie	$1,93 \cdot 10^8$	2,41
3.	XRUHAKXS	XLPE	Tak	$1,74 \cdot 10^8$	2,97
4.	SHD-GC	EPR	Tak	$1,20 \cdot 10^8$	6,24
5.	HAKnFty	Papier	Tak	$1,48 \cdot 10^8$	4,12

#### 5. MODELOWANIE WPŁYWU KONSTRUKCJI KABLA NA JEGO PARAMETRY FALOWE

Zagadnienie wpływu konstrukcji kabla na jego parametry falowe ma swoją obszerną literaturę, a prace w tym zakresie są wciąż prowadzone [3, 6-11]. Prędkość propagacji impulsów wynika z konstrukcji kabla, braku lub obecności ekranów półprzewodzących oraz rodzaju materiałów zastosowanych na izolację i na ekrany.

Na rysunku 6 przedstawiono poglądowo budowę współczesnego kabla elektroenergetycznego, wyróżniając w jego przekroju poprzecznym elementy istotne dla określenia parametrów falowych, w tym również prędkości propagacji [6, 10, 11]. W opisie konstrukcji kabla z rysunku 6 wymienić należy:

- 1) parametry geometryczne:  $r_c$  – promień żyły,  $r_s$  – promień ekranu przewodzącego,  $d_{cs}$  – grubość ekranu półprzewodzącego na żyłę,  $d_{is}$  – grubość ekranu półprzewodzącego na izolacji;
- 2) parametry materiałowe:  $\epsilon_{ri}$  – przenikalność elektryczna względna izolacji,  $\epsilon_{rs}$  – przenikalność elektryczna względna ekranów półprzewodzących,  $\epsilon_r^*$  – zastępcza przenikalność elektryczna względna układu izolacja-ekran półprzewodzący,  $\rho_i$  – rezystywność skośna izolacji,  $\rho_s$  – rezystywność skośna ekranów.



Rys. 6. Konstrukcja i schemat zastępczy kabla elektroenergetycznego (na podstawie [11]): a) przykład warstwowej konstrukcji kabla wraz z przekrojem poprzecznym i oznaczeniem parametrów charakterystycznych, b) schemat zastępczy w przekroju poprzecznym kabla uwzględniający warstwę izolacji oraz ekrany półprzewodzące na żyłę i na izolacji, c) uproszczony poprzeczny schemat zastępczy kabla uwzględniający jedynie zastępczą przenikalność elektryczną względną  $\epsilon_r^*$  (Wyróżnione elementy konstrukcyjne: 1) żyła, 2) ekran półprzewodzący na żyłę, 3) izolacja, 4) ekran półprzewodzący na izolacji, 5) ekran metaliczny - druty i taśmy miedziane)

Biorąc pod uwagę schemat zastępczy z rysunku 6 w pracy [11] dokonano oszacowania wartości zastępczej przenikalności elektrycznej względnej izolacji  $\epsilon_r^*$ :

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_{ri} \cdot \frac{\ln\left(\frac{r_s}{r_c}\right)}{\ln\left(\frac{r_s - d_{is}}{r_s + d_{cs}}\right)} \quad (5)$$

Z analizy wzoru (5) wynika, że obecność ekranów półprzewodzących w konstrukcji kabla powoduje wzrost wartości zastępczej przenikalności elektrycznej względnej izolacji  $\varepsilon_r^*$ , a więc równocześnie obniżenie prędkości propagacji impulsów propagujących w kablu. Należy przy tym zaznaczyć, że przenikalność elektryczna jest wielkością zależną od częstotliwości, co bezpośrednio wpływa na właściwości transmisyjne kabla.

## 6. PODSUMOWANIE

Właściwości falowe kabli elektroenergetycznych wpływają na możliwości rozwiązywania pewnych problemów technicznych. Przykładami tego mogą być: lokalizacja uszkodzeń i defektów w kablach oraz powstawanie przepięć podczas pracy kabli w przekształtnikowych układach napędowych.

Wykonane pomiary potwierdzają wpływ konstrukcji kabla elektroenergetycznego na prędkość propagacji impulsów. Istotną rolę odgrywa w tym przypadku obecność ekranów półprzewodzących, powodujących zwiększenie zastępczej przenikalności elektrycznej izolacji kablowej, a więc obniżenie prędkości propagacji fal elektromagnetycznych w kablu. Wszystkie badane kable były kablami ekranowanymi o polu promieniowym.

Liczne prace prowadzone w ostatnich latach w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie wskazują na aktualność tego tematu. W szczególności prace te dotyczą modelowania komputerowego wpływu konstrukcji kabla na jego właściwości transmisyjne m.in. prędkość propagacji i tłumienie sygnałów impulsowych.

Dla potrzeb praktyki diagnostycznej konieczna jest weryfikowana pomiarowo znajomość rzeczywistej prędkości propagacji impulsów w podlegających badaniom kablach.

### Podziękowanie

Prace opisane w artykule były częściowo finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków projektu rozwojowego nr NR01 0019 04

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Grzybowski S., Nowaczyk H.: Badania eksploatacyjne i lokalizacja uszkodzeń kabli elektroenergetycznych, WNT, Warszawa, 1977

2. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2001, ISBN 83-910387-5-0
3. Boggs S., Pathak A., Walker P.: Partial discharge XXII: High frequency attenuation in shielded solid dielectric power cable and implications thereof for PD location, IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 12, 9-16, 1996 ISSN 0883-7554
4. Wagenaars P., Wouters P., van der Wielen P., Steennis E.F.: Accurate estimation of the time-of-arrival of partial discharge pulses in cable systems in service, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 15, No. 4, pp. 1190-1999, Aug. 2008, ISSN 1070-9878
5. Florkowska B., Florkowski M., Furgał J., Pająk P., Roehrich J., Zydrón P.: Influence of fast switching phenomena on electrical insulation systems, Przegląd Elektrotechniczny, R. 86, nr 4/2010, str. 158-161, ISSN 0033-2097
6. Xu Ch., Zhou L., Zhou J.Y., Boggs S.: High frequency properties of shielded power cable. Part 1: Overview of mechanisms, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 21, No. 6, pp. 24-28, ISSN 0883-7554
7. Weeks W. L., Diao Y. M.: Wave propagation characteristics in underground power cable, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 103, no. 10, pp. 2816-2826, 1984, ISSN 0018-9510
8. Chandrasekar S., Cavallini A., Montanari G.C.: Bandwidth and sensitivity issues in PD detection in power cables, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 14, no. 3, pp. 735-743, 2007, ISSN 1070-9878
9. Mugala G., Eriksson R., Pettersson P.: Dependence of XLPE insulated power cable wave propagation characteristics on design parameters, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 14, no. 2, pp. 393-399, 2007, ISSN 1070-9878
10. Tozzi M., Cavallini A., Montanari G. C., Giuliattini Burbui G.L.: PD detection in extruded power cables: an approximate propagation model, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 15, no. 3, pp. 834-840, 2008, ISSN 1070-9878
11. Wagenaars P., Wouters P., van der Wielen P., Steennis E.: Estimation of transmission line parameters for single-core XLPE cables, Proc. 2008 Int. Conf. Cond. Monitoring and Diagnosis, pp. 1132-1135, Beijing, China, 2008, ISBN 978-1-4244-1621-9
12. Kable i przewody elektroenergetyczne, Tele-Fonika Kable sp. z o.o. S.K.A., 09-2009
13. Mining cable for industrial, commercial and specialty applications, General Cable Inc., 09-2009

## MEASUREMENTS AND MODELING OF POWER CABLE CONSTRUCTION PARAMETERS INFLUENCE ON EXISTING IN CABLES WAVE-PROPAGATION EFFECTS

**Key-words:** electric power cables, wave propagation parameters, propagation velocity

Electric power cables are of different design, geometry, structure of functional elements, and applied materials. These elements influence on wave propagation parameters of cables and quality of propagating signals analysis. Transmission properties of cable i.e. wave propagation velocity, surge impedance, and attenuation coefficient are important for both: low amplitude, short time signals (like for PD sources localization) and for high level disturbances (overvoltages).

Paper presents: 1) influence of cable construction on observed wave-propagation effects, 2) description of simplified cable models – based on equivalent circuits, used for evaluation of wave propagation parameters.