



Zbigniew GACEK<sup>1</sup>, Dominik DUDA<sup>1</sup>, Krzysztof ROJEK<sup>2</sup>

Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów (1), ENION S.A.(2)

## Analiza strumieni uszkodzeń izolatorów długopniowych w wybranych liniach napowietrznych 110 kV

**Streszczenie.** Przedmiotem rozważań są niestacjonarne strumienie uszkodzeń, związane z tzw. samoistnym zrywaniem się izolatorów długopniowych porcelanowych w elektroenergetycznych liniach napowietrznych 110 kV. Strumienie uszkodzeń można traktować jako przedziałami stacjonarne lub alternatywnie wykorzystać stosowaną transformację czasu. W celu zweryfikowania hipotezy, że strumienie uszkodzeń są strumieniami Poissona zastosowano testy Fishera i Hartleya. Analiza takich strumieni i płynące z niej wnioski dostarczają informacji potrzebnych do dalszych rozważań dotyczących niezawodności i odnowy izolatorów długopniowych.

**Abstract.** (Analysis of failure streams for long-rod insulators in chosen 110 kV overhead power lines). Unstationary failure streams connected with the so-called spontaneous ruptures of long-rod porcelain insulators in 110 kV overhead power lines are considered in this article. Failure streams can be treated as stationary ones within certain intervals or – alternatively – an appropriate transform of the time can be made. In order to verify the hypothesis that failure streams are Poisson's ones, the Fisher and Hartley tests are applied. Analysis of such streams and resultant conclusions give information necessary to further considerations concerned reliability and renewal of long-rod insulators.

**Słowa kluczowe:** elektroenergetyczne linie napowietrzne izolatory długopniowe, strumienie uszkodzeń.

**Keywords:** power overhead lines, long-rod insulators, failure streams.

### Wstęp

Rzeczywisty strumień uszkodzeń obiektu technicznego można odwzorować za pomocą odpowiednio skonstruowanego modelu takiego procesu losowego. Istnieje wtedy możliwość wykonania dalszych analiz, na przykład wpływu wybranej strategii obsługi eksploatacyjnej na niezawodność obsługiwanego obiektu.

Według [4 i 5] strumień uszkodzeń i odnowień jest sekwencją (ciągami) chwil  $\{t_i\}$ , składających się na łączny czas eksploatacji obiektu i opisanych następująco:

$$(1) \quad t_i = t_1 + \mathcal{G}_1 + t_2 + \mathcal{G}_2 + \dots + t_{i-1} + \mathcal{G}_{i-1} + t_i + \mathcal{G}_i + \dots$$

gdzie:  $i = 1, 2, \dots$ ,  $t_i$  – czas poprawnej pracy obiektu, będący niezależną zmienną losową o rozkładzie  $F(t)$ ;  $\mathcal{G}_i$  – czas (przedział czasu) dokonywania odnowienia, będący niezależną zmienną losową o rozkładzie  $G(t)$ .

Jeżeli przedział czasu, w którym dokonuje się odnowienia jest znacznie krótszy od czasu poprawnej pracy obiektu, to czasy  $\mathcal{G}_i$  można pominąć. Można wtedy posługiwać się tylko pojęciem strumienia uszkodzeń, który jest ciągiem chwil  $\{t_k\}$  opisujących czas eksploatacji w następujący sposób:

$$(2) \quad t_k = t_1 + t_2 + \dots + t_{k-1} + t_k + \dots \quad k = 1, 2, \dots$$

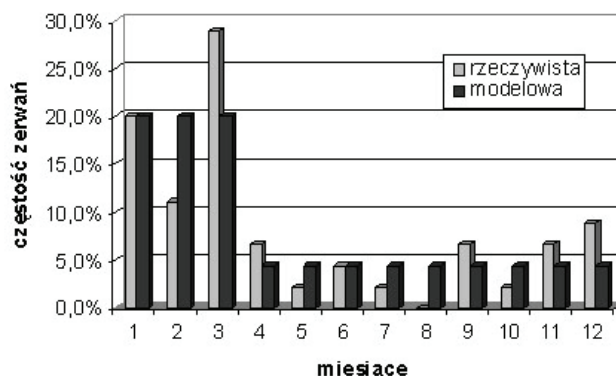
Aby mówić o strumieniu uszkodzeń i związanych z nimi odnowień, rozpatrywany obiekt powinien być obiektem odnawialnym. Oznacza to, że – po uszkodzeniu – możliwa jest naprawa obiektu, przywracająca mu w pełni pierwotne właściwości. Linie napowietrzne spełniają to założenie, ale pod warunkiem, że są traktowane jako całość funkcjonalna, czyli bez wyraźnego rozróżniania ich poszczególnych elementów składowych.

Rzeczywiste strumienie uszkodzeń mają charakter losowy. Jest to spowodowane m.in. losowością występowania wad materiałowych izolacji ujawniających się dopiero podczas eksploatacji oraz w miarę naturalnego starzenia się materiału, pogarszającego niezawodność elementów składowych sieci elektroenergetycznych wraz z upływem czasu.

Przedmiotem rozważań są niestacjonarne strumienie uszkodzeń wybranych izolatorów liniowych długopniowych porcelanowych. Izolatory te, zainstalowane w elektroenergetycznych liniach napowietrznych 110 kV, uszkadzały się mechanicznie na skutek tzw. samoistnych zerwań, czyli bez wyraźnej ingerencji oddziaływań eksploatacyjnych (obciążeń i narażeń).

### Sezonowa zmienność uszkodzeń

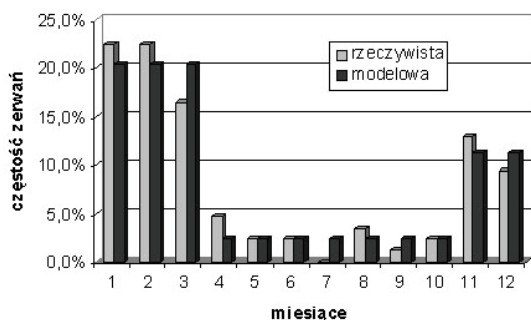
Doświadczenia eksploatacyjne wykazują jednoznacznie, że częstość zerwań izolatorów zależy od pory roku. Jest to związane z wpływem temperatury i jej zmian na wartość wewnętrznych naprężeń mechanicznych w izolatorach [3]. Istnieje hipoteza, że woda dostająca się do mikropęknięć w strukturze izolatora – powiększających się pod względem rozmiarów i liczby w czasie eksploatacji – zamarza i powoduje pęknięcie pni izolatorów. Prowadzi to do zwiększenia częstości uszkodzeń w okresach jesienno-zimowym i zimowo-wiosennym, co obrazują wykresy na rys. 1 – 3.



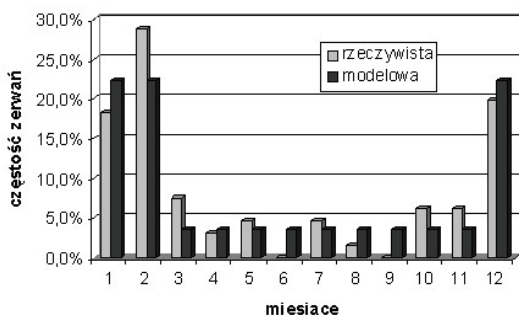
Rys. 1 Sezonowa zmienność częstości zerwań izolatorów LP 75/17

Dysponując wieloletnimi statystykami uszkodzeń izolatorów można podzielić rok eksploatacji na kilka okresów, tworząc kilkustanowy model obliczeniowy o stałych z założenia wartościach częstości uszkodzeń. Na rysunkach od 1 do 3 przedstawiono sezonowe rozkłady częstości uszkodzeń w ciągu roku – oddzielnie dla izolatorów typu LP 75/17, VKLS 75/21 i LPZ 75/27. Analiza miesięcznych częstości

uszkodzeń pozwala na postawienie hipotezy o dwustanowym modelu zawodnościowym dla izolatorów typów LP 75/17 i LPZ 75/27 oraz trójstanowym modelu dla izolatorów typu VKLS 75/21.



Rys.2 Sezonowa zmienność częstości zerwań izolatorów VKLS 75/21



Rys.3 Sezonowa zmienność częstości zerwań izolatorów LPZ 75/27

Poszczególne stany zawodnościowe przypisane rozważanym typom izolatorów oraz wyznaczające je miesiące kalendarzowe przedstawia tabela 1. W tabeli tej, na podstawie danych zaczerpniętych z [1], zamieszczono również dodatkowo stany zawodnościowe dla izolatorów typu LP 75/22.

Tabela 1. Stany zawodnościowe – modele obliczeniowe

Typ izolatora	Stan zawodnościowy	miesiące
LP 75/17	1	I ÷ III
	2	IV ÷ XII
VKLS 75/21	1	I ÷ III
	2	IV ÷ X
	3	XI, XII
LPZ 75/27	1	I, II, XII
	2	III ÷ XI
LP 75/22	1	V ÷ X
	2	XI ÷ IV

Z sezonowych modeli obliczeniowych można korzystać dopiero po upewnieniu się, że częstości zerwań w poszczególnych miesiącach – w obrębie jednego stanu zawodnościowego – nie różnią się znacząco od siebie. Przyjęcie takiej hipotezy oznacza, że zaobserwowane różnice częstości uszkodzeń w miesiącach przyporządkowanych danemu stanowi zawodnościowemu należy uważać za przypadkowe. W celu zweryfikowania tej hipotezy zastosowano test  $\chi^2$ , przy czym – na zadanym poziomie istotności  $\alpha$  – zweryfikowaną hipotezę należy odrzucić i uznać zaobserwowaną różnicę między częstościami uszkodzeń za istotną [4], jeśli zachodzi nierówność:

$$(3) \quad \frac{N}{n_s \cdot (N - n_s)} \left( \sum_{j=1}^m n_j^2 - m \cdot \bar{n}_s^2 \right) \geq \chi_{m-1; 1-\alpha}^2$$

gdzie:  $\chi_{m-1; 1-\alpha}^2$  – kwantyl statystyki  $\chi^2$  (chi kwadrat) o  $m - 1$  stopniach swobody, na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ ;  $N$  – liczba zerwań izolatorów;  $n_s$  – średnia liczba zerwań w obrębie jednego stanu zawodnościowego;  $n_j$  – liczba zerwań izolatorów w kolejnych miesiącach stanu zawodnościowego

Statystykę  $\chi^2$  obliczono na podstawie: liczby uszkodzeń w poszczególnych miesiącach stanów zawodnościowych, liczby miesięcy w obrębie stanu zawodnościowego i łącznej liczby uszkodzeń w stanie zawodnościowym. Obliczone wartości statystyk dla poszczególnych stanów zawodnościowych porównano następnie z wartościami kwantyli dla zadanego poziomu istotności i liczby stopni swobody. Dane wykorzystane w teście oraz rezultaty przeprowadzonego testu zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Weryfikacja hipotezy o wielostanowym modelu zawodnościowym dla wybranych typów izolatorów

miesiąc	N	stan	$n_s$	$\chi^2$	$\chi_{m-1; 1-\alpha}^2$
LP 75/17					
I	9	1	9	4,44	7,81
II	5				
III	13				
IV	3				
V	1	2	2	7,33	15,5
VI	2				
VII	1				
VIII	0				
IX	3				
X	1				
XI	3				
XII	4				
VKLS 75/21					
I	19	1	17,3	1,21	7,81
II	19				
III	14				
IV	4				
V	2	2	2	5,12	12,6
VI	2				
VII	0				
VIII	3				
IX	1				
X	2				
XI	11				
XII	8				
LPZ 75/27					
XII	13	1	14,7	2,51	7,81
I	12				
II	19				
III	5				
IV	2				
V	3				
VI	0				
VII	3				
VIII	1				
IX	0				
X	4				
XI	4				
		2	2,4	11,14	15,5
II	19				
III	5				
IV	2				
V	3				
VI	0				
VII	3				
VIII	1				
IX	0				
X	4				
XI	4				

Wyniki obliczeń weryfikacyjnych wykonanych za pomocą testu  $\chi^2$  potwierdzają prawdziwość postawionej hipotezy (dokładniej – nie są podstawą do jej odrzucenia). Zróżnicowanie miesięcznych częstości uszkodzeń występujące w obrębie zaproponowanych stanów zawodnościowych (widoczne na rys. 1-3) można zatem uznać za przypadkowe, a intensywność uszkodzeń – w przybliżeniu – za wartość stałą. Również dla izolatorów LP 75/22 brak jest podstaw do odrzucenia postawionej hipotezy o dwustanowym modelu zawodnościowym [1].

### Strumienie uszkodzeń linii napowietrznych WN

Pojedynczemu izolatorowi nie można przypisać strumienia uszkodzeń, gdyż – po uszkodzeniu – zostaje on wycofany z eksploatacji i zastąpiony innym (sprawnym) izolatorem. Taki pojedynczy izolator traktuje się więc formalnie jako element nienaprawialny. Aby można było analizować strumień uszkodzeń izolatorów zainstalowanych w linii napowietrznej, każdy izolator (łańcuch izolatorów) musi być traktowany jako jeden z wielu jej elementów składowych. W linii napowietrznej jest bowiem zainstalowana duża liczba izolatorów, z których każdy może ulec uszkodzeniu z na ogół małym prawdopodobieństwem.

Strumień uszkodzeń, związany z tzw. samoistnym zrywaniem się izolatorów wykazuje wyraźną zmienność sezonową, a zatem jest strumieniem niestacjonarnym. Wykazuje jednak brak następstw, gdyż każdy uszkodzony izolator zostaje wymieniony na równorzędny nowy. Prawdopodobieństwo zajścia kolejnych zdarzeń w krótkim przedziale czasu (rzędu jednej doby) nie zależy więc od uszkodzeń wcześniejszych. Kolejną cechą strumienia jest pojedynczość. Cecha ta jest zachowana w przypadku, gdy z analizowanego strumienia zostaną wyeliminowane uszkodzenia spowodowane przyczynami meteorologicznymi (burze, wichury, sadz).

Jak wykazał test  $\chi^2$ , rozważany strumień uszkodzeń można traktować jako przedziałami stacjonarny lub też wykonać odpowiednią transformację czasu, dzięki której uzyskuje się stałość częstości uszkodzeń, a strumień uszkodzeń rozpatrywany jest w zmienionym, obliczeniowym roku eksploatacji [2]. Transformację czasu przeprowadza się według następującego wzoru.

$$(4) \quad T'_k = \frac{w_k}{w_{max}} T_k, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

w którym:  $w_k$  – średnia częstość występowania uszkodzeń w stanie  $k$ ;  $w_{max}$  – największa średnia częstość występowania uszkodzeń;  $T_k$  – czas trwania stanu  $k$  przed transformacją czasu;  $T'_k$  – czas trwania stanu  $k$  po transformacji czasu;  $n$  – liczba stanów zawodnościowych.

Czasy trwania stanów zawodnościowych po transformacji czasu ( $T'_k$ ) spełniają następującą zależność:

$$(5) \quad T' = \sum_{k=1}^n T'_k.$$

Wyniki obliczeń transformacji czasu dla wielostanowych modeli zawodnościowych izolatorów LPZ 75/27, VKLS 75/21 i LP 75/17 zawarte są w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki obliczeń transformacji czasu

Typ izolatora	Stan zawodnościowy	Czas trwania stanu $k$	
		Rzeczywisty $T_k$	Po transformacji $T'_k$
–	–	doby	doby
	1	90	90
LP 75/17	2	275	61
		$T=365$	$T'=151$ (0,41 roku)
VKLS 75/21	1	90	90
	2	214	25
	3	61	33
		$T=365$	$T'=148$ (0,405 roku)
LPZ 75/27	1	90	90
	2	275	45
		$T=365$	$T'=135$ (0,37 roku)
LP 75/22	1	181	181
	2	184	27
		$T=365$	$T'=208$ (0,57 roku)

Aby uzyskać stałą częstość uszkodzeń w ciągu całego roku dokonano transformacji czasu trwania kolejnych stanów zawodnościowych, w których częstości uszkodzeń były mniejsze od wartości maksymalnej, charakterystycznej dla danego sezonowego modelu obliczeniowego.

Po wykonaniu transformacji czasu strumienie uszkodzeń spełniają warunek stacjonarności. Spełnienie jednocześnie warunków stacjonarności, pojedynczości i braku następstw upoważnia do postawienia hipotezy, że strumienie uszkodzeń zarejestrowane w badanych liniach napowietrznych (związane z samoistnymi zerwaniami izolatorów) są strumieniami Poissona. Oznacza to, że rozkład czasu (po transformacji) między kolejnymi uszkodzeniami jest rozkładem wykładniczym.

Tabela 4. Weryfikacja hipotezy o wykładniczym rozkładzie czasu pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami

Czas między uszkodzeniami ( $\tau$ )				Wynik testu Fishera wg (6)	Wynik testu Hartleya wg (7)
W stanie zawodnościowym $k$			po transformacji		
1	2	3			
doby					
Linia A, izolatory typu VKLS 75/21					
101	428	78	193	$\eta = 0,4$ $g_{4,\alpha} = 0,73$ pozytywny	$\eta = 2,59$ $h_{4,\alpha} = 142$ pozytywny
180	215	105	263		
73	213	61	101		
49	214	61	107		
Linia B, izolatory typu VKLS 75/21					
73	214	1	98	$\eta = 0,47$ $g_{4,\alpha} = 0,73$ pozytywny	$\eta = 6,36$ $h_{4,\alpha} = 142$ pozytywny
360	856	304	626		
173	428	116	286		
215	428	66	301		
Linia C, izolatory typu VKLS 75/21					
0	0	22	12	$\eta = 0,68$ $g_{4,\alpha} = 0,73$ pozytywny	$\eta = 67,5$ $h_{4,\alpha} = 142$ pozytywny
90	214	35	134		
501	1070	347	816		
129	428	94	230		
Linia D, izolatory typu VKLS 75/21					
422	856	244	655	$\eta = 0,49$ $g_{5,\alpha} = 0,68$ pozytywny	$\eta = 17,2$ $h_{5,\alpha} = 202$ pozytywny
100	428	121	216		
218	428	123	335		
52	214	8	81		
9	0	53	38		
Linia E, izolatory typu VKLS 75/21					
190	642	183	365	$\eta = 0,42$ $g_{4,\alpha} = 0,73$ pozytywny	$\eta = 3,86$ $h_{4,\alpha} = 142$ pozytywny
130	214	61	188		
132	419	61	214		
60	9	61	95		
Linia F, izolatory typu LPZ 75/27					
65	60		71	$\eta = 0,35$ $g_{7,\alpha} = 0,59$ pozytywny	$\eta = 107,3$ $h_{7,\alpha} = 333$ pozytywny
825	293		429		
586	187		284		
365	90		150		
455	149		224		
0	4		24		
126	34		55		
Linia A, izolatory typu LPZ 75/27					
144	550		234,75	$\eta = 0,35$ $g_{4,\alpha} = 0,73$ pozytywny	$\eta = 107,3$ $h_{4,\alpha} = 142$ pozytywny
19	83		32,695		
32	192		63,68		
19	0		19		
Linia G, izolatory typu LP 75/17					
344	1082		584,204	$\eta = 0,52$ $g_{4,\alpha} = 0,73$ pozytywny	$\eta = 4,34$ $h_{4,\alpha} = 142$ pozytywny
180	305		247,71		
76	263		134,386		
95	275		156,05		
Linia H, izolatory typu LP 75/17					
27	0		27	$\eta = 0,52$ $g_{5,\alpha} = 0,68$ pozytywny	$\eta = 41$ $h_{5,\alpha} = 202$ pozytywny
194	790		369,38		
450	1160		707,52		
100	524		216,328		
17	0		17		

W celu zweryfikowania postawionej hipotezy wykorzystano testy Fishera i Hartleya, których wyniki zostały przedstawione w tabeli 4. Obydwa testy zostały wykonane na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Kryterium spełnienia testu Fishera jest prawdziwość nierówności:

$$(6) \quad \eta = \frac{\max \tau_i}{\sum \tau_i} < g_{n,\alpha}$$

gdzie:  $\tau$  – czas między kolejnymi uszkodzeniami (po transformacji);  $g_{n,\alpha}$  – kwantyle wartości granicznych statystyki Fishera dla poziomu istotności  $\alpha$  i  $n$  stopni swobody.

Test Hartleya daje wynik pozytywny dla czasów między kolejnymi uszkodzeniami ( $\tau$ ) spełniających nierówność:

$$(7) \quad \eta = \frac{\max \tau_i}{\min \tau_i} < h_{n,\alpha}$$

w której  $h_{n,\alpha}$  – kwantyle wartości granicznych statystyki Hartleya dla poziomu istotności  $\alpha$  i  $n$  stopni swobody.

Rozważane strumienie uszkodzeń są strumieniami rzeczywistymi, zaistniałymi podczas eksploatacji linii napowietrznych o napięciu znamionowym 110 kV. Analizie poddano 58 takich linii, z których wybrano 8. Były to linie, na których zarejestrowano co najmniej 5 przypadków zerwań izolatorów tego samego typu. Na jednej linii (oznaczonej w tabeli 4 symbolem A) zarejestrowano 10 zerwań, przy czym awariom uległy dwa typy izolatorów. Możliwe było zatem przeanalizowanie dla tej linii dwóch strumieni uszkodzeń.

Dla wszystkich linii przedstawionych w tabeli 4 wyniki zastosowanych testów statystycznych są pozytywne. Brak jest zatem podstaw do odrzucenia hipotezy o wykładniczym charakterze rozkładu czasów między kolejnymi uszkodzeniami na poziomie istotności  $\alpha = 5\%$ . Należy podkreślić, że zastosowane testy statystyczne są testami nieparametrycznymi i pozwalają jedynie zweryfikować hipotezę o charakterze rozkładu. Dopiero dalsze analizy mogą doprowadzić do określenia wartości liczbowych parametru  $\lambda$ , opisującego funkcję intensywności uszkodzeń. Znajomość tej funkcji warunkuje wykonanie obliczeń niezawodnościowych dotyczących poszczególnych konstrukcji izolatorów w liniach napowietrznych WN,

a następnie zaproponowanie racjonalnej (optymalnej) strategii ich obsługi eksploatacyjnej.

## Podsumowanie

- Strumienie uszkodzeń w liniach napowietrznych wysokiego napięcia, związane z samoistnym zrywaniem się niektórych typów izolatorów długopniowych, wykazują wyraźną zmienność sezonową.
- Dla izolatorów LP 75/17 i LPZ 75/27 zaproponowano model zawodnościowy dwustanowy, natomiast dla izolatorów VKLS 75/21 model trójstanowy.
- Zaproponowana transformacja czasu przywraca rzeczywistym strumieniom uszkodzeń cechę stacjonarności, co pozwala traktować te strumienie jako strumienie Poissona.
- Jak wykazano za pomocą nieparametrycznych testów Hartleya i Fishera, do opisu czasów między kolejnymi zerwaniami analizowanych typów izolatorów można używać rozkładu wykładniczego (po dokonaniu stosownej transformacji czasu).

## LITERATURA

- [1] Duda D.: Modelowanie procesów obsługi eksploatacyjnej wybranych elementów składowych sieci elektroenergetycznych. *Rozprawa doktorska*, Politechnika śląska Gliwice 2003
- [2] Duda D., Gacek Z.: *Model procesu odnawiania układów izolacyjnych w liniach napowietrznych wysokiego napięcia. Energetyka Zeszyt tematyczny I/2003*, ss. 30 – 32
- [3] Gacek Z.: *Diagnozowanie właściwości mechanicznych izolatorów długopniowych w eksploatacji. Mat. Konf. Nauk.–Techn. „Ceramika Elektrotechniczna”*, Boguchwała 1994, str. 111-117
- [4] Gniedenko B., Bieliajew J., Sołowiew A.: *Metody matematyczne w teorii niezawodności*. Warszawa, WNT 1968.
- [5] Kopociński B.: *Zarys teorii odnowy i niezawodności*, PWN, Warszawa 1973

---

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Zbigniew Gacek, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: [zbigniew.gacek@neostrada.pl](mailto:zbigniew.gacek@neostrada.pl)  
 dr inż. Dominik Duda Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: [dominik.duda@polsl.pl](mailto:dominik.duda@polsl.pl)  
 mgr inż. Krzysztof Rojek, ENION S.A. /O BĘDZIN, Rejon Dystrybucji Będzin, 42-500 Będzin, ul. Kościuszki 114, Email: [krzysztof.rojek@bedzin.enion.pl](mailto:krzysztof.rojek@bedzin.enion.pl)