

Lech BOROWIK  
Artur CYWIŃSKI

## PROJEKTOWANIE LINII KABLOWYCH NISKIEGO NAPIĘCIA WYKONANYCH Z ŻYŁ UKŁADANYCH RÓWNOLEGLE

**STRESZCZENIE** *W układach zasilania niskiego napięcia kiedy zachodzi konieczności wyprowadzenia dużej mocy, powszechnie praktykowanym sposobem wykonania instalacji elektrycznej jest stosowanie wielowiązkowych linii kablowych złożonych z kabli jednożyłowych połączonych równolegle. Podstawowym dokumentem regulującym kwestię doboru przewodów w aspekcie obciążalności prądowej długotrwałej, na którym opierają się projektanci to norma PN-IEC 60364-5-523:2001. Sposób ułożenia linii niejednokrotnie skutkuje wystąpieniem asymetrii obciążenia poszczególnych żył. Fakt ten nie został w normie opisany, nie zostały również zaproponowane sposoby ułożenia linii minimalizujące efekt wzajemnego oddziaływania żył, które skutkuje wystąpieniem zjawiska nierównomiernego obciążenia poszczególnych przewodów, dochodzącego czasem nawet do 100%. W artykule przedstawiono pomiary wykonane w rzeczywistych obiektach, podjęto próbę opisanie zjawiska, a także zamodelowania rzeczywistych układów sieciowych oraz zaproponowano rozwiązania budowy linii wykonanych z żył równoległych.*

**Słowa kluczowe:** *linie kablowe z żył równoległych, obciążalność prądowa dopuszczalna długotrwałe, zjawisko zbliżenia.*

### 1. WSTĘP

---

W układach zasilania niskiego napięcia obiektów przemysłowych, dużych budynków biurowo-usługowych, w elektrorowniach oraz w sieci dystrybucyjnej powszechnie stosowanym sposobem wykonania instalacji elektrycznej, w przypadku

---

**dr hab. inż. Lech BOROWIK<sup>1)</sup>, mgr inż. Artur CYWIŃSKI<sup>2)</sup>**  
e-mail: borowik@el.pcz.czyst.pl, artur.cywinski@omega-projekt.pl

<sup>1)</sup>Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny,  
ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

<sup>2)</sup>Pracownia Projektowa Omega-Projekt, ul. Topolowa 1, 43-100 Tychy

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 272, 2016

konieczności wyprowadzenia dużej mocy z transformatora, generatora lub rozdzielnic niskiego napięcia, jest zastosowanie wielowiązkowych linii kablowych złożonych z kabli jednożyłowych połączonych równolegle w celu uzyskania oczekiwanej obciążalności prądowej toru. Niejednokrotnie zdarza się, że poszczególne żyły połączone równolegle, a stanowiące jeden tor prądowy (jedną fazę) obciążają się nierównomiernie, a różnica w obciążeniu dochodzi czasem nawet do 100%. Zjawisko to może powodować znaczny wzrost temperatury przeciążonych żył. Powszechnie wiadomym jest, że przekroczenie temperatury dopuszczalnej prowadzi do skrócenia czasu życia izolacji i może również, w skrajnych przypadkach, doprowadzić do całkowitego zniszczenia kabla, a nawet pożaru. Problem okazał się na tyle poważny, że wielu inżynierów oraz naukowców z dziedziny dystrybucji energii elektrycznej próbowało go opisać i rozwiązać.

Niektóre normy dotyczące budowy linii kablowych niskiego napięcia, takie jak National Electrical Code [1], czy też Canadian Electrical Code [2] zobowiązywały do zastosowania takich rozwiązań sposobu układania kabli, które prowadziłyby do ograniczenia asymetrii prądowej żył równoległych. Przedstawione tam rozwiązania często nie są jednak możliwe do zastosowania, ze względu na ograniczenia przestrzeni, w której ułożona ma być linia, czy też z powodu wymagań dotyczących sposobu prowadzenia instalacji.

Wyznaczenie wartości prądu, jaki może płynąć długotrwale w takim układzie przewodów, nie powodując przekroczenia temperatury dopuszczalnej długotrwale, staje się więc bardzo istotne ze względów bezpieczeństwa oraz niezawodności pracy układu.

Badania nad określeniem możliwej obciążalności kabli mają tak samo długą historię i jak same kable i trwają nieprzerwanie od 1890. [3] Terminu „Ampacity”, odnoszącego się do prądowej obciążalności dopuszczalnej długotrwale, pierwszy raz użył w 1951 William Del Mar. Pierwsze kompletne opracowanie dotyczące sposobu budowy linii kablowych uwzględniające ich obciążalność prądową to praca dwóch amerykańskich inżynierów J. H. Neher oraz M. H. McGrath, „*The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems*” opublikowana w październiku 1957. Bazowała ona na doświadczalnych próbach pokolenia elektryków rozwiązania skomplikowanych równań opisujących przepływ ciepła i opierała się na równaniu Neher-McGratha będącego rozwinięciem ogłoszonego w 1807 roku przez Fouriera równania przewodzenia ciepła.

Podstawowym dokumentem regulującym kwestię doboru przewodów w aspekcie obciążalności prądowej długotrwalej, na którym opierają się polscy inżynierowie to obligatoryjna do stosowania norma PN-IEC 60364-5-523:2001 „Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych – Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego – Obciążalność prądowa długotrwała przewodów [4]. Zapisy normy zakładają, że dla żył równoległych, przy spełnienia warunków, takich jak: identyczna długość, przekrój i ich materiał, poszczególne żyły będą obciążały się symetrycznie. Możliwość wystąpienia nierównego obciążenia nie został w normie nawet zasygnalizowany. Nie określono współczynników korekcyjnych obniżających dopuszczalną obciążalność długotrwałą linii ze względu na możliwą asymetrię obciążenia, ani też nie zostały zaproponowane sposoby ułożenia linii minimalizujące efekt wzajemnego oddziaływania żył. Fakt ten budzi dodatkowe zdziwienie ponieważ europejska norma IEC 60354-5-52 w paragrafie 523.7 – załączniku H sygnalizuje problem, podając jednocześnie przykłady konfiguracji dla żył równoległych [5].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów obciążeń dla rzeczywistych obiektów wykorzystujących linie kablowej niskiego napięcia wykonane z żył równoległych zastosowane dla wyprowadzenia mocy z transformatorów. Podjęto próbę opisanie zjawiska, zamodelowania rzeczywistych układów sieciowych, jak również zaproponowano rozwiązania budowy linii kablowych, wykonanych z żył równoległych.

## 2. OPIS PROBLEMU – POMIARY W OBIEKTACH RZECZYWISTYCH

---

Brak odniesień w cytowanej normie [4] oraz w dostępnej literaturze i publikacjach w języku polskim do problemu budowy linii kablowych z żył równoległych, a w szczególności ich obciążalności dopuszczalnej długotrwale, wynika w dużej mierze z dotychczasowego braku problemów związanych z eksploatacją takich linii lub też z błędnej oceny problemu w przypadku wystąpienia awarii. Obowiązującą przez długie lata regułą w projektowaniu i budowie linii kablowych niskiego napięcia było dobieranie przekroju kabli z bardzo dużym zapasem. Dodatkowo rzadko zdarzało się, że transformatory i rozdzielnice niskiego napięcia obciążane były prądem znamionowym, dlatego też może się wydawać, że zjawisko występujące od zawsze nie było powszechnie zauważane.

Obecnie obowiązującą regułą stało się ograniczanie kosztów i projektowanie linii kablowych odpowiednio do ich obciążalności, a więc określanie ich przekroju odbywa się coraz precyzyjniej. Również dobór transformatorów i rozdzielnic niskiego napięcia dostosowany jest zazwyczaj do rzeczywistych – aktualnych potrzeb. Warto również w tym miejscu wspomnieć o mocno odkształconych przebiegach występujących w sieciach wewnętrznych zakładów przemysłowych wynikających z powszechnego stosowania falowników w napędach silnikowych i z dość liberalnego podejścia Spółek Dystrybucyjnych do odbiorców przekraczających dopuszczalną emisję wyższych harmonicznych prądu, co ma duży wpływ na zdolności przesyłowe kabli oraz obciążenie transformatorów.

Dla przedstawienia problemu zostały wykonane pomiary i rejestracja przebiegów prądowych obciążenia wielowiązkowych linii kablowych w kilku zakładach produkcyjnych. W każdym analizowanym przypadku stwierdzono bardzo dużą asymetrię w obciążeniu poszczególnych żył. Wykonano również pomiary prądu płynącego przez żyły równoległe kabla łączącego transformator 110/20 kV z rozdzielnicą 20 kV w dwóch stacjach. Tam również wystąpiło nierównomierne obciążenie żył. Wyniki pomiarów zostały przedstawione dla dwóch obiektów – zakładu branży papierniczej (obiekt nr 1) oraz branży motoryzacyjnej (obiekt nr 2) – produkującego elementy karoserii do samochodów osobowych. W pierwszym przypadku główne obciążenie transformatora to odbiory silnikowe, napędzające linię technologiczną maszyny papierniczej. Wszystkie układy zasilania wyposażone są w falownik z zabudowanym filtrem pasywnym począwszy od 7 harmonicznej. W drugim przypadku główne obciążenie transformatora to szynoprzewód zasilający linię zgrzewarek. Układy zasilania robotów spawalniczych pracują bez filtra wyższych harmonicznych.

Pomiary zostały wykonane analizatorem typu PQM-701Z firmy Sonel przy wykorzystaniu przekładników prądowych – pętli Rogowskiego o prądzie znamionowym 3000 A i minimalnej dokładności podstawowej 1%. Widok stanowiska pomiarowego w obu przypadkach przedstawiono na rysunku 1.



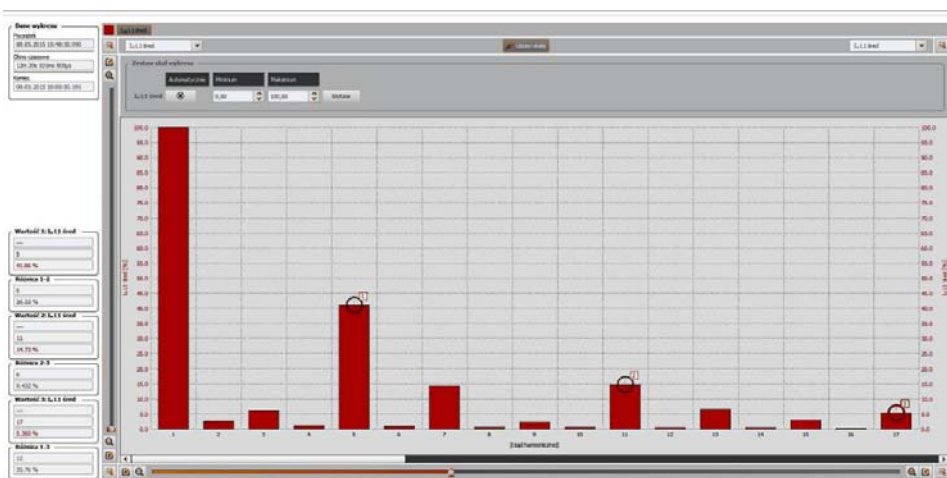
**Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego**

W obu przypadkach zarejestrowane zostały przebiegi prądów poszczególnych faz oraz przewodu N, a następnie przebiegi skrajnie obciążonych żył dla wybranej fazy. Zmierzono zawartość wyższych harmonicznych prądu, a także zarejestrowano przebiegi oscyloskopowe prądu i napięcia. Dla lepszej prezentacji zjawiska w obiekcie nr 1 za pomocą dwóch rejestratorów dokonano rejestracji prądu sześciu żył jednej fazy. Wykresy przebiegów prądu przygotowano za pomocą arkusza kalkulacyjnego. Stanowiska pomiarowe wykonano w punktach, gdzie było to możliwe – dla pomiaru całkowitego prądu każdej z faz oraz napięcia – w polach liniowych rozdzielnic niskiego napięcia. Pomiar prądów pojedynczych żył wykonano na trasie linii bezpośrednio w drabinie kablowej oraz w miejscu przyłączenia linii kablowej do skrzynki zasilającej szynoprzewodu.



lenie w przedstawionych przebiegach oscyloskopowych. Współczynnik THD L1 dochodzi do 55% natomiast przesunięcie napięcia względem prądu wynosi 1,4 ms (rys. 5).

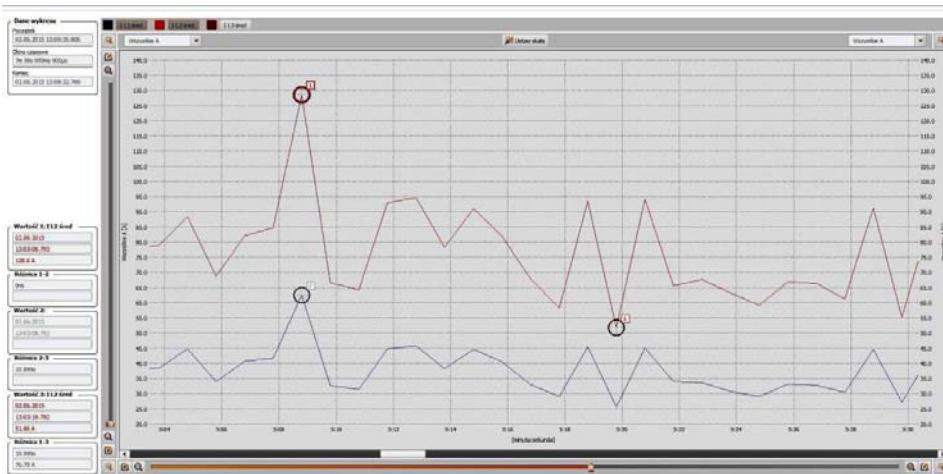
Rysunek 6 przedstawia przebiegi wartości skutecznej prądu dla skrajnie obciążonych żył oznaczonych jako Z1 i Z3 fazy L1. Zarejestrowane wartości maksymalne wynoszą odpowiednio 128 A i 62 A, natomiast stosunek obciążenia żył Z3 do Z1 w całym zarejestrowanym okresie wynosi około 50%.



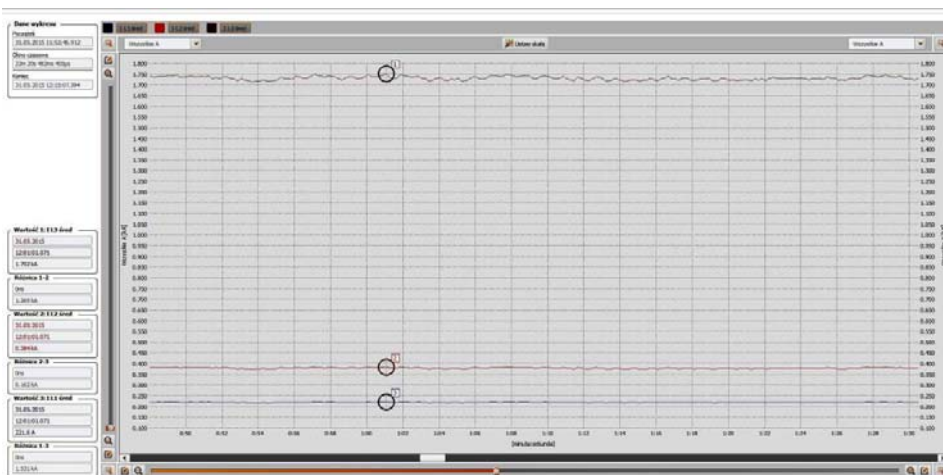
Rys. 4. Zawartość procentowa wyższych harmonicznych fazy L1



Rys. 5. Przebieg oscyloskopowy prądu i napięcia



Rys. 6. Przebieg wartości skutecznej prądu żył Z1 i Z3 fazy L1

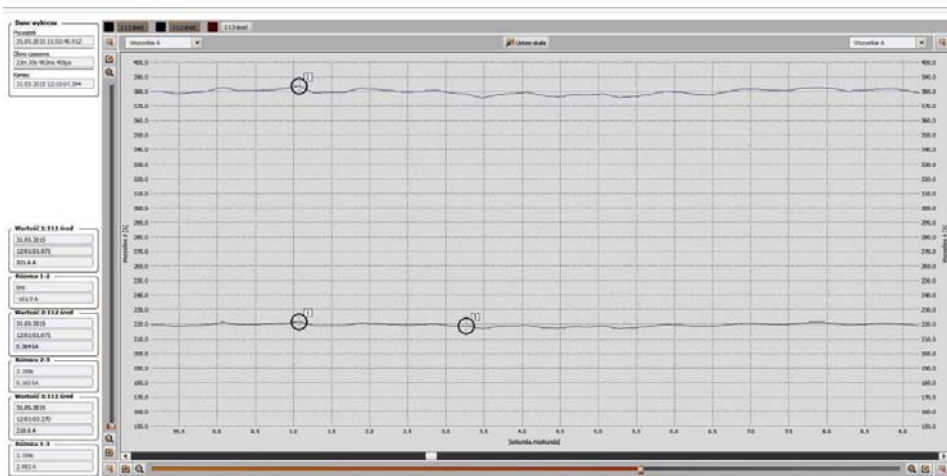


Rys. 7. Przebieg wartości skutecznej prądu żył Z1 i Z3 oraz całkowity prąd fazy L1

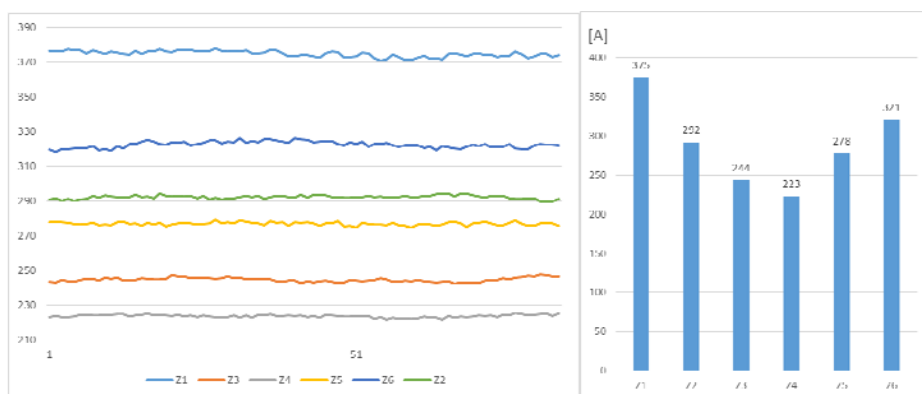
Dla obiektu nr 1 z wykonanych pomiarów zostaną przedstawione cztery wykresy (rys. 7 – 9), które w możliwie najlepszy sposób obrazują występujące zjawisko asymetrycznego obciążenia poszczególnych żył toru prądowego fazy L1.

Z rysunku 7 możemy odczytać, że całkowity prąd płynący torem fazy L1 wynosi 1784 A, natomiast skrajnie obciążone żyły Z1 i Z3 odpowiednio 384 A i 218 A (wartość maksymalna). Współczynnik THD L1 dochodzi do 6%, współczynnik K – 3,6%. Średnia wartość skuteczna prądu płynącego przez poszczególne żyły w rejestrowanym przedziale czasu wynosi: Z1 – 375 A, Z2 – 292 A, Z3 – 244 A, Z4 – 223 A, Z5 – 278 A, Z6 – 321 A.





Rys. 8. Przebieg wartości skutecznej prądu żył Z1 i Z4



Rys. 9. Przebieg wartości skutecznej prądu żył Z1- Z6 oraz wartość średnia prądu

Dla obu analizowanych przypadków sposób ułożenia kabli w korytkach w taki sam, żyły zostały ułożone zgodnie z Tablicą 52-C12 normy [4] sposób G poziomo. Odległość pomiędzy żyłami jednej fazy wynosiła średnicę przewodu natomiast kolejne fazy zostały ułożone analogicznie w odległościach przekraczających znacznie dwukrotną średnicę pojedynczej żyły. W pozostałych obiektach przemysłowych gdzie prowadzone były pomiary sposób budowy linii wiązkowych był identyczny. Dla takiej konfiguracji przestrzennej, asymetria prądu skrajnie obciążonych żył wynosi około 50%, tym samym wartość obciążalności dopuszczalnej długotrwale całej linii ograniczona jest prądem żyły najbardziej obciążonej. Możliwości przesyłowe toru prądowego są o ponad 30% niższe od wartości założonej. Zarejestrowany w czasie pomiarów prąd nie przekroczył wartości dopuszczalnej, ale przy obciążeniu znamionowym dla obiektu nr 1 (2576 A na fazę) tor prądowy uległby zniszczeniu.





Rys. 10. Tor prądowy po awarii – pożarze

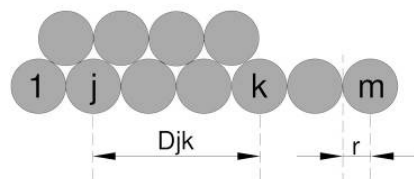
Dodatkowym problemem, często pomijanym, jest sposób zabezpieczenia linii wielowiązkowej. Zazwyczaj zabezpieczana jest cała faza i poszczególne żyły w żaden sposób nie są zabezpieczone od przeciążenia, uszkodzenie pojedynczego kabla nie będzie skutkowało wyłączeniem obwodu, a obciążenie rozłoży się na pozostałe, sprawne przewody. Takie przypadki mają niestety miejsce w praktyce. Fotografia z rysunku 10 przedstawia tor prądowy linii wielowiązkowej po awarii, która doprowadziła do całkowitego zniszczenia instalacji oraz pożaru.

### 3. ANALITYCZNY OPIS ZJAWISKA

Jak już wcześniej wspomniano badania dotyczące obciążalności długotrwałej linii kablowych trwają od bardzo dawna. Również było wiele prób analitycznego opisu rozptywu prądu w żyłach równoległych lub też wyliczenia całkowitych strat cieplnych warunkujących obciążalność długotrwałą [6 – 10]. W niniejszym artykule problem zostanie przedstawiony w ujęciu obwodowym – uproszczonym w stosunku do analizy polowej.

W rozważaniach uproszczonych [8], pomijających zjawisko zbliżenia i nasłórkowości autorzy oparli się na założeniach, że asymetria obciążenia poszczególnych żył spowodowana jest indukcyjnością wzajemną oddziałujących na siebie przewodów i jest zdeterminowana odległością i wzajemnym położeniem kabli.

Jeżeli przykładowo przyjmujemy konfigurację linii pokazaną na rysunku 11, to dla



Rys. 11. Konfiguracja linii, odległości pomiędzy żyłami

wiązki żył równoległych bez żyły powrotnej możemy wyliczyć zgodnie z poniższymi wzorami impedancji własną żyły  $j$  oraz reaktancję wzajemną pochodzącą od żyły  $k$ .

$$\bar{Z}_{jj} = \left( R + j\omega \left( L + \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right) \right) \right) \quad (1)$$

$$\bar{Z}_{jk} = j\omega \left( \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{D_{jk}} - 1 \right) \right) \quad (2)$$

gdzie:

- $R$  – rezystancja przewodu ( $\Omega$ )
- $L$  – indukcyjność przewodu (H/m)
- $\mu_0$  – stała magnetyczna ( $4\pi 10^{-7}$  H/m)
- $r$  – promień przewodu (m)
- $l$  – długość przewodu (m)
- $D_{jk}$  – odległość pomiędzy żyłami  $j$  i  $k$  (m)

Jeżeli wzory (1) i (2) będą użyte do wyliczenia spadku napięcia w danej żyły można je uprościć do następującej postaci [9].

$$\bar{Z}_{jj} = \left( R + j\omega \left( L + \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{1}{r} \right) \right) \right) \quad (3)$$

$$\bar{Z}_{jk} = j\omega \left( \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{1}{D_{jk}} \right) \right) \quad (4)$$

Spadek napięcia pojawiający się w danej żyły możemy wyliczyć na podstawie poniższego wzoru:

$$\bar{E}_j = \sum_{k=1}^m \bar{Z}_{jk} \times \bar{I}_k \quad (5)$$

gdzie:

$m$  – liczba żył w linii kablowej

Jeżeli kąt przesunięcia fazowego wektora  $I_k$  jest taki sam jak wektora  $I_j$  wartość składnika sumy wzoru (5) wpłynie na wzrost wartości spadku napięcia żyły  $j$ . Ponieważ spadki napięcia na żyłach stanowiących jedną fazę są jednakowe, to spadek napięcia wywołany wzrostem impedancji wzajemnej danej żyły powoduje zmniejszenie wartości spadku napięcia na impedancji własnej. Wiąże się to ze spadkiem amplitudy wektora prądu  $I_j$ . Natomiast w przypadku odwrotnym, to znaczy, gdy kąt wektora  $I_k$  jest przeciwny do kąta wektora  $I_j$  amplituda wektora prądu  $I_j$  wzrośnie tak, aby spadek

napięcia na każdej żył tej samej fazy był identyczny. Ze wzoru (4) jasno wynika, że wartość reaktancji wzajemnej  $Z_{jk}$  jest zależna od odległości pomiędzy żyłami  $D_{jk}$ .

#### 4. MODEL CYFROWY UKŁADU RZECZYWISTEGO

Możliwości zastosowania procedury bazującej na wykorzystaniu metody elementów skończonych, a dotyczącej sposobu obliczania charakterystycznych parametrów wielowiązkowych linii kablowych uwzględniającej również zjawisko zbliżenia i naskórkowości zostały opisane w publikacji [10], a ich duża dokładność stosowanej metody została potwierdzona w publikacjach [11, 12]. Do tej pory nie została przedstawiona analityczna metoda bazująca na teorii pola pozwalająca na obliczenie wzajemnego oddziaływania kilku przewodów stanowiących jeden tor prądowy. Zjawisko to w układzie dwóch walcowych przewodów równoległych zostało opisane w pracy [13] i rozwiązane analitycznie w oparciu o równania Kadena. Natomiast próba obliczenia strat całkowitych uwzględniających również zjawisko zbliżenia i naskórkowości quasi-analitycznie dla układu trzech żył przypadających na fazę została przedstawiona w publikacji [10]. Wykonanie klasycznych obliczeń dla układu sześciu przewodów równoległych (na fazę) jest niezwykle skomplikowane.

Dla zamodelowania układu rzeczywistego – obiektu nr 2 zastosowano program FEMM (Finite Element Method Magnetics) wykorzystujący metodę elementów skończonych. Przeznaczony on jest do rozwiązywania dwuwymiarowych problemów płaskich pola elektromagnetycznego oraz elektrostatyki w zakresie niskich częstotliwości. Dla omawianego problemu zastosowano moduł zagadnień magnetycznych rozwiązujący zadane równania Maxwella. Do modelu wprowadzono sześć żył o przekroju  $240 \text{ mm}^2$  i długości 40 m, zadano wymuszenie prądowe sinusoidalne o częstotliwości 50 Hz i amplitudzie 3632 A. Żyłę toru prądowego były wykonane z aluminium AL1100 o konduktywności elektrycznej  $\gamma = 34,45 \text{ MS/m}$ . W symulacji pominięto izolację przewodów. Obliczenia wykonano dla różnych konfiguracji linii. W dalszej części artykułu zaprezentowano wyniki dla następujących ułożeń linii:

- dla jednej fazy – układ płaski (odzwierciedlenie układu rzeczywistego), wiązka (przewody ułożone po okręgu);
  - dla układu trójfazowego dwa przypadki – układ płaski, na korytku ułożone żyły stanowiące jedną fazę; układ płaski, na korytku ułożone żyły różnych faz.
- Dla każdego przypadku zostały wyliczone dwa współczynniki:  $k_{AS}$  – asymetrii oraz  $k_{PZ}$  – przeciążenia, które pozwolą na szybką analizę otrzymanych wyników.

$$k_{AS} = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (6)$$

$$k_{PZ} = \frac{nI_{max}}{I_C} \quad (7)$$

gdzie:

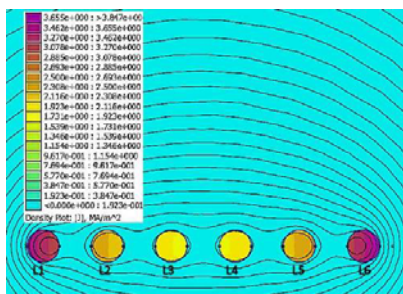
$I_{max}$  – amplituda prądu żyły obciążonej maksymalnie

$I_{min}$  – amplituda prądu żyły obciążonej minimalnie

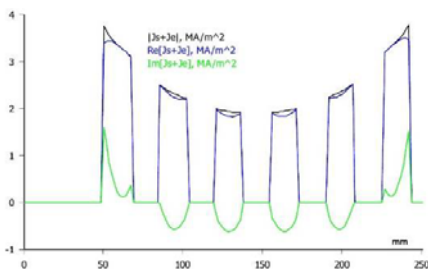
$I_C$  – amplituda prądu całkowitego toru  
 $n$  – liczba żył przypadająca na fazę ( $n = 6$ )

#### 4.1. Model linii dla jednej fazy

W pierwszym wariancie żyły toru prądowego zostały ułożone w układzie płaskim w odległości 17,5 mm, to znaczy zachowano pomiędzy nimi odstęp równy średnicy żyły. Wykonana symulacja jest odwzorowaniem układu rzeczywistego. W obliczeniach zastosowano siatkę obliczeniową złożoną z 44736 węzłów i 88748 elementów trójkątnych. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie graficznej, rozkład gęstości prądu każdej żyły oraz rozkład linii sił pola – część rzeczywista wektorowego potencjału magnetycznego  $\underline{A}$  ( $\underline{B} = \text{rot } \underline{A}$ ,  $\text{rot } \underline{B} = 0$ ) przedstawiono na rysunku 11, natomiast wartości gęstości prądu na linii poprowadzonej przez środki żył wzdłuż osi  $x$  przedstawiono na rysunku 12.

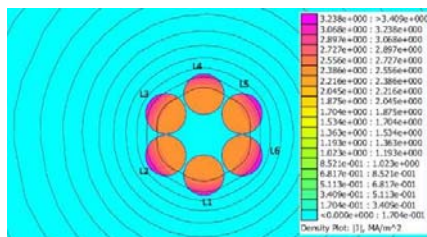


Rys. 11. Rozkład gęstości prądu



Rys. 12. Wartość gęstości prądu

W drugim wariancie żyły toru prądowego zostały ułożone jako wiązka – po okręgu. Przewody nie stykają się ze sobą. W obliczeniach zastosowano siatkę obliczeniową złożoną z 42953 węzłów i 85182 elementów trójkątnych. Wyniki obliczeń – gęstości prądu każdej żyły oraz rozkład linii sił pola (część rzeczywista  $\underline{A}$ ) przedstawiono graficznie na rysunku nr 13. W tabeli nr 1 przedstawiono zestawienie obciążeń poszczególnych żył (wartości skuteczne prądu) oraz wartość współczynników  $k_{AS}$  i  $k_{PZ}$ .



Rys. 13. Rozkład gęstości prądu

TABELA 1

	UKŁAD PŁASKI	UKŁAD SFERYCZNY
$L_1$	809,52A	598,41
$L_2$	558,92	608,98
$L_3$	464,88	606,96
$L_4$	467,10	594,44
$L_5$	566,30	610,78
$L_6$	824,47	612,97
$k_{AS}$	1,78	1,03
$k_{PZ}$	1,32	1,05

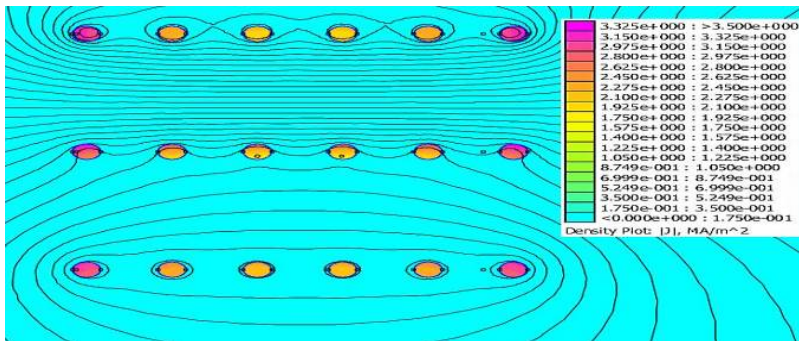
Porównując otrzymane wyniki możemy stwierdzić, że przy ułożeniu żył po okręgu, asymetria obciążenia jest minimalna natomiast dla układu płaskiego współczynnik asymetrii wynosi 1,78 co jest zbliżone z pomiarami przeprowadzonymi w układzie rzeczywistym.

#### 4.2. Model linii dla trzech faz

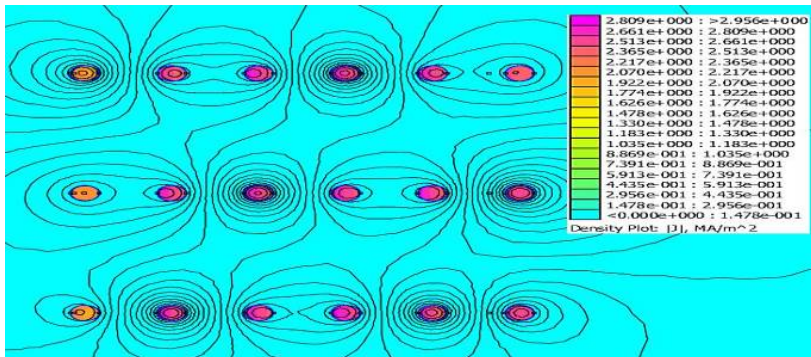
Dla linii trójfazowej w pierwszym wariancie żyły toru prądowego zostały ułożone w układzie równoległym w trzech warstwach w odległości 17,5 mm od siebie (żyły) oraz 55 mm (warstwy), w każdej warstwie były ułożone żyły z tej samej fazy, natomiast w dla wariantu drugiego odległości pomiędzy żyłami były takie same, jednakże w każdej warstwie ułożone zostały przewody różnych faz w następującej konfiguracji: L1, L2, L3, L1, L2, L3 / L2, L3, L1, L2, L3, L1 / L3, L1, L2, L3, L1, L2.

Wyliczone wartości współczynników asymetrii i przeciążenia wynoszą odpowiednio:

dla wariantu 1 –  $k_{AS} = 1,33$   $k_{PZ} = 1,18$ ; dla wariantu 2 –  $k_{AS} = 1,28$   $k_{PZ} = 1,07$ .



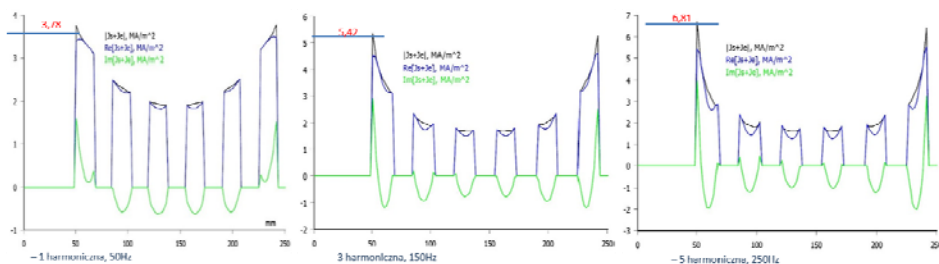
Rys. 14. Rozkład gęstości prądu (linia trójfazowa, wariant 1)



Rys. 15. Rozkład gęstości prądu (linia trójfazowa, wariant 2)

### 4.3. Wpływ wyższych harmonicznych

W zarejestrowanych i przedstawionych w punkcie 2 rzeczywistych przebiegach prądu obciążenia linii kablowej, zwłaszcza dla obiektu nr 2, możemy stwierdzić bardzo dużą zawartość wyższych harmonicznych, a tym samym zniekształcenie kształtu przebiegu prądu. W związku z powyższym w celach porównawczych zamodelowano dla linii jednofazowej w konfiguracji 1 z punktu 3.1. wymuszenie harmoniczną pierwszą, trzecią i piątą. W każdym przypadku amplituda prądu była taka sama. Przedstawione na rysunku 16 wartości gęstości prądu na linii poprowadzonej przez środki żył wzdłuż osi X wskazują na wzrost asymetrii obciążenia wraz ze wzrostem częstotliwości, w szczególności w odniesieniu do żył zewnętrznych.



Rys. 16. Wartości gęstości prądu (linia jednofazowa, wariant 1)

## 5. PODSUMOWANIE

Wykonane pomiary w obiektach rzeczywistych oraz przeprowadzona analiza awarii wielowiązkowych linii kablowych wykazały możliwość wystąpienia potencjalnych zagrożeń w związku z projektowaniem i budową linii kablowych niskiego napięcia zgodnie z obowiązującą i obligatoryjną normą [4]. Przeprowadzone obliczenia oparte na modelach cyfrowych układów rzeczywistych okazały się zgodne z zarejestrowanymi pomiarami. Zasadnym wydaje się wprowadzenie korekty to normy [4], zwracającej uwagę na możliwość wystąpienia asymetrii w obciążeniu poszczególnych żył, wynikającej z ich konfiguracji, a także wskazania sposobu ułożenia dla najbardziej typowych układów zasilania z podaniem współczynników korygujących umożliwiających wyliczenie obciążalności dopuszczalnej długotrwale, dla linii wykonanej z żył równoległych.

Przedstawiony w normach kanadyjskiej [1], amerykańskiej [2] czy europejskiej [5] sposób budowy nie wyczerpuje tematu, przedstawiając jedynie kilka rozwiązań nie wskazując przy tym sposobu wyliczenia obciążalności linii. Również preferowany układ mieszania faz w jednej wiązce jest niezgodny z przyzwyczajeniami oraz doświadczeniem eksploatacyjnym i projektowym pokoleń polskich elektroenergetyków.

Proponowanym przez autorów sposobem budowy linii wykonanej z żył równoległych jest konfiguracja po okręgu i prowadzenie jednej fazy jednym torem. Możliwe to będzie po wykonaniu specjalnych uchwytów dystansujących na przykład z polie-

tylenu, które utrzymają linię w oczekiwanej konfiguracji przestrzennej, a jednocześnie pozwolą na montaż linii eliminując koryta kablowe, które są dodatkowym źródłem strat z powodu prądów wirowych.

## LITERATURA

1. National Electrical Code. NFPA Committee on the National Electrical Code, 2008.
2. Canadian Electrical Code. Canadian Standards Association, 2010.
3. Thue W.: Electrical Power Cable Engineering, Third Edition. CRC Press, USA, 2010.
4. PN-IEC 60364-5-523:2001 „Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych - Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego - Obciążalność prądowa długotrwała przewodów. PKN, 2001.
5. IEC 60364-5-52 „Low-voltage electrical installations - Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment - Wiring systems”. IEC, 2009.
6. Wu A.: Single-Conductor Cables in Parallel. IEEE Transactions on Industry Applications, nr 2, str. 377-395, 1984.
7. Du Y., Burnett J.: Current distribution in single-core cables connected in parallel. IET Transmission Proceedings – Generation Transmission and Distribution, nr 5, str. 406-413, 2001.
8. Lee S.: A cable configuration technique for the balance of current distribution in parallel-connected single-core cables. Journal of Marine Science and Technology, nr 2, s. 290–297, 2010.
9. Petty K.: Calculation of current division in parallel single-conductor power cables for generating stations applications. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 6, nr 2, s. 479-485 1991.
10. Zhang L., Tian X., Boggs A., Bartolucci J.: Determination of Total Resistive Loss in a Multiple Circuit, Three-Phase Cable System, IEEE Transactions on Power Delivery, nr 3, s. 1939–1945, 2011.
11. Cristina S., Feliziani M.: A finite element technique for multiconductor cable parameters calculation, IEEE Transactions Magnetics, nr 4, str. 2986-2988, 1989.
12. Lucas R., Talukdar S., Advances in finite element techniques for calculating cable resistances and inductances, IEEE Transactions Power Apparatus and System, nr 3, s. 875-883, 1978.
13. Piątek Z., Modelowanie linii, kabli i torów wieloprądowych, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej seria monografie nr 130, s. 33–54, 2007.



## DESIGN OF PARALLEL SINGLE-CORE CABLE LINES OF LOW VOLTAGE

Lech BOROWIK, Artur CYWIŃSKI

**ABSTRACT** *In low-voltage power systems, when it is necessary to lead out high power, the most common method to design the electrical installation is to use multi-cable lines consisting of single-core cables in parallel connection. The primary document used by designers that regulates the issue of the cable selection in terms of long-term current-carrying capacity is the PN-IEC 60364-5-523:2001 standard. The cable layout frequently results in asymmetry of the load of particular cores. The standard neither describes this fact nor suggests any methods for the cable layouts that might minimize the effect of the interaction of the wires that leads to the uneven load of particular cables. In the extreme case, this uneven load may reach up to 100%. The article presents measurements conducted in real objects and tries to describe the considered phenomenon to model the existing network systems and to suggest a solution for designing of the parallel-cable lines.*

**Keywords:** *parallel single-core cables, current carrying capacities, proximity effects*

**Dr hab. inż. Lech BOROWIK, Prof. P.Cz.** – zainteresowania naukowe Profesora dotyczą zagadnień związanych z metrologią elektryczną, metrologią wielkości nieelektrycznych, a także diagnostyką procesów przemysłowych i urządzeń elektrycznych. Jest członkiem Komisji Metrologii Polskiej Akademii Nauk, a także Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej. Autor licznych publikacji naukowych. Aktualnie pełni obowiązki Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej, kieruje również pracą Instytutu Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej.

**Mgr inż. Artur CYWIŃSKI** – od początku swej kariery zawodowej związany z energetyką zawodową. Aktualnie prowadzi pracownię projektową, autor licznych projektów związanych z modernizacją i rozwojem sieci elektroenergetycznej oraz trakcji trolejbusowej. Obecnie doktorant na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej. Szczególne zainteresowania naukowe to projektowanie budowy linii kablowych niskiego napięcia z żył równoległych, a także rozwój i zastosowanie nowych technologii w trakcji trolejbusowej.