

# Oddziaływania elektrodynamiczne prądów na przewody sztywne łączone przez docisk

*W artykule przedstawiono wyniki analiz sił działających na przewody sztywne równoległe przy przepływie prądów zakłóceńowych oraz rezultaty rzeczywistych pomiarów ugięć szyn na skutek przepływu przez nie prądów zakłóceńowych. Pomiarzy zostały przeprowadzone dla przykładowego układu szyn sztywnych miedzianych łączonych przez docisk dla różnych konfiguracji ich ułożenia.*

## 1. WSTĘP

Prądy w przewodach równoległych powodują występowanie sił elektromagnetycznych wzajemnego oddziaływania. W przypadku, gdy przewody są długie, w porównaniu z odstępem między nimi, siły te są rozłożone równomiernie wzdłuż przewodów. Jeżeli przepływające prądy mają kierunki przeciwne, siła elektromagnetyczna odpycha przewody, dążąc do ich odkształcenia w taki sposób, aby zwiększyć indukcyjność obwodu.

## 2. ANALIZA TEORETYCZNA

Wartość siły w określonym kierunku można obliczyć, rozpatrując pracę potrzebną do przemieszczenia przewodu. Ponieważ jest ona wykonywana przez siłę elektromagnetyczną, równa jest zmianie energii pola magnetycznego spowodowanej rzeczywistym przemieszczeniem przewodu. Stąd siłę  $F_x$  działającą w kierunku  $x$  można wyrazić wzorem [1]:

$$F_x = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} \quad (1)$$

w którym:

$F_x$  – siła działająca w kierunku  $x$  [N],  
 $L$  – indukcyjność własna obwodu [H],  
 $i$  – wartość chwilowa prądu [A].

W przypadku prostych i wyidealizowanych konfiguracji przewodów można stosować ogólnie znane wzory na obliczanie indukcyjności. Jednak w większości przypadków konieczne są założenia upraszczające, umożliwiające stosowanie praktycznych metod obliczeniowych. Siła oddziaływania elektrodynamicznego między dwoma przewodami jest proporcjonalna do kwadratu prądu lub do iloczynu dwóch prądów. Ponieważ prąd jest funkcją czasu, siła jest także funkcją czasu. W przypadku prądu zwarciowego, bez składowej nieokresowej, siła zmienia się z częstotliwością podwójną w stosunku do częstotliwości prądu. Składowa nieokresowa powoduje zwiększenie wartości szczytowej siły oraz wystąpienie składowej siły zmieniającej się z częstotliwością równą częstotliwości prądu. Wartość szczytowa siły ma szczególne znaczenie w przypadku przewodów sztywnych. Skutkiem jej działania jest naprężenie zginające w przewodach sztywnych, a także zginanie, ściskanie lub rozciąganie podpór (izolatorów wsporczych). Siły działające między dwoma długimi przewodami równoległymi można wyrazić zależnością [1]:

$$F = 0,2 i_1 i_2 \frac{l}{a} \quad (2)$$

gdzie:

$F$  – siła [N],  
 $l$  – odległość między podporami [cm],  
 $i_1, i_2$  – wartości chwilowe prądów w przewodach [kA],  
 $a$  – odstęp między osiami przewodów [cm].

Siłę oddziaływania elektrodynamicznego można również wyznaczyć na podstawie pomiaru strzałki ugięcia  $f_y$  szyny, mierzonej w połowie przęsła, przy wykorzystaniu zależności [1]:

$$F = \frac{384 \cdot E J f_y}{l^3} \quad (3)$$

gdzie:

$F$  – wartość siły [N],

$l$  – długość przęsła [cm],

$E$  – moduł sprężystości materiału szyny: dla Al  $E = 6,86 \cdot 10^6$  N/cm<sup>2</sup>, dla Cu  $E = 10,5 \cdot 10^6$  N/cm<sup>2</sup>,

$J$  – moment bezwładności przekroju  $J = h \cdot b^3/12$ ,

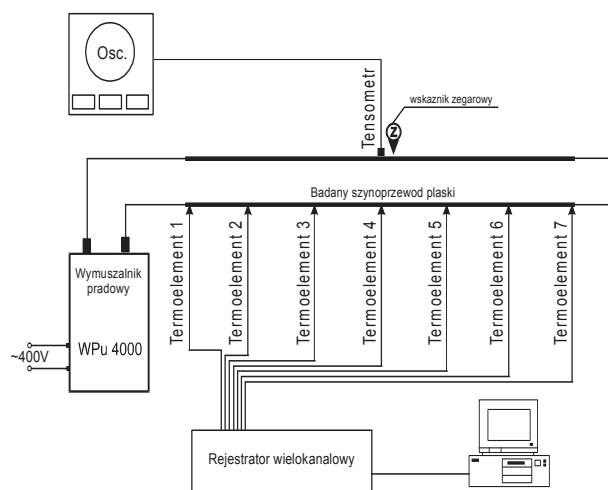
$h$  – wysokość szyny [cm],

$b$  – szerokość szyny [cm],

$f_y$  – zmierzona strzałka ugięcia [cm].

### 3. POMIARY ODDZIAŁYWAŃ ELEKTRODYNAMICZNYCH MIĘDZY SZYNAMI

W celu wykonania badań oddziaływań dynamicznych i ciepłych szynoprzewodów płaskich opracowano i wykonano stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawia rys. 1. [2].

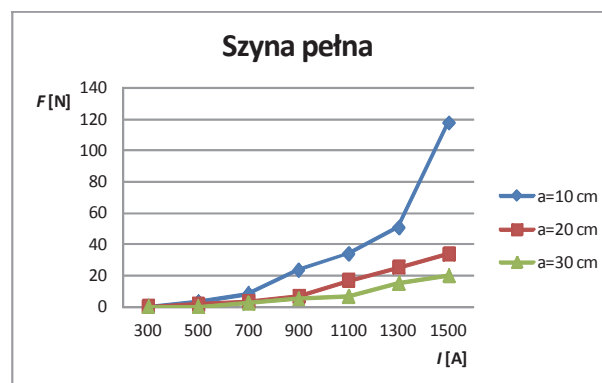


Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego [2]

W badaniach wykorzystano szyny miedziane w ułożeniu pionowym, przy odległości pomiędzy podporami  $l = 1$  m. Odległość  $a$  między osiami przewodów szynowych była regulowana w zakresie od 10

do 30 cm. Pod pojęciem szyny pełnej rozumie się szynę jednorodną (bez połączenia śrubowego).

W wyniku badań określono strzałkę  $f_y$  ugięcia szyny, a na podstawie zależności (3) obliczono wartość zastępczej siły  $F$  działającej na szynę. Wyniki pomiarów w formie graficznej przedstawia rys. 2.

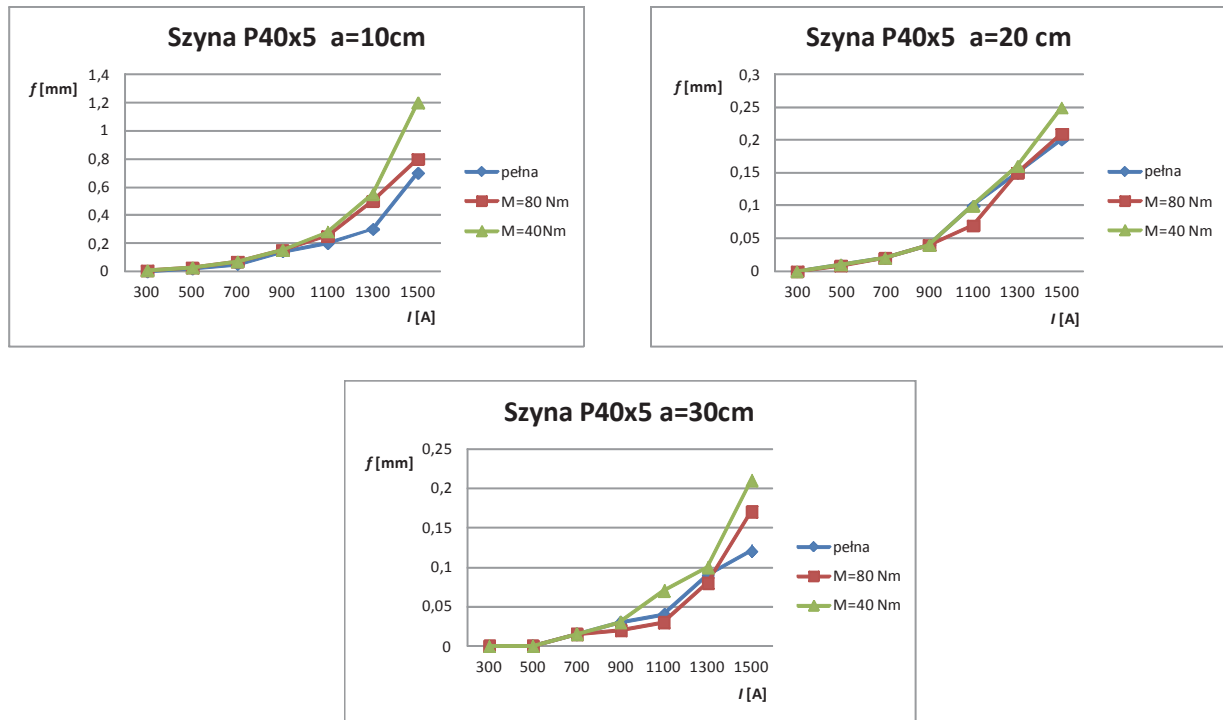


Rys. 2. Zależność wartości siły elektrodynamicznej  $F$  działającej na szynę pełną (bez połączenia śrubowego) od prądu  $I$  obciążenia szyn [2]

W dalszej części badań próbom poddano szyny łączone przez docisk śrubą pojedynczą M12 w zakresie momentów sił docisku niższych od zalecanych przez producentów i w zakresie zalecanym. Według różnych producentów momenty skręcania śrub M12 dla połączeń szynowych mieszczą się w zakresie 80-110 Nm [3, 4]. Szyny poddane badaniom połączone zostały na zakładkę śrubą M12 z dociskiem momentem  $M_y = 80$  Nm oraz  $M_y = 40$  Nm. Połączenie umiejscowiono w połowie przęsła.

Połączenie szynoprzewodów ze zbyt małą siłą jest przyczyną wzrostu temperatury złącza powyżej wartości temperatur dopuszczalnych. Wyniki badań z uwzględnieniem oddziaływań ciepłych prądów zakłóceń na szyny łączone przez docisk przedstawione zostały w artykule [5]. W aspekcie oddziaływań elektrodynamicznych na przewody szynowe jakość połączenia śrubowego wpływa na strzałkę ugięcia szyny. Dodatkowo w obwodach prądu przemiennego siły elektrodynamiczne mają przebieg okresowy. W pewnych przypadkach może to być przyczyną wystąpienia rezonansu między drganiami wymuszonymi oddziaływaniem sił elektrodynamicznych a drganiami własnymi fragmentów toru prądowego, co powoduje dodatkowy wzrost naprężeń mechanicznych w szynie i w elementach wsporczych, szczególnie przy zbyt „słabym” docisku zestyku.

W zależności od wartości prądu obciążenia różna jest charakterystyka odkształceń sprężystych szyn (rys. 3.)



Rys. 3. Charakterystyka odkształceń sprężystych szyn (strzałka ugięcia  $f$ ) dla różnych wartości prądu obciążenia  $I$  przy różnych połączeniach szyn płaskich [2]

#### 4. WNIOSKI

Analiza oddziaływań elektrodynamicznych ma na celu przede wszystkim ustalenie sił i naprężeń występujących w torach prądowych oraz w spornikach tych torów. Wielkości strzałek wygięcia mierzone w trakcie badań były zależne od wartości chwilowej prądu i odległości  $a$  pomiędzy nimi (w badaniach przyjęto stałą odległość pomiędzy podporami  $l = 1$  m). Siły oddziaływań elektrodynamicznych zależne są tylko od iloczynu prądów przepływających przez oddziaływujące na siebie tory prądowe oraz od ich wzajemnego ułożenia. Zobrazowane to zostało na rys. (2).

W wyniku zastosowania połączenia śrubowego szyn uzyskano większe ugięcie niż w przypadku szyn jednorodnych. Strzałka ugięcia jest tym większa, im mniejszy był moment dokręcenia śruby łączącej dwa odcinki szyn. Siła oddziaływania elektrodynamicznego jest zależna od kwadratu prądu płynącego przez równoległe przewody oraz od odległości podpór i przewodów względem siebie. Tak więc dodatkowe złącze na przewodach (przy zbyt małej sile docisku) osłabia ich wytrzymałość elektrodynamiczną. Przy złączach wykonanych zgodnie z zaleceniami producentów (np. dla połączenia M12: 80-110 Nm) wytrzymałość elektrodynamiczna przewodów jest na poziomie wytrzymałości przewodu jednorodnego.

W pomiarach wykorzystano prądy rzędu 1,5 kA, tj. do 2,3-krotności prądu znamionowego ( $I_n = 660$  A).

W warunkach rzeczywistych prądy zwarciove mogą osiągać wartości kilkudziesięciu, a nawet kilkuset kiloamperów. W związku z tym nie można bagatelizować wpływu oddziaływań elektrodynamicznych na układy szyn.

Przedstawiony układ szyn (szyna płaska w układzie pojedynczym) należy do najprostszych. W praktyce układy szyn mogą być dużo bardziej złożone (różne kształty przewodów szynowych, występowanie szyn w pakietach 2-3 szyny na 1 fazę).

#### Literatura

1. PN-EN 60865-1: 2002. *Obliczanie skutków prądów zwarciowych – Część 1: Definicje i metody obliczania.*
2. Żukowski P., Pawłot M.: *Stanowisko pomiarowe do badania oddziaływań elektrodynamicznych i termicznych szynoprzewodów płaskich przy pracy znamionowej i przeciążeniowej.* „Pomiary, Automatyka, Kontrola” (Miesięcznik Naukowo-Techniczny), vol. 55, 2009, nr 1.
3. *Zasady prawidłowego wykonania rozdzielnic elektrycznych nN*, Haber Energia Hulanicki Bednarek Sp. z o. o., Chełm 2011.
4. Katalog Rittal – RiLine60, Rittal Sp. z o. o., Grodzisk Mazowiecki 2006.
5. Pawłot M.: *Nagrzewanie się zestyków szynoprzewodów płaskich łączonych przez docisk w warunkach zakłóceńowych.* „Mechanizacja i Automatyka Górnictwa”, 2011, nr 8.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.