

## Oddziaływanie elektrodynamiczne prądów zakłóceniovych na układ szyn aluminiowych płaskich łączonych przez docisk

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki analiz sił działających na przewody sztywne równoległe łączone przez docisk przy przepływie prądów zakłóceniovych oraz rzeczywistych pomiarów ugięć szyn na skutek przepływu przez nie ww. prądów. Pomiary zostały przeprowadzone dla przykładowego układu szyn sztywnych dla różnych konfiguracji ich ułożenia. Ułożenie rozpatrywano ze względu na odległość pomiędzy szynami jak i na położenie miejsca połączenia. Połączenie wykonano przy dwóch różnych siłach docisku. Miejsce oraz sposób wykonania połączenia ma wpływ na wartość strzałki ugięcia szyny przy przepływie prądów roboczych a przede wszystkim prądów zakłóceniovych.

**Abstract.** The article presents results of analyses concerning forces acting on rigid parallel conductors at the passage of fault currents as well as results of real-time measurements of busbar deflection caused by the passage of those currents. Measurements were performed for the exemplary system of rigid busbar for the different configuration of their arrangement. The arrangement was considered due to the distance between the busbars and on the position of the connection. The connection is made at two different pressure forces. Where and how was made a connection affects the value of the deflection busbar the flow of nominal currents and most of all fault currents. (The electrodynamic impact of fault currents on system of aluminum busbar connected by pressure).

**Słowa kluczowe:** termodynamika, elektrodynamika, szyny sztywne.

**Keywords:** thermodynamics, electrostatics, rigid conductors.

### Wstęp

Prądy w przewodach równoległych powodują występowanie sił elektromagnetycznych wzajemnego oddziaływania między nimi. 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.

### Analiza teoretyczna

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

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

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 (2) [1].

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

przy czym:  $F$  – 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  $f_v$  szyny, mierzonej w połowie przęsła, przy wykorzystaniu zależności (3) [1].

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

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).

### Pomiary oddziaływań elektrodynamicznych między szynami

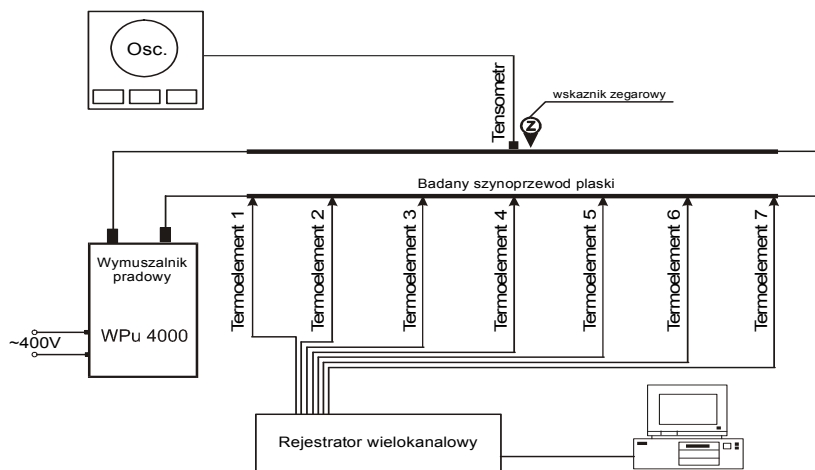
W celu wykonania badań oddziaływań dynamicznych i cieplnych szynoprzewodów płaskich opracowano i wykonano stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawia rysunku 1 [2].

Badaniom poddane zostały szyny płaskie aluminiowe AP40×5 połączone ze sobą w sposób trwały.

Połączenie dwóch szyn ze sobą na stałe stanowi zestyk nieruchomy. Takie połączenie można wykonać na 3 sposoby: spawanie, wgniatanie oraz za pomocą śrub. Łączenie zacisków aparatów z szynami można realizować tylko za pomocą ostatniej z wymienionych metod [3].

Połączenia śrubowe szyn dzielimy na dwa rodzaje:[3]

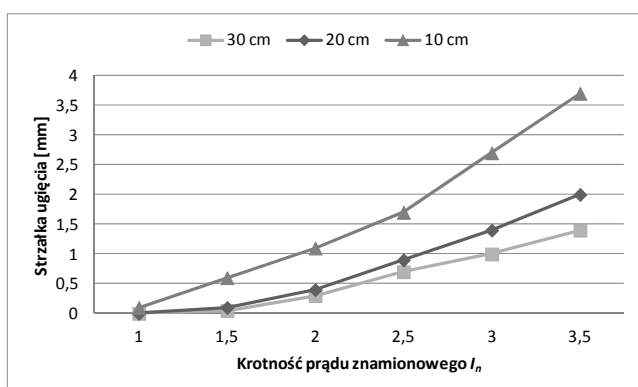
- Z przewiercaniem – śruby przechodzą przez powierzchnię łączonych szyn z nakładką lub na zakładkę.
- Bez przewiercania – przy użyciu nakładek oraz śrub ściskających.



Rys.1. Schemat blokowy układu pomiarowego [2].

W praktyce połączenie szyn na zakładkę czyni zestyk tańszym, jego rezystancja przejściowa jest mniejsza, natomiast wytrzymałość zwarciowa większa. Łączenie takie jest więc dużo lepszym rozwiązaniem niż z nakładką i taki rodzaj połączenia uwzględniono w badaniach.

Oddziaływaniu elektrodynamicznym prądu poddano szyny płaskie aluminiowe w ułożeniu pionowym przy odległości pomiędzy podporami  $l=1m$ . Odległość  $a$  między osiami przewodów była regulowana w zakresie 10-30cm ze skokiem 10cm. W celu określenia wpływu połączenia na strzałkę ugięcia szyny, wykonano badania szyny jednorodnej bez połączeń w zakresie prądów  $I_n - 3,5 I_n$ , gdzie  $I_n$  to prąd obciążenia długotrwałego szyny równy 376 A w temperaturze  $+35^{\circ}C$  przy temperaturze szyn  $65^{\circ}C$  (wg DIN 43670). Według zależności (3) można obliczyć wartość siły elektrodynamicznego oddziaływania na szynę jednorodną. Wartość siły jest stała, jednakże zmiana charakteru obiektu poddawanego oddziaływaniom powoduje zmianę strzałki ugięcia. Zmianą może być np. wprowadzenie połączenia szyn poprzez docisk. Taka zmiana będąca wprowadzeniem w tor prądowy dodatkowej rezystancji będącej dodatkowym źródłem ciepła, zmienia element jednorodny w niejednorodny także pod względem wytrzymałości elektrodynamicznej. W badaniach podjęto próbę analizy zagadnienia związanego z oddziaływaniem elektrodynamicznym szyn płaskich aluminiowych łączonych przez docisk przy różnych wariantach wykonania połączenia.



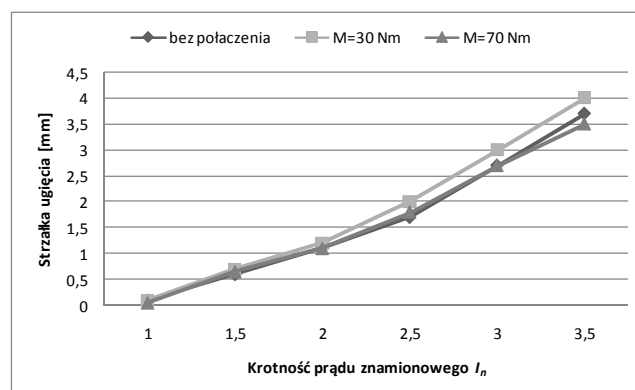
Rys.2. Zależność strzałki ugięcia szyny aluminiowej płaskiej jednorodnej przy przepływie prądów zakłóceniovych dla trzech odległości pomiędzy szynami  $a$ : 10, 20, 30 cm.

W pierwszej kolejności badaniom poddano szynę jednorodną (bez połączenia) przy trzech odległościach pomiędzy szynami: 10 cm, 20 cm i 30 cm i przy stałej odległości pomiędzy podporami równej 100 cm. (rys.2)

W dalszej części badano szyny łączone przez docisk. Układ szyn płaskich wykonano w połączeniu "na zakładkę" pojedynczą śrubą M12 dokręconą z momentami: 30 Nm i 70 Nm (rys.3)

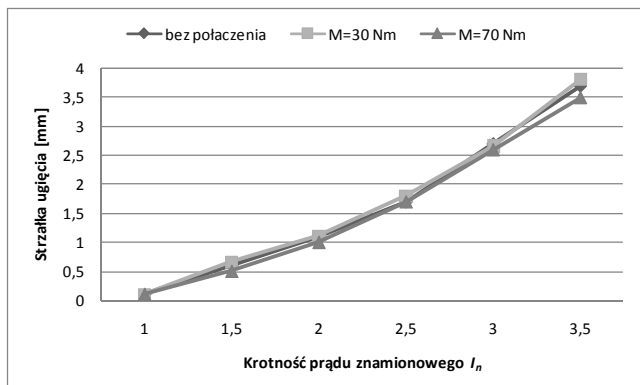
Odległość wzajemna przewodów szynowych poddanych oddziaływaniom elektrodynamicznym ustalono na 10cm a połączenie wykonano w środku geometrycznym pomiędzy przesłami tj. na odległości 50 cm od przesł.

Strzałka ugięcia szyny łączonej przez docisk z momentem równym 30 Nm jest większa niż szyny jednorodnej lub łączonej przez docisk z momentem równym 70Nm. Wprowadzenie połączenia w układ toru prądowego powoduje oprócz zmian oddziaływania cieplnego prądu zakłóceniovego także zmiany oddziaływania elektrodynamicznego. Nieprawidłowe wykonanie połączenia stykowego skutkuje wzrostem temperatur ustalonych, szczególnie przy mniejszych siłach dociskowych. Jest to zjawisko bardzo niebezpieczne z punktu widzenia eksploatacji urządzeń elektrycznych, szczególnie w zakresie przyrostów temperatur ustalonych zbliżonych do dopuszczalnych [4].



Rys.3. Zależność strzałki ugięcia szyny aluminiowej płaskiej łączonej w połowie przesł przy przepływie prądów zakłóceniovych dla odległości pomiędzy szynami 10cm i momentami dokręcenia śruby łączącej M12: 30, 70 Nm.

Miejsce wykonania łączenia szyn płaskich nie jest bez znaczenia. W dalszej części badań wykonano pomiary strzałki ugięcia szyn płaskich łączonych przez docisk z takimi samymi momentami dokręcenia szyn jak w przypadku poprzednim, z tą różnicą, że połączenie szyn wykonano na 1/4 długości przesł (rys.4). Samo przesunięcie połączenia bliżej podpory powoduje zmniejszenie strzałki ugięcia szyny do poziomu szyny pełnej jednorodnej, nawet przy małej sile docisku odpowiadającej momentowi 30 Nm.

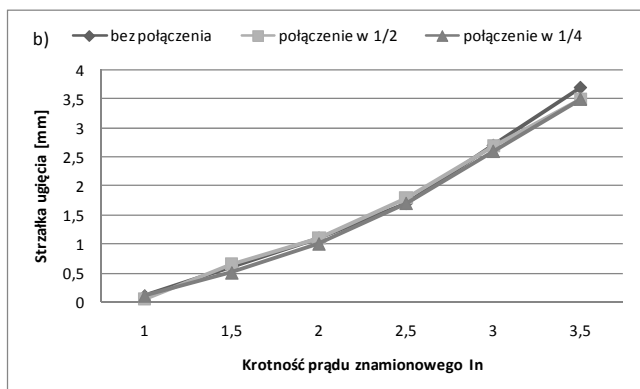
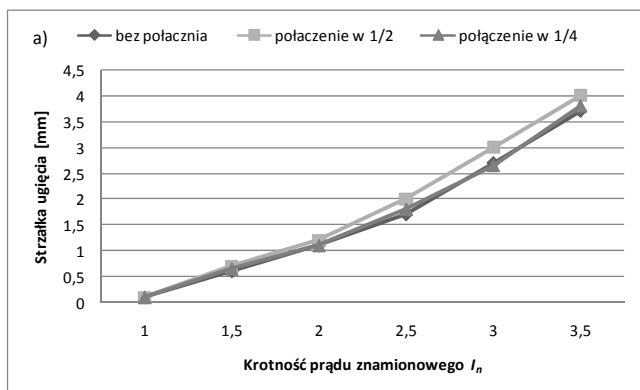


Rys.4. Zależność strzałki ugięcia szyny aluminiowej płaskiej łączonej w  $\frac{1}{4}$  długości przęsła przy przepływie prądów zakłóceńowych dla odległości pomiędzy szynami 10 cm i momentami dokręcenia śruby łączącej M12: 30, 70 Nm.

Rysunek 5 przedstawia wpływ na strzałkę ugięcia jaki ma miejsce wykonania połączenia szyn. Przy wykonaniu połączenia z siłą odpowiadającą momentowi 70 Nm umiejscowienie połączenia w zasadzie nie ma większego znaczenia, o tyle przy mniejszych momentach (30 Nm) przesunięcie połączenia w kierunku podpory zmniejsza strzałkę ugięcia do poziomu odkształcenia szyny jednorodnej.

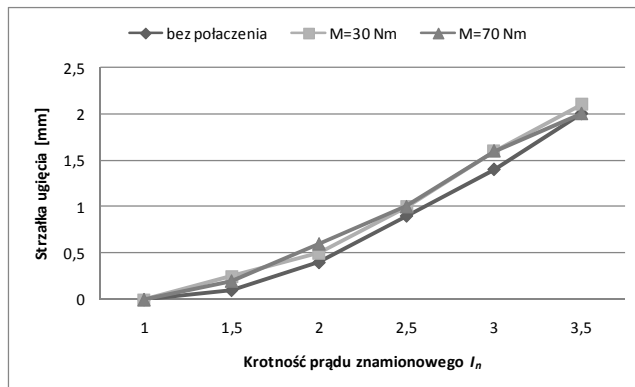
Przy połączeniach szyn aluminiowych należy pamiętać o szybkiej erozji materiału i powstawaniu warstw nalotowych. W związku z tym połączenia śrubowe szyn aluminiowych wykonujemy z zastosowaniem podkładek sprężystych.

W zakresie prądów przeciążeniowych którym oddziaływaniom poddane zostały szyny, wraz ze wzrostem odległości pomiędzy nimi maleje różnica wynikająca z ich sposobu łączenia.

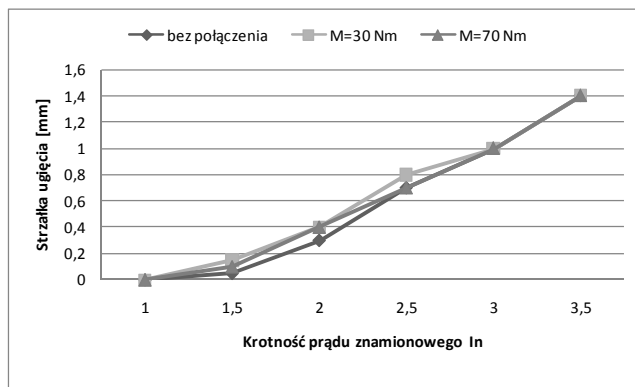


Rys.5. Wpływ położenia połączenia szyn na strzałkę ugięcia w dwóch wariantach połączenia: a) moment dokręcenia śruby łączącej M12 – 30 Nm i b) moment dokręcenia śruby łączącej M12 – 70 Nm w stosunku do szyny jednorodnej.

Wzrost odległości powoduje zmniejszenie naprężeń w szynie i w związku z tym jej odkształcenie też jest mniejsze (rys.6 i rys.7). Przy większych wartościach prądów zakłóceńowych (zwarciovych) różnice wynikające ze sposobu łączenia szyn oraz miejsca połączenia byłyby znaczne, gdyż siła oddziaływania elektrodynamicznego pomiędzy dwoma równoległymi przewodnikami jest (zgodnie z zależnością 1) wprost proporcjonalna do kwadratu prądu płynącego w przewodzie.

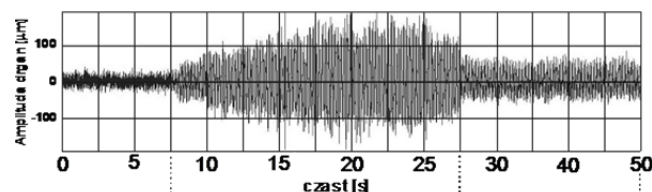


Rys.6. Zależność strzałki ugięcia szyny aluminiowej płaskiej łączonej w połowie przęsła przy przepływie prądów zakłóceńowych dla odległości pomiędzy szynami 20cm i momentami dokręcenia śruby łączącej M12: 30, 70 Nm.



Rys.7. Zależność strzałki ugięcia szyny aluminiowej płaskiej przy przepływie prądów zakłóceńowych dla odległości pomiędzy szynami 30cm i momentami dokręcenia śruby łączącej M12: 30, 70 Nm.

Przy przepływie prądów roboczych a w szczególności prądów zakłóceńowych, w tym prądów zwarciovych zauważalne jest drganie szyn. Pomiar strzałki ugięcia dokonywany w trakcie badań jest to maksymalne ugięcie szyny mierzone w jej środku geometrycznym. Przebieg akustyczny drgania szyny aluminiowej przy odległości pomiędzy szynami równej 10 cm, przedstawia rys.8. W pierwszej części widoczne są drgania szyny przy przepływie prądu znamionowego  $I_n = 376A$ , w dalszych częściach prądu przeciążeniowego  $2,5 I_n$  oraz  $1,5 I_n$ .



Rys.8. Drgania szyn aluminiowych przy przepływie prądów zakłóceńowych.

W pewnych przypadkach drgania szyn mogą doprowadzić do rezonansu między drganiami wymuszonymi a drganiami własnymi fragmentów toru prądowego, co może spowodować dodatkowy wzrost naprężeń mechanicznych w szynie i w elementach wsporczych skutkując ich uszkodzeniem.

### Wnioski

Analiza oddziaływań elektrodynamicznych ma na celu głównie ustalenie sił i naprężeń występujących w torach prądowych oraz w spornikach tych torów.

Siły oddziaływań elektrodynamicznych zależne są tylko od iloczynu prądów przepływających przez oddziaływujące na siebie tory prądowe oraz od ich wzajemnego ułożenia.

Wielkości strzałek ugięcia mierzone w trakcie badań, które powstały na skutek działania ww. sił oddziaływania elektrodynamicznego były zależne od wartości chwilowych prądów, materiału szyn, odległości pomiędzy przewodami a także (w przypadku szyn łączonych) od sposobu i miejsca połączenia.

W wyniku zastosowania połączenia śrubowego szyn uzyskano większe ugięcie niż w przypadku szyn jednorodnych przy wykonaniu połączenia szyn w środku pomiędzy podporami. Strzałka ugięcia jest tym większa im mniejszy był moment dokręcenia śruby łączącej dwa odcinki szyn. Dodatkowe złącze (przy zbyt małej sile docisku) na przewodach jest niejako osłabieniem wytrzymałości elektrodynamicznej przewodu. Przy złączach wykonanych zgodnie za zaleceniami producentów (np. dla połączenia M12: 70-110 Nm) wytrzymałość elektrodynamiczna przewodów jest na poziomie wytrzymałości przewodu jednorodnego.

W pomiarach wykorzystano prądy 2,5 krotności prądu znamionowego ( $I_n = 376\text{A}$ ). W warunkach rzeczywistych prądy zwarciove mogą osiągać wartości kilkudziesięciu, a nawet kilkuset kiloamperów. W związku z tym sposób

ułożenia przewodów szynowych, sposób ich połączenia oraz miejsce połączenia ma decydujący wpływ na wielkość oddziaływania elektrodynamicznego w tym głównie na strzałkę ugięcia.

Ważnym aspektem układu przewodów szynowych i ich wzajemnego oddziaływania są drgania. Częstotliwość drgań powinna być poza obszarem drgań niebezpiecznych związanych z możliwością doprowadzenia do rezonansu.

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

**Autor:** dr inż. Miroslaw Pawłot, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: [m.pawlot@pollub.pl](mailto:m.pawlot@pollub.pl)

### LITERATURA

- [1] PN-EN 60865-1: 2002 – *Obliczanie skutków prądów zwarcioowych – 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*, Miesięcznik Naukowo-Techniczny Pomiar Automatyka Kontrola, 55 (2009), n.1, 38-40.
- [3] Roo H., *Urządzenia elektryczne*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1969
- [4] Pawłot M., *Elektroprzewodząca ochrona typu EPS-98 złącz stykowych szyn płaskich miedzianych i jej wpływ na stan cieplny zestyku przy przepływie prądów roboczych i zakłóceńowych*, Przegląd Elektrotechniczny 91 (2015), n.11, 284-287.