

Paweł ŻUKOWSKI, Mirosław PAWŁOT
POLITECHNIKA LUBELSKA, KATEDRA URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH I TWN

Stanowisko pomiarowe do badania oddziaływań elektrodynamicznych i termicznych szynoprzewodów płaskich przy pracy znamionowej i przeciążeniowej

Dr hab. Paweł ŻUKOWSKI

Absolwent Wydziału Fizyki Państwowego Uniwersytetu Białoruskiego (1972), doktorat obronił w Państwowym Uniwersytecie Białoruskim (1980), a habilitację na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu M. Curie – Skłodowskiej w Lublinie (1992). W swojej pracy naukowej zajmuje się zastosowaniem technik jonowych do modyfikacji materiałów elektrotechnicznych i elektronicznych, badaniami zjawisk łączeniowych w aparatach elektrycznych oraz właściwościami nanomateriałów.



e-mail: p.zukowski@pollub.pl

Dr inż. Mirosław PAWŁOT

Adiunkt Wydziału Elektrotechniki i Informatyki, Pracownik Katedry Urządzeń Elektrycznych i TWN. Autor wielu publikacji z zakresu zjawisk cieplnych zachodzących w przewodach i szynoprzewodach elektrycznych podczas ich pracy znamionowej i zakłóceńowej.



e-mail: mirekp@elektron.pol.lublin.pl

Streszczenie

W artykule zostało przedstawione stanowisko do pomiarów oddziaływań elektrodynamicznych i cieplnych szyn płaskich. Stanowisko badawcze pozwala na pomiar strzałki ugięcia szyn i w efekcie określenie sił działających na szyny w momencie przepływu prądu przeciążeniowego. W pomiarach cieplnych szyn układ pozwala na badanie przyrostów temperatur w 16 punktach szynoprzewodu.

Słowa kluczowe: nagrzewanie, przewody elektryczne.

Measuring stand for testing electrodynamic and thermal processes in flat busbars at their nominal and overload operation

Abstract

The paper presents a stand for measuring electrodynamic and thermal reactions of flat busbars. The stand is composed of a high-current source Wpu-400 of the continuous operating current up to 1A as well as instantaneous currents up to 4.1kA and a multi-channel recorder AGILENT 34970A that enables temperature recording every 200ms at 16 measuring points. A strain gauge is placed in a geometric center of a tested busbar and it enables tracking vibrations of the tested object and measuring their frequency. The presented measuring stand (Fig. 1) makes it possible to test flat busbars of the 50x5 mm diameter in vertical and flat working positions at smooth support adjustment within the range of 100-160 cm for three distances between the bus-bar axes of 30, 20, and 10 cm. In order to change geometric parameters of the stand it is enough to make adequate supports (Fig. 2). By taking the measurements it is possible to determine the distribution of steady temperatures over the whole bar length as well as heating curves for selected points of the system (Fig. 3, Fig. 4). The stand also enables measuring the busbar deflection sag (Fig. 5) and, consequently, determining forces that act upon the bars at the instant of the overload current flow.

Keywords: heating, electric conductors.

1. Wstęp

W rzeczywistych układach szynoprzewodów, z uwagi na fizyczną i geometryczną ich złożoność oraz zróżnicowane formy wymiany ciepła, wyznaczenie temperatur może być zagadnieniem trudnym. Wyniki analitycznego rozwiązania w prostych układach modelowych, będących z reguły wyidealizowanymi, nie mają często praktycznego znaczenia dla ilościowej analizy zjawisk wymiany ciepła w układach technicznych, ze względu na liczne, nie odpowiadające warunkom rzeczywistym, założenia upraszczające. W przypadku pracy zakłóceńowej oprócz oddziaływań cieplnych mamy do czynienia z oddziaływaniami dynamicznymi, tj. siłami działającymi na szynoprzewody w momencie przepływu prądu zakłóceńowej, oraz ze zjawiskiem drgań własnych szyn.

W pracy przedstawiono opis zaprojektowanego i zbudowanego w Katedrze Urządzeń Elektrycznych i TWN na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki na Politechnice Lubelskiej stanowisko do badań oddziaływań cieplnych i dynamicznych szyn i przewodów przy prądach roboczych, przeciążeniowych i zwarciovych. Stanowisko to wykorzystywane jest w pracach badawczych prowadzonych w katedrze oraz w procesie kształcenia studentów.

2. Dobór szynoprzewodów z uwzględnieniem zjawisk cieplnych i dynamicznych

Obliczenia dotyczące zjawisk cieplnych w urządzeniach i aparatach elektrycznych prowadzi się w oparciu o bilans cieplny. Pełna postać równania bilansu cieplnego zapisywania jest w dwóch dziedzinach: czasu i miejsca. Postać tych zależności ulega jednak odpowiedniemu uproszczeniu, zależnie od rozważanych szczegółowych uwarunkowań.

Bilans energetyczny przewodu uwzględniający prawo Joule'a oraz konwekcyjne rozpraszanie ciepła na jednostkę długości poprzez zewnętrzną powierzchnię s nieskończenie długiego przewodu jest opisany prawem Newtona, które ma postać [1]:

$$\Delta P dt = cmd\vartheta + hs(\vartheta_{gr} - \vartheta_o) dt \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta P = I^2 R$ – straty mocy wydzielane w rozpatrywanym obiekcie [W/m]

t – czas [s]

c – ciepło właściwe [W/kg deg]

m – masa rozpatrywanego ciała [kg]

ϑ_o – temperatura otoczenia [°C]

ϑ_{gr} – temperatura nagrzanego ciała [°C]

h – współczynnik wymiany ciepła [W/m²deg]

s – powierzchnia oddawania ciepła z ciała o temperaturze ϑ_{gr} do otoczenia o temperaturze ϑ_o

W stanach ustalonych gdy $d\vartheta/dt = 0$ równanie (1) można zapisać jako:

$$I^2 R = hs(\vartheta_{max} - \vartheta_o) \Rightarrow I = \sqrt{\frac{hs}{R_g} \cdot \sqrt{\vartheta_{max} - \vartheta_o}} \quad (2)$$

Zależność ta umożliwia określanie przyrostów temperatur dla przewodów elektrycznych jedynie przy zaniedbaniu warunków brzegowych, tj. przy założeniu, że przewód jest nieskończenie długi [2-4].

Dobór szynoprzewodów opiera się na określeniu maksymalnego obciążenia długotrwałego prądem roboczym (zależność 2). Następnie obliczony przekrój minimalny szyny ma zapewniać nie przekraczanie temperatur dopuszczalnych przy przepływie prądu zakłócenia sprowadzonego w obliczeniach do zastępczego prądu zwarcia T_k – sekundowego I_{th} [5].

$$s \geq \frac{I_{th} \sqrt{T_k}}{j_c} \quad (3)$$

gdzie:

- s – przekrój minimalny szyny [mm²]
- I_{th} – zastępczy prąd zwarcia T_k -sekundowy [A]
- T_k – czas trwania zwarcia [s]
- j_c – dopuszczalna gęstość prądu zwarcia jednofazowego [A·s^{1/2}/mm²]

W dalszej części określa się wytrzymałość dynamiczną szyny poprzez obliczenie możliwego naprężenia zginającego szyny płaskiej w założonym układzie (pionowym lub poziomym) [5].

$$\sigma_f = m_\sigma k_\sigma \frac{M}{Z} \quad (4)$$

gdzie:

- m_σ – współczynnik dynamiczny do obliczeń naprężeń w szynie drgającej sprężysto zależny od częstotliwości drgań własnych szyny
- k_σ – współczynnik uwzględniający zmianę rozkładu naprężeń w szynie, przy wystąpieniu stanu odkształcenia plastycznego szyny
- Z – wskaźnik wytrzymałości przewodu fazowego [m³]
- M – moment zginający szynę traktowaną jako belkę [Nm]

Ostatnim etapem jest wyznaczenie częstotliwości drgań własnych szyny [5, 6]:

$$v_0 = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \quad (5)$$

gdzie:

- l – długość przęsła [m]
- m – masa jednostkowa szyny [kg/m]
- J – moment bezwładności przekroju [m⁴]
- E – moduł Younga (dla miedzi $E_{Cu}=11,3 \cdot 10^{10}$ N/m²; dla aluminium $E_{Al}=7 \cdot 10^{10}$ N/m²)
- k – współczynnik zależny od sposobu podparcia szyny

Obowiązuje spełnienie warunku [6]:

$$v_0 \neq (90 \pm 15) \text{ Hz}$$

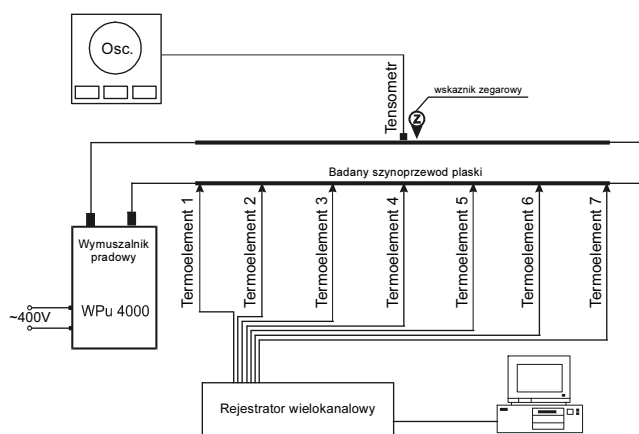
3. Opis stanowiska pomiarowego

W celu wykonania badań oddziaływań dynamicznych i cieplnych szynoprzewodów płaskich opracowano i wykonano stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawia rysunek 1. W skład stanowiska wchodzi: wymusznik prądowy WPU-4000 o prądzie ciągłym roboczym do 1kA, oraz prądach chwilowych od 1-2kA przez czas 1 min, od 2-3kA przez czas 30s oraz 3-4,1kA w maksymalnym czasie 15s. Wymusznik pozwala na dokładną automatyczną regulację prądu i utrzymanie zadanej wartości bez względu na zmianę rezystancji układu spowodowanej wzrostem temperatury. Urządzenie to jednocześnie pozwala na pomiar wartości prądu płynącego przez układ z dokładnością 0,2%. Zespół prądowy WPU-4000 pozwala na szybkie (max. 1s) zmiany prądu o rząd wielkości. Możliwe jest także samoczynne wyłączenie urządzenia

po zadanym czasie np. poprzez połączenie do styków pomocniczych wymusznika przekaźnika czasowego.

Drugim podstawowym elementem układu pomiarowego jest rejestrator wielokanałowy AGILENT 34970A, który umożliwia odczyt temperatury co 200ms w każdym z 16 punktów pomiarowych (jest to liczba maksymalna kanałów). Uzyskuje się dzięki temu dokładne krzywe nagrzewnia oraz rozkłady temperatur ustalonych na całym badanym odcinku szynoprzewodu.

W środku geometrycznym badanej szyny umieszczono tensometr, który po połączeniu do oscyloskopu umożliwia obserwację drgań badanego obiektu oraz pomiar częstotliwości tych drgań. Zastosowanie czujnika zegarowego daje możliwość odczytu maksymalnego ugięcia szynoprzewodu w jego środku geometrycznym a co za tym idzie obliczenie siły działającej na przewód.

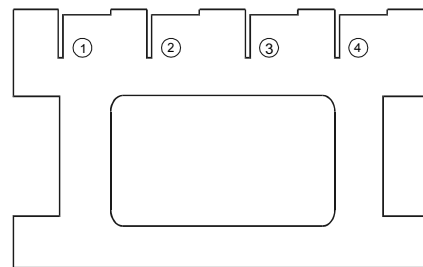


Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego

Fig. 1. Block diagram of the measuring system

Prezentowane stanowisko pomiarowe umożliwia w chwili obecnej badanie szynoprzewodów płaskich o przekroju 50x5 mm, w ułożeniu pionowym i płaskim pracy, przy płynnej regulacji podpór szyn w zakresie od 160 cm do 100 cm dla trzech odległości pomiędzy osiami szyn 30, 20, 10 cm. Zmiana parametrów geometrycznych stanowiska wiąże się jedynie z wykonaniem odpowiednich podpór (rys. 2). W pomiarach wykorzystano dwie szyny płaskie na których zainstalowano po 7 termopar typu K.

Wszystkie pomiary cieplne przewodu dokonywane są automatycznie i poprzez połączenie miernika z komputerem zapisywane w formie pliku tekstowego. Program AGILENT (dostarczony z miernikiem) pozwala na jednoczesną obserwację chwilowych przebiegów temperatur w wszystkich kanałach miernika oraz zmianę ustawień rejestratora.



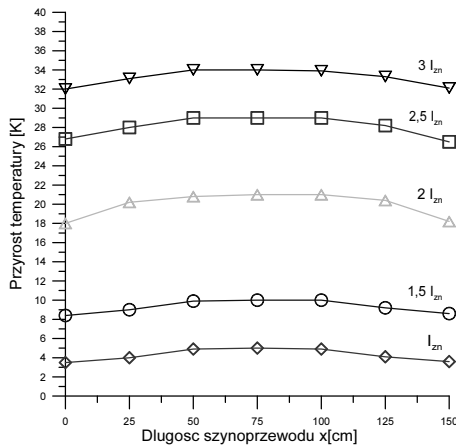
Rys. 2. Widok podpory szyny max. odległość 30 cm (punkty 1-4), odległość 20 cm (punkty 1-3), min odległość 10 cm (punkty 1-2)

Fig. 2. View of a busbar support, max. distance of 30cm (points 1-4), distance of 20cm (points 1-3), min. distance of 10cm (points 1-2)

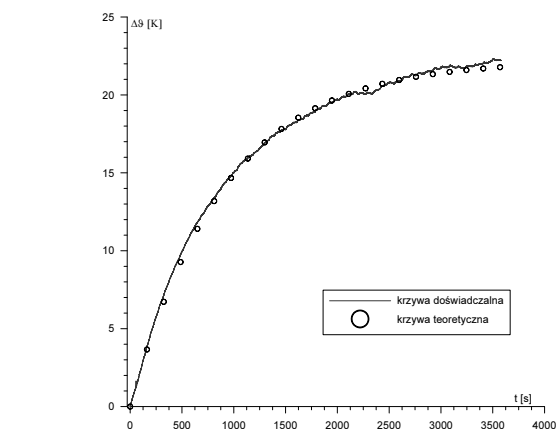
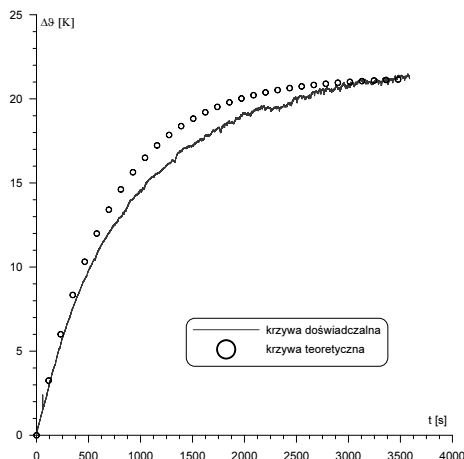
W prezentowanym schemacie (rys. 1) istnieje również możliwość takiego połączenia szyn aby prąd w obydwu płynął w tym samym kierunku.

4. Przykładowe krzywe nagrzewania

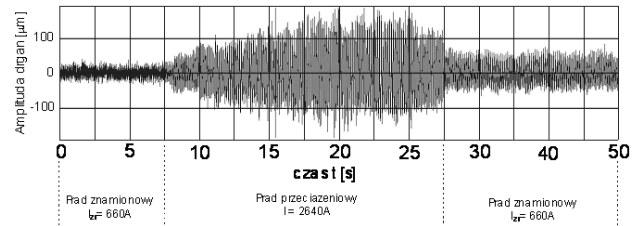
Na poniższych wykresach przedstawiono kilka przykładowych krzywych nagrzewania uzyskanych w wyniku badań na prezentowanym stanowisku pomiarowym.



Rys. 3. Rozkład przyrostów temperatur dla wybranych prądów obciążenia szyny miedzianej płaskiej o przekroju 50x5 mm, w ułożeniu pionowym dla odległości pomiędzy podporami 160 cm, po czasie nagrzewania 2,5 minuty
Fig. 3. Distribution of temperature increments for selected load currents of a vertically situated flat copper busbar of the 50x5mm cross-section area, for the inter-support distance of 160cm, after the performed 2.5-minute annealing

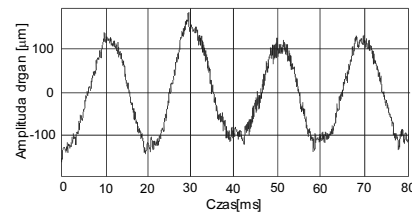


Rys. 4. Krzywe przyrostów temperatur ustalonych przy przepływie prądu znamionowego dla przewodu szynowego miedzianego płaskiego o przekroju 50x5 mm w ułożeniu pionowym uzyskane na drodze doświadczeń i teoretycznych obliczeń: a) dla zestyku, b) dla środka geometrycznego szyny
Fig. 4. Temperature increments determined at the nominal current flow for a vertically situated flat copper busbar of the 50x5mm cross-section area, obtained experimentally and from theoretical calculations for: a) a contact, b) geometric center of the busbar



Rys. 5. Przykład oddziaływań elektrodynamicznych na szynę miedzianą w układzie pionowym przy odległości pomiędzy osiami szyn 10 cm i podporami 1m, przy przepływie prądu przeciążeniowego równego 4-krotności prądu znamionowego I_{zn}=660A (I=2640A)

Fig. 5. Example of electrodynamic actions on a vertically situated copper busbar, at the distance between the busbar axes of 10cm and between the supports of 1m for the flow of the overload current 4 times greater than the nominal one I_{zn} = 660A (I=2640A)



Rys. 6. Przykład oddziaływań elektrodynamicznych dla przypadku z rys. 5 (w powiększeniu)

Fig. 6. Example of the electrodynamic processes for the case of Fig. 5 (enlarged)

Krzywe teoretyczne nagrzewania zamieszczone na rys. 4, uzyskano poprzez wyznaczenie stałej czasowej nagrzewania z zależności [3]:

$$\tau_n = \frac{t}{\ln \frac{g_{\max} - g(t, I)}{g_{\max} - g_0}} \quad (6)$$

Następnie na jej podstawie obliczono i wykreślono teoretyczne krzywe nagrzewania.

Z rysunku 6 wynika, że częstotliwość drgań szyny wynosi 50 Hz.

5. Wnioski

Opracowane i zbudowane w Katedrze Urządzeń Elektrycznych i TWN stanowisko pomiarowe prezentowane w artykule umożliwia badania cieplne szynoprzewodów płaskich przy przepływie prądów roboczych i przeciążeniowych. W wyniku pomiarów istnieje możliwość określenia rozkładu temperatur ustalonych na całej długości przewodu oraz krzywych nagrzewania w wybranych punktach układu. W części oddziaływań dynamicznych w przedstawionym układzie pomiarowym istnieje możliwość pomiaru ugięcia szyni związane z tym obliczenie siły i momentu zginającego oraz poprzez zastosowanie tensometru obserwację drgań szynoprzewodu w momencie przepływu prądu zakłócenie-owego oraz odczyt częstotliwości tych drgań.

6. Literatura

- [1] Dubicki B: Maszyny elektryczne Podręcznik Inżyniera Elektryka t.I Trzaska. Evert. Michalski. Warszawa 1947
- [2] Д. А. Герасимович, Ю. А. Клилович, М. А. Мишина, Г. Г. Ежеников: „Расчет нагрева плоских контактных соединений в установившихся и переходных режимах на основе одномерной модели температурного поля” ЭНЕРГЕТИКА nr. 5, Минск, 2003
- [3] А. А. Чунихин: „Электрические аппараты”, Москва, Энергоатомиздат, 1988
- [4] Hering M. „Termokinytyka dla elektryków” Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980
- [5] G. Bartodziej, J. Bucholc: „Sieci elektroenergetyczne w zakładach przemysłowych” Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1990
- [6] PN-90/E-05025 „Obliczanie skutków prądów zwarciovych”