

## Analiza wpływu elementów toru zasilania zgrzewarki rezystancyjnej na parametry procesu zgrzewania

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wpływ parametrów toru zasilania zgrzewarki rezystancyjnej na parametry wyjściowe procesu zgrzewania rezystancyjnego punktowego, to jest w szczególności średnicę uzyskiwanego jądra zgrzeiny. W zależności od rodzaju zgrzewarki struktura toru zasilania elektrod zawiera różne elementy, wpływające pośrednio na proces. Najczęściej są to przewody i szyny doprowadzające prąd oraz różnego rodzaju przekształtniki energoelektroniczne. W artykule wykazano w jaki sposób każdy z tych elementów wpływa na parametry procesu zgrzewania.

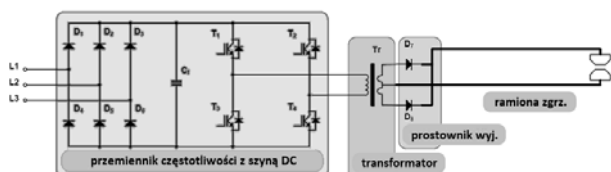
**Abstract.** The influence of components of the supplying path in resistance welding machine on parameters of welding process, particularly diameter of welding nugget is presented in the paper. Depending on type of welding machine the supplying path includes different types of conductors and wires and power electronic converters. Analysis presented in the paper reports influence of these elements on parameters of welding process. (Analysis of influence of components in supplying path of resistance welding machine on parameters of welding process).

**Słowa kluczowe:** zgrzewanie rezystancyjne, straty mocy, przekształtniki wysokoprądowe, parametry zastępcze obwodu.

**Keywords:** resistance spot welding, power losses, high current power electronic converters, equivalent circuit parameters.

### Wstęp

Zgrzewanie rezystancyjne jest procesem technologicznym o bardzo szerokiej gamie zastosowań przemysłowych. Dominuje tu przemysł motoryzacyjny, głównie w zakresie zgrzewania blach karoserii oraz zgrzewania drobnych elementów instalacji elektrycznej (np. wiązek przewodów). Zgrzewanie rezystancyjne operuje w zakresie prądów roboczych w zakresie od pojedynczych do dziesiątek kiloamperów w zależności od rodzaju i grubości zgrzewanego materiału. Do uzyskania takich wartości prądu stosowane są odpowiednio skonstruowane transformatory wyjściowe. Konstrukcja transformatora zależna jest od sposobu przetwarzania prądu w zgrzewarce. Zasadniczo stosowane są dwa typy rozwiązań: zgrzewanie prądem przemiennym (AC), gdzie stosuje się sterowanie poprzez regulatory tyrystorowe (jest to technologia starsza), i zgrzewanie prądem stałym (DC), gdzie w torze przetwarzania prądu w zgrzewarce znajduje się przemiennik częstotliwości, transformator i prostownik wyjściowy. To rozwiązanie jest młodsze technologicznie i pozwala na przetwarzanie prądu z podwyższoną częstotliwością (zwykle 1 kHz lub 10 kHz), a tym samym redukcję gabarytów transformatora podwyższającego prąd wyjściowy [1]. Strukturę zasilania zgrzewarki rezystancyjnej prądu stałego przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys.1. Struktura zasilania toru zgrzewarki rezystancyjnej prądu stałego z przekształtnikiem inwertorowym i prostownikiem

Uzyskanie zgrzeiny punktowej o określonej (oczekiwanej) średnicy wymaga zapewnienia dość precyzyjnie określonych warunków zgrzewania determinowanych przez trzy podstawowe parametry: prąd zgrzewania, czas i siłę docisku elektrod [2]. Wartość prądu i czas jego przepływu są sterowane wspólnie przez tor zasilania zgrzewarki, natomiast siła docisku jest wielkością sterowaną niezależnie od dwóch pierwszych. Ponieważ czas zgrzewania jest najczęściej zadawany do danego procesu jako wielkość stała, to faktyczne sterowanie procesem zgrzewania odbywa się poprzez wartość prądu

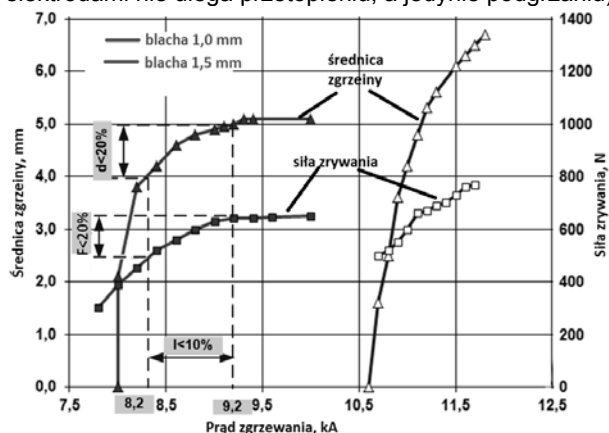
zgrzewania. Złożoność toru prądowego zasilania zgrzewarki jest jednak na tyle znaczna, że istnieje wiele czynników mogących wpływać na faktycznie uzyskiwaną wartość prądu płynącego przez elektrody. W niniejszym artykule omówione zostały podstawowe procesy i zjawiska mogące wpływać na końcową wartość prądu zgrzewania, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu przekształtników energoelektronicznych znajdujących się w torze przetwarzania prądu. Wskazane zostały również przyczyny uzyskiwania niewłaściwego kształtu prądu zgrzewania (w szczególności zbyt powolne narastanie i opadanie prądu).

### Wpływ wartości prądu na średnicę zgrzeiny

Uzyskanie właściwej wytrzymałości złącza zgrzewanego wymaga uzyskania zgrzeiny o odpowiedniej średnicy [3]. Średnica ta jest ograniczona zarówno co do wartości minimalnej, jak i maksymalnej. Średnica minimalna odpowiada oczywiście sile zrywania złącza, natomiast średnicę maksymalną ogranicza zjawisko ekspulsji. Jeżeli dojdzie do przekroczenia średnicy złącza w postaci płynnego metalu w przestrzeni pomiędzy elektrodami, ciśnienie wewnątrz tej struktury może doprowadzić do przerwania ścianki materiału otaczającego złącze i tym samym spowodować ekspulsję ciekłego metalu na zewnątrz. Średnica zgrzeiny jest więc parametrem o bardzo wąskim zakresie tolerancji, a jej wielkość regulowana jest najczęściej poprzez amplitudę prądu zgrzewania.

Zadany prąd na skutek różnych, opisanych w dalszej części artykułu czynników, może ulec obniżeniu. Przeprowadzone eksperymentalnie badania wskazują, że nawet niewielkie kilkuprocentowe obniżenie wartości prądu zgrzewania prowadzi do znacznego zmniejszenia średnicy zgrzeiny (poniżej jej minimalnej wartości), a często nawet do całkowitego jej zaniku. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla zgrzewania dwóch blach ze stali DX53 o różnych grubościach, odpowiednio 2x1 mm oraz 2x1,5 mm. Badania średnicy jądra zgrzeiny oraz siły zrywającej przeprowadzono zgrzewając blachy różnymi wartościami prądu. Przedstawiona na rysunku 2 analiza wskazuje, że obniżenie prądu o około 10% (z wartości 9,2 kA do 8,2 kA) powoduje dla blach o grubości 1 mm obniżenie uzyskanego jądra zgrzeiny o 20% (z 5 mm do 4 mm) oraz podobne zmniejszenie siły zrywającej o około 20% (z 640 N do 500 N). Jednocześnie można zaobserwować, że dalsze niewielkie zmniejszanie prądu zgrzewania (do około 8,0 kA)

przewodzi do całkowitego zaniku zgrzeiny (materiał między elektrodami nie ulega przetopieniu, a jedynie podgrzaniu).



Rys.2. Badania zależności jądra zgrzeiny i siły zrywającej od prądu zgrzewania dla blach DX53 o różnych średnicach

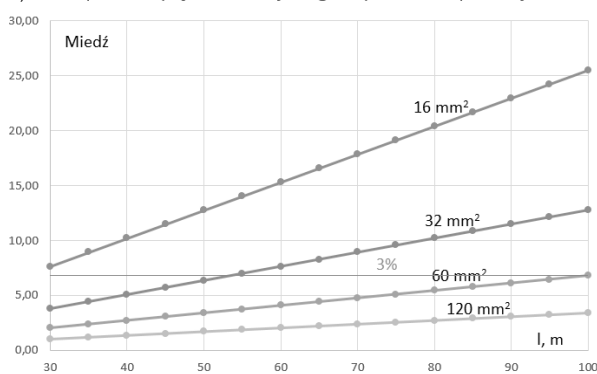
Uzyskanie prawidłowej co do wytrzymałości (a zatem i średnicy) zgrzeiny wymaga zapewnienia właściwego co do wartości prądu zgrzewania. Obniżenie, nawet niewielkie tego prądu, może prowadzić do osłabienia, a w skrajnych przypadkach nawet zaniku, wytwarzanego złącza zgrzewanego. Należy zatem zapewnić, aby rzeczywisty prąd zgrzewania miał taką wartość, jak nastawiona. Dotyczy to w szczególności układów ze sterowaniem otwartym, gdzie w trakcie zgrzewania nie jest prowadzony pomiar prądu. Zapewnienie właściwej wartości prądu wymaga uwzględnienia w procesie projektowania układu zasilania, jak i podczas jego eksploatacji, spadków napięcia jakie mogą wystąpić w torze zasilania (zgrzewanie odbywa się prądem, który jest w zgrzewarce sterowany napięciem).

### Spadki rezystancyjne napięcia wzdłuż toru zasilania

Zgrzewarki pracujące w zakładach przemysłowych zasilane są najczęściej z sieci 3x400/230 V, napięciem trójfazowym lub w przypadku zgrzewarek jednofazowych napięciem międzyprzewodowym 400 V lub fazowym 230 V. Mimo, że obwód prądu zgrzewania zawiera transformator podwyższający prąd, ulokowany tuż przed ramionami zgrzewarki, to również prąd pierwotny pobierany z sieci ma na tyle znaczącą wartość, że jest źródłem powstawania znacznych spadków napięcia wzdłuż przewodów zasilających. Spadki te zależne są od długości i przekroju przewodów zasilających, wartości prądu obciążenia i temperatury pracy. Przy projektowaniu instalacji zakłada się najczęściej, że takie spadki nie przekroczą 3% wartości napięcia znamionowego [4]. Konieczne jest jednak sprawdzenie w danym układzie połączeń i przy uwzględnieniu faktycznej temperatury pracy przewodów, jak duży będzie wpływ spadków napięcia zasilającego na prąd zgrzewania. Znaczenie tego wpływu można przeanalizować na przykładzie konkretnej instalacji. Analizę taką przedstawiono poniżej.

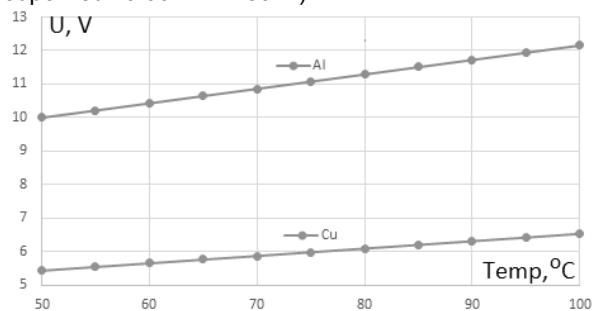
W zależności od obciążenia (zakresu prądu zgrzewania i liczby zgrzewarek dołączonych do tej samej sieci), przewody doprowadzające mają żyły o przekrojach od 16 do 120 mm<sup>2</sup>. Długość tych przewodów to najczęściej od 15 do 50 m (co w układach jednofazowych oznacza łączną długość żył od 30 do 100 m). Dla zgrzewarek o prądzie zgrzewania rzędu 10 kA i przekładni transformatora 50:1 prąd pobierany z sieci wynosi 200 A. Przyjmując takie zakresy, jak opisano powyżej wyznaczono spadki napięcia wzdłuż przewodów (przy temperaturze pokojowej). Charakterystyki dla przewodów miedzianych zamieszczono na rysunku 3. Zaznaczono również poziom dopuszczalnego spadku napięcia o wartości 3% dla zasilania z sieci 230 V.

U, V Spadek napięcia w funkcji długości przewodu i przekroju



Rys.3. Spadek napięcia wzdłuż przewodów zasilających zgrzewarkę pobierającą z sieci prąd 200 A<sub>(RMS)</sub>.

Przedstawione na rysunku 3 charakterystyki wskazują, że dla utrzymania dopuszczalnego spadku napięcia wzdłuż przewodów konieczne jest wzajemne balansowanie pomiędzy długością doprowadzenia, a przekrojem przewodu. Dotyczy to w szczególności instalacji o charakterze uniwersalnym, gdzie odbiorniki mogą być wymieniane na większe lub mogą być dołączane kolejne urządzenia. Należy również pamiętać, że przedstawione dane dotyczą pracy przewodu w temperaturze pokojowej. Bardzo często warunki pracy są mniej korzystne (czy to ze względu na obciążenie, czy też warunki klimatyczne panujące w pomieszczeniu). Materiały używane powszechnie na doprowadzenia mają liniową zależność temperatury [5]. Na rysunku 4 zamieszczono wpływ zmiany temperatury na spadek napięcia wzdłuż przewodu miedzianego i aluminiowego (przekrój i długość wyniosły odpowiednio 60 mm<sup>2</sup> i 80 m).



Rys.4. Spadek napięcia wzdłuż przewodów zasilających dla różnych temperatur pracy przewodu o s=60 mm<sup>2</sup> oraz l=80 m.

Przyrost spadku napięcia zależny jest od wartości współczynnika temperaturowego materiału. Analiza z rysunku 4 wskazuje, że dla stałej wartości prądu pobieranego przez układ w trakcie zgrzewania dwukrotny wzrost temperatury przewodu skutkuje wzrostem spadku napięcia o około 20%. Przyczyną wzrostu temperatury przy stałym prądzie zgrzewania mogą być nie tylko warunki środowiskowe w jakich znajduje się przewód, ale również wzrost częstotliwości wykonywanych zgrzein. Konieczne jest zatem dobieranie parametrów instalacji z uwzględnieniem parametrów termicznych.

Przedstawiona powyżej analiza wskazuje, że nieprawidłowo dobrana pod względem przewodów doprowadzających instalacja zasilająca zgrzewarki może być przyczyną obniżenia wartości prądu zgrzewania, a tym samym pogorszenia jakości uzyskiwanych zgrzein. Przyczyną tego pogorszenia może być również temperatura wynikająca z większej częstotliwości wykonywania zgrzein.

## Wpływ komutacji w prostownikach

Opisane w poprzednim rozdziale zjawiska zachodzą we wszystkich typach zgrzewarek rezystancyjnych. Jeżeli zgrzewanie rezystancyjne prowadzone jest na zgrzewarce DC z falownikiem, należy mieć na uwadze dodatkowe spadki napięcia związane z komutacją w prostownikach. W strukturze takiej zgrzewarki występują dwa prostowniki widoczne na schemacie z rysunku 1, mianowicie prostownik w przemienniku częstotliwości oraz prostownik wyjściowy (wysokoprądowy). W obydwu przypadkach prostowniki mogą być źródłem zarówno strat mocy (głównie ze względu na napięcie progowe zaworów), jak i komutacyjnego spadku napięcia [6]. Spadek napięcia  $U_K$  wynikający z komutacji opisany jest zależnością (1), gdzie  $q$  jest liczbą pulsów, a  $L_s$  indukcyjnością sieci zasilającej.

$$(1) \quad U_K = \frac{q}{2\pi} \omega L_s I_0 = R_K I_0$$

W przypadku prostownika wejściowego spadek napięcia na diodach jest mniej istotny ze względu na znaczną wartość napięcia zasilającego. Wpływ spadku komutacyjnego zależy od wartości pobieranego prądu  $I_0$  oraz od reaktancji (indukcyjności  $L_s$ ) widzianej od strony zasilania prostownika. Na indukcyjność po stronie zasilania prostownika wpływa głównie indukcyjność dławików zwarciovych (lub innych elementów indukcyjnych włączanych w obwód ze względu na jakość energii) oraz indukcyjność transformatora zasilającego zgrzewarkę. Indukcyjność tę można wyznaczyć na podstawie mocy znamionowej transformatora  $S_N$  i jego napięcia zwarcia  $u_{z\%}$  poprzez zależność (2).

$$(2) \quad X_T = \omega L_T \approx Z_T = u_{z\%} \frac{U_S^2}{S_N}$$

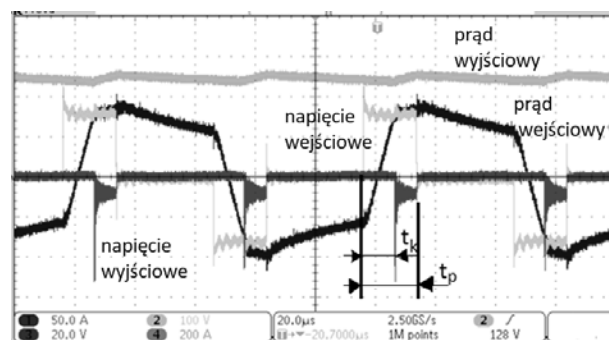
Analizując spadki napięć związane z komutacją w prostowniku wejściowym należy mieć na uwadze, że prąd pobierany z sieci jest dość duży (nawet rzędu 200 A), a indukcyjności w obwodzie doprowadzającym mogą mieć wartości w szerokim zakresie sięgającym od niemal zera do ułamków milihenra. Stąd spadek napięcia pojawiający się na wyjściu prostownika może być dość znaczny. Jeżeli indukcyjność wejściowa miałaby wartość 0,5 mH to przy prądzie wejściowym 200 A komutacyjny spadek napięcia wyniesie około 30 V, co stanowi wartość około 10% wartości napięcia zasilającego.

Drugim prostownikiem w układzie zgrzewarki DC jest prostownik wyjściowy. Ze względu na straty mocy związane z napięciem progowym (prostownik przewodzi prąd rzędu kiloamperów, co generuje olbrzymie, liczone w kilowatach, straty mocy) w zgrzewarkach stosuje się prostowniki dwupulsowe jednokierunkowe zasilane z transformatora z uzwojeniem wtórnym dzielonym. Indukcyjność takiego transformatora, jako elementu znajdującego się bezpośrednio przed prostownikiem jest wielokrotnie mniejsza względem indukcyjności wejściowej prostownika w przemienniku częstotliwości i przyjmuje rząd kilkunastu do kilkuset nanohenrów. Na wartość komutacyjnego spadku napięcia będzie wpływać jednak znacząco wartość prądu wyjściowego (rzędu kiloamperów) i częstotliwość przełączania (zazwyczaj 1 kHz, czasami więcej). Przykładowo, jeżeli indukcyjność transformatora wynosi 100 nH, to przy prądzie wyjściowym 10 kA komutacyjny spadek napięcia wyniesie około 2 V. Przy napięciu wyjściowym rzędu 8 V jakże w tych warunkach zasila elektrody spadek komutacyjny stanowi około 25% wartości.

Przedstawiona w niniejszym rozdziale analiza wskazuje, że spadki napięcia wynikające z komutacji w prostownikach mogą w istotny sposób wpływać na pracę zgrzewarki obniżając napięcia na poszczególnych blokach przekształcania nawet o 10-20%. Dla zapewnienia właściwego prądu zgrzewania konieczne jest zatem uwzględnienie tych spadków napięcia w procesie projektowania toru zasilania zgrzewarki. Dodatkowo, mając na uwadze fakt, że zgrzewarki najczęściej pracują w otwartej pętli sterowania (podczas zgrzewania prąd wyjściowy nie jest mierzony) analiza wpływu spadków komutacyjnych powinna być prowadzona również po zmianie parametrów pracy zgrzewarki (zmianie zakresu prądu zgrzewania czy zmianie sieci zasilającej zgrzewarkę).

## Wpływ indukcyjności rozproszenia transformatora

Uzyskanie właściwej wartości prądu zgrzewania nie jest zdeterminowane wyłącznie spadkami napięcia wzdłuż obwodu. Wartość prądu wyjściowego jest w zgrzewarce sterowana poprzez współczynnik wypełnienia falownika w przemienniku częstotliwości. Dostępny zakres czasu sterowania  $t_p$  jest jednak ograniczany przez czas narastania prądu  $t_k$ , widoczny na przebiegach na rysunku 5. Czas ten jest bezpośrednio zależny od indukcyjności rozproszenia transformatora wysokoprądowego. Jednocześnie dostępny będzie tym krótszy im wyższa będzie częstotliwość przełączania zaworów. Jeżeli indukcyjność rozproszenia transformatora będzie znaczna to w skrajnym przypadku sterowanie w ogóle może być niedostępne, a przez to nie będzie możliwa regulacja prądu zgrzewania (sterowanie falownikiem jest jedną z najprostszych metod na eliminowanie niekorzystnego wpływu spadków napięcia wzdłuż toru zasilania zgrzewarki).

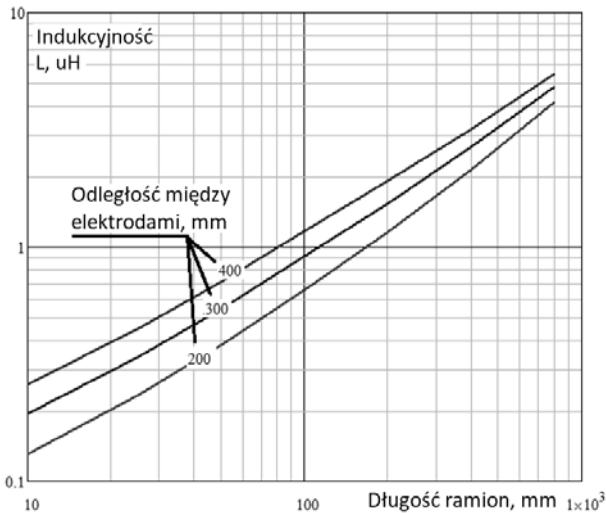


Rys.5. Przebiegi napięcia i prądu na bloku transformator-prostownik w zgrzewarce prądu stałego .

## Wpływ indukcyjności ramion zgrzewarki

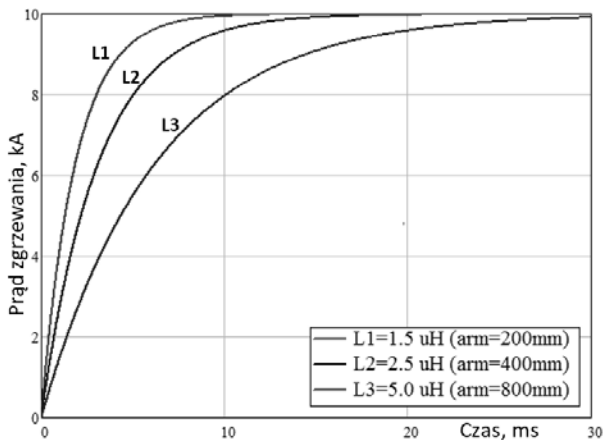
W zgrzewarkach z prądem DC na wyjściu kształt i wielkość ramion nie powinna mieć wpływu na proces zgrzewania (z wyjątkiem rezystancji doprowadzenia, która powinna być uwzględniona w doborze napięcia wyjściowego, zapewniającego właściwy prąd zgrzewania). Długość ramion doprowadzających jest najczęściej wymuszona przez kształt obiektu zgrzewanego (przykładem może być karoseria pojazdu). Konieczność minimalizacji długości doprowadzeń wynika nie tylko z powstających w nich strat mocy (które mogą być redukowane poprzez zwiększenie przekroju poprzecznego ramion), ale również ze względu na indukcyjność pętli prądowej, jaką tworzą ramiona wraz z elektrodami. Indukcyjność ta powoduje ograniczenie stromości narastania prądu zgrzewania, przez co w początkowej fazie procesu prąd ma niższą wartość od oczekiwanej [7].

Na rysunku 6 przedstawiono charakterystykę zmian indukcyjności jaką tworzą ramiona zgrzewarki o określonej długości oddalone od siebie o długość elektrod.



Rys.6. Indukcyjność pętli prądu wyjściowego w zgrzewarce jako funkcja długości ramion i długości elektrod jako parametru.

Indukcyjności tworzone w pętli ramion wraz z elektrodami mają wartości rzędu mikrohenrów. Dla obwodu prądu stałego są to wielkości pomijalnie małe. Mając jednak na uwadze, wartości prądu jakie przepływają podczas zgrzewania nawet tak małe indukcyjności powodują znaczne opóźnienie narastania prądu. Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi narastania prądu dla różnych wartości indukcyjności (odpowiadających różnym długościom ramion). Z charakterystyki wynika, że czas narastania prądu to od 10 do nawet 30 ms. Zakładając, że proces zgrzewania trwa około 200 ms, stan przejściowy stanowi około 10% całości procesu.



Rys.7. Przebiegi prądu zgrzewania po załączeniu obwodu dla różnych indukcyjności pętli prądu.

Opisane powyżej zjawisko jest niezwykle istotne i niekorzystne ze względów technologicznych. Przepływ prądu o mniejszej wartości niż zakładano w pierwszej fazie procesu może prowadzić nie tylko do uzyskania mniejszej średnicy zgrzeiny, ale także do innych niekorzystnych zjawisk wpływających na jakość procesu. Również wyłączenie prądu zgrzewania nie odbywa się w sposób natychmiastowy, przez co może dochodzić do wystąpienia ekspulsji ciekłego metalu i zniszczenia zgrzeiny. Zjawisko to jest jednak bardzo trudne do eliminacji, a jedyną metodą jego ograniczania jest minimalizacja pętli prądu czyli długości ramion i elektrod.

## Podsumowanie i wnioski końcowe

Przedstawiona w artykule analiza poświęcona została wpływowi elementów toru zasilania zgrzewarek rezystancyjnych na jakość zgrzeiny. Omówiono kilka najistotniejszych czynników wpływających na proces doprowadzania prądu, które często są zanedbywane w procesie analizy i doboru toru prądowego zgrzewarki, a mianowicie spadki rezystancyjne na doprowadzeniach, spadki komutacyjne w prostownikach oraz indukcyjności – rozproszenia transformatora oraz pętli ramion i elektrod. Na podstawie przeprowadzonej analizy możliwe jest wyciągnięcie następujących wniosków szczegółowych:

- Przewody doprowadzające do zgrzewarek projektowane są standardowo na spadki napięcia nieprzekraczające 3% napięcia znamionowego. Warunek ten może być jednak łatwo przekroczony poprzez urządzenia na inne pobierające większy prąd, połączenie równoległe większej liczby zgrzewarek lub rozbudowę sieci wywołującą zwiększenie długości doprowadzeń.
- Wzrost spadku napięcia wzdłuż przewodów zasilających może być wywołany również wzrostem temperatury. Dla danych warunków termicznych pracy przewodu przyrost temperatury może wynikać głównie ze zwiększenia częstotliwości wykonywania zgrzein.
- Komutacyjne spadki napięcia są zjawiskiem o względnie stałym wpływie na napięcie wyjściowe (zależne od prądu wyjściowego prostownika i indukcyjności od strony zasilania). Ze względu na znaczny prąd przepływający przez zgrzewarkę konieczne jest jednak ich uwzględnienie w procesie projektowania toru zasilania.
- Indukcyjności występujące w torze zasilania zgrzewarki są przyczyną wydłużenia czasu narastania prądu co jest zjawiskiem niekorzystnym ze względu na proces sterowania zgrzewarki.

**Autorzy:** dr hab. inż. Mariusz Stępień, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Mariusz.Stepien@polsl.pl; dr hab. inż. Zygmunt Mikno, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Spawalnictwa, ul. Bł. Czesława 16-18, 44-100 Gliwice, E-mail: Zygmunt.Mikno@is.gliwice.pl; dr hab. inż. Bogusław Grzesik, prof. PŚ, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: boguslaw.grzesik@polsl.pl

## LITERATURA

- [1] Mikno Z., Biskup T., Stępień M. [red.], 2018, Innowacyjne rozwiązania wysokosprawnych zgrzewarek rezystancyjnych prądu stałego, Monografia z realizacji projektu INWELD, projekt nr PBS3/B4/12/2015 (NCBiR), ISBN 978-83-61272-73-1, Instytut Spawalnictwa, s. 1-244.
- [2] Poradnik Inżyniera, Spawalnictwo tom 1 WNT Warszawa 1983.
- [3] Papkała H., Resistance welding of metals. Publishing House KaBe Krosno, 2003.
- [4] Nowakowski P., Zasady doboru przewodów, Elektronika, listopad 2009, <http://www.elektroonline.pl/a/773,Zasady-doboru-przewodow>
- [5] IS Rayfast Ltd. Product Data. <https://www.is-rayfast.com/news/wire-cable/temperature-rise-by-current/>, dostęp 31.07.2019.
- [6] Grzesik B., Teoria przekształtników statycznych, monografia. Gliwice 1987.
- [7] Stępień M., Mikno Z., Grzesik B., Badania symulacyjne obwodu wtórnego zgrzewarki, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2017 R. 61 nr 5, s. 34-37.