

# Obwód wyjściowy wzmacniacza transkonduktancyjnego dużej mocy

High power transconductance amplifier circuit

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono strukturę i podstawowe elementy składowe precyzyjnego wzmacniacza transkonduktancyjnego dużej mocy ze szczególnym uwzględnieniem wpływu obwodu wyjściowego na charakterystyki częstotliwościowe jego impedancji wyjściowej oraz transimpedancji. Zaprezentowano szczegóły technologiczne połączeń pomiędzy wyjściami modułów przetworników napięcia na prąd i gniazdami wyjściowymi oraz konstrukcję zespołu gniazda wyjściowego na zakresach 20 A oraz 100 A.

**Abstract.** The article presents the structure and basic components of a high-power precision transconductance amplifier with particular emphasis on the effect of the output circuit on the frequency characteristics of its output impedance and transimpedance. The technological details of the connections between the outputs of voltage-to-current converter modules and the output connectors as well as the design of the output connector assembly for the 20 A and 100 A ranges are presented.

**Słowa kluczowe:** wzmacniacz transkonduktancyjny, boczniki prądowe, wzorcowanie boczników prądowych, wzorce prądu przemiennego  
**Keywords:** transconductance amplifier, current shunts, current shunt calibration, standards of AC current

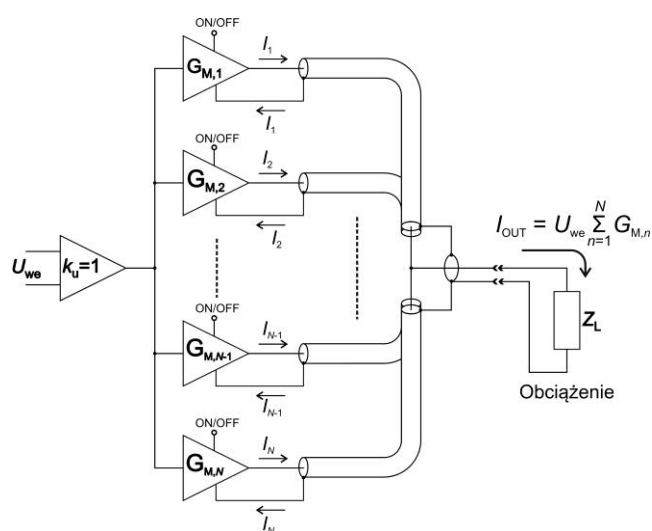
## Wprowadzenie

Wzmacniacz transkonduktancyjny (ang. *transconductance amplifier*, TA) jest urządzeniem służącym do przetwarzania napięcia stałego lub przemiennego na proporcjonalny prąd stały lub przemienny. Wzmacniacze transkonduktancyjne są przydatne do kalibracji i testowania przyrządów pomiarowych oraz badania innych urządzeń, wymagających stabilnego źródła prądu [1]. Najczęściej wykorzystywane są w badaniach i wzorcowaniu boczników prądu stałego i przemiennego, przekładników prądowych, badaniach materiałów magnetycznych, czy prądowym transferze AC-DC. Komercyjnie dostępne precyzyjne wzmacniacze transkonduktancyjne, zwłaszcza wytwarzające prąd o wartości sięgającej 100 A, są kosztowne [2], [3], [4], dlatego w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki (KMEiA) Politechniki Śląskiej podjęto decyzję o opracowaniu i zbudowaniu precyzyjnego wielozakresowego wzmacniacza transkonduktancyjnego, umożliwiającego wytwarzanie prądu stałego o wartości od ułamka miliampera do 100 A oraz prądu przemiennego o identycznym przedziale wartości skutecznej wytwarzanego prądu przemiennego w paśmie częstotliwości od około 10 Hz do co najmniej 100 kHz.

## Struktura wzmacniacza transkonduktancyjnego

Podstawowym elementem składowy wzmacniacza transkonduktancyjnego jest przetwornik (konwerter) napięcia na prąd (U/I). W prototypie urządzenia budowanego w KMEiA zastosowanych jest kilka rodzajów przetworników U/I, różniących się maksymalną wartością szczytową prądu wyjściowego. Na zakresie 2 A, dla prądów wyjściowych o wartości szczytowej z przedziału od około 0,5 A do około 8 A stosowany jest pojedynczy przetwornik U/I, którego wyjście jest połączone kablem o małej indukcyjności z gniazdem wyjściowym typu N. Na wyższych zakresach (20 A oraz 100 A) stosowana jest określona liczba  $N$  przetworników U/I, których wyjścia są łączone równolegle i połączone z gniazdem koncentrycznym typu LC, charakteryzującym się odpowiednio dużym prądem znamionowym. Strukturę układu stosowanego na zakresach 20 A oraz 100 A przedstawiono na rysunku 1. Na zakresie 20 A aktywowanych jest  $N = 10$ , a na zakresie 100 A  $N = 19$  identycznych przetworników U/I. Struktura jest wzorowana na układzie opisanym w [5]. Przetworniki są

włączane i wyłączane sygnałem cyfrowym przez sterownik mikroprocesorowy.

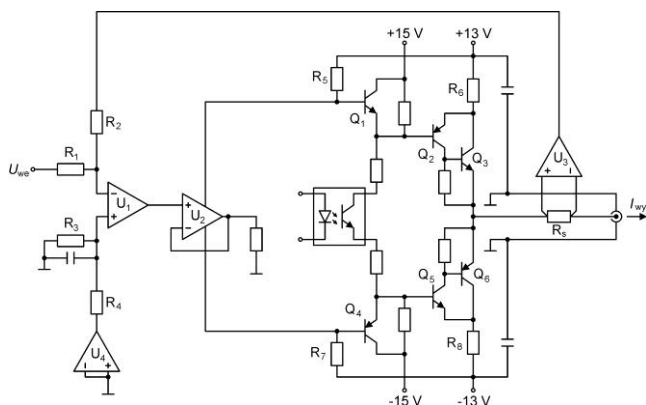


Rys. 1. Struktura wzmacniacza transkonduktancyjnego na zakresach 20 A oraz 100 A

Napięcie wejściowe przetworników jest uzyskiwane na wyjściu szerokopasmowego precyzyjnego wtórnika napięciowego o małej impedancji wyjściowej, a następnie podawane na wejścia 20 przetworników U/I za pomocą współosiowych kabli oraz złączy SMB. Zapewnia to małe oddziaływanie prądu wyjściowego na układy wejściowe przetworników U/I. Struktura układu przedstawionego na rysunku 1 ma dodatkowe zalety. Całkowita moc wydzielana w tranzystorach wyjściowych przetworników U/I, rzędu 60 W na moduł przetwornika, jest równomiernie rozłożona między poszczególne moduły, co ułatwia odprowadzenie ciepła do radiatora, a następnie do otoczenia. Do stabilizacji całkowitego prądu wyjściowego nie jest wymagany pojedynczy bocznik o niskiej rezystancji lecz określona liczba  $N$  boczników o rezystancji  $0,1 \Omega$  każdy, stanowiących elementy składowe przetworników U/I.

## Moduł przetwornika napięcia na prąd

Schemat przetwornika U/I, stosowanego na zakresie 2 A, przedstawiono na rysunku 2 [5], [6]. Na wejściu przetwornika znajduje się wzmacniacz różnicowy, wykorzystujący szerokopasmowy precyzyjny wzmacniacz operacyjny  $U_1$  oraz zestaw stabilnych rezystorów. Sygnał z wyjścia układu  $U_1$  podawany jest na wejście wzmacniacza  $U_2$  o wzmacnieniu napięciowym równym 0,1. Od dwóch wyjść tego stopnia układ dzieli się na dwie połowy, z których jedna (na rysunku 2 górna), odpowiedzialna jest za przetwarzanie sygnałów o polaryzacji dodatniej, a druga (na rysunku 2 dolna), przetwarza sygnały o polaryzacji ujemnej.



Rys. 2. Uproszczony schemat układu konwertera U/I

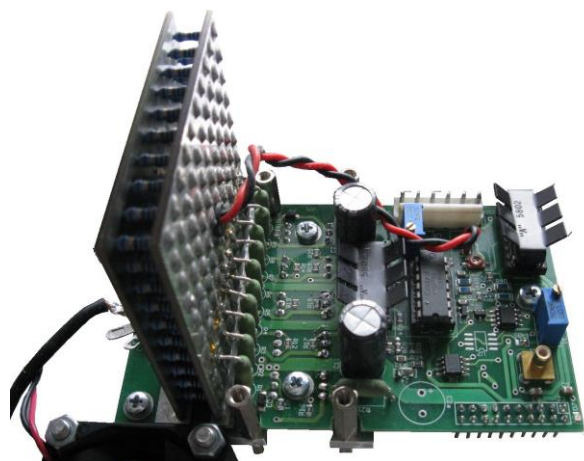
Kolejny podukład z tranzystorami  $Q_1$  i  $Q_4$  pełni potrójną rolę: układu odwracającego fazę, układu nastawy prądu spoczynkowego oraz elementu składowego zwierciadła prądowego, multiplikującego prąd płynący przez rezystor  $R_5$  ( $R_7$ ) ze współczynnikiem wzmacnienia równym 50. Ponadto układ zawiera transceptor, umożliwiający dezaktywację stopnia wyjściowego przez odpowiednie wysterowanie pary tranzystorów komplementarnych w układzie Sziklayiego:  $Q_2$  i  $Q_3$  dla górnej połówki oraz  $Q_5$  i  $Q_6$  dla dolnej połówki. Tranzystory  $Q_2$  oraz  $Q_6$  wchodzi jednocześnie w skład wspomnianego wcześniej lustra prądowego, które determinuje prąd kolektora tranzystorów  $Q_3$  i  $Q_6$ . W rzeczywistości każdy z tych elementów składa się z pięciu identycznych tranzystorów połączonych równolegle. Z uwagi na relatywnie duże współczynniki wzmacnienia prądowego tych tranzystorów, rzędu 100, można przyjąć, że prąd ich emiterów jest w przybliżeniu równy prądom ich kolektorów. Suma prądów emiterów tych tranzystorów jest prądem wyjściowym wzmacniacza. W rezultacie transkonduktancja układu wyjściowego wzmacniacza – czyli stosunek napięcia na wejściu układu  $U_2$  do prądu wyjściowego  $I_{wy}$  wzmacniacza – jest w przybliżeniu równa 2 A/V. Na wyjściu wzmacniacza znajduje się szerokopasmowy bocznik prądowy o rezystancji  $R_s$  równej 0,1  $\Omega$ . Spadek napięcia na tym boczniku jest podawany na wejścia szerokopasmowego wzmacniacza różnicowego  $U_3$ , przetwarzającego ten spadek na napięcie podawane na rezystor  $R_2$ , znajdujący się na wejściu odwracającym wzmacniacza  $U_1$ . Pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego, której elementami składowymi są m.in.  $R_s$ ,  $U_3$  oraz  $R_2$ , zapewnia stabilizację prądu wyjściowego. Transkonduktancja przetwornika jest równa [5]:

$$(1) \quad G_M = \frac{I_{wy}}{U_{we}} = \frac{R_2}{R_1 R_s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{R_1 A_o(jf)}}$$

gdzie  $A_o(jf)$  jest współczynnikiem wzmacnienia napięciowego wzmacniacza operacyjnego  $U_1$  z otwartą pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego. Dla  $A_o(jf) \rightarrow \infty$  transkonduktancja przetwornika U/I przyjmuje postać:

$$(2) \quad G_M = \frac{R_2}{R_1 R_s}$$

Układ z dodatkowym wzmacniaczem różnicowym  $U_4$  oraz rezystorami  $R_3$  i  $R_4$  umożliwił zmniejszenie wpływu dryftu temperaturowego parametrów wzmacniacza  $U_3$ . Bocznik wykonano ze 100 równolegle połączonych rezystorów cienkowarstwowych o rezystancji 10  $\Omega$  i temperaturowym współczynnikiem rezystancji 10  $\mu\Omega/(\Omega \cdot K)$  [7]. Zdjęcie prototypu konwertera z bocznikiem przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Widok prototypu przetwornika U/I

## Impedancja wyjściowa przetwornika U/I

Prąd doprowadzany do obciążenia przez idealny wzmacniacz transkonduktancyjny jest niezależny od impedancji obciążenia, co wymaga zapewnienia możliwie dużej impedancji wyjściowej wzmacniacza. Impedancja wyjściowa prototypu przetwornika U/I jest równa [5]:

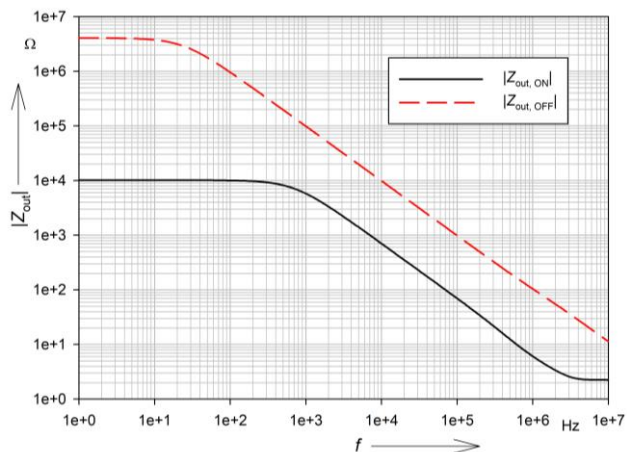
$$(3) \quad Z_{out} = \frac{R_s}{1 - \frac{1 - CMRR(jf)^{-1}}{1 + \frac{R_1 + R_2}{R_1 A_o(jf)}}}$$

gdzie  $CMRR(jf)$  jest współczynnikiem tłumienia sygnału wspólnego wzmacniacza  $U_3$ , który dla zastosowanego wzmacniacza różnicowego jest równy 100 dB w paśmie częstotliwości od 0 do około 200 kHz [8]. Zatem nawet przy spełnieniu warunku  $A_o(jf) \rightarrow \infty$  wartość  $Z_{out}$  jest równa

$R_{out} \approx 10 \text{ k}\Omega$ , tj. istotnie mniejsza od nieskończoności.

Bardziej wnikliwą analizę wpływu poszczególnych elementów układu przetwornika na jego impedancję wyjściową zapewnia analiza symulacyjna tego parametru wykonana za pomocą programu LTSpice. Na rysunku 4 przedstawiono charakterystykę częstotliwościową impedancji  $Z_{out}$  aktywnego i nieaktywnego przetwornika U/I, wyznaczoną tą metodą przy prądzie spoczynkowym stopnia wyjściowego równym około 800 mA. Wynika z niej dobra zgodność obliczonej symulacyjnie wartości modułu  $Z_{out}$  z wartością oszacowaną z równania (3) poniżej około 700 Hz. Powyżej tej częstotliwości obserwowany jest

spadek modułu impedancji wyjściowej równy -20 dB/dekadę, spowodowany przede wszystkim zmniejszeniem współczynnika  $|A_o(jf)|$ . Przy częstotliwości 100 kHz moduł  $Z_{out}$  maleje do wartości równej około 70  $\Omega$ . W tym paśmie częstotliwości impedancja wyjściowa posiada charakter pojemnościowo-czynny; składowa pojemnościowa  $C_s$  tej impedancji jest równa około 22,7 nF, a składowa czynna  $R_s$  wynosi około 2,2  $\Omega$ .



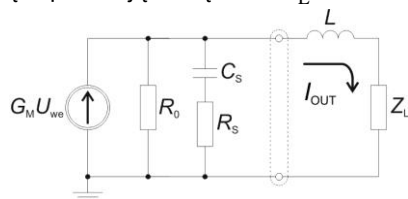
Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa impedancji wyjściowej aktywnego konwertera U/I

Na rysunku 4 przedstawiono również charakterystykę częstotliwościową  $Z_{out}$  nieaktywnego przetwornika U/I, wyznaczoną metodą symulacyjną. Wynika z niej, że moduł tego parametru jest równy około 4 M $\Omega$  przy częstotliwości mniejszej od około 10 Hz. Powyżej tej częstotliwości obserwowany jest spadek  $Z_{out}$  o nachyleniu -20 dB/dekadę. Jak wynika z rysunku 4, powyżej częstotliwości około 10 Hz impedancja wyjściowa nieaktywnego przetwornika U/I przyjmuje charakter pojemnościowy. Pojemność wyjściowa nieaktywnego przetwornika w tym paśmie częstotliwości jest równa około 1,6 nF.

### Obwód wyjściowy wzmacniacza

Krytycznym elementem składowym wzmacniacza jest obwód wyjściowy stosowany na zakresach 20 A oraz 100 A. Szczególnie trudna sytuacja występuje na największym zakresie (100 A), na którym, przy maksymalnej wartości prądu oraz maksymalnej częstotliwości wytwarzanej sinusoidy (100 kHz), ujawnia się wpływ indukcyjności, rezystancji i pojemności obwodu łączącego wyjście wzmacniacza z obciążeniem.

Na rysunku 5 przedstawiono schemat zastępczy opisanego wcześniej aktywnego przetwornika U/I wraz z dołączoną impedancją obciążenia  $Z_L$ .



Rys. 5. Schemat zastępczy wzmacniacza transkonduktancyjnego z dołączonym obciążeniem

Indukcyjność  $L$  reprezentuje indukcyjność obwodu łączącego moduł przetwornika U/I z obciążeniem. Na tej indukcyjności powstaje spadek napięcia  $u_L(t)$  o wartości równej:

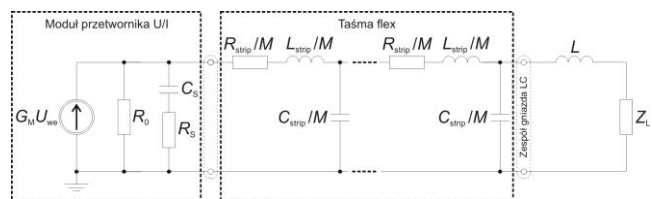
$$(4) \quad u_L(t) = -L \frac{di_{OUT}(t)}{dt}$$

Przy założeniu  $i_{OUT}(t) = I_{m,OUT} \sin(2\pi f t)$ , gdzie  $I_{m,OUT}$  jest amplitudą tego prądu, a  $f$  - częstotliwością, maksymalna wartość spadku napięcia  $u_L(t)$  jest równa:

$$(5) \quad u_{L,max} = 2\pi f L I_m$$

Jak już wspomniano, na zakresie 100 A jest aktywnych 19 przetworników U/I, z których każdy wytwarza na wyjściu prąd sinusoidalny o wartości skutecznej  $100/19 = 5,26$  A. Dla  $I_m = \sqrt{2} \cdot 5,26$  A,  $f = 100$  kHz oraz  $L = 100$  nH wartość  $u_{L,max} = 0,47$  V. Jest to relatywnie niewielka

wartość biorąc pod uwagę dopuszczalną wartość napięcia na wyjściu przetwornika, zawierającą się w przedziale od -7 V do 7 V. Jednak dla zakresu 100 A taka sama wartość indukcyjności w obwodzie wyjściowym powoduje powstanie spadku napięcia równego około 8 V, tj. większego od dopuszczalnej wartości napięcia na wyjściu wzmacniacza. Problem utrzymania niskiej indukcyjności obwodu wyjściowego jest łagodzony przez sumowanie prądów wyjściowych odpowiedniej liczby identycznych przetworników U/I. Niemniej przewody łączące poszczególne przetworniki U/I z zespołem gniazda wyjściowego powinny charakteryzować się możliwie małą indukcyjnością, rezystancją oraz pojemnością. Ponadto powinny być giętkie i zajmować mało miejsca w obudowie urządzenia. Dlatego połączenia między wyjściami przetworników U/I a koncentrycznym gniazdem wyjściowym zrealizowane są za pomocą taśm kaptonowych (flex) o jednakowej długości z obustronnie naniesionymi ścieżkami z folii miedzianej. Na rysunku 6 przedstawiono schemat zastępczy obwodu wyjściowego z taśmą łączącą, zespołem gniazda wyjściowego i obciążeniem. Taśma łącząca charakteryzuje się całkowitą indukcyjnością  $L_{strip}$ , pojemnością  $C_{strip}$ , oraz rezystancją  $R_{strip}$ . Na rysunku 6 taśma łącząca została zamodelowana za pomocą obwodu o parametrach rozłożonych, składającego się z  $M$  elementów składających się z indukcyjności  $L_{strip}$ , pojemności  $C_{strip}$ , oraz rezystancji  $R_{strip}$ .

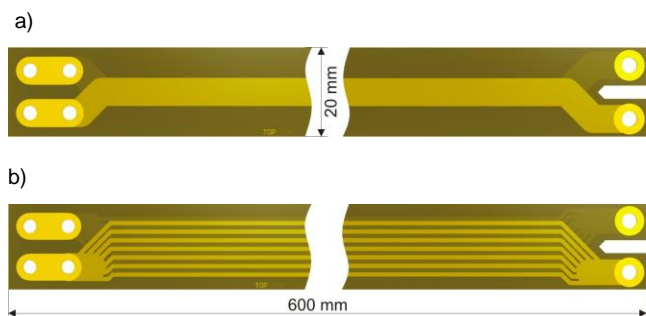


Rys. 6. Schemat zastępczy obwodu wyjściowego pojedynczego przetwornika U/I z taśmą łączącą, zespołem gniazda wyjściowego i obciążeniem

Po rozeznaniu możliwości technologicznych podjęto decyzję o zastosowaniu taśm łączących wykonanych na podłożu z folii kaptonowej o grubości 200  $\mu$ m z obustronnie naniesionymi ścieżkami z folii miedzianej o grubości 70  $\mu$ m, zabezpieczonych maską lutowniczą. Przed zleceniem wykonania taśm wykonano badania symulacyjne taśm o dwóch geometriach ścieżek, przedstawionych na rysunku 7. Pierwsza wersja taśmy [5] zawiera lite ścieżki z folii miedzianej o szerokości 6,3 mm usytuowane jedna pod



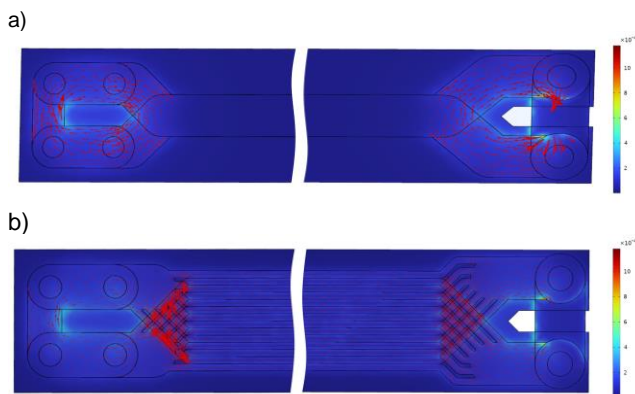
drugą na obu stronach taśmy. Druga wersja składa się z 7 ścieżek o szerokości 1 mm na każdej stronie taśmy, przesuniętych o 1 mm względem siebie w celu zmniejszenia pojemności. Symulacje przeprowadzone zostały przy wykorzystaniu metody elementów skończonych w środowisku Comsol Multiphysics.



Rys. 7. Wygląd zamodelowanych taśm łączących typu flex: a) rozwiązanie ze ścieżkami litymi; b) rozwiązanie ze ścieżkami rozdzielonymi

Na rysunku 8 przedstawiono wynik symulacji rozkładu strumienia magnetycznego w obydwu symulowanych taśmach. Do określenia indukcyjności styki wyjściowe z lewej strony taśmy zostały zwarte, a wymuszenie prądowe było doprowadzone do styków z prawej strony taśmy. Na podstawie przeprowadzonych symulacji otrzymano następujące wyniki:

- a) dla taśmy ze ścieżkami litymi:  $R_{strip} = 46,1 \text{ m}\Omega$ ,  $L_{strip} = 24,9 \text{ nH}$ , oraz  $C_{strip} = 583 \text{ pF}$ ;  
 b) dla taśmy ze ścieżkami rozdzielonymi i przesuniętymi otrzymano wyniki:  $R_{strip} = 41,6 \text{ m}\Omega$ ,  $L_{strip} = 53,0 \text{ nH}$ , oraz  $C_{strip} = 500 \text{ pF}$ .

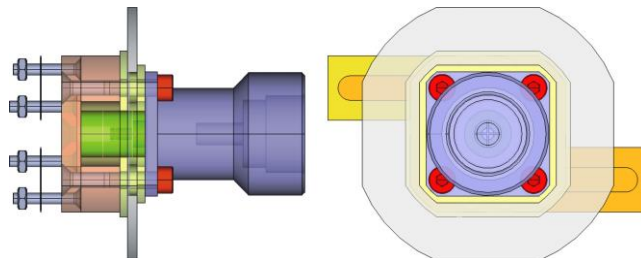


Rys. 8. Rozkład strumienia magnetycznego na ścieżkach miedzianych symulowanych taśm: a) dla taśmy ze ścieżkami litymi, b) dla taśmy ze ścieżkami rozdzielonymi

Ze względu na mniejszą pojemność  $C_{strip}$  zdecydowano się na zastosowanie taśm ze ścieżkami rozdzielonymi. Ich projekt został wykonany w programie Altium Designer, a następnie zlecony do produkcji przy wymaganiach: podłoże z folii kaptonowej o grubości 200  $\mu\text{m}$ , grubość ścieżek miedzianych 70  $\mu\text{m}$ , powierzchnie styków połączeniowych taśmy pokryte złotem w technologii ENIG. Parametry impedancyjne wykonanych taśm wyznaczono za pomocą miernika RLC Hioki 3532-50 przy napięciu 5 V oraz częstotliwości 1 kHz. Uzyskano następujące wyniki:  $R_{strip} = 70 \text{ m}\Omega$ ,  $L_{strip} = 34 \text{ nH}$ , oraz  $C_{strip} = 595 \text{ pF}$ .

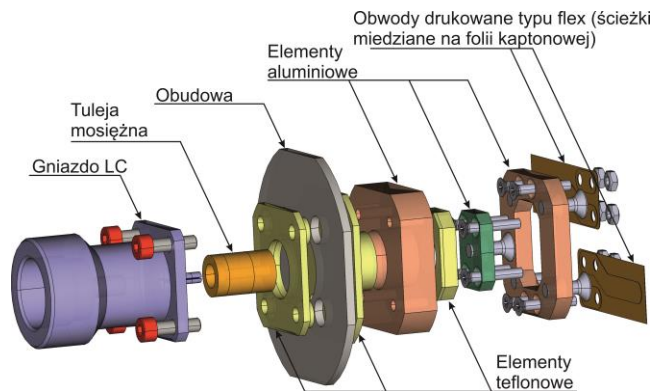
## Zespół gniazda wyjściowego

Wszystkie taśmy wychodzące z wyjść przetworników U/I muszą być połączone ze sobą na zaciskach gniazda wyjściowego. Na zakresach 20 A oraz 100 A zastosowano koncentryczne gniazdo LC firmy Bird RF. Bezpośredni montaż 19 taśm do ww. gniazda jest bardzo trudny, o ile w ogóle możliwy, dlatego zaprojektowano i wykonano odpowiedni zespół, łączący wszystkie taśmy z elektrodami gniazda LC. Zespół gniazda został zaprojektowany w środowisku 3D FreeCAD, w którym wygenerowano pliki umożliwiające sterowanie frezarką lub drukarką 3D. Widok zespołu gniazda LC przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Przekrój przez zespół gniazda wyjściowego LC (z lewej strony) oraz widok od przodu

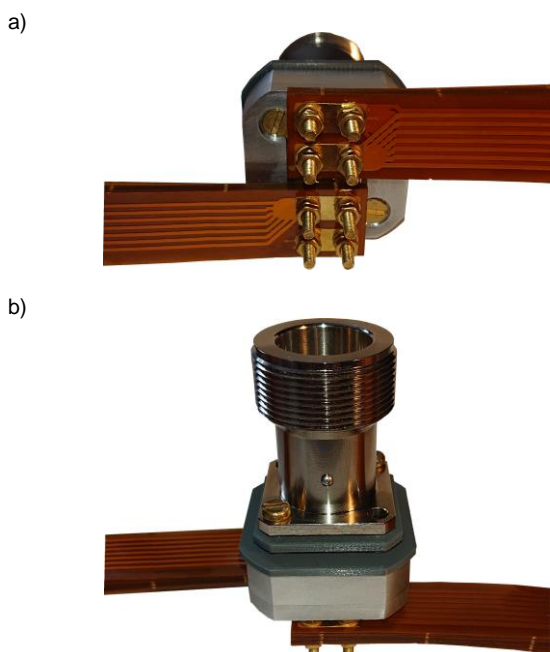
Na rysunku 10 przedstawiono rozłożony model uchwytu wraz z opisanymi elementami składowymi i gniazdem LC. Taśmy łączące przykręcone są do dwóch elementów aluminiowych za pomocą śrub M3. Elementy aluminiowe mają podwójną funkcję: po pierwsze służą jako przewodnik prądu pomiędzy taśmami kaptonowymi a złączem LC; po drugie, służą jako elementy mocujące złącze LC do obudowy wzmacniacza. Samo złącze LC jest odizolowane od obudowy za pomocą elementów teflonowych, znajdujących się od strony uchwytu oraz gniazda LC.



Rys. 10. Rozłożony zespół gniazda wyjściowego LC

Środkowy pin gniazda LC umożliwia jedynie przylutowanie żyły środkowej odpowiedniego kabla koncentrycznego, dlatego zaprojektowano element, który umożliwi przylutowanie do ww. pinu z jednej strony oraz przykręcenie taśm łączących z drugiej. Elementem lutowanym jest tuleja mosiężna, przykręcona do dalszej części uchwytu. Sam uchwyt został wstępnie wykonany z aluminium (stop PA4, 6082) przy pomocy frezarki sterowanej numerycznie (CNC). Docelowo zostanie on wykonany z mosiądzu. Prototypy elementów izolujących zostały wykonane z tworzywa sztucznego z wykorzystaniem druku 3D. Docelowo zostaną one wykonane z teflonu za pomocą frezarki CNC. Planowane zastosowanie teflonu podyktowane jest zwiększeniem niezawodności złącza, które przy maksymalnych prądach może się znacznie nagrzewać oraz zmniejszeniem jego pojemności elektrycznej. Na rysunku

11 przedstawiono widok zbudowanego prototypu zespołu gniazda wyjściowego. Jego indukcyjność oszacowano na około 50 nH [5].



Rys. 11. Prototyp zespołu gniazda LC a) widok od strony taśm, b) widok z boku

W tabeli 1 zestawiono wartości parametrów impedancji wyjściowej prototypu obwodu wyjściowego wzmacniacza w zależności od zakresu.

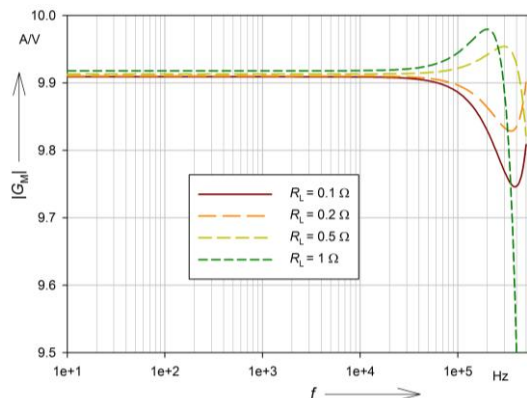
Tabela 1. Przybliżone wartości parametrów impedancji wyjściowej wzmacniacza transkonduktancyjnego

Zakres	$G_M$	$R_0$	$C_s$	$R_s$	$L$
-	S	k $\Omega$	nF	$\Omega$	nH
2 A	1	10	23,3	2,2	84
20 A	10	1	253	0,22	54
100 A	100	0,54	443	0,12	52

Z tabeli 1 wynika, że impedancja wyjściowa wzmacniacza ma charakter pojemnościowo-czynny. Stabilność wzmacniacza zapewnia dodatnia wartość składowej czynnej, natomiast duża składowa pojemnościowa, poza niekorzystnym zmniejszeniem impedancji wyjściowej wzmacniacza, może przy obecności indukcyjności wewnętrznej lub zewnętrznej (np. obciążenia o charakterze indukcyjnym), może powodować powstanie zjawiska rezonansu. Na rysunku 12 przedstawiono wynik symulacji charakterystyki częstotliwościowej transkonduktancji

wzmacniacza na zakresie 20 A dla kilku rezystancji obciążenia.

W paśmie częstotliwości od około 100 kHz do około 300 kHz występuje tego rodzaju rezonans. Widoczny jest również wpływ rezystancji obciążenia na to zjawisko. Dołączenie obciążenia o charakterze indukcyjnym z reguły pogłębia ten efekt.



Rys. 12. Wpływ rezystancji obciążenia na przebieg charakterystyki częstotliwościowej transkonduktancji wzmacniacza na zakresie 20 A

### Podsumowanie i kierunki dalszych prac

W artykule przedstawiono strukturę i podstawowe elementy składowe precyzyjnego wzmacniacza transkonduktancyjnego dużej mocy ze szczególnym uwzględnieniem wpływu obwodu wyjściowego na charakterystyki częstotliwościowe jego impedancji wyjściowej oraz transimpedancji. Zaprezentowano szczegóły technologiczne połączeń pomiędzy wyjściami modułów przetworników napięcia na prąd i gniazdami wyjściowymi oraz konstrukcję zespołu gniazda wyjściowego na zakresach 20 A oraz 100 A. Aktualnie prowadzone są prace konstrukcyjne nad zbudowaniem prototypu wzmacniacza oraz optymalizacją układu przetwornika U/I, stosowanego na zakresach 2 A, 20 A oraz 100 A.

Praca częściowo sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki (Projekt o nr. 2022/47/B/ST7/00047)

**Autorzy:** mgr inż. Kordian Dudzik, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: Kordian.Dudzik@polsl.pl; prof. dr hab. inż. Marian Kampik, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: Marian.Kampik@polsl.pl; Michał Pecyna, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: michpec770@student.polsl.pl;

### LITERATURA

- [1] Laug O.B., A High-Current Very Wide-Band Transconductance Amplifiers, Owen B. Laug, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 39 (1990), No. 1, 42-47, doi: 10.1109/19.50413
- [2] Clarke-Hess Model 8100 Transconductance Amplifier, <https://www.clarke-hess.com/ta8100.pdf>, dostęp 03.02.2025
- [3] Hess D. T., Clarke K. K., Evaluation of 100 A, 100 kHz Transconductance Amplifiers, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 48 (1999), No. 2, 447-449, doi: 10.1109/19.769622
- [4] Guildline Model 7810 Transconductance Amplifier, [https://guildline.com/media/k2/attachments/31800-00-85\\_9\\_\(7810\).pdf](https://guildline.com/media/k2/attachments/31800-00-85_9_(7810).pdf), dostęp 10.02.2025
- [5] Laug O.B., A 100 A, 100 kHz Transconductance Amplifier, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 45 (1996), No. 2, 440-444, doi: 10.1109/19.492763
- [6] Kyriazis G., A 24 A, 100 kHz transconductance amplifier with stable current output constructed at Inmetro, *Measurement: Sensors*, 18 (2021), 100064, doi: 10.1016/j.measen.2021.100064
- [7] Laug O.B., A Wide-Band Transconductance Amplifiers for current calibrations, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 34 (1985), No. 4, 639-643, doi: 10.1109/TIM.1985.4315425
- [8] High Speed, Video Difference Amplifier AD830, Datasheet, Rev. D, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ad830.pdf>, dostęp: 08.02.2025