

Dr hab. inż. Jacek Rąbkowski

Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny

Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRYCZNEGO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Analiza i badania wysokoczęstotliwościowych falowników klasy DE z tranzystorami MOSFET na bazie SiC i GaN.

Autor rozprawy: **mgr inż. Krzysztof Przybyła**

1. Wstęp. Tematyka rozprawy.

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Przybyły dotyczy zastosowania nowych tranzystorów mocy wykonanych na bazie półprzewodników szerokoprzerwowych – węgla krzemu (SiC) oraz azotku galu (GaN) w falownikach rezonansowych cechujących się bardzo wysokimi częstotliwościami przełączeń. W tym przypadku autor skupiał się na układzie klasy DE (półmostkowym) małej mocy pracującym w zakresie częstotliwości 13,56 MHz. Przekształtniki energoelektroniczne tego typu mogą znaleźć zastosowanie przede wszystkim w grzejnictwie indukcyjnym oraz w bezprzewodowym przesyśle energii. Wiadomo, że dotychczas tranzystory SiC oraz GaN znalazły szerokie zastosowanie w układach pracujących z częstotliwościami w zakresie kilkudziesięciu czy kilkuset kHz, gdzie odnotowano istotną poprawę właściwości użytkowych przekształtników. Wszelkie przesłanki wskazują na to, że podobnie może być w przypadku układów pracujących przy częstotliwościach liczonych w MHz, szczególnie tranzystory GaN HEMT wydają się być tu szczególnie interesującym rozwiązaniem łącznika mocy. Brak prac w tym zakresie w literaturze krajowej oraz niewielka ich ilość w literaturze anglojęzycznej wskazują, że tematyka jest nowa i wymaga przeprowadzenia prac badawczych o charakterze poznawczym.

W chwili obecnej trudno znaleźć krajowy czy zagraniczny ośrodek badawczy pracujący w obszarze energoelektroniki, który nie ma na koncie prac w zakresie półprzewodników szerokoprzerwowych. Patrząc na tematykę falowników rezonansowych to, obok szerokiego spektrum ośrodków światowych aktywnych w tym obszarze, warto odnotować także prace licznych krajowych ośrodków badawczych. Wymienić należy tu prace prowadzone na

Politechnice Białostockiej, Akademii Górniczo-Hutniczej, Politechnice Warszawskiej czy wreszcie przez grupę badaczy z Katedry Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki (KENER) Politechniki Śląskiej, z której wywodzi się autor rozprawy. Grupa ta wykazywała istotną aktywność w obszarze falowników rezonansowych pracujących w zakresie częstotliwości sięgających MHz, o czym świadczy szereg publikacji a praca autora jest wyraźną kontynuacją tej tematyki. Wobec pojawienia się nowych przyrządów mocy autor postawił sobie za cel opracowanie, przebadanie i porównanie parametrów falowników klasy DE pracujących przy częstotliwości 13,56 MHz z wykorzystaniem tranzystorów SiC i GaN. W mojej ocenie cel rozprawy jest jednoznaczny a też sformułowana właściwie. Oryginalność tematyki wynika przede wszystkim z wykorzystania nowych półprzewodnikowych przyrządów mocy, co niesie za sobą szereg wyzwań z problematyką sterowników bramkowych i projektowania obwodów mocy na czele. Wypełnienie luki merytorycznej w obecnym stanie wiedzy w tym zakresie należy uznać za istotną i uzasadnioną motywację podjęcia tematu. Należy podkreślić, że cel pracy jest niezmiernie aktualny i ważny z punktu widzenia wartości poznawczych ale niesie w sobie także duży potencjał aplikacyjny.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Dosyć obszerna, bo licząca 143 strony rozprawa składa się z 9 zasadniczych rozdziałów (115 stron), spisu literatury oraz dodatków zawierających opis modelu falownika i wybrane wyniki badań symulacyjnych, spis aparatury oraz oszacowanie niepewności a także spis dorobku naukowego doktoranta.

Rozdział pierwszy – wstęp zawiera wprowadzenie do tematyki (1.1) oraz motywację podjęcia prac badawczych (1.2), autor formułuje także cel rozprawy (1.3) podając przy tym także szereg założeń (1.4). W podrozdziale 1.5 nazwanym „Struktura rozprawy” opisana zostaje zawartość poszczególnych rozdziałów. Ta część rozprawy jest napisana krótko i rzeczowo, zawiera wszystkie niezbędne informacje. Drobne zastrzeżenia mogą dotyczyć tylko drobnych potknięć stylistycznych oraz dosyć enigmatycznego założenia podanego na str. 7: „pewne analizy i zagadnienia będą ograniczone do zagadnień istotnych z punktu widzenia wysokiej częstotliwości pracy”.

W kolejnym rozdziale autor przechodzi do przeglądu literatury, który podzielił na trzy grupy tematyczne: falowniki rezonansowe wysokiej częstotliwości, drajwery wysokiej częstotliwości oraz modele falowników rezonansowych. Literatura jest obszerna i zawiera aż 158 pozycji, w tym 118 publikacji naukowych w językach angielskim i polskim, 36 not aplikacyjnych, 2 źródła internetowe oraz dwie publikacje własne w języku polskim. Jej przegląd zawarty jest na 5 stronach i siłą rzeczy jest dosyć pobieżny, choć należy podkreślić, że wybrane pozycje, szczególnie istotne z punktu widzenia rozprawy, omówione są dosyć szczegółowo. W efekcie czytelnik zostaje zaznajomiony ze stanem wiedzy w niezbędnym dla dalszej lektury zakresie oraz otrzymuje listę pozycji po które warto w razie potrzeby sięgnąć. Całość świadczy o dobrej znajomości literatury, warto także dodać, że większość pozycji to publikacje nowe. Na koniec rozdziału, po krótkim podsumowaniu autor stawia poprawnie sformułowaną tezę rozprawy.

W dalszej części pracy zawartej w rozdziale trzecim omawiane są elementy mocy na bazie SiC i GaN, począwszy od właściwości materiałów szerokoprzerwowych poprzez podstawowe właściwości poszczególnych elementów. W pewnym momencie (str. 22) podrozdział 3.3 dotyczący tranzystorów GaN przeradza się w porównanie elementów Si, SiC i GaN – brak wyodrębnienia osobnego podrozdziału należy uznać za błąd formalny popełniony przez doktoranta. Przedstawione informacje świadczą o jego dużej wiedzy w zakresie

parametrów katalogowych półprzewodnikowych mocy, trudno też mieć zastrzeżenia do solidnie przeprowadzonego porównania czy wytypowanych do dalszych badań elementów. Z drugiej strony chaos w nazewnictwie (tranzystor GaN HEMT, w jednym miejscu (str. 21) jest przedstawiany jako złączowy, poza tym – błędnie – jako MOSFET) i brak jasnego sprecyzowania czego autor w zasadzie oczekuje od dobieranych elementów obniżają wartość merytoryczną tego rozdziału.

Od elementów mocy w rozdziale trzecim doktorant przechodzi w rozdziale czwartym do sterowników bramkowych, określanych w pracy drajwerami, bazując tu na bogatym dorobku zespołu badawczego z KENER. Omawia podstawowe wymagania wobec takich układów a następnie w sposób jasny i czytelny przedstawia układy twar- i miękoprzelączalne. Zdecydowaną zaletą tej części pracy jest odwoływanie się do konkretnych rozwiązań i odpowiednich not katalogowych, co świadczy o wysokiej znajomości tematyki. Wreszcie, w podrozdziale 4.4 doktorant dokonuje wyboru sterownika bramkowego i układu izolatora, które będą używane w dalszej części pracy. Niestety, na koniec bardzo dobrego rozdziału autor zamieścił podpunkt 4.4.3 zawierający podsumowanie, które w zasadzie tym podsumowaniem nie jest a zawiera zestawienie kilku podanych już wcześniej obserwacji.

Następny rozdział omawiający falowniki klasy DE ma podobną strukturę do rozdziału czwartego. Doktorant omawia podstawowe topologie mostka falownika jednofazowego oraz obwodów rezonansowych ilustrując je odpowiednimi zależnościami, wspomina także o metodach sterowania aby wreszcie przejść do wyboru topologii falownika i obwodu dopasowania wraz z odpowiednimi parametrami elementów. Rozdział jest relatywnie krótki (11 stron), ale zawiera wszelkie niezbędne informacje.

Bardzo istotną z punktu widzenia wartości rozprawy jest tematyka modelowania falownika klasy DE, której omawianie zaczyna się w rozdziale szóstym. Doktorant przedstawił tu założenia teoretyczne, po czym pomiary parametrów pasożytniczych elementów umieścił w dalszej części rozprawy (podrozdział 7.5), przykład modelu i wyników symulacji w załącznikach a wyniki obliczeń modeli w rozdziale 8, co jest sporym wyzwaniem dla czytelnika. Wracając do rozdziału 6 to zawiera on opis oryginalnego, choć w dużej mierze bazującego na dokonaniach zespołu badaczy z KENER, modelu falownika, który można określić mianem ulepszanego modelu behawioralnego zorientowanego szczególnie na odwzorowanie strat mocy. I tak kolejno autor podaje swoje propozycje opisu kluczowych parametrów wpływających na straty mocy takich, jak rezystancje pasożytnicze obwodu rezonansowego przewodzenia czy pojemność wyjściowa tranzystora. Pojawia się tu nowe podejście do modelowania strat jałowych w sterowniku bramkowym oraz próba uwzględnienia częstotliwości oraz temperatury w parametrach rezystancyjnych. Podsumowując, rozdział jest dobrze napisany i ciekawy z punktu widzenia merytorycznego, niestety czytelnik musi szukać dalszego ciągu tematyki modelowania dopiero w rozdziale 8 a nawet uważna lektura załączników nie daje zbyt dużych szans na samodzielną weryfikację zaproponowanego w pracy modelu.

Rozdział siódmy to najobszerniejsza część pracy (44 strony) zawierająca najważniejsze dokonania doktoranta – opis opracowanych modeli eksperymentalnych oraz wyniki ich badań laboratoryjnych. Patrząc na jego strukturę, nasuwa się pytanie czy mniej istotna część opisu modeli (zawarta w podpunktach 7.1-7.3) nie powinna znaleźć się w załącznikach. Ponadto wydaje się, że zamiast formuły polegającej na chronologicznym opisywaniu kolejnych modeli i ich badań w podrozdziale 7.4, autor mógł zdecydować się na porównywanie poszczególnych rozwiązań i wyników ich badań. Tym bardziej, że w podrozdziale 7.5 i 7.6 takie porównania wyników się pojawiają. W efekcie mocny merytorycznie i zawierający kluczowe wyniki rozdział jest nierówny i czyta się go dosyć ciężko. W niektórych częściach doktorant przechodzi

do pogłębionych analiz teoretycznych objaśniających otrzymane wyniki (np. temat pojemności pasożytniczych str. 75-77 czy zagadnienie indukcyjności wspólnej źródła str. 78-79) a niektóre zarejestrowane zjawiska w ogóle nie są skomentowane (np. oscylacje w napięciu dren-źródło na rys. 7.24 czy 7.32). Zaprezentowane wyniki świadczą o wysokim poziomie prac autora oraz dużych umiejętnościach projektowania i badania wysokoczęstotliwościowych falowników rezonansowych z elementami SiC i GaN. Podsumowując, pomimo błędów formalnych i niedociągnięć w opisach wyników, zawartość rozdziału 7, czyli wyniki badań eksperymentalnych, to zdecydowanie najistotniejsza część pracy.

W krótkim rozdziale 8 (liczącym 7) stron doktorant przedstawia i porównuje wyniki obliczeń opracowanych przez siebie modeli falownika klasy DE oraz tam, gdzie to możliwe symulacji bazujących na modelach dostarczonych przez producentów elementów półprzewodnikowych. Symulacje były prowadzone dla dwóch różnych, arbitralnie dobranych czasów opadania prądu oraz dwóch temperatur, przy czym drobnym błędem wydaje się tu założenie takiej samej temperatury złącz tranzystorów i obwodu rezonansowego. Rozdział zamyka krótkie podsumowanie.

Wreszcie, w rozdziale 9 doktorant przechodzi do dyskusji otrzymanych wyników, podsumowania i wniosków końcowych. Znowu od strony formalnej chyba lepiej by było najpierw porównać wyniki modelowania i eksperymentów a potem przejść do napotkanych w modelach laboratoryjnych ograniczeń i propozycji ich pokonania, ale w istniejącej sekwencji rozdział też jest do przyjęcia. Doktorant z pełną otwartością wskazuje braki w zaprojektowanych przez siebie układach, co uznaję za istotną zaletę tej części pracy, nieczęsto spotykaną w rozprawach doktorskich. Zazwyczaj autorzy w takich miejscach stawiają zasłonę dymną aby zatuszować swoje niepowodzenia, natomiast metoda przyjęta przez mgr inż. Krzysztofa Przybyłę jest zdecydowanie bardziej uczciwa i – co ważne – pozwoli zainteresowanemu czytelnikowi rozprawy uniknąć tych samych błędów. Uważam, że postawione cele rozprawy są niezwykle ambitne i nawet jeżeli nie wszystkie układy w pełni spełniły pokładane w nich nadzieje (np. falowniki na bazie tranzystorów GaN pracujące z ograniczoną mocą), to i tak zawartość pracy, poziom analizy wyników i wyciągniętych wniosków jest bardzo wysoki oraz świadczy o wysokiej wiedzy doktoranta. Obronną ręką wychodzi on także z porównania otrzymanych wyników symulacji i eksperymentów, podsumowuje osiągnięcia pracy oraz przedstawia możliwe kierunki dalszych badań. Oczywiście w kilku miejscach można podjąć dyskusję z przedstawionymi wnioskami – bo czy można stwierdzić, że tranzystory GaN HEMT są lepszym rozwiązaniem, jeśli – w przeciwieństwie do tranzystorów SiC MOSFET- nie pozwoliły osiągnąć mocy układów wyższej niż 320W ? Nie zmienia to wysokiej oceny ostatniego zasadniczego rozdziału recenzowanej rozprawy.

Układ redakcyjny pracy jest na ogół prawidłowy, choć w mojej ocenie sekwencja tematyki w niektórych miejscach mogła być zmieniona z korzyścią dla jasności przekazu. Zdecydowanie łatwiej by się rozprawę czytało gdyby zagadnienia modelowania tzn. omówienie modelu, wyniki obliczeń i zestawienie z wynikami eksperymentów przedstawione były bezpośrednio po sobie. Poza tym sekwencja przedstawiania tematyki w poszczególnych rozdziałach jest w zasadzie bez zarzutów.

Szata graficzna pracy jest na dobrym poziomie, rysunki mają odpowiednią wielkość, są czytelne i poprawnie opisane. Oczywiście autor nie ustrzegł się szeregu drobnych niedociągnięć redakcyjnych, które zestawione są w punkcie 3 tej recenzji. Poza tym w kilku miejscach pracy można spotkać niedociągnięcia stylistyczne polegające na gwałtownych przeskokach myślowych w sąsiednich zdaniach, co oczywiście czasem utrudnia lekturę. W kwestii nazewnictwa nie można doktorantowi zbyt wiele zarzucić, używa on poprawnej terminologii,

sporadycznie sięga po wyrażenia mniej formalne. Tu i owdzie nieoczekiwanie pojawiają się wtręty w cudzysłowie, w tym anglojęzyczne (np. str. 50 „in circuit”) mające przecież polskie odpowiedniki.

3. Uwagi ogólne

W czasie studiowania rozprawy nasunęły mi się następujące **uwagi dyskusyjne natury ogólnej**:

1. W rozprawie, począwszy od jej tytułu, autor używa sformułowania „tranzystory MOSFET na bazie SiC i GaN”, co na poziomie ogólnym, hasłowym jest oczywiście akceptowalne, natomiast w mojej ocenie nie jest poprawne, ponieważ tranzystory GaN HEMT jako tranzystory polowe złączone nie zaliczają się do tranzystorów polowych z izolowaną bramką. Proszę o krótkie omówienie podstawowych struktur SiC MOSFET i GaN HEMT i wskazanie różnic.
2. Autor porównuje kilka rozwiązań falowników rezonansowych klasy DE na bazie elementów SiC i GaN, jednak w rozprawie, oprócz dosyć ogólnego wskazania na str. 5, brak odniesienia do parametrów układów wykorzystujących krzemowe tranzystory MOSFET. Czy można prosić o krótkie zestawienie najważniejszych parametrów opracowanych układów z ich odpowiednikami krzemowymi ?
3. Na stronie 31 autor podaje zależność 4.8 opisującą straty w rezystancji wyjściowej sterownika bramkowego w przypadku, gdy ma on różne rezystancje w stanie wysokim i niskim. Wydaje mi się, że w drugiej części wzoru wkradł się błąd tzn. w liczniku powinna być rezystancja R_{DROL} - chciałbym prosić o sprawdzenie, objaśnienie i wyprowadzenie tego wzoru.
4. W pracy pojawia się dosyć interesujące, autorskie rozwiązanie systemu chłodzenia polegające na zastosowaniu miniaturowych radiatorów chłodzonych cieczą dla każdego z dwóch elementów półprzewodnikowych falownika. Wydaje się, że ak w przypadku elementów SiC, jaki i GaN, radiatory podłączone są do obudów, które z kolei znajdują się na potencjałach drenów (SiC) lub źródeł (GaN) chłodzonych elementów. Dlatego pojawia się pytanie o praktyczny aspekt takiego rozwiązania – wydaje się, że radiatory są na innych potencjałach obwodu i nie mogą być chłodzone tą samą cieczą ? Proszę o objaśnienie tego zagadnienia.
5. Niezwykle interesującym aspektem pracy jest podjęcie tematu wpływu częstotliwości na rezystancję przewodzenia, choć autor nie podjął próby wyjaśnienia tego zjawiska. Czy może chodzić tu o zjawiska fizyczne zachodzące w elementach półprzewodnikowych ? A może, patrząc na różne charakterystyki dla tego samego przyrządu rys. 7.44, odpowiedzialna jest tu raczej obudowa ?
6. Na rysunkach 7.24, 7.32 i 7.39 podane są przebiegi napięcia między drenem a źródłem dolnych tranzystorów falowników SiC-2 oraz GaN-1 i GaN-2, których wspólną cechą są oscylacje o częstotliwości kilkukrotnie przewyższającej częstotliwość rezonansową. Ponieważ w pracy nie znalazłem komentarza na ten temat proszę o podjęcie próby objaśnienia tego zjawiska.
7. W postawionej na str. 15 tezie mowa jest o falownikach klasy DE pracujących w pasmie 13.56 MHz a tymczasem większość przedstawionych w rozdziale 7 badań przeprowadzono dla częstotliwości 12.5 MHz. Oczywiście z dużą dozą pewności można założyć, że omawiane układy będą pracować poprawnie po zwiększeniu częstotliwości o kilka procent, niemniej jednak proszę o wyjaśnienie tej różnicy.
8. Na podstawie omówienia modelu falownika w rozdziale 6 wydaje się, że temperatura elementów jest tu istotnym parametrem. Niestety, przedstawiony w

załączniku sposób realizacji modelu w praktyce nie pozwala stwierdzić w jaki sposób parametr ten jest uwzględniany. Czy temperatura jest tu wielkością wejściową czy też, obliczana na podstawie strat mocy, wielkością wyjściową z modelu ?

4. Uwagi szczegółowe

W tabeli poniżej podano najbardziej znaczące pomyłki edycyjne i formalne. Poniższe uwagi szczegółowe nie mają istotniejszego wpływu na ocenę merytorycznej wartości pracy i nie utrudniają odbioru treści.

Nr strony	Linia lub nr rysunku	Uwagi
5	36	Powinno być „struktry półmostkowej, jak i mostkowej”
7	13	A rozdział 2 ?
13	27	Powinno być „mając na uwadze”
14	26	Sterowanie bipolarne raczej wydłuża czas załączania
18	3	Sformułowanie o połączeniu technologii Si z technologią SiC/GaN jest nieprecyzyjne, chodzi raczej o połączenie elementów we wspólnej obudowie
23	4	W tranzystorze TPH3208PS sterujemy zwyczajnym niskonapięciowym MOSFETem
28	3	Powinno być: „struktury drajwerów przeznaczone ...”
28	akapit 2	Styl – ciągle rozpoczynanie zdania od „Drajwer...”
29	13	Powinno być : „przeładowaniem pojemności bramkowej”
31	22	Stwierdzenie nieprecyzyjne – obydwie typy drajwerów są podłączone do elektrod bramki i źródła.
43	-	Tytuły podrozdziałów powinny brzmieć: Metoda z modulacją amplitudy, Metoda z modulacją częstotliwości
49	3	Powinno być „W tym rozdziale ...”
49	21, 25	Sformułowania „model biblioteczne”, „słabo odzwierciedlone” są niefortunne
54	19	Powinno być „... z sondą umieszczoną bezpośrednio w obwodzie”
65	11	Cudzysłów niepotrzebny
66	18	Powinno być „zaimplementowane w obwodzie”
77	16	Powinno być „padu termicznego”.
81	14	C_{GD} powinno być raczej w nawiasie

83	14	Rezystancja termiczna złącze-obudowa oznaczana jest zwykle R_{THJC}
85	3	Znowu powinno być po prostu „Pad termiczny”
96	-	„Rezystancja pasożytnicza” a nie „pasożytnicza rezystancja”
104	5	Powinno być „... w zakresie mocy wyjściowych ...”
107-113	-	Powinno być „Wyniki obliczeń strat mocy i sprawności...”
115	14	Raczej „...sam tranzystor a przede wszystkim duża rezystancja wewnętrzna bramki R_M ”
117	drugi akapit	Objaśnienie z sondą prądową jest nie do końca jasne.
119	-	Stwierdzenie „poprawa sterowani bramkowego” jest nieprecyzyjne
119	Ostatnia linijka	Niepotrzebny cudzysłów

5. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska zawiera część analityczną, symulacyjną i przede wszystkim eksperymentalną, które mimo wymienionych uwag należy ocenić pozytywnie. Autor sformułował tezę, którą udowodnił, w szczególności projektując sterowniki bramkowe i obwody mocy a następnie przeprowadzając badania eksperymentalne falowników rezonansowych na bazie elementów SiC i GaN pracujących przy bardzo wysokich częstotliwościach. Wyniki tych prac należy uznać za znaczące, co potwierdza opublikowanie ich w periodykach oraz na konferencjach krajowych. Wnoszą one liczący się wkład w poszerzenie stanu wiedzy z zakresu projektowania falowników rezonansowych klasy DE pracujących przy częstotliwościach rzędu kilkunastu MHz. Autor wykazał się dobrą znajomością energoelektroniki, elektroniki oraz techniki mikroprocesorowej a w szczególności metod projektowania obwodów drukowanych, technik symulacji komputerowej oraz metod prowadzenia badań eksperymentalnych i pomiarów urządzeń energoelektronicznych pracujących przy wysokich częstotliwościach.

Za osiągnięcia własne Autora uznaję:

- opracowanie *pięciu* modeli falowników rezonansowych z elementami SiC i GaN do pracy w zakresie częstotliwości do kilkunastu MHz,
- przeprowadzenie serii badań eksperymentalnych pozwalających ocenić podstawowe parametry opracowanych układów oraz dokonanie analiz porównawczych,
- opracowanie oryginalnego modelu falownika rezonansowego i porównanie go z modelami symulacyjnymi wykorzystującymi biblioteki dostarczone przez producentów,
- weryfikację modelu poprzez porównanie wyników symulacji z wynikami eksperyment

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa przedstawiona przez mgr inż. Krzysztofa Przybyły pt. „**Analiza i badania wysokoczęstotliwościowych falowników klasy DE z tranzystorami MOSFET na bazie SiC i GaN**” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej z zakresu energoelektroniki, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez jej autora. Na tej podstawie stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania sformułowane w odniesieniu do rozpraw doktorskich w obowiązującej aktualnie ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i może być dopuszczona do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, consisting of two distinct parts. The first part is a stylized, cursive signature that appears to be 'K. Przybyły'. The second part is a shorter, more compact signature that appears to be 'Przybyły'.