



Politechnika  
Śląska

# *Innowacyjny modułowy system nagrzewania indukcyjnego z efektywnym kształtowaniem rozkładu pola temperatury*

dr inż. Krystian FRANIA

**KENER**

Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki

---

# 1. Wprowadzenie

# Podstawowe informacje o projekcie

*Innovative **M**odular Induction Heating **S**ystem  
with Effective **T**emperature Field Distribution Shaping*

**MIST**

LIDER15/0357/2024

1 września 2025 – 1 marca 2028



Rzeczpospolita  
Polska

**NCBR**   
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

**LIDER**

# Program LIDER

## Cel programu

Wsparcie rozwoju młodych naukowców poprzez podnoszenie kompetencji w zakresie:

- samodzielnego planowania prac badawczych;
- zarządzania zespołem badawczym;
- kierowania projektem badawczym.

# Program LIDER

## Cel programu

Wsparcie rozwoju młodych naukowców poprzez podnoszenie kompetencji w zakresie:

- samodzielnego planowania prac badawczych;
- zarządzania zespołem badawczym;
- kierowania projektem badawczym.

## Rodzaj realizowanych prac

- Projekty obejmują badania aplikacyjne i/lub prace rozwojowe.
- Wyniki projektu muszą mieć zastosowanie praktyczne i posiadać potencjał wdrożeniowy.

# Cel projektu

Opracowanie systemu **nagrzewania indukcyjnego**, który dzięki modułowej budowie i efektywnemu kształtowaniu rozkładu pola temperatury ma umożliwiać **hartowanie powierzchniowe** o szerokim zakresie częstotliwości (10-30) kHz dla MF i (100-300) kHz dla HF oraz mocy do 100 kW.

# Cel projektu

Opracowanie systemu **nagrzewania indukcyjnego**, który dzięki modułowej budowie i efektywnemu kształtowaniu rozkładu pola temperatury ma umożliwiać **hartowanie powierzchniowe** o szerokim zakresie częstotliwości (10-30) kHz dla MF i (100-300) kHz dla HF oraz mocy do 100 kW.

Pozwoli to na hartowanie za pomocą jednego urządzenia elementów o:

- różnym stopniu złożoności kształtu (np. wałków, kół zębatych);
- szerokim zakresie średnic (6 - 250 mm);
- szerokim zakresie głębokości warstwy zahartowanej (0,5 - 6 mm).

# Zadania

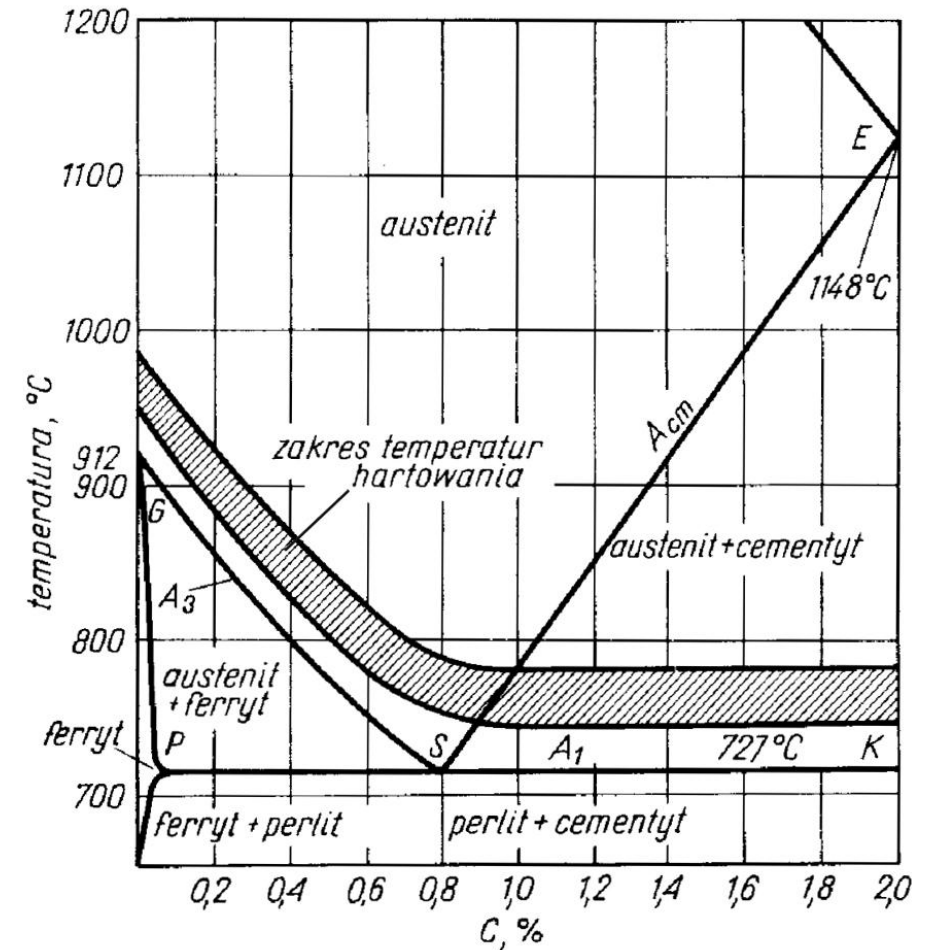
1. Analiza, projekt i badania bazowych układów przekształtnikowych systemu
2. Analiza, projekt i badania transformatorów dopasowujących oraz obwodów rezonansowych systemu
3. Opracowanie i przebadanie prototypu docelowego systemu w symulowanych warunkach operacyjnych
4. Budowa laboratoryjnej komory hartowniczej i demonstracja prototypu systemu w warunkach operacyjnych
5. Badania i ocena poszczególnych układów prototypu systemu w procesie hartowania powierzchniowego

Nr zadania	2025				2026												2027												2028	
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
1	x	x	x	x	x	x	x	x																						
2						x	x	x	x	x	x	x	x																	
3												x	x	x	x	x	x	x												
4																			x	x	x	x	x	x	x	x				
5																								x	x	x	x	x	x	x

# 2. Projekt

# Hartowanie powierzchniowe

Hartowanie powierzchniowe polega na szybkim nagraniu cienkiej warstwy powierzchniowej danego elementu do temperatury powyżej  $A_3$  (temperatury austenizacji) i oziębieniu z dużą szybkością niezbędną do uzyskania struktury martenzytycznej w tej warstwie.



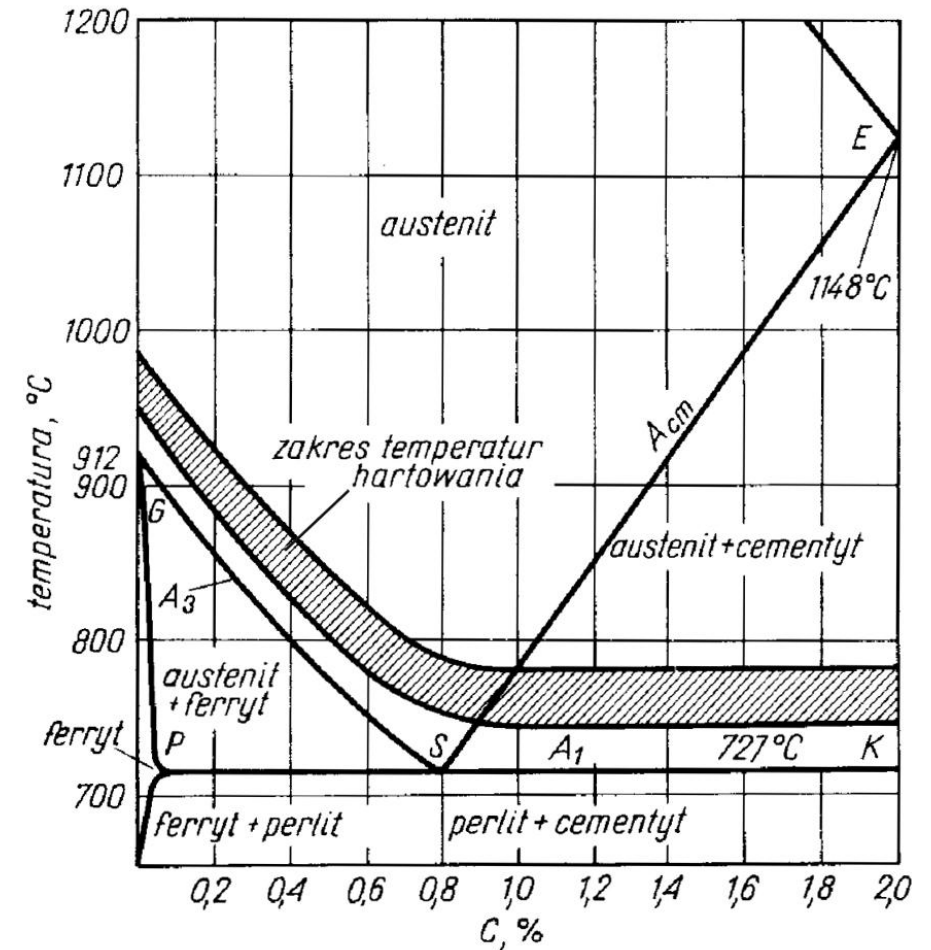
Zakres temperatur hartowania stali węglowych

# Hartowanie powierzchniowe

Hartowanie powierzchniowe polega na szybkim nagraniu cienkiej warstwy powierzchniowej danego elementu do temperatury powyżej  $A_3$  (temperatury austenizacji) i oziębieniu z dużą szybkością niezbędną do uzyskania struktury martenzytycznej w tej warstwie.

## Kluczowe parametry procesu hartowania:

- temperatura austenizowania;
- czas grzania;
- szybkość chłodzenia.



Zakres temperatur hartowania stali węglowych

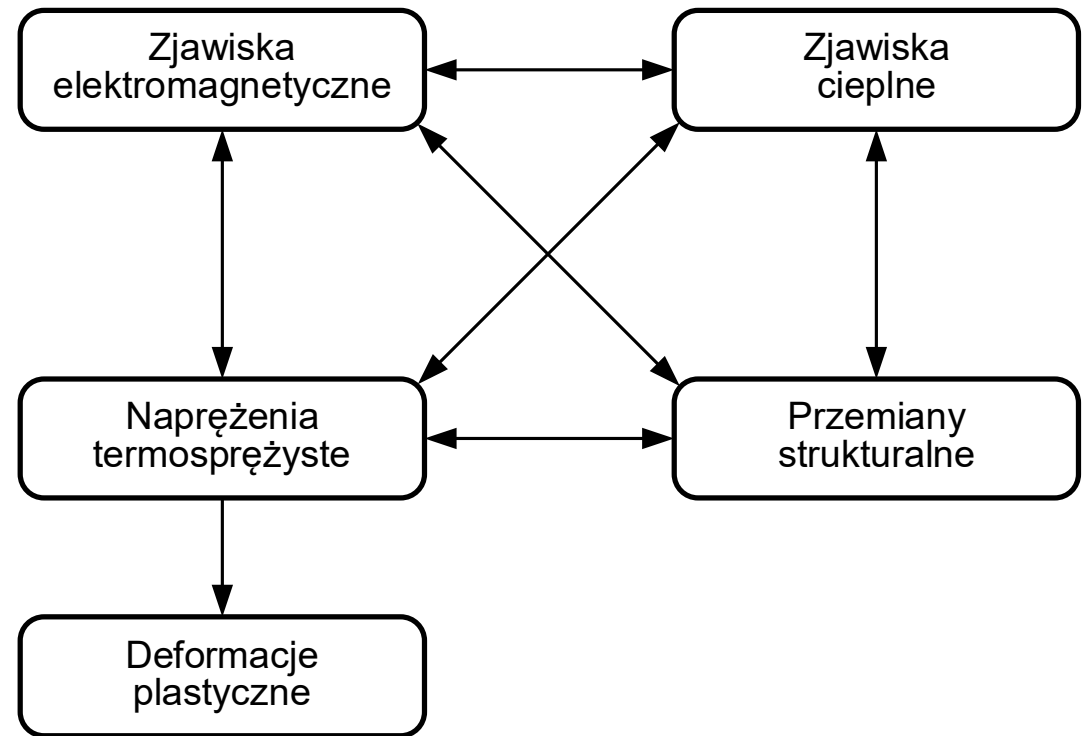
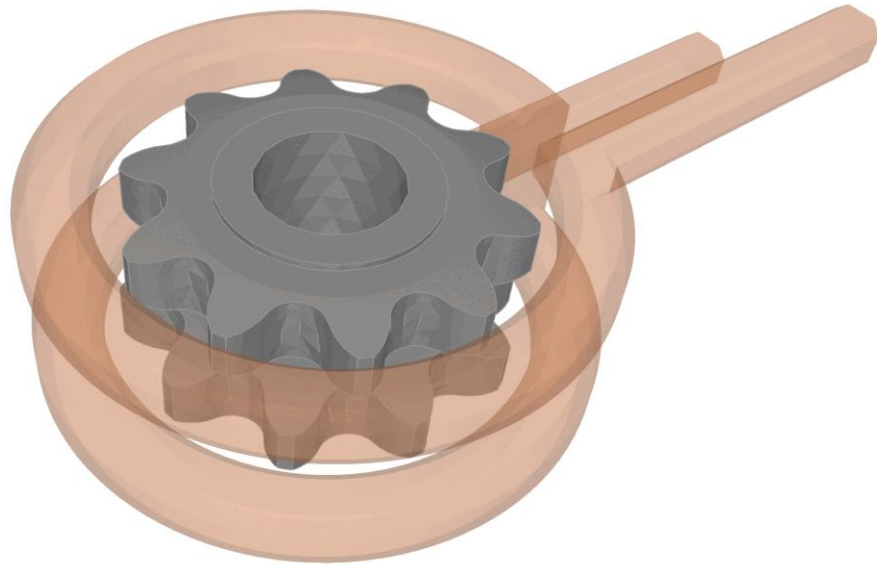
# Metody hartowania powierzchniowego

Metoda	Sposób nagrzewania	Głębokość hartowania	Twardość	Najlepsze materiały	Typowe detale
Hartowanie indukcyjne	Prądy wirowe (średnio- i wysokoczęstotliwościowe)	0,5 - 8 mm	50 - 65 HRC	Stale średnio- i wysokowęglowe	wały, koła zębate, czopy, sworznie
Hartowanie płomieniowe	Palnik gazowy (acetylen-tlen)	1,5 - 10 mm	50 - 60 HRC	Stale węglowe i niskostopowe	duże wały, koła linowe, szyny
Hartowanie laserowe	Wiązka lasera (CO <sub>2</sub> , diodowy, światłowodowy)	0,2 - 2,5 mm	55 - 65 HRC	Stale węglowe, narzędziowe, żeliwa	precyzyjne elementy, formy, matryce
Hartowanie elektronowe	Wiązka elektronów (próżnia)	0,1 - 3 mm	55 - 65 HRC	Stale stopowe	bardzo precyzyjne, małe detale

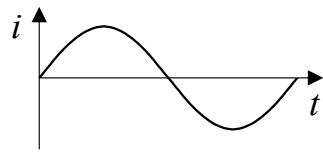
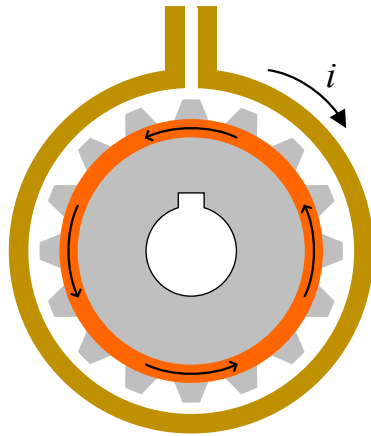
# Metody hartowania powierzchniowego

Metoda	Sposób nagrzewania	Głębokość hartowania	Twardość	Najlepsze materiały	Typowe detale
<b>Hartowanie indukcyjne</b>	<b>Prądy wirowe (średnio- i wysokoczęstotliwościowe)</b>	<b>0,5 - 8 mm</b>	<b>50 - 65 HRC</b>	<b>Stale średnio- i wysokowęglowe</b>	<b>wały, koła zębate, czopy, sworznie</b>
Hartowanie płomieniowe	Palnik gazowy (acetylen-tlen)	1,5 - 10 mm	50 - 60 HRC	Stale węglowe i niskostopowe	duże wały, koła linowe, szyny
Hartowanie laserowe	Wiązka lasera (CO <sub>2</sub> , diodowy, światłowodowy)	0,2 - 2,5 mm	55 - 65 HRC	Stale węglowe, narzędziowe, żeliwa	precyzyjne elementy, formy, matryce
Hartowanie elektronowe	Wiązka elektronów (próżnia)	0,1 - 3 mm	55 - 65 HRC	Stale stopowe	bardzo precyzyjne, małe detale

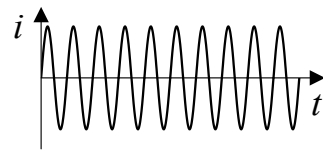
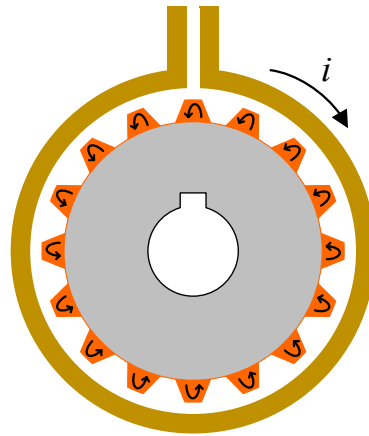
# Hartowanie indukcyjne



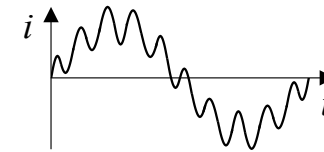
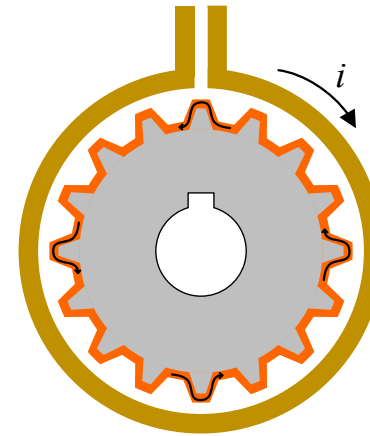
# Hartowanie indukcyjne kół zębatach



MF

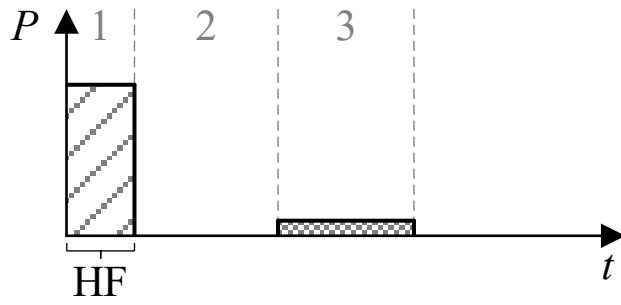


HF



MF + HF

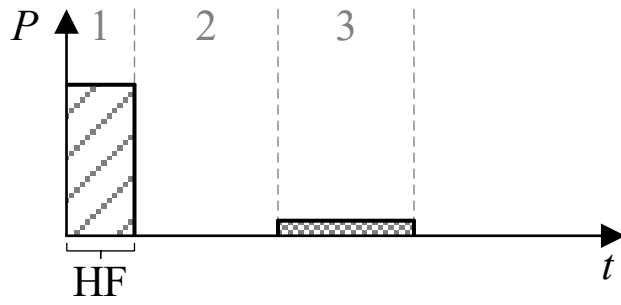
# Metody hartowania indukcyjnego kół zębatach



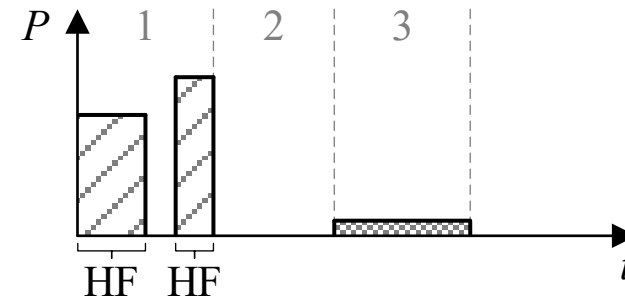
Conventional **S**ingle **F**requency

1 – nagrzewanie, 2 – hartowanie, 3 – odpuszczanie

# Metody hartowania indukcyjnego kół zębatach



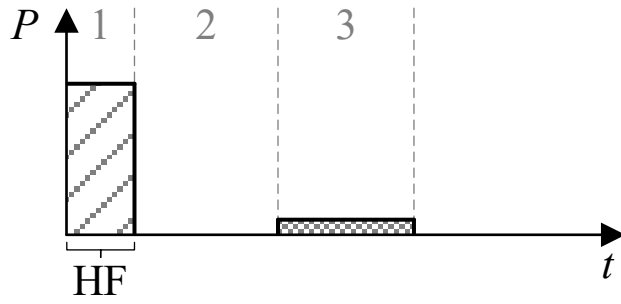
Conventional **S**ingle **F**requency



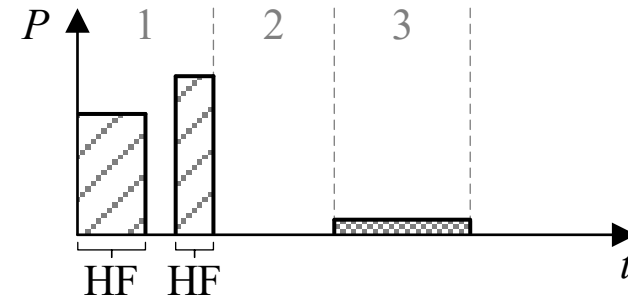
Pulsing **S**ingle **F**requency

1 – nagrzewanie, 2 – hartowanie, 3 – odpuszczanie

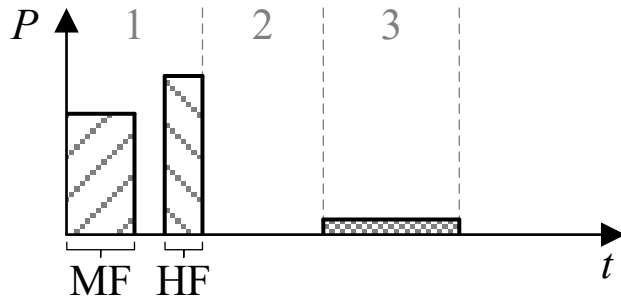
# Metody hartowania indukcyjnego kół zębatach



Conventional **S**ingle **F**requency



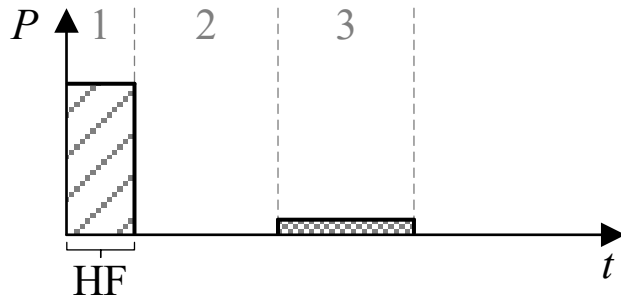
Pulsing **S**ingle **F**requency



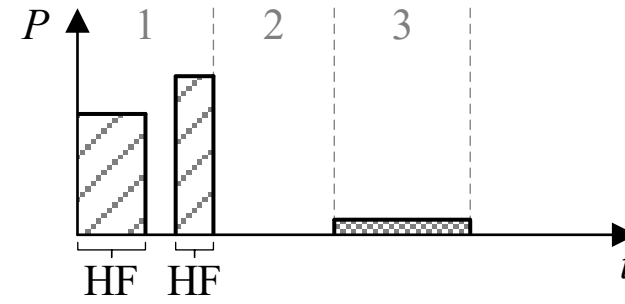
Pulsing **D**ual **F**requency

1 – nagrzewanie, 2 – hartowanie, 3 – odpuszczanie

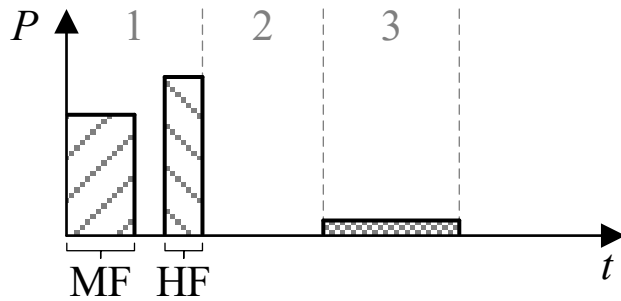
# Metody hartowania indukcyjnego kół zębatach



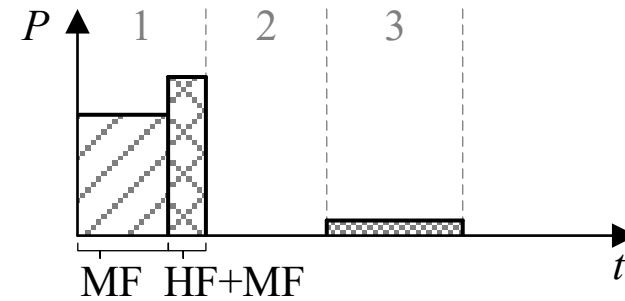
Conventional **S**ingle **F**requency



Pulsing **S**ingle **F**requency



Pulsing **D**ual **F**requency

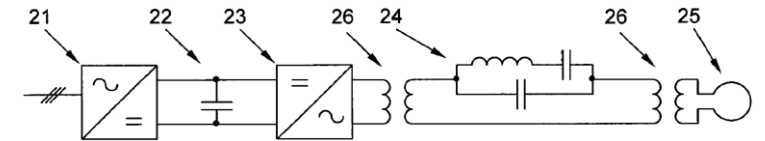
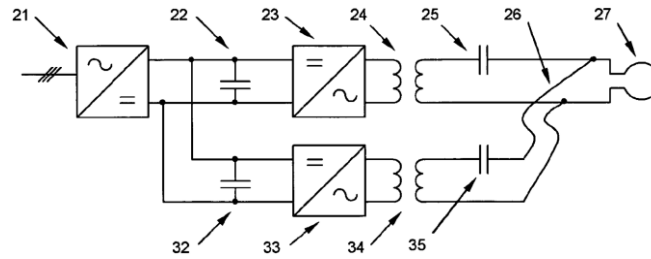
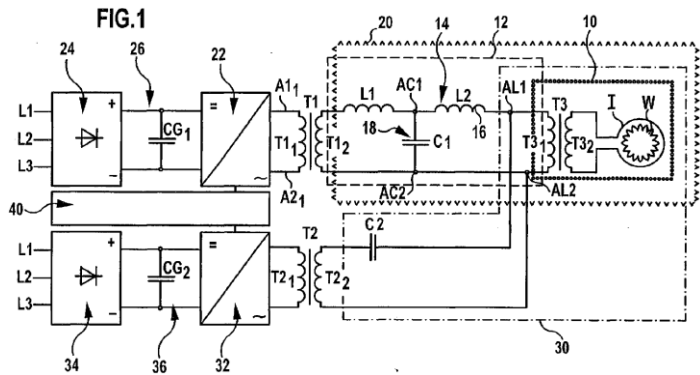


Simultaneous **D**ual **F**requency

1 – nagrzewanie, 2 – hartowanie, 3 – odpuszczanie

# Patenty europejskie

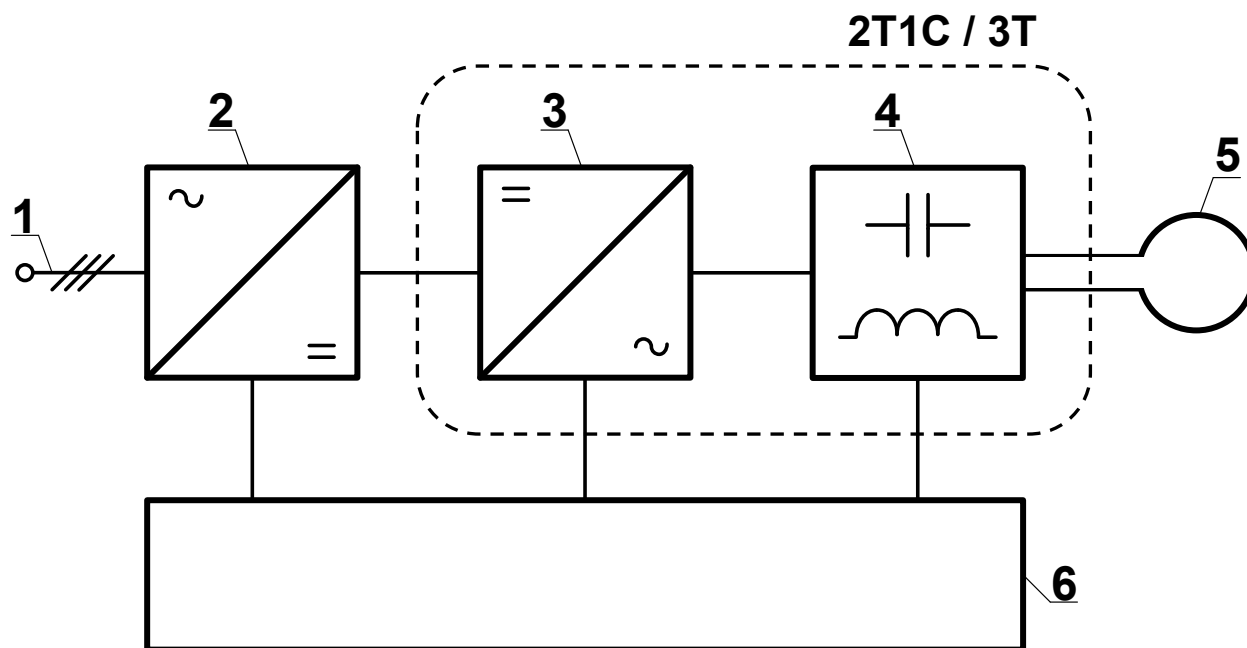
Nr patentu	Rodzaj systemu	Niezależne sterowanie składowych HF i MF	Dopasowanie impedancji obciążenia dla składowych HF i MF
EP1363474A2	złożony	TAK	TAK
EP2147983A1	złożony	TAK	TAK
EP2148551A1	prosty	NIE	NIE



# Patenty krajowe

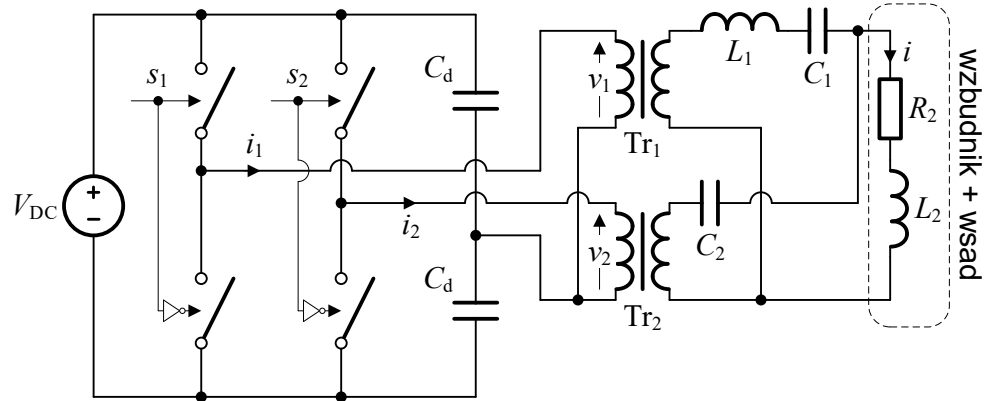
Nr patentu	Rodzaj systemu	Niezależne sterowanie składowych HF i MF	Dopasowanie impedancji obciążenia dla składowych HF i MF
EP1363474A2	złożony	TAK	TAK
EP2147983A1	złożony	TAK	TAK
EP2148551A1	prosty	NIE	NIE
<b>PL241666B1</b>	<b>prosty</b>	<b>TAK</b>	<b>TAK</b>
<b>PL439134A1</b>	<b>prosty</b>	<b>TAK</b>	<b>TAK</b>

# Schemat blokowy systemu

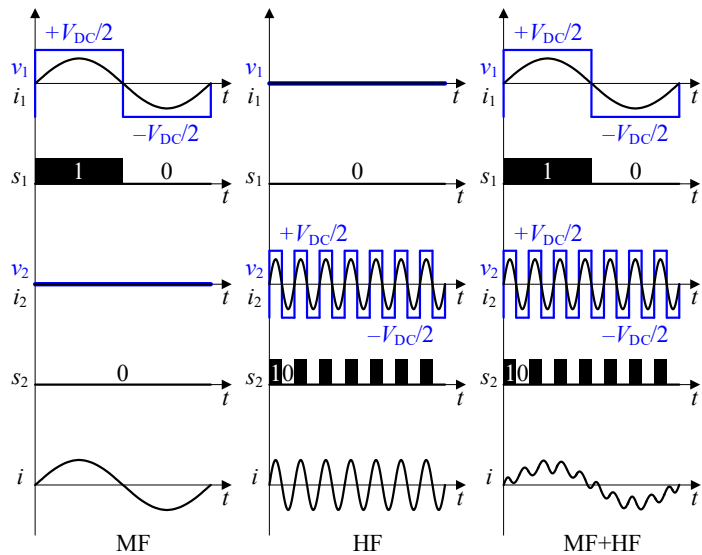


1. Sieć zasilająca 3 x 400 V
2. Prostownik
3. Falownik
4. Obwód rezonansowy
5. Wzbudnik
6. Układ pomiarowo-sterujący

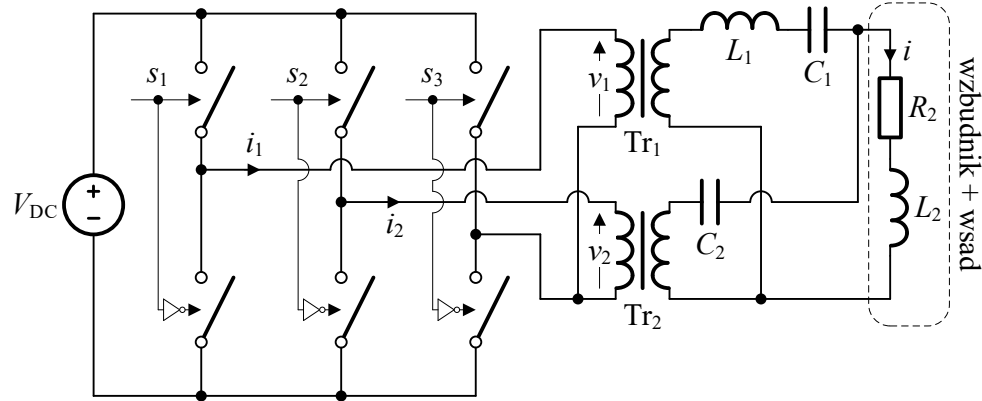
# Topologia 2T1C (PL241666B1)



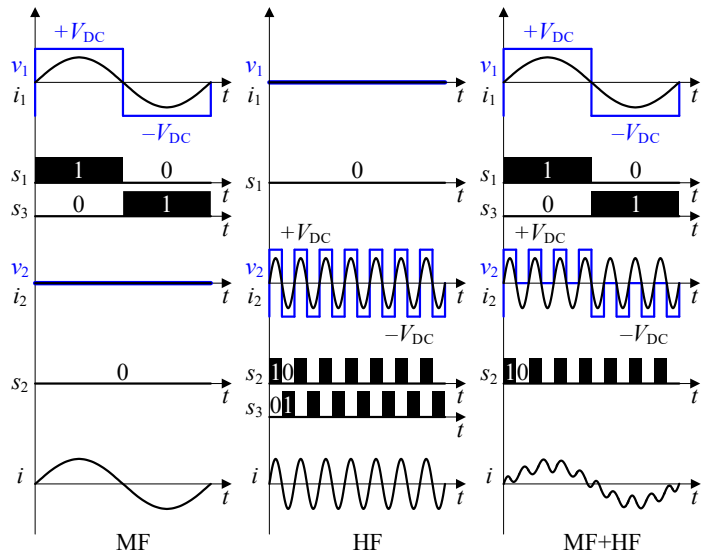
- Dwa półmostki tranzystorowe i jeden półmostek kondensatorowego.
- Półmostki tranzystorowe wykorzystywane są do generowania odpowiednio składowych MF i HF, a półmostek kondensatorowy jest wspólny dla obu tych składowych.
- Dla przypadków jednoczesnego (SDF) i sekwencyjnego (PDF) dwuczęstotliwościowego nagrzewania indukcyjnego falownik pracuje zawsze w konfiguracji półmostka tranzystorowego zarówno dla składowej MF, jak i dla składowej HF.



# Topologia 3T (PL439134A1)

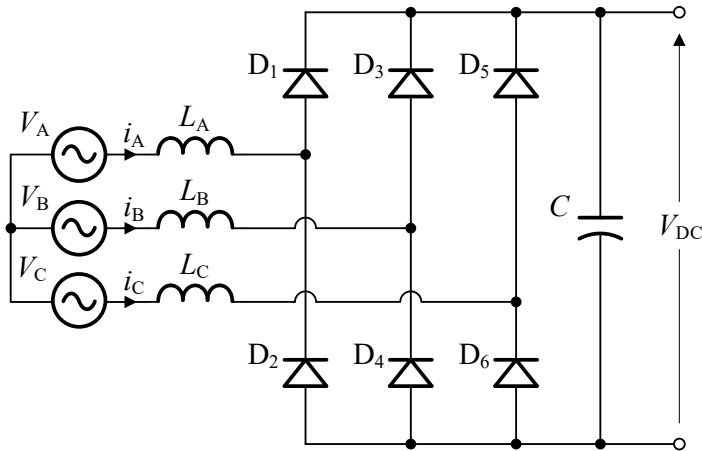


- Trzy półmostki tranzystorowe.
- Pierwsze dwa półmostki wykorzystywane są do generowania odpowiednio składowych MF i HF, a ostatni półmostek jest wspólny dla obu tych składowych.
- W przypadku jednoczesnego dwuczęstotliwościowego nagrzewania indukcyjnego (SDF) falownik pracuje w konfiguracji pełnego mostka tranzystorowego dla składowej MF oraz w konfiguracji półmostka dla składowej HF.
- W przypadku sekwencyjnego dwuczęstotliwościowego nagrzewania indukcyjnego (PDF) falownik pracuje w konfiguracji pełnego mostka tranzystorowego zarówno dla składowej MF, jak i dla składowej HF.



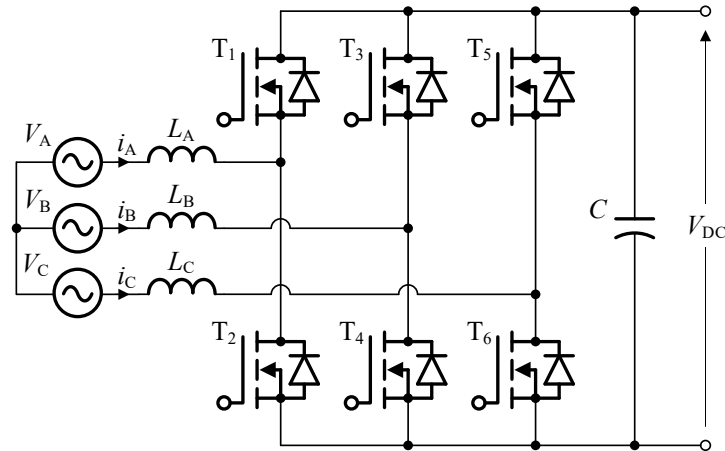
# Przekształtnik wejściowy AC/DC

## 3- $\Phi$ Diode Bridge Rectifier



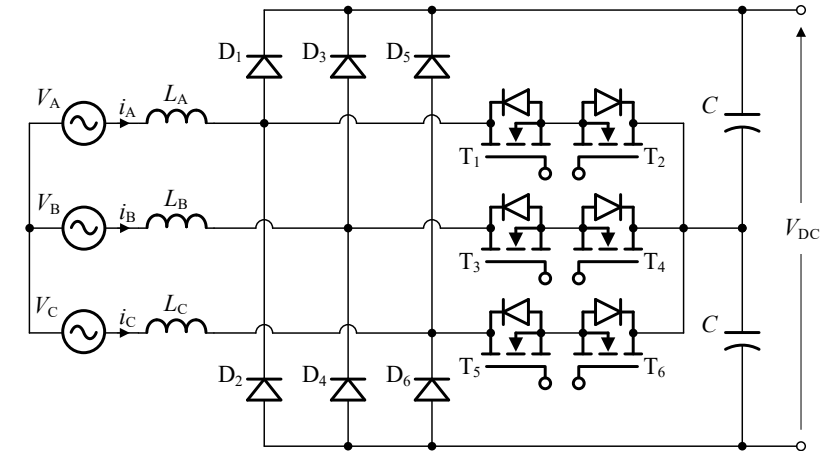
- + Brak sterowania
- + Względnie mała liczba elementów
- + Niska cena i wysoka niezawodność
- Brak kontroli napięcia wyjściowego
- Wysoki THD prądu wejściowego
- Niski współczynnik mocy

## 6-Switch Boost PFC Rectifier



- + Proste sterowanie
- + Względnie mała liczba elementów
- + 1 element w głównej ścieżce prądowej
- Tranzystory na 1200 V
- Topologia 2-poziomowa (EMI)
- Ryzyko zwarć skrośnych

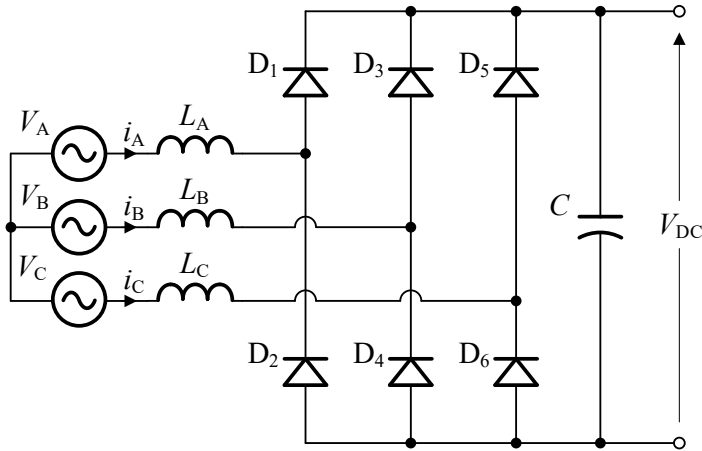
## Vienna Rectifier



- + Względnie mała liczba elementów
- + 1 element w głównej ścieżce prądowej
- + 3-poziomowa topologia
- + Brak ryzyka zwarć skrośnych
- Złożone sterowania
- Diody na 1200 V (SiC)

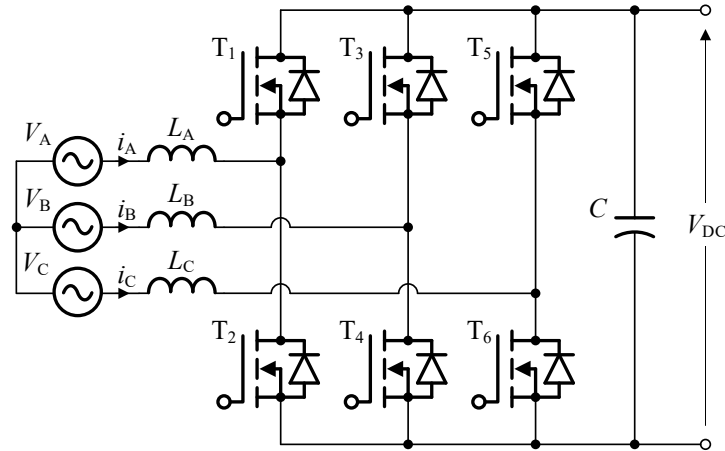
# Przekształtnik wejściowy AC/DC

## 3- $\Phi$ Diode Bridge Rectifier



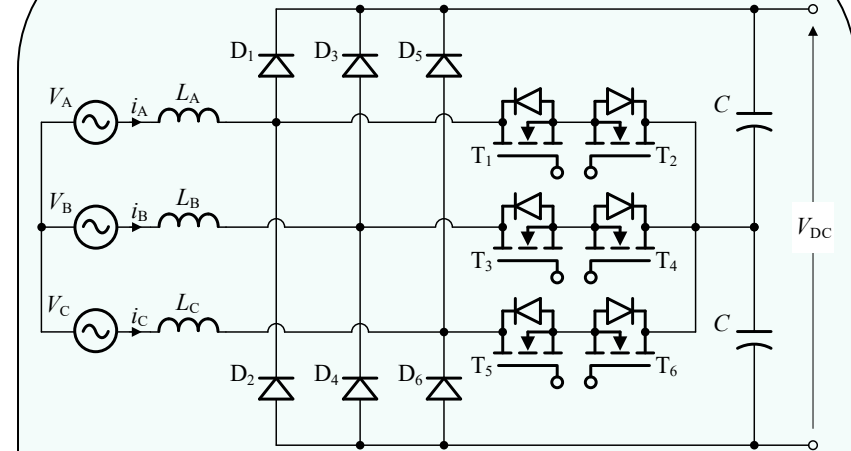
- + Brak sterowania
- + Względnie mała liczba elementów
- + Niska cena i wysoka niezawodność
- Brak kontroli napięcia wyjściowego
- Wysoki THD prądu wejściowego
- Niski współczynnik mocy

## 6-Switch Boost PFC Rectifier



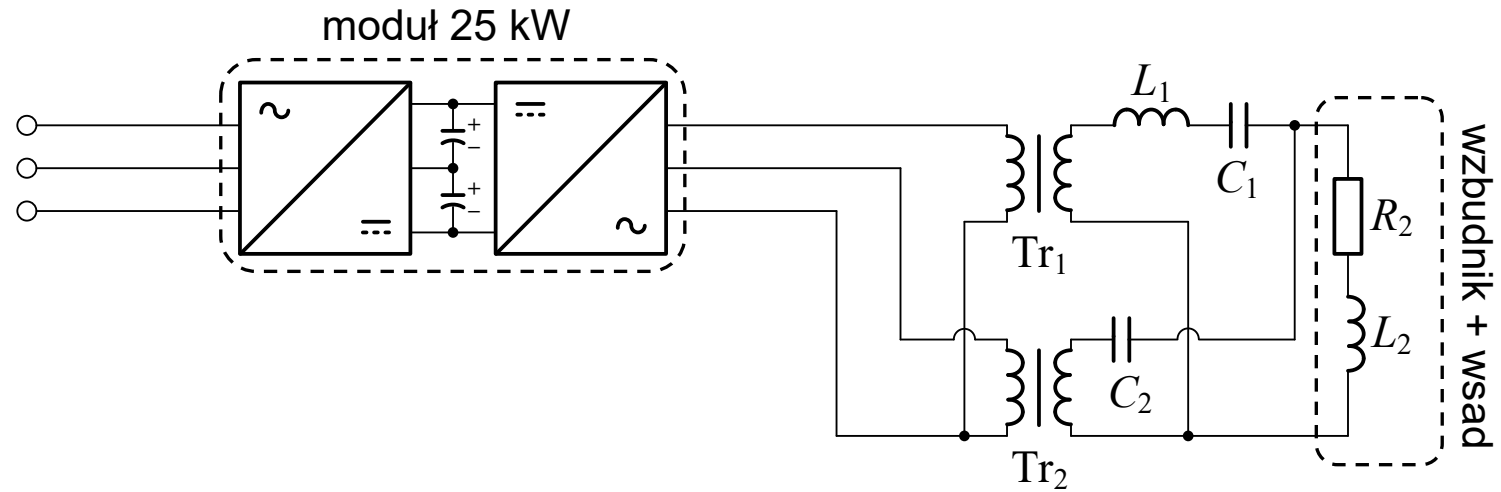
- + Proste sterowanie
- + Względnie mała liczba elementów
- + 1 element w głównej ścieżce prądowej
- Transzystory na 1200 V
- Topologia 2-poziomowa (EMI)
- Ryzyko zwarć skrośnych

## Vienna Rectifier

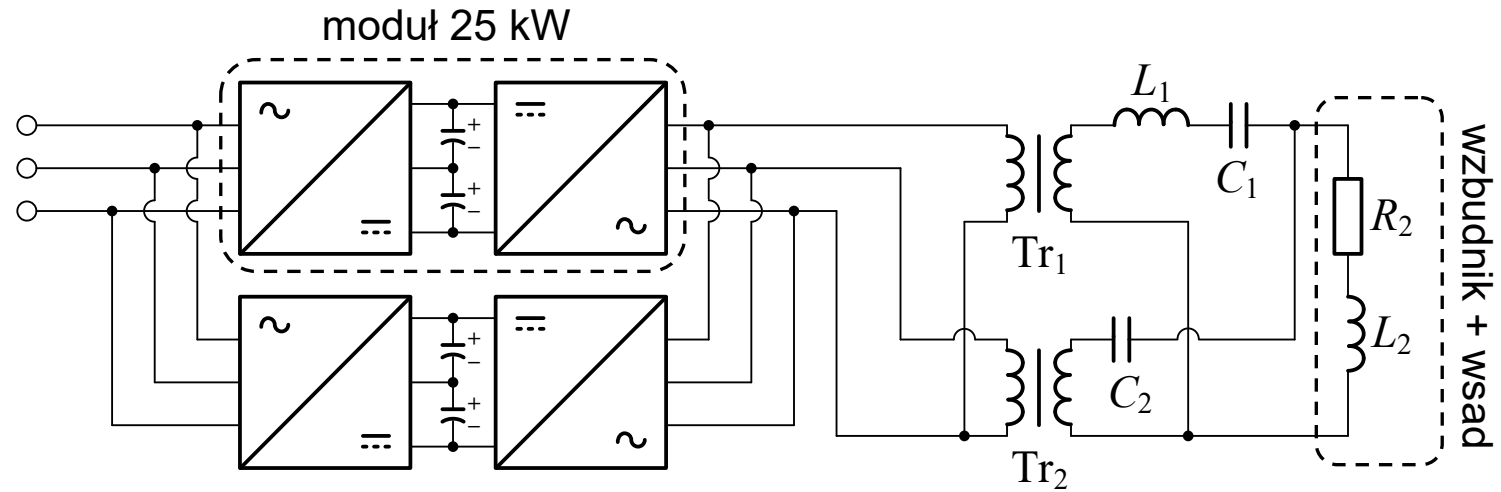


- + Względnie mała liczba elementów
- + 1 element w głównej ścieżce prądowej
- + 3-poziomowa topologia
- + Brak ryzyka zwarć skrośnych
- Złożone sterowania
- Diody na 1200 V (SiC)

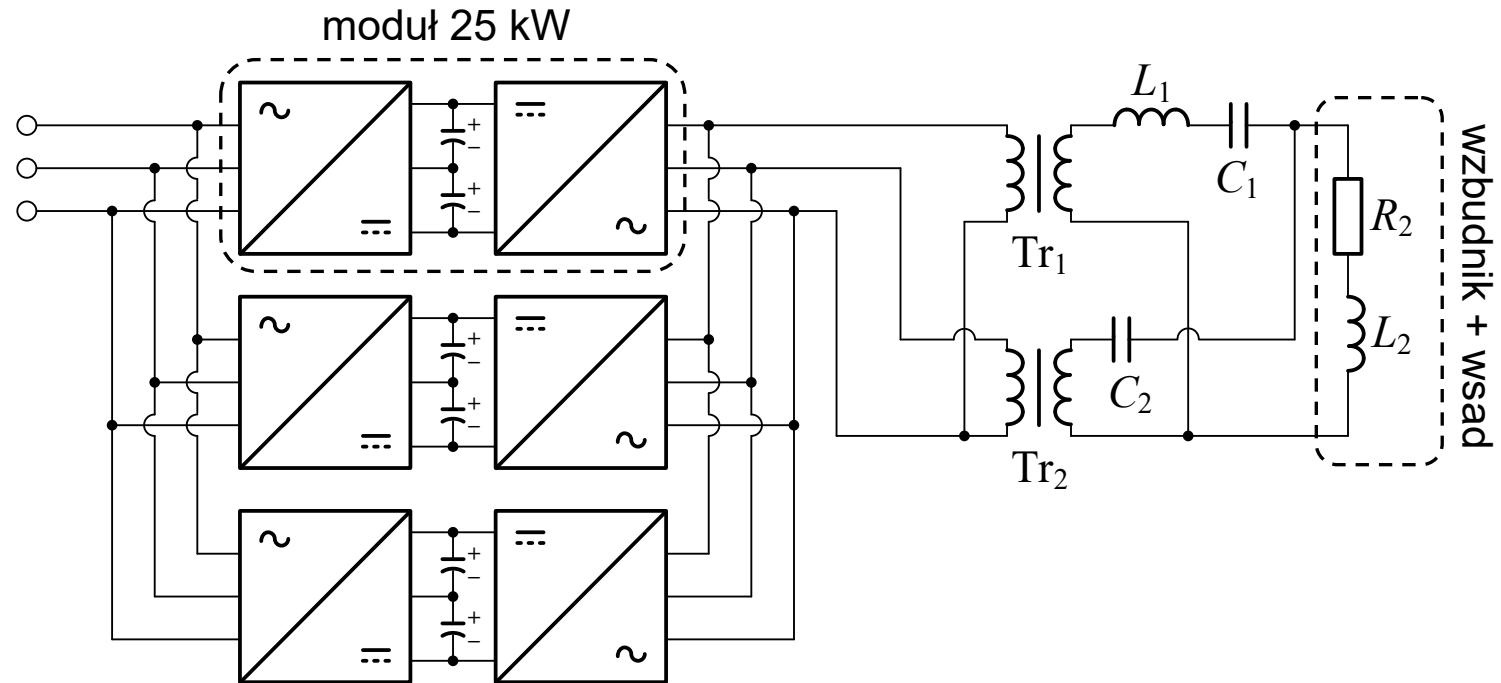
# Modułowość systemu



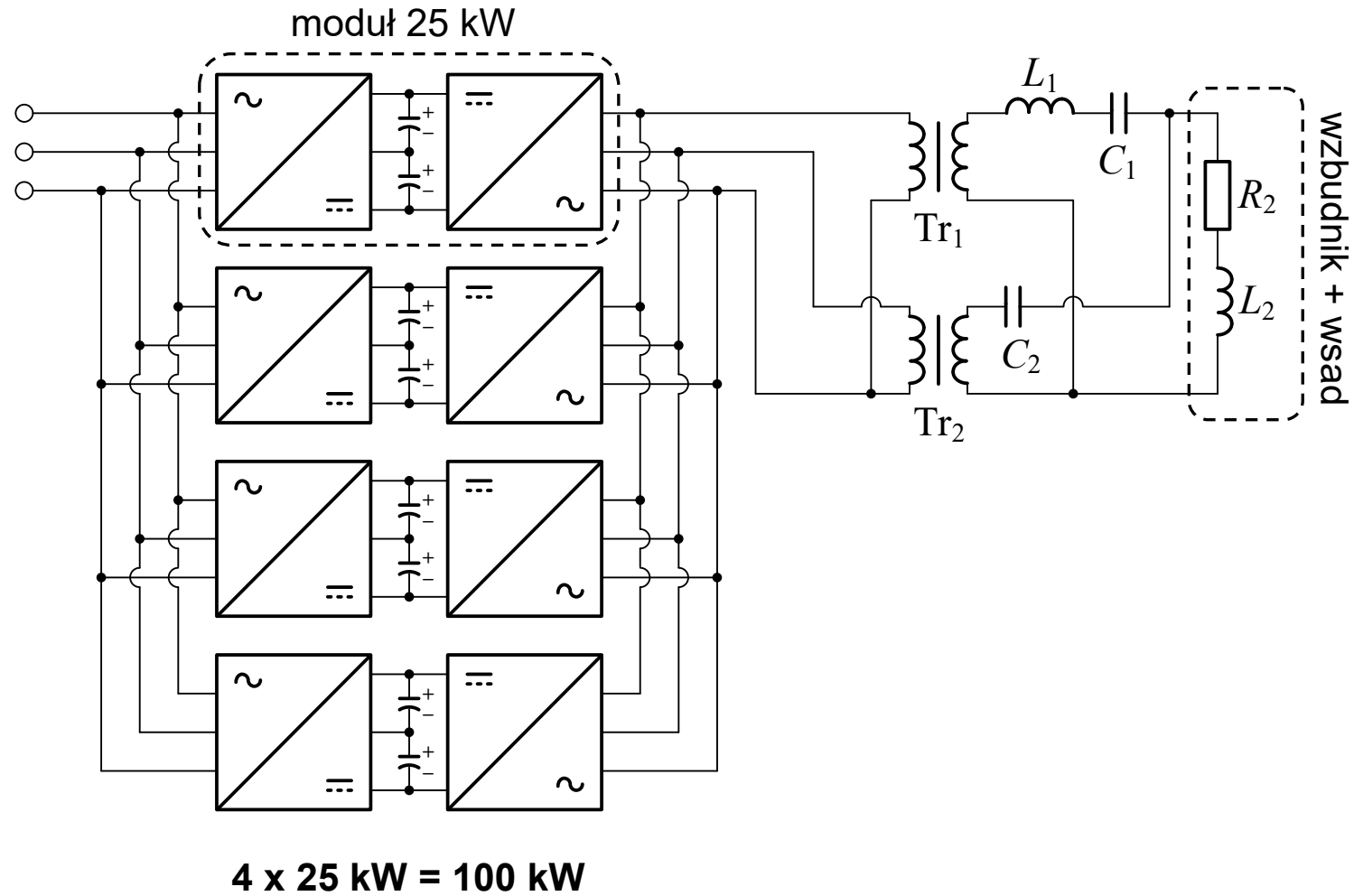
# Modułowość systemu



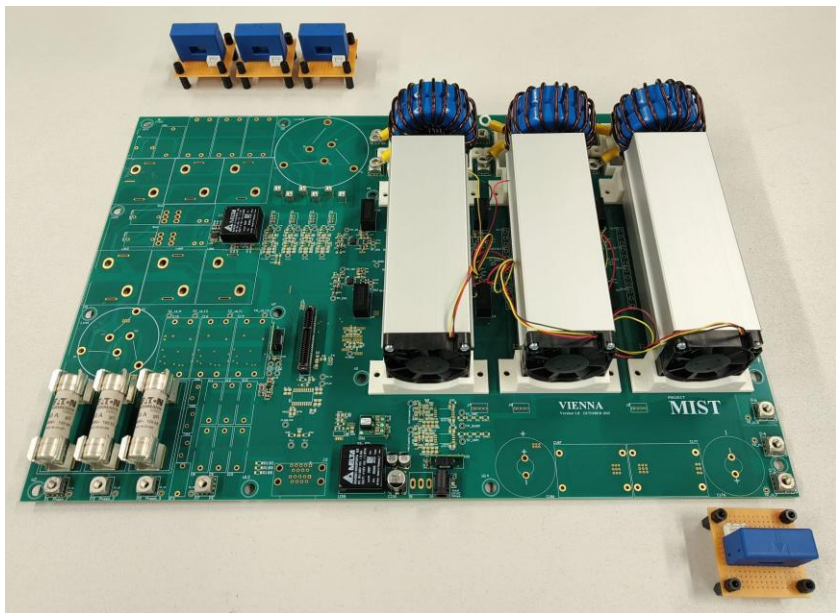
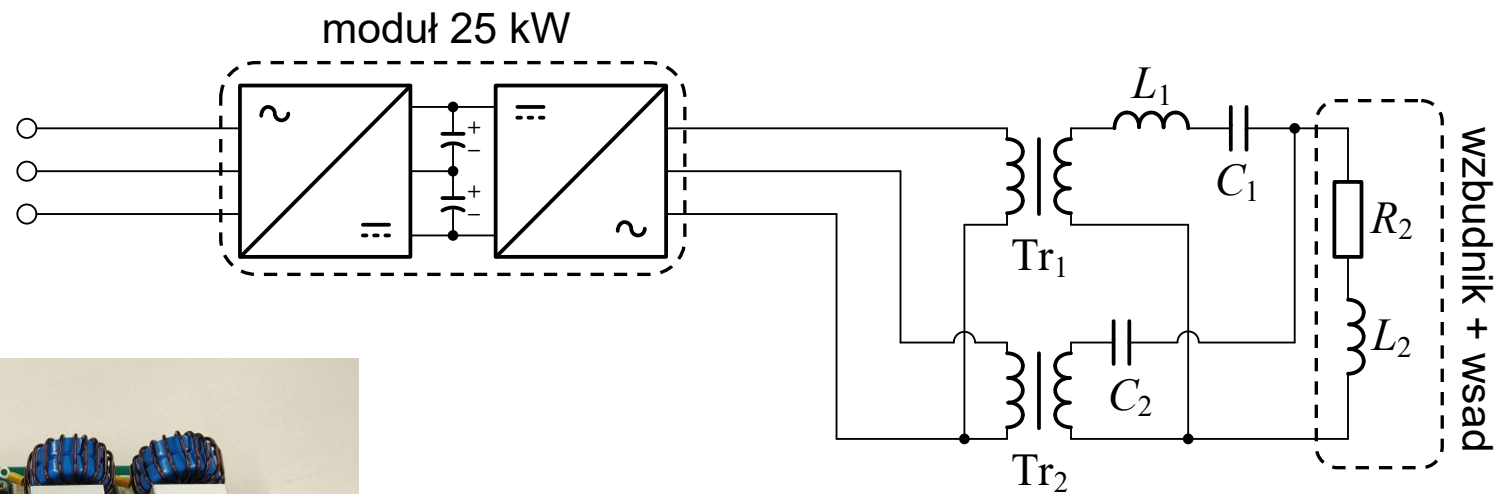
# Modułowość systemu



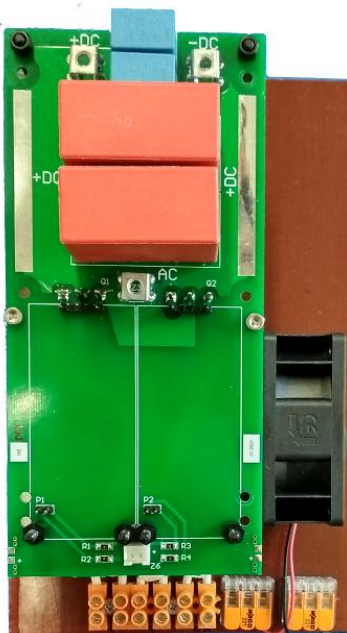
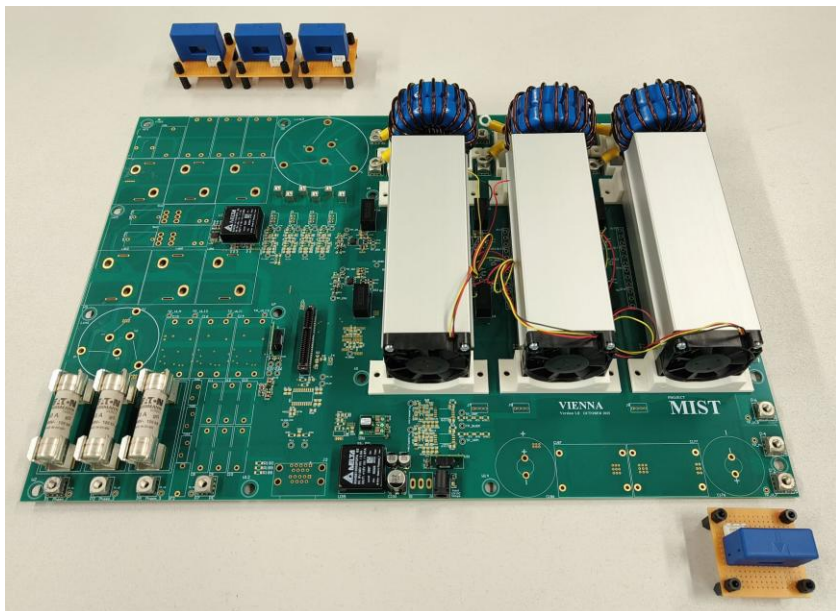
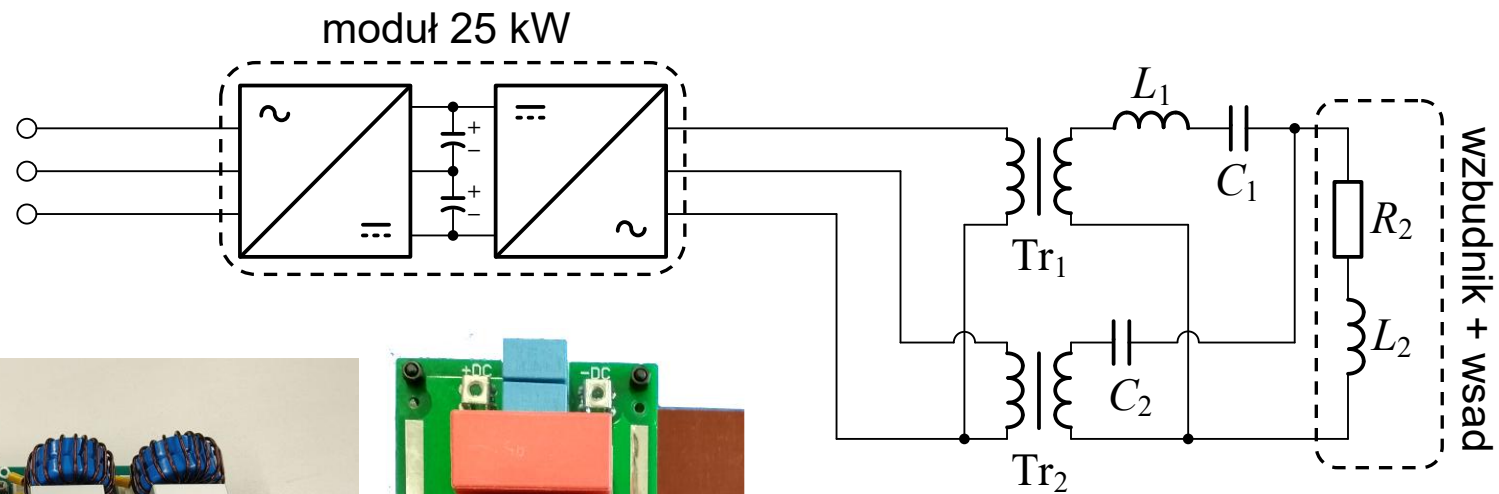
# Modułowość systemu



# Aktualny stan zaawansowania prac

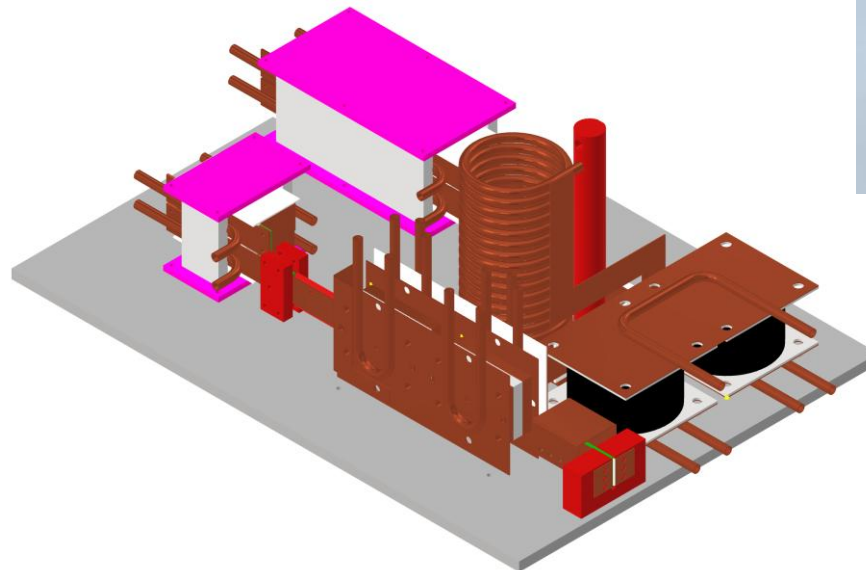
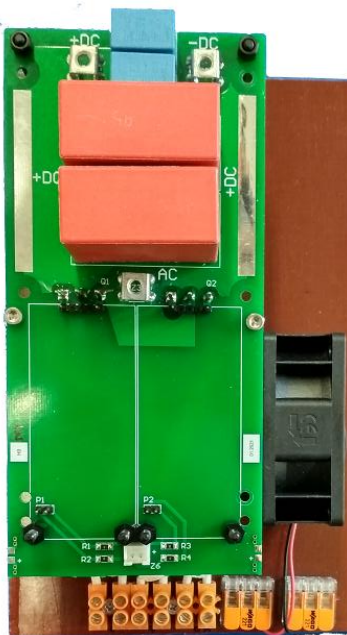
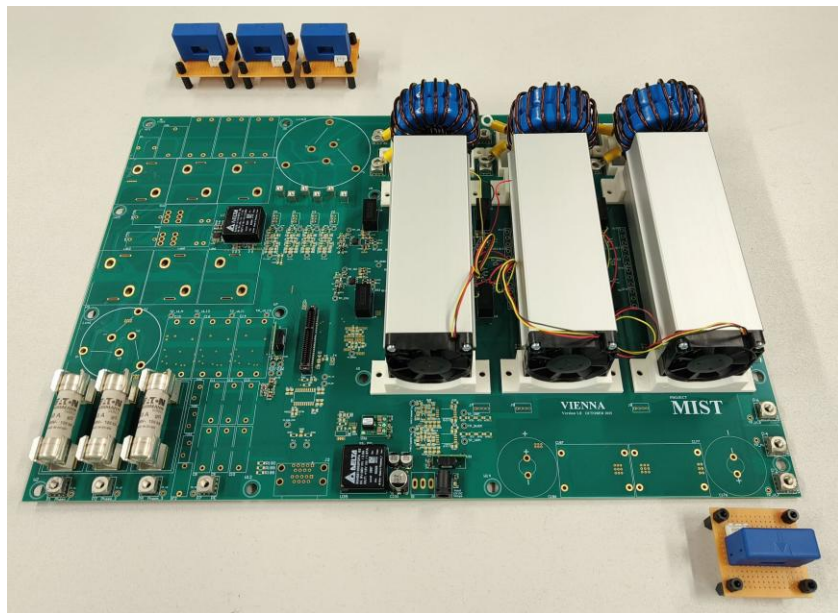
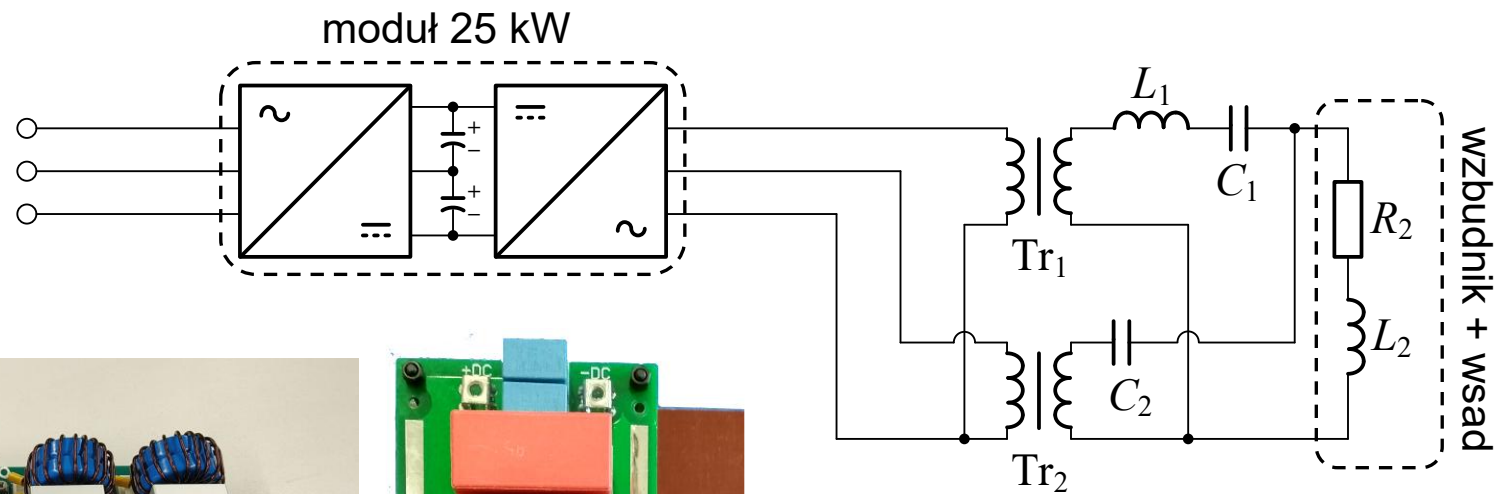


# Aktualny stan zaawansowania prac





# Aktualny stan zaawansowania prac



# 3. Podsumowanie

# Rezultaty projektu

Cecha rezultatu projektu	Korzyść / przewaga	Parametry techniczne
Możliwość hartowania jedno- i dwuczęstotliwościowego (SDF, PDF) zapewnia wymaganą głębokość utwardzenia.	Urządzenie bardziej uniwersalne, modułowe i dzięki temu tańsze.	Zakres częstotliwości prądu wyjściowego w granicach (10-30) kHz dla MF i (100-300) kHz dla HF oraz moc do 100 kW.

# Rezultaty projektu

Cecha rezultatu projektu	Korzyść / przewaga	Parametry techniczne
Możliwość hartowania jedno- i dwuczęstotliwościowego (SDF, PDF) zapewnia wymaganą głębokość utwardzenia.	Urządzenie bardziej uniwersalne, modułowe i dzięki temu tańsze.	Zakres częstotliwości prądu wyjściowego w granicach (10-30) kHz dla MF i (100-300) kHz dla HF oraz moc do 100 kW.
Możliwość hartowania za pomocą jednego urządzenia elementów o szerokim zakresie średnic (od 6 mm do 250 mm).	Szeroki zakres wielkości hartowanych elementów, daje korzyść w postaci zmniejszenia kosztów wdrożenia dla produkcji krótkoseryjnej.	Parametrem definiującym nowość rezultatu i jego przewagę na rynku jest szeroki zakres średnic (6 - 250 mm) elementów hartowanych.

# Rezultaty projektu

Cecha rezultatu projektu	Korzyść / przewaga	Parametry techniczne
Możliwość hartowania jedno- i dwuczęstotliwościowego (SDF, PDF) zapewnia wymaganą głębokość utwardzenia.	Urządzenie bardziej uniwersalne, modułowe i dzięki temu tańsze.	Zakres częstotliwości prądu wyjściowego w granicach (10-30) kHz dla MF i (100-300) kHz dla HF oraz moc do 100 kW.
Możliwość hartowania za pomocą jednego urządzenia elementów o szerokim zakresie średnic (od 6 mm do 250 mm).	Szeroki zakres wielkości hartowanych elementów, daje korzyść w postaci zmniejszenia kosztów wdrożenia dla produkcji krótkoseryjnej.	Parametrem definiującym nowość rezultatu i jego przewagę na rynku jest szeroki zakres średnic (6 - 250 mm) elementów hartowanych.
Możliwość uzyskiwania za pomocą jednego urządzenia szerokiego zakresu głębokości warstwy zahartowanej (od 0,5 mm do 6 mm).	Zmniejszenie kosztów wdrożenia dla produkcji krótkoseryjnej, jednym urządzeniem można obsłużyć cały zakres produkcji.	Parametrem definiującym nowość rezultatu i jego przewagę na rynku jest szerokość zakresu głębokości warstwy zahartowanej, którą określono na 0,5 - 6 mm.