

Projektowanie Urządzeń Elektronicznych Labolatorium

Dokumentacja techniczna projektu  
**Precyzyjne źródło prądowe sterowane napięciem**



Mateusz Mróz  
AGH, elektronika, 3 rok  
prowadzący: Cezary Worek, dr hab. inż., prof. AGH

# Spis treści

1. Wstęp .....	3
1.1 Założenia projektu .....	3
1.2 Schematy blokowe.....	4
1.3 Opis bloków schematu.....	5
1.3.1 Moduł Stamp .....	5
1.3.2 Moduł płyty bazowej .....	5
2. Moduł Stamp.....	6
2.1 Schematy .....	6
2.2 Opis rozwiązań.....	7
2.2.1 Układ filtracji zasilania.....	7
2.2.2 Rezystory diod LED .....	8
2.2.3 Zabezpieczenie linii zasilania .....	9
2.2.4 Bilans mocy.....	12
2.2.5 Konfiguracja pracy układu .....	13
2.2.6 Inne.....	13
2.3 BOM .....	14
2.4 PCB.....	15
3. Moduł płyty bazowej.....	18
3.1 Schematy .....	18
3.2 Opis rozwiązań.....	19
3.2.1 Stabilizator napięcia .....	19
3.2.2 Izolacja galwaniczna .....	20
3.2.3 Układ DAC.....	22
3.2.4 Układ źródła prądowego .....	23
3.2.5 Dobór radiatora .....	29
3.2.6 Sterowanie wentylatorem radiatora .....	31
3.2.7 Filtr wyjściowy DAC .....	33
3.2.8 Inne.....	34
3.3 BOM .....	35
3.4 PCB.....	36
4. Wizualizacja 3D .....	39
5. Literatura.....	40

# **1. Wstęp**

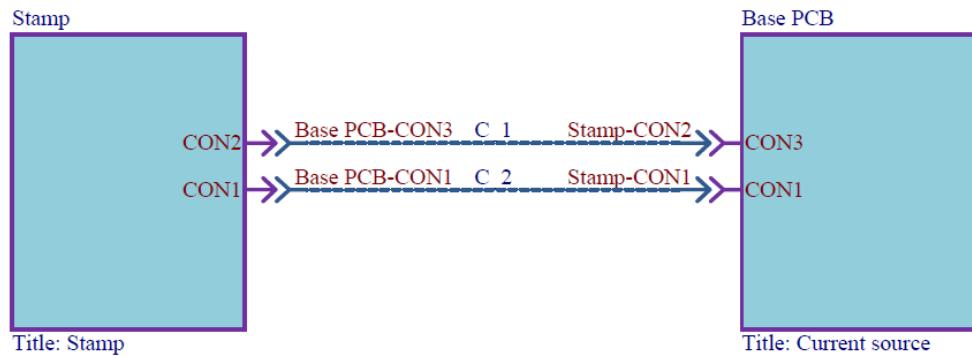
## **1.1 Założenia projektu**

Celem projektu jest stworzenie precyzyjnego źródła prądowego (kalibratora) sterowanego napięciem. Gotowy produkt musi spełniać poniższe wymagania:

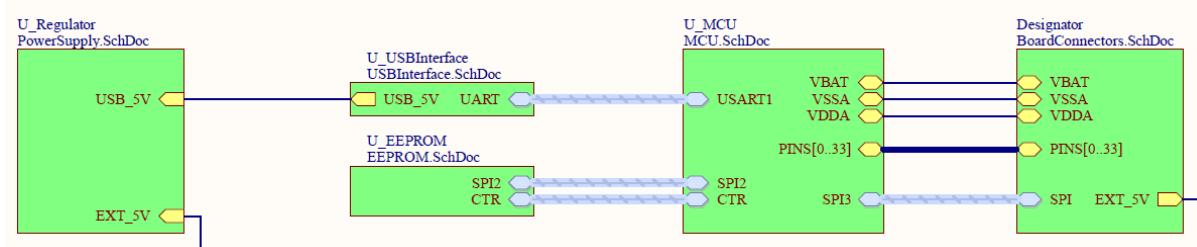
- Zasilanie układu z zewnętrznego źródła zapewniającego +- 15[V].
- Maksymalny prąd wyjściowy 5[A].
- Maksymalna rezystancja obciążenia 1[ $\Omega$ ].
- Cyfrowe sterowanie kształtem przebiegu wyjściowego.
- Komunikacja z układem za pomocą standardu USB.
- Wewnętrzna pamięć zawierająca konfigurację możliwych przebiegów wyjściowych.
- Projekt powinien umożliwiać pracę z możliwie wysoką częstotliwością.

## 1.2 Schematy blokowe

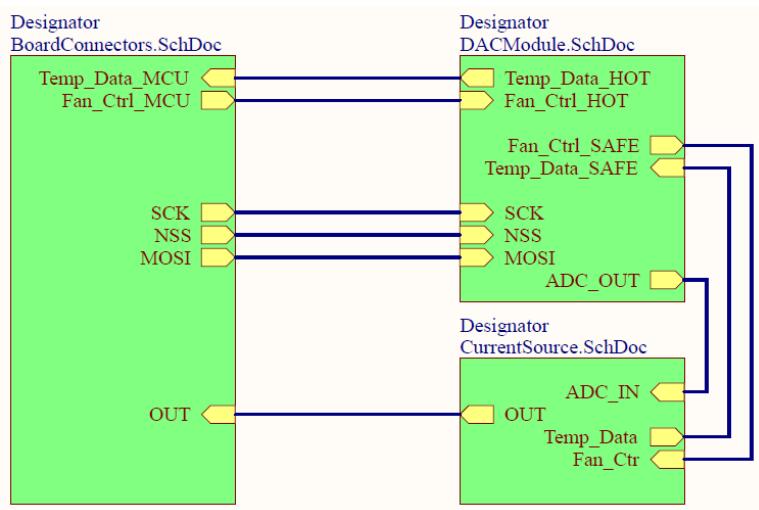
Schemat blokowy układu:



Schemat blokowy modułu *Stamp*:



Schemat blokowy płyty bazowej:



## 1.3 Opis bloków schematu

### 1.3.1 Moduł Stamp

- „**PowerSupply**”  
Blok zawiera układ zabezpieczający przed odwrotną polaryzacją napięcia zasilania oraz zbyt wysokim napięciem zasilania dostarczanego z zewnątrz, zrealizowany jest on wokół tranzystora PMOS. Znajduje się tu również stabilizator napięcia 3.3[V] dla układów logicznych oraz zworka umożliwiającą wybór źródła zasilania (zewnętrzne źródło lub zasilanie ze złącza USB). Obecność napięcia zasilania jest wskazywana poprzez zapalenie się diody LED.
- „**USBInterface**”  
Blok zawiera układ konwertera USB-UART, status transmisji jest wskazywany przez dwie diody LED (receive i transmit).
- „**EEPROM**”  
Blok zawiera układ pamięci EEPROM.
- „**MCU**”  
Blok zawiera mikrokontroler wraz z układami filtracji linii zasilania, przyciskiem resetu, układem zegara, złączem do programowania oraz zworki pozwalające wybrać źródło napięć zasilających układ mikroprocesora.
- „**BoardConnectors**”  
Blok zawiera złącza umożliwiające podłączenie modułu do zewnętrznych układów

### 1.3.2 Moduł płyty bazowej

- „**BoardConnectors**”  
Blok zawiera złącza, służące do połączenia modułu *Stamp* z płytą bazową oraz złącze pozwalające na podłączenie napięcia zasilania +15[V] oraz wyjście układu. Ponadto znajduje się tutaj stabilizator napięcia 5[V].
- „**DACModule**”  
Blok zawiera układy realizujące funkcję izolacji galwanicznej pomiędzy modułem *Stamp*, a wysoko-prądową częścią płyty bazowej. Znajduje się tutaj również przetwornik DAC wraz z filtrem dolnoprzepustowym.
- „**CurrentSource**”  
Blok zawiera układ źródła prądowego sterowanego napięciem, czujnik temperatury radiatora, oraz układ sterowania wiatrakiem znajdującym się na radiatorze.

## **2. Moduł Stamp**

### **2.1 Schematy**

Ze względu na rozmiar, arkusze ze schematami zaczynają się od kolejnej strony:

A

A

B

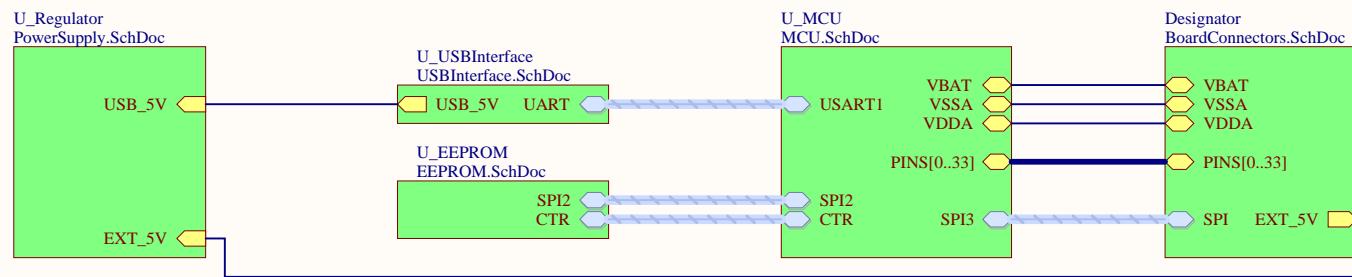
B

C

C

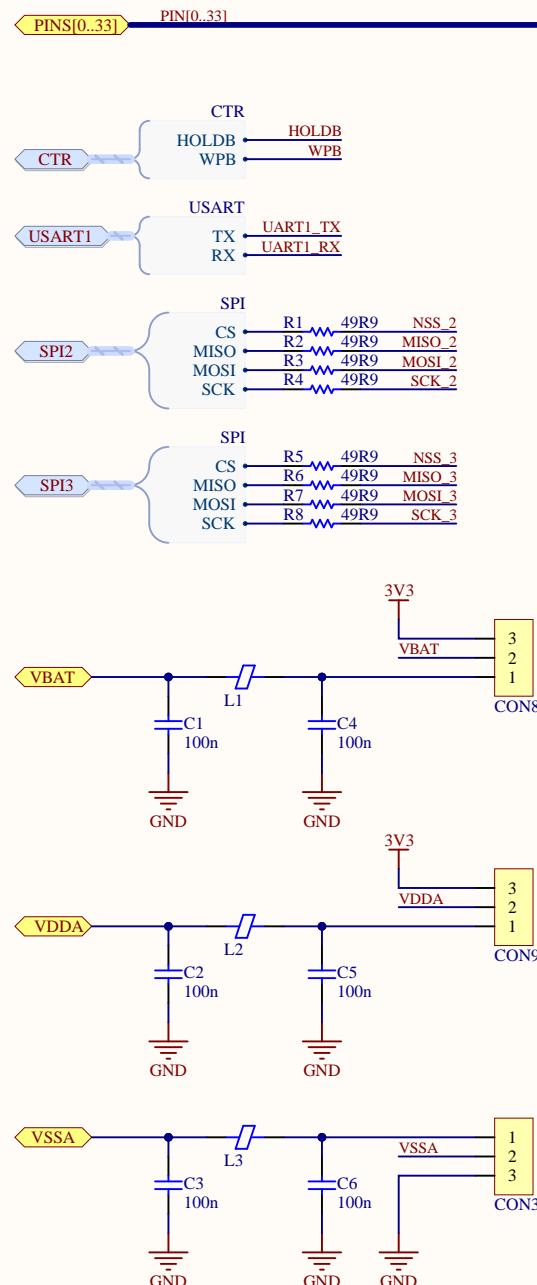
D

D



University name: AGH  
 Degree course: 3th year electronics  
 Course: PUE  
 Checked by: dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH  
 Author: Mateusz Mróz  
 Student Index: 305093

Date: 07.06.2021  
 Sheet/all: 1/6  
 Project name: Stamp.PrjPcb  
 Document name: Main.SchDoc  
 Variant name: [No Variations]  
 Version number: 1264



University name: AGH  
Degree course: 3th year electronics  
Course: PUE  
Checked by: dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH  
Author: Mateusz Mróz  
Student Index: 305093

Date: 07.06.2021  
Sheet/all: 2/6

Project name: Stamp.PprPcb  
Document name: MCU.SchDoc  
Variant name: [No Variations]  
Version number: 1264

A

B

C

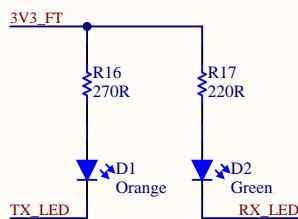
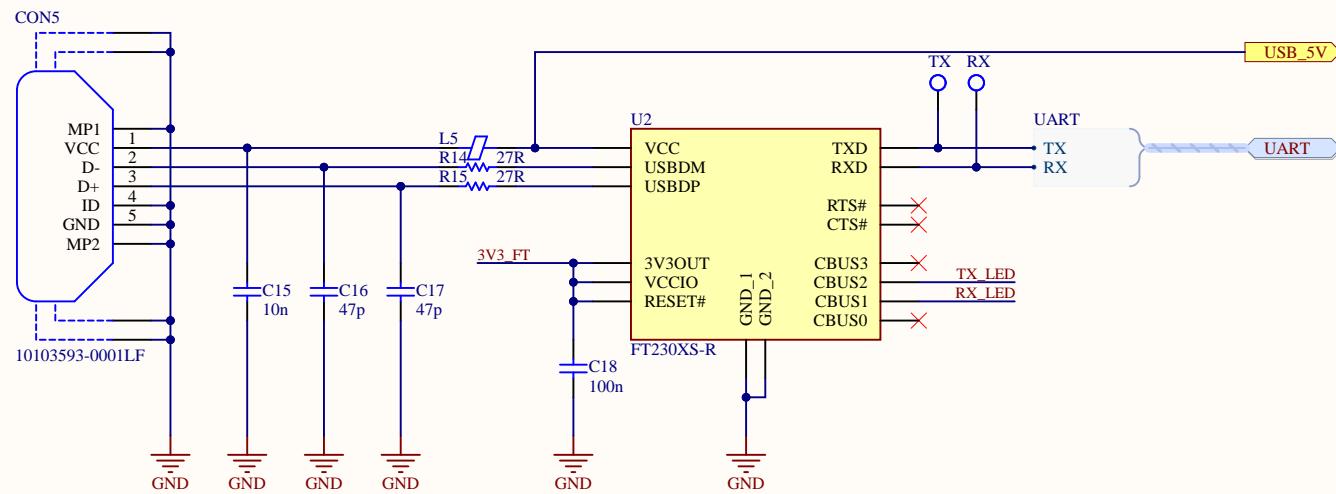
D

A

B

C

D



University name: AGH  
Degree course: 3th year electronics  
Course: PUE  
Checked by: dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH  
Author: Mateusz Mróz  
Student Index: 305093

Date: 07.06.2021  
Sheet/all: 3/6

Project name: Stamp.PrjPcb  
Document name: USBInterface.SchDoc  
Variant name: [No Variations]  
Version number: 1264

A

B

C

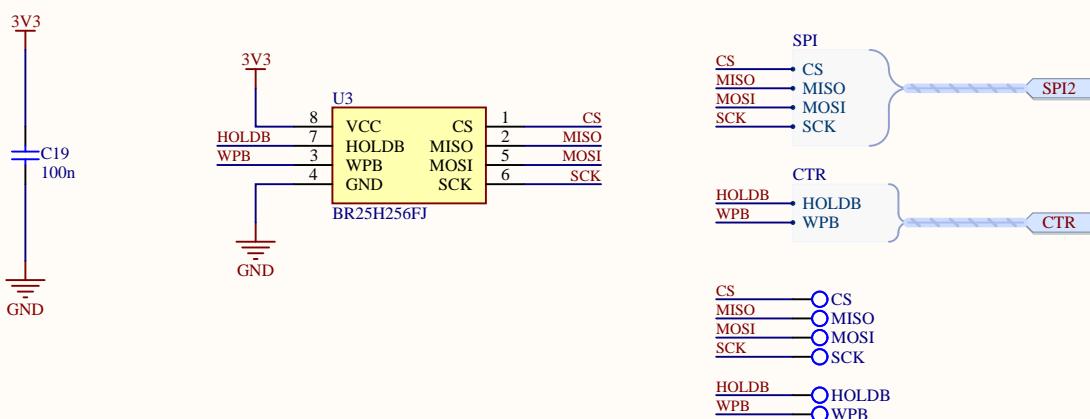
D

A

B

C

D

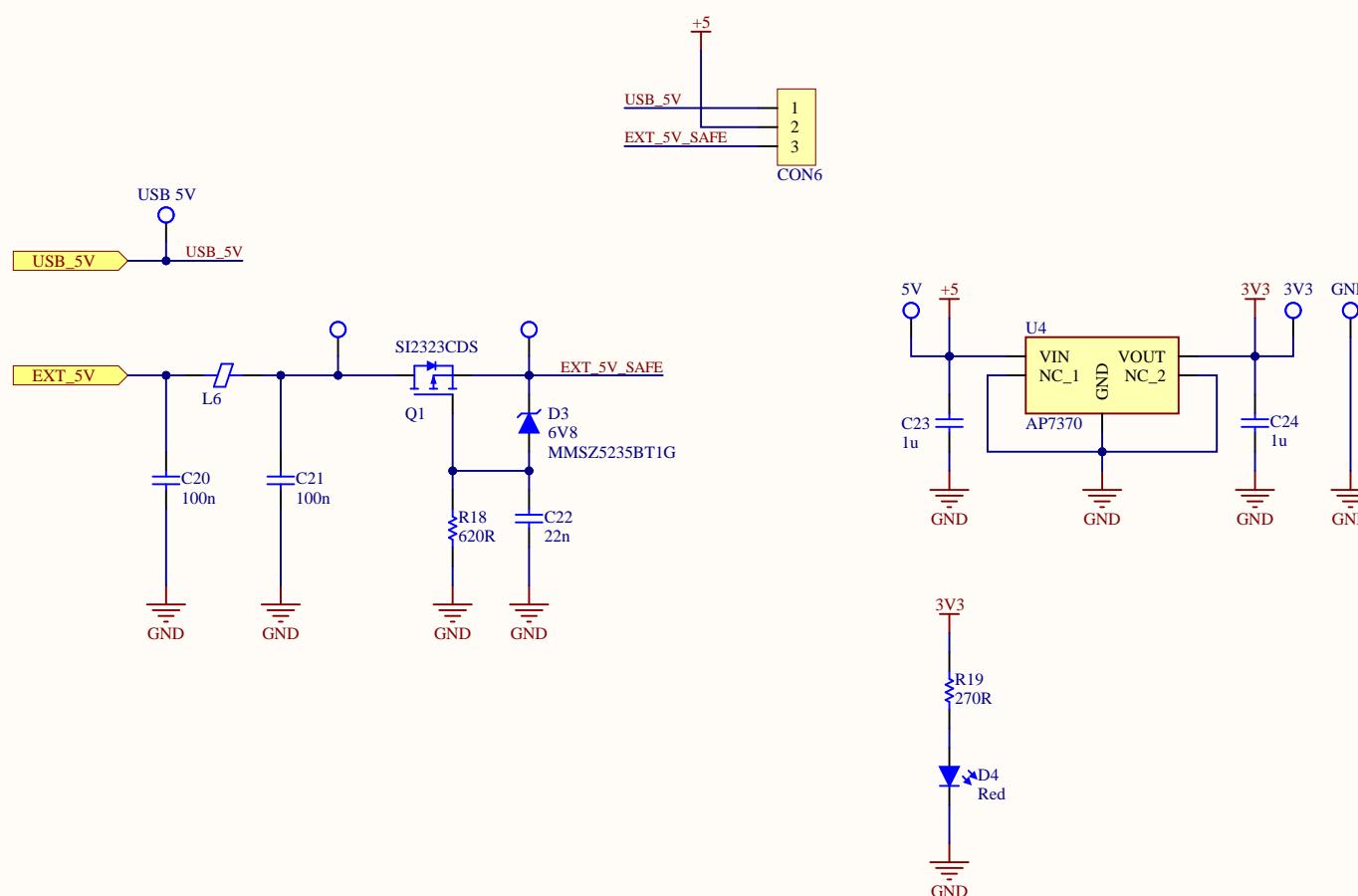


University name: AGH  
Degree course: 3th year electronics  
Course: PUE  
Checked by: dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH  
Author: Mateusz Mróz  
Student Index: 305093

Date: 07.06.2021  
Sheet/all: 4/6

Project name: StampPrjPcb  
Document name: EEPROM.SchDoc  
Variant name: [No Variations]  
Version number:

A



B

C

D

A

B

C

D

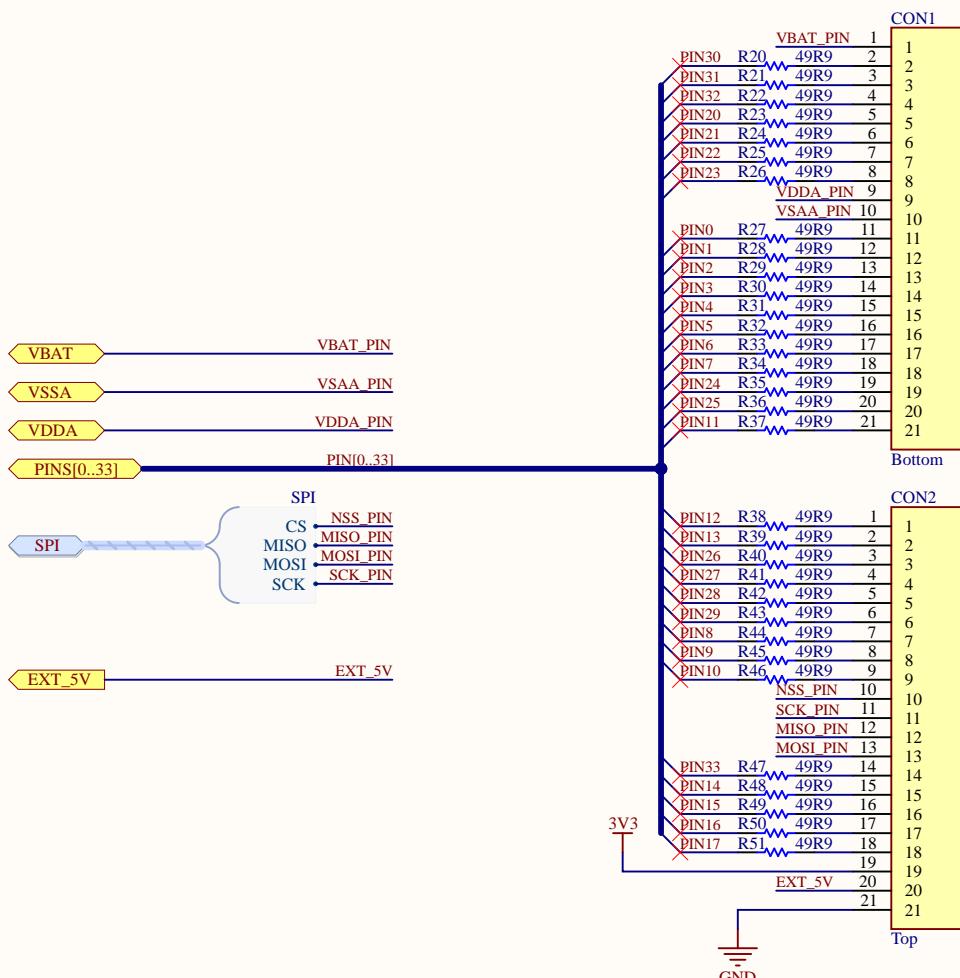


University name: AGH  
Degree course: 3th year electronics  
Course: PUE  
Checked by: dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH  
Author: Mateusz Mróz  
Student Index: 305093

Date: 07.06.2021  
Sheet/all: 5/6

Project name: Stamp.PrjPcb  
Document name: PowerSupply.SchDoc  
Variant name: [No Variations]  
Version number:

A



B

C

D

A

B

C

D



University name: AGH  
Degree course: 3th year electronics  
Course: PUE  
Checked by: dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH  
Author: Mateusz Mróz  
Student Index: 305093

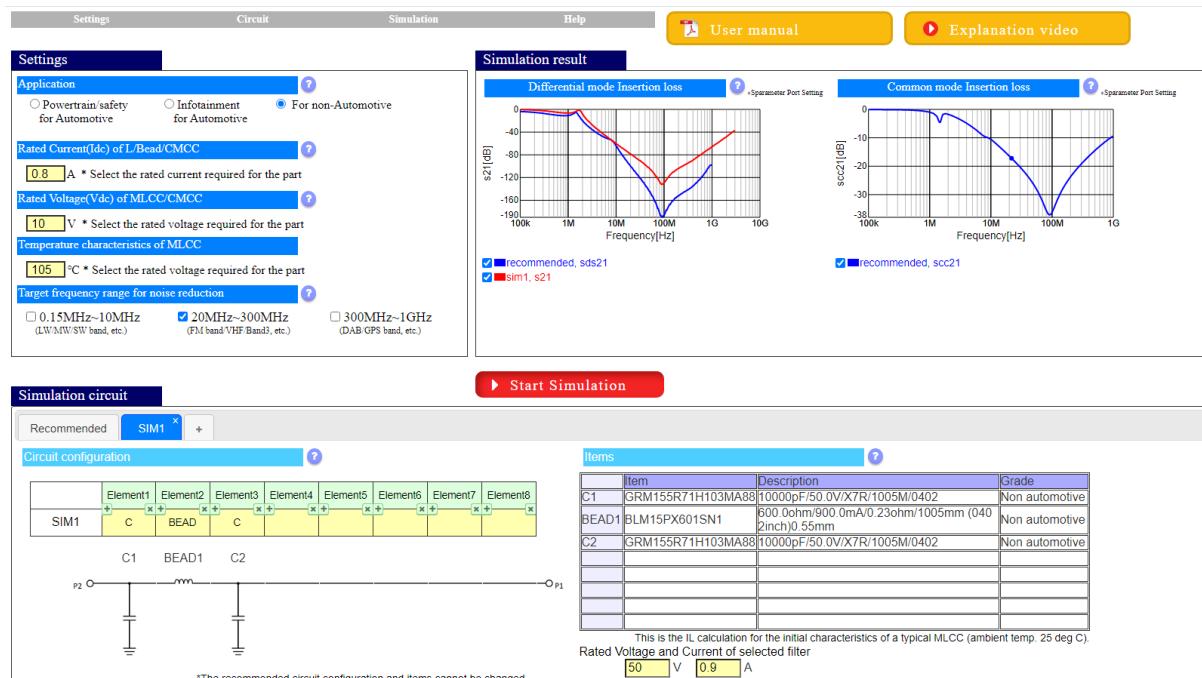
Date: 07.06.2021  
Sheet/all: 6/6

Project name: Stamp.PnjPcb  
Document name: BoardConnectors.SchDoc  
Variant name: [No Variations]  
Version number:

## 2.2 Opis rozwiązań

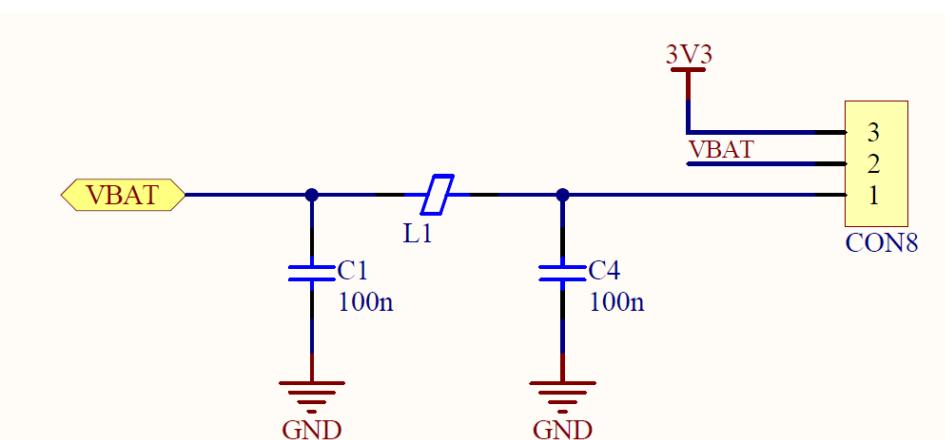
### 2.2.1 Układ filtracji zasilania

Układ filtracji linii zasilania służy do eliminacji zakłócających pracę układów wysokoczęstotliwościowych składowych napięcia. Mogą one powodować ciężkie do wykrycia zachowania układów np. mikro-procesora. Do symulacji wykorzystano narzędzie udostępnione przez firmę Murata:

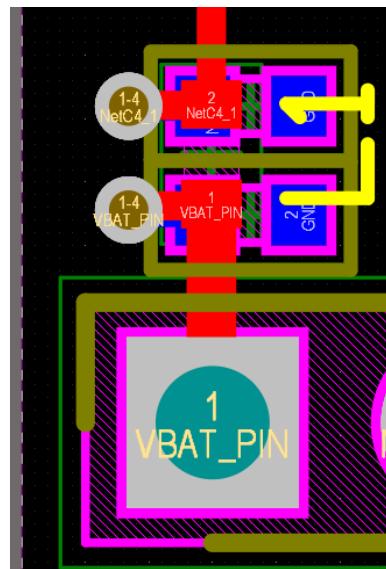


Zastosowano elementy podane w wyniku symulacji. Maksymalne napięcie pracy to 50[V] (maksymalne przewidywane na wejściu to 10[V]), zaś maksymalny prąd to 0.9[A] (wyznaczony w kolejnym podpunkcie bilans prądu wynosi 57[mA]) co daje spory zapas.

Przykład filtru na schemacie:



Filtry na płytce PCB są umieszczone jak najbliżej wejścia, w celu maksymalnego zmniejszenia możliwości propagacji zakłóceń. Przykład:

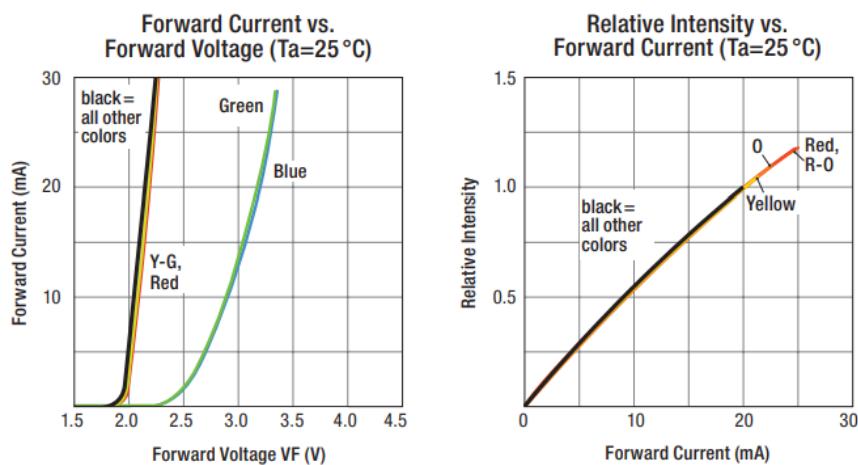


## 2.2.2 Rezystory diod LED

Wybrane diody LED pochodzą z serii 599 firmy Dialight:



Pożądany prąd diod został wyznaczony na ok. 5[mA], na podstawie danych zawartych w karcie katalogowej:



Tak wybrana wartość natężenia prądu pozwala na uzyskanie ok. 25% maksymalnego możliwego natężenia światła i znalezienie się w miarę liniowej części charakterystyki prądowo napięciowej diody.

Dla podanego prądu napięcia przewodzenia diod wynoszą:

- czerwona: 2,0[V],
- pomarańczowa: 2,0[V],
- zielona: 2,2[V]

Wzór na wartość rezystancji wynosi:

$$R = \frac{V_{sup} - V_{F\_LED}}{I_{F\_LED}}$$

gdzie:

$V_{sup}$  – supply (napięcie zasilania)

$V_{F\_LED}$ ,  $I_{F\_LED}$  – forward (napięcie/prąd przewodzącego złącza)

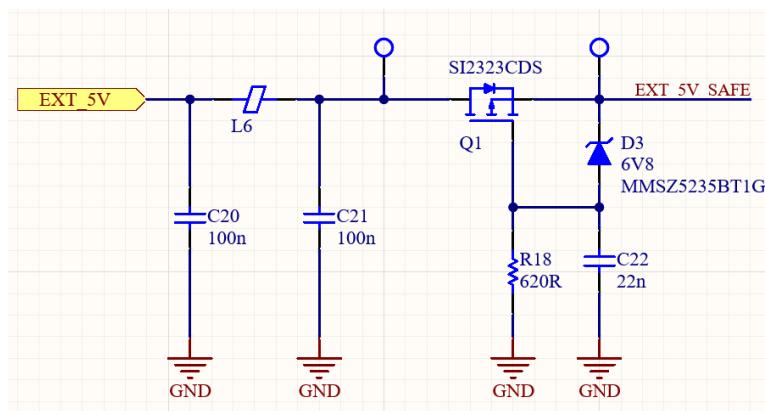
Wyliczone wartości rezystorów (typoszereg E24) dla napięcia zasilania 3,3[V] i prądu diod 5[mA]:

- czerwona: 270[Ω],
- pomarańczowa: 270[Ω],
- zielona: 220[Ω]

Wybrano rezystory z 1% tolerancją i mocą znamionową 400[mW].

## 2.2.3 Zabezpieczenie linii zasilania

Układ powinien posiadać zabezpieczenie przeciw odwrotną polaryzacją napięcia zasilania oraz zbyt wysokim napięciem zasilania dostarczanego z zewnątrz. Te zadania realizuje poniższy układ ( dodatkowo widać układ filtracji linii zasilania):



Najważniejsze parametry tranzystora (odczytane z karty katalogowej):

- max. ciągły prąd drenu: 5[A] (dla T=70°),
- rezystancja kanału: 0,039[Ω] (dla V<sub>gs</sub> = -4,5V),
- maksymalne napięcie wsteczne V<sub>gs</sub>: +- 8[V]

Jako maksymalne dopuszczalne napięcie wejściowe wybrano wartość 6.8 [V]. W celu zabezpieczenia wykorzystano diodę Zenera. Dodatkowo chroni ona złącze GS tranzystora przed nadmiernym napięciem mogącym spowodować uszkodzenie.

Do wyliczenia wartości rezystora wykorzystano wzór:

$$R = \frac{V_{IN} - V_Z}{I_Z}$$

gdzie:

$V_{IN}$  – napięcie wejściowe

$V_Z, I_Z$  – napięcie/prąd Zenera

Potrzebne wartości:

- maksymalne napięcie wejściowe jakie pojawi się w najgorszym przypadku na wejściu: 10[V],
- napięcie Zenera: 6.8[V],
- $I_Z$  dla którego podawane jest w karcie katalogowej napięcie Zenera to 10[mA], jednak można zastosować mniejszy prąd zgodnie z wykresem zamieszczonym w karcie katalogowej (zależność napięcia Zenera od prądu jest praktycznie liniowa dla wybranej diody):

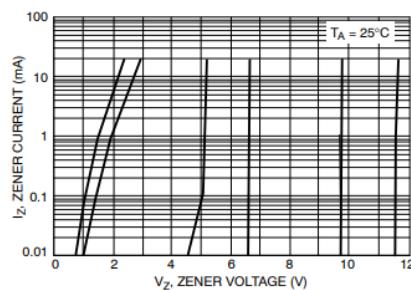
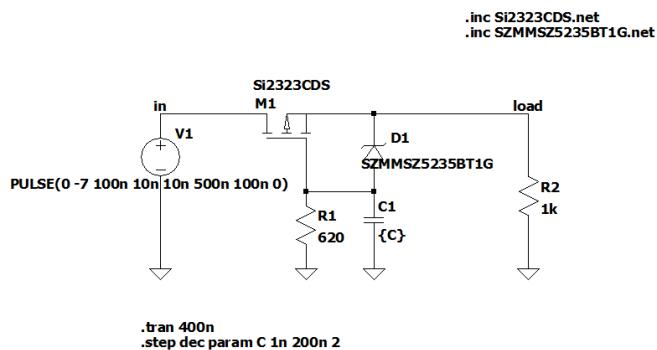


Figure 9. Zener Voltage versus Zener Current  
( $V_Z$  Up to 12 V)

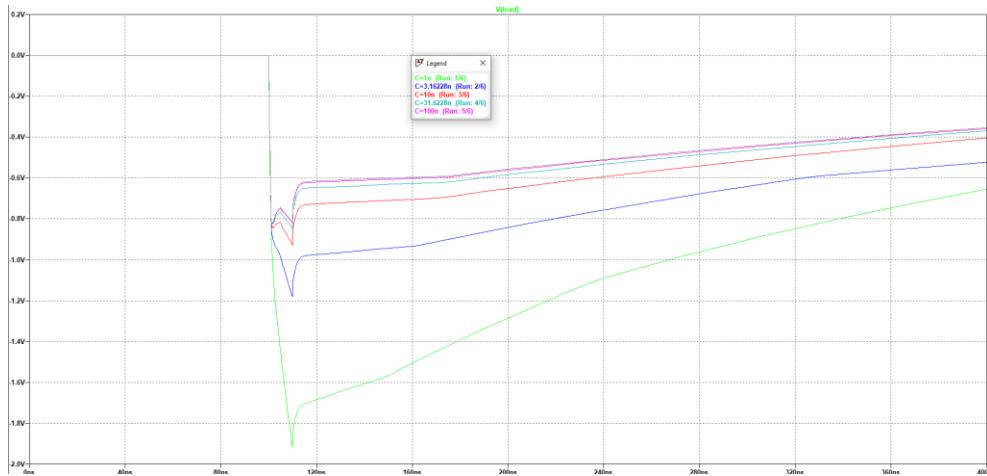
Wybrano więc  $I_Z = 5[\text{mA}]$ .

Wyliczona wartość rezystancji to  $R = 620[\Omega]$ .

Kondensator pozwala na szybszą pracę układu poprzez rozładowywanie pojemności bramka – źródła tranzystora w sytuacji nagłej zmiany napięcia wejściowego. Zbyt duża wartość tego kondensatora może jednak powodować przepływ zbyt dużego prądu w stanach nieustalonych przez co uszkodzić lub zmniejszyć żywotność półprzewodników w danym układzie. W celu wyznaczenia jego wartości skorzystano z symulacji LTspice:

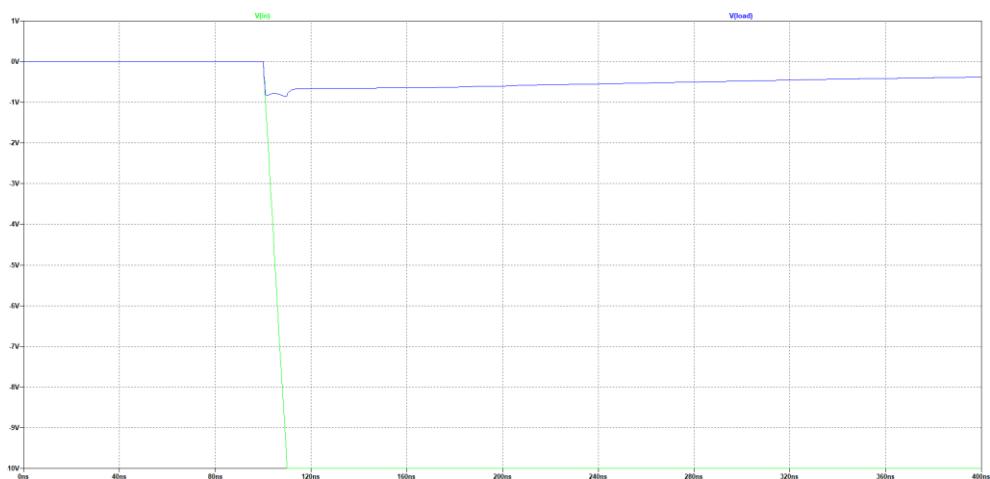


Wykorzystane zostały modele wybranych półprzewodników udostępnione przez producentów oraz wyliczona wcześniej wartość rezystora. Następnie została wykonana analiza parametryczna dla szukanej pojemności, wynik:



Na podstawie symulacji wybrano wartość pojemności  $22[\text{nF}]$ .

Symulacja potwierdza działanie układu dla wybranych parametrów:



Wybrano kondensator ceramiczny z dielektrykiem X7R, tolerancji 10% i max. napięciu pracy  $100[\text{VDC}]$  oraz rezistor o tolerancji 1% i mocy  $100[\text{mW}]$  (symulacja wskazała na maksymalną moc wydzieloną na rezystorze na  $1[\text{mW}]$ ).

## 2.2.4 Bilans mocy

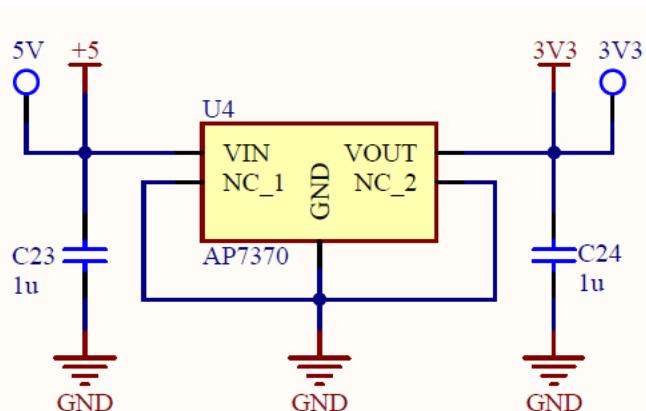
Wyliczony został przypadek maksymalnego poboru mocy, tzn. wszystkie układy logiczne działają i znajdują się w stanie pracy. Najbardziej złożonym do analizy poboru mocy układem jest mikrokontroler, skorzystano więc z najgorszego przypadku wykorzystania wszystkich modułów peryferyjnych w najwyższej możliwej częstotliwości pracy:

Table 29. Typical and maximum current consumption from VDD supply at VDD = 3.6V

Symbol	Parameter	Conditions	$f_{HCLK}$	All peripherals enabled			All peripherals disabled			Unit	
				Typ	Max @ $T_A^{(1)}$			Typ	Max @ $T_A^{(1)}$		
					25 °C	85 °C	105 °C		25 °C	85 °C	
$I_{DD}$	Supply current in Run mode, executing from Flash	External clock (HSE bypass)	72 MHz	45.7	48.6	50.0	52.0	25.5	27.5	28.1	28.8
			64 MHz	40.6	43.6	44.5	46.4	22.7	24.6	25.2	25.9
			48 MHz	30.8	33.6	34.1	35.5	17.3	19.0	19.5	20.0
			32 MHz	21.0	22.9	23.5	25.6	11.7	13.2	13.7	14.1
			24 MHz	16.0	16.8	18.0	18.9	9.0	10.4	10.8	11.4
			8 MHz	5.4	5.6	6.1	7.2	3.3	3.3	3.8	4.2
			1 MHz	1.1	1.2	1.7	2.7	0.8	0.9	1.3	1.6
		Internal clock (HSI)	64 MHz	37.6	41.3	42.9	44.7	22.5	24.7	25.0	25.8
			48 MHz	28.7	32.3	33.1	34.0	17.2	19.1	19.4	19.6
			32 MHz	19.5	22.0	23.4	24.6	11.5	12.9	13.5	13.7
			24 MHz	14.9	16.6	17.9	18.4	6.0	7.0	7.4	7.9
			8 MHz	5.2	5.5	6.4	7.0	3.2	3.8	4.3	4.7

Linia 3.3[V]	
Komponent	Pobór prądu [mA]
Pamięć EEPROM	2
LED	5
MCU	50
Suma	57

Wybrany stabilizator napięcia posiada wydajność prądową rzędu 300[mA]. Otrzymany zapas jest niezbędny do skompresowania prądów rozruchowych (In rush currents), mocy traconej na rezystancji ścieżek, parametrach pasożytniczych komponentów (np. ESR) czy zjawiskach termicznych. Kondensatory filtrujące zostały wybrane zgodnie z kartą katalogową producenta.



## 2.2.5 Konfiguracja pracy układu

Umożliwiono łatwy wybór następujących parametrów:

- Źródło napięcia 5V (USB lub zewnętrzne źródło)
- Źródło zasilania mikrokontrolera, osobno zasilanie modułu ADC i modułów cyfrowych mikrokontrolera (wewnętrzny stabilizator 3.3[V] lub zewnętrzne źródła)
- Miejsce rozruchu programu mikrokontrolera (boot)

Wybór następuje poprzez zwarcie odpowiednich pinów wyprowadzonych na PCB:



## 2.2.6 Inne

Wartości pojemności kondensatorów odsprzęgających zostały wybrane zgodnie z kartami katalogowymi poszczególnych układów. Wybrano kondensatory ceramiczne z dielektrykiem X7R i odpowiednim maksymalnym napięciem pracy.

W ścieżkach, przez które propagowane będą szybkie sygnały zostały dodane szeregowo rezystory pozwalające zmniejszyć szerokość widma sygnału („pochylić” zbocza sygnałów). Są to rezystory o rezystancji  $49.9[\Omega]$  (w razie konieczności mogą one zostać zwarte na PCB lub zamienione na rezystory o innej wartości).

Układ przycisku resetu został zaprojektowany zgodnie z kartą katalogową producenta mikrokontrolera. Dodatkowo dodano rezistor pull-up ( $10[k\Omega]$ ) oraz szeregowy rezistor ograniczający prąd płynący przez przycisk pozwalający na wydłużenie jego żywotności ( $100[\Omega]$ ).

Elementy pasywne współpracujące z układem konwertera USB-UART zostały odczytane z karty katalogowej producenta układu konwertera.

Rezonator kwarcowy został podłączony zgodnie z dokumentacją producenta.

Piny mikrokontrolera, wejścia i wyjścia napięć zasilających zostały wyprowadzone na dwa rzędy łączy typu goldpin, uzyskano dzięki temu uniwersalność modułu Stamp.

## 2.3 BOM

Description	Designator	MPN	Comment	Quantity	Manufacturer	Link	Pricing 1pcs. brutto [zl]	Total pricing brutto [zl]
Capacitor	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C20, C21	GRM155R71H103MA88	100n ±20%, 50VDC, X7R, 0402	8	Murata	<a href="#">Link</a>	0,393	3,144
Capacitor	C7	GRM21BR71C475ME51	4u7 ±20%, 16VDC, X7R, 0805	1	Murata	<a href="#">Link</a>	0,745	0,745
Capacitor	C8, C9, C11, C12, C14, C18, C19	GRM188R72A104KA35	100n ±10%, 100VDC, X7R, 0603	7	Murata	<a href="#">Link</a>	1,06	7,42
Capacitor	C10, C23, C24	GRM219R7Y105KA12	1u ±10%, 35VDC, X7R, 0805	3	Murata	<a href="#">Link</a>	1,06	3,18
Capacitor	C13, C15	GRM188R72A103KA01	10n ±10%, 100VDC, X7R, 0603	2	Murata	<a href="#">Link</a>	0,393	0,786
Capacitor	C16, C17	VJ0402A470XXCW1BC	47p ±5%, 25VDC, COG, 0402	2	Vishay	<a href="#">Link</a>	0,393	0,786
Capacitor	C22	GRM188R72A223KAC4D	22n ±10%, 100VDC, X7R, 0603	1	Murata	<a href="#">Link</a>	0,472	0,472
Resistor	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R31, R32, R33, R34, R35, R36, R37, R38, R39, R40, R41, R42, R43, R44, R45, R46, R47, R48, R49, R50, R51	CRCW060349R9FKEA	49R9 1%, 100mW, 0603	40	Vishay	<a href="#">Link</a>	0,703	28,12
Resistor	R9, R11	CRCW060310K0FKEAC	10k 1%, 100mW, 0603	2	Vishay	<a href="#">Link</a>	0,587	1,174
Resistor	R12	CRCW0603100RFKEAHIP	100R 1%, 330mW, 0603	1	Vishay	<a href="#">Link</a>	0,629	0,629
Resistor	R13	CRCW060340R2FKEA	40R2 1%, 100mW, 0603	1	Vishay	<a href="#">Link</a>	0,393	0,393
Resistor	R14, R15	MCT06030C2709FP500	27R 1%, 125mW, 0603	2	Vishay	<a href="#">Link</a>	0,509	1,018
Resistor	R16, R19	RCS0805270RFKEA	270R 1%, 400mW, 0805	2	Vishay	<a href="#">Link</a>	1,02	2,04
Resistor	R17	RCS0805220RFKEA	220R 1%, 400mW, 0805	1	Vishay	<a href="#">Link</a>	1,02	1,02
Resistor	R18	CRCW0603620RFKEAC	620R 1%, 100mW, 0603	1	Vishay	<a href="#">Link</a>	0,587	0,587
Ferrite bead	L1, L2, L3, L4	BLM15PXB01SN1	0.230hmDC, 900mA, 0402	4	Murata	<a href="#">Link</a>	0,55	2,2
Ferrite bead	L5	MPZ2012S601AT000	0.1OhmDC, 2A, 0805	1	TDK	<a href="#">Link</a>	0,393	0,393
Ferrite bead	L6	BLM15PXB01SN1	0.230hmDC, 900mA, 0402	1	Murata	<a href="#">Link</a>	0,55	0,55
8MHz Ceramic Resonator	X1	CSTNE8MD0GH5L00R0	Resonator	1	Murata	<a href="#">Link</a>	1,25	1,25
LED	D1	599-0130-007F	Orange	1	Dialight	<a href="#">Link</a>	1,76	1,76
LED	D2	599-0181-007F	Green	1	Dialight	<a href="#">Link</a>	2,66	2,66
LED	D4	599-0110-007F	Red	1	Dialight	<a href="#">Link</a>	1,49	1,49
Zener Diode	D3	MMS25235BT1G	MMS25235BT1G	1	ON	<a href="#">Link</a>	0,902	0,902
P-MOSFET	Q1	S2323CDS-T1-GE3	S2323CDS	1	Vishay	<a href="#">Link</a>	3,06	3,06
Voltage Regulator 3V3	U4	AP7370-33WV-7	AP7370	1	Diodes Incorporated	<a href="#">Link</a>	1,6	1,6
EEPROM	U3	BR25H256FJ-2ACE2	BR25H256FJ	1	Rohm	<a href="#">Link</a>	8,97	8,97
USB converter	U2	FT230XS-R	FT230XS-R	1	FTDI	<a href="#">Link</a>	8,37	8,37
MCU LQFP64	U1	STM32F301R8T6	STM32F301R8T6	1	STM	<a href="#">Link</a>	20,72	20,72
USB Connector	CON5	10103593-0001LF	10103593-0001LF	1	Amphenol	<a href="#">Link</a>	3,02	3,02
Connector	J1	5055680671	SWD Connector	1	Molex	<a href="#">Link</a>	2,74	2,74
Switch	S1	EVP-BB0AAB000	Switch	1	Panasonic	<a href="#">Link</a>	3,49	3,49
Header, 3-Pin	CON3, CON4, CON6, CON8, CON9	G800LR305018EU	Header 3	5	Amphenol	<a href="#">Link</a>	0,745	3,725
Connector	CON1, CON2	68001-121HLF	Header 21	2	Amphenol	<a href="#">Link</a>	5,46	10,92
					Suma			129,334

Podane są ceny brutto, w celu konwersji na ceny netto należy odliczyć 23% podatku VAT.

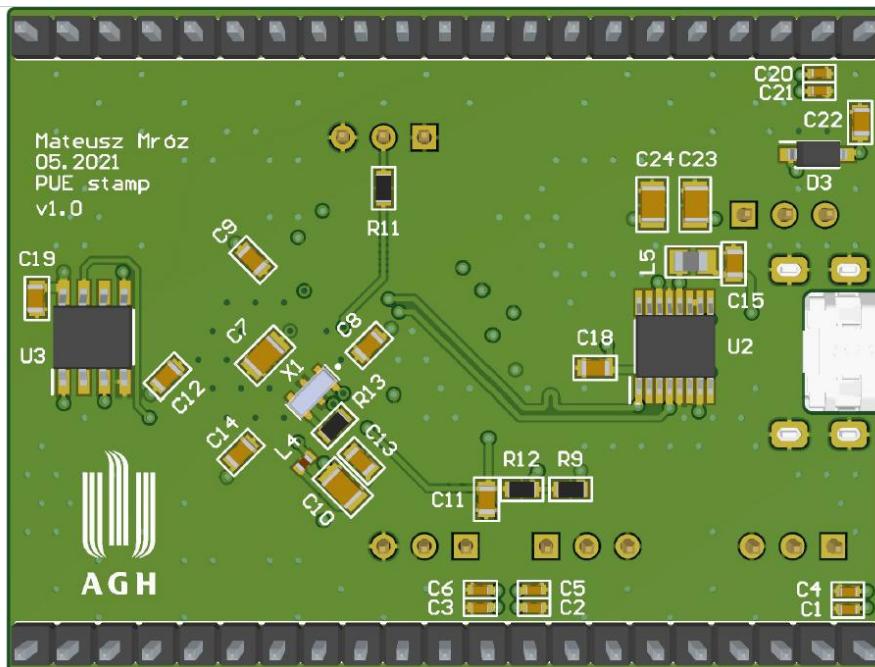
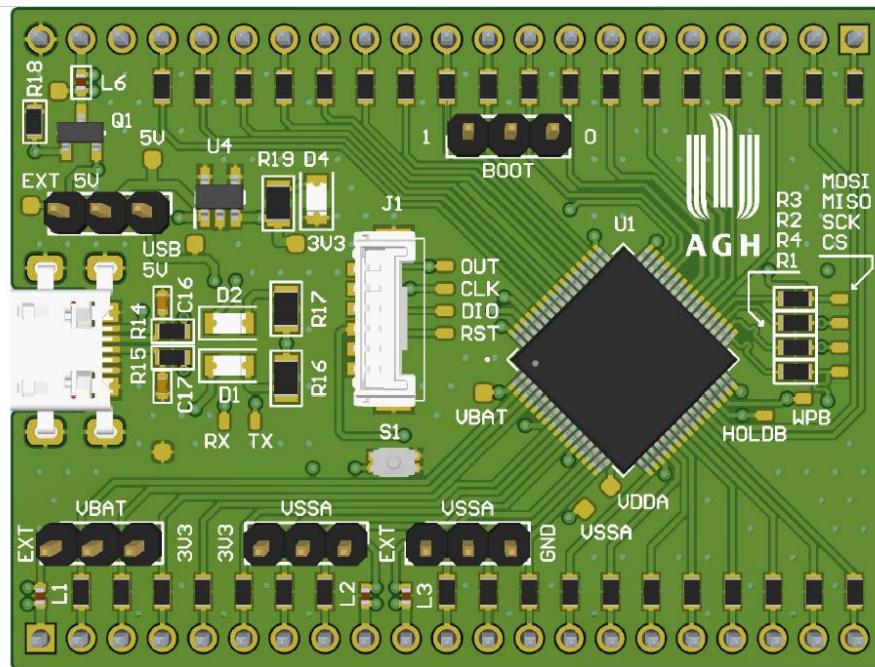
BOM znajduje się również w pliku *BOMStamp.xlsx*

## 2.4 PCB

Została zaprojektowana 4 warstwowa płytka drukowana, zgodnie ze specyfikacją dla takich producentów jak EuroCircuit czy JLCPCB.

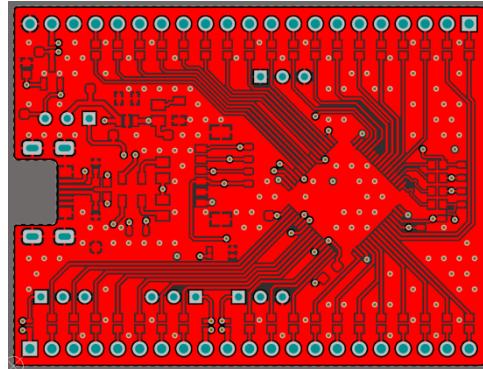
Rozmiar: 54,61 x 41,53 [mm]

Widok 3D:

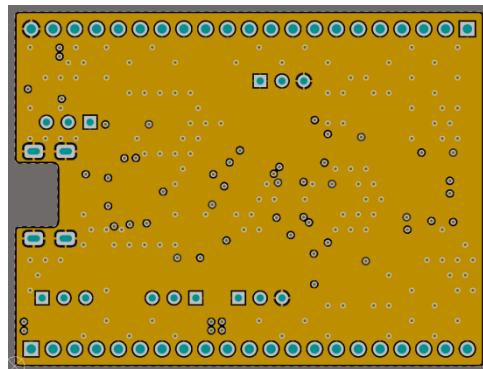


Podział warstw:

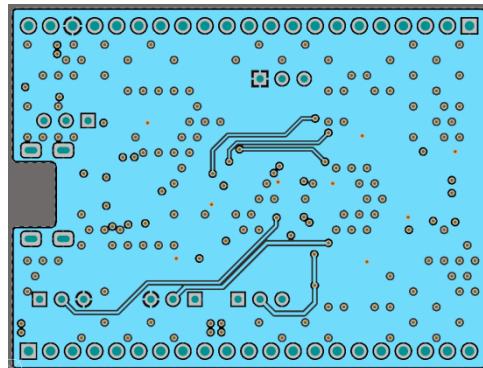
- Górną warstwą: większość elementów, ścieżki sygnałowe, powierzchnia masy



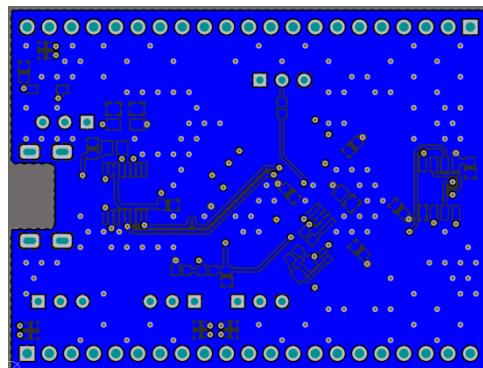
- Pierwsza warstwa wewnętrzna: wyłącznie powierzchnia masy, warstwa pełni również funkcję ekranującą



- Druga warstwa wewnętrzna: powierzchnia napięcia zasilania 3.3[V], ścieżki zasilania dla procesora, w przypadku wybrania zasilania z zewnątrz



- Dolna warstwa: kondensatory odsprzęgające, elementy które dzięki umiejscowieniu na tej warstwie znacznie uprościły i skróciły ścieżki sygnałowe, powierzchnia masy



Warstwy masy na różnych warstwach zostały ze sobą połączone przelotkami.

Ścieżki, przez które propagują szybkie sygnały (np. SPI pamięci EEPROM) zostały dopasowane pod względem długości z tolerancją do 10[mil]. Przykład:

	Name	N...	Si...	T...	Ro...	Unrouted...
[ ]	MISO_2	2	197.1	0	197.4	0
[ ]	MOSI_2	2	197.1	0	197.2	0
[ ]	NSS_2	2	197.1	0	197.7	0
[ ]	SCK_2	2	201.0	0	201.6	0

W kluczowych punktach płytki dodano punkty pomiarowe, które ułatwią ewentualne wyszukiwanie błędów, lub badanie działania układów.

### **3. Moduł płyty bazowej**

#### **3.1 Schematy**

Ze względu na rozmiar, arkusze ze schematami zaczynają się od kolejnej strony:

A

A

B

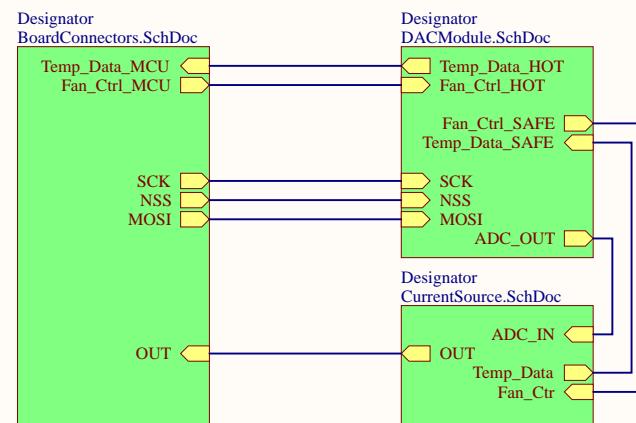
B

C

C

D

D



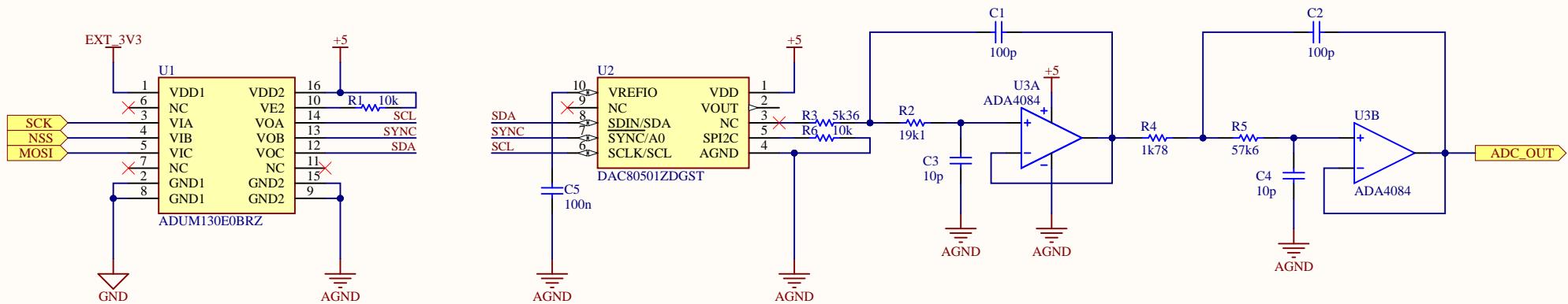
AGH University of Science and Technology

University name: AGH  
 Degree course: 3th year electronics  
 Course: PUE  
 Checked by: dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH  
 Author: Mateusz Mróz  
 Student Index: 305093

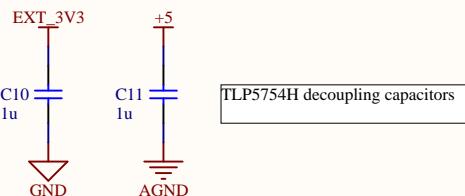
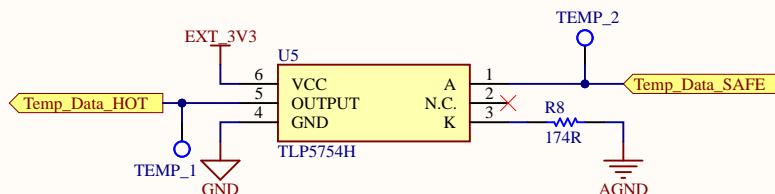
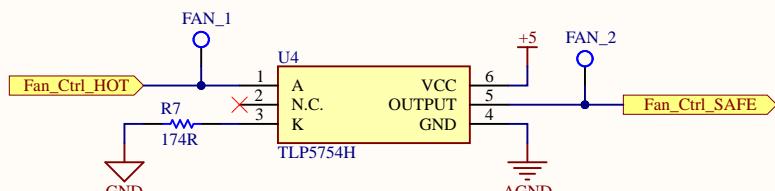
Date: 07.06.2021  
 Sheet/all: 1 / 4

Project name: CurrentSourceModule.PrjPcb  
 Document name: Main.SchDoc  
 Variant name: [No Variations]  
 Version number: 1264 [No modification]

A



B

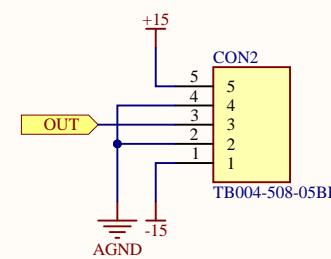
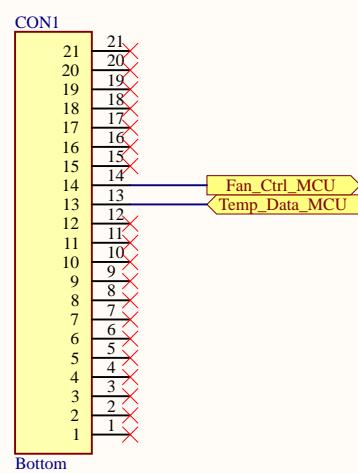


University name: AGH  
Degree course: 3th year electronics  
Course: PUE  
Checked by: dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH  
Author: Mateusz Mróz  
Student Index: 305093

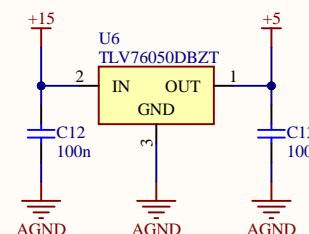
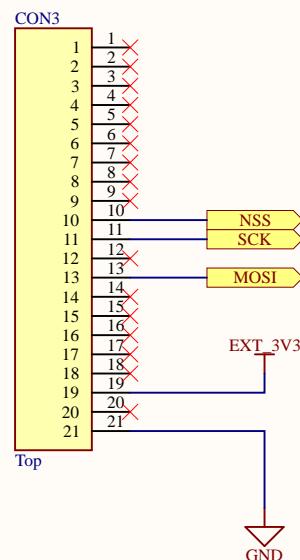
Date: 07.06.2021  
Sheet/all: 2 / 4

Project name: CurrentSourceModule.PnjPcb  
Document name: DACModule.SchDoc  
Variant name: [No Variations]  
Version number: 1265

A



B



C

D

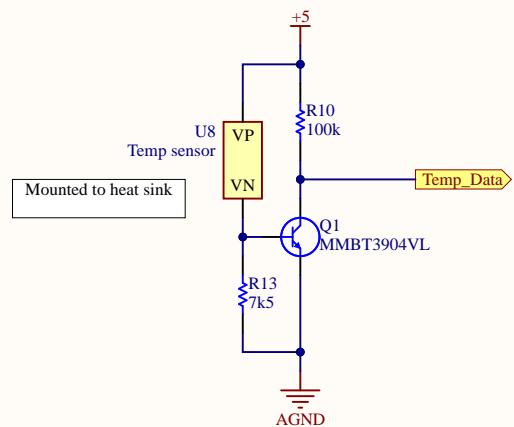


University name: AGH  
Degree course: 3th year electronics  
Course: PUE  
Checked by: dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH  
Author: Mateusz Mróz  
Student Index: 305093

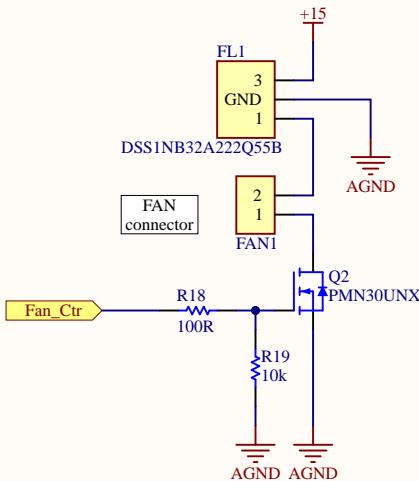
Date: 07.06.2021  
Sheet/all: 3/4

Project name: CurrentSourceModule.PrjPcb  
Document name: BoardConnectors.SchDoc  
Variant name: [No Variations]  
Version number:

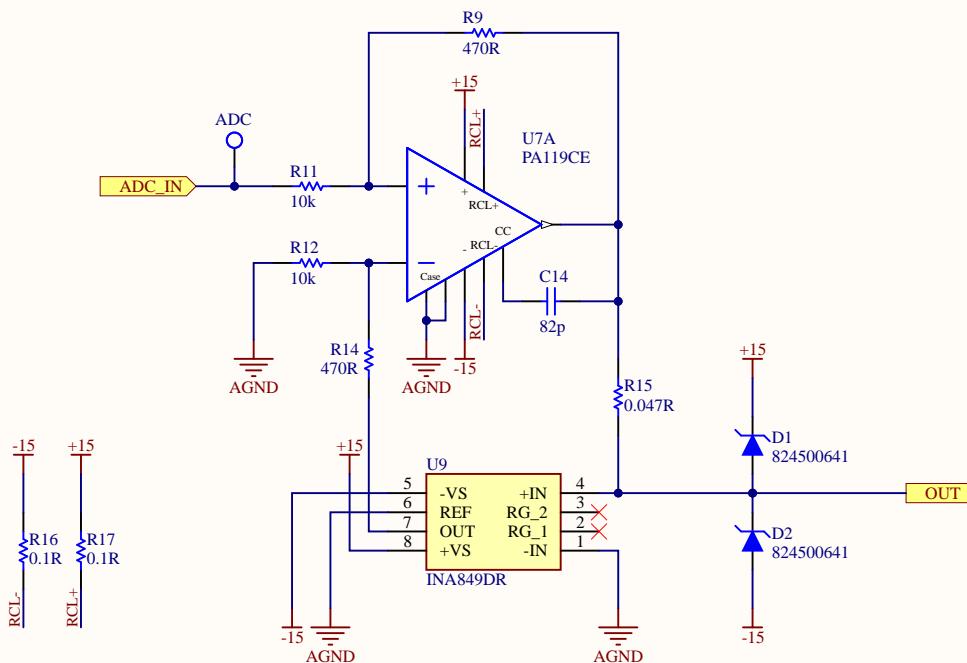
A



B



C



D



University name: AGH  
Degree course: 3th year electronics  
Course: PUE  
Checked by: dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH  
Author: Mateusz Mróz  
Student Index: 305093

Date: 07.06.2021  
Sheet/all: 4 / 4

Project name: CurrentSourceModule.PjPcb  
Document name: CurrentSource.SchDoc  
Variant name: [No Variations]  
Version number: 1265

## 3.2 Opis rozwiązań

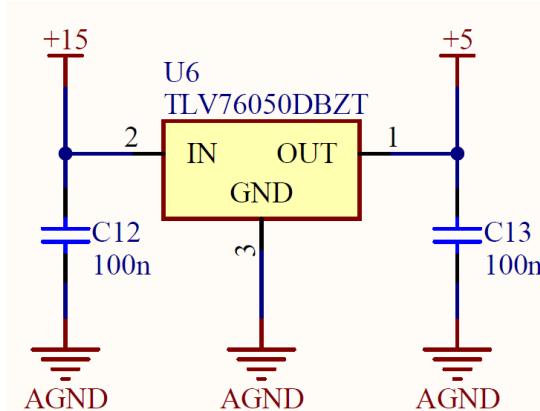
### 3.2.1 Stabilizator napięcia

Napięcie 5[V] potrzebne jest dla przetwornika DAC, układów filtrowania oraz czujnika temperatury.

Bilans mocy:

Linia 5[V]	
Komponent	Pobór prądu [mA]
DAC	1
OpAmp	15
Izolatory	10
Suma	26

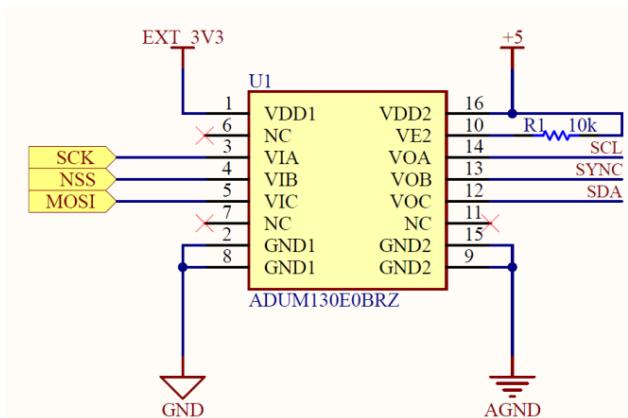
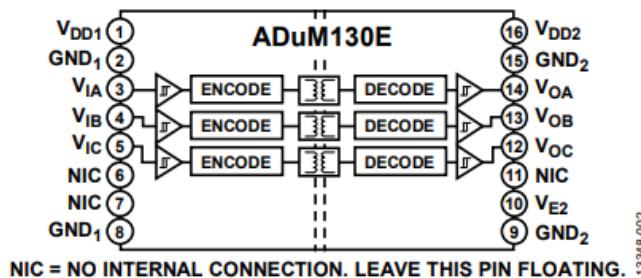
Wybrany stabilizator posiada maksymalne napięcie wejściowe wynoszące 35[V] i wydajność prądową 100[mA]. Kondensatory zostały wybrane zgodnie z dokumentacją techniczną producenta stabilizatora.



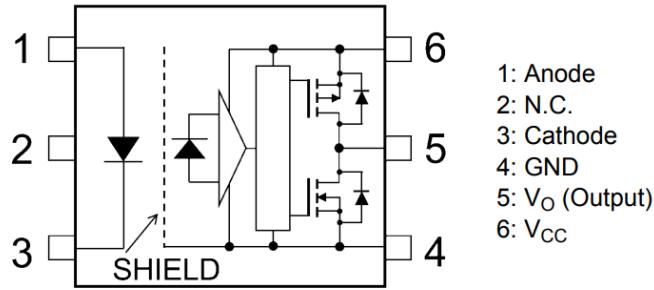
### 3.2.2 Izolacja galwaniczna

W celu ochrony modułu Stamp, a w szczególności magistrali USB (np. komputery osobiste) odizolowano galwanicznie część układu, w której występują wysokie napięcia i prądy. Dodatkowo zapewnia to ekranowanie czułych układów cyfrowych przed zakłóceniami elektromagnetycznymi. Izolatory zapewniają również konwersję stanów logicznych: moduł Stamp operuje na poziomie 3.3[V], zaś płyta bazowa na 5[V]. Na płycie bazowej znajdują się więc dwie, oddzielone od siebie galwanicznie potencjały masy.

Linie SPI zostały odizolowane za pomocą układu ADUM130E0BRZ. Układ ten zapewnia prędkość przesyłu danych na poziomie 150[Mbps] i posiada maksymalnie 13[ns] opóźnienia, parametry te zapewniają odpowiednią propagację szybkich sygnałów występujących w standardzie SPI. Dodatkowo w jednej obudowie znajdują się 3 kanały, dzięki czemu jeden układ obsługuje całą komunikację. Układ posiada możliwość załączania lub wyłączania wyjść poprzez wejście Output Enable (pin 10), w opisywanej aplikacji ciągłe działanie jest zapewnione poprzez podpięcie „na sztywno” tego wejścia do wysokiego potencjału. Rezystor ogranicza ewentualne prądy płynące w trakcie stanów nieustalonych. Zastosowano również kondensatory odsprzęgające zgodnie z kartą katalogową.



Kolejne dwa transmitowane sygnały, to wyjście z czujnika temperatury oraz wejście sterujące załączaniem klucza sterującego wentylatorem (są to sygnały cyfrowe). Do ich izolacji wybrano układ TLP5754H.



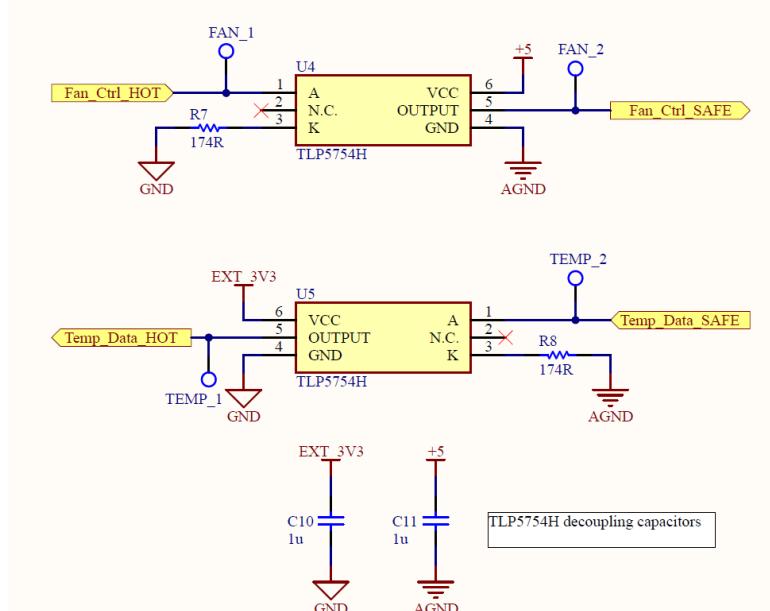
Dużą zaletą wybranego układu jest minimalna ilość potrzebnych komponentów do działania układu, jest to zapewnione dzięki wyjściu typu CMOS push-pull (zapewnia to również wysoką chwilową wydajność prądową wynoszącą do 4[A]). Układ może pracować z napięciami do 30[V] i częstotliwością do 100[kHz] (maksymalna potrzebna to 88[kHz]). Producent zaleca aby prąd płynący przez diodę miał natężenie ok. 10[mA]. Podaje również napięcie przewodzenie wynoszące 1,55[V]. Dla tych wartości można wyliczyć niezbędną rezystancję:

$$R = \frac{V_{sup} - 1,55[V]}{10[mA]}$$

gdzie  $V_{sup}$  wynosi 3,3[V]

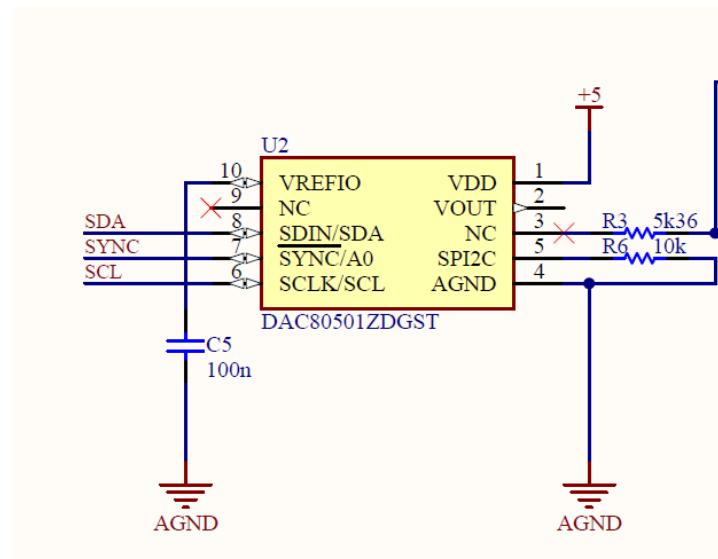
Wyliczona wartość to  $R = 175[\Omega]$ . Wybrano rezistor z tolerancją 1% (typoszereg zawiera wartość 174[ $\Omega$ ]) i mocą 100[mW] (dla prądu 10[mA] na rezystorach wydzieli się 17,4[mW]). Na obydwu wejściach układów pojawi się 3,3[V] ponieważ układ kondycjonowania czujnika temperatury zmienia poziom napięć z 5[V] na 3,3[V].

Zastosowano również kondensatory odsprzęgające zgodnie z kartą katalogową producenta.



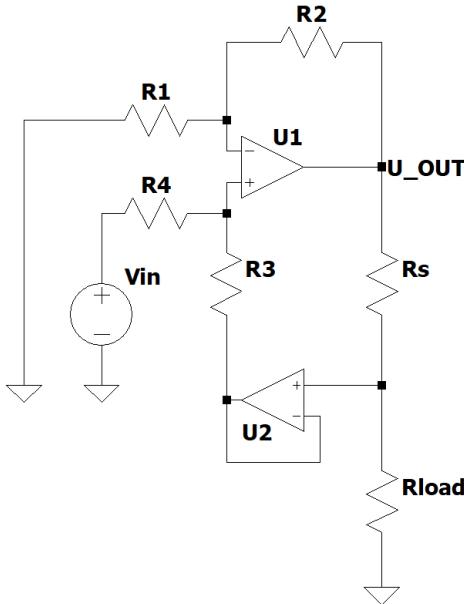
### 3.2.3 Układ DAC

Układ DAC komunikuje się z mikrokontrolerem za pomocą standardu SPI. W celu wybrania odpowiedniego standardu komunikacji (możliwy jest też do wyboru I<sub>2</sub>C) należy zewrzeć pin 5 do masy. Wykonano to przez rezystor, który ogranicza ewentualne prądy płynące w trakcie stanów nieustalonych. Kondensatory odsprzęgające zostały wybrane zgodnie z kartą katalogową producenta.



### 3.2.4 Układ źródła prądowego

Do realizacji modułu źródła prądowego sterowanego napięciem z uziemionym obciążeniem wybrano układ Howland'a. Model służący do analizy wygląda następująco:



W celu wyboru wartości komponentów, rozpisano wzory opisujące działanie układu. Zakładamy, że  $R_1 = R_4$  i  $R_2 = R_3$ .

$$X = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_- = U_{OUT} * X$$

$$U_+ = (U_{OUT} - IR_s - U_{IN})X + U_{IN}$$

Zakładając idealny wzmacniacz operacyjny o zerowym napięciu niezrównoważenia:

$$U_+ = U_-$$

Po przekształceniach:

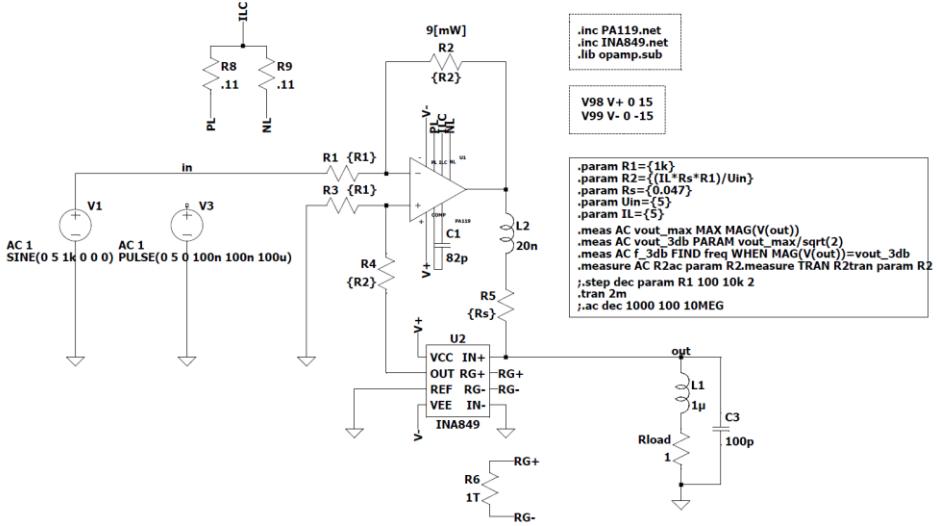
$$IR_s = U_{IN}(X^{-1} - 1)$$

$$I = \frac{U_{IN}}{R_s} * \frac{R_2}{R_1}$$

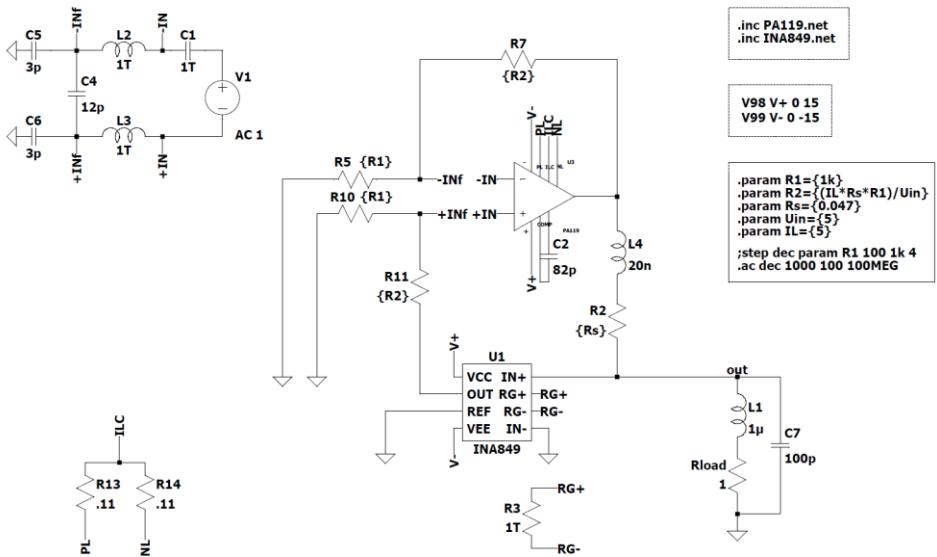
Powyższy wzór pokazuje, że wartość prądu obciążenia zależy liniowo od napięcia wejściowego i pewnej stałej. W opisywanym przypadku stała ta musi wynosić dokładnie 1, gdyż dla maksymalnego napięcia wejściowego wynoszącego 5[V] musimy uzyskać 5[A] prądu obciążenia.

Wybrany wzmacniacz operacyjny to PA119 pozwalający na dostarczenie do 5[A] prądu wyjściowego, zasilanie do +40[V] i bardzo szybki Slew Rate na poziomie 900[V/μs].

Do symulacji użyty został model dostarczony przez producenta.



Schemat układu do symulacji wzmacniania w otwartej pętli. Do rozwarcia składowych zmiennych pętli sprzężenia zwrotnego bez usuwania napięć stałych (punktu pracy), wykorzystano idealność modeli cewek i kondensatorów w języku SPICE. Dodatkowo zamodelowano pojemność wejściową wzmacniacza operacyjnego zgodnie z wartością odczytaną z karty katalogowej. Symulowana jest pojemność widziana zarówno przez wspólne sygnały wejściowe (common mode) jak i różnicowe (differential).



Wartość rezystorów programujących maksymalny prąd wyjściowy (węzły PL i NL) zostały wybrane zgodnie ze wzorem podanym w karcie katalogowej (ograniczenie wynosi +5[A]).

Kondensator C2 służy do kompensacji charakterystyki fazowej w celu zapewnienia stabilności układu. Jego wartość dla danego wzmacniania została odczytana z karty katalogowej, a następnie poprzez symulację upewniono się, że uzyskany został odpowiedni margines fazy.

Aby pętla sprzężenia zwrotnego wchodząca na nieodwracające wejście wzmacniacza operacyjnego nie obciążała reszty układu, zastosowano wzmacniacz instrumentalny. Posiada on wzmacnienie 1[V/V] i mierzy napięcie względem masy. Jest zasilany z +15[V], wyjście rail-to-rail pozwala na pracę z szerokimi napięciami wejściowymi, przekłada się to na zwiększenie możliwej rezystancji obciążenia (dla której układ będzie działał prawidłowo).

Wybrano shunt, który może pracować z prądem o natężeniu 5[A]. Posiada on rezystancję 0,047[Ω], tolerancję 1% i moc znamionową 3[W].

Maksymalna moc, jaka może się na nim wydzielić w danym układzie to:

$$P = I^2 * R = 1,175[W]$$

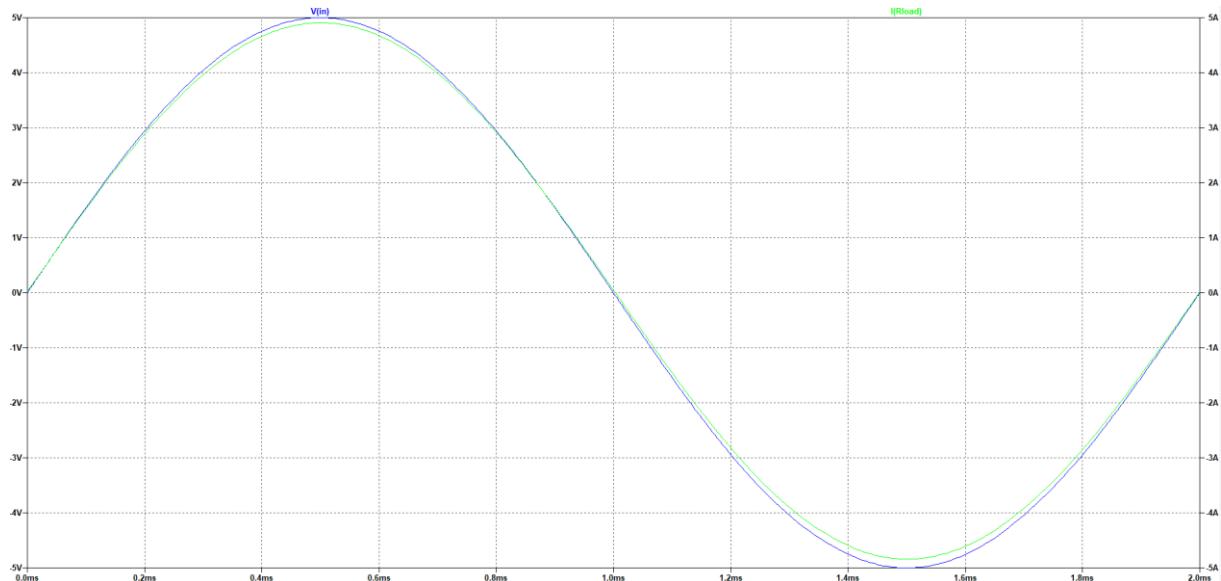
Zapewnia to bezpieczny zapas. Podczas symulacji dołożono pasożytniczą indukcyjność elementu, by uzyskać wyniki bliższe rzeczywistości.

Wartość rezystancji R1 została wybrana na podstawie optymalizacji, mniejsze wartości rezystancji zapewniają lepsze parametry układu, jednak wtedy większy wpływ mają parametry pasożytnicze. Jest to bardzo ważne, ponieważ układ działa tylko pod warunkiem zachowania równości odpowiadających sobie rezystancji. Wartość rezystancji R2 jest wyliczana automatycznie z wyliczonego wcześniej wzoru po przekształceniach:

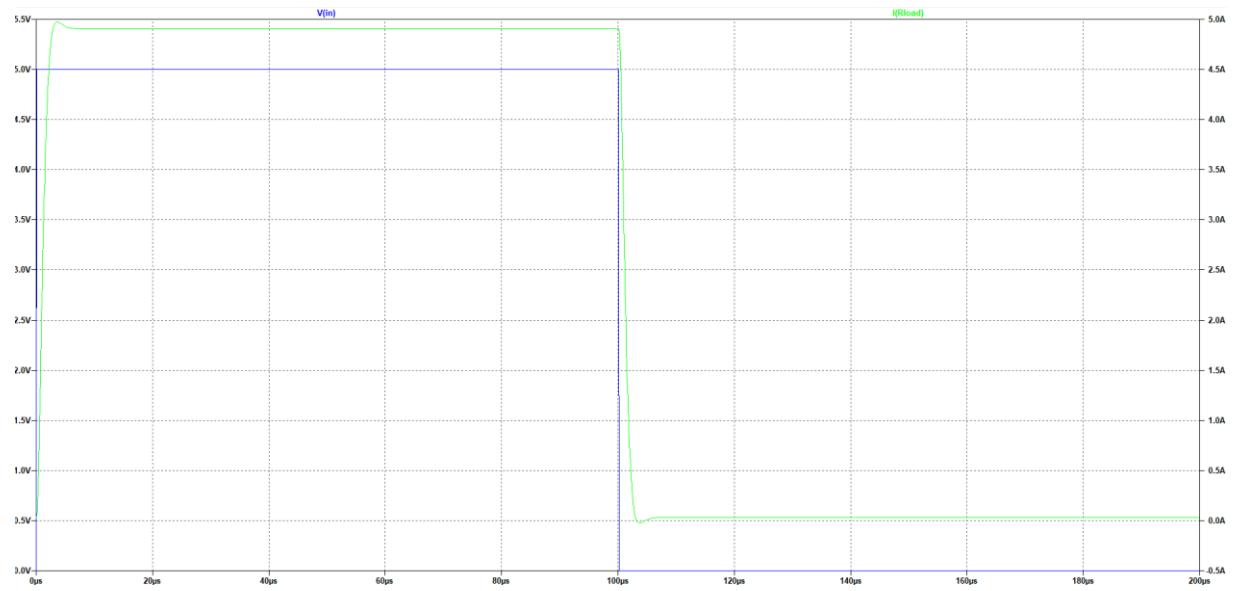
$$R_2 = \frac{R_S * R_1 * I}{U_{IN}}$$

Obciążenie zostało zamodelowane jako element RLC.

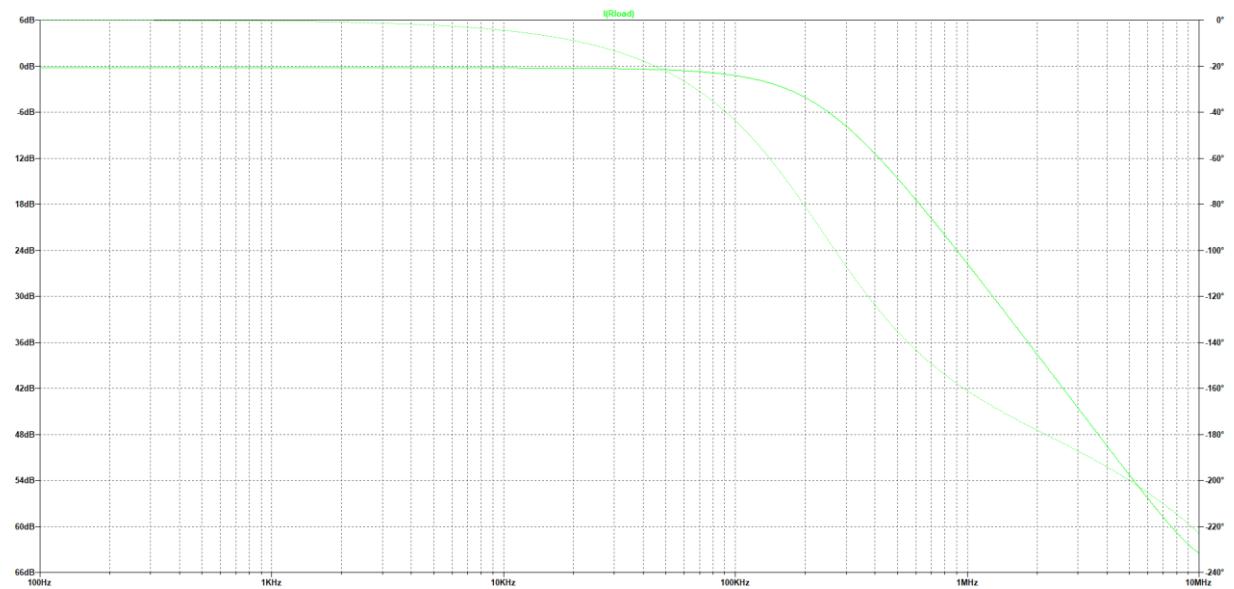
Działanie układu:



Odpowiedź impulsowa na sygnał o szybkości trwania zboczy 100[ns]:



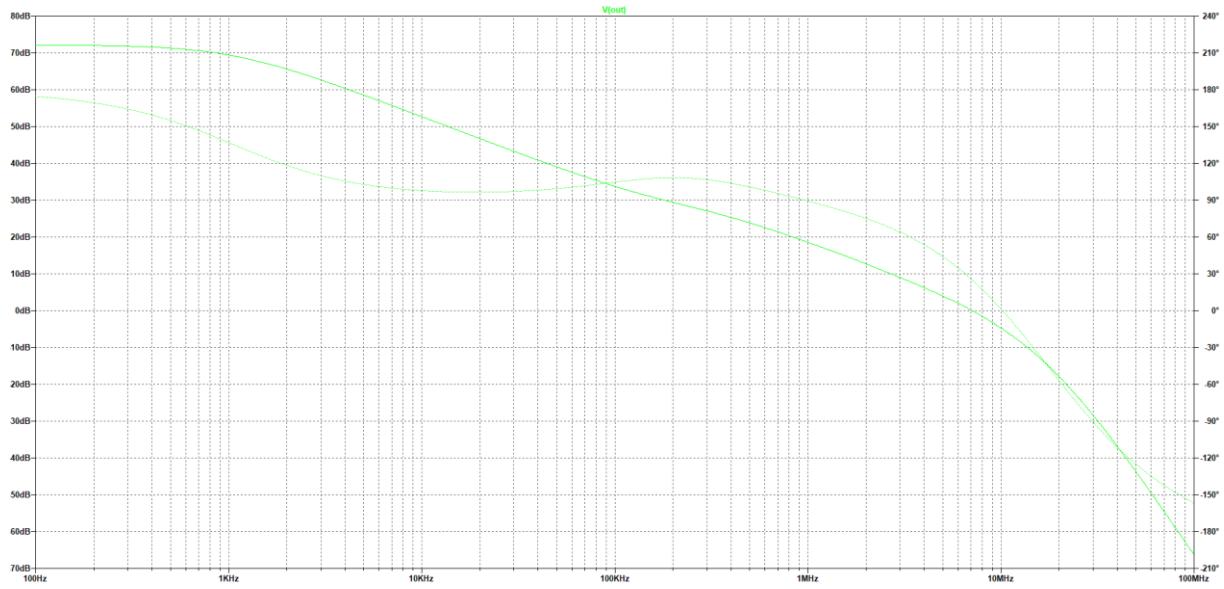
Charakterystyka częstotliwościowa układu:



Wyliczona z symulacji częstotliwość 3[dB] spadku charakterystyki wzmacnienia:

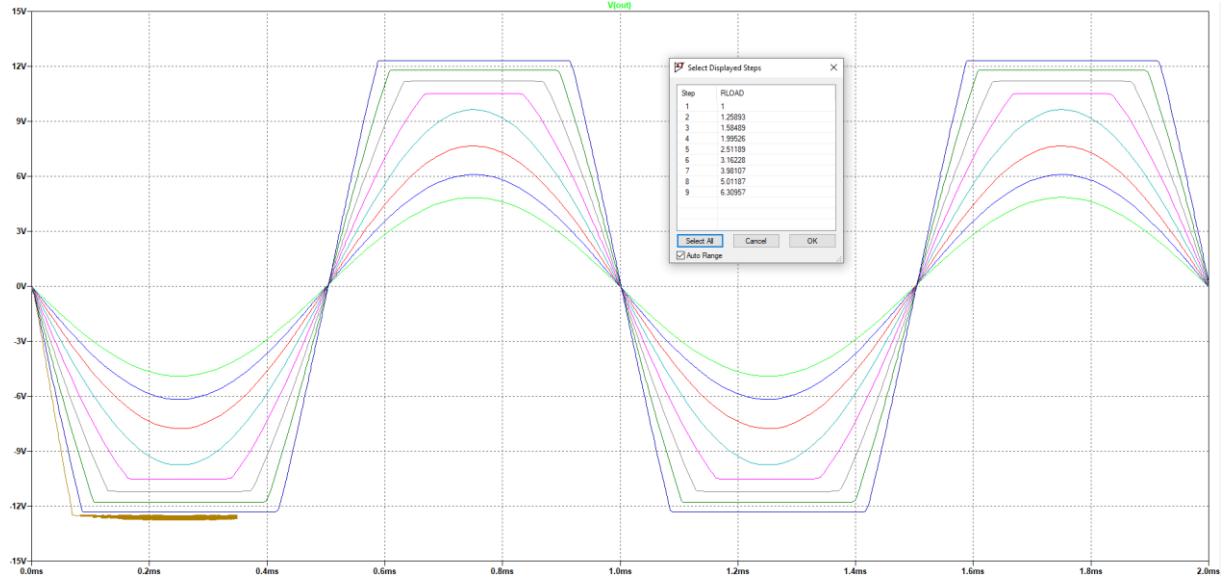
$$f_{3dB} = 397174[\text{Hz}]$$

Wykres wzmocnienia w otwartej pętli:



Uzyskany margines fazy wynosi  $25^\circ$

Symulacja maksymalnego rezystancyjnego obciążenia układu:

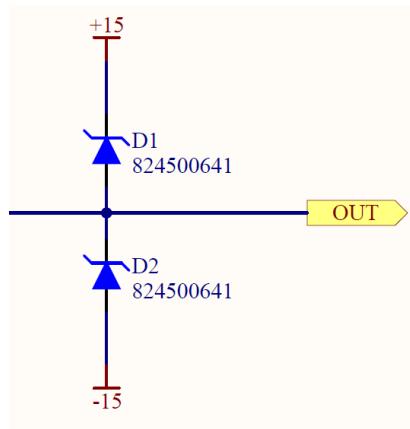


Maksymalna rezystancja obciążenia wynosi  $2\Omega$

Aby zapewnić precyzję działania układu wybrano rezystory o precyzyji 0,1[%].

TODO Bypassy

W celu zabezpieczenia linii wyjściowej przed przepięciami zastosowano szybkie diody TVS o oznaczeniu 824500641. Posiadają one wsteczne napięcie przebicia na poziomie 74,85[V], szczytowy prąd przewodzenia 40[A] i możliwą do rozproszenia chwilową moc 400[W].



Podsumowanie wyliczonych w symulacji parametrów:

Maksymalne parametry	
Prąd wyjściowy	+ - 5[A]
Napięcie wyjściowe	+ - 15[V]
3dB spadek wzmacnienia	397174[Hz]
Margines fazy	25[°]
Maksymalna rezystancja obciążenia	2[Ω]

### 3.2.5 Dobór radiatora

Wzór pozwalający wyznaczyć potrzebną rezystancję termiczną radiatora:

$$R_{sa} = \frac{T_j - T_a}{Q} - R_{jc} - R_{cs}$$

gdzie:

$T_a$  – temperatura otoczenia,

$T_j$  – temperatura złączka,

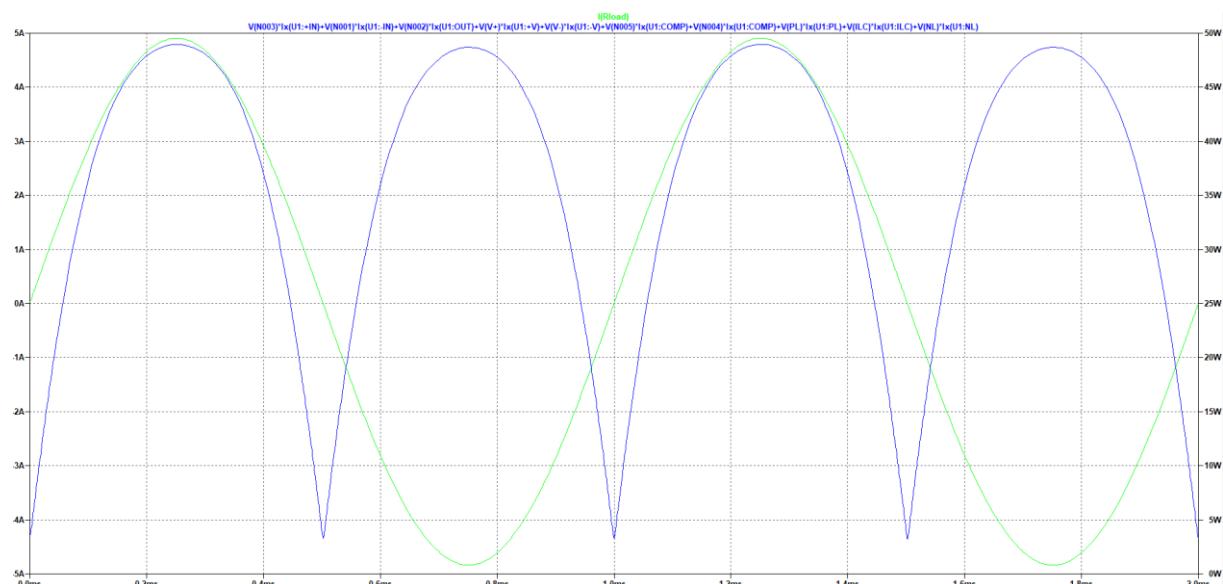
$R_{sa}$  – rezystancja termiczna między radiatorem a otoczeniem,

$R_{jc}$  – rezystancja termiczna między złączem, a obudową układu,

$R_{cs}$  – rezystancja termiczna między obudową układu, a radiatorem,

$Q$  – moc wydzielająca się w układzie

Największa moc wydzielająca się na układzie wzmacniacza ( $Q$ ) została odczytana z symulacji, wynosi ona ok. 34[W] (zakładamy, że użytkownik może mieć możliwość generacji prądu o stałym natężeniu).



Dla wyznaczonej mocy jesteśmy w stanie odczytać z karty katalogowej maksymalną temperaturę układu, która pozwoli na jej rozproszenie. Rezystancja termiczna między złączem, a obudową również jest podana w karcie katalogowej:

#### THERMAL

RESISTANCE, AC, junction to case<sup>4</sup>

RESISTANCE, DC, junction to case

RESISTANCE, junction to air

TEMPERATURE RANGE, case

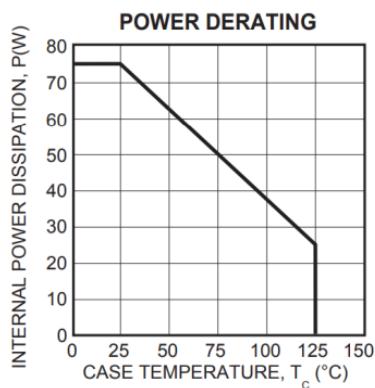
$T_c = 25^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$ , F > 60 Hz

$T_c = 25^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$ , F < 60 Hz

$T_c = 25^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$

Meets full range specifications

1.46	1.64	*	*	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
1.84	2.0	*	*	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
30	*	*	*	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
-25	+85	*	*	$^{\circ}\text{C}$



Do połączenia obudowy z radiatorem wybrano pastę firmy Wakefield-Vette o oznaczeniu 120-2:

TYPICAL VALUES FOR THERMAL RESISTANCE, CASE TO SINK ( $\theta_{cs}$ ) WHEN THERMAL JOINT COMPOUNDS ARE USED		
Case Style Characteristics	Mounting Torque in inch • pounds (N•M)	Typical Thermal Resistance (°C/W)
T0-3	8 (0.9)	0.09

Temperatura otoczenia, w którym układ będzie pracował wynosi ok. 35[°C].

Powyzsze dane podstawione do wzoru:

$$R_{sa} = \frac{125[°C] - 30[°C]}{34[W]} - 1.84 \left[ \frac{°C}{W} \right] - 0.09 \left[ \frac{°C}{W} \right] = 0.28 \left[ \frac{°C}{W} \right]$$

Powyzsze założenia spełnia radiator firmy Fischer Elektronik o oznaczeniu LA6.

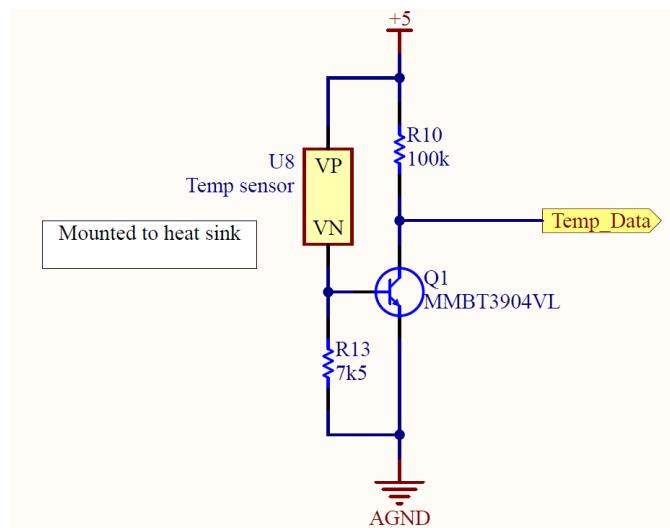
#### Features

width:	62 mm
height:	74 mm
length:	100 mm / 150 mm / 200 mm / 250 mm / 300 mm
thermal resistance:	0.2 - 0.1 K/W
surface:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• raw degreased aluminium (by the metre raw aluminium)</li> <li>• mounting area(s) milled flat</li> </ul>
operating voltage of the fan motor:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12 V DC</li> <li>• 24 V DC</li> </ul>

### 3.2.6 Sterowanie wentylatorem radiatora

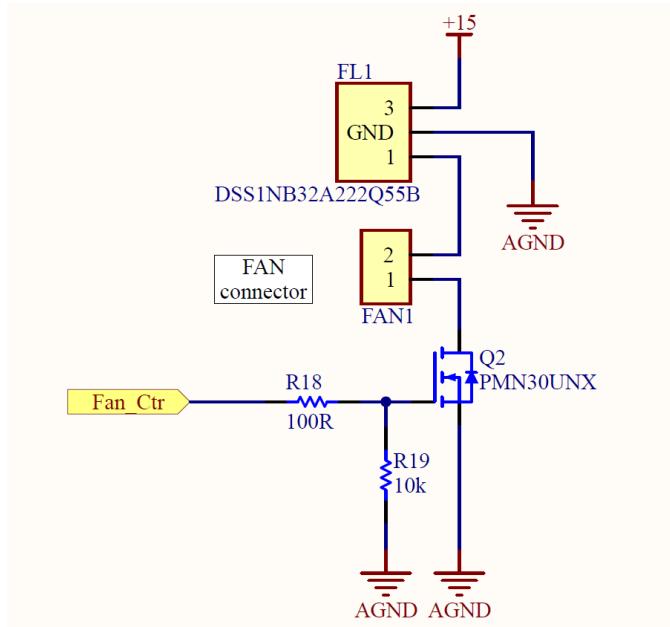
W celu zapewnienia odpowiedniego chłodzenia radiatora niezbędny jest wentylator. Aby jednak nie pracował on bez potrzeby, zaprojektowany został układ ze sprzężeniem zwrotnym: czujnik temperatury zapewnia mikrokontrolerowi informację o aktualnej temperaturze układu, a ten w odpowiednim momencie załącza wentylator.

Do monitorowania temperatury wybrano czujnik LMT01LPGM, zapewniający dokładność na poziomie  $0,06[^\circ\text{C}]$ , posiada jedynie dwa wyprowadzenia, kodowanie wartości temperatury następuje w systemie liczby impulsów, częstotliwość odświeżania wynosi ok.  $88[\text{kHz}]$ . Układ:



Zaprojektowany został również układ kondycjonowania redukujący napięcie wyjściowe do  $3,3[\text{V}]$  (układ zaproponowany w karcie katalogowej producenta).

Do przełączania wentylatora zaprojektowano poniższy układ:



Aby nie propagować zakłóceń do linii zasilania zastosowano filtr EMI.

Wentylator posiada moc znamionową wynoszącą 2,9[W], co dla napięcia zasilania 15[V] daje prąd ok. 200[mA]. Aby zapewnić bezpieczny zapas mocy, wybrano jako klucz tranzystor NMOS PMN30UNX. Podstawowe dane:

Table 1. Quick reference data

Symbol	Parameter	Conditions		Min	Typ	Max	Unit
$V_{DS}$	drain-source voltage	$T_j = 25^\circ C$	-	-	30	30	V
$V_{GS}$	gate-source voltage		-12	-	12	12	V
$I_D$	drain current	$V_{GS} = 4.5 V; T_{amb} = 25^\circ C; t \leq 5 s$	[1]	-	-	5.7	A
<b>Static characteristics</b>							
$R_{DSon}$	drain-source on-state resistance	$V_{GS} = 4.5 V; I_D = 4.5 A; T_j = 25^\circ C$		-	33	40	$m\Omega$

Maksymalne napięcie  $V_{ds}$  w opisywanym układzie to 15[V], a  $V_{gs}$  to 5[V], więc tranzystor może bezpiecznie pracować w założonych warunkach. Dodatkowo posiada niską rezystancję kanału dla zastosowanego napięcia  $V_{gs}$ , co jest ważne w konfiguracji gdzie tranzystor spełnia rolę klucza.

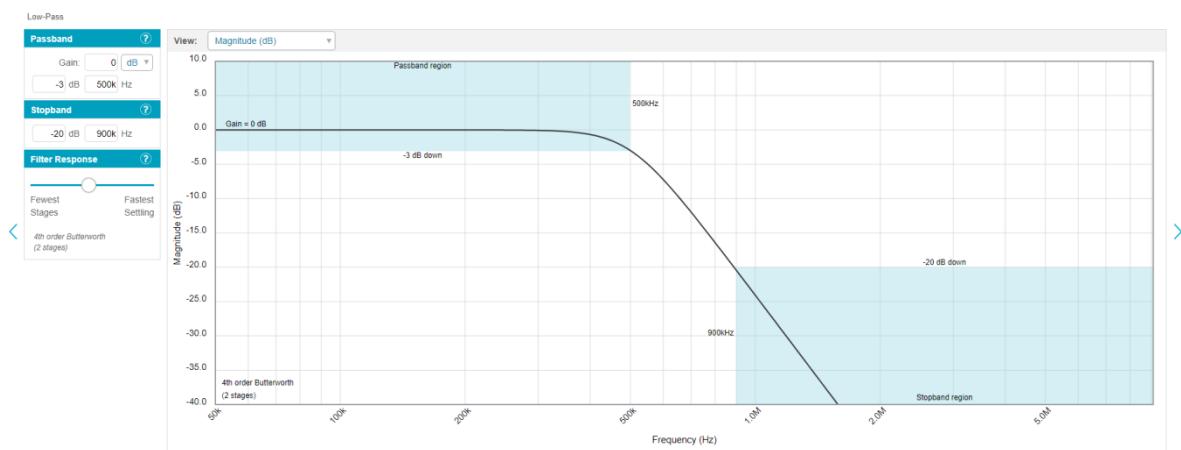
Rezystor połączony szeregowo z bazą ogranicza prąd przeładowywania pojemności złącza MOS, zaś rezistor zwierający bazę do masy służy do odprowadzenia ładunku tegoż złącza w celu szybszego wyłączenia klucza.

Wybrano rezystory o tolerancji 1% i odpowiedniej znamieniowej mocy.

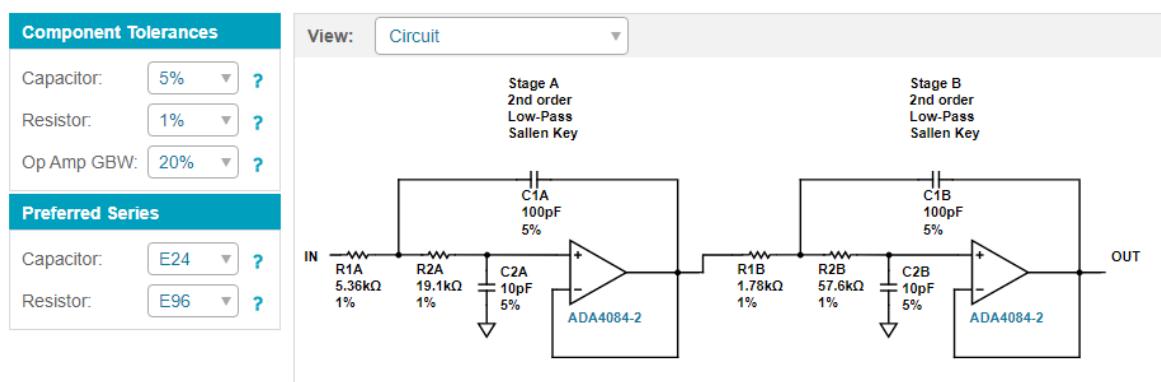
### 3.2.7 Filtr wyjściowy DAC

W celu zniwelowania możliwości wzbudzenia się układu źródła prądowego, a także rekonstrukcji sygnału generowanego przez przetwornik DAC zaprojektowano filtr aktywny. Wykorzystano kalkulator udostępniony przez firmę Analog Devices, częstotliwość 3[dB] spadku charakterystyki wzmacnienia została wybrana tak, aby pokrywała się ze wcześniej wyznaczoną częstotliwością pracy układu źródła prądowego. Nabylenie charakterystyki zostało ograniczone przez wzgląd na koszty i powierzchnię zajmowaną przez rozwiązańe. Z racji umiejscowienia w jednej obudowie dwóch wzmacniaczy operacyjnych zdecydowano się na filtr Butterwortha 4 rzędu w topologii Sallen-Key.

Wyniki symulacji:



Low-Pass; 4th order Butterworth; 500kHz passband; Optimize: Power; +Vs: 5; -Vs: 0



Aby uzyskać parametry wyznaczone z symulacji wybrano dokładnie takie parametry elementów, jakie zostały zaproponowane. Wybrano kondensatory ceramiczne z dielektrykiem COG.

### **3.2.8 Inne**

Wartości pojemności kondensatorów odsprzęgających zostały wybrane zgodnie z kartami katalogowymi poszczególnych układów. Wybrano kondensatory ceramiczne z dielektrykiem X7R i odpowiednim maksymalnym napięciem pracy.

Do płyty bazowej przymocowany jest moduł Stamp poprzez złącza goldpin.

Przewidziano otwory montażowe M3.

Skręcane złącze służy do podpięcia zewnętrznego zasilania i udostępnia wyjście układu. Rozwiązanie to zwiększa elastyczność wykorzystania układu.

### 3.3 BOM

Description	Designator	MPN	Comment	Quantity	Manufacturer	Link	Pricing 1pcs. brutto [zl]	Total pricing brutto [zl]
Capacitor	C1, C2	GQM1875C2E101JB12D	100p +-5%, 250VDC, C0G, 0603	2	Murata	<a href="#">link</a>	2,31	4,62
Capacitor	C3, C4	GRM1885C2E100JW07D	10p +-5%, 250VDC, C0G, 0603	2	Murata	<a href="#">link</a>	0,86	1,72
Capacitor	C5, C6, C7, C8, C9, C12, C13, C17, C19, C21, C22	GRM188R72A104KA35D	100n +-10%, 100VDC, X7R, 0603	11	Murata	<a href="#">link</a>	1,06	11,66
Capacitor	C10, C11	GRM219R7YA105KA12	1u +-10%, 35VDC, X7R, 0805	2	Murata	<a href="#">link</a>	1,06	2,12
Capacitor	C14	GQM1875C2E820JB12D	82p +-5%, 250VDC, C0G, 0603	1	Murata	<a href="#">link</a>	2,59	2,59
Capacitor	C16, C18	GCJ21BR71H105KA01L	1u +-10%, 50VDC, X7R, 0805	2	Murata	<a href="#">link</a>	1,25	2,5
Aluminum Electrolytic Capacitor	C15, C20	EEE-FK1E102AQ	1000u +-20%, 105 stopni	2	Panasonic	<a href="#">link</a>	4,86	9,72
Resistor	R1, R6, R19	CRCW060310K0FKEAC	10k +-1%, 100mW, 0603	3	Vishay	<a href="#">link</a>	0,55	1,65
Resistor	R2	CRCW060319K1FKTA	19k1 +-1%, 100mW, 0603	1	Vishay	<a href="#">link</a>	0,55	0,55
Resistor	R3	CRCW06035K36FKEA	5k36 +-1%, 100mW, 0603	1	Vishay	<a href="#">link</a>	0,393	0,393
Resistor	R4	CRCW06031K78FKTA	1k78 +-1%, 100mW, 0603	1	Vishay	<a href="#">link</a>	0,67	0,67
Resistor	R5	CRCW060357K6FKEA	57k6 +-1%, 100mW, 0603	1	Vishay	<a href="#">link</a>	0,472	0,472
Resistor	R7, R8	CRCW0603300RFKEAC	300R +-1%, 100mW, 0603	2	Vishay	<a href="#">link</a>	0,509	1,018
Resistor	R9, R14	MCT0603MD4700BP100	470R +-0,1%, 125mW, 0603	2	Vishay	<a href="#">link</a>	2,82	5,64
Resistor	R10	CRCW0603100KFKEAC	100k +-1%, 100mW, 0603	1	Vishay	<a href="#">link</a>	0,393	0,393
Resistor	R11, R12	MCT06030E1002BP100	10k +-0,1%, 100mW, 0603	2	Vishay	<a href="#">link</a>	0,509	1,018
Resistor	R13	CRCW06037K50FKEA	7k5 +-1%, 100mW, 0603	1	Vishay	<a href="#">link</a>	0,393	0,393
Resistor	R15	GMR100HTBFQR047	0,047R +-1%, 3W, 2512	1	Rohm	<a href="#">link</a>	5,69	5,69
Resistor	R16, R17	RCWE0603R100FNEA	0,1R +-1%, 200mW, 0603	2	Vishay	<a href="#">link</a>	2,43	4,86
Resistor	R18	RCW0603100RFKEAHP	100R +-1%, 100mW, 0603	1	Vishay	<a href="#">link</a>	0,587	0,587
EMIFilter	FL1	DSS1NB32A222Q55B	DSS1NB32A222Q55B	1	Murata	<a href="#">link</a>	1,88	1,88
TVS Diode	D1, D2	824500641	824500641	2	Wurth Elektronik	<a href="#">link</a>	1,1	2,2
Transistor BJT NPN	Q1	MMBT3904VL	MMBT3904VL	1	Nexperia	<a href="#">link</a>	0,43	0,43
Transistor MOSFET N-Channel	Q2	PMN30UNX	PMN30UNX	1	Nexperia	<a href="#">link</a>	1,37	1,37
Digital isolator	U1	ADUM130E0BRZ	ADUM130E0BRZ	1	Analog Devices	<a href="#">link</a>	12,44	12,44
Optocoupler	U4, U5	TLP5754H(TP4,E)	TLP5754H	2	Toshiba	<a href="#">link</a>	8,33	16,66
Voltage Regulator 5V	U6	TLV76050DBZT	TLV76050DBZT	1	Texas Instruments	<a href="#">link</a>	1,84	1,84
Op Amp	U3	ADA4084-2ACPZ-R7	ADA4084	1	Analog Devices	<a href="#">link</a>	28,17	28,17
Op Amp	U7	PA119CE	PA119CE	1	Apex	<a href="#">link</a>	1287,92	1287,92
DAC	U2	DAC80501ZDGST	DAC80501ZDGST	1	Texas Instruments	<a href="#">link</a>	24,93	24,93
Temperature sensor, Pulse Train Interface	U8	LMT01LPGM	Temp sensor	1	Texas Instruments	<a href="#">link</a>	10,04	10,04
Instrumental Amplifier	U9	INA849DR	INA849DR	1	Texas Instruments	<a href="#">link</a>	36,21	36,21
Socket, 21-Pin	CON1, CON3	76308-209LF	Socket	3	Amphenol	<a href="#">link</a>	9,57	28,71
Terminal Block Screw	CON2	TB004-508-05BE	TB004-508-05BE	1	CUI Devices	<a href="#">link</a>	5,69	5,69
Heat sink	-	LA6	-	1	Fischer Elektronik	<a href="#">link</a>	273,65	273,65
Thermal Joint Compound	-	120-2	-	1	Wakefield-Vette	<a href="#">link</a>	45,28	45,28
						<b>Suma</b>	<b>1835,684</b>	

Podane są ceny brutto, w celu konwersji na ceny netto należy odliczyć 23% podatku VAT.

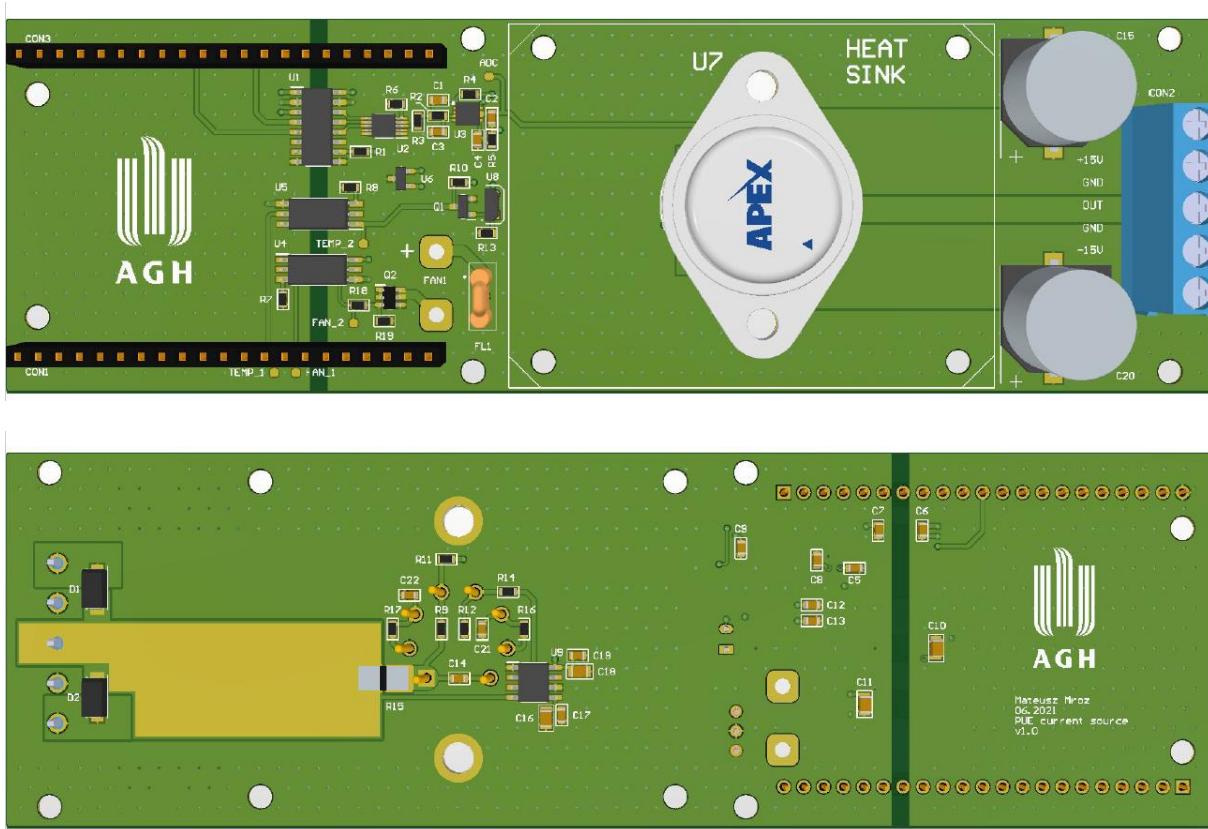
BOM znajduje się również w pliku *BOMMainBoard.xlsx*

### 3.4 PCB

Została zaprojektowana 4 warstwowa płytka drukowana, zgodnie ze specyfikacją dla takich producentów jak EuroCircuit czy JLCPCB.

Rozmiar: 154,18 x 47,88 [mm]

Widok 3D:



Radiator montowany jest w poprzek osi PCB ze względu na swoją długość (10[cm]). Jest on przymocowany do PCB za pomocą 4 śrub M3. Radiator musi być poddany wierceniu, aby móc przymocować do niego obudowę TO3 wzmacniacza operacyjnego za pomocą dwóch śrub M3 i pasty termoprzewodzącej oraz, możliwe jak najbliżej chłodzonego układu, czujnik temperatury.

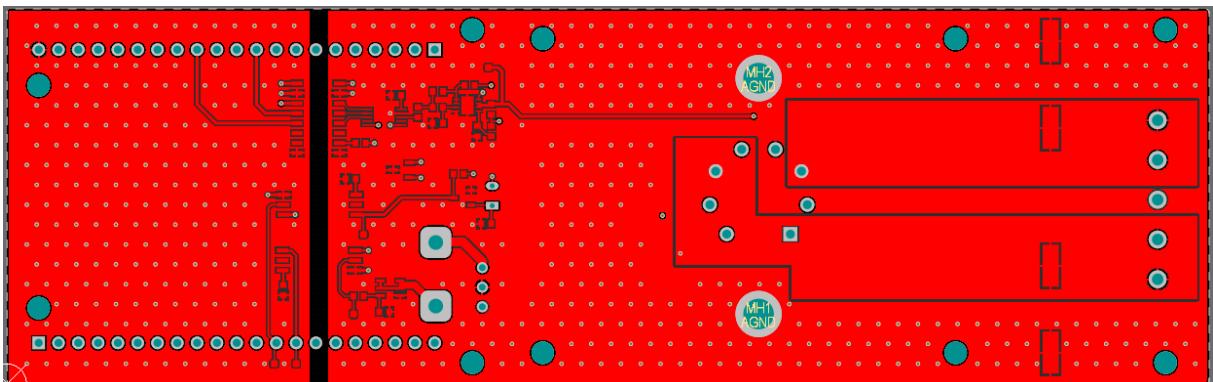
Jak widać ścieżki, przez które będą przepływać duże prądy zostały możliwie jak najbardziej poszerzone, aby wytrzymać warunki pracy. Ścieżka wyjściowa posiada w najwęższym miejscu ok. 220[mil], zaś ścieżki zasilania 1200[mil]. Aby zmniejszyć rezystancję ścieżki wyjściowej odsłonięto miedź aby w procesie HASL pokryć ją dodatkową warstwą spoiny. Jest to czynność zrobiona zapobiegawczo, ze względu na możliwość dostarczenia prądu stałego o natężeniu 5[A] do obciążenia. W liniach wysoko-prądowych zrezygnowano również z zastosowania thermal-relief.

Warstwy masy na różnych warstwach zostały ze sobą połączone przełotkami.

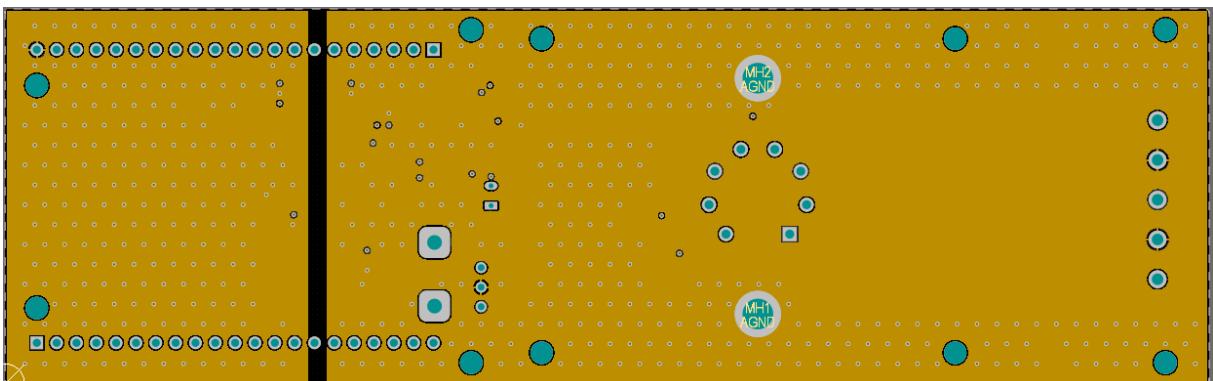
W kluczowych punktach płytki dodano punkty pomiarowe, które ułatwią ewentualne wyszukiwanie błędów lub badanie działania układu.

### Podział warstw:

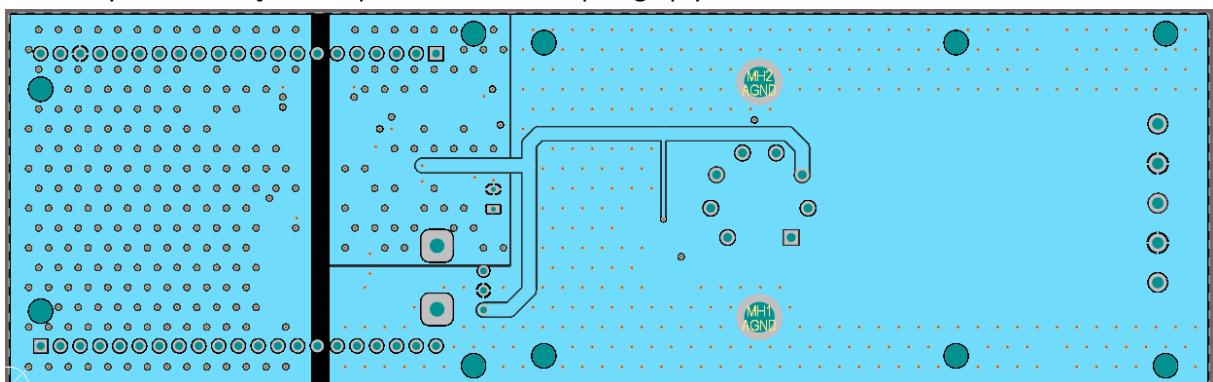
- Górną warstwą: większość elementów, ścieżki sygnałowe, dwie oddzielone galwanicznie powierzchnie masy, duże powierzchnie linii zasilania +15[V] dla wzmacniacza operacyjnego.



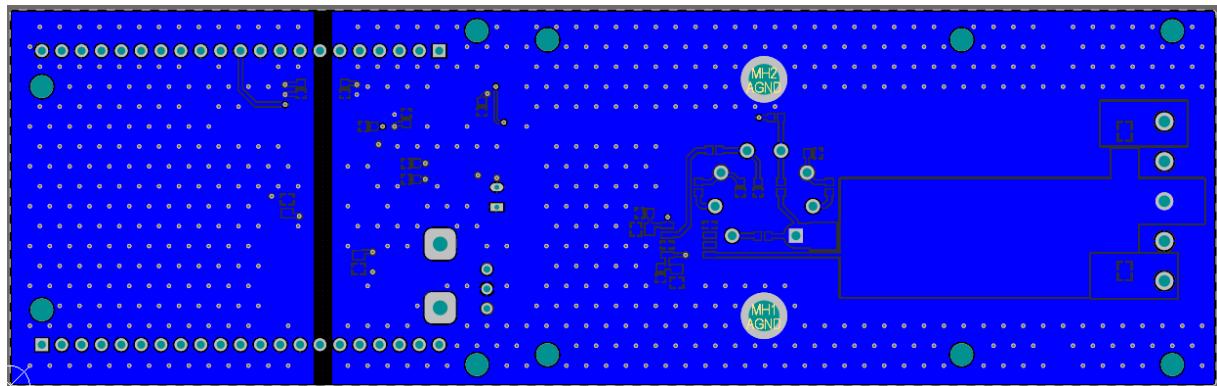
- Pierwsza warstwa wewnętrzna: wyłącznie dwie oddzielone galwanicznie powierzchnie masy, warstwa pełni również funkcję ekranującą



- Druga warstwa wewnętrzna: powierzchnia napięcia zasilania 3.3[V], 5[V], 15[V] i warstwy masy w celu zwiększenia przewodnictwa cieplnego płytki



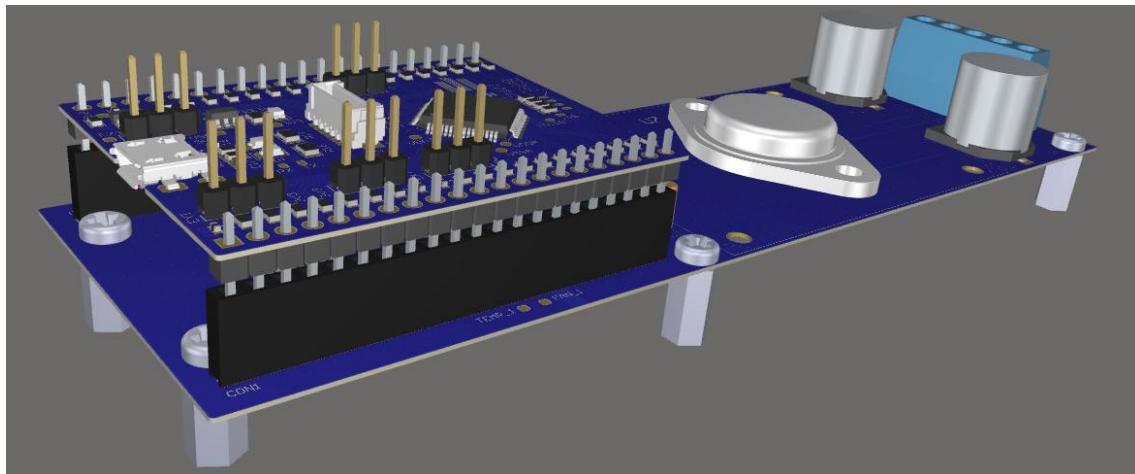
- Dolna warstwa: kondensatory odsprzęgające, elementy źródła prądowego, pozwoliło to na minimalizację długości ścieżek oraz pozbycie się przelotek, powierzchnie masy



## 4. Wizualizacja 3D

Wizualizacja 3D gotowego projektu znajduje się w pliku *Stamp3dRender.pdf*

Wizualizacja zawiera połączone z sobą: moduł Stamp i płyta bazowa, dodatkowo dodano elementy montażowe: dystanse, na których mechanicznie opiera się projekt. Kilka przykładowych widoków:



## 5. Literatura

- P. Horowitz, W. Hill, *Sztuka elektroniki*, Warszawa 2015, ISBN: 978-83-206-1992-8,
- U. Tietze, Ch. Schenk, *Układy półprzewodnikowe*, Warszawa 1996, ISBN: 83-204-2123-3,
- Alteria, *High-Speed Board Layout Guideline*, San Jose 2009,
- Toradex, *Layout Design Guide*, Switzerland 2015,
- Texas Instruments, *Analysis of Improved Howland Current Pump Configurations*, Texas 2020,
- LTwiki, [link](#),
- Dokumentacja techniczna wykorzystanych komponentów.