



Laboratorium układów elektronicznych

Ćwiczenie 5

Przetwornice impulsowe

Zagadnienia do przygotowania

- Podstawowe konfiguracje i parametry przetwornic impulsowych
- Budowa i zasada działania przetwornicy typu step-up (boost)
- Budowa i zasada działania przetwornicy typu step-down (buck)
- Budowa i zasada działania przetwornicy typu odwrócony step-up (invert)
- Budowa i zasada działania przetwornicy typu current mode step-up
- Pojęcia:
 - współczynnik wypełnienia przebiegu prostokątnego,
 - PWM - modulacja wypełnienia impulsów,
 - sprawność przetwornicy,
 - napięcie wyindukowane w dławiku,
 - prąd i napięcie szczytowe.

Literatura

- [1] Baranowski, Czajkowski, Układy analogowe nieliniowe i impulsowe WNT

[2] Niedźwiedzki, Rasiukiewicz, Nieliniowe elektroniczne układy analogowe, WNT

[3] Notatki do wykładu Analogowe i Cyfrowe Układy Elektroniczne 2.

[4] nota katalogowa TC4432

[5] nota katalogowa IRF3704

[6] nota katalogowa UC3843

1. Wprowadzenie

Przetwornice impulsowe oraz stabilizatory impulsowe są obecnie masowo stosowane w sprzętach powszechnego użytku, a także aparaturze pomiarowej. Przetwornice impulsowe mają wiele zalet w porównaniu do stabilizatorów liniowych, ale mają także i wady, przez co pomimo dużej popularności przetwornic impulsowych, zasilacze liniowe są dalej stosowane. Głównymi zaletami przetwornic impulsowych są: wysoka sprawność, małe wymiary oraz waga a także możliwość separacji galwanicznej. Sprawność przetwornic impulsowych może sięgać nawet do 95% i zwykle jest większa niż 70%, przy czym sprawność stabilizatorów liniowych często jest mniejsza niż 50%. Ponadto wykorzystując przetwornice impulsowe można nie tylko obniżać napięcie jak w przypadku klasycznych stabilizatorów napięcia, ale można także je podwyższać lub zmieniać jego polaryzację. Transformatory oraz kondensatory filtrujące w przetwornicach są zwykle kilkukrotnie mniejsze niż te stosowane przy stabilizacji liniowej. Zalety te powodują, dużą popularność tego typu rozwiązań w urządzeniach przenośnych, np.: w telefonach lub komputerach, gdzie zwykle znajduje się kilka przetwornic w jednym urządzeniu.

Wadą w stosunku do stabilizatorów liniowych, jest dużo bardziej skomplikowana budowa, a co za tym idzie mniejsza trwałość i niezawodność. Przetwornice też zwykle charakteryzują się gorszą stabilnością napięcia wyjściowego oraz wolniejszą reakcją na zmiany obciążenia. Dodatkowo przetwornice mogą być źródłem zakłóceń, przez co stosowanie ich w niektórych wysokoczułych urządzeniach pomiarowych może być utrudnione lub wręcz niemożliwe.

1.1. Klasyfikacja przetwornic impulsowych

Przetwornice impulsowe można klasyfikować na kilka sposobów w zależności od wybranej cechy. Przetwornice impulsowe składają się z elementów biernych (LC), które gromadzą i transformują energię dostarczaną do nich w krótkich impulsach przez elementy kluczujące (tranzystory). Energia z elementu indukcyjnego jest przekazywana na wyjście przetwornicy przez elementy prostujące napięcie.

Ze względu na **rodzaj zastosowanego elementu indukcyjnego** przetwornice można podzielić na:

- **Transformatorowe** (z separacją galwaniczną wyjścia względem wejścia zasilania)
- **Dławikowe** (bez separacji galwanicznej wyjścia względem wejścia)

Przetwornice transformatorowe stosuje się głównie jako impulsowe zasilacze sieciowe (tj. zasilane z sieci 50 Hz) lub w aplikacjach, gdzie separacja wyjścia układu względem wejścia jest pożądana - zasilacze o „pływającym” wyjściu. W przetwornicach tych stosuje się transformator, który zazwyczaj jest produkowany na zamówienie do konkretnego zasilacza oraz którego projekt wymaga dużej ilości obliczeń.

Przetwornice dławikowe zwane także jako beztransformatorowe, są przetwornicami bez separacji galwanicznej. Stosuje się je zazwyczaj wewnątrz urządzeń, do wytworzenia potrzebnego zasilania - urządzenia których komponenty wymagają wielu różnych napięć zasilania posiadają wiele przetwornic impulsowych. W aplikacjach tych separacja galwaniczna nie jest potrzebna. Przetwornice dławikowe są prostsze, łatwiej się wyznacza parametry dławika, a ponadto dławiki kupuje się jako gotowe elementy - zazwyczaj nie ma potrzeby wykonywania ich na zamówienie.

Ze względu na **typ konwersji napięcia** przetwornice można podzielić na:

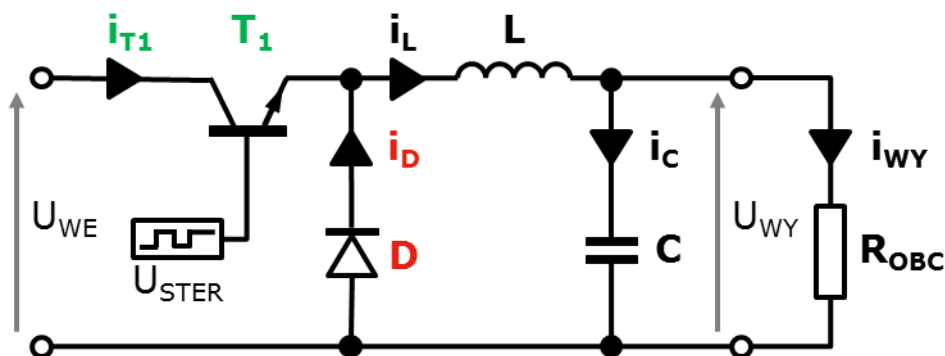
- Obniżające napięcie (step down, buck)
- Podwyższające napięcie (step-up, boost)
- Zmieniające polaryzację (invert)

Ze względu na **zasadę działania i gromadzenia energii** przetwornice można podzielić na:

- Współbieżne lub jednotaktowe (forward) - w tych przetwornicach gromadzenie energii w dławiku oraz przekazywanie energii do wyjścia są realizowane w tym samym czasie, podczas gdy element kluczujący jest włączony.
- Przeciwbieżne lub dwutaktowe (flyback) - w tych przetwornicach energia jest gromadzona w dławiku w jednym takcie, w czasie którego element kluczujący jest włączony, a oddawana do obciążenia jest w drugim takcie, kiedy klucz jest rozarty.

1.2. Przetwornica współbieżna obniżająca napięcie (buck, step-down)

Przetwornica typu step-down(buck) jest przetwornicą współbieżną obniżającą napięcie. Uproszczony schemat przetwornicy buck jest przedstawiony na rys.1.2.1.



Rys.1.2.1. Uproszczony schemat przetwornicy buck

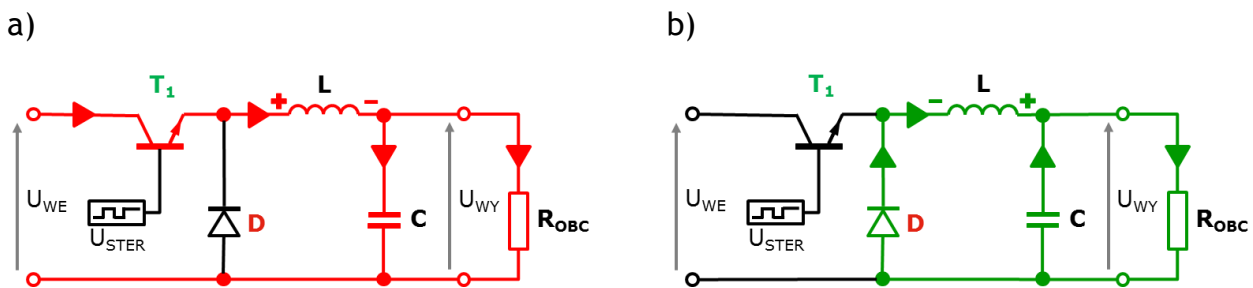
Tranzystor T1 kluczuje napięcie z określonym wypełnieniem - **napięcie wyjściowe zależy bezpośrednio od wypełnienia**, zgodnie z zależnością 1.2.1.

$$U_{WY} = U_{\text{średnie}} = \delta U_{WE} = \frac{t_{ON}}{T} U_{WE} , \quad (1.2.1)$$

gdzie δ oznacza wypełnienie sygnału kluczującego (w %), czyli stosunek czasu załączenia klucza t_{ON} , do czasu trwania okresu T .

Jak widać z powyższej zależności **napięcie wyjściowe przetwornicy buck nie zależy od parametrów elementów LC**. W przetwornicy tej elementy te działają jako

filtr usuwający tętnienia napięcia wyjściowego. Fazy pracy przetwornicy buck przedstawione zostały na rys.1.2.2. W pierwszej fazie, oznaczonej a) prąd przepływa przez tranzystor T1 i dławik L do kondensatora C i obciążenia wyjściowego. W tej fazie energia jest gromadzona w dławiku. W drugiej fazie klucz jest rozwarty i układ nie jest zasilany z wejścia. Energia zgromadzona w dławiku przekazywana jest do obciążenia dzięki czemu prąd płynie przez obciążenie, nawet gdy klucz jest rozwarty.



Rys.1.2.2. Fazy pracy przetwornicy buck: a) faza gromadzenia energii, b) faza przekazywania zgromadzonej energii do obciążenia

Przebiegi prądów oraz napięć w przetwornicy buck przedstawiono na rys.1.2.3. Dla uproszczenia przyjmujemy, że zmiany napięcia wyjściowego w każdym cyklu są znikomo małe. W pierwszej fazie, gdy klucz jest zwarty, na dławiku odkłada się stałe napięcie równe różnicy między napięciem zasilania a napięciem wyjściowym. W tym wypadku prąd płynący przez dławik będzie zwiększał się liniowo zgodnie z zależnością 1.2.2

$$i_{L1}(t) = \frac{u_L}{L} t + i_L(0) = i_{Lmin} + \frac{u_{WE} - u_{WY}}{L} t, \text{ dla } t \in \langle t_0, t_1 \rangle \quad (1.2.2)$$

W drugiej fazie, gdy klucz jest rozwarty, napięcie na dławiku zmienia się skokowo, do wartości równej napięciu wyjściowemu. Prąd i_{L2} płynący w tej fazie przez dławik L oraz diodę D opisuje wzór 1.2.3.

$$i_{L2}(t) = \frac{u_L}{L} t + i_L(0) = i_{Lmax} - \frac{u_{WY} + U_{DP}}{L} t, \text{ dla } t \in \langle t_0, t_1 \rangle \quad (1.2.3)$$

, gdzie U_{DP} jest spadkiem napięcia na diodzie prostującej D.

Na podstawie powyższych równań można wyliczyć zmianę prądu w dławiku - Δi_L . Wartość zmian prądu można wyznaczyć z zależności 1.2.4.

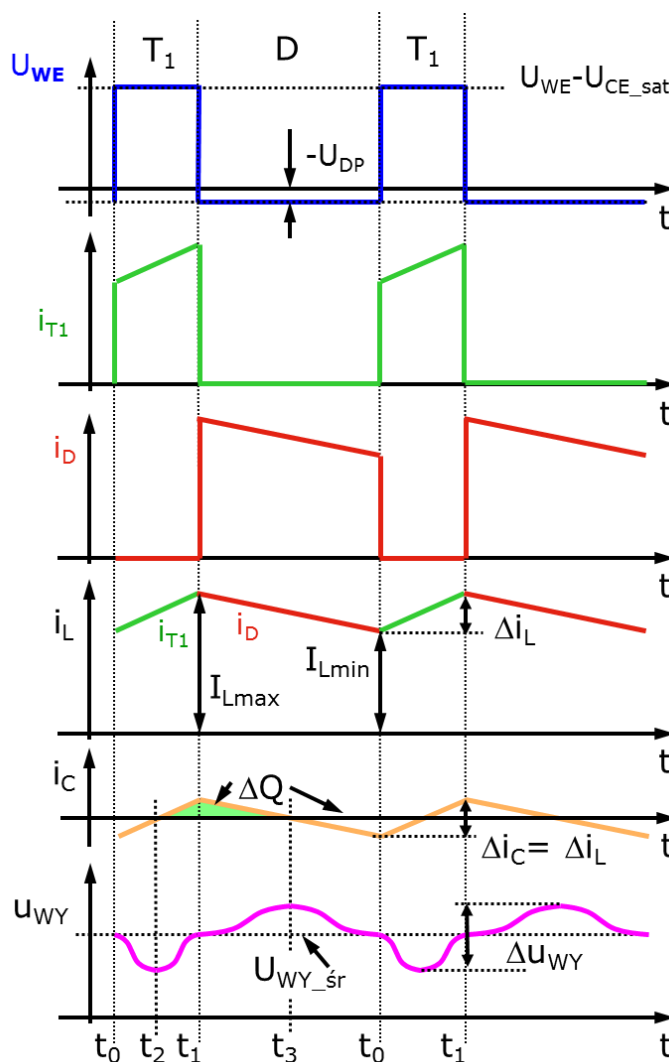
$$\Delta i_L = i_{Lmax} - i_{Lmin} = \frac{u_{We} - u_{WY}}{L} \delta T = \frac{u_{WY}}{L} (1 - \delta) T \quad (1.2.4)$$

Korzystając z powyższych zależności, można wyznaczyć amplitudę tętnień napięcia wyjściowego - zależność 1.2.5 i 1.2.6.

$$U_{\text{tętnień}} = \Delta u_{WY} = \frac{1}{C} \int_{t_2}^{t_3} i_C(t) dt = \frac{Q_C}{C} \quad (1.2.5)$$

, gdzie $Q_C = \frac{T}{8} \Delta i_L$, stąd:

$$U_{\text{tętnień}} = \frac{u_{WY}}{8LC} (1 - \delta) T \quad (1.2.6)$$



Rys.1.2.3. Przebiegi prądów oraz napięć w przetwornicy buck

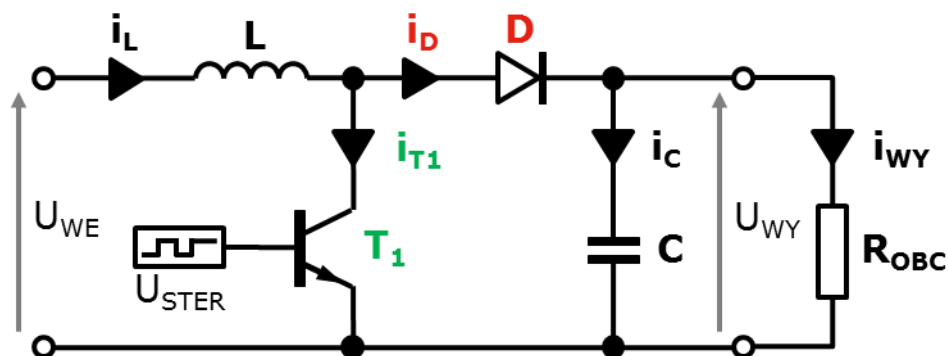
Należy dodać, że przetwornica typu buck nie może pracować bez obciążenia - w tym wypadku napięcie wyjściowe dąży do napięcia wejściowego.

W bezstratnej przetwornicy współbieżnej typu buck:

- Napięcie za tranzystorem kluczującym a na wejściu filtru RC zmienia się w zakresie od 0V do napięcia zasilania,
- Napięcie wyjściowe także zmienia się w zakresie od 0V do napięcia zasilania,
- Napięcie wyjściowe jest zależne od współczynnika wypełnienia δ sygnału kluczującego, a nie jest zależne od rezystancji obciążenia R_L ,
- Prąd z wejścia układu jest pobierany jedynie w pierwszej fazie, gdy klucz jest włączony,
- Maksymalny prąd I_{Lmax} płynący przez dławik i tranzystor kluczujący, w praktyce wynosi niewiele więcej niż prąd płynący przez obciążenie - I_{WY} , zakładając, że $\Delta i_L \ll I_{WY}$.

1.3. Przetwornica przeciwbieżna podwyższająca napięcie (boost, step-up)

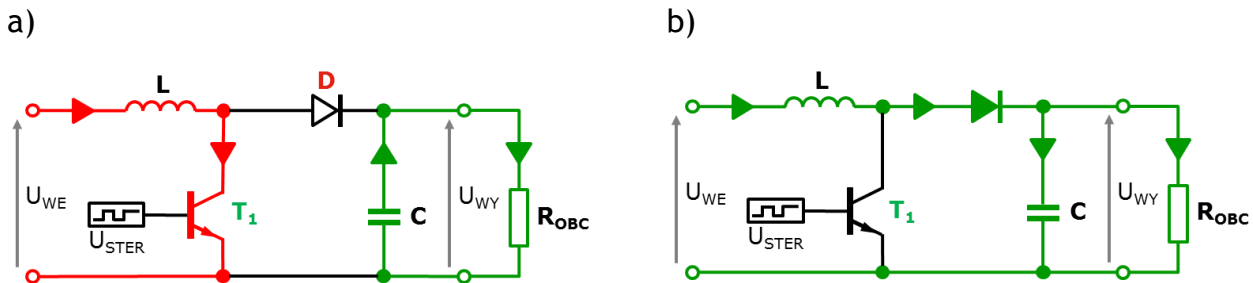
Przetwornica typu step-up (boost) jest przetwornicą przeciwbieżną odwyższającą napięcie. Uproszczony schemat przetwornicy boost jest przedstawiony na rys.1.3.1.



Rys.1.3.1. Uproszczony schemat przetwornicy boost

W przetwornicy przeciwbieżnej podwyższającej napięcie możemy wyróżnić dwa cykle pracy. W pierwszym, cyklu tranzystor T_1 zwiera wyjście dławika z masą. Prąd przepływający przez dławik powoduje gromadzenie się w jego rdzeniu energii. W drugim cyklu tranzystor się rozwiera a energia zgromadzona w dławiku jest przekazywana do obciążenia. W tej fazie jeden koniec cewki połączony jest z zasilaniem a drugi przez diodę prostującą z obciążeniem. Napięcie wyjściowe jest więc sumą napięcia zasilania oraz napięcia wyindukowanego w dławiku. Oznacza to, że **minimalnym napięciem**

wyjściowym przetwornicy boost jest napięcie zasilania. Fazy pracy przetwornicy boost przedstawione zostały na rys.1.3.2. Stosując transformator zamiast dławika uzyskujemy możliwość zmiany napięcia wyjściowego oraz separację galwaniczną - jest to klasyczny układ fly-back stosowany w zasilaczach sieciowych.



Rys.1.3.2. Fazy pracy przetwornicy boost: a) faza gromadzenia energii, b) faza przekazywania zgromadzonej energii do obciążenia

Przebiegi prądów oraz napięć w przetwornicy boost przedstawiono na rys.1.3.4. W zależności od rezystancji obciążenia możemy wyszczególnić trzy typy obciążeń: nadkrytyczne (część energii gromadzonej w fazie ładowania jest oddawana do obciążenia), krytyczne, i podkrytyczne (cała energia gromadzona w fazie ładowania jest oddawana do obciążenia w fazie rozładowywania). Typowo stosuje się przetwornice z obciążeniem nadkrytycznym - ze względu na mniejsze wahania prądu oraz mniejszą maksymalną wartość prądu.

Dla obciążenia nadkrytycznego wartość prądu przepływającego przez dławik oraz tranzystor w cyklu ładowania będzie się zwiększała liniowo zgodnie z zależnością 1.3.1

$$i_{L1}(t) = \frac{u_L}{L} t + i_{Lmin} = i_{Lmin} + \frac{u_{WE}}{L} t \quad (1.3.1)$$

W drugiej fazie, gdy klucz jest rozarty, napięcie na dławiku zmienia się skokowo, do wartości równej napięciu wyjściowemu minus napięcie wejściowe. Prąd i_{L2} płynący w tej fazie przez dławik L oraz diodę D opisuje wzór 1.3.2.

$$i_{L2}(t) = \frac{u_L}{L} t + i_{Lmax} = i_{Lmax} + \frac{u_{WY} + U_{DP} - u_{WE}}{L} t, \quad (1.3.2)$$

gdzie U_{DP} jest spadkiem napięcia na diodzie prostującej D.

Na podstawie powyższych równań można wyliczyć zmianę prądu w dławiku - Δi_L . Wartość zmian prądu można wyznaczyć z zależności 1.3.3.

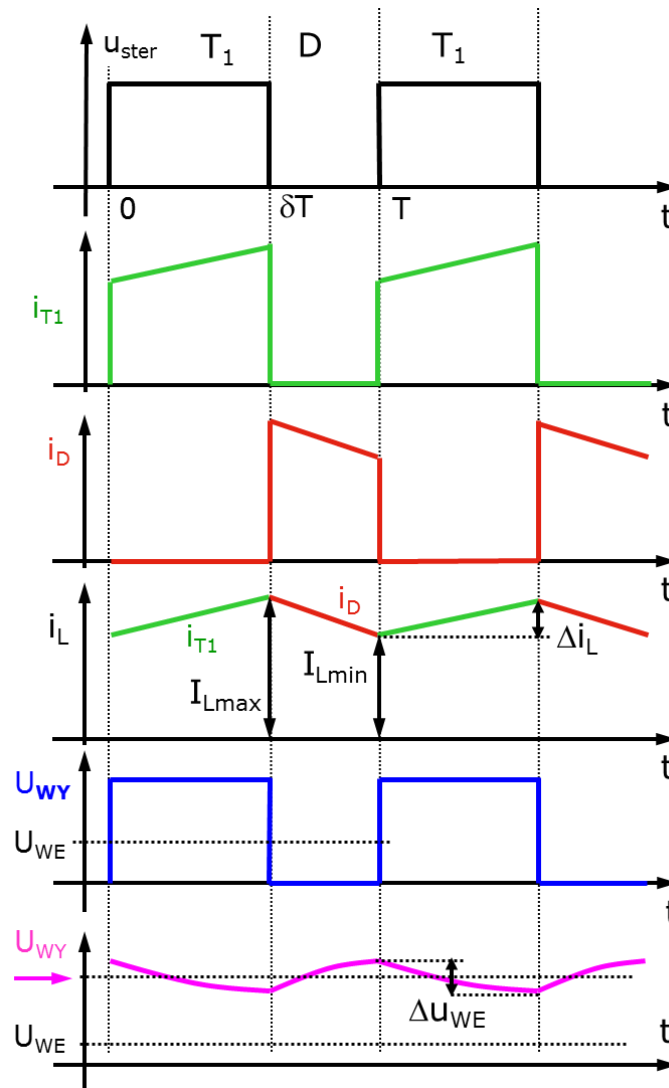
$$\Delta i_L = \frac{u_{we}}{L} \delta T = \frac{u_{wY}}{L} (1 - \delta) T \quad (1.3.3)$$

Napięcie na tranzystorze w drugim cyklu (tranzystor rozwarty) - napięcie wyindukowane w dławiku + napięcie wejściowe można wyznaczyć ze wzoru 1.3.4. Jest to również wartość napięcie wyjściowego

$$u_{T1max} = u_{wY} = \frac{u_{we}}{1 - \delta} \quad (1.3.4)$$

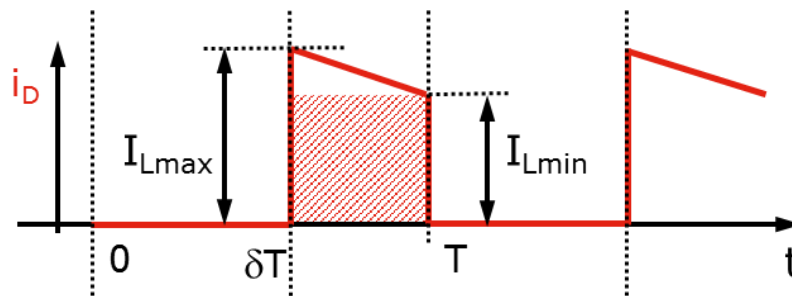
przy $I_{Lmin} > 0$

Z zależności tej wynika, że napięcie wyjściowe (napięcie na tranzystorze) jest większe od napięcia wejściowego i przy dużych wartościach współczynnika wypełnienia δ może przyjmować bardzo duże wartości.



Rys.1.3.4. Przebiegi prądów i napięć w przetwornicy boost

Prąd wyjściowy I_{WY} płynący przez obciążenie jest równy średniemu prądowi i_D przepływającemu przez diodę D - patrz rys.1.3.3



Rys.1.3.3. Przebieg prądu płynącego przez diodę D

Prąd ten można wyznaczyć z zależności 1.3.5.

$$I_{WY} = \frac{1}{T} \int_0^T i_D(t) dt = \left(i_{Lmin} + \frac{U_I}{2L} \delta T \right) (1 - \delta) = \left(i_{Lmax} - \frac{U_I}{2L} \delta T \right) (1 - \delta) \quad (1.3.5)$$

Zakładając, że prąd wyjściowy przetwornicy płynący przez obciążenie, w pierwszym cyklu (dioda D nie przewodzi i obciążenie nie dostaje energii z wejścia) jest stały, to napięcie na kondensatorze wyjściowym C zmniejszy się w czasie δT (czas trwania pierwszego cyklu) o:

$$U_{tętnień} = \Delta u_{WY} = \frac{\Delta Q_C}{C} \approx \frac{I_{WY} \delta T}{C} \quad (1.3.6)$$

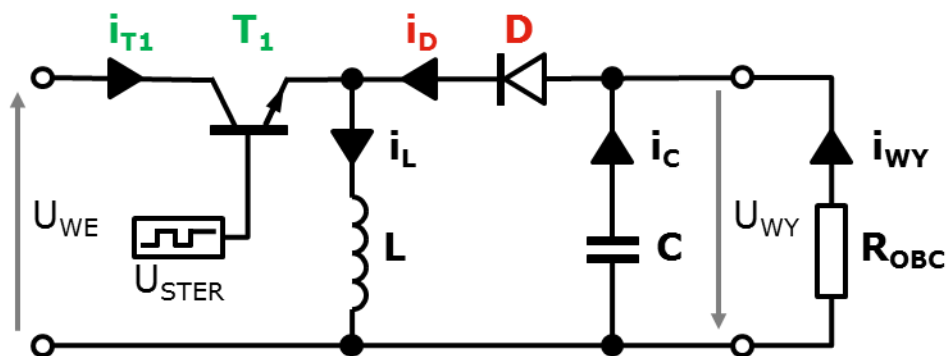
Należy dodać, że przetwornica typu boost nie może pracować bez obciążenia - w tym wypadku napięcie wyjściowe dąży do nieskończoności.

W bezstratnej przetwornicy przeciwbieżnej typu boost:

- Napięcie na tranzystorze kluczującym zmienia się w zakresie od 0V do napięcia wyjściowego,
- Minimalne napięcie wyjściowe jest równe napięciu zasilania,
- Napięcie wyjściowe jest zależne od współczynnika wypełnienia δ sygnału kluczującego, a także od rezystancji obciążenia R_L ,
- Prąd z wejścia układu pobierany jest w obu fazach,

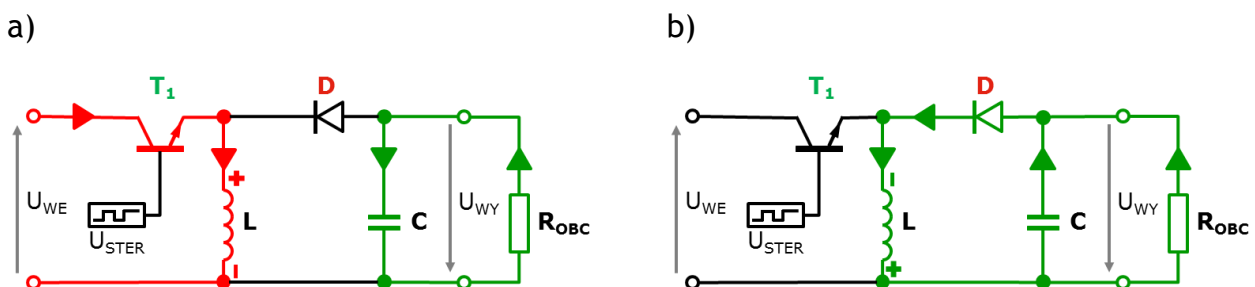
1.4. Przetwornica przeciwbieżna zmieniająca polaryzację napięcia (invert, odwrócony step-up)

Przetwornica typu invert jest przetwornicą przeciwbieżną zmieniającą polaryzację napięcia. Uproszczony schemat przetwornicy invert jest przedstawiony na rys.1.4.1. Przetwornica typu invert jest bardzo podobna do przetwornicy typu boost - zamienione miejscami są cewka i tranzystor, a dioda ma odwrotną polaryzację. Działanie tych przetwornic także jest bardzo podobne.



Rys.1.4.1. Uproszczony schemat przetwornicy invert

W przetwornicy przeciwbieżnej zmieniającej polaryzację napięcia możemy wyróżnić dwa cykle pracy. W pierwszym, cyklu tranzystor T1 zwiiera wejście napięcia z wejściem dławika. Prąd przepływający przez dławik powoduje gromadzenie się w jego rdzeniu energii. W tym cyklu energia nie jest przekazywana do obciążenia ze względu na zaporową polaryzację diody D. W drugim cyklu tranzystor się rozwiera a energia zgromadzona w dławiku jest przekazywana do obciążenia. W tej fazie jeden koniec cewki połączony jest z masą a drugi przez diodę prostującą z obciążeniem. Napięcie wyjściowe jest tożsame z napięciem wyindukowanym w dławiku. W przeciwieństwie do przetwornicy typu boost, minimalne napięcie wyjściowe przetwornicy invert wynosi 0V. Fazy pracy przetwornicy invert przedstawione zostały na rys.1.4.2.



Rys.1.4.2. Fazy pracy przetwornicy invert: a) faza gromadzenia energii, b) faza przekazywania zgromadzonej energii do obciążenia

Przebiegi prądów oraz napięć w przetwornicy invert przedstawiono na rys.1.4.3.

Dla obciążenia nadkrytycznego wartość prądu przepływającego przez dławik oraz tranzystor w cyklu ładowania będzie się zwiększała liniowo zgodnie z zależnością 1.4.1

$$i_{L1}(t) = \frac{u_L}{L} t + i_{Lmin} = i_{Lmin} + \frac{u_{WE}}{L} t \quad (1.4.1)$$

W drugiej fazie, gdy klucz jest rozwarty, napięcie na dławiku zmienia się skokowo, do wartości równej napięciu wyjściowemu - odwracana jest polaryzacja. Prąd i_{L2} płynący w tej fazie przez dławik L oraz diodę D opisuje wzór 1.3.2.

$$i_{L2}(t) = \frac{u_L}{L} t + i_{Lmax} = i_{Lmax} + \frac{U_{DP} - u_{WY}}{L} t, \quad (1.4.2)$$

gdzie U_{DP} jest spadkiem napięcia na diodzie prostującej D.

Napięcie na tranzystorze w drugim cyklu (tranzystor rozwarty) - napięcie wyindukowane w dławiku + napięcie wejściowe można wyznaczyć ze wzoru 1.4.3. Jest to również wartość napięcia wyjściowego

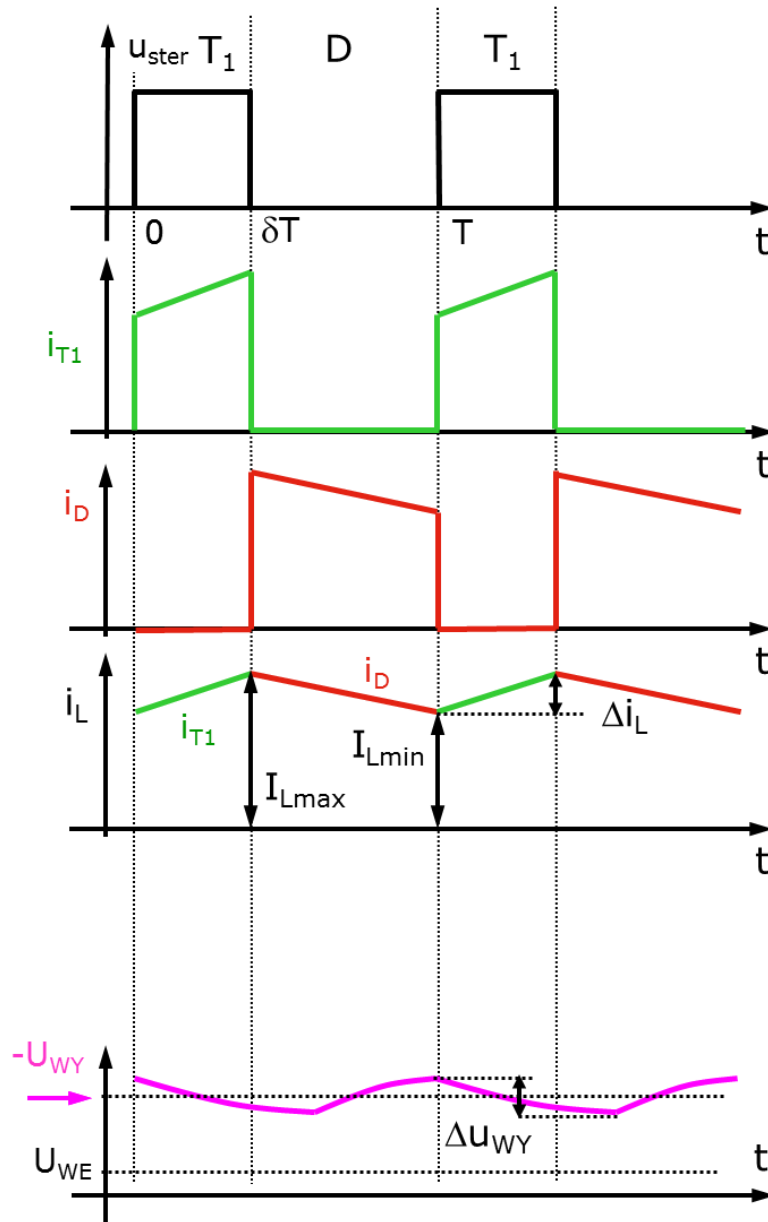
$$u_{T1max} = u_{WY} = -u_{We} \frac{\delta}{1-\delta}, \quad (1.4.3)$$

przy $i_{Lmin} > 0$.

Z zależności tej wynika, że napięcie wyjściowe może mieć większą wartość (na minusie) od wartości napięcia wejściowego i przy dużych wartościach współczynnika wypełnienia δ może przyjmować bardzo duże wartości.

Prąd wyjściowy i_{WY} płynący przez obciążenie jest równy średniemu prądowi i_D przepływającemu przez diodę D. Prąd ten można wyznaczyć z zależności 1.4.4.

$$I_{WY} = \frac{1}{T} \int_0^T i_D(t) dt = \left(i_{Lmin} + \frac{U_I}{2L} \delta T \right) (1 - \delta) = \left(i_{Lmax} - \frac{U_I}{2L} \delta T \right) (1 - \delta) \quad (1.4.4)$$



Rys.1.4.3. Przebiegi prądów i napięć w przetwornicy invert

Zakładając, że prąd wyjściowy przetwornicy płynący przez obciążenie, w pierwszym cyklu (diody D nie przewodzi i obciążenie nie dostaje energii z wejścia) jest stały, to napięcie na kondensatorze wyjściowym C zmniejszy się w czasie δT (czas trwania pierwszego cyklu) o:

$$U_{\text{tętnień}} = \Delta u_{WY} = \frac{\Delta Q_C}{C} \approx \frac{I_{WY} \delta T}{C} \quad (1.4.5)$$

Należy dodać, że przetwornica typu invert nie może pracować bez obciążenia - w tym wypadku napięcie wyjściowe dąży do minus nieskończoności.

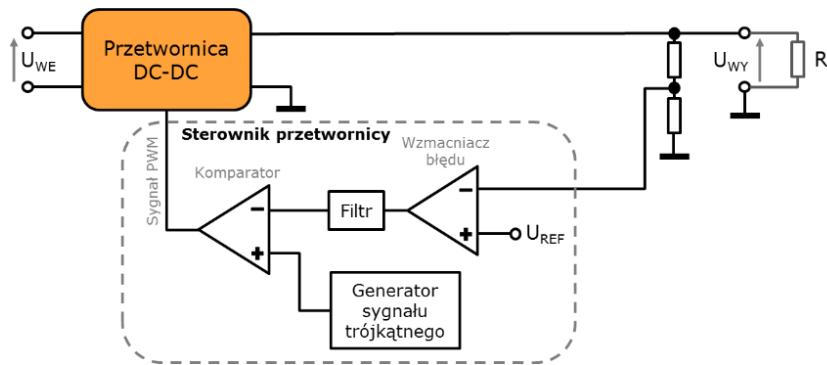
W bezstratnej przetwornicy przeciwbieżnej typu invert:

- Napięcie na tranzystorze kluczującym zmienia się w zakresie od 0 V do napięcia wyjściowego (ujemnego),
- Minimalne napięcie wyjściowe jest równe 0V,
- Napięcie wyjściowe jest zależne od współczynnika wypełnienia δ sygnału kluczującego, a także od rezystancji obciążenia R_L ,
- Prąd z wejścia układu pobierany jest jedynie w drugiej fazie,

1.5. Sprzężenie zwrotne, modulacja szerokości impulsów, PWM (ang. Pulse Width Modulation)

Stabilizowane impulsowe przetwornice DC-DC (napięcia stałego) są układami pracującymi w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Sprzężenie zwrotne zmienia sygnał sterujący kluczem, tak aby uzyskać stabilne napięcie wyjściowe. W zależności od konstrukcji przetwornicy oraz sposobu zmiany sygnału sterującego, można wyróżnić: przetwornice z modulacją czasu wypełnienia sygnału impulsowego (ang. PWM, Pulse Width Modulation), przetwornice z modulacją częstotliwości kluczowania (ang. PFM, Pulse Frequency Modulation) przetwornice samowzbudne, przetwornice z modulacją amplitudy i inne. Stabilizatory te różnią się między sobą stopniem skomplikowania, częstotliwością pracy, szybkością reakcji na zmiany obciążenia, napięcia zasilania, itp. Najczęściej stosowanym typem przetwornic DC-DC są przetwornice PWM.

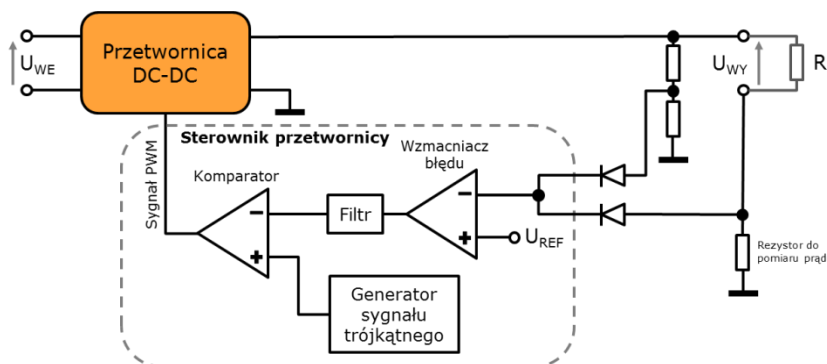
Stabilizatory z modulacją szerokości impulsów składają się z przetwornicy DC-DC, układu próbkującego napięcie wyjściowe przetwornicy, źródła napięcia referencyjnego (odniesienia), wzmacniacza błędu porównującego sygnał próbkowany z wejścia z sygnałem referencyjnym, filtr sygnału błędu, generatora sygnału piłokształtnego i komparatora tworzących generator impulsów o zmiennej szerokości impulsów. Schemat blokowy stabilizatora impulsowego PWM przedstawiony jest na rys.1.5.1. Stabilizator zmienia wypełnienie (czas załączenia klucza T_{ON}) tak aby próbkowane napięcie było równe napięciu referencyjnemu - tak aby napięcie wyjściowe miało stałą określoną wartość. Wypełnienie δ sygnału sterującego może być zmieniane od zera (przetwornica nie pracuje) do wartości maksymalnej - zwykle 0,7 - 0, dzięki czemu przetwornica jest w stanie zmieniać napięcie wyjściowe w szerokim zakresie. Napięcie wyjściowe stabilizatora PWM stabilizuje się zazwyczaj w ciągu kilkunastu-kilkuset milisekund.



Rys.1.5.1. Schemat blokowy przetwornicy z modulacją szerokości impulsów PWM

1.6. Przetwornice z wyjściem prądowym - prądowe sprzężenie zwrotne

Zazwyczaj stosuje się stabilizatory impulsowe ze stabilizacją napięcia - patrz rys.1.5.1. Spowodowane jest to tym, że w większości aplikacji chcemy uzyskać stabilne napięcie zasilania układów elektronicznych. Czasem jednak występuje potrzeba zastosowania przetwornic z wyjściem prądowym - działają tak samo jak liniowe źródła prądowe. W tym celu szeregowo z obciążeniem stosuje się rezystor do pomiaru prądu. Napięcie odkładające się na tym rezystorze jest proporcjonalne do prądu płynącego przez obciążenia. Przetwornica zmienia wypełnienie sygnału kluczującego tak, aby wartość prądu płynącego przez obciążenie miała określoną wartość. Podobnie jak w przypadku źródeł prądowych, napięcie wyjściowe nieobciążonej przetwornicy prądowej będzie dążyć do nieskończoności lub do napięcia zasilania (w zależności od typu przetwornicy). Skutkować to może uszkodzeniem elementów na wyjściu przetwornicy, bądź nawet samej przetwornicy. W tym celu stosuje się dwa sprzężenia zwrotne - prądowe oraz napięciowe, które ogranicza maksymalne napięcie wyjściowe w przypadku, gdy obciążenie ma za dużą rezystancję.



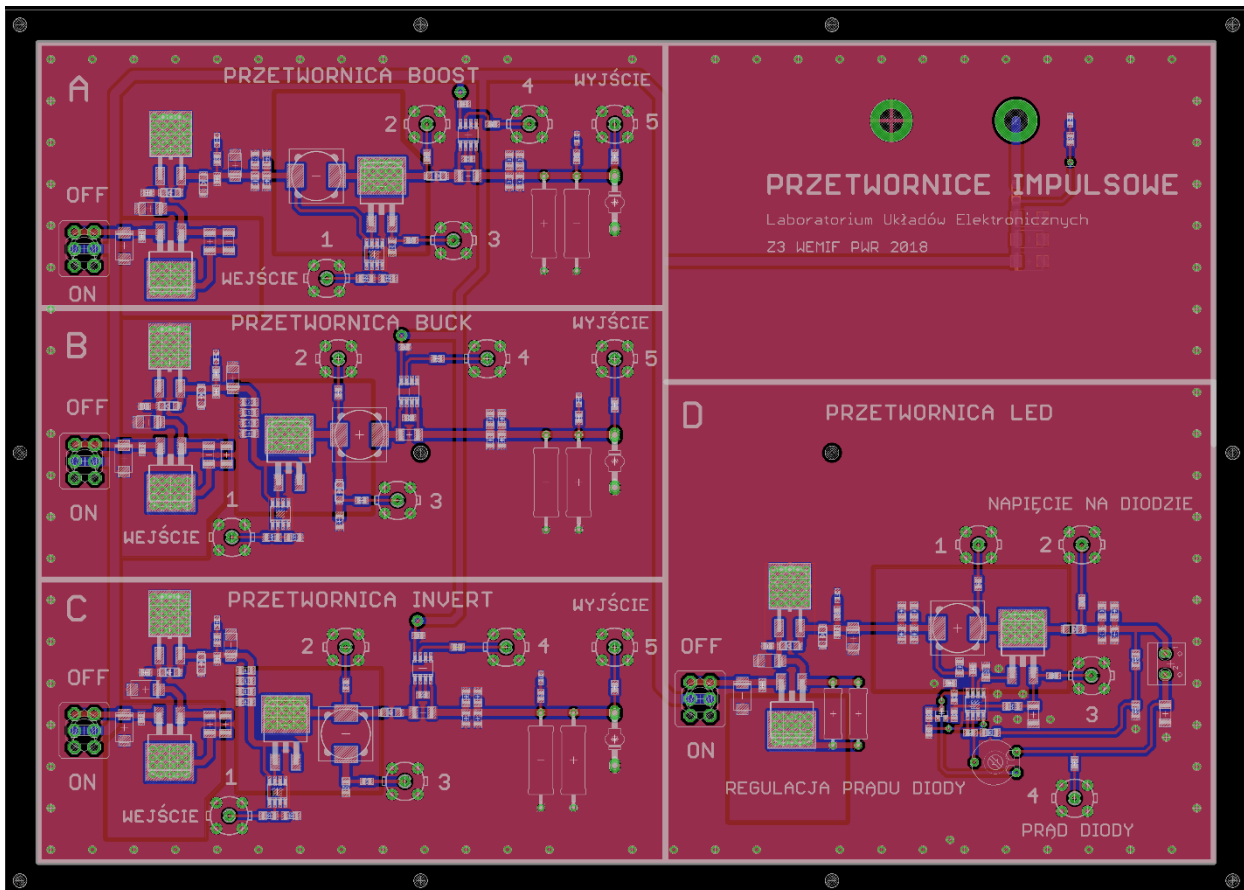
Rys.1.6.1. Schemat blokowy przetwornicy PWM z prądowym sprzężeniem zwrotnym

2. Opis badanych układów

Na stanowisku pomiarowym znajduje się jedna makieta opisana „Przetwornice impulsowe” przeznaczone do pomiarów parametrów czterech typów przetwornic impulsowych. Makieta ta jest przedstawiona na rysunku 2.1. Makieta z przetwornicami impulsowymi wymaga pojedynczego (dodatniego) napięcia zasilającego o wartości równej **+15 V** zasilające wszystkie 4 przetwornice. Napięcie zasilające należy doprowadzić do zacisków: **+Ucc, Gnd**.

Badane przetwornice znajdują się w osobnych obrysach oznaczonych: **A (boost)**, **B (buck)**, **C (invert)** lub **D (led)**. Każda z przetwornic posiada przełącznik umożliwiający włączenie (**ON**) bądź wyłączenie (**OFF**) zasilania danej przetwornicy. Po stronie zarówno wejścia jak i wyjścia każdej z przetwornic znajdują się diody LED wskazujące obecność zasilania.

Jako źródło sygnału wejściowego dla wzmacniacza należy wykorzystać generator sygnałowy i przyłączyć go do gniazda **Wejście** badanej przetwornicy - na makiecie znajdują się 3 złącza oznaczone jako **Wejście** (oraz numerem 1), po jednym w sekcji **A**, **B** oraz **C**. Obciążenie wyjść przetwornic impulsowych znajduje się na wyjściu każdej z przetwornic i nie jest konieczne jego podłączanie do poprawnej pracy przetwornicy.



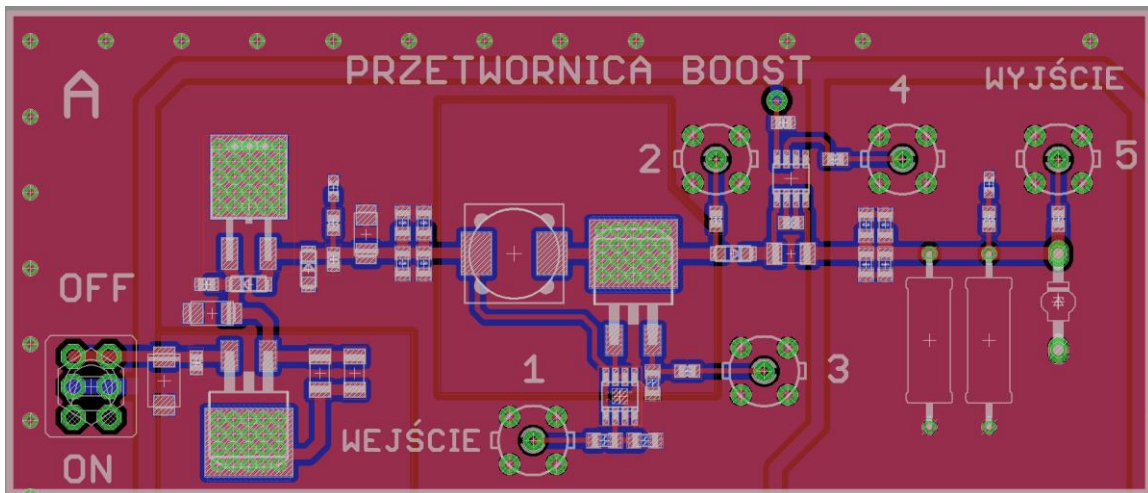
Rys.2.1. Makieta pomiarowa z przetwornicami impulsowymi

2.1. Przetwornica podwyższająca napięcie step-up (boost)

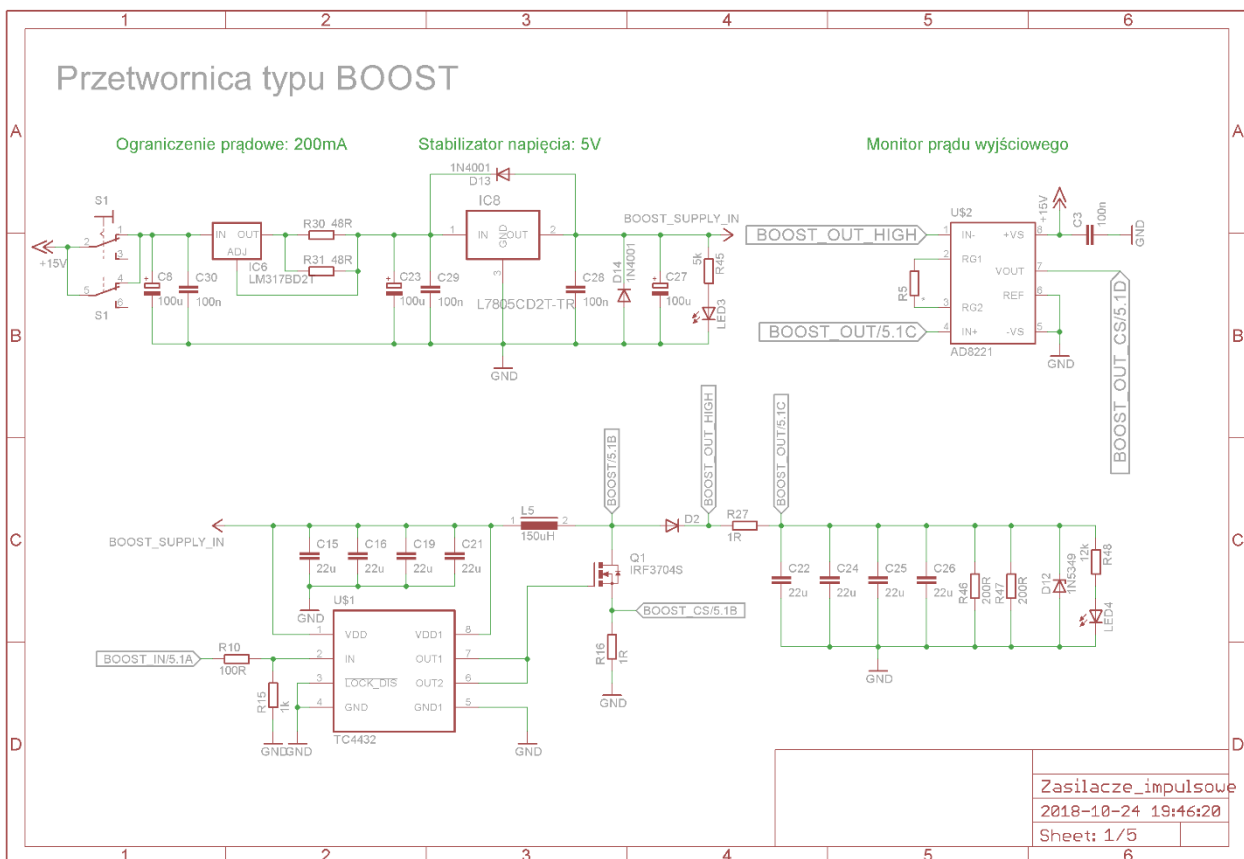
Poglądowy szkic części makiety zawierającej przetwornicę podwyższającą napięcie zwaną „step-up converter” lub „boost converter” przedstawiono na rys.2.1.1. Schemat tej części makiety znajduje się na rys. 2.1.2. Przetwornica ta na makiecie oznaczona jest symbolem A.

Na wejściu przetwornicy znajduje się ogranicznik prądu oparty na układzie LM317 ograniczający maksymalny prąd pobierany przez przetwornicę do **200 mA**, oraz stabilizator napięcia o napięciu wyjściowym **5 V**. Przy wykonywaniu obliczeń należy uwzględnić, że przetwornica ta jest zasilana napięciem wejściowym **5 V**.

Jako źródło sygnału wejściowego taktującego przetwornicę należy wykorzystać generator sygnałowy i przyłączyć go do gniazda **Wejście**. Obciążenie przetwornicy znajdujące się na makiecie wynosi **100 Ω**. Wyjście przetwornicy zabezpieczone jest diodą zenera, więc maksymalne napięcie na wyjściu przetwornicy wynosi **12 V**.



Rys.2.1.1. Część makiety z przetwornicą typu step-up (boost)



Rys.2.1.2. Uproszczony schemat elektryczny przetwornicy typu step-up (boost)

Gniazdo **Wejście** (nr 1) służy do podłączenia generatora sygnałowego. Generator ustawiamy w tryb „PULSE”, czyli generowania impulsów o zadanej częstotliwości i wypełnieniu. Minimalne napięcie (low level) ustawiamy na **0 V** a maksymalne (high level) na **5 V** - zgodnie ze standardem TTL. Częstotliwość i wypełnienie sygnału ustawić zgodnie z poleceniami prowadzącego.

Gniazdo nr 2 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia za dławikiem - w tym punkcie widoczne jest kluczkowanie tranzystora (spadek napięcia w okolicę 0 V) oraz przebieg napięcia wyindukowanego w dławiku.

Gniazdo nr 3 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia na boczniku $1\ \Omega$ znajdującym się w źródle tranzystora MOSFET - odkłada się na nim napięcie proporcjonalne do prądu płynącego przez tranzystor. Gniazdo nr 4 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji prądu płynącego pomiędzy dławikiem a wyjściem przetwornicy. Prąd ten jest mierzony przez wzmacniacz instrumentacyjny o wzmocnieniu **16,5 V/A**.

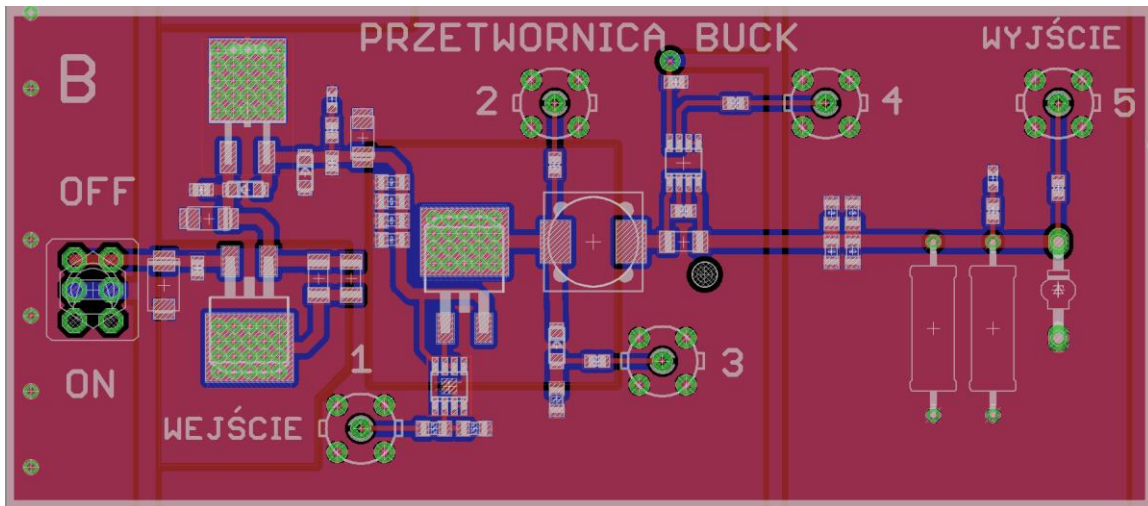
Gniazdo nr 5 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia wyjściowego (napięcie stałe) z przetwornicy impulsowej - w zależności od częstotliwości i wypełnienia sygnału pobudzającego będzie się zmieniać w zakresie od **5 V** do **12 V**.

2.2. Przetwornica obniżająca napięcie step-down (buck)

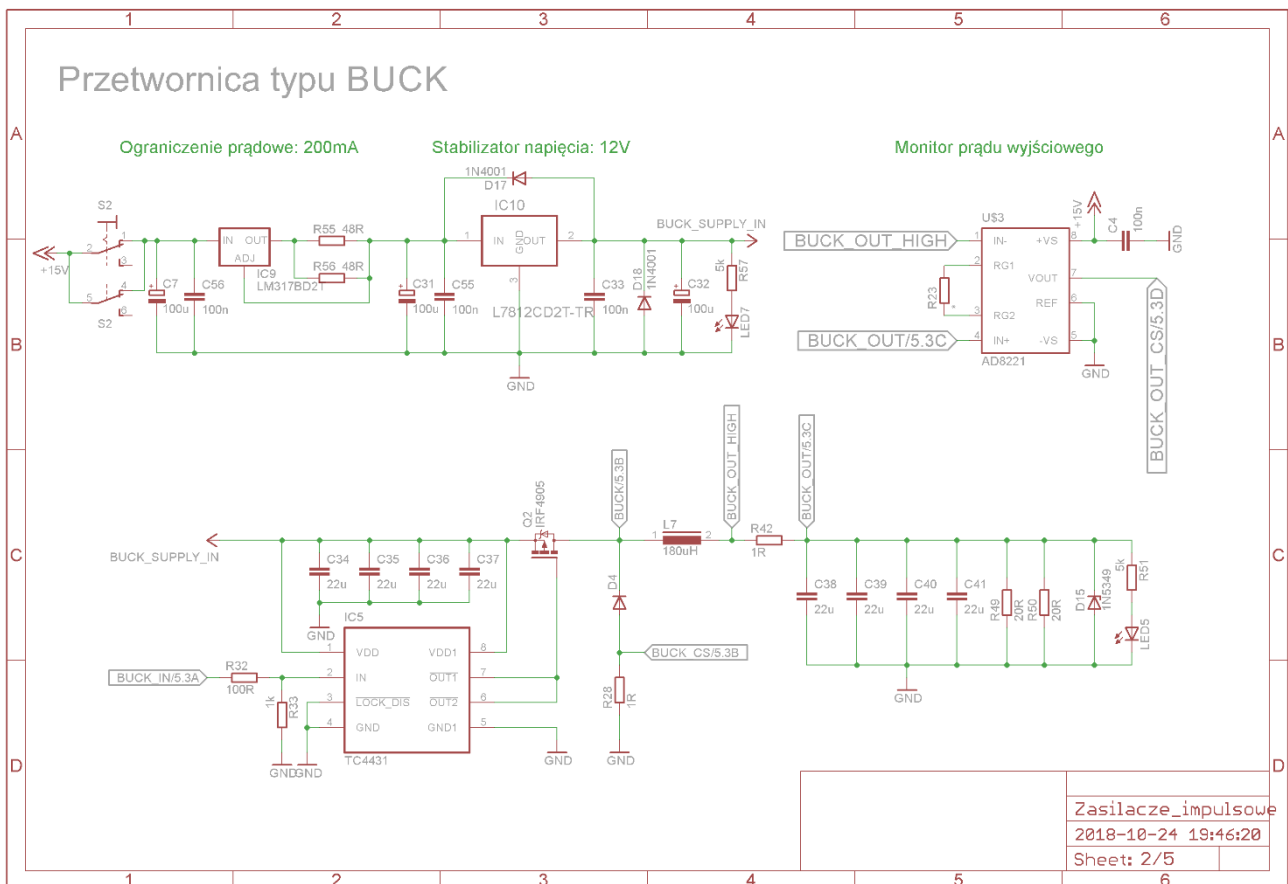
Poglądowy szkic części makiety zawierającej przetwornicę obniżającą napięcie zwaną „step-down converter” lub „buck converter” przedstawiono na rys.2.2.1. Schemat tej części makiety znajduje się na rys. 2.2.2. Przetwornica ta na makiemie oznaczona jest symbolem **B**

Na wejściu przetwornicy znajduje się ogranicznik prądu oparty na układzie LM317 ograniczający maksymalny prąd pobierany przez przetwornicę do **200 mA**, oraz stabilizator napięcia o napięciu wyjściowym **12 V**. **Przy wykonywaniu obliczeń należy uwzględnić, że przetwornica ta jest zasilana napięciem wejściowym 12 V.**

Jako źródło sygnału wejściowego taktującego przetwornicę należy wykorzystać **generator sygnałowy** i przyłączyć go do gniazda **Wejście**. Obciążenie przetwornicy znajduje się na makiemie i wynosi **10 Ω** . Wyjście przetwornicy zabezpieczone jest diodą zenera, więc maksymalne napięcie na wyjściu przetwornicy wynosi **12 V**.



Rys.2.2.1. Część makiety z przetwornicą typu step-down (buck)



Rys.2.2.2. Uproszczony schemat elektryczny przetwornicy typu step-down (buck)

Gniazdo **Wejście** (nr 1) służy do podłączenia generatora sygnałowego. Generator ustawiamy w tryb „PULSE”, czyli generowania impulsów o zadanej częstotliwości i wypełnieniu. Minimalne napięcie (low level) ustawiamy na **0 V** a maksymalne (high level)

na **5 V** - zgodnie ze standardem TTL. Częstotliwość i wypełnienie sygnału ustawić zgodnie z poleceniami prowadzącego.

Gniazdo nr 2 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia przed dławikiem - w tym punkcie widoczne jest kluczkowanie tranzystora (wzrost napięcia do 12 V)

Gniazdo nr 3 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia na boczniku 1Ω znajdującym się w źródle tranzystora MOSFET - na boczniku odkłada się napięcie proporcjonalne do prądu płynącego przez tranzystor oraz prądu wyindukowanego w dławiku.

Gniazdo nr 4 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji prądu płynącego pomiędzy dławikiem a wyjściem przetwornicy. Prąd ten jest mierzony przez wzmacniacz instrumentacyjny o wzmacnieniu **16,5 V/A**.

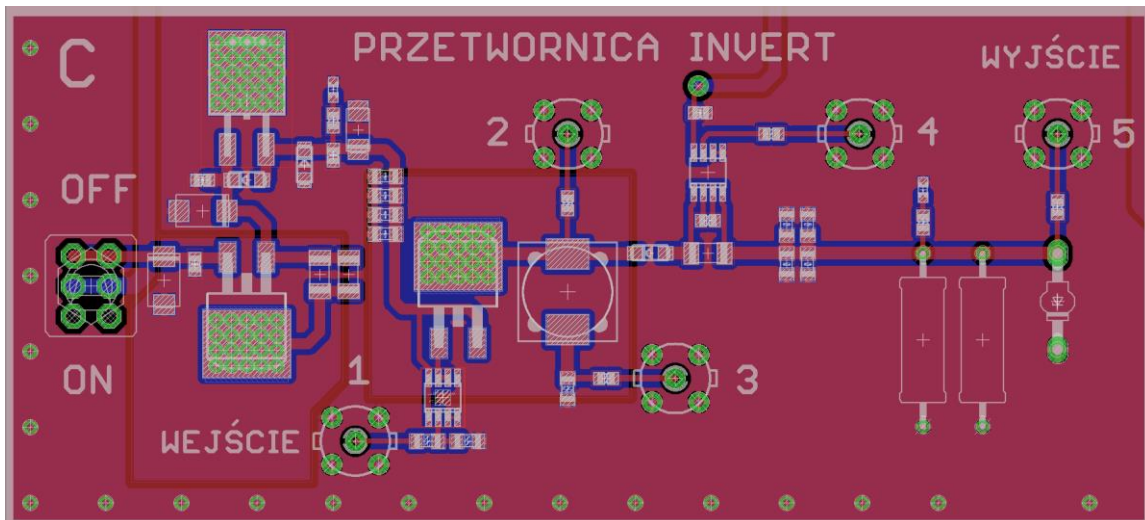
Gniazdo nr 5 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia wyjściowego (napięcie stałe) z przetwornicy impulsowej - w zależności od częstotliwości i wypełnienia sygnału pobudzającego będzie się zmieniać w zakresie od **0 V** do **12 V**.

2.3. Przetwornica odwracającą polaryzację napięcia (invert)

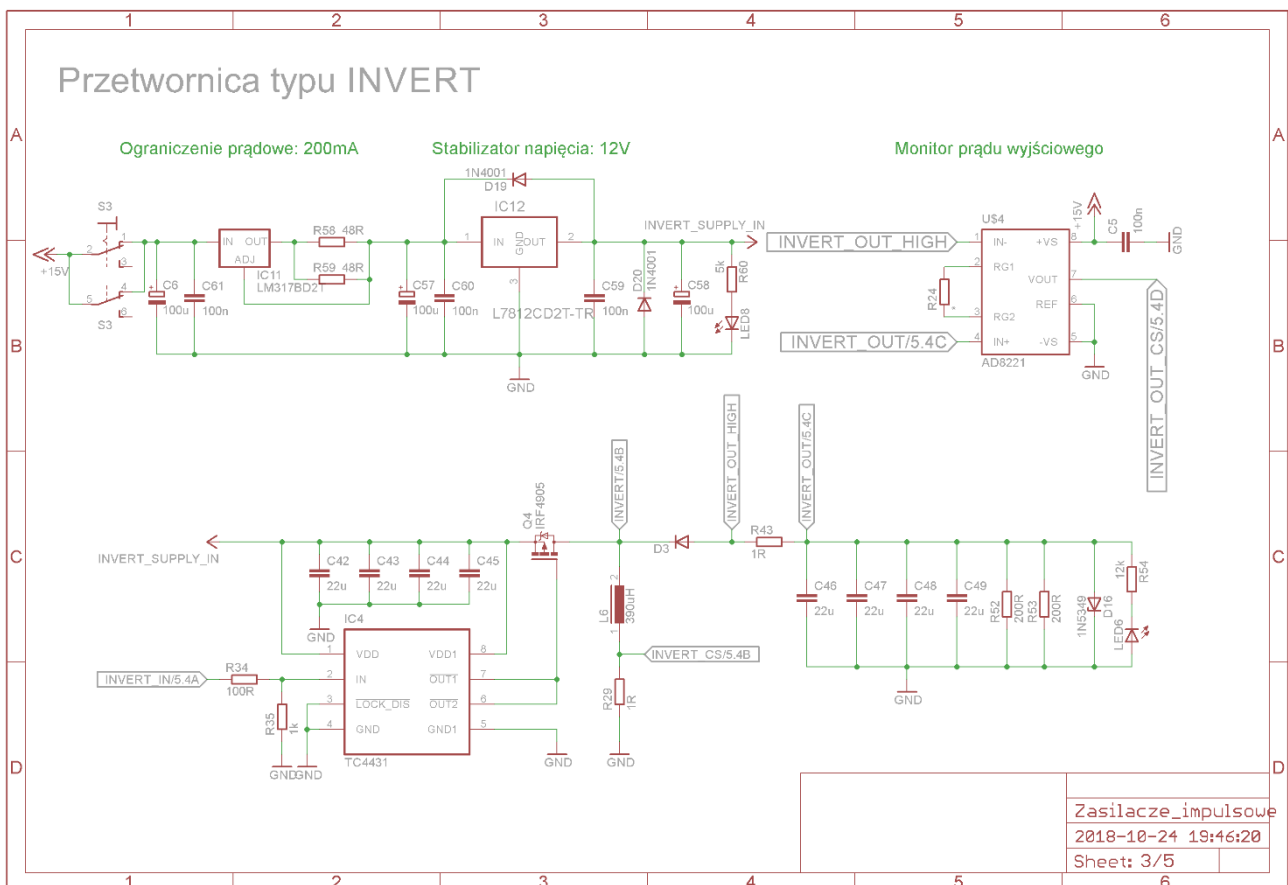
Poglądowy szkic części makiety zawierającej przetwornicę odwracającą polaryzację napięcia zwaną „invert converter” przedstawiono na rys.2.3.1. Schemat tej części makiety znajduje się na rys. 2.3.2. Przetwornica ta na makięcie oznaczona jest symbolem C.

Na wejściu przetwornicy znajduje się ogranicznik prądu oparty na układzie LM317 ograniczający maksymalny prąd pobierany przez przetwornicę do **200 mA**, oraz stabilizator napięcia o napięciu wyjściowym **12 V**. **Przy wykonywaniu obliczeń należy uwzględnić, że przetwornica ta jest zasilana napięciem wejściowym 12 V.**

Jako źródło sygnału wejściowego taktującego przetwornicę należy wykorzystać **generator sygnałowy** i przyłączyć go do gniazda **Wejście**. Obciążenie przetwornicy znajduje się na makięcie i wynosi **100 Ω** . Wyjście przetwornicy zabezpieczone jest diodą zenera, więc maksymalne ujemne napięcie na wyjściu przetwornicy wynosi **-12 V**.



Rys.2.3.1. Część makiety z przetwornicą typu invert



Rys.2.3.2. Uproszczony schemat elektryczny przetwornicy typu invert

Gniazdo **Wejście** (nr 1) służy do podłączenia generatora sygnałowego. Generator ustawiamy w tryb „PULSE”, czyli generowania impulsów o zadanej częstotliwości i wypełnieniu. Minimalne napięcie (low level) ustawiamy na **0 V** a maksymalne (high level)

na **5 V** - zgodnie ze standardem TTL. Częstotliwość i wypełnienie sygnału ustawić zgodnie z poleceniami prowadzącego.

Gniazdo nr 2 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia za dławikiem - w tym punkcie widoczne jest kluczowanie tranzystora (spadek napięcia w okolicę 0 V) oraz przebieg napięcia wyindukowanego w dławiku.

Gniazdo nr 3 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia na boczniku 1Ω znajdującym się w źródle tranzystora MOSFET - na boczniku odkłada się napięcie proporcjonalne do prądu płynącego przez tranzystor. Gniazdo nr 4 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji prądu płynącego pomiędzy dławikiem a wyjściem przetwornicy. Prąd ten jest mierzony przez wzmacniacz instrumentacyjny o wzmacnieniu **16,5 V/A**.

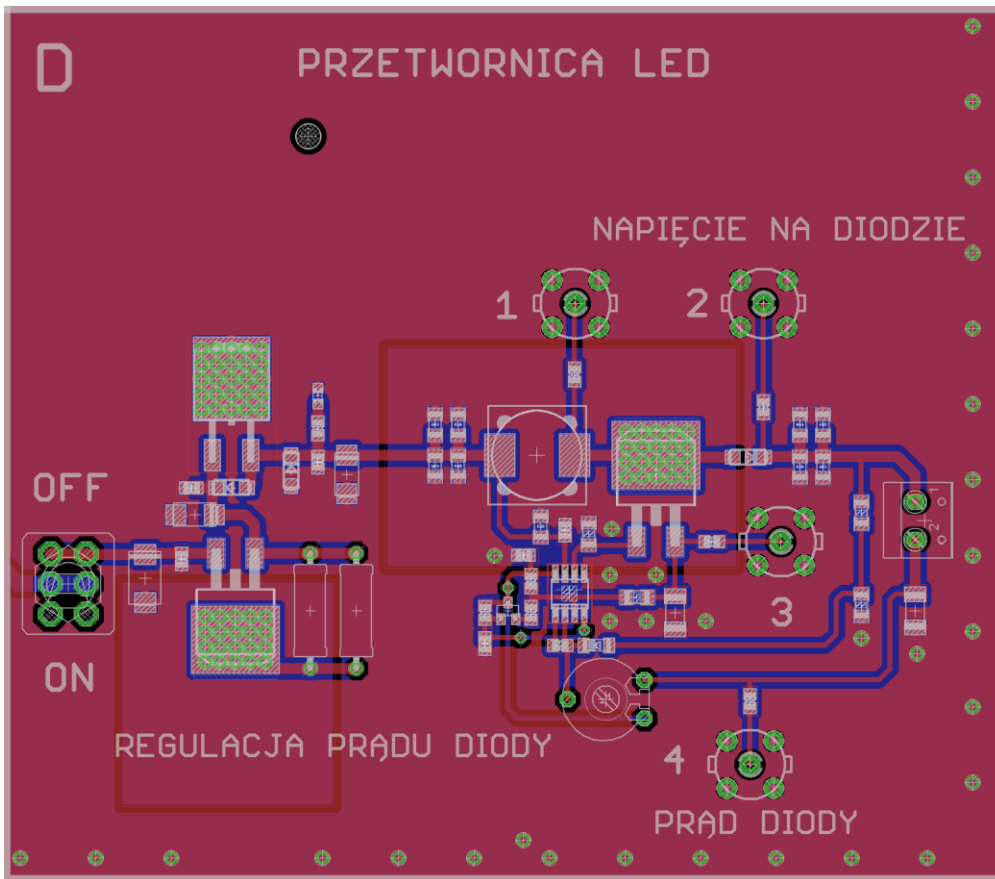
Gniazdo nr 5 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia wyjściowego (napięcie stałe) z przetwornicy impulsowej - w zależności od częstotliwości i wypełnienia sygnału pobudzającego będzie się zmieniać w zakresie od 0 V do -12 V.

2.4. Przetwornica prądowa do zasilania wysokonapięciowych diod LED - current mode step-up

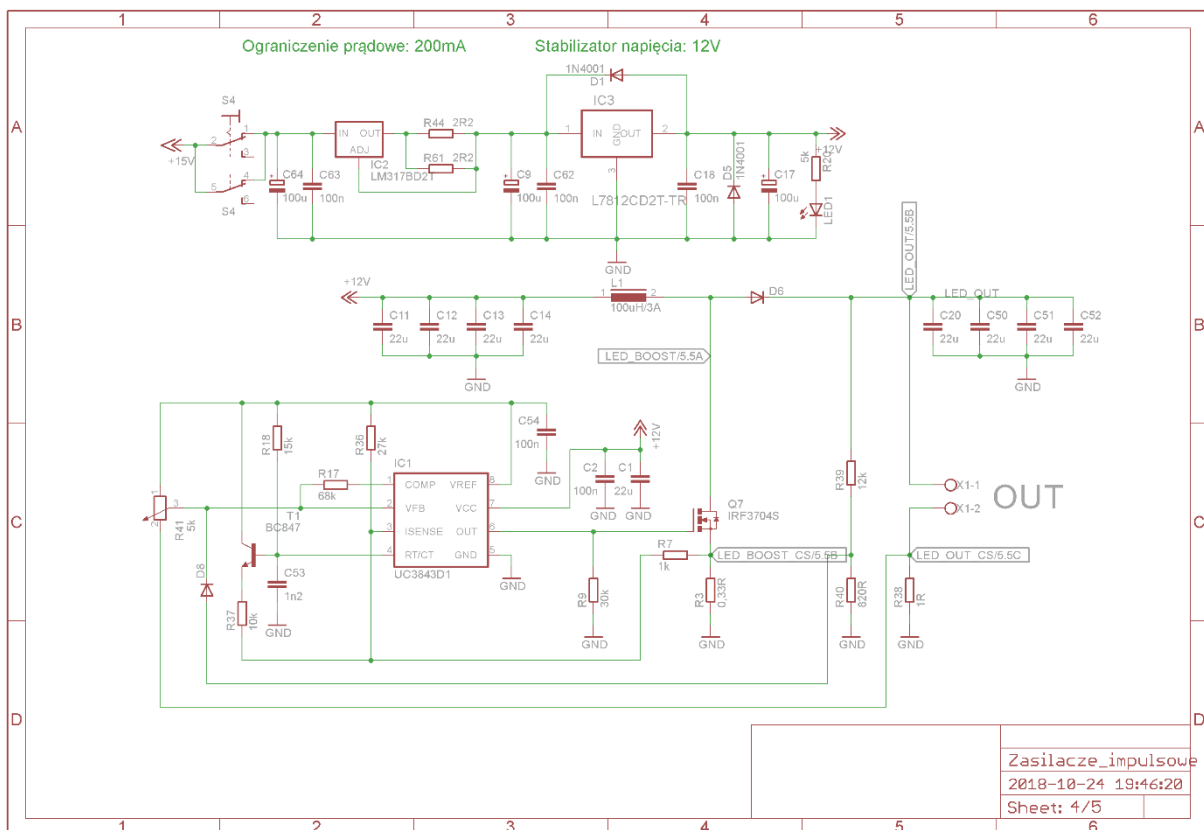
Poglądowy szkic części makiety zawierającej przetwornicę podwyższającą napięcie ze sprzężeniem prądowym zwaną „current mode step-up converter” przedstawiono na rys.2.4.1. Schemat tej części makiety znajduje się na rys. 2.4.2. Przetwornica ta na makiecie oznaczona jest symbolem **D**.

Na wejściu przetwornicy znajduje się ogranicznik prądu oparty na układzie LM317 ograniczający maksymalny prąd pobierany przez przetwornicę do **500 mA**, oraz stabilizator napięcia o napięciu wyjściowym **12 V**. **Przy wykonywaniu obliczeń należy uwzględnić, że przetwornica ta jest zasilana napięciem wejściowym 12 V.**

Przetwornica ta w odróżnieniu do poprzednich przetwornic posiada kontroler - UC3843, taktujący przetwornicę oraz zmieniający wypełnienie przebiegu kluczującego tranzystor, tak aby prąd płynący przez diodę LED znajdująca się na wyjściu przetwornicy był stały i miał określoną wartość - 100mA. Przetwornica ta nie wymaga więc zewnętrznego generatora sygnałowego. Obciążeniem przetwornicy jest dioda mocy LED umieszczona na radiatorze i połączona z wyjściem przetwornicy.



Rys.2.4.1. Część makiety z przetwornicą prądową do diod LED



Rys.2.4.2. Uproszczony schemat elektryczny przetwornicy prądowej do diod LED

Gniazdo nr 1 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia za dławikiem - w tym punkcie widoczne jest kluczkowanie tranzystora (spadek napięcia do 0 V) oraz przebieg napięcia wyindukowanego w dławiku.

Gniazdo nr 2 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia wyjściowego (napięcie stałe) z przetwornicy impulsowej zasilającej diodę LED - w zależności od częstotliwości i wypełnienia sygnału pobudzającego będzie się zmieniać w zakresie od 12 V do 36 V.

Gniazdo nr 3 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia na boczniku $0,33 \Omega$ znajdującym się w źródle tranzystora MOSFET - na boczniku odkłada się napięcie proporcjonalne do prądu płynącego przez tranzystor.

Gniazdo nr 4 służy do przyłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia na boczniku 1Ω znajdującym się pomiędzy katodą diody LED a masą - na boczniku odkłada się napięcie proporcjonalne do prądu płynącego przez diodę LED.

3. Projekt

Do ćwiczenia **Przetwornice impulsowe** studenci nie przygotowują zadania domowego.

4. Program ćwiczenia

Zakres wykonywanych w ćwiczeniu pomiarów określa, spośród przedstawionych poniżej propozycji, **Prowadzący** zajęcia.

4.1. Napięcie wyjściowe oraz napięcie szczytowe dławika w funkcji wypełnienia sygnału klucującego (PWM)

Pomiarów zależności napięcia wyjściowego przetwornicy oraz prądu szczytowego dławika w funkcji wypełnienia przebiegu prostokątnego (PWM) należy dokonać dla trzech przetwornic oznaczonych jako **A, B, C**.

- Pomiarów należy przeprowadzić przy napięciu zasilającym równym +15 V,
- Generator funkcyjny generujący sygnał wejściowy ustawić w tryb PULSE - generator impulsów o zadanej częstotliwości i wypełnieniu,

- Poziom sygnału wejściowego dobrać tak, aby był zgodny ze standardem TTL - minimalna wartość napięcia 0 V, maksymalna 5 V,
- Częstotliwość sygnału wejściowego ustawić na 100 kHz,
- Wypełnienie sygnału wejściowego ($D_{P_{PWM}}$) zmieniać począwszy od 0% do 50% co 5%, czyli: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%,
- Napięcie wyjściowe przetwornicy należy mierzyć za pomocą multimetru (złącza nr 5),
- Napięcie szczytowe dławika należy określać na podstawie pomiaru wartości maksymalnej napięcia wyindukowanego w dławiku (złącza oznaczone numerem 2) oscyloskopem,
- Charakterystyki $U_{WY}=f(D_{P_{PWM}})$ dla trzech przetwornic sporządzić we wspólnym, liniowym układzie współrzędnych i dla każdej z nich określić wartość minimalną, maksymalną oraz nachylenie charakterystyki ($V/\%P_{PWM}$),
- Charakterystyki $U_{WY}=f(D_{P_{PWM}})$ i $U_{IND}=f(D_{P_{PWM}})$ osobno dla każdej z trzech przetwornic sporządzić we wspólnych (U_{WY} i U_{IND}), liniowych układach współrzędnych,
- W sprawozdaniu napisać wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

4.2. Maksymalna moc wyjściowa oraz prąd szczytowy dławika w funkcji częstotliwości kluczowania

Pomiarów zależności maksymalnej mocy wyjściowej przetwornicy oraz prądu szczytowego dławika w funkcji częstotliwości przebiegu prostokątnego (PWM) należy dokonać dla trzech przetwornic oznaczonych jako **A**, **B**, **C**.

- Pomiarów należy przeprowadzić przy napięciu zasilającym równym +15 V,
- Generator funkcyjny generujący sygnał wejściowy ustawić w tryb PULSE - generator impulsów o zadanej częstotliwości i wypełnieniu,
- Poziom sygnału wejściowego dobrać tak, aby był zgodny ze standardem TTL - minimalna wartość napięcia 0 V, maksymalna 5 V,
- Wypełnienie sygnału wejściowego ustawić na 50%,
- Częstotliwość sygnału wejściowego zmieniać począwszy od 100 kHz do 300 kHz z krokiem 25 kHz, czyli 100 kHz, 125 kHz, 150 kHz, 175 kHz, 200 kHz, 225 kHz, 250 kHz, 275 kHz, 300 kHz,

- Moc wyjściową należy obliczać na podstawie pomiaru napięcia wyjściowego przetwornicy (złącza oznaczone numerem 5) woltomierzem, przeliczając z prawa Ohma dla danej rezystancji obciążenia ($100\ \Omega$ dla przetwornicy A i C, $10\ \Omega$ dla przetwornicy B),
- Prąd szczytowy dławika należy obliczać na podstawie pomiaru wartości maksymalnej napięcia odkładającego się na rezystorze pomiarowym znajdującym się pomiędzy dławikiem a masą (złącza oznaczone numerem 3) oscyloskopem, przeliczając z prawa Ohma dla rezystancji pomiarowej równej $1\ \Omega$,
- Prąd rozładowania dławika należy obliczać na podstawie pomiaru oscyloskopem wartości maksymalnej napięcia odkładającego się na rezystorze pomiarowym znajdującym się pomiędzy dławikiem a wyjściem, wzmacnionym przez wzmacniacz instrumentacyjny o wzmacnieniu $16,5\ \text{V/A}$ (złącza oznaczone numerem 4),
- Zapisać przebieg prądu dławika oraz prądu rozładowania dławika, dla dwóch okresów sygnału, opisać w sprawozdaniu z czego wynika kształt każdego przebiegu i jaka jest relacja pomiędzy nimi,
- Charakterystyki $P_{\text{WY}}=f(f_{\text{PWM}})$ dla wszystkich trzech przetwornic sporządzić we wspólnym, liniowym układzie współrzędnych i dla każdej z nich określić wartość minimalną, maksymalną oraz nachylenie charakterystyki ($\text{W/kHz}_{\text{PWM}}$),
- Charakterystyki $P_{\text{WY}}=f(f_{\text{PWM}})$ i $I_{\text{L_MAX}}=f(f_{\text{PWM}})$ osobno dla każdej z trzech przetwornic sporządzić we wspólnych (P_{WY} i $I_{\text{L_MAX}}$), liniowych układach współrzędnych,
- W sprawozdaniu napisać wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

4.3. Sprawność przetwornicy impulsowej w funkcji wypełnienia oraz częstotliwości sygnału kluczującego

Pomiarów sprawności przetwornicy impulsowej w funkcji wypełnienia oraz częstotliwości przebiegu prostokątnego (PWM) należy dokonać dla trzech przetwornic oznaczonych jako **A**, **B**, **C**.

- Pomiarów należy przeprowadzić przy napięciu zasilającym równym $+15\text{V}$,
- Przewody zasilające podłączyć tak, aby szeregowo z makieta podłączyć multimetr ustawiony w tryb pomiaru prądu (szeregowo z zaciskiem „+” zasilacza),

- Generator funkcyjny generujący sygnał wejściowy ustawić w tryb PULSE generowania impulsów o zadanej częstotliwości i wypełnieniu,
- Poziom sygnału wejściowego dobrać tak, aby był zgodny ze standardem TTL - minimalna wartość napięcia 0 V, maksymalna 5 V.
- Wypełnienie sygnału wejściowego zmieniać począwszy od 10% do 50%, co 10%, czyli 10%, 20%, 30%, 40%, 50%,
- Pomiarów dla różnych wypełnień sygnału kluczującego wykonać 3-krotnie dla częstotliwości sygnału wejściowego równych 100 kHz, 200 kHz oraz 300 kHz,
- Moc wyjściową należy obliczać na podstawie pomiaru napięcia wyjściowego przetwornicy (złącza oznaczone numerem 5) multimetrem, przeliczając z prawa Ohma dla danej rezystancji obciążenia (100 Ω dla przetwornicy A i C, 10 Ω dla przetwornicy B),
- Moc wejściową należy obliczać uwzględniając napięcie wejściowe przetwornicy (5 V dla przetwornicy A, 12 V dla przetwornicy B i C) i wartości prądu pobieranego przez makietę mierzoną multimetrem.
- Charakterystyki sprawności $\eta=f(D_{P_{PWM}})$ i $\eta=f(f_{P_{PWM}})$ osobno dla każdej z trzech przetwornic sporządzić we wspólnych ($\eta=f(D_{P_{PWM}})$ i $\eta=f(f_{P_{PWM}})$), liniowych układach współrzędnych,
- W sprawozdaniu napisać wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

4.4. Parametry przetwornicy prądowej do diod LED

Pomiarów parametrów przetwornicy impulsowej ze sprzężeniem prądowym do zasilania wysokonapięciowych (35 V) diod należy dokonać dla przetwornicy oznaczonej jako D.

- Pomiarów należy przeprowadzić przy napięciu zasilającym równym +15 V,
- Przewody zasilające podłączyć tak, aby szeregowo z makietą podłączyć multimetr ustawiony w tryb pomiaru prądu (szeregowo z zaciskiem „+” zasilacza),
- Generator funkcyjny nie jest używany,
- Moc wyjściową należy obliczać na podstawie pomiaru wartości napięcia wyjściowego przetwornicy (złącze oznaczone numerem 2) multimetrem, oraz pomiaru prądu wyjściowego płynącego przez diodę LED przez pomiar napięcia

- odkładającego się na boczniku 1Ω (złącze oznaczone numerem 4) drugim multimetrem,
- Moc wejściową należy obliczać uwzględniając napięcie wejściowe przetwornicy - 12 V i wartości prądu pobieranego przez makietę mierzoną multimetrem.
 - Wyliczyć sprawność przetwornicy,
 - Napięcie szczytowe dławika należy określać na podstawie pomiaru wartości maksymalnej napięcia wyindukowanego w dławiku (złącza oznaczone numerem 1) oscyloskopem,
 - Prąd szczytowy dławika należy obliczać na podstawie pomiaru wartości maksymalnej napięcia odkładającego się na rezystorze pomiarowym znajdującym się pomiędzy dławikiem a masą (złącza oznaczone numerem 3) oscyloskopem, przeliczając z prawa Ohma dla rezystancji pomiarowej równej $0,33 \Omega$,
 - Zapisać przebieg prądu dławika oraz napięcia wyindukowanego w dławiku,
 - *Wyliczyć spadek napięcia na diodzie prostującej, mierząc szczytową wartość wyindukowanego napięcia i odejmując je od zmierzonego napięcia wyjściowego przetwornicy,
 - *Wyliczyć straty mocy na diodzie prostującej mnożąc spadek napięcia na diodzie wyliczony w poprzednim punkcie przez wartość średnią prądu w czasie rozładowywania dławika (gdy wyindukowane napięcie przekracza 30V),
 - *Wyliczyć straty mocy na rezystorze pomiarowym przy diodzie LED(złącze 2) oraz straty mocy na rezystorze do pomiaru prądu dławika(złącze 3),
 - *Określić, jaki wpływ dane straty mają na sprawność przetwornicy,
 - W sprawozdaniu napisać wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

5. Wykaz aparatury i przyrządów pomiarowych

- makietę pomiarową
- oscyloskop cyfrowy TDS1001
- cyfrowy generator sygnałowy AFG3021
- zasilacz laboratoryjny HAMEG HM8040-3, HAMEG HM8143
- dwa multimetry HM8012