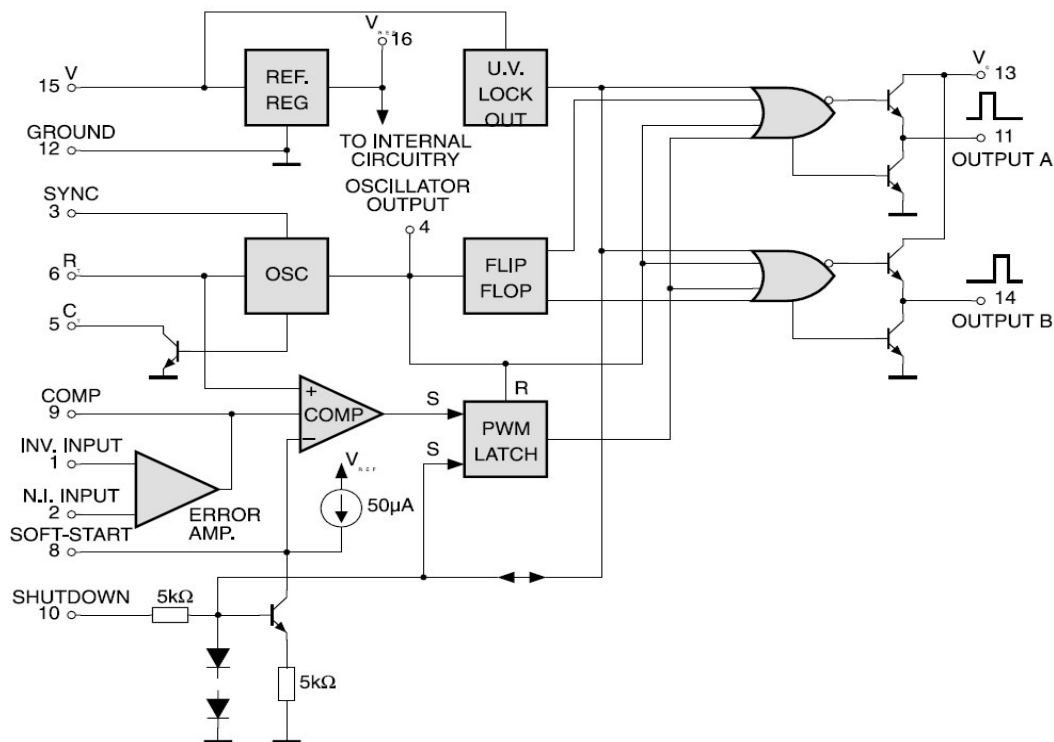


Zasilacz impulsowy ~230V na +/-30V

Projekt przetwornicy impulsowej pracującej w konfiguracji Half-Bridge (tzw. układ pół-mostkowy). Głównym elementem zasilacza jest układ sterownika UC3525, którego strukturę wewnętrzną przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Schemat blokowy układu UC3545.

Funkcje poszczególnych wyprowadzeń układu:

- Końcówki 1 i 2 są wejściami wzmacniacza napięcia błędów wykorzystanego w układzie stabilizacji napięcia wyjściowego zasilacza.
- Końcówka 3 jest to wejście dla zewnętrznego układu oscylatora i jest wykorzystywana przy współpracy kilku układów sterowników.
- Końcówka 4 jest to wyjście wewnętrznego układu oscylatora i podobnie jak końcówka 3 jest wykorzystywana przy współpracy kilku układów sterowników. W niniejszym rozwiązaniu układowym końcówki 3 i 4 nie zostały wykorzystane.
- Za pomocą elementów dołączonych do wyprowadzeń 5, 6 i 7 ustala się częstotliwość pracy wewnętrznego oscylatora układu sterownika. Ważnym elementem jest rezystor dołączony do nóżki 7 (DISC) układu, ponieważ

- wyznacza on wartość tzw. czasu martwego, czyli minimalnego odstępu czasu między wyłączeniem jednego z kluczy, a załączeniem drugiego.
- Końcówka 8 SS (SOFTSTART) jest to wejście powolnego startu przetwornicy. Napięcie występujące na podłączonym do niej kondensatorze steruje modulacją szerokości impulsów kluczujących. Kondensator ten jest ładowany z układu wewnętrznego źródła prądowego, daje to w efekcie powolny wzrost wypełnienia impulsów sterujących po włączeniu zasilania.
- Elementy dołączone do końcówki 9 zapewniają kompensację częstotliwościową układu stabilizacji napięcia wyjściowego zasilacza.
- Końcówka 10 SH (SHUTDOWN) jest to wejście układu blokującego pracę układu UC3525. Przekroczenie na niej poziomu napięcia $0,6 \div 1V$ powoduje stopniowe ograniczenie szerokości impulsów sterujących kluczami i w efekcie spadek napięcia wyjściowego aż do całkowitego zatrzymania pracy zasilacza. W przedstawionym przez autora rozwiązaniu wejście to zostało wykorzystane do zabezpieczenia przed zwarciami i przeciążeniami na wyjściu przetwornicy.
- Końcówki 11 i 14 są wyjściami układu drivera, i służą do bezpośredniego sterowania kluczami MOSFET.
- Końcówka 16 jest to wyjście napięcia odniesienia o wartości 5.1V, które zostało wykorzystane jako napięcie odniesienia dla komparatora błędów.

składową symetryczną. Prawidłowe i skuteczne działanie filtra wymaga podłączenia zasilacza do sieci trójżyłowym przewodem, do gniazdka sieciowego z zestykiem uziemiającym. Termistor NTC (o rezystancji malejącej ze wzrostem temperatury) RTH1 włączony szeregowo z mostkiem prostowniczym M1 łagodzi impulsy prądowe w momencie włączenia urządzenia do sieci zasilającej. Warystor V1 zabezpiecza układ zasilacza impulsowego przed przepięciami pojawiającymi się w sieci energetycznej. Wyprostowane przez mostek M1 napięcie sieciowe jest filtrowane za pomocą kondensatorów C10 i C11, a równolegle przyłączone do nich rezystory R11, R12 wyrównują ładunki zgromadzone w tych pojemnościach.

Do zasilania układu sterownika UC3525 i obwodów stabilizacji napięcia wykonano pomocniczy zasilacz małej mocy z transformatorem TEZ2.5, i typową aplikacją scalonego stabilizatora napięcia 78L12.

Wyprostowane i odfiltrowane napięcie sieci jest podawane na wejście falownika zbudowanego z dwóch tranzystorów kluczujących MOSFET T1, T2 typu IRFP450 oraz transformatora impulsowego TR3. Niestety wadą tranzystorów MOSFET są duże pojemności wejściowe C_{iss} . Dlatego bramkę należy sterować ze źródła o bardzo małej impedancji tak, aby szybko przeładować dużym prądem pojemności wejściowe. Producent układu UC3525 zadbał jednak, aby na wyjściu układu znalazły się odpowiednie stopnie przeciwsołbne (tzw. układy totem-pole) zdolne do bezpośredniego sterowania parą tranzystorów o pojemności wejściowej do 1.5nF. Maksymalny prąd chwilowy przepływający przez stopnie wyjściowe nie powinien przekraczać 400mA, ograniczenie to realizuje rezystor R8 włączony pomiędzy wyjścia driverów układu sterownika, a transformator sterujący TR.STER.

Dodatkowo, w celu zabezpieczenia układu sterownika przed zniszczeniem (w przypadku uszkodzenia tranzystora kluczującego) oraz odseparowania obwodów niskonapięciowych zasilacza od napięcia sieci zastosowano transformator sterujący TR.STER włączony pomiędzy układem UC3525 a bramkami tranzystorów T1 i T2. Równolegle do uzwojenia pierwotnego transformatora TR3. włączono dwójnik R13, C12 ograniczający wartość przepięć powstających na tej indukcyjności do wartości bezpiecznej dla tranzystorów T1,T2. Dodatkowym zabezpieczeniem tranzystorów są diody Zenera DZ1÷DZ4. Ograniczają wartość amplitudy sygnału sterującego bramki tranzystorów (w czasie startu przetwornicy impulsy sterujące mają małe wypełnienie, a ich amplituda osiąga wartość znacznie większą niż w czasie „normalnej” pracy).

Szeregowo z uzwojeniem pierwotnym TR3. włączono uzwojenie pierwotne przekładnika prądowego PRZEK. stanowiącego zabezpieczenie przeciążeniowe i przeciwzwarciove wyjścia zasilacza. Spadek napięcia na rezystorze R14 wywołany przepływem prądu uzwojenia wtórnego przekładnika informuje sterownik poprzez jego wejście SH (SHUTDOWN) o wartości prądu w obwodzie pierwotnym zasilacza. Sygnał na tym wejściu oddziałuje na stopnie wyjściowe i blok SOFT-START układu UC3525. Wzrost napięcia na tym wejściu powoduje stopniowe ograniczenie wypełnienia impulsów sterujących klucze tranzystorowe, a tym samym ograniczenie mocy wyjściowej przetwornicy. Przekroczenie wartości $0.6 \pm 1V$ na wejściu SH wywołuje za pomocą bloku PWM LATCH natychmiastowe zatrzymanie stopni wyjściowych sterownika, powrót napięcia do właściwego poziomu wznawia pracę przetwornicy. Elementy R15 i C13 tworzą prosty filtr zapobiegający reakcji układu SHUTDOWN na zakłócenia „szpilkowe” powstające w momencie przełączania kluczy tranzystorowych.

Przetransformowane przez TR3, napięcie strony pierwotnej jest podawane poprzez mostek Graetza (D11÷D14) na dławiki L2 i L3. Ich podstawowym zadaniem jest gromadzenie energii podczas włączonych kluczy i oddawanie jej do obciążania wtedy, gdy oba klucze są zatkane. Brak dławików uniemożliwiłby, także prawidłową pracę układu zabezpieczenia przeciwzwarciovego jak i układu stabilizacji napięcia. Każde nawet niewielkie przeciążenie wyjścia powodowało by natychmiastową reakcję układu SHUTDOWN sterownika (dzięki „przeciąganiu” prądu przez dławik efekt ten zostaje wyeliminowany). Kondensatory C14÷C21, filtrują napięcie wyjściowe z uwagi na dużą częstotliwość pracy przetwornicy i duże prądy przepływające przez ich wyprowadzenia, zastosowano specjalne kondensatory przystosowane do pracy w układach przetwornic impulsowych. Kondensatory takie charakteryzują się niską wartością rezystancji ESR, a także wysoką dopuszczalną temperaturą pracy $105^{\circ}C$.

Układ stabilizacji napięcia wyjściowego doprowadza informację o całkowitym napięciu wyjściowym do wejścia komparatora błędu sterownika UC3525 (nóżka 1). Przy prawidłowym napięciu wyjściowym zasilacza wartość napięcia na wejściu 1 układu powinna wynosić 5.1V. Wartość mniejsza powoduje zwiększenie wypełnienia impulsów sterujących klucze tranzystorowe, natomiast wartość większa zmniejsza ich wypełnienie. Zastosowanie optoizolacji w obwodzie sprzężenia zwrotnego układu stabilizacji, zapewnia całkowitą separację napięcia

wyjściowego od obwodów przetwornicy. Ze względu na bardzo wysoki współczynnik temperaturowy optoizolatorów i duży rozrzut współczynnika przenoszenia prądu (current transfer ratio) zastosowano popularny układ stabilizacji spotykany w większości zasilaczy impulsowych. Tworzy go transoptor OPTO1, pracujący w układzie ujemnego sprzężenia prądowego wprowadzonym poprzez drugi transoptor OPTO2. Transoptor ten kieruje z powrotem do wejścia OPTO1 sygnał powstający ze wzmacnionego przez T4 prądu wyjściowego OPTO1.

Elementy przyłączone do wejść 5, 6, 7, 9 sterownika UC3525 odpowiedzialne są za częstotliwość pracy wewnętrznego oscylatora oraz za tzw. czas martwy pomiędzy kolejnymi impulsami (czas martwy zabezpiecza tranzystory kluczujące przed możliwością jednoczesnego włączenia).

Do włączania zasilacza impulsowego wykorzystano opisane powyżej wejście miękkiego startu SS (SOFTSTART), wraz z elementami OPTO3 i T3,R7.C27. Podanie sygnału z mikroprocesora (+5V) na wejście transoptora OPTO3, powoduje nasycenie wewnętrznego tranzystora OPTO3 a tym samym tranzystor T3 znajdzie się w stanie zatkania. Umożliwia to ładowanie kondensatora C27 z wewnętrznego źródła prądowego układu UC3525 i powolny start układu przetwornicy. Przy braku sygnału z mikroprocesora sterującego tranzystor T3 jest w stanie nasycenia nie pozwalając na ładowanie C27, tym samym zasilacz jest wyłączony.

Obliczenia wartości elementów zasilacza impulsowego:

Specyfikacja zasilacza:

Zakres napięcia wejściowego: 200 ÷ 240VAC, 50/60Hz

Napięcie wyjściowe: +30VDC 3A

-30VDC 3A

+12VDC 0.5A

Wstępne obliczenia:

Moc wyjściowa:

$$P_{\text{out}} = (30V \times 3A) + (30V \times 3A) + (12V \times 0.5A) = 186W$$

Moc pobierana z sieci:

$$P_{\text{in(est)}} = P_{\text{out}} / (\text{eff}) = 186 / 0.8 = 232.5W$$

Zakres napięć wejściowych:

$$V_{in(min)} = 1.414(185 \text{ VAC}) = 262 \text{ V DC}$$

$$V_{in(max)} = 1.414(270 \text{ VAC}) = 382 \text{ V DC}$$

Przewidywana średnia wartość prądu wejściowego (DC):

$$I_{in(max)} = P_{in}/V_{in} = 232.5 \text{ W} / 262 = 0.88 \text{ A}$$

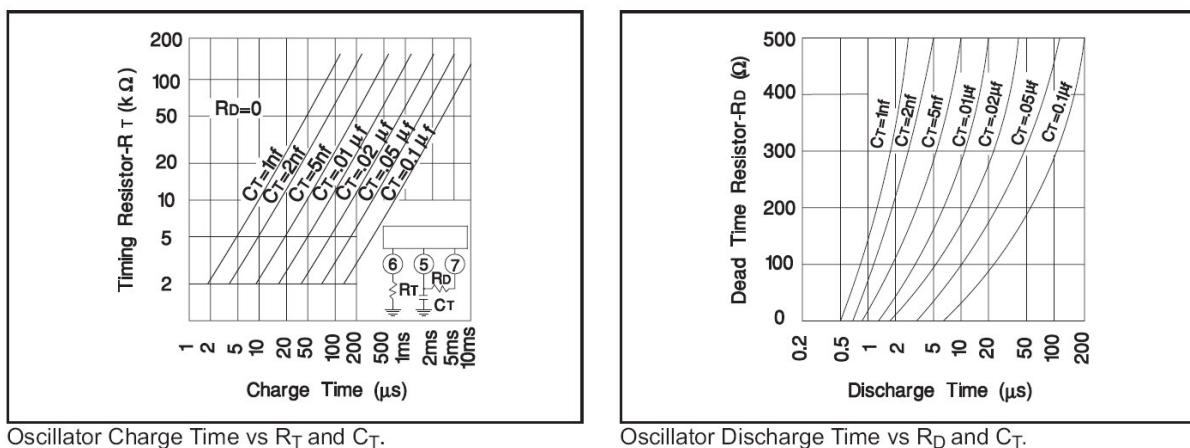
$$I_{in(min)} = P_{in}/V_{in} = 232.5 \text{ W} / 382 = 0.60 \text{ A}$$

Maksymalna szczytowa wartość prądu:

$$I_{pk} = \frac{k \times P_{out}}{V_{in(min)}} = \frac{2.8(186 \text{ W})}{262 \text{ V}} = 1.98 \text{ A}$$

Wybór układu sterownika:

Do sterowania zasilaczem impulsowym wykorzystany został tani i popularny układ kontrolera przetwornic UC3525 firmy Teras Instruments. Częstotliwość pracy wewnętrznego oscylatora układu oraz wartość czasu martwego dobrano za pomocą nomogramów producenta przedstawionych na rysunku 3.



Oscillator Charge Time vs R_T and C_T.

Oscillator Discharge Time vs R_D and C_T.

Rysunek 3. Zależność częstotliwości i czasu martwego od wartości elementów R_T, C_T, R_D.

Wartości zastosowanych elementów dla częstotliwości $f=100\text{kHz}$ i czasu martwego $D_T=0.8\mu\text{s}$ mają wartość: $R_T = 10\text{k}\Omega$, $R_D = 100\Omega$, $C_T = 1\text{nF}$.

Dobór transformatora impulsowego:

Dobór odpowiedniego transformatora sprowadza się właściwie do wyboru odpowiedniego rdzenia, który zdolny będzie do przeniesienia żądanej mocy przy danej częstotliwości pracy przetwornicy. Oznacza to właściwie wybór materiału, z którego rdzeń jest wykonany i jego zastępczej objętości magnetycznej (V_e), od której zależy moc, jaką rdzeń może przenieść (większe V_e to większa moc).

Materiał rdzenia oraz jego wielkość dobrano z pomocą katalogu producenta firmy Ferroxcube i jest to rdzeń ETD49 z materiału 3F3.

Wybrane dane katalogowe rdzenia przedstawiono w tabeli 1, pozostałe parametry można znaleźć w nocy katalogowej producenta.

Tabela 1. Podstawowe parametry rdzenia ETD49 z materiału 3F3.

Symbol	Parametr	Typ.	Jed.
Ve	Efektywna objętość rdzenia	24000	mm ³
le	Długość skuteczna rdzenia	114	mm
Bsat	Indukcyjność nasycenia rdzenia	330	mT
Ac	Efektywny obszar rdzenia	211	mm ²
Wa	Okno karkasu dla uzwojenia	273	mm ²

Dobór średnicy przewodów nawojowych:

Należy pamiętać, że wraz ze wzrostem częstotliwości następuje zwiększenie efektu naskórkowości w uzwojeniach transformatora. Zjawisko naskórkowości jest przyczyną zmniejszenia tzw. przekroju czynnego przewodu i silnego wzrostu oporu elektrycznego. Tak, więc prąd nie płynie w całym przekroju poprzecznym przewodu, ale wnika tylko na określoną głębokość.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \times \omega \times \sigma}}$$

Z powyższego wzoru wynika, że zamiast uzwojenia złożonego z jednego drutu o dużej średnicy należy zastosować specjalny przewód zwany licą. Lica to plecionka składająca się od kilku do kilkuset cienkich wzajemnie odizolowanych przewodów.

Liczbę zwoi uzwojenia pierwotnego transformatora impulsowego Tr.3 określa następujące wyrażenie:

$$N_{pri} = \frac{V_{in(nom)} \times 10^9}{4 \times f \times B_{max} \times Ac}$$

Liczba zwoi uzwojenia wtórnego:

$$N_{\text{sec}} = \frac{1.1 \times (V_{\text{out}} + V_{\text{fwd}})}{N_{\text{pri}} \times V_{\text{in}(\text{min})} \times DC_{\text{max}}}$$

Ponieważ układ zasilacza impulsowego posiada stabilizację napięcia wyjściowego napięcie wyjściowe przetwornicy powinno być większe od oczekiwanego, aby zapewnić prawidłową pracę układu stabilizacji.

W celu zapewnienia odpowiedniej izolacji pomiędzy uzwojeniami poszczególne warstwy uzwojenia transformatora pokryto preparatem Plastik 70 i oddzielono od siebie podwójną warstwą taśmy teflonowej.

Liczbę zwoi uzwojenia transformatora sterującego kluczami tranzystorowymi, wyznaczono na podstawie następującego wyrażenia:

$$N_{\text{pri}} = \frac{V_{\text{cc}} \times 10^8}{4 \times f \times B_{\text{max}} \times A_c}$$

Transformator sterujący wykonano na niewielkim rdzeniu toroidalnym. Przekładnia transformatora wynosi 1:1, uzwojenia nawinięte są przewodem w izolacji z tworzyw sztucznych (tzw. skrętka telefoniczna).

Dobór elementów mocy:

Elementy półprzewodnikowe mocy stosowane w zasilaczach impulsowych powinny charakteryzować się parametrami gwarantującymi pewną i niezawodną pracę całego układu. Tranzystory kluczujące i diody prostownicze muszą być przystosowane do pracy z dużymi częstotliwościami, powinny także charakteryzować się małą wartością rezystancji przewodzenia $R_{\text{DS(on)}}$, aby zminimalizować straty mocy. Wyboru tranzystorów kluczujących MOSFET dokonano za pomocą poniższych wzorów:

$$V_{\text{dss}} \Rightarrow 1.3V_{\text{in}(\text{max})} = 1.3(382\text{V}) > 496.6\text{V}$$

$$I_d \Rightarrow 1.5I_{in(av)} = 1.5(1.98A) > 2.97A$$

Zastosowano tranzystory NMOS typu IRFP450 oraz szybkie diody prostownicze BYW29/200V, parametry tych elementów można znaleźć w nocie katalogowej producenta.

Dobór elementów wyjściowych LC:

Minimalną indukcyjność dławika wyjściowego L2 i L3 określa następujący wzór:

$$L_{\min} = \frac{V_{in(max)} \times T_{off(max)}}{1.4 \times I_{out(max)}} = 71\mu H$$

Liczba zwoi uzwojenia dławika L2 i L3:

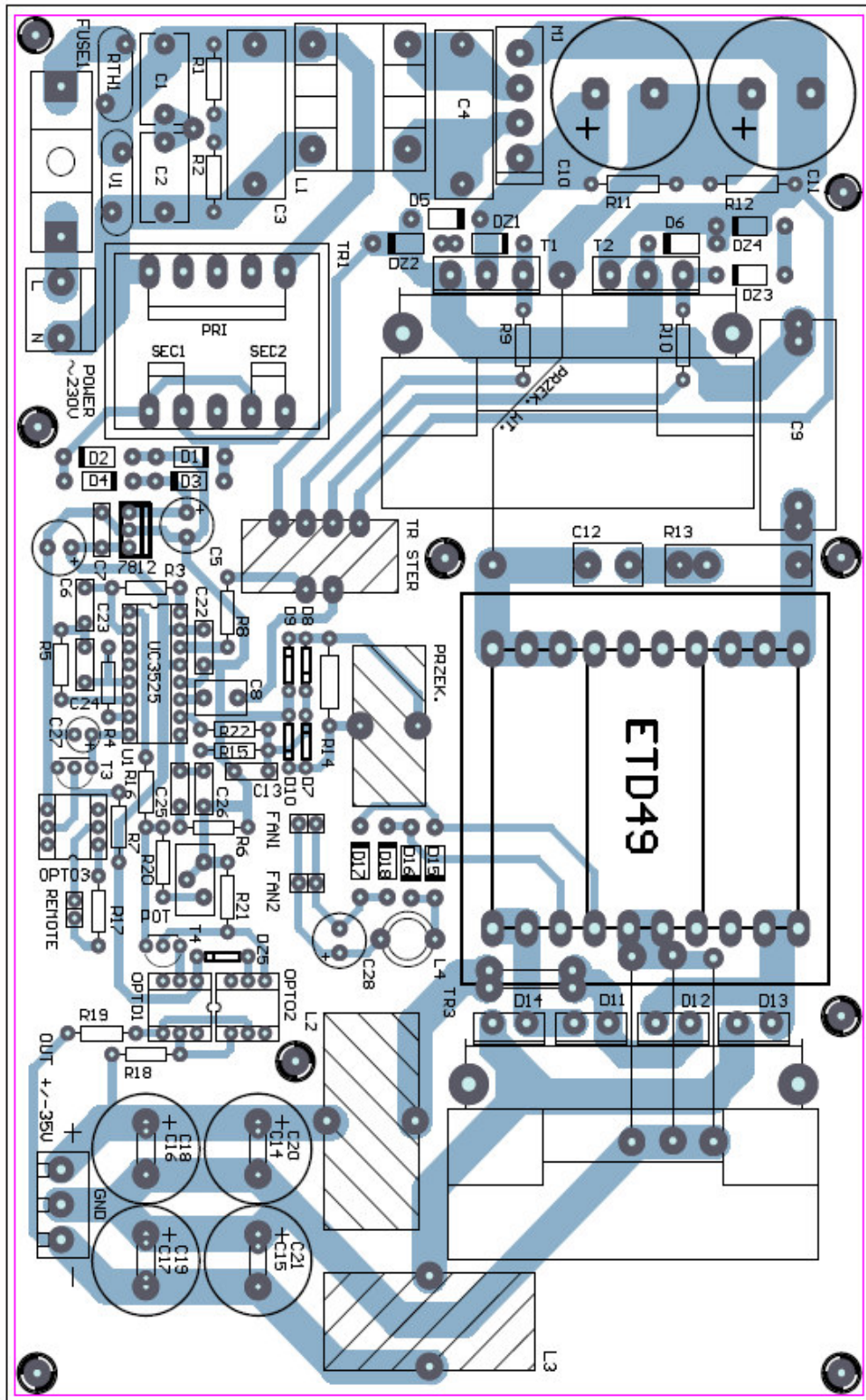
$$N_{pri} = 1000 \sqrt{\frac{L_{pri}}{A_l}} = 1000 \sqrt{\frac{0.071}{93}} \cong 28$$

Główne dławiki wyjściowe nawinięto na rdzeniach toroidalnym T106 z materiałów proszkowych, natomiast jako dławik napięcia pomocniczego (zasilanie wentylatorów) wykorzystano gotowy element indukcyjny.

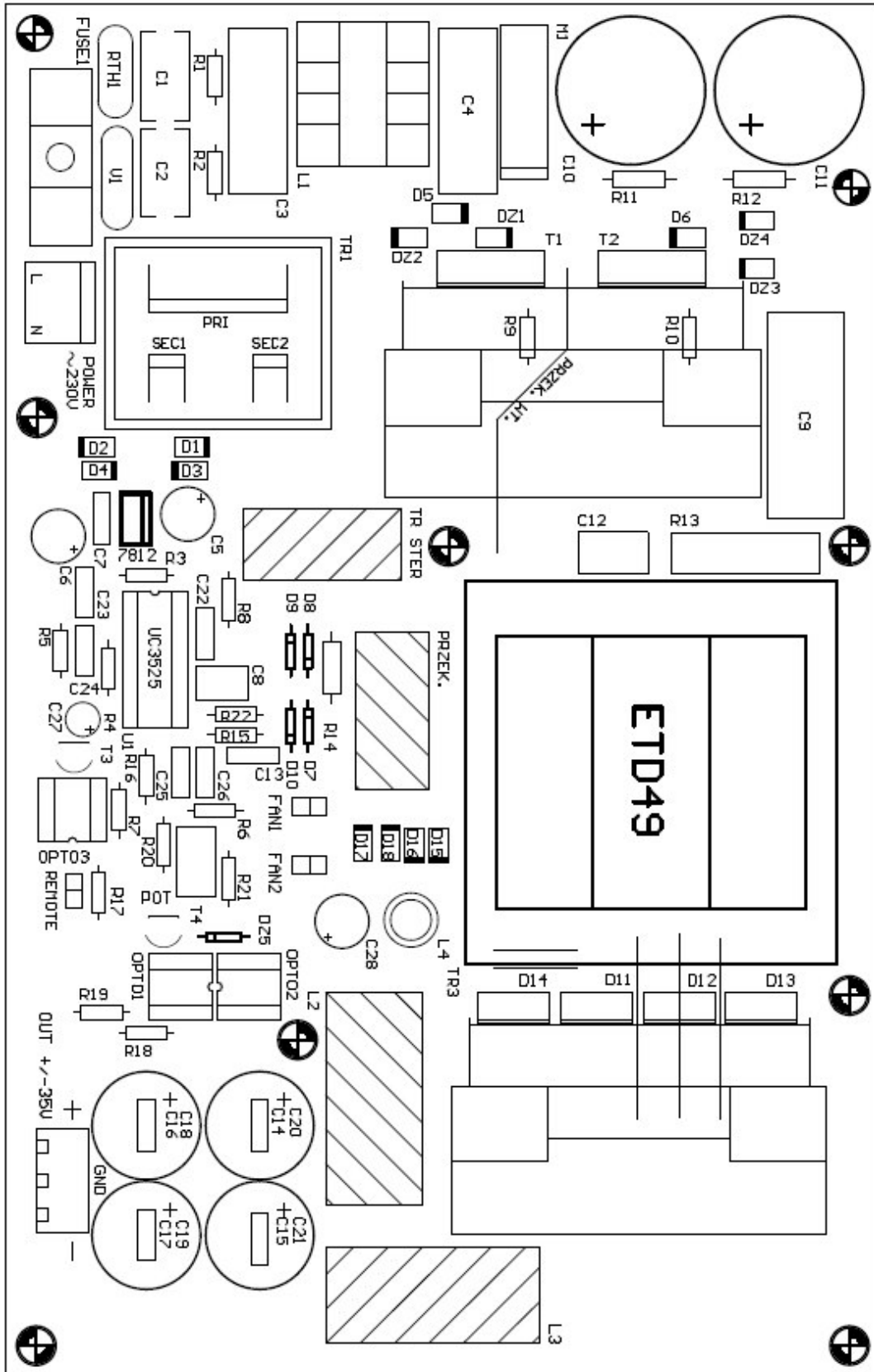
Minimalna pojemność baterii kondensatorów wyjściowych:

$$C_{o(min)} = \frac{I_{out(max)} \times T_{off(max)}}{V_{ripple(max)}} = 600\mu F$$

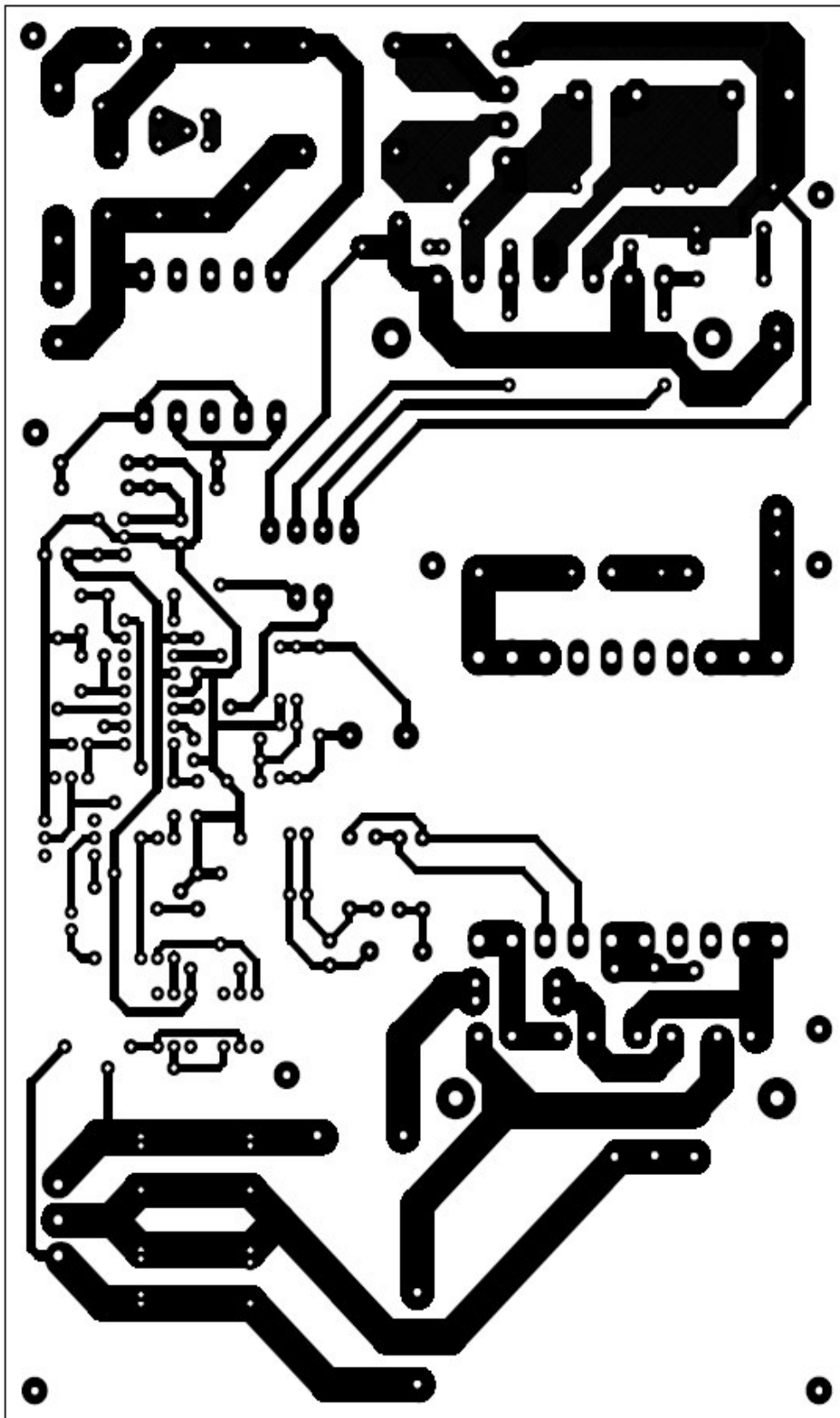
Zastosowano po dwa kondensatory o pojemności 1000 μ F dla dodatniego i ujemnego napięcia wyjściowego 30V.



Rysunek 4. Widok płytki układu zasilacza impulsowego.



Rysunek 5. Widok od strony elementów płytki układu zasilacza impulsowego.



Rysunek 6. Widok od strony ścieżek płytki układu zasilacza impulsowego.