

Dział „Projekty Czytelników” zawiera opisy projektów nadesłanych do redakcji EP przez Czytelników. Redakcja nie bierze odpowiedzialności za prawidłowe działanie opisywanych układów, gdyż nie testujemy ich laboratoryjnie, chociaż sprawdzamy poprawność konstrukcji. Prosimy o nadsyłanie własnych projektów z modelami (do zwrotu). Do artykułu należy dołączyć podpisane oświadczenie, że artykuł jest własnym opracowaniem autora i nie był dotychczas nigdzie publikowany. Honorarium za publikację w tym dziale wynosi 250,- zł (brutto) za 1 stronę w EP. Przesyłanych tekstów nie zwracamy. Redakcja zastrzega sobie prawo do dokonywania skrótów.

Półprzewodnikowa Cewka Tesli

Projekt
185

Cewka Tesli, zwana również transformatorem Tesli, jest rodzajem rezonatora LC służącym do wytwarzania wysokich napięć. Urządzenie to skonstruował około 1891 roku naukowiec serbskiego pochodzenia Nicola Tesla. Wysokie napięcie wytwarzane przez cewkę Tesli powoduje powstawanie w powietrzu efektownych wyładowań elektrycznych. Przedstawione w artykule urządzenie jest nowoczesną odmianą cewki Tesli, w którym do zasilania rezonatora zastosowano elementy elektroniczne.

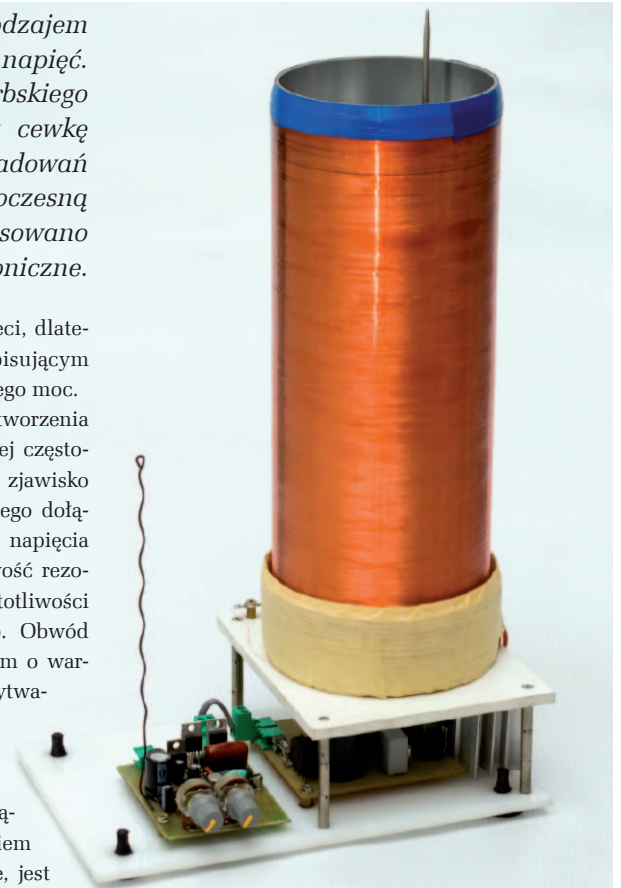
Najważniejszym elementem cewki Tesli jest rezonator w postaci bezrdzeniowego uzwojenia solenoidalnego o dużej liczbie zwojów. Uzwojenie to oprócz indukcyjności ma również pojemności międzyzwojowe oraz pojemność między uzwojeniem a ziemią. W normalnych warunkach takie pojemności nazywane są pasożytniczymi, jednak tutaj odgrywają ważną rolę; mimo, że uzwojenie nie jest połączone z oddzielnym kondensatorem, to stanowi obwód LC o względnie dużej dobroci, mający swoją częstotliwość rezonansową. Po pobudzeniu rezonatora tą częstotliwością napięcie pomiędzy końcami uzwojenia wtórnego cewki osiąga ogromne wartości.

Z powodu wielkości występujących napięć wymagana jest specjalna konstrukcja transformatora. Uzwojenie wtórne jest cewką jednowarstwową zabezpieczoną przed przebiciami lakierem i ustawioną pionowo. Dolny koniec uzwojenia jest uziemiony, dzięki czemu nigdy nie ma tam wysokiego napięcia, które wówczas występuje jedynie u góry uzwojenia. Na szczycie uzwojenia montuje się torus wykonany z blachy lub folii aluminiowej, który poprawia właściwości rezonatora.

Do pobudzenia rezonatora wykorzystuje się pole magnetyczne wytworzone przez drugą, mniejszą cewkę pierwotną. Ta cewka wraz z rezonatorem Tesli tworzy transformator powietrzny. Co ciekawe, z uwagi na pracę w stanie rezonansu, wartość napięcia na uzwojeniu wtórnym nie ma związku z napięciem zasilania ani z przekładnią wynikającą z liczby zwojów cewek. Ogólnie samo określenie wartości napięcia wyjściowego jest dość problematyczne, dlatego nie używa się tego parametru do opisu cewki Tesli. Ponieważ długość wyładowań wzrasta wraz

ze wzrostem mocy pobieranej z sieci, dlatego najważniejszym parametrem opisującym klasyczny transformator Tesli jest jego moc.

W klasycznej cewce Tesli do wytworzenia pola magnetycznego o odpowiedniej częstotliwości również wykorzystuje się zjawisko rezonansu. Do uzwojenia pierwotnego dołączony jest kondensator wysokiego napięcia o takiej pojemności, aby częstotliwość rezonansowa obwodu była równa częstotliwości rezonansowej uzwojenia wtórnego. Obwód ten jest zasilany wysokim napięciem o wartości najczęściej kilkunastu kV, wytwarzanym przez wysokonapięciowy transformator sieciowy o mocy przynajmniej kilkuset VA. Elementem, który samoczynnie przełącza urządzenie między ładowaniem kondensatora a pracą w rezonansie, jest iskiernik. Częstotliwość jego przełączania wynosi nie mniej niż 100 Hz. W dużych cewkach Tesli często spotyka się iskiernik obrotowy o regulowanej prędkości. Dokładne dopasowanie częstotliwości rezonansowych obwodu pierwotnego i rezonatora Tesli jest tutaj kluczowe. Efekty pracy źle zestrojonej cewki Tesli będą mizerne lub nawet nie będzie ich wcale. Elementów potrzebnych do budowy klasycznej cewki Tesli jest co prawda niewiele, jednak ich koszt jest wysoki oraz, co często jest większym problemem, bywają one bardzo trudne do zdobycia. To powoduje, że użycie metody prób i błędów w dopasowywaniu częstotliwości rezonansowych występujących w urządzeniu często jest niemożliwe, więc konieczne są dokładne obliczenia parametrów poszczególnych elementów. Te czynniki sprawiają, że budowa takiego urządzenia nie należy do tanich, a tym bardziej do łatwych i bezproblemowych.



Fot. 1. Wygląd zmontowanej półprzewodnikowej cewki Tesli (SSTC)

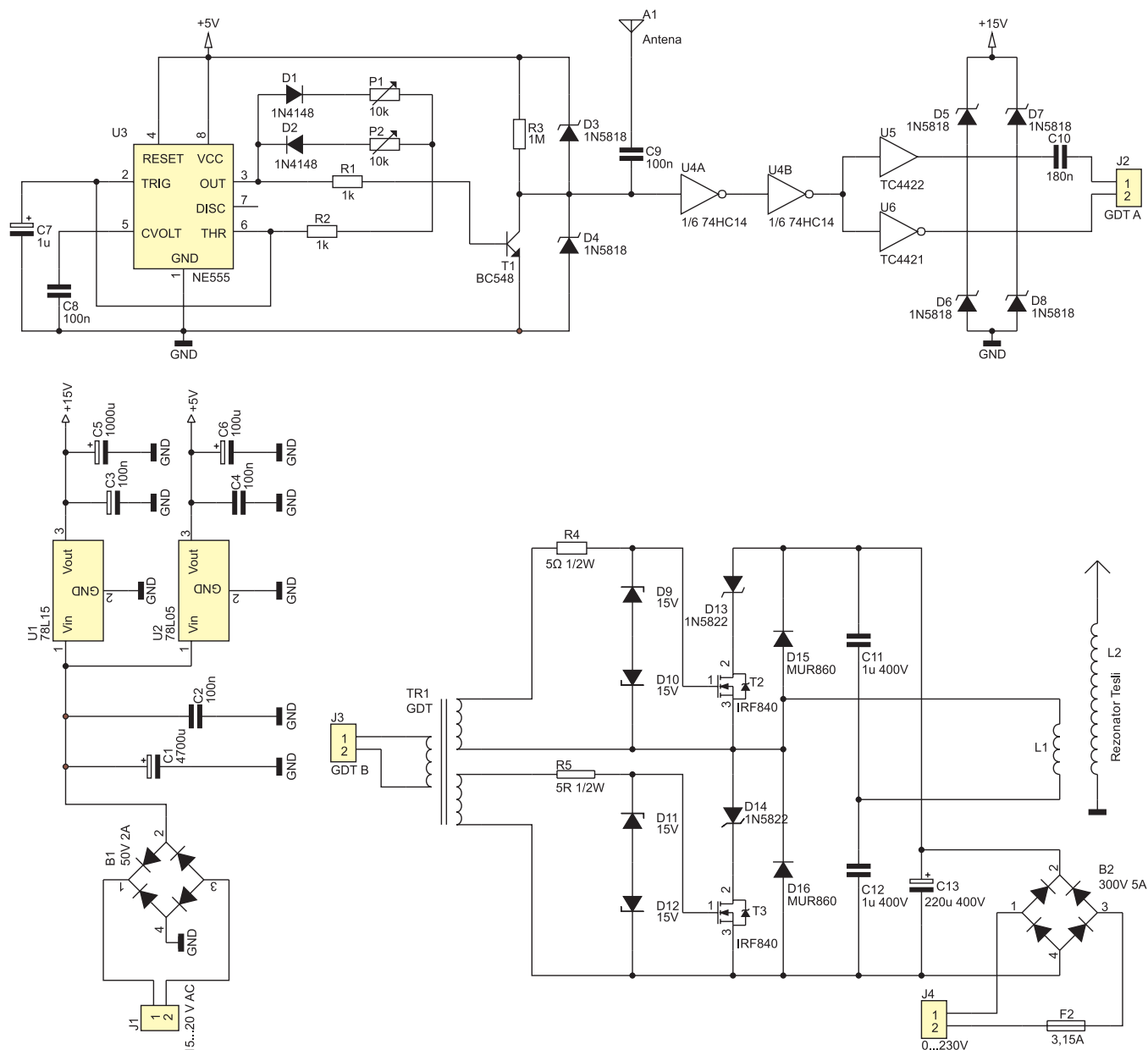
Dodatkowe informacje:

W przedstawionym w artykule urządzeniu występują wysokie napięcia niebezpieczne dla życia i zdrowia! Dodatkowym zagrożeniem jest pole elektryczne o dużym natężeniu wytwarzane wokół urządzenia, dlatego niedopuszczalne jest uruchamianie urządzenia, gdy w pobliżu znajduje się sprzęt elektroniczny podtrzymujący życie (np. osoba ze stymulatorem serca).

Klasyczna cewka Tesli a cewka półprzewodnikowa

Zastosowanie półprzewodnikowych elementów kluczujących pozwala skonstruować cewkę Tesli pracującą nieco inaczej niż w przypadku jej klasycznej wersji.

W półprzewodnikowej cewce Tesli funkcję obwodu rezonansowego tworzonego przez uzwojenie pierwotne oraz iskiernik przejmuje układ elektroniczny. Najczęściej uzwojenie pierwotne transformatora Tesli jest zasilane



Rys. 2. Schemat ideowy SSTC

z mostka lub półmostka złożonego z tranzystorów MOSFET. Takie samo rozwiązanie stosowane jest do zasilania transformatorów w wielu zasilaczach impulsowych. Mostek tranzystorowy jest sterowany układem elektronicznym, który przełącza go z częstotliwością rezonansu własnego rezonatora Tesli. Dzięki temu niepotrzebny staje się iskiernik oraz kondensator wysokiego napięcia. Mostek zasilany jest bezpośrednio z wyprostowanego napięcia sieciowego, a to z kolei pozwala wyeliminować duży i ciężki transformator zasilający.

Opracowanie takiego rodzaju cewki Tesli pociągnęło za sobą konieczność stworzenia również kilku innych rozwiązań. Każde rozwiązanie nosi własną nazwę, często używaną w postaci akronimu. Klasyczna cewka Tesli nazywana jest SGTC (*Spark Gap Tesla Coil*). Półprzewodnikowa cewka Tesli to w dosłownym tłumaczeniu *Solid State Tesla Coil* (SSTC). Spotkać można również rozwiązanie wciąż półprzewodnikowe, jednak

bardziej zbliżone do wersji klasycznej. Są to DRSSCTC (*Dual Resonant SSTC*), w którym w obwodzie uzwojenia pierwotnego zastosowano kondensator rezonansowy zwiększający prąd w uzwojeniu pierwotnym i mniej popularny OLTC (*Off Line Tesla Coil*), w którym w obwodzie pierwotnym również znajduje się kondensator rezonansowy, a zamiast mostka tranzystorowego zastosowano pojedynczy tranzystor IGBT spełniający funkcję podobną do iskiernika. Istnieje jeszcze jeden rodzaj cewki Tesli, w której elementem przełączającym jest lampa elektronowa – jest to VTTC (*Vacuum Tube Tesla Coil*). Akronimy te stanowią podstawowe hasła pomocne przy przeszukiwaniu zasobów Internetu pod kątem materiałów dotyczących cewki Tesli.

Opis konstrukcji

Opisywana cewka Tesli to najprostszy rodzaj SSTC. Pomysł zbudowania zrodził się, gdy zobaczyłem jedną z półprzewodniko-

wych cewek Tesli wykonanych przez Steve'a Warda (<http://www.stevehv.4hv.org/SSTC5.htm>), na niej też wzorowałem się budując swoją konstrukcję. Nie użyłem żadnych specjalnych i trudnych do zdobycia elementów, a całość jest stosunkowo prosta w budowie.

Gotowa konstrukcja jest przedstawiona na fot. 1, a schemat elektryczny na rys. 2. Schemat podzielony jest na trzy części. Pierwsza część, ilustrująca zasilanie układu sterowania, nie wymaga chyba komentarza. Druga część schematu to układ sterujący, natomiast trzecia to układ półmostka tranzystorowego wraz z samym transformatorem Tesli. Układ sterujący wraz z zasilaniem oraz układ półmostka zmontowano na oddzielnych płytkach drukowanych, jak pokazano na fot. 3.

Układ sterowania zawiera generator zbudowany w oparciu o NE555, jednak nie służy on do generowania sygnału przełączającego półmostek. Zadaniem tego generatora jest

Wykaz elementów

Rezystory:

R1, R2: 1 kΩ
R3: 1 MΩ
R4, R5: 5 Ω/0,5 W
P1, P2: potencjometr 10 kΩ/A

Kondensatory:

C1: 4700 μF/25 V
C2...C4, C8, C9: 100 nF
C5: 1000 μF/25 V
C6: 100 μF/10 V
C7: 1 μF/10 V
C10: 180 nF (impulsowy)
C11, C12: 1 μF/400 V (impulsowy)
C13: 220 μF/400 V

Półprzewodniki:

D1, D2: 1N4148
D3...D8: 1N5818
D13, D14: 1N5822
D9...D12: dioda Zenera 15 V
D15, D16: MUR860
B1: mostek prostowniczy 2 A/50 V
B2: mostek prostowniczy 3 A/400 V

T1: BC548

T2, T3: IRF840

U1: 78L15

U2: 78L05

U3: NE555

U4: 74HC14

U5: TC4422

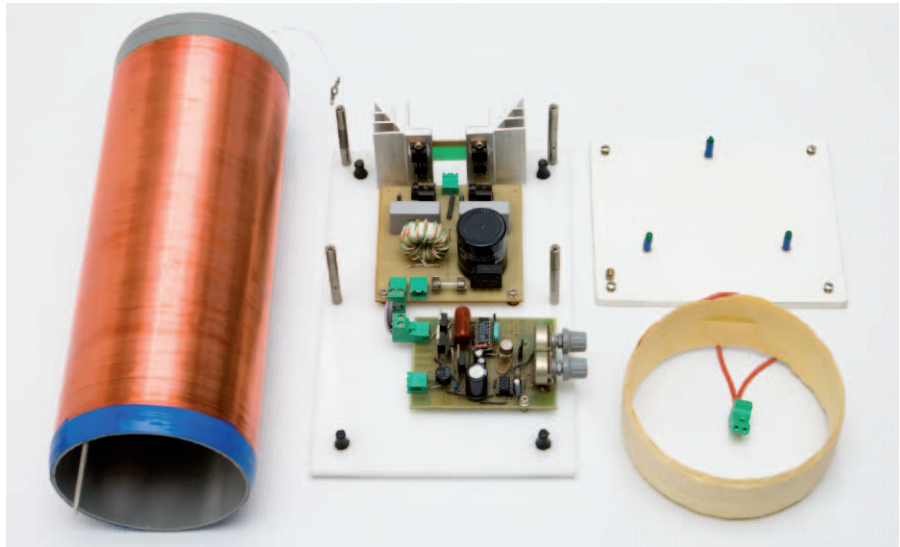
U6: TC4421

Inne:

F2: bezpiecznik 3,15 A/250 V
TR1: transformator sterujący (opis w tekście)
L1: uzwojenie pierwotne (opis w tekście)
A1: antena (opis w tekście)

modulacja pracy cewki Tesli, czyli okresowe blokowanie sygnału sterującego tranzystorami półmostka. Blokowanie tego sygnału odbywa się poprzez zwieranie wejścia negatora U4A do masy przez T1. Częstotliwość pracy tego generatora nie przekracza kilkuset Hz i jest regulowana w szerokim zakresie. Za pomocą potencjometrów P1 i P2 można regulować czas trwania stanu wysokiego i niskiego generowanego przebiegu. Możliwość oddzielnej regulacji czasu trwania obu stanów przebiegu pozwala uzyskać nie tylko różne częstotliwości, ale również różne współczynniki wypełnienia. Taka modulacja pracy półmostka pozwala na dość wygodną regulację średniej mocy cewki Tesli. Można w ten sposób zmniejszyć nagrzewanie się elementów, a dodatkowo dzięki zmianie parametrów modulacji można uzyskać wyładowania o różnym wyglądzie. Układ modulujący pełni jeszcze jedną ważną funkcję, o której będzie mowa nieco dalej.

Oprócz opisanego generatora układ sterujący składa się z anteny A1, dwóch negatorów TTL U4A i U4B oraz dwóch driverów MOS-FET U5 i U6, które zasilają transformator TR1 sterujący pracą półmostka tranzystorowego. Diody Schottky'ego D3 i D4 ograniczają amplitudę napięcia przychodzącego z anteny tak, aby nie uszkodziło ono wejścia negatora U4A. Diody D5...D8 zabezpieczają wyjścia driverów przed przepięciami. Kondensator C10 blokuje składową stałą prądu płynącego przez TR1.



Fot. 3. Podział urządzenia na poszczególne moduły

Niewątpliwie zagadkowym elementem jest tutaj antena. Otóż właśnie ona jest źródłem sygnału sterującego pracą półmostka tranzystorowego. Zadaniem cewki Tesli jest wytwarzanie wysokiego napięcia. Napięciu temu towarzyszy pole elektryczne o dużym natężeniu. Zmienia ono swoją wartość tak samo jak napięcie generowane w rezonatorze Tesli. Antena odbiera pole elektryczne, a sygnał z anteny (po uformowaniu przez U4 oraz przejściu przez drivery i transformator TR1) steruje przełączaniem półmostka zasilającego uzwojenie L1. W ten sposób mamy tutaj do czynienia z klasycznym sprzężeniem zwrotnym. Takie rozwiązanie powoduje, że całe urządzenie staje się generatorem LC, gdzie obwodem LC determinującym częstotliwość pracy jest sam rezonator Tesli. Dzięki temu nie jest potrzebne żadne strojenie częstotliwości, a co więcej, urządzenie nie jest wrażliwe na zmiany częstotliwości rezonansowej uzwojenia. Jest to bardzo ważna cecha, ponieważ taką zmianę częstotliwości powoduje obciążenie wyjścia cewki przez wyładowanie do uziemionego przedmiotu lub nawet pojawienie się w odległości kilkudziesięciu cm od uzwojenia dużego obiektu przewodzącego prąd. Taki obiekt powoduje zmianę pojemności między uzwojeniem a ziemią, co skutkuje zmianą częstotliwości rezonansowej. Gdyby nie było sprzężenia zwrotnego, a uzwojenie pierwotne byłoby zasilane prądem o stałej częstotliwości, wówczas nawet zbliżenie dłoni do uzwojenia wtórnego na odległość kilkunastu cm powodowałoby takie odstrojenie układu, że cewka Tesli całkowicie przestawałaby działać. Dodatkowo, nawet niewielkie rozstrojenie pomiędzy układem sterującym a rezonatorem Tesli powodowałoby powstawanie dużych oscylacji na tranzystorach półmostka w momentach przełączania, co znacznie zwiększałoby ryzyko ich uszkodzenia. Wykorzystanie sprzężenia zwrotnego z anteną powoduje, że te problemy znikają, bo układ sterujący zawsze

pracuje z taką częstotliwością, jaką determinuje uzwojenie wtórne transformatora Tesli.

W powyższym rozumowaniu pominięty jest jeden problem. Po włączeniu zasilania rezonator Tesli przecież nie pracuje. Wtedy do anteny nie dociera żaden sygnał, a to powoduje, że rezonator nie zaczyna pracować. Do rozpoczęcia pracy potrzebny jest impuls wzbudzający w rezonatorze niewielkie drgania, które zostaną odebrane przez antenę i zapoczątkują pracę. Impulsu takiego dostarcza opisany wcześniej generator modulujący pracę cewki Tesli. Załączenie lub wyłączenie tranzystora T1 skutkuje zmianę stanu wejścia U4A. To pociąga za sobą przełączenie stanu driverów U5 i U6, co powoduje przedostanie się do półmostka krótkiego impulsu włączającego na chwilę jeden z tranzystorów (T2 lub T3). Taki impuls wywołuje w rezonatorze wystarczające drgania, aby układ wzbudził się i zaczął generować wysokie napięcie.

Drugim modułem wchodzącym w skład opisywanego urządzenia jest układ półmostka tranzystorowego. W prawej części schematu układu znajduje się mostek prostowniczy wraz z kondensatorem filtrującym napięcie zasilania. Środkowa część to mostek zasilający uzwojenie pierwotne transformatora Tesli, czyli L1. Mostek zawiera dwie gałęzie. Pierwszą stanowi dzielnik pojemnościowy złożony z kondensatorów C11 i C12. Drugą gałąź stanowią tranzystory T2 i T3. Transformator sterujący TR1 dostarcza napięcia sterującego bramkami tranzystorów i stanowi separację galwaniczną między tranzystorami a układem sterującym. Rezystory R4 i R5 ograniczają prąd bramek tranzystorów, a diody Zenera D9...D12 zabezpieczają bramki przed przepięciami. Zastosowanie separacji między tranzystorami półmostka jest konieczne, ponieważ każdy z tranzystorów musi być sterowany napięciem podanym między jego bramkę a źródło. Źródła tranzystorów są na różnych potencjałach. Co wię-



cej, potencjał źródła tranzystora T2 nie jest stały. Dlatego konieczna jest separacja galwaniczna między bramkami tranzystorów oraz między tranzystorami a układem sterującym.

Tranzystory użyte w półmostku zawierają w swojej strukturze diody zwrotne, które niestety przy pracy z dużą częstotliwością mogą okazać się zbyt wolne. W opisywanym urządzeniu częstotliwość pracy jest wysoka (kilkaset kHz) i jednocześnie prądy płynące przez diody zwrotne tranzystorów mogą osiągać duże wartości. Przez to dioda przewodząca prąd może nie zdążyć wyłączyć się w czasie przełączania mostka, a wtedy następuje zwarcioowy impuls prądu płynącego przez włączony tranzystor oraz zaporowo przez diodę w drugim tranzystorze, która nie zdążyła się wyłączyć. Takie zjawisko nieuchronnie prowadzi do uszkodzenia tranzystorów. Dlatego wewnętrzne diody tranzystorów T2 i T3 są zablokowane diodami Schottky'ego D13 i D14, a jako diody zwrotne zastosowano ultraszybkie D15 i D16.

Transformator sterujący TR1 również musi być przystosowany do pracy przy wielkiej częstotliwości. W sprzedaży oferowane są gotowe transformatoriki sterujące, jednak próba ich użycia była nieudana. Dlatego najlepiej jest dobrać odpowiedni rdzeń i samodzielnie nawinąć ten transformator.

Wykonanie rezonatora Tesli

Główną częścią cewki Tesli jest rezonator, więc warto od niego rozpocząć budowę urządzenia. Najważniejszym parametrem rezonatora jest częstotliwość rezonansu własnego. Częstotliwość ta jest tym mniejsza, im większe są wymiary uzwojenia oraz im więcej zwojów, czyli im mniejsza średnica drutu nawojowego. Im wyższa jest częstotliwość rezonansowa, tym trudniejsze zadanie stoi przed elektroniką sterującą.

Wymiary uzwojenia zastosowanego w opisywanej SSTC to około 110 mm średnicy i 300 mm wysokości. Cewkę nawinięto drutem DNE 0,18 mm i pomalowano żywicą epoksydową. Nie wiem, ile zwojów ma uzwojenie, dokładna znajomość ich liczby nie jest potrzebna, ponieważ wynika ona z wysokości cewki i grubości drutu. Cewka wykonana w ten sposób ma rezonans na częstotliwości około 200 kHz. Osobiście nie zalecam konstruowania cewki o mniejszych wymiarach (czyli wyższej częstotliwości rezonansowej), zwłaszcza jako pierwszej tego typu konstrukcji. Zaczynając budowę SSTC, napotykałem wiele trudności, próbując uruchomić prototyp z rezonatorem pracującym na częstotliwości 400 kHz. Po wielu dniach posłuchałem kolegów, którzy budowali wcześniej takie urządzenia i nawinąłem nowy, większy, opisywany rezonator. Dwukrotne zmniejszenie częstotliwości rzeczywiście zdecydowanie poprawiło kształty sygnałów w układzie i rozwiązało

wiele problemów. Nie polecam stosowania cieńszego drutu niż 0,15 mm, ponieważ łatwo go urwać i nawijanie staje się znacznie trudniejsze. Stosunek średnicy uzwojenia do jego wysokości w przypadku SSTC powinien zawierać się między 1:2 a 1:4. Osobiście zalecam 1:2.

Dobrym karkasem do nawinięcia rezonatora jest rura PCV. Powierzchnia rury musi być czysta, wszelki brud może spowodować przebicie, czyli nieodwracalne uszkodzenie uzwojenia. Na rurze należy nawinąć jedną warstwę emaliowanego drutu nawojowego, pamiętając o pozostawieniu na końcach rury przynajmniej po 2 cm wolnego miejsca, które przyda się przy montażu rezonatora do podstawy. Drut na obu końcach uzwojenia należy przymocować do rury, co zabezpieczy go przed odwinieniem. Jako tymczasowe mocowanie dobrze sprawdza się zwykła taśma klejąca. Metod nawijania drutu jest wiele. Zwoje powinny być nawinięte ściśle, jeden przy drugim. Nakładanie się zwojów jeden na drugi jest niedopuszczalne i konieczne należy każde takie niedopatrzenie poprawić.

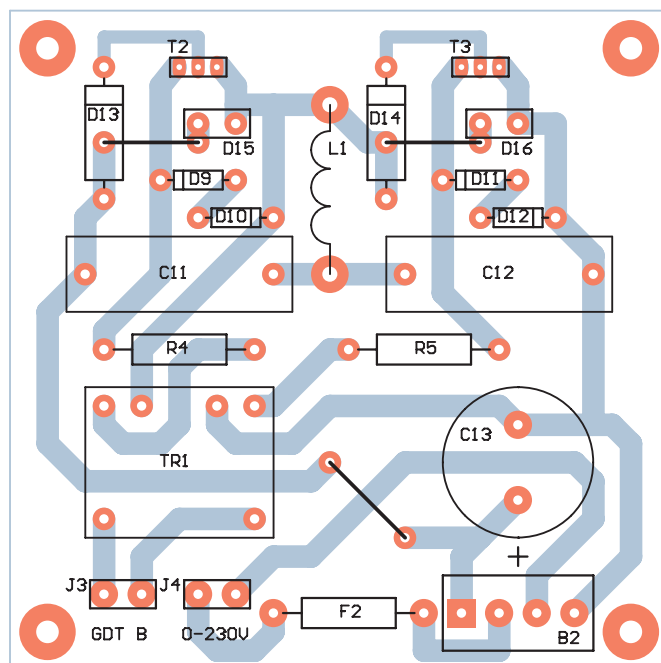
Po nawinięciu drutu należy zabezpieczyć jego powierzchnię lakierem izolacyjnym. Może to być żywica epoksydowa lub na przykład jakiś specyfik w sprayu, służący do zabezpieczania płytek drukowanych. Polakierowanie uzwojenia spełnia dwa zadania. Pierwsze to oczywiście poprawa izolacji, co zmniejsza ryzyko przebicia międzyzwojowych na powierzchni uzwojenia (które w cewkach Tesli są dość powszechne). Drugie to usztywnienie i sklejenie ze sobą zwojów. W niezabezpieczonym uzwojeniu drut potrafi przy niewielkim wzmroście temperatury tak się wydłużyć, że zwoje odchodzą od powierzchni rury i cała cewka się

rozpada. Zastosowany lakier powinien być na tyle rzadki i wolnoschnący, aby po nałożeniu wsiąkł pod drut i połączył się również z powierzchnią karkasu. Po wsiąknięciu lakieru dobrze jest polakierować uzwojenie jeszcze raz. Jeśli są wątpliwości co do tego, czy lakier wsiąknie, dobrze jest wcześniej polakierować samą rurę i nawijać drut na jeszcze nie do końca wyschnięty lakier. Takie rozwiązanie jest jednak mniej wygodne, ponieważ drut przykleja się i wszelkie błędy podczas nawijania trudniej jest poprawić. Po wyschnięciu lakieru można bezpiecznie odkleić taśmę przytrzymującą końce drutu. Wówczas rezonator jest gotowy.

Uzwojenie pierwotne L1 pobudzające rezonator do drgań może być nawinięte dowolnym drutem lub linką miedzianą o przekroju co najmniej 2,5 mm². Średnica uzwojenia powinna być dopasowana tak, aby uzwojenie dało się założyć na rezonator, jak pokazano na fot. 1. Karkas można wykonać z rury PCV, ale ilość zwojów jest tak mała, że nie jest konieczne stosowanie jakiegokolwiek karkasu. W przedstawionym modelu uzwojenie pierwotne składa się z 12 zwojów izolowanej linki miedzianej, usztywnionych szeroką taśmą klejącą. Uzwojenie to może składać się z kilku do kilkunastu zwojów, przy czym nie powinno być ich mniej niż 8. Dokładne ustalenie optymalnej liczby zwojów na drodze teoretycznej jest trudne, dlatego należy zastosować tutaj metodę prób i błędów, zwracając uwagę nie tylko na uzyskiwane efekty, ale również na nagrzewanie się tranzystorów T2 i T3.

Montaż urządzenia

Część elektroniczna urządzenia podzielona została na dwie oddzielne płytki drukowane. Układ sterujący zmontowano na płyt-



Rys. 4. Schemat montażowy płytki kluczy tranzystorowych

ce uniwersalnej o wymiarach 65×85 mm. Montaż elementów na takiej płytce nie wymaga chyba większego komentarza. Potencjometry i złącza należy zamontować w łatwo dostępnych miejscach, a w rogach płytki pozostawić miejsca na otwory mocujące. Warto również przewidzieć ewentualną konieczność przymocowania radiatorów do stabilizatorów napięcia oraz driverów. Należy pamiętać o doprowadzeniu zasilania do negatorów oraz driverów. Układ U4 zasilany jest napięciem +5 V, natomiast układy U5 i U6 +15 V. Wejścia niewykorzystanych negatorów z układu 74HC14 powinny być zwarte do masy lub do +5 V.

Antena A1 to kawałek drutu ustawiony pionowo w odległości około 10 cm od rezonatora Tesli i sięgający mniej więcej do połowy jego wysokości. Nie ma znaczenia, czy będzie to drut izolowany, czy nie. Warto podkreślić, że negatory zastosowane w układzie koniecznie muszą być w wersji, TTL a nie CMOS. Z moich doświadczeń wynika, że wejście negatora CMOS nie chce poprawnie odbierać sygnału z anteny.

Układ półmostka tranzystorowego zmontowano na płytce drukowanej. Wzór ścieżek tej płytki oraz rozmieszczenie elementów pokazane są na rys. 4. W tej części układu występuje niebezpieczne napięcie oraz płyną spore prądy, dlatego warto jest dla porządku wykonać płytkę, zamiast montować elementy na płytce uniwersalnej i łączyć je odcinkami przewodów. Tranzystory półmostka muszą być przymocowane do sporej wielkości radiatorów, dobrze jest też zadbać o łatwość ich wymiany. Niestety, zwłaszcza podczas uruchamiania urządzenia, trzeba liczyć się z możliwością uszkodzenia tranzystorów.

Wykonanie transformatora sterującego TR1 jest niezwykle proste. Należy jednak zastosować odpowiedni do tego rdzeń. Powinien to być rdzeń ferrytowy, toroidalny i przeznaczony do pracy w transformatorze wysokiej częstotliwości. Nic nie stoi na przeszkodzie wykorzystania rdzenia z odzysku, jednak trzeba pamiętać, że musi on spełniać wymienione wymagania. Z moich obserwacji procesu budowy cewek Tesli podobnych do opisanej w artykule wynika, że częstym błędem jest użycie nieodpowiedniego rdzenia. Mimo że wszystkie tego typu rdzenie wyglądają tak samo, ich parametry znacznie się różnią i wiele rdzeni, np. spośród tych stosowanych w filtrach przeciwzakłóceń, nie nadaje się do pracy w transformatorze. Nadawać się na pewno będzie każdy rdzeń toroidalny z materiału 3E25. Mając już odpowiedni rdzeń, należy określić długość drutu potrzebną do nawinięcia na nim 15 zwojów. Do otrzymanej wartości dobrze jest dodać jakieś 15...20 cm zapasu. Transformator ma trzy uzwojenia, więc potrzebne będą trzy jednakowe odcinki drutu. Powinien to być drut izolowany o grubości 0,5...1 mm. Trzy odcinki drutu należy skrócić ze sobą i tą

skrętką nawinąć 15 zwojów równomiernie wokół rdzenia, uzyskując w ten sposób od razu trzy uzwojenia. Skręcenie ze sobą drutów oraz równomierne rozłożenie uzwojeń wokół rdzenia wbrew pozorom ma znaczenie i poprawia parametry transformatora. Przy montażu transformatora TR1 trzeba pamiętać o zamianie ze sobą wyprowadzeń jednego z uzwojeń wtórnych. W przeciwnym razie tranzystory mostka będą włączać się jednocześnie i od razu ulegną uszkodzeniu.

Płytki drukowane wraz z uzwojeniami L1 i L2 można zamontować na pojedynczej podstawie lub zbudować konstrukcję piętrową jak w przedstawionym modelu. Rozmieszczenie poszczególnych części urządzenia powinno być takie, aby połączenia między modułami oraz przewody łączące uzwojenie L1 z płytką drukowaną były jak najkrótsze. Ważne również jest, aby jako podstawy nie zastosować metalowej blachy albo innego materiału przewodzącego prąd. Dotyczy to przede wszystkim części, do której przymocowany jest rezonator Tesli. Taka płyta z przewodnika umieszczona pod uzwojeniem zachowuje się jak zwarty zwoj. Wówczas pole magnetyczne wytwarzane przez uzwojenie L1 generuje prądy wirowe w płycie i moc, zamiast zamieniać się w długie i piękne wyładowania, zostaje w większości zmarnowana na nagrzewanie podstawy. Takie niedopatrzanie jest często popełniane przez konstruktorów budujących cewkę Tesli po raz pierwszy, warto więc zwrócić na to uwagę.

Metod przymocowania rezonatora Tesli do podstawy jest wiele, jednak należy pamiętać o łatwości demontażu. Bardzo przydaje się to przy transporcie i przechowywaniu urządzenia. W przedstawionym modelu zastosowałem trzy długie śruby M3 wkręcone od dołu podstawy tak, aby znajdowały się na obwodzie od wewnątrz karkasu rezonatora. Po założeniu na wystające części śrub koszułek termokurczliwych rezonator daje się ciasno wsunąć na śruby i trzyma się dość stabilnie. W przypadku użycia rury PCV warto podczas kupna rury od razu rozejrzeć się za zaślepką, kratką wentylacyjną lub inną podobną częścią pasującą do wybranej rury. Taka część, po przykręceniu do podstawy i ewentualnie drobnej przeróbce, nadaje się idealnie jako uchwyt rezonatora. Obok rezonatora należy umieścić jakiś zacisk, za pomocą którego można będzie połączyć dolny koniec uzwojenia rezonatora z uziemieniem. W prezentowanym modelu w tym celu użyty jest metalowy kołek z nagwintowanym otworem, do którego przykręcone jest wyprowadzenie rezonatora zakończone oczkiem pod śrubę.

Na szczycie rezonatora należy zamontować jakiś metalowy, względnie ostry element, z którego wychodzić będą wyładowania połączony z końcówką uzwojenia wtórnego. W tym celu można umieścić na górze karkasu swego rodzaju pokrywkę czy zaślepkę i do niej przymocować ten element, ale można również przymocować go do krawędzi, tak jak jest to

zrobione w przedstawionym urządzeniu. Bez opisanego metalowego zakończenia cewka Tesli będzie normalnie pracować, ale wyładowania będą wychodzić ze sterzącego drutu nawojowego, który przy pełnej mocy szybko się stopi. Na uzwojeniu można również umieścić aluminiowy torus, taki jak stosowany w SGTC. Obniża on nieco częstotliwość rezonansową uzwojenia, zmniejsza zależność tej częstotliwości od otoczenia, a jego gładka powierzchnia powoduje, że cewka Tesli produkuje jedno duże wyładowanie, a nie wiele małych. Jednak w przypadku SSTC obniżenie i stabilizacja częstotliwości rezonansowej nie są potrzebne, a ostrze, z którego wychodzić będą wyładowania, tak czy inaczej trzeba zamontować, więc mocowanie torusa mija się z celem.

Uruchamianie

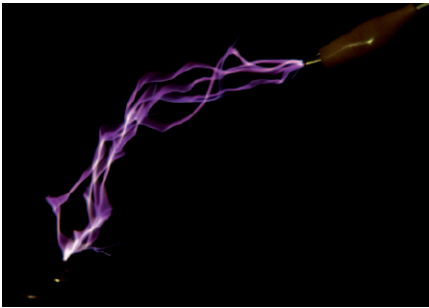
Podczas uruchamiania SSTC oraz właściwie również podczas późniejszego użytkowania bardzo przydatny jest autotransformator regulacyjny. Opisane urządzenie po uruchomieniu może pracować przy zasilaniu bezpośrednio z sieci 230 V, jednak wtedy pracuje przy swoich maksymalnych parametrach, co zwiększa ryzyko uszkodzenia podzespołów. Przy uruchamianiu niezbędny będzie oscyloskop.

Po pierwsze, należy włączyć zasilanie samego układu sterującego, jeszcze niepołączony z płytką półmostka. Należy sprawdzić poprawność działania generatora z układem NE555, ewentualnie wcześniej sprawdzając dla pewności wartości napięć +5 V i +15 V. Przebieg generowany na wyjściu układu U3 (nóżka 3) powinien mieć strome zbocza, a czasy obu poziomów przebiegu powinny dać się regulować. Sygnał powinien przechodzić na wyjścia obu driverów sterujących, a na wyjściu drivera U5 powinien być odwrócony w fazie.

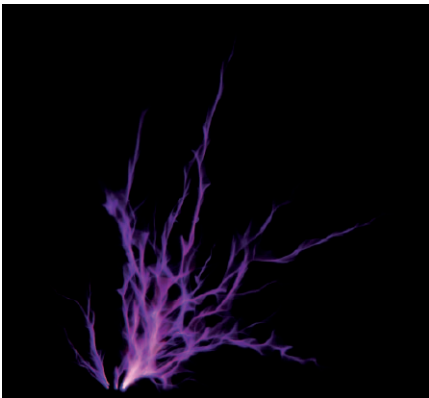
Teraz można połączyć płytkę półmostka z płytką układu sterującego, nie podając jeszcze zasilania mostka. Wówczas, przy włączonym zasilaniu układu sterującego na bramkach tranzystorów T2 i T3 powinny występować krótkie impulsy. Oczywiście napięcie na bramce tranzystora T2 należy mierzyć w odniesieniu do źródła tego tranzystora, a nie do masy układu.

Teraz należy połączyć dolną końcówkę rezonatora Tesli z uziemieniem w gniazdku (PE), ustawić potencjometrami przebieg o wypełnieniu około 50% i włączyć zasilanie płytki mostka, jednak koniecznie obniżone do wartości około 50 VAC.

Jeśli w gniazdku nie ma bolca uziemiającego (lub nie jest on połączony z przewodem PE, bo tak też się zdarza), można do uziemienia wykorzystać przewód zerowy. Podłączenie uziemienia ma na celu głównie utrzymanie uziemienia części rezonatora na niskim potencjale, żeby nie nastąpiło przebiecie między rezonatorem a pozostałą częścią układu. Wykorzystanie jako uziemienia kaloryfera albo piorunochronu nie jest dobrym pomysłem.



Fot. 5. Łuk elektryczny przewodzący prąd do zbliżonej końcówki przewodu



Fot. 6. Wyładowanie koronowe (niezupełne)



Fot. 7. Przykład innego wyładowania koronowego

W celu obniżenia napięcia można użyć zwykłego transformatora sieciowego, nie musi to być autotransformator regulacyjny. Antenę sterującą z układu sterującego można na czas uruchamiania przechylić nieco w kierunku rezonatora Tesli (na odległość około 5 cm), aby była pewność, że przy tak niskim napięciu zasilania sprzężenie będzie wystarczające.

Po podaniu zasilania do płytki mostka układ może już się wzbudzić i zacząć pracować, czego skutkiem będzie pojawienie się małego syczącego ulotu elektrycznego (wyładowania koronowego) na szczycie uzwojenia wtórnego transformatora Tesli. Jeśli tak się jednak nie stanie, to nie znaczy jeszcze, że w układzie jest błąd. Następną czynnością jest sprawdzenie napięcia zasilania półmostka oraz sprawdzenie, czy do uzwojenia pierwotnego docierają im-

pulsy prądu wynikające z impulsów napięcia pojawiających się na bramkach tranzystorów. Jeśli takie impulsy prądu do uzwojenia docierają, wygląda na to, że wszystko jest w porządku, a powodem tego, że układ nie pracuje, najprawdopodobniej jest zła faza sygnału sterującego. Aby sprzężenie zwrotne działało poprawnie, sygnał z anteny musi być odwrócony w fazie przed dotarciem do uzwojenia pierwotnego transformatora Tesli. W przeciwnym razie układ nie będzie się wzbudzał. W takim przypadku trzeba odwrócić fazę sygnału, a najłatwiej zrobić to zamieniając ze sobą końcówki uzwojenia pierwotnego transformatora Tesli, wyjścia driverów lub ewentualnie zmieniając liczbę negatorów w szeregu z parzystej na nieparzystą. Każdy z tych sposobów daje taki sam efekt. Po odwróceniu fazy sygnału transformator Tesli powinien zacząć pracować. Wówczas napięcie zasilające płytkę mostka można zwiększyć, pamiętając o zachowaniu bezpiecznej odległości od rezonatora Tesli.

Jeśli jednak urządzenie nie pracuje, trzeba przystąpić do żmudnego poszukiwania przy użyciu oscyloskopu. Metodą na sprawdzenie wszystkiego na sucho jest odłączenie uzwojenia L1 od układu i podłączeniu zamiast niego odpowiednio dużego rezystora lub niewielkiej (kilkadziesiąt W) żarówki 230 V. Wówczas, podając na wejście negatora U4A sygnał z zewnętrznego generatora, można dokładnie prześledzić pracę poszczególnych części układu. Sygnał ten powinien mieć wypełnienie równe 50% i częstotliwość rzędu 100 kHz.

Eksperymenty z wyładowaniami

Przedstawiona cewka Tesli może wytwarzać zarówno łuki elektryczne biegnące do przedmiotów przewodzących prąd (fot. 5), jak i wyładowania niezupełne rozchodzące się w powietrzu i niedocierające do żadnych obiektów (fot. 6 i fot. 7). Zależnie od ustawienia wypełnienia sygnału generowanego przez układ U3 uzyskać można wyładowania o różnym wyglądzie. Najdłuższe wyładowania, jakie udało mi się uzyskać, miały długość około 15 cm. **Prąd generowany przez opisaną cewkę Tesli, ze względu na niewielkie natężenie oraz wysoką częstotliwość, sam w sobie raczej nie jest niebezpieczny, natomiast bardzo nieprzyjemne mogą być poparzenia wywołane przez łuk elektryczny trafiający bezpośrednio w skórę. Łuk taki wypala w skórze dość głęboką zwęgloną dziurkę, która kiepsko się goi.** W przypadku gdy łuk przeskakuje na przedmiot metalowy trzymany w ręce, nie dzieje się nic złego, a prąd często nie jest nawet wyczuwalny.

Ciekawym zjawiskiem jest powstawanie wyładowania niezupełnego wychodzącego nie z cewki Tesli, a z uziemionego przedmiotu umieszczonego w jej pobliżu (najlepiej nad



Fot. 8. Wyładowanie przypominające ogniki św. Elma

uzwojeniem wtórnym – fot. 8). Zjawisko to przypomina tzw. ognie św. Elma. Ognie te są właśnie wyładowaniem niezupełnym powstającym na ostrych, wysoko umieszczonych elementach statku (szczyty masztów) wskutek silnego pola elektrycznego wywołanego chmurami burzowymi oraz braku jakichkolwiek innych obiektów o ostrych krawędziach na dużym obszarze.

Również ciekawe doświadczenia można wykonać, umieszczając różne przedmioty na drodze wyładowania. Używając wykałaczki lub zapalki jako elektrody emitującej wyładowania, można przekonać się, że przy wysokich napięciach drewno nie stanowi żadnej izolacji. Po chwili z końca zapalki zacznie wydostawać się wyładowanie niezupełne, a drewno szybko zwęgli się lub nawet zapali (fot. 9).

Zbliżając płaski plastikowy przedmiot (np. pudełko od płyty CD) do wyładowania wytwarzanego przez cewkę Tesli, można zaobserwować stopniowe „przyklejanie się” wyładowania do powierzchni plastiku i topienie go. Jest to zjawisko wyładowania powierzchniowego, mające ogromne znaczenie przy projektowaniu izolatorów stosowanych w liniach wysokiego napięcia.

Świetłówki, zarówno te kompaktowe, jak i klasyczne w postaci prostej szklanej rurki, zaświecają się samoczynnie przy zbliżeniu do cewki Tesli już w odległości 50...100 cm. Ciekawym i efektownym pokazem jest trzymanie w ręku świetłówki, która świeci jasnym światłem, mimo iż nie jest do niczego podłączona.

Karol Łuszcz
C4r0@o2.pl



Fot. 9. Zwęglenie i zapalenie się wykałaczki