

Wytwórnia piorunów

Generator wysokiego napięcia



Jak wskazuje tytuł projektu, chodzi o generator wysokiego napięcia. I nie jest to żaden primaaprilisowy chwyt - zadziwiająco prosty układ wytwarza impulsy o napięciu rzędu kilkudziesięciu kilowoltów, co umożliwia uzyskanie efektywnych wyładowań łukowych, czyli po prostu miniaturowych piorunów.

Ideę zaczerpnąłem z naszego czasopisma, z rubryki *Jak to robią inni* (EdW 2/2002 str. 34), gdzie była zamieszczona króciutka notka dotycząca prostego sposobu wytwarzania wysokiego napięcia. Szybko na stole powstał próbny model, gdzie między innymi zastosowałem generator impulsów, który niedawno powstał w ramach cyklu Ośła łączka.

Spektakularne wyniki eksperymentu oraz prostota układu spowodowały, że przedstawiam zbudowaną wytwórnice piorunów jako projekt główny tego numeru.

Projekt jest oznaczony trzema gwiazdkami tylko z uwagi na obecność wysokich napięć, a nie ze względu na stopień trudności montażu. Układ jest bardzo prosty i w wersji podstawowej nie wymaga żadnej regulacji – po zmontowaniu od razu pracuje poprawnie.

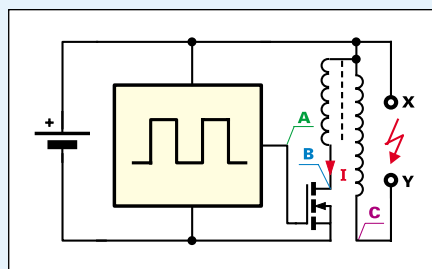
Ze względu na ryzyko porażenia i przykrego szoku, osoby niepełnoletnie i niedoświadczone mogą wykonać opisane eksperymenty wyłącznie pod opieką wykwalifikowanych opiekunów (nauczycieli). Nawet doświadczeni dorośli elektrycy nie powinni przeprowadzać żadnych prób w pojedynkę, a jedynie w obecności drugiej osoby, która w razie potrzeby odłączy zasilanie.

Choć długość błyskawic wytwarzanych w powietrzu nie przekracza kilku centymetrów, uzyskany efekt na pewno jest godny uwagi, o czym skutecznie przekonuje **fotografia na okładce**.

Opis układu

Do wytwarzania piorunów (wyładowań łukowych) służy samochodowa cewka wysokiego

napięcia. W układzie modelowym, pokazanym na fotografiach pracuje popularna krajowa cewka wysokiego napięcia o oznaczeniu BE200B produkcji ZELMOT, pochodząca z samochodowego szrotu. Rezystancja uzwojenia pierwotnego wynosi około $3,2\Omega$, wtórnego – około $7k\Omega$, a przekładnia około 1:40. Układ połączeń cewki i zasadę działania ilustruje **rysunek 1**. Uproszczone przebiegi pokazane są na **rysunku 2**. Zasada działania jest bardzo prosta. Dodatni impuls (przebieg A), podany na bramkę MOSFET-a otwiera go w pełni. Napięcie na drenie tranzystora jest praktycznie równe potencjałowi masy (przebieg B). Przez tranzystor i uzwojenie pierwotne cewki zaczyna płynąć prąd. Ze względu na indukcyjność cewki prąd narasta stopniowo (przebieg I). Podczas przepływu prądu w cewce gromadzi się energia.

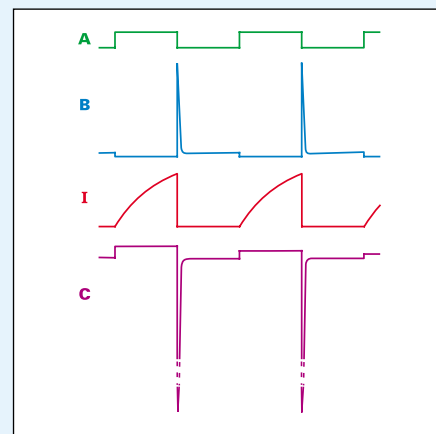


Rys. 1

Gdy tranzystor zostanie gwałtownie zatkany, prąd nie może już płynąć w dotychczasowym obwodzie. Cewka, jak wiadomo, „nie lubi zmian prądu”, więc gwałtowny zanik prądu powoduje powstanie napięcia samoindukcji, które niejako „próbuje” podtrzymać przepływ prądu (przebieg B). Na uzwojeniu pierwotnym powstaje impuls napięcia o wartości kilkuset woltów. Ponieważ uzwojenie wtórne ma kilkadziesiąt razy więcej zwojów, na wyjściu w tym samym czasie pojawia się impuls napięcia o wartości ponad 20kV

(przebieg C). Jeśli tylko elektrody wyjściowe X, Y są oddalone nie więcej niż 15...30mm (zależnie od napięcia zasilania i innych czynników), następuje przeskoczenie iskry w powietrzu i powstanie łuku. Jeśli elektrody są oddalone za bardzo, iskra nie przeskoczy, a energia zgromadzona w cewce zamieni się na ciepło w elementach układu.

Fotografia na okładce pokazuje wyładowania wewnątrz najzwyczajniejszej żarówki. Wewnątrz bańki żarówki znajduje się gaz pod niskim ciśnieniem, a w takich warunkach jonizacja i wyładowania powstają łatwiej.



Rys. 2

Najodważniejsi (a raczej niefrasobliwi i najmniej ostrożni) eksperymentatorzy pozwalają sobie wziąć bańkę żarówki w rękę i zbliżyć trzonek do przewodu wysokiego napięcia wychodzącego z cewki. Wyładowanie powstaje wtedy wewnątrz bańki, a jedną z elektrod jest... ręka. Prąd (trzeba przyznać o niewielkiej wartości średniej) zawsze musi płynąć w zamkniętym obwodzie, więc znajduje sobie jakąś drogę przez ciało człowieka i dalej gdzieś do masy i „zimnych” zacisków cewki. Oczywiście przepływ prądu przez

ciało powoduje nieprzyjemny efekt, a odczucie bólu zależy od kilku czynników, między innymi od odporności organizmu i drogi przepływu prądu.

Stanowczo odradzam takie eksperymenty!

Choć płynące prądy (mikrosekundowe impulsy o natężeniu do kilku amperów, powtarzane co kilka milisekund) mają niewielką wartość średnią, porażenie może się okazać wyjątkowo nieprzyjemne, a skutki - groźne dla życia.

Dlatego kolejny raz przestrzegam przed nonszalanckim podejściem do problemu. Podczas eksperymentów należy unikać dotykania jakichkolwiek części układu. I nigdy nie wolno przeprowadzać prób w pojedynkę. W pomieszczeniu zawsze musi się znajdować przeszkolona osoba, która wyłączy napięcie w razie nieszczęścia.

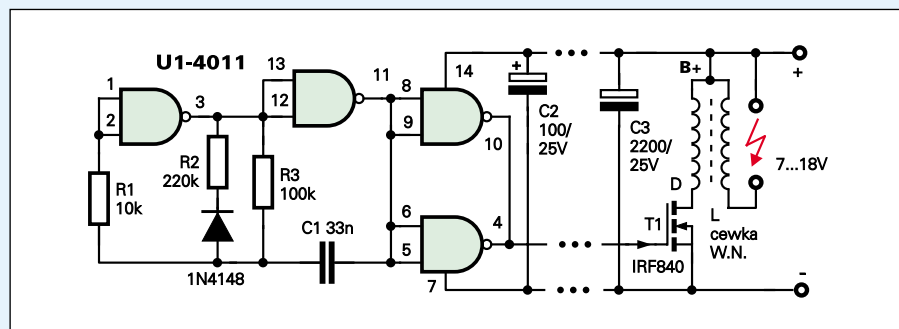
Trzeba też uważać na przyrządy pomiarowe. Jeśli to nie jest konieczne, nie należy mierzyć w pracującym układzie żadnych napięć czy prądów za pomocą miernika czy oscyloskopu. Przypadkowy przeskoczenie jednej małej iskierej może uszkodzić obwody wejściowe przyrządu.

Ja, co prawda, mierzyłem prawie wszystkie przebiegi oscyloskopem z odpowiednią sondą (z wyjątkiem impulsów wysokiego napięcia) i udało mi się niczego nie zepsuć. Niestety, wiem ze słyszenia, że niektórzy eksperymentatorzy „załatwili” sobie multymetry, których kable pomiarowe przypadkowo lub nieprzypadkowo znalazły się zbyt blisko obwodów wysokiego napięcia.

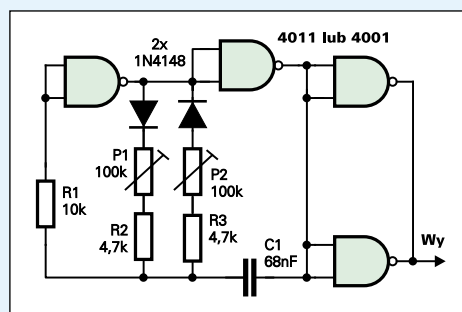
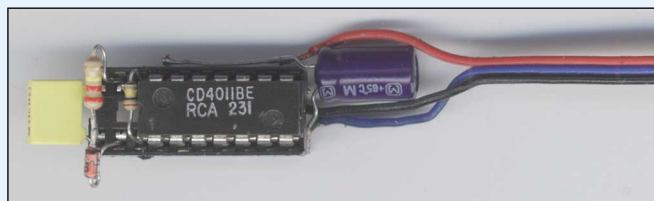
Kto chciałby zbudować i przetestować wytwornicę prywatnych piorunów, może wykorzystać prościutki układ według **rysunku 3**. **Fotografia** pokazuje taki model do wersji podstawowej, zmontowany na... podstawie 20-pinowej.

Kluczową sprawą jest w naszej przetwornicy maksymalny prąd cewki i nieodłącznie z tym związany czas impulsu (czas przewodzenia tranzystora T1), który nie powinien być dłuższy niż 6...7ms. Zapewniają to zastosowane elementy - czas impulsu wynosi tu około 3,5 milisekund, a czas przerwy około 1,8ms. Daje to okres około 5ms czyli częstotliwość powtarzania impulsów rzędu 200Hz.

Rys. 3



Na wszelki wypadek układ sterujący dobrze byłoby umieścić w odległości co najmniej kilku centymetrów od cewki i tranzystora, by nie narażać go na obecność bardzo silnych pól elektrycznych - dlatego modelowy sterownik jest połączony z tranzystorem za pomocą kawałka trzyżyłowej tasiemki.



Rys. 4

Obwód wytwarzania impulsów sterujących można też zmodyfikować według **rysunku 4**, co pozwoli sprawdzić działanie przy różnych czasach impulsu i przerwy. Rozdzielenie obwodów zasilania generatora impulsów (9...12V) i przetwornicy pozwoli odważniejszym eksperymentatorom przeprowadzić próby przy różnych napięciach zasilania cewki i różnych czasach impulsu i przerwy. Dodatkowy rezystor (0,1Ω) w obwodzie źródła tranzystora umożliwi obserwację i pomiar prądu ładującego cewki.

Montaż i uruchomienie

W układzie występują wysokie napięcia groźne dla życia i zdrowia. Podczas eksperymentów należy zachować daleko posuniętą ostrożność i nie dotykać żadnych elementów pracującego układu.

Osoby niepełnoletnie mogą przeprowadzić opisane eksperymenty wyłącznie pod opieką wykwalifikowanych opiekunów.

Prezentowane układy są na tyle proste, że można je zmontować „w pająku” albo na płycie uniwersalnej. Sam montaż nie jest trudny i nie powinien nikomu sprawić kłopotów.

Ze względu na straty mocy w tranzystorze T1, należy go wyposażyć w radiator. Będzie się on grzał zwłaszcza przy napięciach zasilania powyżej 12V.

Podczas moich wszystkich (niezbyt długich) eksperymentów przy napięciach zasilania do 24V wystarczył pokazany na fotografii wstępnej niewielki radiator, który się

wprawdzie mocno nagrzewał, ale nie dopuścił do uszkodzenia tranzystora.

Opisany układ, wytwarzający impulsy o wysokim napięciu i dużym prądzie, może być źródłem zakłóceń elektromagnetycznych (choć podczas prób nie stwierdziłem wpływu na odbiór RTV). Aby zminimalizować ich poziom, można podczas prób położyć układ na możliwie dużym kawałku blachy. Blacha powinna być połączona z masą układu oraz, o ile to możliwe, z uziemieniem.

Należy podkreślić, że podczas pracy układu silne impulsy występują nie tylko na wyjściu wysokonapięciowym cewki, ale także na drenie tranzystora. Przy tak dużych napięciach można niespodziewanie doznać wstrząsu wskutek przepływu prądu przez pojemności montażowe, np. przy dotykaniu kabla wysokiego napięcia, wychodzącego z cewki. Ze względów bezpieczeństwa nie należy więc przeprowadzać żadnych regulacji i zmian w układzie będącym pod napięciem.

W pierwotnym modelu, pokazanym na **fotografii wstępnej** wykorzystałem generator impulsowy, stworzony wcześniej na potrzeby cyklu *Ośła łączka*. Na marginesie warto potwierdzić, iż znakomicie zdał tu egzamin przy pierwszych próbach, pozwalając wygodnie regulować czas impulsu i przerwy. Obwód cewki i tranzystora T1 zasilany był napięciem 7...24V z regulowanego zasilacza o wydajności kilku amperów, natomiast generator impulsów - napięciem stabilizowanym 9V z innego, małego zasilacza.

Sprawdziłem działanie z tranzystorami MOSFET typu IRF840 oraz BUZ90A. IRF840 ma katalogowe dopuszczalne napięcie źródło-dren równe 500V, natomiast BUZ90A - 600V. Wyniki były praktycznie jednakowe, a maksymalna długość iskry w powietrzu przy zasilaniu cewki napięciem 12V±0,5V wynosiła około 2cm. Po zwiększeniu napięcia zasilania cewki do 24V wyładowanie stało się zdecydowanie silniejsze, a maksymalna długość łuku między końcem kabla wysokiego napięcia, a obudową lub zaciskiem B+ cewki wzrosła do 30mm (w powietrzu). Dłuższego łuku na drodze kabel

wysokiego napięcia – zacisk B+ cewki nie udało się uzyskać, ponieważ wyładowanie zaczęło powstawać między metalową obudową cewki, a wyjściem kabla (po powierzchni plastikowego izolatora).

Wyładowanie tworzy się w powietrzu, między metalowymi częściami i łatwo potwierdzić znaną z podręczników zasadę, że wyładowania „lubią” wszelkie ostre krawędzie, nierówności i kolce. Czasem jednak wyładowanie znajdowało lepszą drogę, niż przez powietrze. Kilkakrotnie łuk wypalił sobie ścieżkę przez papier, na którym leżały elektrody (co wcale nie dowodzi, że okładka „elektronicznego” miesięcznika, jakim jest EdW, jest przewodnikiem czy choćby półprzewodnikiem). Kiedy indziej przewodząca ścieżka powstawała na powierzchni arkusza meblowego laminatu, który też okazał się gorszym izolatorem, niż powietrze.

Jeśli między elektrodami utrzymywał się solidny łuk, to włożenie między nie kartki papieru lub tektury nie przerywało go, tylko powodowało szybki zapłon papieru.

Jak wspominałem, niesamowicie atrakcyjne efekty, zwłaszcza w ciemności, można uzyskać przy zastosowaniu najwykleszej żarówki. Aby uzyskać efekt jak na fotografii na okładce, koniec kabla wysokiego napięcia przylutowałem do stopki żarówki, a do zacisku B+ cewki dołączyłem kawałek srebrzanki ukształtowany w pierścień, obejmujący szklany balon żarówki na wysokości żarnika. Właśnie ten druczany pierścionek wokół balonu stworzył warunki do równomiernego rozłożenia łuku wewnątrz żarówki. Łuk powstaje wewnątrz bańki i nie przeszkadza temu szklany balon, będący skądinąd dobrym izolatorem.

Ja wykorzystałem zwykłą żarówkę 40W o średnicy bańki 60mm, bo taką akurat miałem pod ręką. Na pewno interesujące byłoby sprawdzenie efektu z żarówką o dużo większej średnicy.

Interesujące okazały się także eksperymenty ze świetłówkami. Wykorzystałem 30-centymetrową białą świetlówkę o mocy 8W i 15-cm ultrafioletową. Nie dołączałem elektrod do przeciwległych końców świetlówki – to byłoby zbyt oczywiste. Zacisk B+ cewki dołączony był do świetlówki z jednej strony, a kabel wysokiego napięcia nie był nigdzie połączony, tylko zbliżony do rury na środku jej długości. Jeszcze ciekawszy był fakt świecenia nigdzie nie podłączonej świetlówki, leżącej w pobliżu pracującego generatora wysokiego napięcia. Nie przeprowadzałem jedynie prób z popularnymi niegdyś klasycznymi świetłówkami (jarzeniówkami) o długości rury około metra.

Sprawdziłem natomiast, jak opisywana przetwornica pobudza do świecenia uszkodzoną energooszczędną żarówkę Philipsa, której stopka połączona była z zaciskiem B+, a kabel WN zbliżony był do balonu lampy.

Dla dociekliwych

Choć opisany prościutki układ pozwala uzyskać naprawdę interesujące efekty, na pewno część Czytelników chciałaby uzyskać wyniki jeszcze bardziej widowiskowe. Przed przystąpieniem do samodzielnych eksperymentów warto zapoznać się z dodatkowymi informacjami, mianowicie rozróżnić dwie podstawowe sprawy:

Po pierwsze zwiększenie maksymalnego napięcia wyjściowego, umożliwiające zapalenie dłuższej iskry.

Po drugie zgromadzenie w cewce jak największej energii, by kolejne wyładowania były jak najbardziej efektowne.

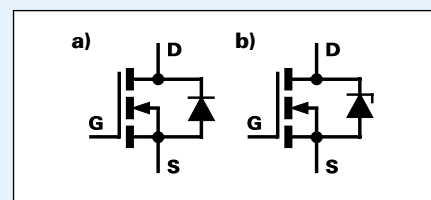
Zwiększanie napięcia. Maksymalna długość iskry wyznaczona jest przez maksymalne napięcie między punktami X, Y. Może jednak nie dla wszystkich jest jasne, że napięcie to nie jest wprost proporcjonalnie zależne od napięcia zasilającego układ. Nawet przy niewielkim napięciu zasilającym, przepięcie powstające na cewce w chwili wyłączenia tranzystora ma wartość rzędu kilkuset woltów. To przepięcie prawie nie zależy od napięcia zasilania, tylko od szybkości zmian (zaniku) prądu, a ta zależy głównie od wewnętrznych pojemności montażowych i innych szczegółów budowy cewki i obwodów współpracujących.

Jednym z ograniczeń są właściwości... tranzystora. Jak wiadomo, każdy MOSFET posiada pasyżnicze struktury, które zaznacza się na symbolu tranzystora jako diodę, włączoną między źródło i dren – patrz **rysunek 5a**. Nie wszyscy jednak wiedzą, że te pasyżnicze obwody zachowują się jak... dioda Zenera o napięciu nieco większym, niż katalogowe napięcie U_{DS} . Ilustruje to **rysunek 5b**. Oznacza to, że próba przekroczenia tego napięcia spowoduje przepływ prądu w obwodzie dren-źródło także wtedy, gdy tranzystor jest zatkany. Tym samym w praktyce nie da się przekroczyć katalogowego napięcia dren-źródło więcej niż o 10...15%. Warto dodać, że przepływ prądu przez wspomnianą pasyżniczą „diodę Zenera” nie uszkodzi tranzystora, o ile tylko energia impulsów nie będzie zbyt duża – informacje o dopuszczalnej energii takich impulsów podane są zawsze w katalogu (dla IRF840 pojedynczy impuls przebiecia lawinowego może mieć energię do 510mJ, powtarzalne – do 13mJ, przy czym pród przebiecia może sięgnąć do 8A).

Generalnie obecność w tranzystorze MOSFET takiej mało podatnej na uszkodzenia „diody Zenera” jest korzystna, jednak w tym przypadku, aby uzyskać jak najdłuższe wyładowanie, chcielibyśmy uzyskać na uzwojeniu pierwotnym cewki jak największe napięcie. Należy więc zastosować w układzie tranzystor o jak największym napięciu pracy.

Choć dostępne są MOSFET-y o katalogowym napięciu U_{DS} równym 1000V, próba ich wykorzystania może wymagać pewnych

zmian. Wadą ich jest nie tylko znacznie mniejsza popularność i trudności z zakupem. Czym wyższe napięcie dopuszczalne, tym większa rezystancja w stanie otwarcia. Przykładowo tranzystor BUZ51 o napięciu 1000V, umieszczony w obudowie TO-220 ma rezystancję R_{Dson} typowo 4 Ω , czyli większą, niż rezystancja uzwojenia pierwotnego cewki i może pracować przy prądzie drenu do 3,4A. Oczywiście oznacza to, że straty mocy w takim tranzystorze będą duże. Aby utrzymać je na sensownym poziomie należałoby zastosować tranzystor o znacznie większym prądzie. Taki tranzystor, na przykład BUZ312 o rezystancji R_{Dson} typowo 1,5 Ω , prądzie drenu do 6A, umieszczony w większej obudowie TO-218AA, na pewno będzie dużo droższy i znacznie trudniejszy do zdobycia.



Rys. 5

Nieco inaczej jest z tranzystorami bipolarnymi. Tu wprawdzie nie występuje żadna „dioda Zenera”, ale także i tu znaczne zwiększenie napięcia kolektor-emiter powyżej napięcia katalogowego spowoduje przepływ prądu przez złącze kolektorowe. Co gorsza, prąd ten może uszkodzić tranzystor. Różnica jednak są dość istotne. W MOSFET-ach „napięcie Zenera” jest z reguły tylko o kilka...kilkanaście procent większe od katalogowego napięcia U_{DSmax} ($U_{(BR)DSS}$). W tranzystorach bipolarnych „napięcie przebiecia” poszczególnych egzemplarzy może być co najmniej dwukrotnie większe, niż ich katalogowe napięcie U_{CE0} , zwłaszcza przy odpowiednim sterowaniu (zwieranie bazy do emitera przy zatykaniu).

Kto chce, może przeprowadzić próby, na przykład w układzie według **rysunku 6** z popularnym tranzystorem bipolarnym BU508A o napięciu katalogowym U_{CE0} 700V i U_{CB0} 1500V albo z innymi tranzystorami, przeznaczonymi specjalnie do samochodowych układów zapłonowych. Ze względu na małe wzmocnienie tranzystorów wysokonapięciowych (w skrajnym przypadku <10), konieczne jest dodanie stopnia sterującego, zapewniającego odpowiednio duży prąd bazy T1. Prąd bazy wyznaczony jest przez rezystor R4. Wartość tego rezystora trzeba dobrać do wzmocnienia tranzystora T1, by zapewnić jego nasycenie. Ze względu na znaczną wartość prądu, zasilacz sterownika powinien mieć odpowiednio dużą wydajność, w skrajnym przypadku 1A. Ponieważ kluczowe znaczenie ma też szybkość

wyłączania, trzeba zastosować „dolny” tranzystor T3, a dla jego szybszego i pewniejszego wyłączenia T1, także diodę D3 i rezystor polaryzujący R5.

Gdyby w roli T1 pracował wysokonapięciowy „darlington”, D3, R5 nie są potrzebne, a wartość R4 może być znacznie większa.

Jeszcze lepszym rozwiązaniem byłoby wykorzystanie tranzystora IGBT o napięciu pracy 1200V. Tranzystory IGBT, będące jakby połączeniem MOSFET-a i tranzystora bipolarnego, z zasady mogą pracować przy wysokich napięciach 600V...1200V, zależnie od typu. Niestety, tranzystory IGBT są zdecydowanie mało popularne i trudniejsze do zdobycia.

Teoretycznie można się spodziewać, że łatwo dostępne tranzystory, np. serii BU508 o napięciu U_{CE0} równym 700V pozwolą uzyskać napięcie na kolektorze ponad 1000V, a tym samym impulsy wyjściowe o amplitudzie rzędu 40kV.

Teoretycznie!

Trzeba mieć świadomość, że przebiegi z rysunku 2 są bardzo uproszczone i nie pokazują wszystkich ważnych szczegółów, a tylko podstawową zasadę działania. Ze względu na obecność pojemności montażowych, pojemności uzwojeń cewki i innych zjawisk, w układzie występują przebiegi prądów i napięć o charakterze rezonansowym. Omówienie tych przebiegów, odmiennych w różnych warunkach pracy (w obecności i przy braku wyładowania) zdecydowanie wykracza poza ramy artykułu.

Jeśli ktoś ma sondę oscyloskopową 1:10 lub lepiej 1:100 o odpowiednio dużym dopuszczalnym napięciu pracy, może zmierzyć przebiegi napięcia na drenie (kolektorze) tranzystora T1. Prąd można mierzyć dodając mały rezystor, np. 0,1Ω, w obwodzie źródła (emitera) tranzystora. Dociekliwi eksperymenciści, gotowi zaryzykować uszkodzenie tranzystora, zapewne będą chcieli sprawdzić, jak zmienia przebiegi i parametry układu dołączenie rów-

noległe do cewki dodatkowego kondensatora o napięciu nominalnym 630V lub 1000V (pozwąwszy od pojemności 1nF do nawet 100nF).

Uzyskanie wyższego napięcia może się jednak okazać niemożliwe, choćby ze względu na przebicie na drodze między obudową cewki, a wyjściem kabla wysokiego napięcia. Okazuje się także, że oprócz wysokości napięcia, w praktyce ogromne znaczenie ma ilość energii zgromadzona w cewce podczas przewodzenia tranzystora oraz częstotliwość powtarzania impulsów. Dlatego zamiast poświęcić całą uwagę zwiększeniu napięcia na tranzystorze i na pierwotnym uzwojeniu cewki, należy raczej podjąć kroki pozwalające zwiększyć energię wyładowania.

Zwiększanie energii. Energia zgromadzona w cewce wyznaczona jest przez szczytową wartość prądu, płynącego przez nią (tuż przed wyłączeniem tranzystora).

Wydawałoby się, że idealnym sposobem zwiększania energii jest zwiększanie czasu przewodzenia tranzystora. Owszem, jest to jakiś sposób, jednak trzeba pamiętać o ograniczeniach. Głównym ograniczeniem jest tu rezystancja cewki, wynosząca zwykle ponad 3Ω. Do tego dochodzi rezystancja otwartego tranzystora MOSFET, która dla tranzystorów IRF840, BUZ 90 wynosi prawie 1Ω. Rezystancje te powodują, że prąd nie wzrasta liniowo, tylko według krzywej wykładniczej. **Rysunek 7** pokazuje, że dwukrotne zwiększenie czasu przewodzenia tranzystora tylko w niewielkim stopniu zwiększy szczytową wartość prądu. Nadmierne przedłużenie czasu praktycznie nic nie poprawi, natomiast bardzo wzrosną straty mocy (powodujące grzanie cewki).

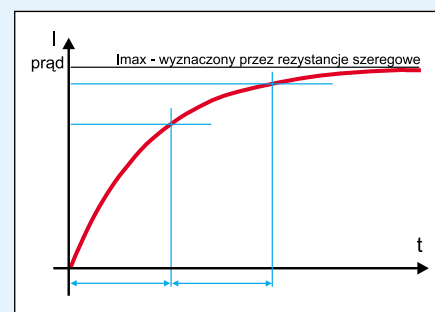
Co najważniejsze, i najgorsze, rezystancje te uniemożliwią uzyskanie dużej wartości prądu – prąd maksymalny I_{max} zgodnie z prawem Ohma zależy od napięcia i rezystancji cewki i tranzystora. Ten prąd maksymalny I_{max} wynosi przy napięciu zasilania 12V około 3A, a tym samym roboczy prąd szczytowy będzie rzędu 2A, co oczywiście ogranicza wielkość porcji energii zgromadzonej w cewce.

Zamiast zwiększać czas przewodzenia tranzystora, należy **zwiększyć napięcie zasilające**. Większe napięcie spowoduje szybsze narastanie prądu zgodnie ze znanym wzorem na szybkość narastania prądu:

$$I/t = U/L$$

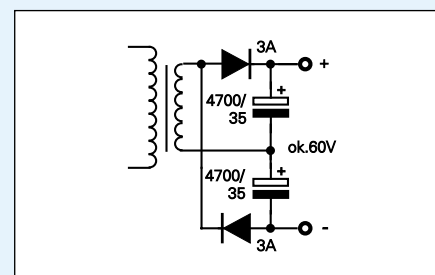
Wtedy w tym samym czasie przewodzenia tranzystora prąd osiągnie większą wartość i w cewce zgromadzi się znacznie więcej energii. Ja przeprowadzałem próby z napięciem zasilania 6VDC do 24VDC i tranzystor IRF840 z powodzeniem przetrzymał takie katusze.

Odważni eksperymenciści mogą jeszcze bardziej zwiększyć napięcie zasilania, na przykład stosując układ według **rysunku 8**. Z transformatora o napięciu zmiennym 24V uzyskuje się tu napięcie zasilające ponad 60V. Większe napięcie powoduje szybszy wzrost prądu. IRF840 ma rezystancję R_{D-Son} do 0,85 i może pracować przy ciągłym prądzie drenu 8A przy temperaturze obudowy +25°C i 5,1A przy temperaturze obudowy +100°C. Maksymalny prąd impulsowy może wprawdzie wynosić 32A, jednak nie można



Rys. 7

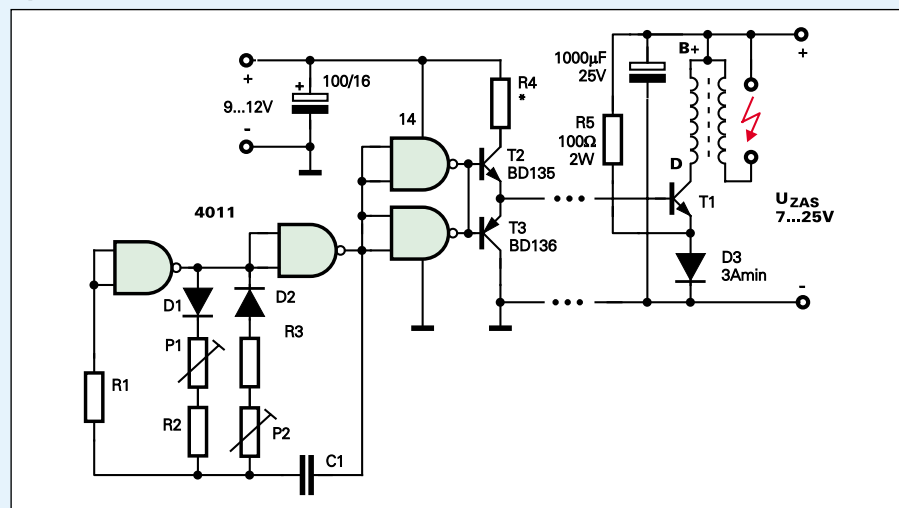
Rys. 8



Wykaz elementów układu z rysunku 3:

R1	.....	10kΩ
R2	.....	220kΩ
R3	.....	100kΩ
C1	.....	33nF MKT
C2	.....	100μF/25V
C3	.....	2200μF/25V (1000...4700μF)
T1	.....	.IRF840, BUZ90, BUZ91
U1	.....	.CMOS 4011 lub 4001
L	.....	.samochodowa cewka zapłonowa, np. BE200B ZELMOT

Rys. 6



przekroczyć dopuszczalnej temperatury struktury równej $+150^{\circ}\text{C}$. Prąd teoretycznie mógłby wzrosnąć do wartości ponad 10A w impulsie, co w pewnych wypadkach byłoby ryzykowne dla tranzystora kluczującego.

Aby zmniejszyć ryzyko przegrzania tranzystora przy napięciu zasilania dużo wyższym niż 12V można zmniejszyć czas przewodzenia tranzystora.

Ponieważ w ten sposób uda się szybciej zgromadzić w cewce potrzebną porcję energii, można zwiększyć częstotliwość impulsów, co

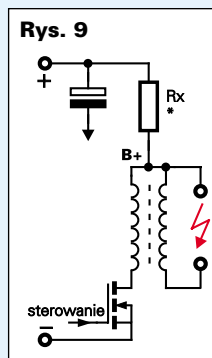
dotąd dodatkowo wzmacni siłę wyładowania. Umożliwi to wytworzenie ciągłego łuku. Oczywiście trzeba się liczyć, że praca przy napięciach i prądach dużo wyższych, niż w typowych warunkach „samochodowych”, może spowodować uszkodzenie tranzystora kluczującego.

Aby przy dużym napięciu zasilania zmniejszyć takie ryzyko, obok skrócenia czasu impulsu, warto też dodać w szereg z cewką rezystor(y) o odpowiedniej mocy, ograniczający prąd według **rysunku 9**. Można przypomnieć, iż taka dodatkowa rezystancja...

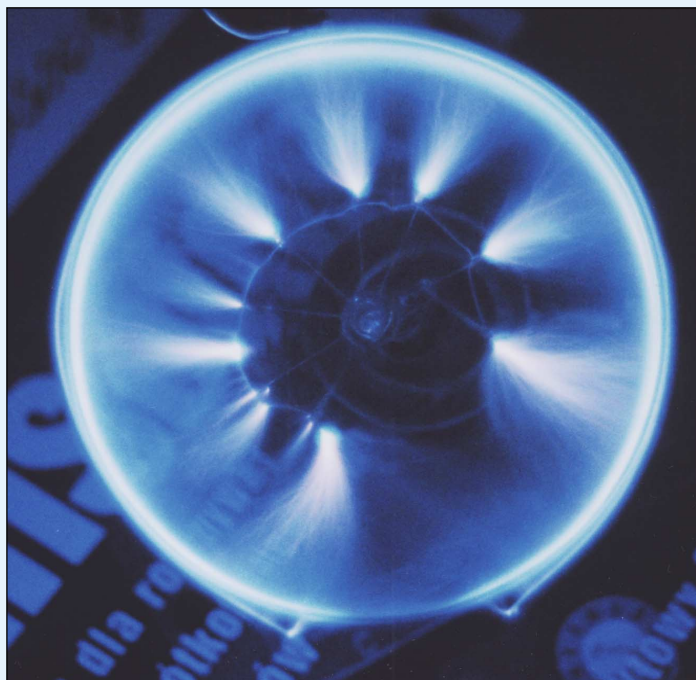
zmniejszy stałą czasową obwodu ładowania ($\tau=L/R$), ale nie to jest ważne. Istotne jest, że

wartość Rx wyznacza maksymalny prąd, a tym samym maksymalną energię. W praktyce wartość Rx będzie rzędu pojedynczych omów, a obciążalność – kilka watów.

Mając na względzie podane informacje, dociekliwi i pomysłowi Czytelnicy zapewne osiągną efekty jeszcze bardziej widowiskowe, niż opisane w artykule.



Piotr Górecki



Konkurs

PIORUN

Ponieważ wielu Czytelników zechce przeprowadzić podobne doświadczenia w szkole lub w domu, ogłaszamy konkurs. Zadaniem konkursowym jest:

wykonanie fotografii wyładowań „własnej produkcji”

Do fotografii powinny być dołączone: schemat ideowy wykorzystanego układu z podaniem sposobu zasilania,

ewentualny dodatkowy rysunek pokazujący warunki eksperymentu oraz kilka zdań zwięzłego opisu eksperymentu i uzyskanych wyników.

Uwaga! Ze względu na ryzyko porażenia, obowiązkowo należy też podać swój wiek (rok urodzenia). Osoby niepełnoletnie muszą dodatkowo nadesłać pisemne oświadczenie rodziców lub nauczyciela, którzy poświadczą, że eksperymenty z wytwarzaniem wysokich

napięć były wykonywane pod ich osobistym nadzorem.

Prace należy nadsyłać w terminie do 30 czerwca 2002 roku. Na kopercie należy dopisać PIORUN. Nagrodami będą atrakcyjne podzespoły elektroniczne. Dodatkowo najbardziej interesujące eksperymenty mogą być opisane w Forum Czytelników, a Autorzy otrzymują honoraria.