

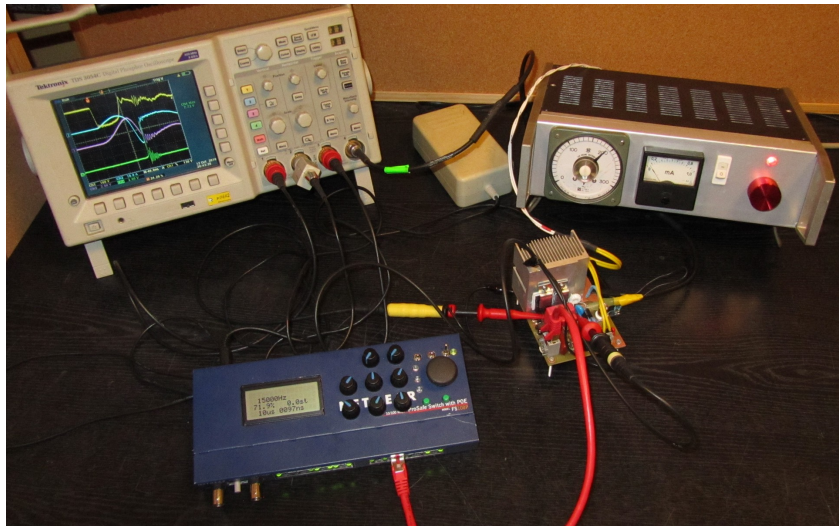
GENERATOR NANOSEKUNDOWYCH IMPULSÓW O DUŻEJ MOCY

07.2016

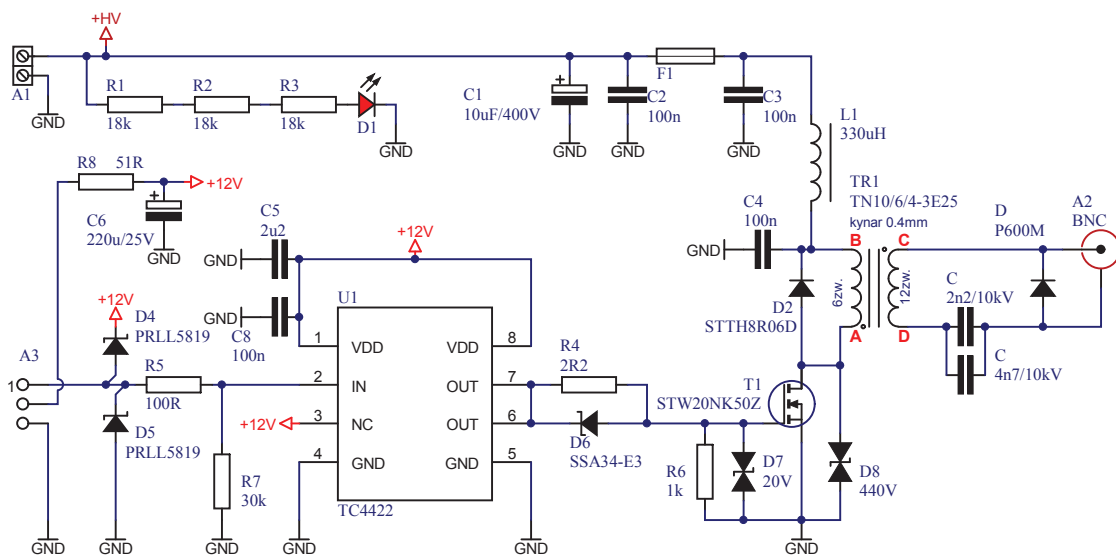
Opis układu

Podczas prac nad darmową energią zaistniała potrzeba zbudowania generatora krótkich impulsów o dużej energii. Prezentowany układ wytwarza impulsy o szerokości $\leq 3ns$ i amplitudzie $\leq 2kV$ przy obciążeniu impedancją 50Ω . Układ wykorzystuje diodę DSR (*ang. Drift Step Recovery Diode*) i transformator z nasycalnym rdzeniem.

Na rysunku 1 pokazano prototyp układu podczas pomiarów, a na rysunku 2 jego schemat ideowy.

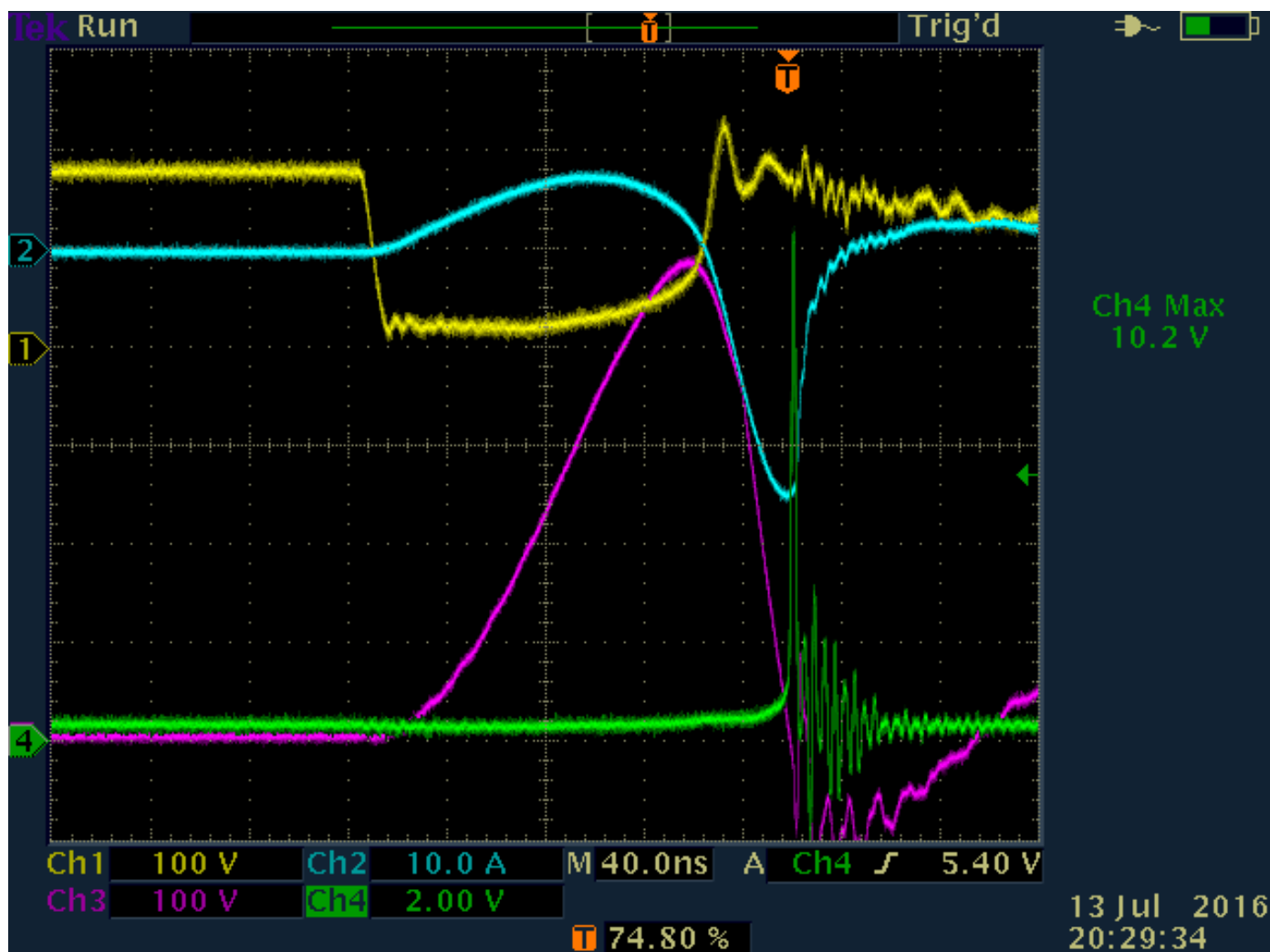


Rysunek 1: Prototyp generatora podczas pomiarów.



Rysunek 2: Schemat układu.

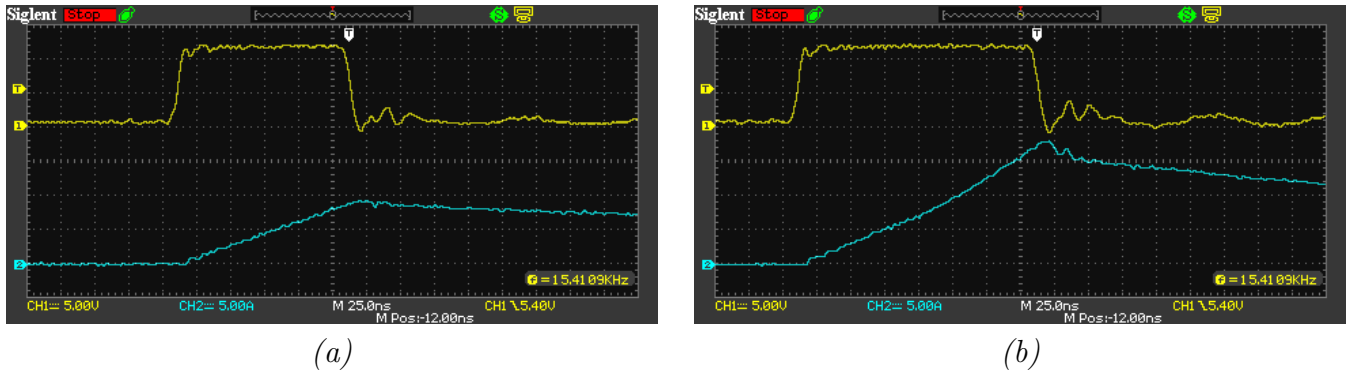
Na rysunku 3 zobrazowano przebiegi podczas generowania impulsu. Sygnał żółty to napięcie na drenie tranzystora T1, niebieski to prąd wykonawczej diody D (DSR), fioletowy to napięcie na kondensatorze szeregowym C, a zielony to generowany impuls mierzony szybką sondą wysokonapięciową 1:250 (wejście oscyloskopu bez dodatkowego podziału).



Rysunek 3: Przebiegi w układzie.

Działanie układu zostało opisane w radzieckiej publikacji Belkina i Szulżenki [1] i na jej podstawie zbudowano opisywany generator.

Na wejście układu należy podać krótki impuls otwierający tranzystor T1. W obwodzie wtórnym TR1, C i D zaczyna wtedy płynąć prąd w kierunku przewodzenia diody D. Prąd ten jest sinusoidalny (niebieski przebieg) o okresie określonym w głównej mierze przez wartość indukcyjności TR1 i pojemność C. Ten sam prąd ładuje również kondensator C i co bardzo ważne, wstrzykuje ładunki do złącza p-n diody D. W tym czasie przez tranzystor T1 i uzwojenie pierwotne transformatora płynie rosnący liniowo prąd (podobnie jak w przetwornicy podwyższającej). Rdzeń i uzwojenia transformatora należy tak dobrać, aby nasycił się on w momencie maksymalnego napięcia na kondensatorze (różowy przebieg). Moment ten jest równoważny z półokresem prądu obwodu wtórnego. Wybierając rdzeń i nawijając uzwojenia można wykonać prosty test. Przy zwartym uzwojeniu wtórnym (aby prąd rezonansowy nie wpływał na pomiar) należy mierzyć prąd uzwojenia pierwotnego. Zaczynając od krótkich impulsów (np. 30ns) obserwujemy prąd uzwojenia. Gdy zaczyna zaginać się do góry oznacza to nasycanie rdzenia (patrz rys. 4). Dla opisywanego układu nasycanie zaczyna się przy impulsie bramkowym ok. 160ns, co oznacza, że dla tak wykonanego transformatora, półokres prądu obwodu wtórnego powinien mieścić się właśnie w tym czasie.



Rysunek 4: Krótkie otwarcie tranzystora nie nasycy rdzenia (a) natomiast impuls dłuższy (170ns) już powoduje nasycenie (b). Oba pomiary przy zwartym uzwojeniu wtórnym. Żółte przebiegi na napięcie na bramce T1, a niebieskie to prąd uzwojenia pierwotnego.

Gdy prąd zaczyna płynąć w kierunku przeciwnym (a zacznie, zgodnie z prawami rządzącymi obwodem rezonansowym), kondensator zaczyna być rozładowywany. Nasycenie rdzenia w tym właśnie momencie jest bardzo ważne, gdyż znacząco zmniejsza impedancję uzwojeń (w tym przypadku istotne jest już tylko uzwojenie wtórne) oraz separuje magnetycznie oba uzwojenia. Dzięki temu, prąd w kierunku przeciwnym osiąga dużo większą wartość niż w pierwszym półokresie a jego częstotliwość rośnie.

Równocześnie ładunek przestrzenny wstrzyknięty poprzednio w złącze diody D jest odbierany z powrotem. Ponieważ dioda jest bardzo wolna (dla P600M $t_{rr} = 2.5\mu s$) w tym czasie ciągle jest jeszcze spolaryzowana w kierunku przewodzenia i dla płynącego rezonansowego prądu wciąż przedstawia niską impedancję.

Całkowite odebranie ładunku skutkuje nagłym przerwaniem obwodu rezonansowego. Jest to właśnie zjawisko zachodzące w diodzie DSR (*ang. Drift Step Recovery Diode*). Złącze półprzewodnikowe diody działa w tym momencie jak przełącznik kontrolowany ładunkiem. Transformator powinien być tak skonstruowany, aby przerwanie obwodu nastąpiło w momencie maksymalnego prądu rozładowującego. Im większa wartość prądu jest nagle przerywana, tym wyższe napięcie impulsu zostaje wygenerowane.

Tranzystor T1 można już wyłączyć, gdyż nasycony rdzeń nie jest już potrzebny. Tak naprawdę wyłączyć można go już po przejściu prądu wtórnego przez 0, gdyż wyjście z nasycenia trwa trochę czasu.

Dobór elementów

Rdzeń transformatora musi być niedużych rozmiarów, aby łatwo się nasycał. Powinien też mieć dużą przenikalność, aby mała ilość zwojów wystarczyła do przeniesienia energii. Po nasyceniu rdzenia mała ilość zwojów skutkuje niską impedancją obwodu wtórnego, co z kolei pozwala na przepływ dużego prądu w drugim półokresie. Uzwojenia transformatora należy tak dobrać, aby nasycił się on w momencie maksymalnego napięcia na kondensatorze C. W opisywanym urządzeniu zastosowano rdzeń TN10/6/4-3E25 (prod. Ferroxcube). Uzwojenia nawijano kynarem 0.4mm w stosunku 6:12 (odpowiednio pierwotne i wtórne). Nawijać należy równomiernie na całym obwodzie rdzenia. Warto zwrócić uwagę na prawidłowe połączenie wyprowadzeń transformatora (w publikacji [1] jest błąd na rysunku 22).

Diodę D należy dobrać eksperymentalnie. W układzie dobrze sprawdzają się wolne diody prostownicze o dużej powierzchni złącza p-n i wysokim napięciu wstecznym. Czas t_{rr} musi być znacząco dłuższy od całego cyklu formowania impulsu, aby złącze p-n nie zdążyło się spolaryzować w kierunku zaporowym podczas przepływu prądu rozładowującego. Przetestowano niektóre z radzieckich diod opisywanych w oryginalnej publikacji [1]. Dobrana dioda P600M dawała w badanym układzie impulsy o większym napięciu i bardziej stromych zboczach niż owe diody produkcji ZSRR.

Pojemność kondensatora C wpływa na stałą czasową i energię obwodu rezonansowego. Dobrano kondensator ceramiczny 2n2/10kV równolegle z 4n7/10kV, czyli razem 6n9.

Dioda D2 tłumi przebiegi na drenie T1. Dobrano szybką diodę STTH8R06D.

Tranzystor T1 to MOSFET o $V_{DS} \geq 400V$. Mała pojemność bramki pomaga przetransmitować krótki impuls bramkowy. W prezentowanym układzie pracuje MOSFET STW20NK50Z. Testowano też układ z tranzystorem wykonanym z węgliku krzemu (SiC) C3M0120090D. Układ rzeczywiście sprawniej przełączał i miał mniejsze straty, ale jako że nie sprawność jest tutaj celem, w układzie pozostał tani STW20NK50Z.

Transil D8 dodatkowo zabezpiecza tranzystor T1. Dobrano 1.5KE440CA o napięciu zadziałania niewiele niższym od dopuszczalnego napięcia V_{DS} T1.

Obwód bramkowy klasyczny. Powinien umożliwić przepływ prądu bramki $I_G > 4A$. Wyłączanie tranzystora warto przyspieszyć (dioda D6). Zastosowany driver TC4422 rozładowuje bramkę prądem 10A. Jego zasilanie należy zablokować szybkimi kondensatorami ceramicznymi $> 1\mu F$.

Kondensator C4 powinien być szybki. Zastosowano kondensator polipropylenowy FKP1G031005H00JSSD.

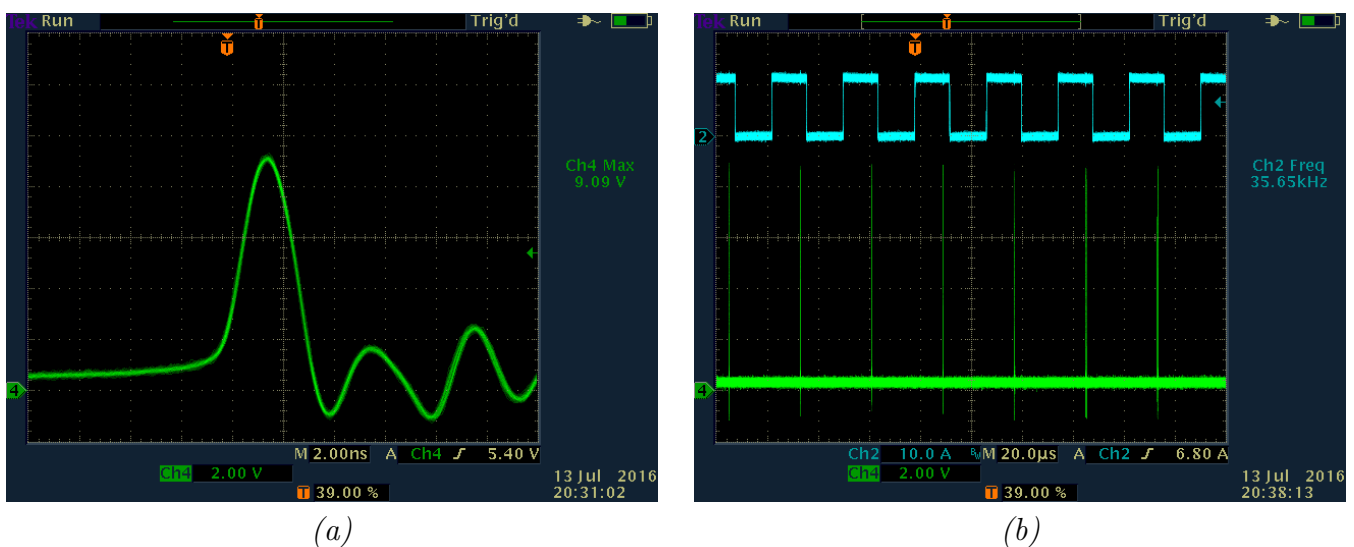
Wszystkie połączenia w układzie powinny być krótkie, gdyż jest to układ wysokoczęstotliwościowy.

Pozostałe elementy ze schematu 2 nie są kluczowe dla działania układu.

Osiągane parametry

Na rysunku 5a pokazano uzyskiwany impuls przy podstawie czasu 2ns/działkę. Impulsy mierzone samodzielnie wykonaną, szybką sondą wysokonapięciową z podziałem 1:250. Tak więc 9V impulsu widocznego na oscyloskopie oznacza napięcie 2.25kV. Oscylacje widoczne po impulsie wynikają z niewielkiego niedopasowania impedancyjnego w konstrukcji sondy. Zbocza impulsu osiągają czasy poniżej 2ns. Pomiary wykonywano szybkim oscyloskopem Tektronix TDS3054C (500MHz, 5GS/s). Szczytowa moc na obciążeniu 50Ω osiąga $100kW$ zgodnie z zależnością $P = \frac{V^2}{R}$.

Układ zasilany z napięcia 200VDC pracuje poprawnie do około 50kHz częstotliwości powtarzania impulsów. Przy obciążeniu 50Ω i napięciu zasilania 200VDC pobór prądu wynosi $90mA@16kHz$ i $215mA@36kHz$. Na rysunku 5b pokazano generowane impulsy z częstotliwością 36kHz (przebieg niebieski dla wyzwalania oscyloskopu).



Rysunek 5: Uzyskiwany impuls wysokiego napięcia mierzony sondą 1:250 (a) i impulsy WN powtarzane z częstotliwością 35kHz (b).

Literatura

[1] V.S. Belkin, G.I. Szulżenko,

**ФОРМИРОВАТЕЛИ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ И ПИКОСЕКУНДНЫХ
ИМПУЛЬСОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ**

[2] V. Prokhorenko,

AN IMPULSE GENERATOR FOR THE GROUND PENETRATING RADAR