

TRANSFORMATOR TESLI ZE STEROWANYM KOMPUTEROWO ENERGOELEKTRONICZNYM BLOKIEM ZASILANIA

Paweł ZYDRON¹, Damian PALA

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

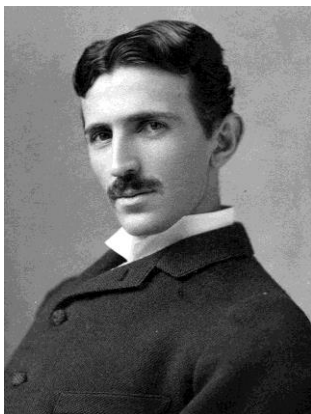
tel: 12 617 28 35 fax: 12 634 48 25 e-mail: pawel.zydron@agh.edu.pl

Streszczenie: Transformator Tesli jest urządzeniem, które pozwala wytwarzać napięcia o bardzo dużej wartości, mające kształt przebiegów oscylacyjnych o krótkim czasie trwania. W artykule opisano projekt takiego transformatora, z układem zasilania zbudowanym w oparciu o tranzystory mocy *IGBT*. Dzięki temu możliwe jest kontrolowanie przez komputer podstawowych parametrów czasowych sekwencji wyładowań, wytwarzanych na elektrodzie wysokonapięciowej uzwojenia wtórnego.

Słowa kluczowe: transformator (cewka) Tesli, układ energoelektroniczny, sterownik mikroprocesorowy.

1. WPROWADZENIE

W 1891 roku Nikola Tesla¹ (rys. 1), jeden z najbardziej znanych konstruktorów i wynalazców w historii, przedstawił projekt specjalnego transformatora na rdzeniu powietrznym, w którym dzięki wykorzystaniu zjawiska rezonansu możliwym było uzyskiwanie napięć o bardzo dużych wartościach. W rozwiązaniu tym, uznawanym obecnie za klasyczne, obwód pierwotny jest zasilany impulsowo ze źródła o dużej mocy, przy czym energia jest dostarczana do układu rezonansowego przy zastosowaniu obwodu zawierającego iskiernik.



Rys. 1. Nikola Tesla, zdjęcie z roku ok. 1890 [1]

¹ Nikola Tesla (1856-1943) – z pochodzenia Serb, od 1884 roku mieszkający i pracujący w Stanach Zjednoczonych, utalentowany wynalazca, inżynier elektryk i mechanik, wizjoner współczesnej techniki; najbardziej znany ze względu na swój znaczący wkład w rozwój systemu wytwarzania i dostawy energii elektrycznej z zastosowaniem prądu przemiennego [1, 2]

Artykuł przedstawia inne rozwiązanie konstrukcyjne, w którym obwód zasilania uzwojenia pierwotnego transformatora zawiera energoelektroniczny układ kluczujący, zbudowany w oparciu o półprzewodnikowe łączniki mocy – tranzystory *IGBT*. W efekcie pozwala to na:

- 1) optymalizację pracy układu zasilania transformatora,
- 2) uzyskanie kontroli nad wytwarzaniem wysokoczęstotliwościowych impulsów wysokiego napięcia,
- 3) stosowanie programowo sterowanych sekwencji impulsów, wyzwalających powstawanie wyładowań elektrycznych.

Przy odpowiednim, sterowanym przez komputer (lub specjalny, dedykowany do urządzenia układ mikroprocesorowy) nadzorowaniu pracy transformatora uzyskiwane są wyładowania elektryczne o określonym czasie trwania i zmiennej częstotliwości powtarzania. Efektem tego jest możliwość odtwarzania przez w ten sposób zasilany transformator Tesli dźwięków o różnym tonie i natężeniu. Każde wyładowanie elektryczne rozwijające się w powietrzu od elektrody wysokonapięciowej transformatora jest związane z powstaniem kanału zjonizowanego gazu. Znaczny wzrost temperatury i ciśnienia w kanale wyładowania są źródłem fali akustycznej, której podstawowe parametry zależą od sekwencji generowanych wyładowań. Dzięki temu możliwe jest odtwarzanie pojedynczych dźwięków o różnym tonie i głośności oraz składanych z nich melodii, także o większym stopniu złożoności.

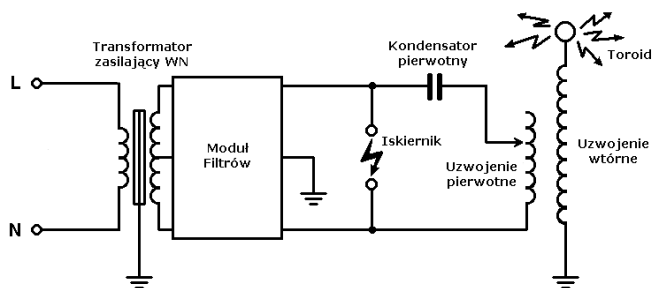
Podstawowymi problemami, pomyślnie rozwiązanymi podczas realizacji opisywanego projektu, było:

- 1) odpowiednie zaprojektowanie i wykonanie 3-fazowego bloku zasilania wraz z układem energoelektronicznych łączników mocy, tworzących efektywny energetycznie modulator sekwencji impulsów, zasilających uzwojenie pierwotne transformatora;
- 2) zaprogramowanie sekwencji sterujących wytwarzanych przez sterownik mikroprocesorowy, które dla optymalnej pracy transformatora muszą uwzględniać charakterystyki i właściwości rezonansowe jego obwodów;
- 3) zapewnienie bezpieczeństwa osobom obsługującym urządzenie poprzez izolację łączem światłowodowym pomiędzy sterownikiem a modulatorem.

Obecnie, transformator Tesli opisany w artykule („grający” transformator) stanowi wyposażenie jednego ze stanowisk Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH w Krakowie.

2. KLASYCZNE ROZWIĄZANIE KONSTRUKCJI TRANSFORMATORA TESLI

Transformator Tesli w koncepcji zaproponowanej przez pierwszego konstruktora składa się z dwóch obwodów rezonansowych, pierwotnego i wtórnego, strojonych do tej samej częstotliwości. Obwód pierwotny, składający się z kondensatora, uzwojenia pierwotnego i iskiernika, zasilany jest ze źródła wysokiego napięcia stałego – zwykle o wartości do kilkunastu kV (rys. 2). Wtórny obwód rezonansowy składa się z uzwojenia mającego ponad tysiąc zwojów cienkiego drutu emaliowanego oraz elektrody wysokonapięciowej, najczęściej toroidalnej, stanowiącej jedną z okładek otwartego kondensatora. Drugą jego elektrodą jest powierzchnia podstawy wraz z wszystkimi uziemionymi elementami otoczenia.



Rys. 2. Schemat klasycznej konstrukcji transformatora Tesli

Po włączeniu zasilania następuje ładowanie kondensatora po stronie pierwotnej, aż do osiągnięcia wartości napięcia przeskoku na iskierniku, co powoduje pobudzenie oscylacji w obwodzie rezonansowym LC . Jeśli częstotliwość rezonansowa obwodu wtórnego jest zbliżona do częstotliwości obwodu pierwotnego, wówczas następuje wydajny przekaz energii pomiędzy tymi obwodami, a napięcie na toroidalnej elektrodzie osiąga wartości wielokrotnie większe od wartości napięć po stronie pierwotnej. Skutkuje to pojawieniem się efektywnych wyładowań elektrycznych, osiągających znaczne długości.

W rozwiązaniu klasycznym najwięcej problemów sprawiają:

- iskiernik obwodu pierwotnego,
- strojenie obwodów rezonansowych transformatora.

Iskiernik ulega zwykle szybkiemu zużyciu, ponieważ podczas wyładowania elektrycznego przepływa przez niego bardzo duży prąd impulsowy, wywołujący przyspieszoną degradację termiczną powierzchni elektrod. W praktyce, dla minimalizacji tego efektu, stosuje się iskierniki sekcjonowane (wielostopniowe) lub chłodzone. Wyładowania elektryczne na iskierniku są źródłem strat energii, które znacząco obniżają wydajność całego układu klasycznego transformatora Tesli. Rozwiązaniem tego problemu jest zastąpienie iskiernika półprzewodnikowymi łącznikami silnoprądowymi, np. tranzystorami typu *MOSFET* lub *IGBT*. Ponadto, dla generacji wyładowania na iskierniku konieczne jest stosowanie wystarczająco wysokich napięć, co wymaga użycia dość drogich elementów: transformatora i kondensatorów wysokonapięciowych. Zastosowanie elementów niskonapięciowych pozwala znacząco obniżyć koszty, a ponadto skutkuje możliwością zasilania transformatora Tesli ze źródła napięcia sieciowego 230/400V i sterowania go z zewnętrznego sterownika.

3. WSPÓŁCZESNE KONSTRUKCJE TRANSFORMATORA TESLI

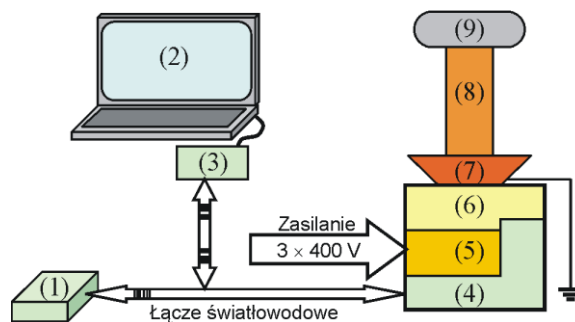
Obecnie stosowanych jest kilka rozwiązań transformatora Tesli, wśród nich najbardziej popularnymi konstrukcjami są układy typu [3, 4]:

- *SSTC* (ang. *Solid State Tesla Coil*),
- *DRSSTC* (ang. *Dual Resonant Solid State Tesla Coil*).

W układzie typu *SSTC* stosowane jest zjawisko rezonansu jedynie po stronie wtórnej, natomiast w układzie z topologią *DRSSTC* także po stronie pierwotnej. Dzięki zastosowaniu podwójnego układu rezonansowego, konstrukcja typu *DRSSTC* charakteryzuje się znacznie większym podobieństwem do klasycznego transformatora Tesli oraz możliwością uzyskania znacząco większej mocy. W układach typu *SSTC* stosowane są najczęściej tranzystory *MOSFET* – głównie z powodu wyższych częstotliwości pracy tych układów. Transformatory o konstrukcji *DRSSTC* pracują najczęściej na niższych częstotliwościach – do 100 kHz – z tranzystorami *IGBT*, jako elementy kluczujące.

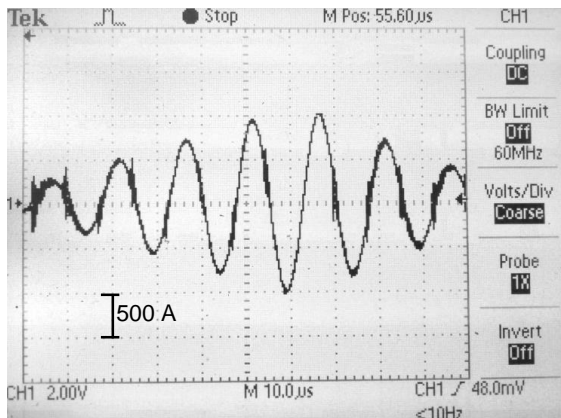
4. REALIZACJA PRAKTYCZNA TRANSFORMATORA TESLI W UKŁADZIE *DRSSTC*

W opisywanym projekcie transformatora Tesli zastosowano rozwiązania układowe przedstawione w uproszczeniu na schemacie blokowym na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy transformatora Tesli z elektronicznym układem sterowania i kontroli: 1) autonomiczny sterownik mikroprocesorowy z kartą plików *MIDI*; 2) komputer z 3) interfejsem łącza światłowodowego; 4) kontroler bloku sterowania; 5) blok zasilania; 6) mostkowy modulator prądów strony pierwotnej; 7) cewka pierwotnej strony transformatora; 8) cewka strony wtórnej, 9) terminal górnym – elektroda wysokonapięciowa

W układzie *DRSSTC* po stronie pierwotnej uzwojenie transformatora oraz kondensator połączone są szeregowo z łącznikiem, zbudowanym zwykle w konfiguracji mostka lub półmostka tranzystorowego. Strona wtórna to klasyczna cewka Tesli z toroidalną elektrodą wysokonapięciową. Duże wartości pojemności w obwodzie pierwotnym stwarzają konieczność przewodzenia prądów impulsowych o bardzo dużych wartościach. Mostek tranzystorowy przełączany jest zgodnie ze zmianami kierunku prądu w obwodzie pierwotnym (rys. 4), co powoduje cykliczne dostarczenie do niego energii, przekazywanej następnie do uzwojenia wtórnego. Prąd w układzie narasta aż do momentu, w którym dochodzi do wyładowania, które raptownie zmienia parametry układu, co skutkuje gwałtownym spadkiem wartości prądu. Szybkie zmiany wartości prądu powodują powstawanie stosunkowo dużych przepięć na elementach obwodu rezonansowego. Z tego względu konieczne jest obniżenie indukcyjności pasożytniczych w obwodzie mostka, szczególnie pomiędzy mostkiem a kondensatorem filtrującym, zastosowanie ograniczników przepięć oraz zaawansowanego układu sterowania, pełniącego rolę inteligentnego kontrolera mostka tranzystorowego.



Rys. 4. Oscylogram przebiegu prądu w obwodzie pierwotnym transformatora Tesli w wykonanym układzie *DRSSTC*

W elektronicznym transformatorze Tesli, dla ograniczenie wydzielanej mocy, nie stosuje się trybu pracy ciągłej, pobudzając układ do generacji wysokiego napięcia za pomocą sekwencji impulsów o programowalnych: czasie trwania i częstotliwości powtarzania. Sterowanie pracą transformatora opisywanego w artykule może się odbywać z:

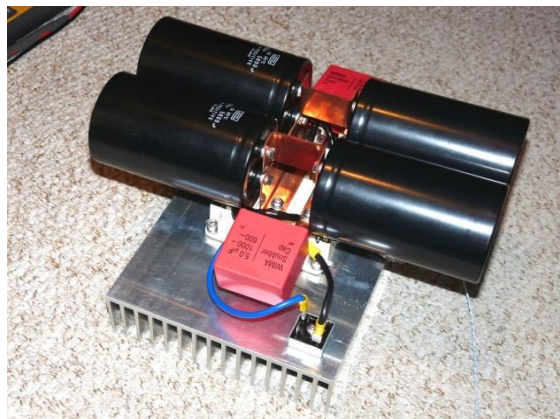
- autonomicznego sterownika mikroprocesorowego z nadajnikiem łącza światłowodowego, pozwalającego na odczyt plików muzycznych standardu *MIDI* [5] zapisanych na karcie *SD* i przetworzenie ich na ciąg impulsów sterujących pracą transformatora Tesli. Sterownik ten (rys. 5) został zbudowany w oparciu o mikrokontroler *ATmega2560*.
- komputera, pełniącego funkcje interpretera plików muzycznych standardu *MIDI*, wyposażonego w interfejs pozwalający na przesył cyfrowych sygnałów sterujących poprzez łącze światłowodowe.



Rys. 5. Autonomiczny sterownik mikroprocesorowy z kartą pamięci plików standardu *MIDI*, zbudowany na mikrokontrolerze *ATmega2560*

Czasy trwania impulsów sterujących oraz częstotliwości ich powtarzania (a więc wartości współczynnika wypełnienia) wpływają bezpośrednio na wartości energii dostarczanej do transformatora. Typowe czasy przewodzenia zawierają się w zakresie od dziesiątek do setek mikrosekund, a częstotliwości powtarzania zwykle nie przekraczają 1 kHz.

Przełączanie tranzystorów układu mostkowego dopasowane jest do oscylacji rezonansowych i realizuje metodę *ZCS* (ang. *Zero Current Switching*). Informacja determinująca chwilę przełączenia pochodzi z układu sprzężenia zwrotnego, monitorującego prąd z pomocą szerokopasmowego przekładnika prądowego. Metoda zapewnia minimalizację strat energii oraz przepięć powstających podczas przełączania tranzystorów.



Rys. 6. Przełącznik energoelektroniczny – modulator prądów obwodu pierwotnego

W wykonanym układzie sterującym maksymalny spodziewany prąd w obwodzie pierwotnym wynosi ok. 1500 A. Dla zabezpieczenia tranzystorów *IGBT* przed przepięciami zastosowano kondensatory typu *snubber* 5 uF/1000 V oraz diody typu *TVS*. Dwa moduły energoelektroniczne połączone miedzianym kątownikiem o dużym przekroju z baterią kondensatorów 5600 uF/900 V oraz osadzono na żebrowanym radiatorze (rys. 6). Sterowanie modułami *IGBT* odbywa się poprzez mostek pośredni (rys. 7). Sygnał sterujący z kontrolera po przejściu przez transformator bramkowy trafia do mostka pośredniego, będącego pełnym mostkiem tranzystorowym, zasilanym napięciem stabilizowanym 70 V. Mostek ten zbudowano w oparciu o szybkie tranzystory *MOSFET*, dla zapewnienia krótkich czasów przełączania i dużej wydajności prądowej. Mostek pośredni połączono z mostkiem głównym poprzez transformator bramkowy o przekładni 4:1, by uzyskać odpowiedni poziom napięcia sterującego bramkami tranzystorów *IGBT*.



Rys. 7. Mostek pośredni, sterujący pracą tranzystorów mocy

Uzwojenie pierwotne transformatora Tesli jest wykonane z kilkunastu zwojów taśmy miedzianej o przekroju 16,5 mm² i ma formę płaskiej spirali. Uzwojenie wtórne, nawinięte na rurę z tworzywa sztucznego o długości 114 cm, posiada 1500 zwojów cienkiego emaliowanego drutu miedzianego. Dolny koniec uzwojenia wtórnego jest uziemiony, natomiast górny połączono z toroidalną elektrodą wysokonapięciową wpływającą na wartość pojemności obwodu wtórnego.

Całkowita wysokość urządzenia wraz z podstawą wynosi 195 cm (rys. 8). Podstawowe parametry elektryczne to:

- częstotliwość rezonansowa ok. 80 kHz,
- moc maksymalna 10 kVA,
- maksymalne napięcie strony wtórnej 650 kV.

Takie parametry umożliwiają generację wyładowań elektrycznych dochodzących do 3 m długości (rys. 9). Układ sterujący umożliwia uzyskanie efektu „grającego” transformatora.



Rys. 8. „Grający” transformator Tesli w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH

5. PODSUMOWANIE

Przez ponad 100 lat zbudowany przez Nicola Teslę rezonansowy transformator wysokonapięciowy nie ulegał żadnym zmianom konstrukcyjnym. Stosunkowo niedawno, dzięki rozwojowi energoelektroniki, w szczególności dzięki nowym półprzewodnikowym łącznikom mocy możliwym stało się dokonanie zmian zwiększających sprawność i funkcjonalność tego urządzenia.

W artykule opisano projekt transformatora Tesli z energoelektronicznym blokiem sterowania realizujący układ z podwójnym obwodem rezonansowym *DRSSTC*. Występujące podczas działania tego urządzenia duże wartości prądu obwodu pierwotnego (> 1 kA) oraz częstotliwości pracy na poziomie $10^4 - 10^5$ Hz wymagają stosowania odpowiednich elementów przełączających oraz technik ich sterowania.



Rys. 9. Przykład wyładowań elektrycznych generowanych przez „grający” transformator Tesli w polu probierczym Laboratorium Wysokich Napięć KEE AGH

Mikrokontroler nadzorujący pracę transformatora został wyposażony w funkcje odczytu i odtwarzania plików muzycznych zapisanych w formacie *MIDI*, co pozwala wzbogacić pokazy transformatora Tesli o interesujące efekty dźwiękowe. Dzięki temu pokazy działania tego urządzenia stały się niezwykle atrakcją, przyciągającą liczne grupy gości, odwiedzających Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie, np. podczas organizowanych cyklicznie Dni Otwartych AGH lub Nocy Naukowców.

6. BIBLIOGRAFIA

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla (2013.09.12)
2. Słowiński K. K., Słowiński P.: Władca piorunów. Nikola Tesla i jego genialne wynalazki, Wyd. VIDEOGRAF II, 2013, s. 528, ISBN 978-83-7835-174-0
3. Dunn E.K.: DRSSTC (pdf file), University of Kansas Physics Dept., May 8, 2012 (available at: people.ku.edu/~matt915/projects/papers/DRSSTC.pdf)
4. Steve's High Voltage. Steve Ward, <http://www.stevehv.4hv.org/>
5. Stępień M.: MIDI: cyfrowy interfejs instrumentów muzycznych, Wyd. Helion, ISBN 83-7197-892-8, 2002

PODZIĘKOWANIE

Projekt „Transformator Tesli” zrealizowany na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie przez zespół wykonawców ze Studenckiego Koła Naukowego Elektroenergetyków PIORUN był wykonany w roku akademickim 2011/2012, m.in. dzięki środkom finansowym uzyskanym w ramach Grantu Rektorskiego przyznanego przez J. M. Rektora AGH. Osobami biorącymi udział w projekcie byli Autorzy artykułu oraz, na różnych etapach pracy, studenci: M. Krawczyk, N. Kuder i W. Sorbian.

TESLA TRANSFORMER WITH COMPUTER CONTROLLED POWER ELECTRONIC SUPPLYING SYSTEM

Key-words: Tesla transformer (coil), power electronics system, microprocessor controller

Tesla transformer is a device that allows us to generate voltages with a very high value, having the shape of oscillatory waveforms of short duration. This paper describes the design of such a transformer, with the power supply system based on *IGBT* type power transistors. This allows us to control by computer or dedicated, specialized microcontroller the basic parameters of the time sequences of electrical discharges, which are produced on a high-voltage electrode of the secondary winding.