

# Transformator Tesli



**Ze względu na obecność skrajnie wysokich napięć, osoby niepełnoletnie i niedoświadczone mogą wykonać układ wyłącznie pod opieką wykwalifikowanych opiekunów.**

**Wykonawca buduje urządzenie na własne ryzyko i ponosi pełną odpowiedzialność za efekty jego działania, w tym zakłócenia elektromagnetyczne oraz możliwość porażenia, zatrucia i uszkodzenia wzroku osób trzecich.**

Jednym z badaczy wysokich napięć był mało znany Nikola Tesla, człowiek ekscentryczny, lecz o ogromnej wiedzy. Między innymi stworzył i opatentował urządzenie znane pod kilkoma nazwami: *cewka Tesli*, *transformator Tesli*, *transformator rezonansowy*. Transformator Tesli składa się z dwóch obwodów: wtórnego i pierwotnego. Obwód pierwotny składa się ze źródła wysokiego napięcia (powinien to być transformator sieciowy podwyższający napięcie, pracujący przy częstotliwości sieci 50Hz, napięcie pierwotne 220V, moc około 300-500W, napięcie wtórne 5-10kV; mając taki transformator, możemy zrobić „teslę” dającą ciągłe wyładowania do powietrza długości 20-30cm), kondensatora, uzwojenia pierwotnego oraz iskrownika. Obwód wtórny natomiast składa się z uzwojenia wtórnego oraz kondensatora. Ten wtórny kondensator to pojemność między toroidem a ziemią (jest to tzw. rezonator otwarty). Urządzenie to pozwala wytwarzać zmienne wysokie napięcia rzędu megawoltów (milionów woltów).

Zastosowań tak ogromnych napięć może być bardzo dużo. Na przykład Tesla zamierzał

wykorzystać swój wynalazek do rozbijania skorupy ziemskiej. Innym zastosowaniem był projekt bezprzewodowego przesyłu energii; temat ten jest do dziś okryty tajemnicą. Tesla stworzył plany sieci nadajników okalających Ziemię. System ten miał zapewnić globalną transmisję energii elektrycznej bez użycia przewodów. Gotowy był również jeden egzemplarz nadajnika. Tesla jednak zaczął borykać się z problemami finansowymi, w końcu zła sytuacja zmusiła go do rozbiórki nadajnika. Obecnie transformatory Tesli stosuje się do sprawdzania wytrzymałości karoserii samochodów, samolotów, badań laboratoryjnych, jonizacji gazów, a przede wszystkim do widowiskowych pokazów.

## Ostrzeżenia

Transformator Tesli jest urządzeniem bardzo efektywnym, ale także bardzo niebezpiecznym ze względu na występujące w nim wyjątkowo wysokie napięcia. Teoretycznie otrzymywane wyładowanie elektryczne ma bardzo dużą częstotliwość, więc co za tym idzie, powinno być niegroźne (chodzi o tzw. *efekt naskórkowy*). Niestety, tak nie jest. Małe transformatory są wprawdzie w miarę bezpieczne, ale duże „tesle” potrafią nieźle kopnąć lub poparzyć (albo jedno i drugie). Wiemy to z doświadczenia, więc nie radzimy ich dotykać. Należy uważać także na sam transformator zasilający, gdyż jest on w stanie zabić o wiele szybciej niż napięcie sieci energetycznej. Ponieważ w cewce Tesli płyną bardzo duże prądy (zmienne), cewka jest więc źródłem bardzo silnego pola elektromagnetycznego, które wytwarzane jest w jej pierwotnym obwodzie rezonansowym. Tak wielkie pole elektromagnetyczne z łatwością ni-

szczy obecne w pobliżu urządzenia elektroniczne - nie jest to żart - naprawa wieży Hi-Fi sporo kosztuje – wiemy, bo stała za blisko urządzenia. Jeśli zastosujecie się do naszych rad, wszystko będzie OK. Wspomnieć należy także o świetle UV, które w dużych ilościach wytwarzane jest przez iskrownik, jest ono szkodliwe dla wzroku, dlatego nigdy nie należy patrzeć bezpośrednio w iskrownik.

Z wysokimi napięciami i dużymi częstotliwościami wiąże się dwa bardzo ważne zjawiska, a mianowicie: efekt naskórkowy i krawędziowy.

- *Efekt naskórkowy* spowodowany prądami w.cz. nie pozwala elektronom wnikać w głąb przewodnika, a co za tym idzie, prąd płynie po powierzchni przewodnika, a czasem tylko „ślizga” się po niej.

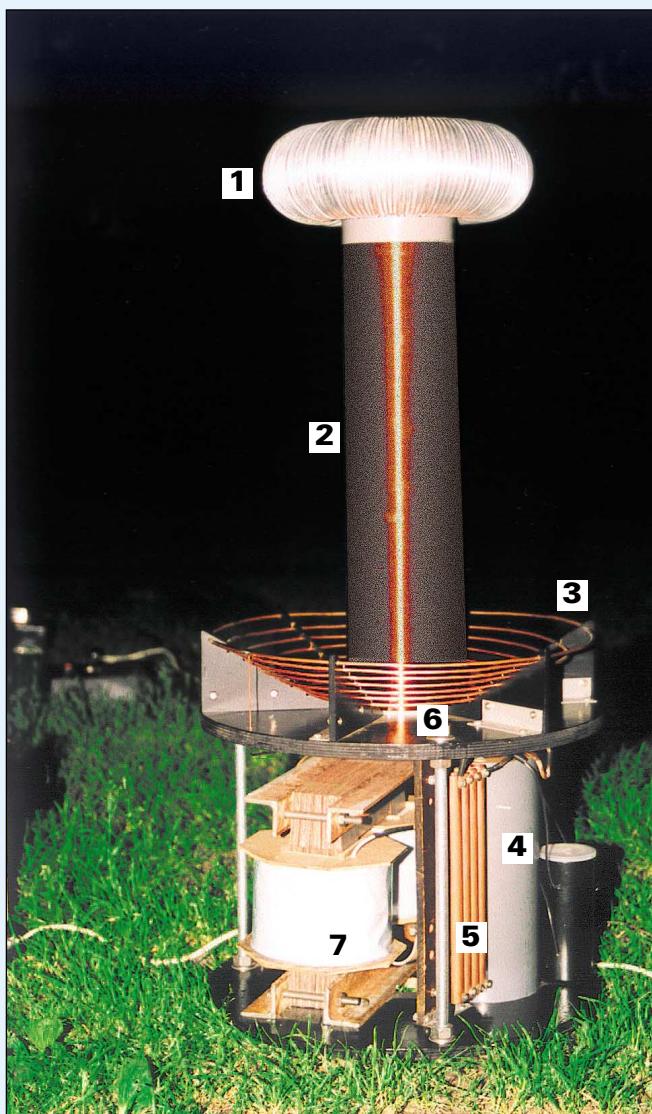
- *Efekt krawędziowy* polega na gromadzeniu się ładunku na wszelkich ostrych krawędziach, powoduje to przeskakowanie isker (ulot elektryczny), które są niepożądane w obwodach wysokonapięciowych.

W cewkach Tesli można też spotkać inne zjawisko, niebezpieczne dla transformatora zasilającego i kondensatora, jest to efekt tzw. nadsprężenia, objawia się on w tych cewkach Tesli, których cewka obwodu pierwotnego ma małą średnicę i liczy 2...4 zwoje. Wtedy to cały strumień „pompowany” jest w dolną część cewki obwodu wtórnego, powodując przeskok isker między zwojami, jak również przebicia na drodze wtórno-pierwotne. Jeśli strumień magnetyczny „nie widzi” wyższej części uzwojenia wtórnego (części rezonansowej), to całe napięcie indukuje się w jego dolnej części.

**Fotografia 1** przedstawia najważniejszą część transformatora (cewki) Tesli.

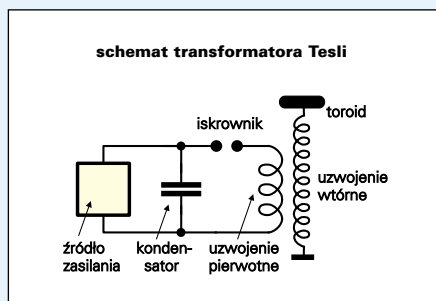
- 1 - Toroid
- 2 - Uzwojenie wtórne części rezonansowej
- 3 - Zwój zabezpieczający
- 4 - Kondensator
- 5 - Iskrownik
- 6 - Uzwojenie pierwotne części rezonansowej
- 7 - Transformator zasilający

Budowę transformatora Tesli pokazuje w uproszczeniu **rysunek 1**. Jest to rysunek poglądowy, pomocny przy omawianiu działania urządzenia.



Fot. 1

Rys. 1



Bardziej pełny schemat, często spotykany w literaturze, pokazany jest na **rysunku 2**.

*Tr1* - Źródło zasilania (transformator sieciowy, o napięciu wyjściowym np.10kV),  
*Is2* - Iskrownik zabezpieczający chroni transformator przed zbyt wysokim napięciem (informacji o nim należy szukać w Internecie, ponieważ uznaliśmy go za mało ważny i w większości przypadków niepotrzebny, tak samo jak dławiki),  
*Dławiki* - Zapobiegają przedostawaniu się

zakłóceń w.cz. do sieci energetycznej,  
*C* - Kondensator,  
*Is1* - Iskrownik główny,  
*Tr2* - Transformator rezonansowy (część rezonansowa cewki Tesli),  
*Toroid* - Patrz niżej.

*Tr1* - Źródło zasilania (transformator sieciowy, o napięciu wyjściowym np.10kV),  
*Is2* - Iskrownik zabezpieczający chroni transformator przed zbyt wysokim napięciem (informacji o nim należy szukać w Internecie, ponieważ uznaliśmy go za mało ważny i w większości przypadków niepotrzebny, tak samo jak dławiki),  
*Dławiki* - Zapobiegają przedostawaniu się

## Zasada działania

Kondensator *C* jest na przemian ładowany dodatnią i ujemną półką sinusoidy prądu wypływającego z transformatora zasilającego. Kondensator ładuje się do napięcia przebicia iskrownika *Is1*, wtedy to plazma powstała pomiędzy elektrodami iskrownika połączy dotąd odciętą cewkę pierwotną części rezonansowej z kondensatorem, tworząc równoległy obwód rezonansowy, a zarazem przekazując energię zgromadzoną w kondensatorze do uzwojenia, mamy więc typowy przykład rezonansu równoległego, gdzie przepływ prądu możliwy jest dzięki powstaniu łuku elektrycznego.

Obwód pierwotny jest w rzeczywistości obwodem rezonanso-

wym równoległym, pobudzonym do drgań gasnących o częstotliwości równej częstotliwości rezonansowej obwodu LC w takt przeskoków iskry w iskrowniku. Częstotliwość obwodu rezonansowego zależy od indukcyjności uzwojenia pierwotnego części rezonansowej oraz od pojemności kondensatora. Wyznacza się ją ze szkolnego wzoru:

$$\text{Gdzie: } f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

*f* - częstotliwość pracy cewki (częstotliwość łuku) [Hz]

*L* - indukcyjność uzwojenia pierwotnego części rezonansowej (ślimaka) [H]

*C* - pojemność kondensatora w obwodzie pierwotnym [F]

Obwód rezonansowy, w skład którego wchodzi cewka pierwotna transformatora rezonansowego i kondensator, jest pobudzany do drgań. Częstotliwość pobudzania (częstotliwość przeskoków iskry na iskrowniku) w zasadzie jest równa podwojonej częstotliwości sieci (100 razy na sekundę), ale też zależy od czasu, po jakim kondensator naładuje się do napięcia, które umożliwi przebicie powietrza pomiędzy elektrodami iskrownika. Czas ten z kolei zależy od napięcia i prądu transformatora zasilającego, pojemności kondensatora, no i oczywiście od odległości elektrod iskrownika. W ten sposób częstotliwość przeskoków iskry może być większa od 100Hz. Energia wytworzona w obwodzie pierwotnym przekazywana jest przez pole elektromagnetyczne dalej, do obwodu wtórnego transformatora rezonansowego. Jednak aby obwód wtórny wytworzył wysokie napięcie, wymagana jest zgodność jego częstotliwości rezonansowej z częstotliwością rezonansową obwodu pierwotnego. Wtedy to obydwa obwody reprezentują sobą tylko opór rzeczywisty - jeżeli ten warunek jest spełniony, pomiędzy okładzinami kondensatora obwodu wtórnego występuje bardzo wysokie napięcie.

Pracy transformatora Tesli towarzyszą silne efekty akustyczne - huk wywołany przeskokami iskry na iskrowniku. Widzimy również piękne fioletowe wyładowania wędrujące wokół toroidu, w tle można także usłyszeć łuk elektryczny. Nie należy zapominać, że „tesla” jest wydajnym źródłem bardzo aktywnego gazu – ozonu, to zresztą daje się silnie odczuć. A ozon w większych dawkach jest szkodliwy dla zdrowia.

## Transformator zasilający

Jest to zwykły transformator pracujący przy napięciu 220V, 50Hz, konwertuje on napięcie na wartość kilkadziesiąt razy większą, np. 10000V

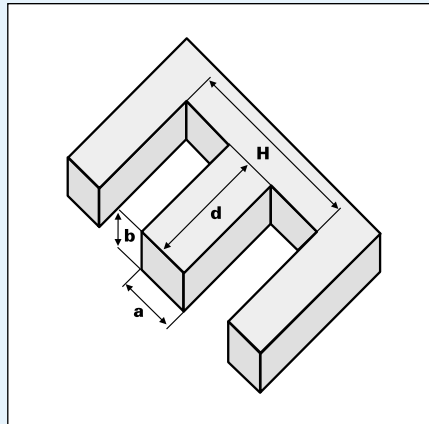
Musi to być transformator o mocy od 100W do 5000W, w zależności od oczekiwanego efektu i napięciu wyjściowym od 5kV wzwyż. Jeżeli ktoś robi małą „tesłę”, to polecamy transformator o mocy ok. 200-300W.



Kupno gotowego transformatora raczej nie wchodzi w rachubę (choć można użyć transformatora od zasilania neonów lub kilku transformatorów od mikrofalówek – obydwa rozwiązania są dosyć drogie). Pozostaje więc samemu postarać się o niezbędne elementy i zacząć najbardziej pracochłonną robotę, czyli nawinięcie transformatora. Ma to swoje zalety i wady. Po samodzielnym nawinięciu mniej więcej wiemy, czego można się spodziewać, a ewentualnie kupione za ciężkie pieniądze trafo może się „spalić” w najmniej pożądanym momencie. Podstawowym problemem, jak już wspomnieliśmy, jest znalezienie rdzenia. Z praktyki wiemy, że na duże „tesle” najlepsze są rdzenie transformatorów od spawarek. Na małe „tesle” polecamy rdzenie od transformatora z Rubina – to taki radziecki telewizor ;-)

Kolejną kwestią jest drut nawojowy na uzwojenie wysokonapięciowe. Nabycie takiego (zwykłego) drutu nawojowego nie stanowi dużego problemu - można go dostać w większości sklepów elektrycznych lub w hurtowniach elektrycznych. Jedynym problemem związanym z drutem jest jego cena: ok. 25-30zł za kilogram, a do nawinięcia trafo o mocy 2000W i napięciu wyjściowym 10000V potrzeba jakieś 5kg (do transformatora o mocy 400W potrzeba go około 1,5kg). Na pocieszenie dodamy, że to największy koszt przy budowie „tesli”. Ostatnią czynnością przed nawijaniem jest zakup folii ogrodniczej na przekładki transformatora. Folia taka o grubości 0,25 mm jest dostępna w każdym sklepie ogrodniczym. Nie jest to najlepsze rozwiązanie, ponieważ powinniśmy użyć do tego celu porządnych przekładek preszpanowych lub jeszcze lepiej teflonowych, lecz przy braku tych materiałów można wykonać przekładki z folii polietylenowej. (UWAGA! Temperatura topnienia to ok. 80°C, więc jeżeli macie dostęp do bardziej wytrzymałych materiałów, to wykorzystajcie je). Na każdą nawiniętą warstwę uzwojenia należy nawinąć warstwę papieru, a następnie kilka warstw folii polietylenowej i znowu warstwę papieru, zapobiegając to przecinaniu folii polietylenowej przez uzwojenia. Dobrze jest zabezpieczać każdą warstwę drutu parafiną. Nie używajcie lakieru – w razie spalania będzie można naprawić trafo. Przy nawijaniu uzwojenia należy zwracać uwagę na trzy podstawowe rzeczy. Po pierwsze, emaliowa izolacja drutu nie może być zardrapana, bo może się to zakończyć przebiciem i spalaniem całej naszej pracy. Po drugie, zwoje muszą być nawijane bardzo starannie, blisko siebie (chyba że nawijamy drutem  $\phi < 0,2\text{mm}$ ) i nie mogą na siebie nachodzić. Co tu dużo mówić, musi to być zrobione jak w dobrej firmie produkującej transformatory. Po trzecie, należy zostawić ok. 10mm wolnego miejsca po każdej stronie karkasu czyli na początku i na końcu każdej warstwy. Zapobiega to późniejszym przebiciom między warstwami. Dobrze

jest też pomyśleć o wyprowadzeniach. Osobiście polecamy przyłutowanie do początku i do końca uzwojenia kilku cm linki miedzianej w izolacji, która jest bardziej odporna na wyginanie niż drut. Zarówno średnicę drutu na uzwojenie pierwotne, jak i wtórne, oblicza się stosownie do mocy transformatora (co wiąże się z wielkością rdzenia). Dla początkujących maniaków wysokonapięciowych przedstawiamy kilka pomocnych wzorów odnoszących się do powszechnie używanych transformatorów sieciowych – patrz **rysunek 3**.



**Rys. 3**

Wzór na przekrój środkowej kolumny rdzenia:

$$S = a \cdot b \text{ gdzie } a \text{ i } b \text{ w [cm]}$$

Wzór na moc, jaką można uzyskać z rdzenia:  $P = 0,69S^2$  (jeśli zdecydowaliście się na rdzeń od Rubina, to ma on moc ok. 200W)

$P$  - moc [W]

$S$  - przekrój rdzenia w  $\text{cm}^2$

Wzór na liczbę zwojów przypadających na 1V dla tego transformatora:

$$Z = 45 / S$$

Wzór na liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego:

$$Z1 = U1 \cdot 0,9 \cdot (45/S)$$

$$Z2 = U2 \cdot 1,1 \cdot (45/S)$$

$Z1$  - liczba zwojów uzwojenia pierwotnego

$Z2$  - liczba zwojów uzwojenia wtórnego

$U1$  - 220 V

$U2$  - 10000V (jest to najlepsze napięcie do małych transformatorów Tesli)

Wzór na średnicę drutu w mm:

$$D = 0,8 \cdot \sqrt{I}$$

$I$  - natężenie prądu w A

Jeżeli na transformatorze jest już uzwojenie pierwotne przystosowane do pracy przy napięciu 220V, to można je wykorzystać (zostawić tak jak jest). Należy jednak uważać na transformatory (Rubin), gdzie uzwojenia nawijane są aluminiumowym drutem – nie jest to optymalne rozwiązanie dla „tesli”. Przy samodzielnym nawijaniu uzwojenia pierwotnego powinno się ściśle przestrzegać obliczonej liczby zwojów, natomiast uzwojenie wtórne radzimy nawijać na napięciu  $10000V \pm 30\%$ . Prąd uzwojenia wtórnego i wynikającą stąd

grubość drutu trzeba natomiast wyliczyć z mocy rdzenia

$$I = \frac{P}{U}$$

gdzie:

$I$  - prąd w amperach

$P$  - moc rdzenia w watach

$U$  - wtórne napięcie transformatora w woltach

Drut nawojowy na uzwojenie wtórne transformatora zasilającego może mieć średnicę od 0,1mm do 1mm. Zawsze drut może być grubszy, byleby zmieścił się na karkasie.

Gdy dostępny jest tylko goły rdzeń, karkas należy wykonać we własnym zakresie.

Pomocą będzie **rysunek 4**.

$x$  - grubość materiału, z jakiego wykonujemy karkas

Rdzeń składamy w sposób typowy dla rdzeni z kształtek EI: na przemian z obydwu stron wkładamy kształtki E, po wbiciu wszystkich blach, w szczeliny wkładamy „literki” I.

Lepszym rdzeniem na transformator zasilający jest wspomniany wcześniej rdzeń od telewizora Rubin, ponieważ posiada on osobne karkasy dla uzwojenia pierwotnego i wtórnego, co zmniejsza ryzyko przebicia. Warto minimalizować wszystkie szczeliny pomiędzy blachami – w fabrycznych rdzeniach nie ma z tym problemu. Jeżeli kogoś interesują konkrety, oto dane naszych transformatorów zasilających:

Mała „tesla”: rdzeń od telewizora Rubin, moc podobno 200W, napięcie pierwotne 220V~, napięcie wtórne 5-6kV~, prąd ok. 30mA.

Średnia „tesla”: rdzeń robiony we własnym zakresie (nie polecamy takich sposobów początkującym, jest z tym dużo kłopotów), moc 500W, napięcie pierwotne 220V~, napięcie wtórne 7kV~, prąd ok. 60mA.

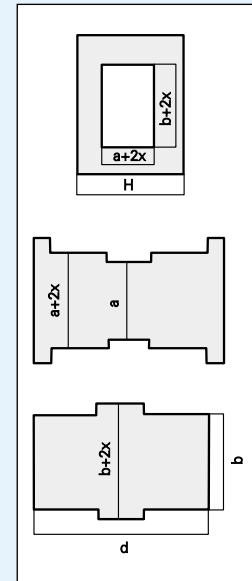
Mała „tesla”: rdzeń od telewizora Rubin, moc podobno 200W, napięcie pierwotne 220V~, napięcie wtórne 5-6kV~, prąd ok. 30mA.

Średnia „tesla”: rdzeń robiony we własnym zakresie (nie polecamy takich sposobów początkującym, jest z tym dużo kłopotów), moc 500W, napięcie pierwotne 220V~, napięcie wtórne 7kV~, prąd ok. 60mA.

## Kondensator

**Jest to kondensator foliowy, którego budowę przedstawiamy poniżej.**

Kondensator powinien mieć taką pojemność, aby nastąpiło dopasowanie jego impedancji i impedancji uzwojenia wtórnego transformatora zasilającego. Maniacy mogą ją zwiększać nawet o jakieś 40%. Trzeba tu nadmienić, że zwiększenie pojemności kondensatora ponad obliczoną stworzy niedopasowanie - krótko mówiąc, kondensator będzie



**Rys. 4**

powiększył prąd, transformator będzie bardziej obciążony, jednakże przy pracy dorywczej nie ma to dużego znaczenia. Może się zdarzyć, że kondensator będzie za duży, transformator będzie go ładował powoli, przeskoki na iskrowniku będą pojawiać się stosunkowo rzadko i w gruncie rzeczy „tesla” nie będzie działał zbyt dobrze.

$$C = \frac{I_{wy}}{2\pi f U_{wy}}$$

$U_{wy}$  - Napięcie na wyjściu transformatora zasilającego w voltach

$I_{wy}$  - Prąd, na jaki przewidziane jest uzwojenie wtórne transformatora zasilającego w amperach

$C$  - Pojemność kondensatora w faradach

$f$  - Częstotliwość sieci energetycznej w Polsce 50Hz

Przykładowo: mamy transformator zasilający o następujących parametrach uzwojenia wtórnego: 7kV/60mA, po podstawieniu do wzoru otrzymujemy pojemność kondensatora w przybliżeniu równą 27nF.

Jeżeli wiemy, jaki konkretnie kondensator jest nam potrzebny i mamy odpowiednie materiały, to po obliczeniu jego parametrów (długość okładzin, grubość izolatora itp.), najlepiej za pomocą takich programów jak Capsolve, możemy przystąpić do budowy. Program do obliczania kondensatorów Capsolve można ściągnąć na przykład spod adresu: [www.myzlab.qs.pl/download.html](http://www.myzlab.qs.pl/download.html) (strona też jest bardzo porządna).

Opiszemy teraz, jak zrobić kondensator rolkowy, gdyż wykonanie go zajmie mniej czasu i będzie łatwiejsze niż wykonanie kondensatora warstwowego (opisu budowy kondensatora warstwowego radzimy szukać w Internecie). Aby zrobić własny kondensator rolkowy, potrzebne będą: folia aluminiowa (jedna rolka kuchennej folii aluminiowej wystarczy), folia polietylenowa o dowolnej grubości (najlepiej 0,25mm). Ponieważ folia aluminiowa ma szerokość ok. 30cm, więc pasy folii polietylenowej powinny być szersze po każdej stronie o minimum 2cm, tak więc folia polietylenowa powinna mieć szerokość 34cm. Teraz sprawdzimy, jaką grubość łączną powinna mieć każda z przekładek kondensatora - ponieważ przyjmuje się 1,5mm folii polietylenowej na każde 10kV napięcia zmiennego, więc mając przykładowo transformator o napięciu 10kV, potrzebujemy dwóch przekładek o grubości 1,5mm każda. Załóżmy, że mamy do dyspozycji folię polietylenową o grubości 0,25mm, tak więc potrzeba będzie ułożyć na sobie 1,5/0,25=6 warstw folii polietylenowej (to jest jedna przekładka). Dane, które mamy (całkowita grubość przekładki, szerokość folii aluminiowej), wpisujemy do programu Capsolve, dodatkowo przyjmujemy pewną przypadkową długość folii aluminiowej (np.1m), po tych operacjach otrzymujemy pojemność takiego kondensatora. Jeżeli jego pojemność

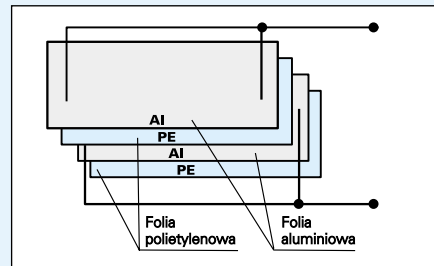
nie zgadza się z pojemnością nam potrzebną, to tak korygujemy wpisywaną do programu długość folii aluminiowej, aby trafić na właściwą pojemność. Program pyta także o długość folii polietylenowej, która powinna być o 20-30cm dłuższa niż folia aluminiowa. Mając dokładne dane potrzebne do wykonania kondensatora, wycinamy pasy folii polietylenowej, na płaskim podłożu układamy połowę z nich (tyle, ile trzeba na jedną przekładkę), przykrywamy pasem folii aluminiowej, następnie lutujemy wyprowadzenia kondensatora, po ich przyłutowaniu taśmę aluminiową przykrywamy następną przekładką złożoną z pozostałych taśm folii polietylenowej, na to kładziemy drugi pas folii aluminiowej i znowu lutujemy wyprowadzenia, lecz po przeciwnej stronie. Tak przygotowaną „kanapkę” nawijamy na rurę PCV o średnicy np. 20mm. Musimy zwracać uwagę na to, aby pasy folii się nie przemieszczały (dostyć trudne). Po nawinięciu cały kondensator owijamy taśmą klejącą, a następnie tasemkami zaciskowymi do przewodów elektrycznych. Na koniec łączymy wyprowadzenia i pozostaje nam tylko umieścić nasz kondensator w jakiejś obudowie. Tak kończy się budowa podstawowej wersji kondensatora. Jeżeli ktoś chce, aby jego kondensator pracował dłużej jak kilka miesięcy, to powinien zalać go olejem (najlepiej transformatorowym), jest to dosyć skomplikowana procedura, jeżeli ktoś miał do czynienia z olejem transformatorowym, to powinien wiedzieć, dlaczego. Nieobeznanych pragniemy poinformować, że taki olej włązi w każdą szczelinę, potrafi także wydostawać się z naczynia, wychodząc do góry po jego ściankach. Nam, pomimo prób, nie udało się zalać dużych kondensatorów „tesli” olejem („uciekał”), dlatego też nasze kondensatory czasem ulegają przebiciu. Na pocieszenie dwa mniejsze kondensatory zalane olejem ani razu nie uległy spaleni. I tu dobra rada, należy pamiętać, że mało która guma potrafi uszczelnić olej, dlatego nie radzimy stosować uszczelkek.

**Rysunek 5** pokazuje sposób układania warstw folii polietylenowej i aluminiowej w kondensatorze rolkowym.

**Rysunek 6** przedstawia sposób zwijania kondensatora rolkowego.

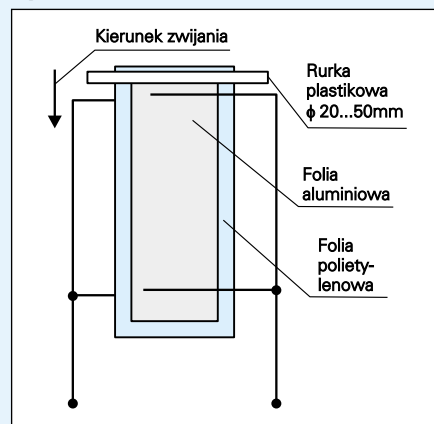
Istnieje też inny sposób wykonania kondensatora. Może to być tzw. kondensator warstwowo. Jego budowa opiera się na wycinaniu i warstwowym składaniu kawałków folii aluminiowej na przemian z folią polietylenową. Dokładne poskładanie takiego kondensatora jest trudniejsze i zajmuje więcej czasu, ponadto z każdej warstwy folii aluminiowej trzeba zrobić wyprowadzenia. Kondensator ten ma jednak olbrzymią zaletę, a mianowicie po jakimś niekontrolowanym przebiciu i spaleni w jakimś miejscu można bez większych problemów go rozłożyć i w razie potrzeby wymienić spaloną warstwę. W kondensatorze rolkowym jest to nie-

możliwe. Osobiście spaliliśmy dwa kondensatory rolkowe przez brak doświadczenia. Mimo to nie polecamy budowy kondensatora warstwowego (straszenie dużo roboty).



Rys. 5

Rys. 6



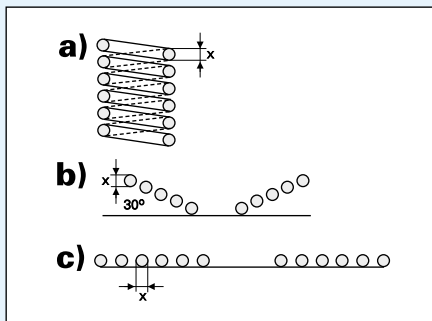
## Uzwojenie pierwotne części rezonansowej

(patrz fotografia 1, odnośnik nr 6)

Na wykonanie kilku zwojów uzwojenia pierwotnego (12 zwojów zupełnie wystarczy, zapobiegliwi mogą dać jeszcze pięć) potrzebne będzie kilka metrów grubego przewodu. Może to być zwykły drut do instalacji elektrycznych ze zdjętą izolacją o średnicy od 4 do 10 mm. Grubszego nie polecamy ze względu na niemałe problemy z wyginaniem. Istnieje też możliwość zastąpienia drutu miedzianą rurką hydrauliczną – rozwiązanie lepsze, ale i bardziej kosztowne. Uzwojenie to można wykonać na trzy sposoby, pionowe (**rysunek 7a**), które tak naprawdę nadaje się tylko do „Tesli” małych mocy, poniżej 100W, lub do „Tesli półprzewodnikowych”, stożkowe (**rysunek 7b**), zalecane przy małych i średnich, oraz płaskie (**rysunek 7c**), zalecane przy dużych „teslach”. Przekroje poprzeczne uzwojeń używanych w transformatorach Tesli małej, średniej i dużej mocy pokazane są na rysunku 7. Uzwojenia pionowego nie polecamy. Uzwojenie stożkowe powinno mieć kąt nachylenia uzwojenia do podstawy około 30°.

Przetestowaliśmy wszystkie typy uzwojeń i możemy śmiało powiedzieć, że płaskie uzwojenie jest zdecydowanie najlepsze do dużych „tesli”. Uzwojenie stożkowe nie nadaje się do dużych transformatorów Tesli ze względu na wyładowania na drodze

uzwojenie wtórne-pierwotne części rezonansowej (po prostu czasem nasz piorun uderza w ślimaka); nadaje się natomiast do „tesli” średnich i małych, o mocach do 1000W. Uzwojenie to wytwarza lepiej skierowane pole elektromagnetyczne, w konsekwencji czego uzwojenie wtórne jest pobudzane bardziej równomiernie. W obwodzie pierwotnym cewki Tesli mamy do czynienia z wysokoprądowymi oscylacjami o częstotliwościach radiowych i wartościach rzędu setek amperów. Wielka częstotliwość wywołuje dodatkowo efekt naskórkowy, który powoduje, że elektrony poruszają się tylko w zewnętrznych warstwach przewodnika, nie wnikając głębiej.



Rys. 7

Następnym ważnym aspektem uzwojenia pierwotnego jest rozmiar. Odstęp międzyzwojowy powinien wynosić ok. 1-2cm (w małych „teslach” odstęp ten powinien wynosić 1cm), odległość pierwszego zwoju od uzwojenia wtórnego – około 3...7cm (w małych „teslach” odległość ta powinna wynosić od 2 do 3cm). Izolatory dystansowe można wykonać z drewna (sklejka). Zapobiegliwi mogą je zrobić z bakelitu lub z pleksy (należy pamiętać, że plastik topi się w niskich temperaturach, co może mieć znaczenie w „teslach” dużych mocy, powyżej 1000W). Rowki można wyciąć piłką do metalu lub szlifierką (za wyjątkiem plastiku) po uprzednim wytrasowaniu i nawierceniu otworów. Trzeba także pod uwagę wziąć to, że uzwojenie pierwotne jest „ślimakiem”, tak więc rowki dwóch sąsiednich izolatorów dystansowych muszą być względem siebie przesunięte. Izolatorów dystansowych powinno być od 6 do 8, przy ich mniejszej liczbie trudno jest równo kłaść uzwojenie. Jeżeli ktoś chciałby zrobić izolatory dystansowe do uzwojenia stożkowego, to kąt nachylenia do podstawy wynosi 30°.

## Uzwojenie wtórne części rezonansowej

(patrz fotografia 1, odnośnik nr 2)

**Jest to cewka z rdzeniem powietrznym nawinięta na plastikowej rurze.** W zależności od wysokości rury potrzeba około 0,2-1kg (dla małych „tesli” 0,5kg z pewnością wystarczy) drutu miedzianego w emalii o średnicy od 0,25 do 1mm (jeżeli robisz małą „teslę”,

nawień drutem 0,35-0,45mm). Uzwojenie wtórne powinno mieć średnicę 4...5 razy mniejszą od wysokości. Dopuszczalne jest stosowanie stosunku nawet 6:1. Powyżej tej wartości pole elektromagnetyczne wytworzone przez uzwojenie pierwotne nie będzie w stanie objąć zasięgiem całego uzwojenia wtórnego, co w efekcie spowoduje, że ostatnie kilkadziesiąt lub nawet kilkaset zwojów nie będzie absorboowało pola elektromagnetycznego. Jak to zwykle bywa, można nawinać mniej, można więcej. Ogólnie nie nawija się mniej niż 400 i nie więcej niż 1500 zwojów. Należy jeszcze wspomnieć, że jest to **cewka jednowarstwowa** i nawijanie na niej dwóch warstw jest niedopuszczalne. Jej górny koniec przymocujemy do toroidu, dolny zaś do uziemienia.

Na koniec najlepiej jest wszystko polakierować, co zapobiega rozwijaniu się zwojów (radzimy tego nie lekceważyć, mieliśmy już dwa przypadki rozwinięcia się drutu, przy niewielkich zmianach temperatur). Zapobiegliwi mogą próbować rurę zalewać czymś od środka, ale nie ma to sensu, nie mieliśmy żadnej awarii uzwojenia wtórnego, jedynym godnym polecenia usprawnieniem jest zatkanie uzwojenia dwoma kółkami wyciętymi np. ze sklejki na wcisk. W górnym kółku można wywiercić otwór na śrubę, do której będzie przymocowany toroid. I jeszcze jedna uwaga: nie radzimy wyprawać uzwojenia środkiem rury, może się coś przebić.

## Toroid (kula)

(patrz fotografia 1, odnośnik nr 1)

Koniec uzwojenia wtórnego podłączony jest do metalowego (przewodzącego) toroidu (może to być kula). Generalnie, czym toroid jest gładki, tym dłuższe są iskry (**efekt krawędziowy**). Nie oznacza to wcale, że toroid z ostrymi krawędziami jest zły, po prostu z takiego toroidu będzie wylatywało więcej krótszych iskierek. Gładki toroid można na przykład wykonać z dwóch dużych metalowych misek sałatkowych po odcięciu lub zeszlifowaniu krawę-

dzi bocznej (kolnierza). Dobrym rozwiązaniem byłaby kula, ale zdobycie metalowej kuli (pustej w środku) jest dosyć trudne (kule od dużych łożysk odpadają, są za ciężkie!).

Wielu konstruktorów, w tym także my, robi toroid z aluminiowej elastycznej rury wentylacyjnej – rurę taką można łatwo wyginać i formować. Stosuje się ją do przewodów kominowych (wygląda jak harmonijka), powinna ona mieć średnicę 10 lub 11cm. W naszym przypadku jest to właśnie taka rura. Toroid ten spisuje się świetnie i wbrew pozorom otrzymujemy z niego pioruny, a nie iskry (pomimo „harmonijkowego” kształtu). Po uformowaniu okręgu rurę taką zwyczajnie lutujemy, najlepiej lutownicą transformatorową z użyciem dużej ilości cyny i kalafonii (to naprawdę da się zrobić, jak ktoś nie wierzy, zawsze może skleić). Średnica toroidu powinna być 2 do 3 razy większa od średnicy rury, na której nawinięte jest uzwojenie wtórne części rezonansowej. Takie toroidy są najczęściej stosowane ze względu na łatwość konstrukcji. Tak więc nie ma sensu bawić się (chyba że się komuś nudzi) w oklejanie go taśmą aluminiową, czy szpachlowanie i szlifowanie itp.

Łukasz Bajda

Radosław Szymczycha

Ciąg dalszy w kolejnym numerze EdW.