

# KONDENSATORY część 1

Ostatnio zajmowaliśmy się rezystorami, dziś porozmawiamy o kondensatorach.

Czy pamiętasz stare, czarno-białe telewizory jak choćby Belweder, Koral, Tosca czy Wisła? Czy zdarzyło ci się może spotkać w nich rozwijające się kondensatory?

Młodszym czytelnikom trzeba wyjaśnić, że w tamtych zamierzonych czasach królowały kondensatory w postaci zwiniętej wstęgi folii aluminiowej i impregnowanego papieru, klejone czymś podobnym z wyglądu do krochmalu. Stąd zresztą nazywane były potocznie kartoflakami. Te majstersztyki ówczesnego przemysłu elektrotechnicznego oprócz cech właściwych kondensatorom miały przedziwną skłonność do stopniowego rozwijania się. Najprostszą formą "naprawy" było obcinanie odwiniętych zwojów, żeby metalowa folia nie spowodowała zwarcia. Cała sprawa jest tym bardziej intrygująca, ponieważ znana była opinia, iż jeśli w starym, czarno-białym "ruskim" telewizorze zaczynają rozwijać się kondensatory, to zaczyna on lepiej odbierać. Z czasem jednak zaprzestano produkcji takich "kartoflaków" i niestety od tej pory nikt nie wiedział już co zrobić, żeby poprawić odbiór w starych radzieckich telewizorach.

Tyle anegdoty wystarczy. Nie będę ci opowiadał zabawnych perypetiów i z wyschniętymi elektrolitami, masz się przecieć dziś w końcu czegoś konkretnego nauczyć.

Jeśli wkładano ci do głowy mądre rozważania o wyższości kondensatorów próżniowych nad powietrznymi, olejowych nad suchymi czy mikowych nad papierowymi, spróbuj o tym wszystkim szybko i skutecznie... zapomnieć.

Ja też chodziłem do szkoły; na zajęciach z materiałoznawstwa i podzespołów uczono mnie mądrych klasyfikacji, potem okazało się, że prawie wszystkie wiadomości są delikatnie mówiąc nieświeże i nieprzydatne w praktyce.

Dziś kondensatorów papierowych, mikowych, szklanych, olejowych w typowym sprzęcie nie spotkasz. Masz natomiast do dyspozycji trzy główne grupy kondensatorów:

- elektrolityczne



- ceramiczne
  - z tworzyw sztucznych.
- Na początek zajmiesz się pierwszą grupą.

## Kondensatory elektrolityczne

Przyznam ci się, że choć ze wspomnianych przedmiotów miałem oceny bardzo dobre, bardzo długo nie rozumiałem jak naprawdę zbudowane są i działają kondensatory elektrolityczne. Dopiero lektura oryginalnych katalogów firmowych rozjaśniła mi obraz całej sprawy. Śmiem więc przypuszczać, iż ty też możesz mieć podobne kłopoty, pozwól więc że opowiem ci trochę o budowie kondensatorów. Nie jest to jakaś sucha teoria, szybko przekonasz się o praktycznej przydatności takiej wiedzy. Nie będzie to także suchy wykład, ponieważ zaczniesz od rozebrania kilku mokrych "elektrolitów". Serdecznie cię zachęcam, żebyś rzeczywiście przeprowadził zalecane eksperymenty, a nie tylko poprzestał na przeczytaniu tego artykułu. Jedną taką lekcją praktyczną prawdopodobnie da ci więcej niż teoria wykładana w szkolnym roku.

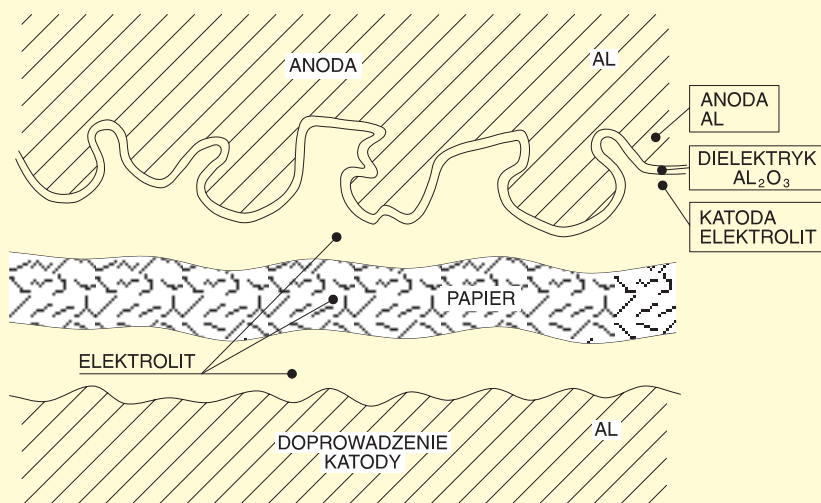
Zebrałem dla ciebie w zwięzłej postaci podstawowe wiadomości o dostępnych kondensatorach i ich parametrach, ale stosowne

ramki podam ci w jednym z następnych odcinków. A tymczasem opowiem ci o popularnych "elektrolitach".

## Kondensatory elektrolityczne aluminiowe

Dawno już niczego nie zepsułeś, więc możesz na dobry początek rozebrać kilka typowych "elektrolitów", ale pod warunkiem, że zachowasz ostrożność, nie skaleczysz się przy otwieraniu obudowy i nie poplamisz rąk ani otoczenia elektrolitem. W zasadzie elektrolit nie powinien być żrący ani trujący, ale w nowszych kondensatorach mogą występować "wynałazki" o nie wiadomych właściwościach. Na wszelki wypadek na czas rozwijania zwijki załóż gumowe rękawice.

Jeśli już oddzieliłeś wilgotny papier, przyjrzyj się dokładnie obu aluminiowym elektrodom. Czy mają jednakowy wygląd? W małych kondensatorach zapewne wyglądają tak samo. Jednak w starszych krajowych elektrolitach o większych wymiarach folia dodatnia - anoda jest bardziej matowa i szara niż folia ujemna. Jak zauważyłeś folia anodowa za-



**Rys. 1 Przekrój kondensatora aluminiowego mokrego**

wsze jest matowa. Pod mikroskopem okazuje się, iż jest bardzo chropowata, przypomina trochę wyglądem skalistą pustynię. Dzięki temu rzeczywista powierzchnia dodatniej okładziny - anody jest znacznie większa niż wynikałoby to z wymiarów folii. Tak znaczne powiększenie powierzchni (rozwiniecie) uzyskuje się przez chemiczne trawienie folii.

Wiadomo, że według definicji każdy kondensator składa się z dwóch przewodników (okładek) przedzielonych warstwą dielektryka (izolatora). Wydaje się, że okładki mamy. Co jednak jest dielektrykiem w naszych kondensatorach? Czy papier? Nie! Przecież jest on nasączony przewodzącym elektrolitem! No więc co?

Czy wiesz, że aluminium w obecności tlenu natychmiast pokrywa się cieniutką warstwą nieprzewodzącego tlenku ( $Al_2O_3$ ). Co najważniejsze, tlenek ten jest znakomitym izolatorem i ma dużą wartość stałej dielektrycznej. Wyobraź sobie, że warstwa tlenku glinu o grubości  $1\mu m$  ( $1/1000$  mm) wytrzyma bez przebicia napięcie rzędu 700V!

Masz już kilka ważnych informacji: w kondensatorach elektrolitycznych izolatorem jest warstewka tlenku glinu o grubości znacznie mniejszej niż  $1\mu m$ , a dla zwiększenia po-

**Może słyszałeś**, że kondensatory mogą się przeformować na inne napięcie - jest to częściowo prawda. Kondensator pozostawiony pod napięciem nieco większym od nominalnego przeformuje się na to napięcie... pod warunkiem, że wcześniej nie wybuchnie. Nie polecam ci więc tej metody "ulepszania" kondensatorów.

wierzni czynnej, rozwija się powierzchnię folii anodowej w procesie trawienia chemicznego.

Jakie znaczenie ma w tym elektrolit? Otóż tak naprawdę to elektrolit jest elektrodą ujemną, natomiast drugi pasek folii aluminiowej, potocznie zwany katodą, w rzeczywistości jest tylko doprowadzeniem prądu do tej prawdziwej, płynnej katody. Ponadto tylko zastosowanie jakiegoś "wścibskiego" elektrolitu, który wciśnie się w każdą dziurę, pozwala wykorzystać zalety rozwiniętej powierzchni anody. A porowaty papier pełni rolę zbiornika ciekłego elektrolitu oraz zabezpiecza przed bezpośrednim zetknięciem obu metalowych elektrod, co mogłoby spowodować uszkodzenie delikatnej warstwy tlenku i zwarcie. Uproszczony przekrój jednej warstwy kondensatora elektrolitycznego mokrego możesz obejrzeć na **rysunku 1**.

Teraz już wiesz, na czym polega tajemnica dużej pojemności i małych wymiarów kondensatorów elektrolitycznych. Decydujące znaczenie mają:

- duża, trawiona powierzchnia,
- bardzo cienka warstwa dielektryka ( $Al_2O_3$ )
- znaczna stała dielektryczna  $Al_2O_3$ .

Pozostaje jednak jeszcze istotny problem: dlaczego typowe kondensatory elektrolityczne muszą być polaryzowane napięciem stałym?

Otóż "winny" jest elektrolit. Zanim konkretnie odpowiem na to pytanie, muszę ci przypomnieć pewne podstawowe wiadomości.

Jak pewnie pamiętasz, w elektrolitach nośnikami ładunku elektrycznego są jony. W elektrolicie naszych kondensatorów jony

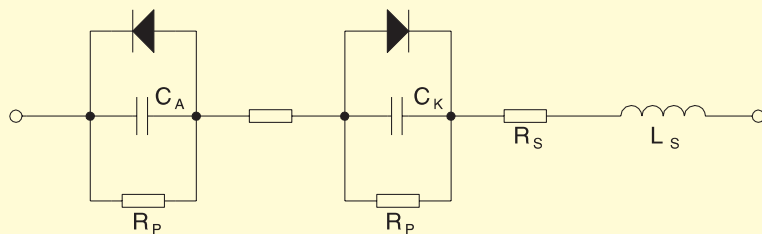
ujemne zawierają tlen, dodatnie wodór. Nie powiedziałem ci też dotychczas jak wytwarza się warstewkę tlenku glinu. Otóż naturalna warstewka tlenku jest nadzwyczaj cienka, rzędu  $1...2nm$  i dla uzyskania grubszych warstw stosuje się metodę elektrochemiczną polegającą ogólnie rzecz biorąc na podłączeniu do kondensatora w trakcie produkcji źródła napięcia stałego. W obwodzie biegun dodatni źródła-anoda kondensatora-elektrolit-biegun ujemny popłynie prąd stały. Ponieważ w elektrolicie przepływ prądu polega na przemieszczaniu jonów, a jony ujemne zawierają tlen, więc w tym procesie zwanym formowaniem, na powierzchni anody wytwarza się warstwa tlenku glinu, a z drugiej strony jako produkt uboczny powstaje gazowy wodór. Powstająca stopniowo warstwa izolującego tlenku coraz bardziej zmniejsza wartość płynącego prądu, a po pewnym czasie prąd stabilizuje się na nieznacznej wartości i proces tworzenia tlenku ustaje. Zwróć uwagę, że grubość tak powstałej warstwy tlenku zależy od przyłożonego napięcia - tzw. napięcia formowania, które zawsze jest większe o 20...100% od założonego nominalnego napięcia kondensatora. Dlatego napięcie formowania powinno być większe od napięcia

**Czy "elektrolity" mogą być polaryzowane napięciem stałym o odwrotnej biegunowości?**

Nie jest do końca prawdą, że kondensatory elektrolityczne nie mogą pracować przy odwrotnej biegunowości przyłożonego napięcia. Jak wynika z zamieszczonych rozważań mogą pracować przy napięciach, które nie spowodują formowania folii katodowej (i nieodłącznego gazowania). Dlatego niektóre katalogi podają dopuszczalne stałe napięcie wsteczne równe 2V, jednak bezpieczną wartością wydaje się napięcie 1V. Napięcie to wynika z grubości istniejącej, naturalnej warstwy tlenku na powierzchni folii katodowej. W takiej sytuacji należy się jednak liczyć ze zwiększonymi prądami upływu.

pracy? Ponieważ w czasie pracy przez kondensator praktycznie nie powinien płynąć prąd stały (tzw. prąd upływu).

Jeśli w przyszłości "wgrzyziesz się" w katalogi, to znajdziesz wykonania oznaczone LL (dawniej typ 1) oraz GP (dawniej typ 2). LL jest skrótem od Long Life (długowieczny), a GP - General Purpose (ogólnego przeznaczenia).



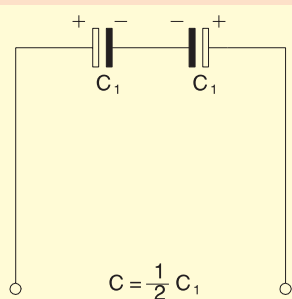
Rys 2 Schemat kondensatora elektrolitycznego

czenia). Kondensatory LL są formowane wyższym napięciem niż kondensatory GP o takim samym napięciu nominalnym. Wyższe napięcie formowania daje grubszą warstwę tlenku, a w konsekwencji mniejszy prąd upływu i mniejsze prawdopodobieństwo uszkodzenia. Grubsza warstwa dielektryka daje jednak mniejszą pojemność, więc kondensatory LL mogą mieć większe wymiary niż kondensatory o takich samych nominalach w wykonaniu zwykłym.

Z podanych informacji możesz wyciągnąć kilka ważnych wniosków.

Po pierwsze, chyba już rozumiesz, że uszkodzenie kondensatora podwyższonym napięciem nie jest spowodowane przebiciem warstwy tlenku, tylko powtórny rozpoczęciem procesu formowania, związanego nieodłącznie z wydzielaniem gazu, który w końcu powoduje eksplozję kondensatora.

Może też miałeś do czynienia z "elektrolitami", które... wyschły. Znowu wypadaloby przypomnieć wyroby dawnego ZSRR, ale spuśćmy na tę sprawę zasłonę milczenia. Jeśli obudowa kondensatora nie będzie szczelna, podwyższone ciśnienie związane z normalnym gazowaniem podczas pracy może spowodować utratę elektrolitu i z kon-



Czy można samodzielnie zrobić kondensator niebiegunowy?

Tak! I to w prosty sposób przez przeciwnobne połączenie szeregowo dwóch jednokowych kondensatorów biegunowych (katoda do katody). Pojemność takiego zestawu jest równa połowie pojemności jednego kondensatora.

densatora elektrolitycznego zrobi się stopniowo dobry kondensator powietrzny, tyle że o pojemności kilkudziesięciu... pikofaradów. Dlatego niech nie przychodzi ci do głowy, żeby "odpowietrzyć elektrolita" przez wywiercenie w obudowie maleńkiej dziurki.

Czy rozumiesz teraz, dlaczego kondensatory elektrolityczne z ciekłym elektrolitem składowane przez dłuższy czas bez napięcia mają znaczny prąd upływu, który po niedługim czasie pozostawiania pod napięciem zmniejsza się do pomijalnej wartości? Po prostu podczas składowania cieniuteńka warstwa tlenku ulega drobnym uszkodzeniom, które później po podaniu napięcia są samoczynnie reperowane przez jony ujemne dążące do anody.

Dlatego w układach, gdzie wymagana jest niezawodność i pewność działania, kondensatory elektrolityczne muszą pozostawać pod napięciem, wtedy w sposób ciągle następujący proces regeneracji, a upływność i pojemność mieszczą się w przewidzianych granicach.

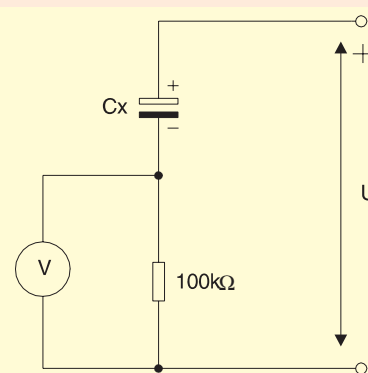
Pomału dochodzimy wreszcie do podsumowania odpowiedzi na pytanie dlaczego omawiane kondensatory powinny być spolaryzowane napięciem stałym. Jak już wiesz, jony ujemne dochodzące do anody powodują powstawanie tlenku glinu. Jednak jeśli odwróci się biegunowość przyłożonego napięcia stałego, to nasza aluminiowa anoda staje się katodą. Wędrują teraz do niej lekkie jony dodatnie, które bez większych kłopotów przedostają się przez warstwę tlenku, a po dołączeniu elektronu wydziela się gazowy wodór. Płynący prąd stały może mieć dużą wartość, bowiem warstwa tlenku glinu nie jest znaczącą przeszkodą dla wścibskich jonów dodatnich, a wydzielający się gazowy wodór dodatkowo niszczy istniejącą już warstwę tlenku. Znowu kondensator ulegnie uszkodzeniu wskutek eksplozji związanej z wydzielaniem gazu. Zauważ, że w kondensatorze elektrolitycznym występuje zjawisko jednokierunkowego przewodzenia prądu, podobnie jak w diodzie. Dlatego na schematach zastępczych kondensatorów elektrolitycznych poja-

wia się symbol diody.

Ktoś uważny zauważy jednak, że przecież po odwróceniu biegunowości przyłożonego napięcia rolę anody pełnić będzie druga aluminiowa elektroda. Rzeczywiście na to wygląda. Czy to nie zmieni sytuacji? Nie, ponieważ ta druga elektroda pełniąca wcześniej rolę doprowadzenia do płynnej katody nie była uformowana i pokryta jest jedynie naturalną cieniutką warstwą tlenku (stąd jasna, błyszcząca folia katodowa w niektórych kondensatorach). Owszem, przy przepływie "odwrotnego" prądu zacznie na niej narastać warstwa izolacyjnego tlenku, zanim jednak zdąży się ona utworzyć i ograniczyć prąd, kondensator eksploduje!

A jeśli w procesie produkcji byłyby uformowane obie folie aluminiowe?

Genialna myśl! Wtedy przy danej biegunowości jedna z elektrod pełniłaby rolę anody, a po zmianie biegunowości - druga! Może



Rys. 3 Układ pomiarowy prądu upływu

cię zaskoczę - takie kondensatory są produkowane - są to kondensatory elektrolityczne bipolarne, zwane też niebiegunowymi. Mogą one pracować bez ograniczeń przy napięciu zmiennym bez składowej stałej. W kraju kondensatory takie z oznaczeniami BPT, BPU i BPE były produkowane (a może jeszcze są) przez filię Elwy w Kołobrzegu.

Dlaczego więc nasze popularne "elektrolity" nie są wykonywane w ten sposób? Powody są przynajmniej dwa: kondensatory niebiegunowe mają zdecydowanie większy prąd upływu, a ponadto przy danych wymiarach ich pojemność jest prawie dwukrotnie mniejsza niż odpowiednich kondensatorów bipolarnych. Wynika to z szeregowego połączenia pojemności obu okładek. Pokazuje to **rysunek 2**. Co prawda w kondensatorach biegunowych pojemność jest tak samo wypadkową wspomnianych dwóch pojemności.

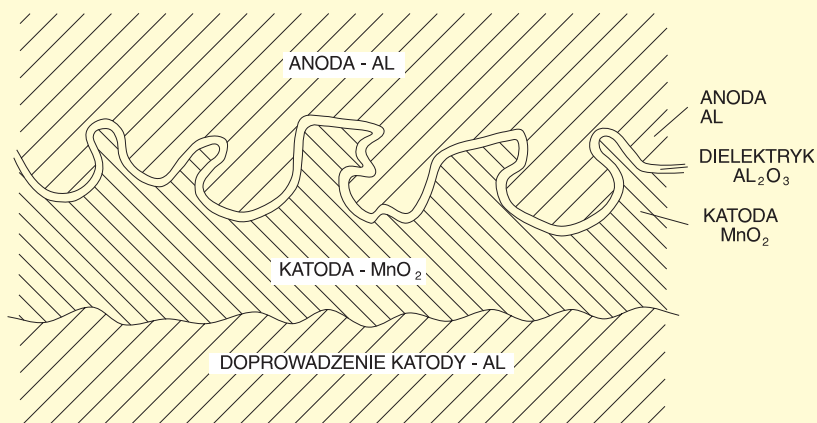
## LISTY OD PIOTRA

Jednak z uwagi na znikomą grubość warstwy tlenku na ujemnej okładce (a tym samym dużą pojemność), decydująca jest pojemność związana z anodą.

A teraz pora na praktyczne sprawdzenie przeczytanych wiadomości. Proszę cię jednak, nie sprawdzaj jak wybuchają kondensatory - wybuchają z hukiem, dymem i... nazwijmy to zapachem. Wiem, bo parę razy w życiu odwrotnie wlutowałem elektrolita w płytkę. A znam też paru gości, którzy mówią, że mieli szczęście, bo rozerwana obudowa kondensatora nie trafiła ich w oko, tylko przeleciała obok ucha.

Proszę cię jednak, sprawdź prądy upływu długo nieużywanych kondensatorów o różnych nominalach przy pierwszym włączeniu i po kilku minutach pozostawiania pod napięciem. Sprawdź też prądy upływu dobrze zformowanych kondensatorów aluminiowych o nominalach, powiedzmy 10, 100 i 1000  $\mu\text{F}$  przy różnych napięciach polaryzujących. Nie przekrocz tylko ich napięcia nominalnego. Będziesz miał wyobrażenie jakiego rzędu mogą być prądy upływu, Pomoże ci to zrozumieć dlaczego trzeba być ostrożnym przy stosowaniu aluminiowych "elektrolitów" w układach czasowych zawierających rezystory o nominalach rzędu megaomów i dlatego w układach wymagających dużej niezawodności stale powinny one pozostawać pod napięciem.

Rzadziej spotykaną odmianą są kondensatory aluminiowe stałe, w firmowych katalogach oznaczane solid aluminium capacitors. Różnią się one od popularnych mokrych materiałem katody. Elektroda dodatnią - anodą - nadal jest trawiona folia aluminiowa, a dielektrykiem - tlenek glinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Tym razem katodę stanowi dwutlenek manganu ( $\text{MnO}_2$ ). Pokazuje to rysunek.

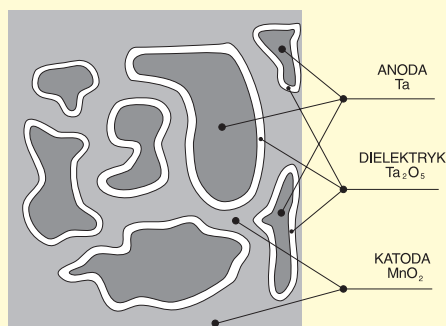


Ponieważ nie ma tu ciekłego elektrolitu, nie ma też jonów w roli nośników prądu. Teoretycznie więc kondensatory takie mogłyby pracować przy dowolnej biegunowości napięcia stałego. Jednak ze względu na obecność choćby śladów wilgoci i związane z tym ryzyko wystąpienia przewodnictwa jonowego niszczącego dielektryk zaleca się polaryzowanie tych kondensatorów odpowiednim napięciem stałym.

### Kondensatory tantalowe

W tych kondensatorach anoda wykonana jest nie z aluminium, tylko ze spiekane go proszku tantalowego. W wyniku spiekania otrzymuje się strukturę porowatą, przypominającą nieco gąbkę - uzyskuje się w ten sposób w niewielkiej objętości bardzo dużą powierzchnię. Następnie, analogicznie jak przy kondensatorach aluminiowych, metodami elektrochemicznymi wytwarza się na powierzchni izolacyjną warstwę pięciotlenku tantalum ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), która podobnie jak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ma bardzo dobre właściwości dielektryczne. Wreszcie porowatą anodę wypełnia się elektrolitem. W popularnych "perełkach" jest to dwutlenek manganu  $\text{MnO}_2$ . Mniej popularne są kondensatory z elektrolitem ciekłym, a właściwie żelowym. W kraju były, a może nawet są produkowane, kondensatory żelowe typu ETO przeznaczone do celów profesjonalnych. Mimo dobrych parametrów, najlepszych z kondensatorów elektrolitycznych, kondensatory tantalowe z ciekłym elektrolitem nie są popularne.

Najczęściej spotyka się "tantal suche". Ich schematyczny przekrój pokazano na rysunku.



Należy pamiętać, że struktura jest trójwymiarowa i wszystkie elementy anody (tantal) narysowane oddzielnie, w rzeczywistości są ze sobą elektrycznie połączone.

Za sprawą dwutlenku manganu, który jest rodzajem półprzewodnika, kondensatory tantalowe mają własności biegunowe. Powinny więc być spolaryzowane napięciem stałym o określonej biegunowości, jednak w niektórych katalogach można znaleźć informację, że dopuszczalna jest polaryzacja napięciem przeciwnym o wartości 5...15% napięcia nominalnego.

Pięciotlenek tantalum jest bardzo odporny na uszkodzenia, dlatego upływność kondensatorów tantalowych jest mniejsza niż aluminiowych, a prądy upływu praktycznie nie zmieniają się nawet po kilkuletnim okresie składowania bez napięcia. Długo nieużywanych "tantal" nie trzeba więc formować, zresztą nie ma to sensu, bo bez elektrolitu zawierającego jony proces formowania nie występuje.

Należy pamiętać, że struktura jest trójwymiarowa i wszystkie elementy anody (tantal) narysowane oddzielnie, w rzeczywistości są ze sobą elektrycznie połączone.

Za sprawą dwutlenku manganu, który jest rodzajem półprzewodnika, kondensatory tantalowe mają własności biegunowe. Powinny więc być spolaryzowane napięciem stałym o określonej biegunowości, jednak w niektórych katalogach można znaleźć

Sprawdź też parametry posiadanych "tantal". Czy zauważyłeś różnice?

Eksperymenty możesz przeprowadzić w układzie z **rysunku 3** używając cyfrowego voltomierza. Prąd obliczysz dzieląc zmierzone napięcie przez rezystancję rezystora.

Zdobyłeś oto sporo ważnego materiału o "elektrolitach". Zanim zajmiesz się czymś innym zapytaj sam siebie, czy wszystko zrozumiałeś. Jeśli nie, przeczytaj materiał jeszcze raz i postaraj się poukładać pod czaszką dotychczasowe i nowe informacje.

**Piotr Górecki**