

Lampy elektronowe, część 1

Lampy elektronowe narodziły się dawno, ale są używane do dziś, zwłaszcza lampy obrazowe. Wielu współczesnych elektroników uważa, że lampy są absolutnym przeżytkiem, jednak statystyki handlowe wykazują ciągły wzrost obrotów na „lampowym” rynku. Dlaczego? Odpowiedź znajdziecie w artykule....

Lampy elektronowe są do dzisiaj stosowane w wielu dziedzinach. W porównaniu do mikroprocesorów, zawierających setki tysięcy tranzystorów, lampy nie reprezentują najświeższych osiągnięć technologicznych, ale zajmują ciągle swoje miejsce we współczesnej technice. Wystarczy usiąść przed telewizorem, aby skorzystać z jednego z przyrządów termoelektronowych. Kineskop (lampa elektronopromieniowa) dzięki niskiemu kosztowi i wysokiej jakości jest do dzisiaj najbardziej rozpowszechnionym ekranem telewizyjnym. Lampy używane są także w innych dziedzinach, zwłaszcza w zakresie wielkich mocy. Na przykład lampy elektronowe stosuje się we wzmacniaczach antenowych dużych mocy w nadajnikach radiowych.

Poza tym wielu entuzjastów audio woli wzmacniacze lampowe twierdząc, że dźwięk z nich uzyskiwany jest naturalniejszy od „dźwięku półprzewodnikowego”. Zainteresowanie sprzętem lampowym rzeczywiście wzrasta, i w ofercie handlowej można znaleźć szereg nowych produktów, zarówno gotowych, jak i do własnego montażu.

Odkrycie Edisona

Fundamenty pod odkrycie lamp elektronowych zostały położone na wiele lat przed opatentowaniem pierwszych wynalazków z tej dziedziny. Wszystko zaczęło się od obserwacji, jakiej dokonał sławny wynalazca amerykański - Thomas Edison.

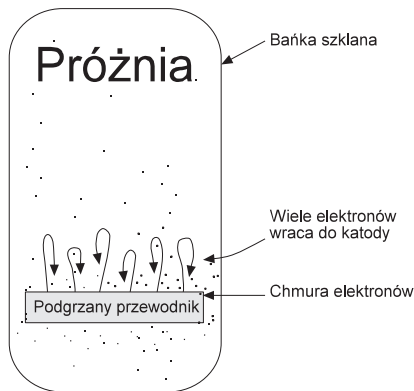
Okolo 1880 r. pracował nad sposobem przedłużenia żywotności żarówek. Szybkie ich przepalanie się było głównym ograniczeniem ekspansji oświetlenia elektrycznego. Jednym z efektów, który temu towarzyszył, było ciemnienie szkła wewnątrz balonika żarówki już po kilku godzinach jej świecenia. Rozumując, że ciemnienie to jest wywoływane przez cząsteczki emitowane przez żarnik, Edison umieścił w baloniku żarówki dru-

gą elektrodę i nadał jej potencjał odpychający te cząsteczki. Przy tej okazji odkrył, że pomiędzy tą elektrodą a żarnikiem może przepływać prąd elektryczny, ale tylko w jednym kierunku. Ciekawe, że Edison nie próbował wykorzystać tego efektu, nadał mu tylko nazwę efektu Edisona. Dopiero Anglik, profesor John Ambrose Fleming wynalazł zastosowanie tego odkrycia.

Fleming był doradcą Marconiego i to on zaprojektował nadajnik, za pomocą którego w roku 1901 wysłano pierwszą depezę przez Atlantyk. Fleming zrozumiał wtedy, że najsłabszym ogniwem ówczesnych urządzeń radiowych był sposób detekcji sygnałów. Używano wówczas urządzeń o bardzo niskiej czułości, zwanych koherecami. Fleming zmagął się z tym zagadnieniem przez szereg lat, aż w końcu - jak napisał - szczęśliwy pomysł wpadł mu do głowy pewnego ranka, gdy szedł przez Gower Street w centrum Londynu. Poleciał swojemu asystentowi w laboratorium przygotowanie żarówki z efektem Edisona i sprawdzenie, czy może ona posłużyć do detekcji fal radiowych. Wynik okazał się pozytywny i w roku 1904 Fleming opatentował swój pomysł, nazywając go zaworem (ang. valve) oscylacji, z powodu jednokierunkowego, jak gdyby zaworowego, oddziaływania na sygnały radiowe.

Za Atlantykem inny wynalazca, Lee de Forest, do „zaworu” Fleminga dodał dalszy stopień, umieszczając w szklanym baloniku trzecią elektrodę. Może się dzisiaj wydawać zastanawiające, dlaczego de Forest używał tej lampy tylko jako detektora, nie zdając sobie sprawy z tego, że może ona posłużyć do wzmacniania sygnałów.

Zjawisko wzmacniania odkryto dopiero około roku 1911. Dostrzeżono wtedy kryjące się za tym możliwości i szybko zabrano się do ich wykorzystywania. Sam Lee de Forest zbudował wzmacniak telefoniczny i chociaż jego osiągi



Rys. 1.

były bardzo mizerne, to przedsiębiorstwo telefoniczne AT&T dostrzegło jego potencjalne możliwości.

Udoskonalenia

Jakość pierwszych lamp była kiepska. Początkowo uważano, że pewna ilość gazu wewnątrz bańki jest im potrzebna do działania. Ale w roku 1915 Amerykanin Irvin Langmuir wykazał, że całkowita próżnia poprawia ich działanie. W wyniku tego wprowadzono do użytku nowe, znacznie lepsze lampy próżniowe.

Pomimo tych usprawnień, stosowanie pierwszych lamp napotykało na trudności. Największym problemem było ograniczenie ich skłonności do oscylacji. Na różny sposób próbowano zmniejszyć pojemność pomiędzy anodą i siatką. Jeden z inżynierów, H. J. Round, wprowadził w roku 1926 istotne udoskonalenie: czwartą elektrodę w postaci siatki ekranującej, umieszczonej pomiędzy siatką sterującą a anodą. Zredukowała ona szkodliwą pojemność niemal do zera. Nie było to jednak jeszcze rozwiązanie ostateczne. Konstrukcję tę udoskonalono w roku 1929 dodając jeszcze jedną elektrodę, siatkę hamującą. Poprawiła ona kształt charakterystyki lampy, zwracając elektrony emitowane z anody na skutek zjawiska emisji wtórnej.

Żarzenie pośrednie

Następne ważne udoskonalenie wiązało się z działaniem żarników. Początkowo żarnik był równocześnie katodą. Odkryto jednak, że rozdzielenie funkcji żarzenia od funkcji emisji elektronów jest korzystne i wprowadzono katody żarzone pośrednio. Umożliwiło to

także rozdzielanie dwóch źródeł zasilania: niskiego napięcia żarzenia i wysokiego napięcia anodowego. Dotychczas trzeba było żarzyć każdą lampę z osobnej baterii, aby zapewnić jej właściwe warunki działania. Było to rozwiązanie bardzo kosztowne.

Wzrost i spadek

Po przewyciężeniu podstawowych trudności, w latach trzydziestych zastosowanie lamp elektronowych zaczęło szybko wzrastać. Radioodbiorniki znalazły się w dużej części gospodarstw domowych, a produkcja lamp wzrosła do milionów sztuk rocznie. Druga wojna światowa jeszcze bardziej przyczyniła się do ich unowocześniania i do wzrostu produkcji. W latach pięćdziesiątych wprowadzono tzw. lampy miniaturowe. Ale wkrótce lampy elektronowe napotkały konkurencję półprzewodników. Tranzystor został wynaleziony w roku 1948, ale trzeba było dwudziestu lat, aby w pełni dojrzał. Lampy zostały prześcignięte przez wydajniejsze i bardziej niezawodne tranzystory.

Okres lamp przeminął bardzo szybko, a przyrządy termoelektronowe zostały odsunięte do kilku wyspecjalizowanych dziedzin, chociaż produkcja lamp elektronopromieniowych nadal rośnie. Wydaje się jednak, że wraz z rozwojem nowych rodzajów wyświetlaczy, prawdopodobnie i z tego obszaru zastosowania lampy elektronowe zostaną wkrótce wyrugowane.

Zasada działania

Działanie wszystkich lamp elektronowych opiera się na zjawisku zwanym termiczną emisją elektronów. Prąd elektryczny jest to przepływ elektronów w przewodniku. Do jego przepływu w strukturze metalu są konieczne wolne elektrony. Prawie zawsze pozostają one wewnątrz przewodnika. Jeżeli jednak przewodnik zostanie rozgrzany, to energia elektronów wzrasta i niektóre z nich nabierają energii wystarczającej do pokonania zatrzymujących je sił i uciekają na zewnątrz.

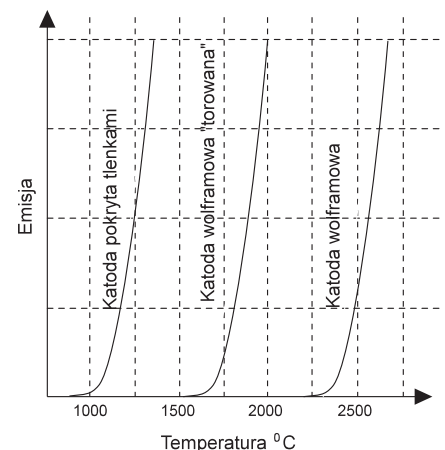
Z chwilą ucieczki elektronu ładunek przewodnika staje się dodatni. Ale ładunek elektronu jest ujemny, a więc powstaje siła

przyciągająca elektrony z powrotem. Gdy zachodzi emisja termiczna, wokół emitującej je powierzchni formuje się chmura elektronów, jak to pokazuje rys. 1, która hamuje emisję dalszych elektronów. Podobnie dzieje się w żarówce, gdy jej rozżarzone włókno promieniuje światło.

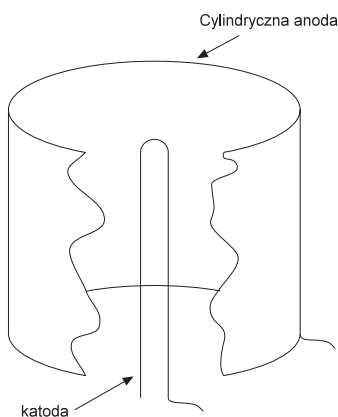
Pod wielu względami emisja termoelektronowa bardzo przypomina parowanie z powierzchni cieczy. Cząsteczki normalnie pozostają w cieczy, ale gdy nabędą dostatecznej energii, to przewyciężają powściągające je siły i opuszczają ciecz.

Wysokie temperatury

Aby emisja termiczna mogła zajść katoda musi osiągnąć temperaturę powyżej 900°C. Temperatury topnienia metali zwykle używanych jako przewodniki jest niższa, albo niewiele przewyższa 900°C, nie nadają się więc one na katody. Do tego celu jest potrzebny metal o znacznie wyższej temperaturze topnienia i możliwie wysokiej temperaturze parowania. Takim metalem jest wolfram. Torowanie wolframu (wiązanie toru w jego warstwach powierzchniowych) ułatwia emisję z niego elektronów i umożliwia obniżenie temperatury katody. Pokrywanie katody warstwą tlenków niektórych metali (tzw. katoda tlenkowa) jeszcze bardziej ułatwia emisję elektronów i pozwala obniżyć temperaturę. Wolfram jest jednakże bardziej wytrzymały i odporniejszy na silne pola elektryczne, które występują w lampach wysokonapięciowych. Właściwości poszczególnych rodzajów katod są zilustrowane na rys. 2.



Rys. 2.

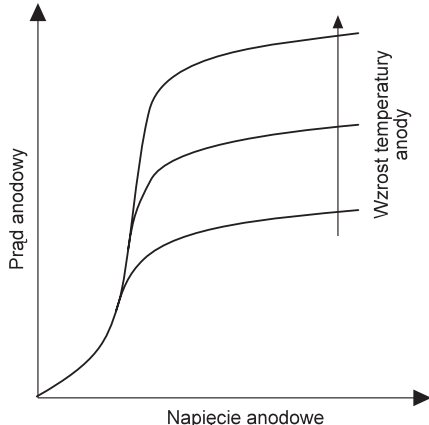


Rys. 3.

Powszechnie używane są katody tlenkowe, wykonywane przez pokrycie podkładu niklowego mieszaniną węglanów baru i strontu. W trakcie procesu produkcyjnego węglany zostają przetworzone w tlenki, a dwutlenek węgla jest odprowadzony. Wydajność katod tlenkowych jest bardzo wysoka, są one jednak bardziej wrażliwe na różne czynniki. Łatwiej na przykład ulegają „zatruciu“ śladowymi ilościami gazów (które mogą być uwolnione ze struktur lampy przy ich nadmiernym rozgrzaniu) lub uszkodzeniu bombardowaniem jonowym tego samego pochodzenia.

Najprostsza lampa

Najprostszą lampą elektronową jest dioda. Składa się ona z dwóch elektrod (i stąd jej nazwa): katody i anody. Jej struktura (elementy znajdują się w opróżnionej szklanej bańce), jest pokazana na rys. 3. W czasie działania katoda jest podgrzewana prądem, który przez nią przepływa, a z jej powierzchni są emitowane w próżnię elektrony. Anoda będąca pod dodatnim potencjałem względem katody przyciąga elektrony. Na drodze do



Rys. 4.

anody elektrony powinny napotykać na możliwie najmniejszą liczbę jonów gazu. Kolidując z jonami eliminują je i rozpraszają, zmniejszając prąd w lampie. Anoda nie jest podgrzewana, jej potencjał jest dodatni, a więc elektrony nie mogą jej opuszczać. Przepływ elektronów może odbywać się zatem tylko od katody do anody. Inaczej mówiąc, dioda termoelektronowa działa jak mechanizm przepuszczający prąd elektryczny w jednym tylko kierunku. Może być używana do wielu zadań, od prostowania prądu zasilającego do detekcji i demodulacji sygnałów radiowych.

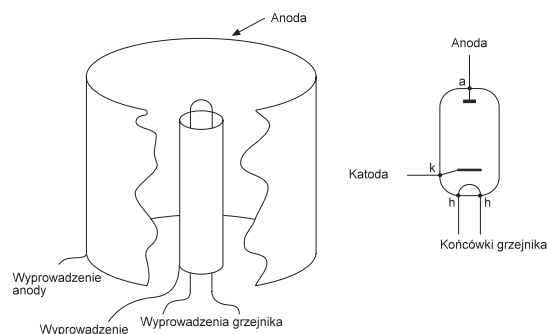
Charakterystyki diody

Gdy elektrony opuszczają katodę, tworzą tzw. chmurę elektronową, czyli ładunek przestrzenny, który nie dopuszcza do emisji dalszych elektronów. Pod wpływem dodatniego potencjału anody docierają do niej elektrony z ładunku przestrzennego, który uzupełnia ubytek dopuszczając dopływ elektronów z katody. Gdy wzrasta napięcie anody, rośnie także strumień dopływających do niej elektronów. Pole elektryczne pomiędzy katodą a ładunkiem przestrzennym automatycznie reguluje strumień uzupełniających go elektronów.

Wzrost prądu anodowego pod wpływem coraz większego napięcia anodowego może w końcu doprowadzić do zaniku ładunku przestrzennego, gdy zdolność emisyjna katody zostanie w całości wykorzystana. Dalszy wzrost prądu anodowego jest wtedy możliwy tylko przez podwyższenie temperatury katody. Ilustrują to krzywe na rys. 4.

W pierwszych lampach katoda była równocześnie żarnikiem. Rozwiązanie takie narzucało różne ograniczenia układowe i zazwyczaj wymagało stosowania dużych baterii do żarzenia katod.

Wprowadzono więc katody podgrzewane pośrednio, w formie rurki zamkniętych czasem od góry. Wewnątrz rurki jest umieszczony żarnik, podgrzewający katodę przez promieniowanie. Konstrukcję tę przedstawia rys. 5. Żarnik znajduje się w bezpośredniej bliskości



Rys. 5.

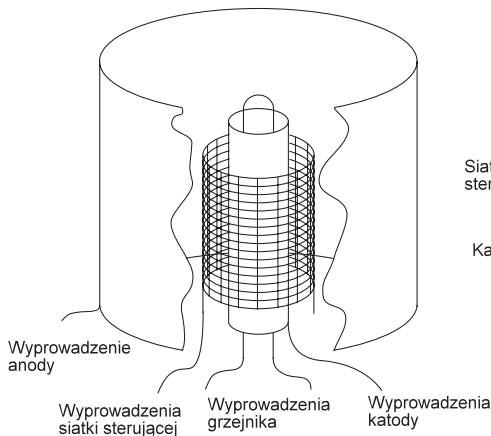
katody i sprawnie przekazuje jej dostateczną ilość ciepła, równocześnie będąc od niej izolowany elektrycznie. Dzięki temu katody różnych lamp mogą być pod różnymi napięciami, a szereg lamp może być zasilany ze wspólnego źródła, nie wywołując żadnych konfliktów. Jest to szczególnie ważne w układach, w których na katodach poszczególnych lamp występują różne dodatnie względem masy napięcia, o czym będzie później mowa.

Drugą zaletą pośrednio żarzonych katod jest możliwość stosowania napięcia zmiennego do ich podgrzewania. Nie było to możliwe w przypadku katod żarzonych bezpośrednio.

Trioda

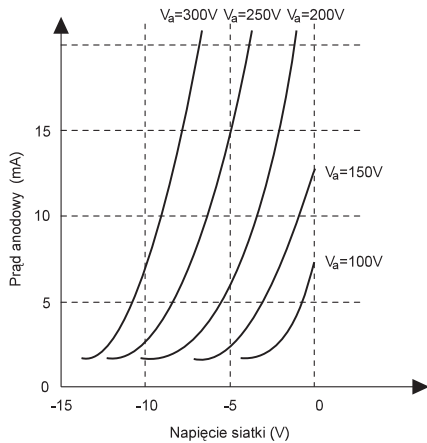
Zastosowania diod termoelektronowych były wielorakie. Jednak dopiero pojawienie się triody nierozzerwalnie związało lampy termoelektronowe z technologią radiową i zapoczątkowało nową erę elektroniki.

Trioda powstała z diody przez dodanie trzeciej elektrody. Została ona umieszczona pomiędzy katodą a anodą i nazwana siatką. Jej zadaniem jest sterowanie liczbą elektronów płynących od katody do anody i dlatego została nazwana siatką sterującą. Siatka musi odpowiednio kształtować pole elektryczne pomiędzy katodą a anodą, nie może jednak działać jak ekran i elektrony muszą przez nią przepływać. Może ona przybrać formę cienkiej siatki drucianej, ale zazwyczaj jest zwojem cienkiego molibdenowego lub niklowego drutu w kształcie sprężyny, przyspawanej do dwóch lub kilku wsporników. W różnych lampach siatka może różnić się kształtem, zawsze jednak otacza katodę, jak to ilustruje rys. 6.

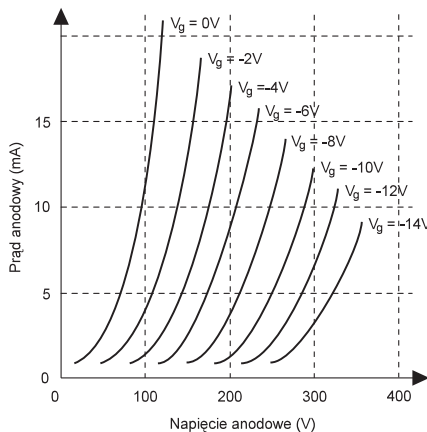


Rys. 6.

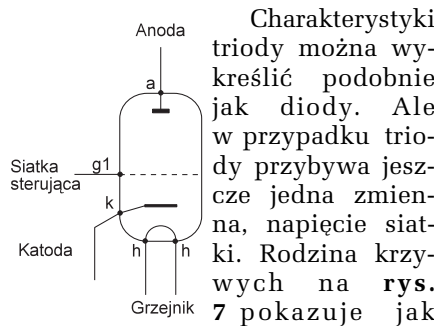
Potencjał siatki w podobny sposób wpływa na ładunek przestrzenny wokół katody jak potencjał anody w diodzie. Prawie zawsze siatka otrzymuje napięcie ujemne względem katody, nie przyciąga więc elektronów. Im bardziej siatka staje się ujemna, tym więcej elektronów odpycha w stronę katody i tym mniejszy jest prąd anodowy. Jeżeli natomiast napięcie siatki względem katody wzrośnie do zera, to prąd w obwodzie anodowym lampy także wzrośnie.



Rys. 7.



Rys. 8.



Charakterystyki triody można wykreślić podobnie jak diody. Ale w przypadku triody przybiera jeszcze jedna zmienna, napięcie siatki. Rodzina krzywych na rys. 7 pokazuje jak zmienia się prąd anodowy w zależności od napięcia siatki. Parametrem tej rodziny jest napięcie anody. Widać jak w miarę wzrostu napięcia siatki (obniżania się wartości bezwzględnej ujemnego napięcia) wzrasta prąd anodowy. Jeżeli małe napięcie zmienne zostanie nałożone na stałe napięcie siatki, wywoła stosunkowo duże zmiany prądu anodowego.

Można także wykreślić rodziny charakterystyk prądu anodowego w zależności od napięcia anodowego, z napięciem siatki w roli parametru. Taka rodzina jest przedstawiona na rys. 8. Na tych krzywych także widać, że im bardziej ujemne jest napięcie siatki, tym mniejszy prąd płynie w obwodzie anodowym.

Zwykle siatka otrzymuje stałe napięcie ujemne, na które nakłada się zmienne napięcie sygnału. Jeżeli jednak z jakiegokolwiek powodu napięcie siatki stanie się dodatnie względem katody, to przestanie odpychać elektrony, zacznie natomiast je przyciągać i w obwodzie siatkowym zacznie płynąć prąd. Zazwyczaj jest to niekorzystne i tak projektuje się układy lampowe, aby do powstawania prądu siatkowego nie dochodziło.

Tetroda

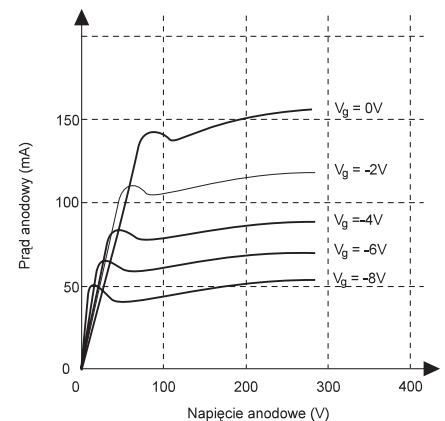
Okazało się, że wprowadzanie dalszych siatek do lamp jest dla ich działania korzystne. Jednym z głównych problemów, na jakie napotkano w układach lampowych, była ich skłonność do samowzbudnych oscylacji. Przyczyną tego zjawiska była stosunkowo duża pojemność pomiędzy siatką i anodą, ułatwiająca przedostawanie się sygnału z obwodu anodowego do siatkowego. Wprowadzenie drugiej siatki pomiędzy siatkę sterującą a anodą radykalnie zmniejszyło tę pojemność, a zatem i skłonność do oscylacji. Z racji jej roli siatkę tę

nazwano siatką ekranującą.

Napięcie tej siatki, w odróżnieniu od siatki sterującej, jest dodatnie, ale zazwyczaj niższe od napięcia anodowego. Wobec tego w jej obwodzie płynie prąd. Konstrukcja siatki jest tak dobrana, aby udział prądu ekranu w prądzie katodowym był jak najmniejszy, a równocześnie, aby w maksymalnie możliwym stopniu zredukowała ona pojemność pomiędzy siatką sterującą a anodą. Współczynnik redukcji tej pojemności daje się doprowadzić do 500, a nawet więcej. W większości wypadków to wystarczało.

Większość elektronów przepływa pomiędzy elementami siatki ekranującej do anody, część ich jednak zostaje przez siatkę przechwycona i składają się one na prąd ekranu. Trzeba dbać, aby prąd ten zbyt nie wzrósł, może to bowiem doprowadzić do zniszczenia siatki ekranowej. Celem obniżenia jej napięcia zasila się ją często przez odpowiedni rezystor redukcyjny i odblokowuje do masy kondensatorem, który eliminuje składową zmienną napięcia ekranu. Jego działanie ekranujące dzięki temu nie doznaje uszczerbku.

Tetroda umożliwia uzyskanie znacznie większego wzmocnienia niż trioda. Można to prześledzić na charakterystykach tych lamp. Na rys. 9 widać, że prąd anodowy zależy w znacznym stopniu od napięcia anodowego. To znaczy, że jeżeli zmiana napięcia siatki wywoła wzrost prądu anodowego, to oporności w obwodzie anodowym wywołają obniżenie się napięcia anodowego, przeciwdziałające wzrostowi prądu. Natomiast w lampie z siatką ekranującą - jak



Rys. 9.

pokazuje **rys. 9** - zależność prądu anodowego od napięcia anodowego jest minimalna.

Ale oprócz wyraźnych zalet tetroda wykazuje także wadę. Przy dużych sygnałach chwilowe napięcie anody może obniżyć się znacznie poniżej napięcia siatki ekrano-

wej. W tych momentach elektrony „wybijane“ z anody na skutek efektu emisji wtórnej podążają do siatki ekranowej. Na skutek tego zjawiska znacznie wzrasta prąd ekranu, a maleje prąd anodowy, i rosą zniekształcenia. Efekt ten jest powodem występowania wi-

docznych na **rys. 9** wyraźnych załamania charakterystyk tetrody.

Ian Poole, EwPE

Artykuł publikujemy na podstawie umowy z redakcją miesięcznika „Everyday with Practical Electronics“.