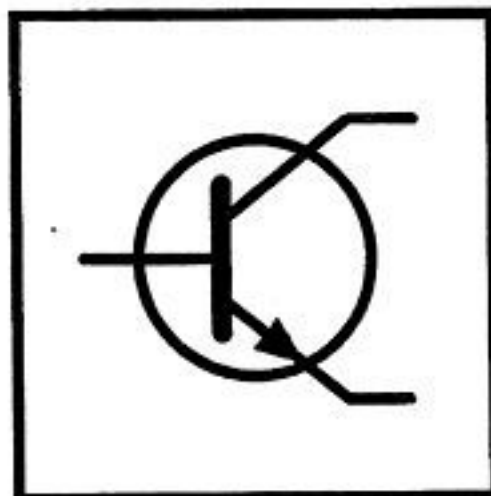


Edward Krupa
Wiktorja Tańska - Krupa

OSCYLOSKOP

**PRACOWNIA
ELEKTRONIKI**



IF UMCS

Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej
Lublin 1997

Spis treści:

1	Termoemisja elektronowa z powierzchni metali	5
2	Ogniskowanie elektronów w lampie oscyloskopowej	10
2.1	Ogniskowanie elektryczne	10
2.2	Ogniskowanie magnetyczne	15
3	Układy odchylające wiązkę elektronową w lampie oscyloskopowej	17
3.1	Elektryczny układ odchylający	17
3.2	Magnetyczny układ odchylający	19
4	Ekran lamp oscyloskopowych	23
5	Krótki opis działania głównych układów oscyloskopu	25
5.1	Odchylenie pionowe plamki	26
5.2	Sonda wejściowa	28
5.3	Odchylenie poziome	29
5.4	Układ wygaszania biegu powrotnego plamki	31
5.5	Układ wyzwiania i synchronizacji	32
5.6	Regulacja jasności plamki – wzmacniacz Z	32
5.7	Pamięć cyfrowa	33
6	Płyta czołowa oscyloskopu	34
6.1	Tor odchylenia pionowego	36
6.2	Tor odchylenia poziomego "horizontal"	37
6.3	Tor wyzwiania "trigger"	38
7	Pomiar częstości drgań przy pomocy krzywych Lissajous	40
8	Przechodzenie sygnałów prostokątnych przez filtry RC: górno- przepustowy i dolnoprzepustowy	42
8.1	Górnoprzepustowy filtr RC — "układ różniczkujący"	42
8.2	Dolnoprzepustowy filtr RC — "układ całkujący"	46
9	Plan ćwiczenia	49

Oscyloskop i różne jego fizyczne odmiany są obecnie szeroko wykorzystywane w wielu dziedzinach badań naukowych i ich praktycznych zastosowań. Oscyloskopy są stosowane w laboratoriach fizycznych, chemicznych i na salach operacyjnych, a jego odmiana w postaci lampy kineskopowej znajduje się dzisiaj w telewizorze w każdym domu.

Dzięki swoim właściwościom rejestrowania zmian przebiegów elektrycznych, zachodzących w bardzo krótkich odcinkach czasu, oscyloskop stał się bardzo przydatnym urządzeniem w rękach naukowców różnych dziedzin, lekarzy i inżynierów. Możliwość rejestrowania na ekranie oscyloskopu przebiegów elektrycznych generowanych w różnego rodzaju przyrządach elektrycznych pozwala technikom na kontrolę pracy tych urządzeń oraz ich naprawę.

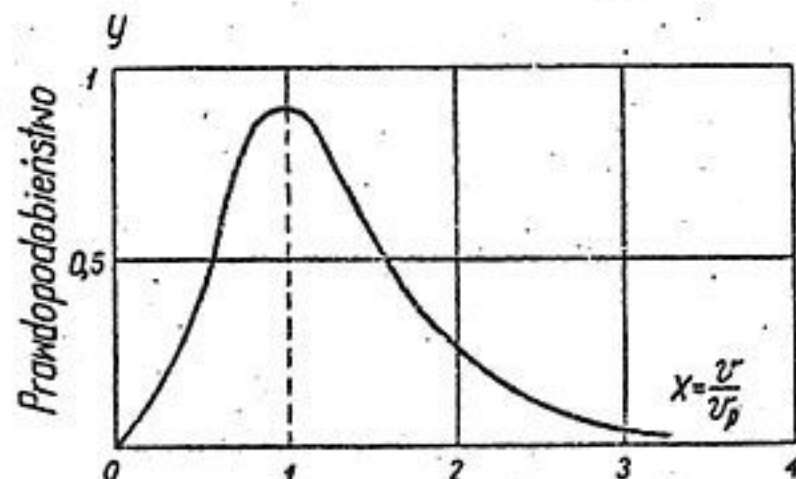
Oscyloskop jest bez wątpienia unikalnym przyrządem wśród wszystkich przyrządów pomiarowych. Dostarcza on obserwatorowi natychmiast informację o kształcie badanego przebiegu elektrycznego, w którym zawarte są wielorakie dane o pracy urządzenia lub jego części. W ten sposób, oscyloskop daje możliwość uchwycenia pełnej sytuacji, czego nie jest zdolny dokonać żaden inny przyrząd.

Wchodzące coraz szerzej w użycie oscyloskopy z pamięcią cyfrową, pozwalają na natychmiastowe zarejestrowanie badanego przebiegu analogowego w postaci cyfrowej, i następnie odtworzenie tego sygnału w postaci analogowej na ekranie oscyloskopu, lub zapisanie na drukarce. Połączenie oscyloskopu cyfrowego z komputerem pozwala na zapisanie sygnału w pamięci komputera, co umożliwia jego późniejsze opracowanie i przechowywanie.

Celem tego ćwiczenia jest poznanie procesów występujących w lampie oscyloskopowej oraz techniki badania przebiegów elektrycznych przy pomocy oscyloskopu.

1 Termoemisja elektronowa z powierzchni metali

W elektronowych przyrządach próżniowych wykorzystuje się strumień elektronów emitowanych z podgrzewanej metalowej katody.¹ Klasyczna teoria elektronowa zakłada, że elektrony w metalu poruszają się z wszelkimi możliwymi prędkościami, które podlegają rozkładowi Maxwella, przedstawionemu na rysunku 1.



Rys.1. Rozkład prędkości elektronów w metalu według klasycznej teorii elektronowej

Z rysunku widać, że istnieje pewna najbardziej prawdopodobna prędkość v_p , którą posiada największa liczba elektronów. Ze wzrostem temperatury zwiększają się prędkości elektronów, a przez to zwiększa się wartość v_p . Średnia wartość energii cieplnej elektronu, zgodnie z tą teorią wynosi:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$$

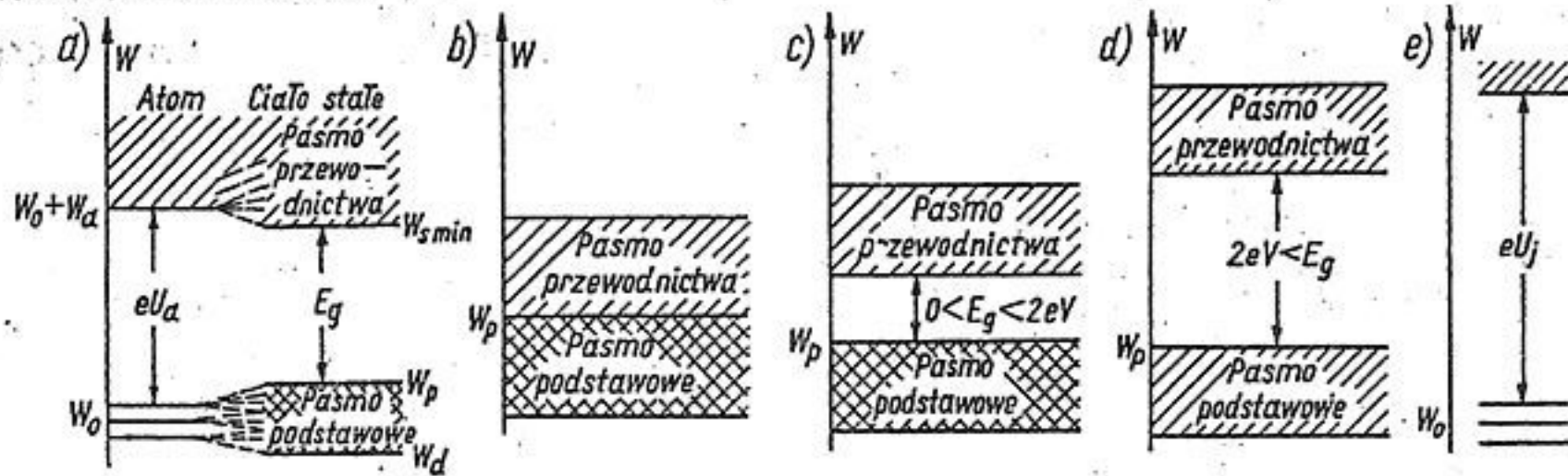
gdzie $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ jest stałą Boltzmann, a T – temperaturą metalu w skali bezwzględnej Kelvina.

Obliczając, według tego wzoru, średnią energię kinetyczną elektronu w temperaturze pokojowej (300° K) otrzymamy wartość $0,026 \text{ eV}$.

Współczesna teoria elektronowa przyjmuje, że rozkład energii elektronów nie podlega prawu Maxwella, lecz jest określony przez teorię wynikającą z teorii kwantowej – teorię Fermiego-Dirac'a. Zgodnie z tą teorią, elektrony w metalu posiadają ściśle określone przez prawa kwantowe wartości energii, wynikające z oddziaływania ich ładunków elektrycznych z ładunkiem jąder atomowych oraz ich momentów magnetycznych z momentami magnetycznymi powłok elektronowych. Dany poziom energetyczny może być zajęty tylko przez jeden elektron.

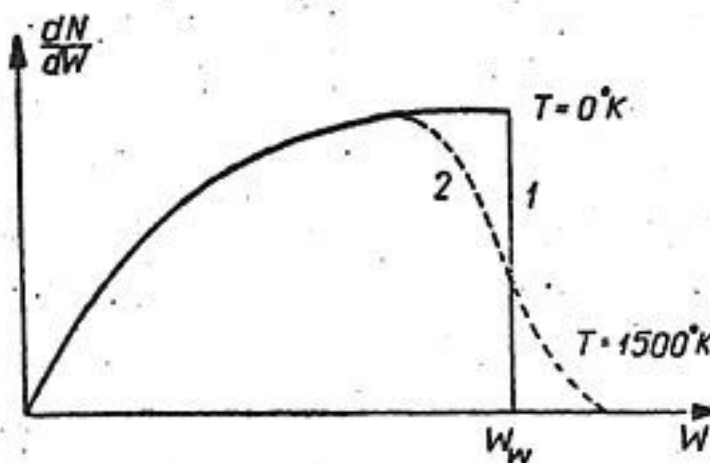
¹Według teorii elektronowej metali, elektrony zewnętrznych powłok w metalu katody, mogą łatwo odłączać się od swoich atomów i poruszać się między atomami-jonami, we wszystkich możliwych kierunkach; obecnością tych elektronów tłumaczy się przewodnictwo elektryczne metali. Ładunek elektronu jest równy $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (kulombów), a jego masa wyznaczona z pomiarów stosunku e/m wynosi $m = 0.91 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$. Masa ta jest 1845 razy mniejsza od masy atomu wodoru.

Zasada ta rozciąga się również na elektrony, które odłączyły się od swoich atomów i poruszają się w obszarach międzyatomowych. Wskutek oddziaływania pól elektrycznych i magnetycznych atomów między sobą, dozwolone dla elektronów poziomy energetyczne grupują się w pasma, (rys.2), w których odległość między poziomami jest mała.



Rys.2. Pasma energetyczne różnych materiałów: a) przekształcanie się poziomów energetycznych pojedynczego atomu w pasma energetyczne ciała stałego, b) pasma w metalach, c) pasma w półprzewodnikach, d) pasma w dielektrykach, e) poziomy atomowe i pasmo energetyczne elektronów swobodnych w gazach [1]

Teoria pasmowa przewodnictwa metali i półprzewodników mówi, że oprócz pasma podstawowego dla elektronów istnieje również pasmo wzbudzone o wyższych energiach poziomów. W temperaturze $0^\circ K$ elektrony zajmują najniższe poziomy energetyczne. Poziomy energetyczne, odpowiadające wyższym energiom, elektrony mogą zająć po dostarczeniu im odpowiedniej energii poprzez nagrzanie, naświetlenie światłem lub innym promieniowaniem elektromagnetycznym oraz w wyniku działania silnego pola elektrycznego. Ponieważ, elektrony metalu, przeniesione na wyższe poziomy energetyczne, mogą przemieszczać się od jednego atomu do drugiego, pasmo odpowiadające tym energiom nazywa się pasmem przewodnictwa. W metalach, pasmo wzbudzone nakłada się na pasmo podstawowe, natomiast w półprzewodnikach pasmo wzbudzone jest oddzielone od pasma podstawowego przerwą energetyczną: ok. $0,72 eV$ w Ge i $1,1 eV$ w Si. W przypadku dielektryków, przerwa energetyczna jest znacznie większa.



Rys.3. Rozkład gęstości obsadzenia poziomów energetycznych przez elektrony w metalu, w zależności od energii W , według teorii Fermiego-Dirac'a

Rozkład energetyczny elektronów w metalu jest przedstawiony na rysunku 3. Krzywa ciągła przedstawia rozkład energii elektronów w temperaturze 0° K, natomiast krzywa przerywana przedstawia ten rozkład w temperaturze wyższej. W temperaturze 0° K wszystkie poziomy energetyczne poniżej energii Fermiego W_w są obsadzone przez elektrony. Gęstość obsadzenia poziomów energetycznych dN/dW , a więc ilość elektronów przypadających na jednostkowy przedział energii dW , wzrasta wraz ze wzrostem energii gdy wartość energii jest mniejsza od W_w i jest równa zero powyżej tej energii. W temperaturze wyższej od temperatury 0° K, pewna część elektronów posiada energie wyższe od energii W_w i im wyższa jest wartość tej energii, tym posiada ją mniejsza liczba elektronów; przy czym liczba ta ze wzrostem energii maleje wykładniczo.

Pomimo że w niskich temperaturach niektóre elektrony posiadają energie znacznie większe od zera, to doświadczalnie nie obserwuje się zjawiska emisji elektronów z powierzchni metalu. Okazuje się, że elektron nie może opuścić metalu gdyż:

- 1) przy powierzchni metalu powstaje podwójna warstwa ładunkowa, wytworzona przez elektrony, które odłączyły się od atomów. Spadek potencjału w tej warstwie działa hamująco na elektrony.
- 2) elektron opuszczający metal musi pokonać siły przyciągania, między nim a dodatnimi jonami metalu. Zatem, aby wydostać się z metalu, elektron musi posiadać energię A_o dostateczną do pokonania tych sił przyciągających.

Pracę tę nazywamy pracą wyjścia elektronu z metalu i możemy ją wyrazić jako iloczyn hamującego potencjału φ_o i ładunku elektronu: $A_o = e\varphi_o$. Doświadczalnie stwierdzono, że wartość pracy wyjścia jest odwrotnie proporcjonalna do odległości międzyatomowych w sieci krystalicznej

$$\varphi_o = \frac{A_o}{e} \sim \frac{e}{2a}$$

Tabela I. Prace wyjścia elektronów z metali.

Metal	Praca wyjścia φ_o [eV]	Stała A_o A/cm ² K ²	Stała sieci a [Å]	Metal	Praca wyjścia φ_o [eV]	Stała A_o A/cm ² K ²	Stała sieci a [Å]
Cez	1,87	162	6,15	Tantal	4,10	60	3,31
Bar	2,52	60	5,025	Nikiel	5,03	60	3,52
Wapń	2,71	60	5,57	Molibden	4,16	55	3,15
Tor	3,38	60	5,084	Wolfram	4,52	60	3,16

Tabela I przedstawia wartości prac wyjścia elektronów różnych metali. Widać, że najmniejsze prace wyjścia posiadają metale alkaliczne, odznaczające się dużymi wartościami stałych sieci a . W elektronowych przyrządach próżniowych, energię potrzebną do wykonania pracy wyjścia dostarczamy elektronom w postaci ciepła przez podgrzewanie katody prądem elektrycznym. Zależnie od potrzebnej

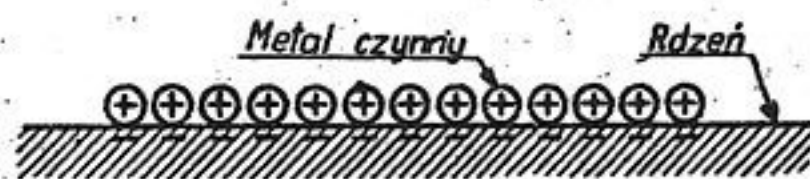
elektronom energii prądu żarzenia lamp elektronowych wynoszą: od ułamka do kilkudziesięciu amperów. W wyniku nagrzania metalu wzrastają energie kinetyczne drgań jonów sieci krystalicznej, a przez to i energie kinetyczne elektronów, tak że elektrony są zdolne pokonać siły utrzymujące je w metalu. Im wyższa jest temperatura metalu, tym większa liczba elektronów posiada energie wystarczające aby go opuścić. Zatem, ze wzrostem temperatury katody rośnie strumień elektronów opuszczających jej powierzchnię.

Zależność emisji elektronowej od temperatury zbadali Richardson i Dushman (1901 r.) i wyprowadzili wzór:

$$i_e = A_0 T_k^2 e^{-\frac{e\varphi_0}{kT}} = A_0 T_k^2 \exp\left(-\frac{11600\varphi_0}{T_k}\right) \quad (1)$$

Wzór ten określa natężenie prądu elektronowego, emitowanego z jednostkowej powierzchni katody o temperaturze T_k , wyrażonej w skali bezwzględnej Kelvina. Stała A_0 , dla czystych pierwiastków, jest rzędu $15 \div 150 \text{ A}/(\text{cm}^2\text{K}^2)$. Dla większości metali, wykorzystywanych do produkcji katod, przyjmuje ona wartość $\simeq 60 \text{ A}/(\text{cm}^2\text{K}^2)$. Dla powierzchni niejednorodnych, na ogół, maleje do wartości: $2 \cdot 10^{-4} \div 10 \text{ A}/(\text{cm}^2\text{K}^2)$.

Z członu wykładniczego wzoru (1) wynika, że gęstość prądu zależy od rodzaju katody i jej temperatury. Badania emisji termoelektronowej różnych metali oraz prace nad określeniem stałych A_0 i $e\varphi_0$ wykazały, że zdolność emisyjna katody zależy w znacznym stopniu od domieszek występujących w badanym metalu katody, jak również od stanu jej powierzchni. Wolfram z domieszką toru, poddany specjalnej obróbce termicznej, daje emisję elektronową wielokrotnie większą niż czysty wolfram. Wzrost emisji elektronowej z torowanego wolframu następuje wskutek wytworzenia na powierzchni katody jednoatomowej warstwy toru, (rys.4). Warstwa ta, wskutek mniejszej pracy wyjścia toru, stanowi warstwę elektrododatnią, która przy powierzchni katody wytwarza pole elektryczne wyciągające elektrony z metalu. Praca wyjścia elektronów z katody wolframowej torowanej wynosi 2,63 eV i jest niższa od pracy wyjścia z czystego toru, równej 3,38 eV. Jako domieszki do katod wykonanych z wolframu, molibdenu lub niklu, stosuje się również inne metale alkaliczne, jak: bar i cez, odznaczające się podobnymi własnościami.



Rys.4. Powierzchnia katody wolframowej z wytworzoną jednoatomową warstwą toru

Szerokie zastosowanie zyskały katody tlenkowe, w których rdzeń metalowy (niklowy lub wolframowy) jest pokryty warstwą tlenków boru, strontu lub wapnia. Domieszki te stosuje się w katodach pośrednio żarzonych,² w których rurkę

²Włókno żarzenia w takich katodach, w postaci spirali wolframowej, umieszczone jest we-

niklową pokrywa się węglkami tych metali, a następnie poddaje się obróbce termicznej w temp. 1500° K, w której węgliki przechodzą w tlenki. Praca wyjścia z takich katod wynosi ok.1 eV. Niska temperatura pracy (1000°K) zapobiega parowaniu katody. Wydajność katod wolframowych torowanych, bezpośrednio żarzonych, wynosi około 1,2 A/cm², natomiast katod tlenkowych pośrednio żarzonych zawiera się w granicach: 0,2÷10A/cm².

Ważnym zagadnieniem jest niedopuszczenie w czasie pracy lampy do zanieczyszczenia powierzchni katody gazami resztkowymi, znajdującymi się w lampie, oraz utrzymanie możliwie stałej temperatury pracy katody. W celu usunięcia resztek gazu w bańce lampy stosuje się getter; składający się ze związków magnezu, fosforu i baru, który wiąże chemicznie resztki gazu. W ten sposób, próżnia w bańce lampy poprawia się do około 10⁻⁷ Pa.³ Bardzo ważnym czynnikiem, wpływającym na trwałość lampy, jest również utrzymanie optymalnego napięcia żarzenia. Zwiększenie napięcia żarzenia o 5% powoduje skrócenie żywotności lampy do połowy. Czas życia lampy jest głównie określony trwałością jej katody i wynosi 1000÷2000 godzin dla zwykłych lamp oraz około 10000 godzin dla lamp specjalnych (oscyloskopowych i kineskopów).

wnątrz rurki niklowej i jest od niej odizolowane rurką ceramiczną.

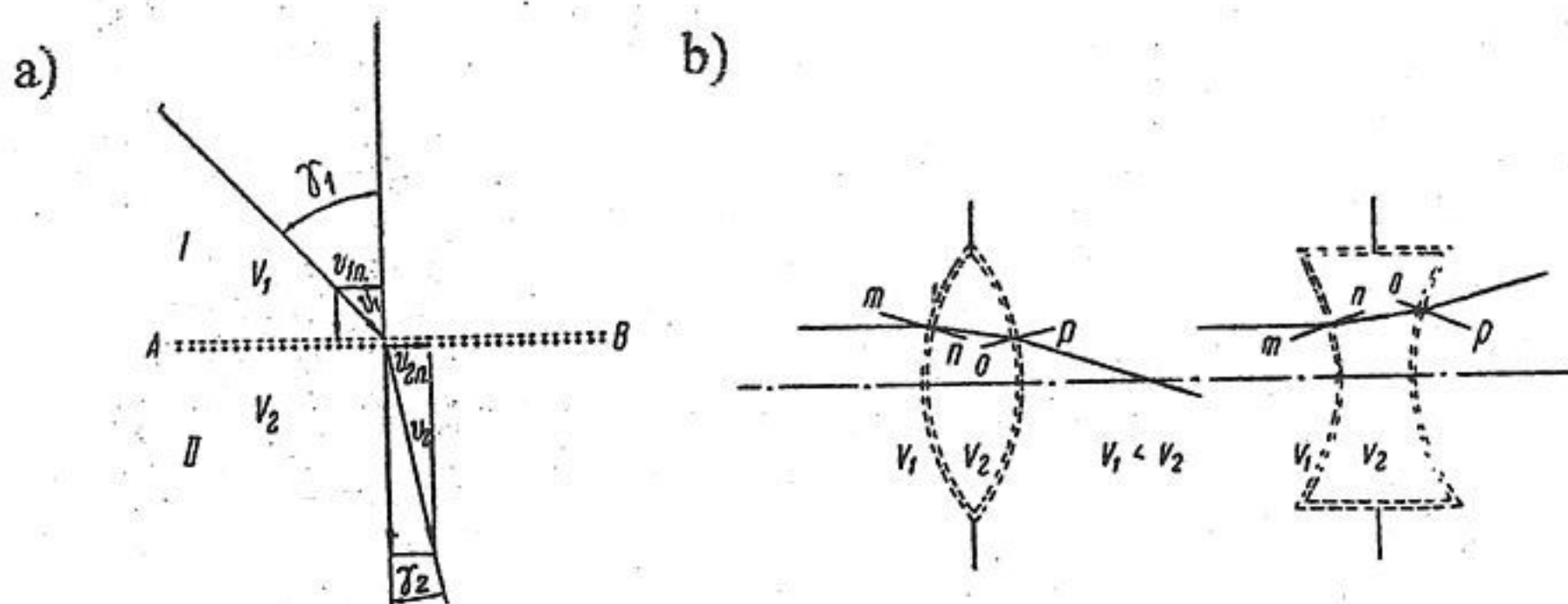
³W lampie z nieuszkodzoną próżnią, getter widoczny jest w postaci ciemnej napyłonej warstwy, w górnej części bańki lampy. W lampie z uszkodzoną próżnią, nalot ten przyjmuje kolor białego pyłku.

2 Ogniskowanie elektronów w lampie oscyloskopowej

Elektrony emitowane z powierzchni katody, tworzą wiązkę rozbieżną o skończonym kącie rozwarcia. W celu wykorzystania jak największej ich liczby, a więc wytworzenia wiązki o dużej gęstości, biegnącej wzdłuż osi lampy oscyloskopowej, konieczne jest zogniskowanie tej wiązki. Należy również nadać elektronom odpowiednią energię, potrzebną do wzbudzenia luminoforu na ekranie. Zagadnieniem ogniskowania elektronów zajmuje się dział fizyki nazywany optyką elektronową. Pewne podstawowe zagadnienia ogniskowania wiązek elektronowych w lampie oscyloskopowej zostaną przedstawione poniżej.

2.1 Ogniskowanie elektryczne

Istnieje duża analogia między układami optyki świetlnej i optyki elektronowej. Rozpatrzmy najpierw, przechodzenie promienia elektronowego przez granicę dwóch obszarów, w których istnieją różne potencjały. Granicę taką można wytworzyć, np. przez umieszczenie blisko siebie dwu siatek metalicznych, wykonanych z cienkiego drutu, do których przyłożone są różne potencjały: V_1 i V_2 , rys.5a. Możemy powiedzieć, że siatki te odgraniczają dwa obszary I i II, w których potencjały wynoszą V_1 i V_2 . W każdym z obszarów, elektrony poruszają się prostoliniowo, ze stałymi prędkościami v_1 i v_2 ; gdyż nie działają na nie żadne siły elektrostatyczne. Przy przechodzeniu granicy dwóch ośrodków, na elektrony działają siły pola elektrycznego, które powodują zmianę ich prędkości w kierunku ruchu.



Rys.5. Przechodzenie promienia elektronowego przez dwie siatki metalowe o różnych potencjałach – część a) i siatkowe soczewki elektronowe – część b)

Założymy dla prostoty, że przed wejściem do obszaru I elektrony przeszły różnicę potencjałów $V = V_1 - 0 = V_1$, a zatem ich prędkości w I i II obszarach

będą wynosić:

$$v_1 = \sqrt{2eV_1/m} \quad v_2 = \sqrt{2eV_2/m} \quad (2)$$

W kierunku równoległym do siatek na elektrony nie działają żadne siły, więc składowe prędkości w tym kierunku nie ulegną zmianie

$$v_{1n} = v_{2n}$$

co możemy zapisać inaczej:

$$v_1 \sin \gamma_1 = v_2 \sin \gamma_2$$

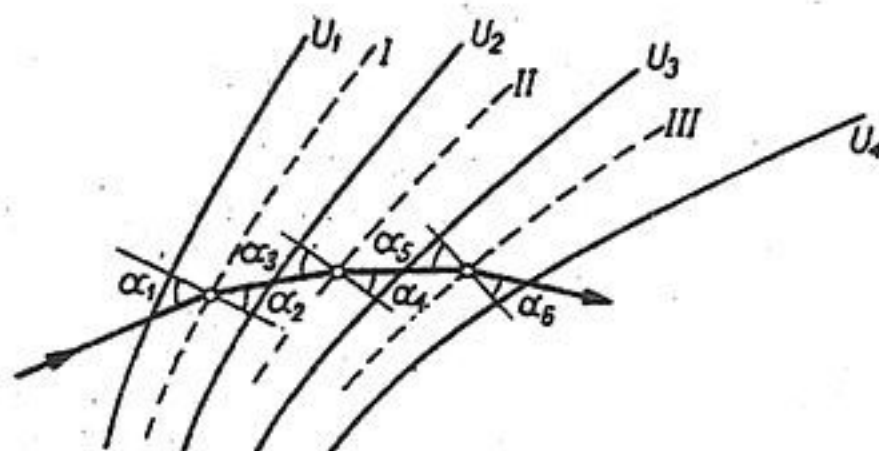
skąd:

$$\frac{\sin \gamma_1}{\sin \gamma_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Wykorzystując poprzednie wzory (2), możemy zapisać prawo załamania promienia elektronowego na granicy dwóch potencjałów w postaci:

$$\frac{\sin \gamma_1}{\sin \gamma_2} = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}} \quad (3)$$

Widzimy, że wzór ten jest analogiczny do wzoru na załamanie promienia świetlnego na granicy dwóch ośrodków, przy czym stosunek współczynników załamania światła tych ośrodków został zastąpiony tutaj przez stosunek pierwiastków z potencjałów. Zatem możemy powiedzieć, że w optyce elektronowej rolę współczynnika załamania pełni pierwiastek kwadratowy z przyspieszającego potencjału.

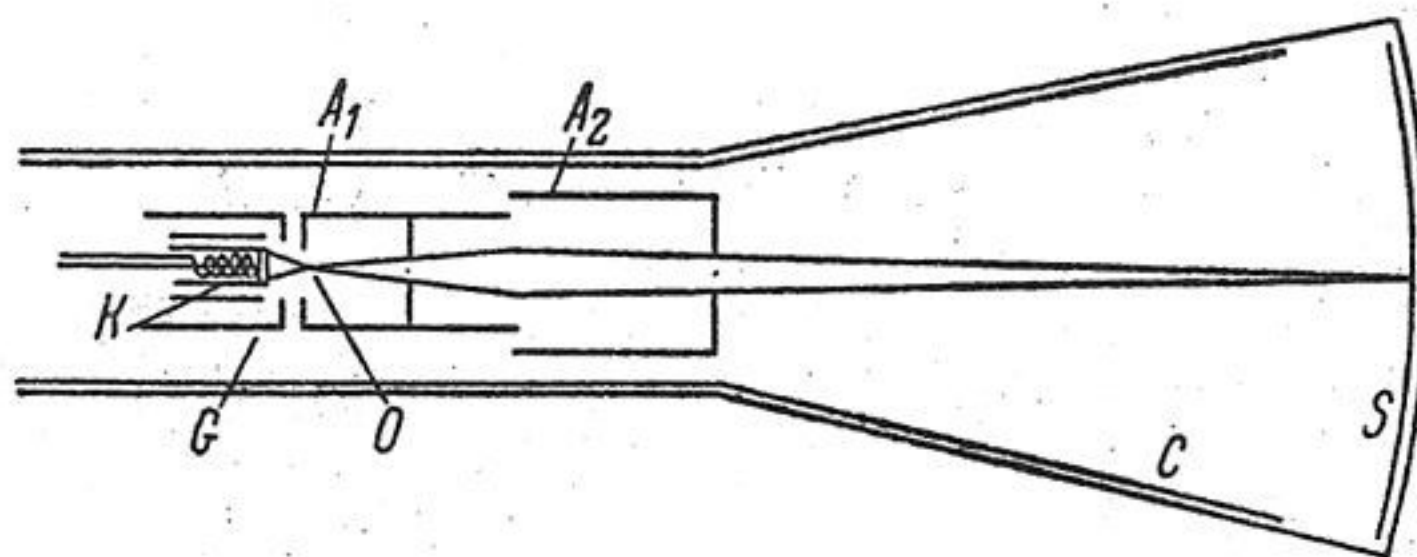


Rys.6. Przykład wykreślnego wyznaczania torów elektronów [2]

Możemy sobie wyobrazić odpowiednio ukształtowane podwójne siatki metalowe, na podobieństwo soczewek optycznych, które mogłyby ogniskować lub rozpraszać wiązki elektronowe, rys.5b. Jak można się domyśleć, takie rozwiązanie byłoby jednak wielce niepraktyczne, z wielu względów jak: zwarcia elektryczne, pochłanianie elektronów itd. Dlatego w rzeczywistości, soczewki elektrostatyczne konstruuje się w postaci odpowiednio ukształtowanych cylindrów lub diafragm o różnych średnicach otworów. Po przyłożeniu potencjałów, do takich elektrod,

wytwarzają się między nimi pola elektryczne, o odpowiednich powierzchniach ekwipotencjalnych, ogniskujące przebiegające przez układ elektrony. Jeżeli znany jest rozkład powierzchni ekwipotencjalnych, torów elektronów w wytworzonych polach elektrycznych można wyznaczyć posługując się metodą wykresną. Przykład takiego postępowania pokazany jest na rysunku 6. Rozkład potencjałów można wyznaczyć przy pomocy wanny elektrolitycznej lub obliczyć numerycznie. W przykładzie, pokazanym na rysunku 6, wszystkie torów elektronów, startujących w jednej płaszczyźnie, pozostają w tej samej płaszczyźnie przez cały czas. Krzywe torów elektronów są krzywymi płaskimi jeżeli układ elektrod jest zbudowany na wspólnej osi i jest względem tej osi symetryczny.

Dokładność wyznaczania torów elektronów metodą wykresną jest niewielka. Błąd wyznaczenia końcowego położenia elektronu w układzie może sięgać 50%. Z tego powodu, obecnie do wyznaczania torów elektronów w układach elektronicznych stosuje się wyłącznie metody numeryczne. W metodach tych, dla zadanego kształtu elektrod oraz ich potencjałów, rozwiązuje się równania Gaussa, w celu znalezienia mapy potencjałów, a następnie wyznacza się torów elektronów.

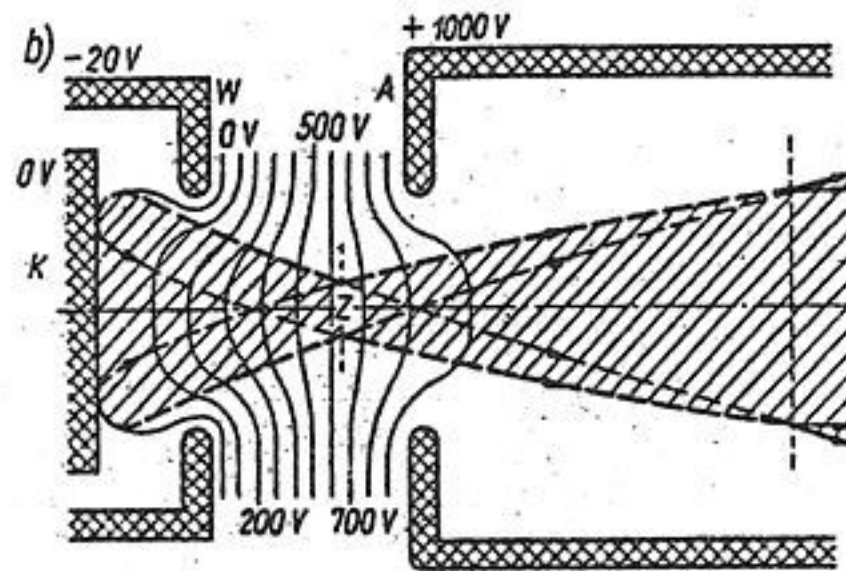


Rys.7. Układ elektronoptyczny lampy oscyloskopowej

Przykład rozwiązania układu elektronoptycznego lampy oscyloskopowej pokazany jest na rysunku 7. Układ ten jest umieszczony w bańce szklanej, w kształcie rury rozszerzającej się w kierunku ekranu *S*, w której wytworzona jest wysoka próżnia, rzędu 10^{-7} Pa. Elektrony wytwarzane są w dziale elektronowym. Działo składa się z podgrzewanej katody *K*, elektrody ogniskującej *G* nazywanej cylindrem Wehnelta, anody *A*₁ (pierwsza anoda) i elektrody *A*₂ nazywanej drugą anodą. Wnętrze szklanej bańki pokryte jest na pewnym obszarze cienką przewodzącą warstwą grafitową *C* połączoną na ogół z masą układu. W ten sposób, rozproszone elektrony są odprowadzane do masy i nie zakłócają ruchu wiązki elektronicznej. Elektrody ogniskujące wykonane są w postaci cylindrów z diafragmami. Emitująca elektrony powierzchnia katody, łącznie z elektrodą ogniskującą *G* i zwróconym do katody końcem pierwszej anody, tworzą obiektyw imersyjny (skupiający). Działanie jego omówimy na podstawie rysunku 8.

Na elektrodę *G* podaje się niewielki ujemny względem katody potencjał. Na rysunku potencjał elektrody ogniskującej jest równy -20 V, natomiast diafragma

pierwszej anody posiada potencjał $+1000V$. Ponieważ odległość elektrody ogniskującej od katody jest mniejsza od średnicy diafragmy więc w pobliżu katody wytwarza się silnie niejednorodne pole elektryczne. W obszarze tym elektrony emitowane z katody z małymi prędkościami są silnie ogniskowane, jak pokazano to na przykładzie czterech torów. Elektrony wyemitowane pod różnymi kątami z jednego punktu katody, po przejściu przez obiektyw imersyjny biegną po torach prawie równoległych, nachylonych pod pewnym kątem do osi. Gdyby elektrony wychodziły z katody z prędkościami równymi zeru, to zostałyby zogniskowane na osi układu; w jakimś punkcie, pomiędzy dwoma diafragmami. Wskutek różnej prędkości, elektrony emitowane z dowolnych punktów katody K , będą poruszać się po różnych trajektoriach i będą przecinać oś układu w różnych punktach lub zbliżać się do niej na małą odległość. W wyniku tego, w pewnym punkcie Z na osi (rys.8), przekrój wiązki będzie najmniejszy, przy czym powierzchnia tego przekroju będzie znacznie mniejsza od powierzchni emitującego elektrony obszaru katody.



Rys.8. Układ imersyjny lampy oscyloskopowej [1]

Pierwsza i druga anoda tworzą drugi obiektyw skupiający, dla którego obraz katody wytworzony przez pierwszy obiektyw jest przedmiotem. Drugi obiektyw daje rzeczywisty obraz tego "przedmiotu" na ekranie lampy. Ponieważ prędkości elektronów w tym obszarze są znacznie większe, jako odpowiadające wyższym potencjałom, więc zdolność zbierająca tej soczewki jest znacznie mniejsza od skupiającej zdolności soczewki w obszarze pierwszej diafragmy. W ogólności, oba obiektywy imersyjne stanowią układ skupiający elektrony, dający obraz emitującej elektrony powierzchni katody. Im obraz, dawany przez pierwszy obiektyw imersyjny jest jest mniejszy, tym mniejszą plamkę zogniskowaną, można otrzymać na ekranie oscyloskopu.

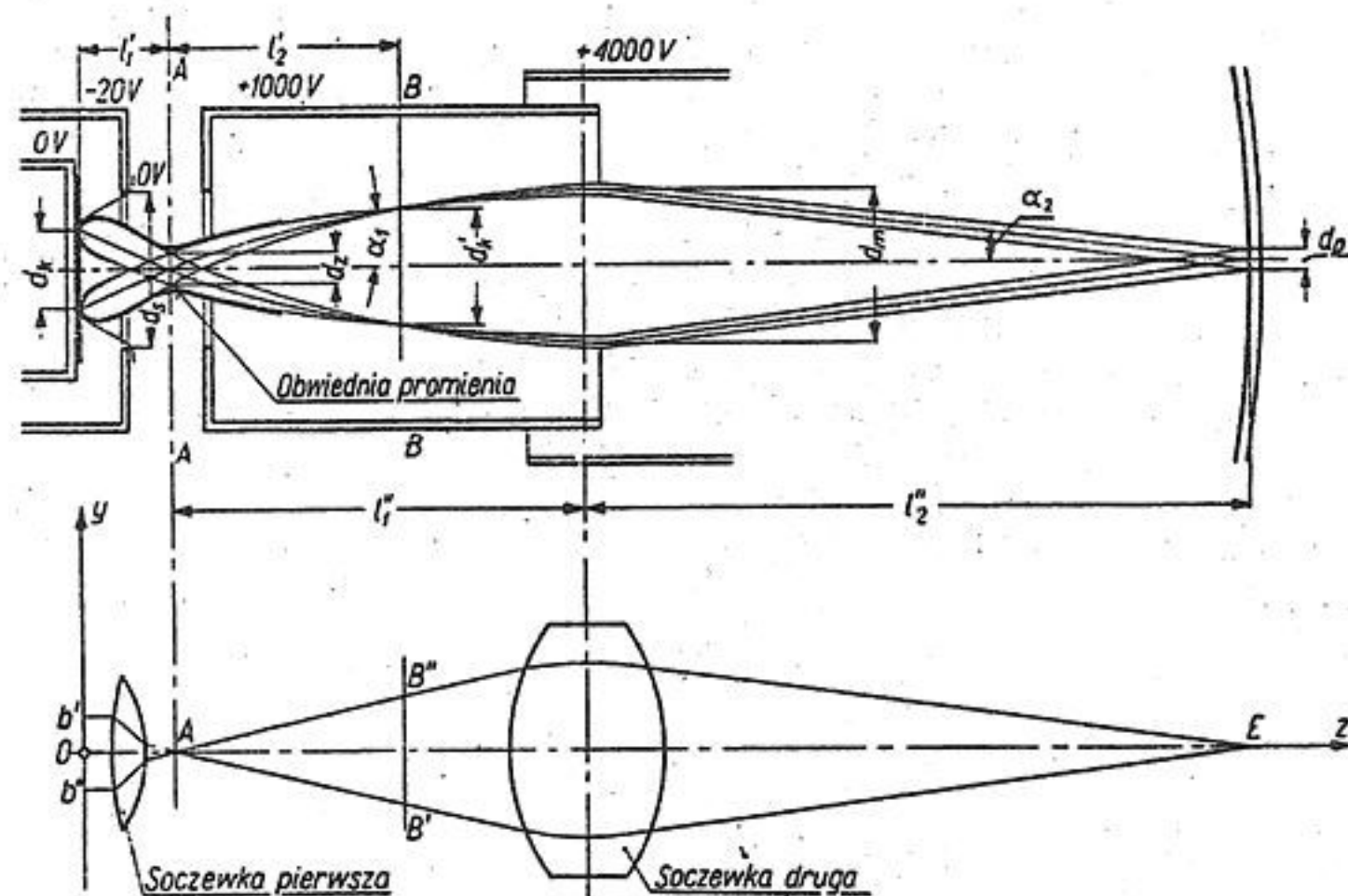
Na rysunku 9 przedstawiony jest układ działa elektronowego lampy oscyloskopowej oraz jego optyczna analogia. Rysunek przedstawia rolę oddzielnych elementów elektronooptycznego układu działa elektronowego w wytworzeniu małego jasnego punktu na ekranie. Podanie niewielkiego ujemnego potencjału, na elektrodę ogniskującą, zwiększa ogniskowanie elektronów w pobliżu katody. Wskutek większego zakrzywienia linii ekwipotencjalnych przy katodzie i zwiększenia ra-

diałnej składowej pola, odchylającej elektrony w kierunku osi, ogniskowanie elektronów jest znacznie większe, w porównaniu z przypadkiem, gdy ten potencjał jest dodatni. Dzięki temu przewężenie wiązki w płaszczyźnie $A - A$ pogłębia się.

Jeśli oznaczyć przez U_1 i U_2 napięcie pierwszej i drugiej anody względem cylindra Wehnelta, przez E_o – natężenie pola między anodami, a przez E_k – natężenie pola między katodą a pierwszą anodą, wówczas ogniskowe soczewek będą w przybliżeniu określone wzorami:

$$f_1 = \frac{4U_1}{E_o - E_k} \quad f_2 = \frac{4U_2}{E_o} \quad (4)$$

Przy U_1 kilka razy mniejszym od U_2 , pierwsza soczewka skupiająca jest krótkoogniskowa, druga zaś jest długoogniskowa. Poprzez zmianę napięć U_1 i U_2 , można oddziaływać na wartość ogniskowej całego układu, a więc na ostrość plamki na ekranie oscyloskopu.



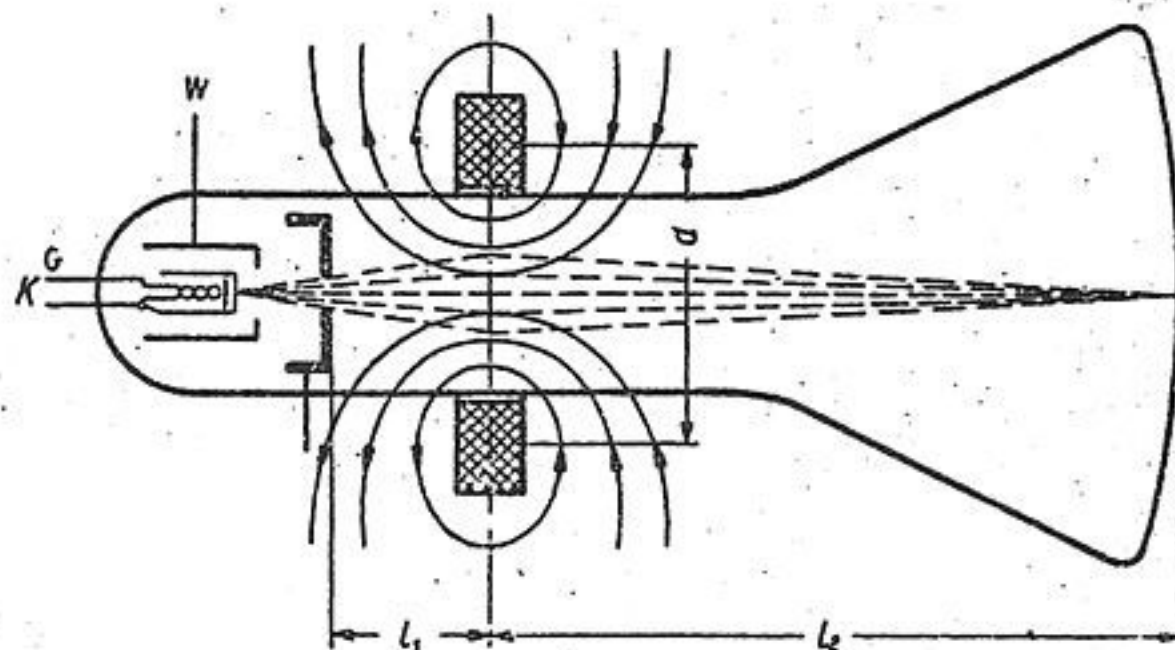
Rys.9. Układ elektronooptyczny lampy oscyloskopowej i jego optyczna analogia [2]

Gęstość prądu w wiązce (jasność plamki), reguluje się napięciem podawanym na elektrodę G (cylinder Wehnelta). W dobrych lampach, pracujących przy wysokim napięciu anodowym i niewielkiej jaskrawości udaje się uzyskać plamkę o średnicy 0,2 mm, a nawet 0,1 mm. Przy dużych natężeniach wiązki elektronicznej (przy dużej jasności), istotny wpływ może mieć oddziaływanie elektronów między sobą w wiązce, wskutek odpychania kulombowskiego, co oczywiście pogarsza ich zogniskowanie. Efekt ten jest mniejszy w lampach pracujących z większym napięciem przyspieszającym elektrony.

Na ogół, w lampach oscyloskopowych, ogniskowanie reguluje się poprzez zmianę napięcia pierwszej anody, (przez co oddziałuje się równocześnie na obie soczewki), a jasność plamki poprzez zmianę napięcia elektrody G . Jak wiemy, zmiana poten-

cjału elektrody G wpływa na własności ogniskujące pierwszej soczewki – plamka na ekranie rozogniskowuje się. Dlatego, w celu uzyskania wyraźnego obrazu przy zmianie jasności plamki, należy jednocześnie podregulować napięcie pierwszej anody (ostrość plamki).

2.2 Ogniskowanie magnetyczne



Rys.10. Magnetyczne ogniskowanie elektronów w lampie oscyloskopowej

W lampach kineskopowych, w które wyposażone są monitory komputerów oraz telewizory powszechnego użytku, a także w niektórych lampach oscyloskopowych o dużych rozmiarach ekranu, do ogniskowania i odchylenia wiązki elektronowej stosuje się pole magnetyczne, rys.10. Elektrostatyczny układ ogniskowania elektronów składa się tutaj z jednej soczewki krótkoogniskowej, przy pomocy której reguluje się tylko jasność plamki. Druga soczewka ogniskująca elektrony została zastąpiona przez soczewkę magnetyczną. Jest to tzw. cienka soczewka magnetyczna. Pole magnetyczne takiej soczewki posiada symetrię osiową i ma właściwości skupiające elektrony. Linie sił pola magnetycznego wytworzonego przez cewkę są pokazane na rysunku. Pole magnetyczne posiada składowe wzdłuż osi lampy H_x , jak i prostopadłe do nich składowe radialne H_r , rys.11. Składowe tego pola oddziałują na rozbieżną wiązkę elektronową.

W celu jakościowego przeanalizowania ruchu elektronów rozłożymy prędkość elektronu na składowe: wzdłuż osi cewki v_x i prostopadłą do osi (składową radialną) v_r .⁴ Składowa osiowa pola magnetycznego będzie oddziaływać na składową radialną prędkości, natomiast składowa radialna pola na składową osiową prędkości elektronów. Jak można wywnioskować z reguły Fleminga lub Ampera, te dwie siły będą skierowane w tym samym kierunku. W wyniku tego oddziaływania, składowa radialna prędkości będzie ulegać skręceniu, jak to pokazano

⁴Aby nie komplikować rysunku składowe prędkości elektronów nie są pokazane na rysunku. 11.

w części b) rysunku. Płaszczyzna, w której leżą wektory v_x i v_r obraca się wokół składowej v_x tak, że wektor v_r obraca się o kąt większy niż 180° . Elektron, wychodzący z pewną prędkością z punktu O, porusza się na początku wzdłuż linii prostej. Po wejściu w obszar pola magnetycznego jego tor przypomina swoim kształtem linię śrubową; przy czym skok śruby jest tym mniejszy im silniejsze jest pole magnetyczne. W centrum pola magnetycznego cewki tor elektronu będzie najsilniej zakrzywiany. Przy wychodzeniu z pola magnetycznego, elektron w dalszym ciągu zakreśla tor w postaci linii śrubowej, przy czym skok śruby wzrasta wraz ze zmniejszaniem się pola magnetycznego, aż do momentu, w którym ten przechodzi w linię prostą, styczną do poprzednio kreślonej linii śrubowej. Przy pewnej wielkości pola magnetycznego, wiązka elektronów będzie zogniskowana na osi cewki.

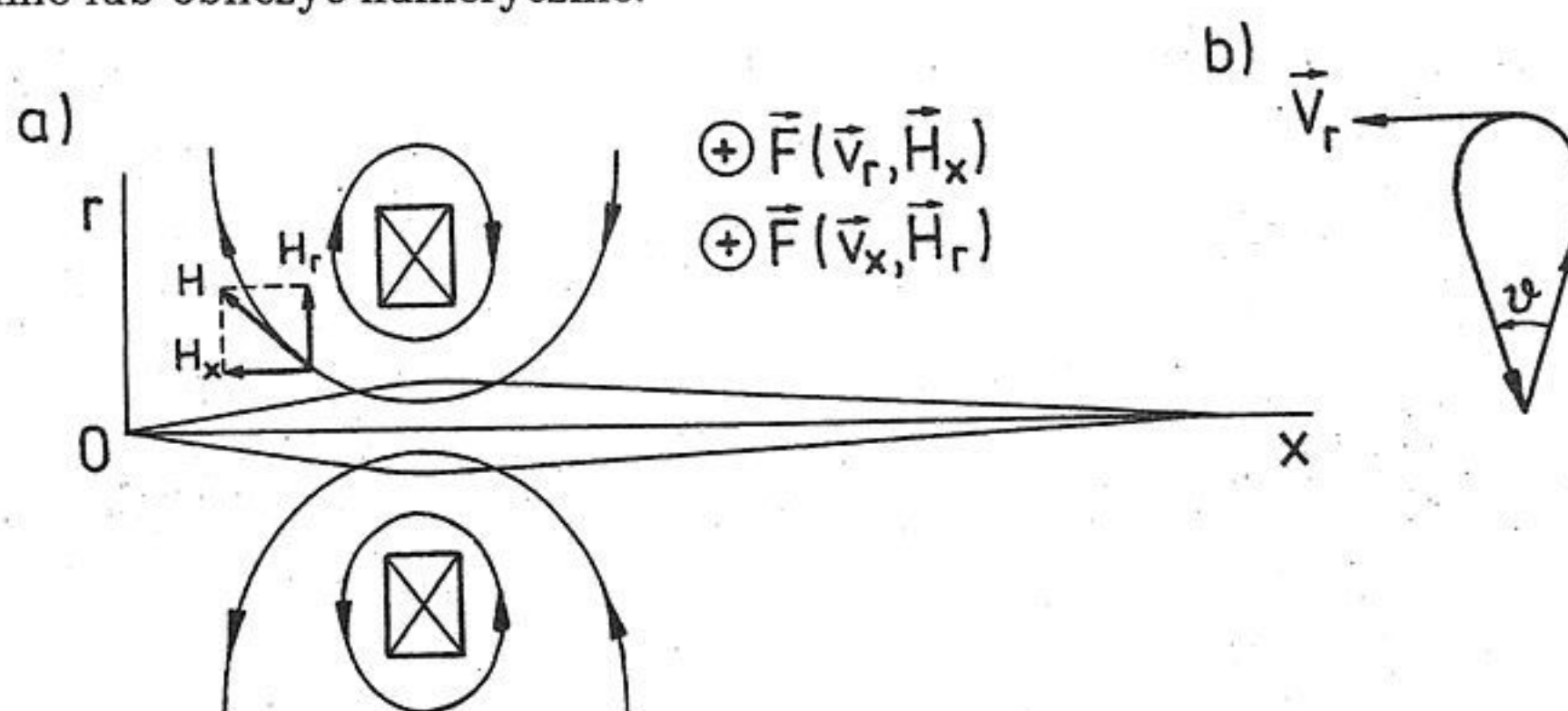
Ogniskową magnetycznego układu ogniskującego, można wyrazić wzorem:

$$\frac{1}{f} = \frac{e^2}{4m^2v_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} H_x^2 dx$$

W układzie takim, można mówić o pewnym kącie skręcenia obrazu źródła:

$$\vartheta = \frac{e}{2mv_0} \int_{-\infty}^{+\infty} H_x dx$$

Aby skorzystać z tych wzorów, konieczna jest znajomość funkcji, według której zmienia się rozkład pola magnetycznego. Rozkład ten, można wyznaczyć doświadczalnie lub obliczyć numerycznie.



Rys.11. Ogniskowanie elektronów przy pomocy cienkiej soczewki magnetycznej

3 Układy odchylające wiązkę elektronową w lampie oscyloskopowej

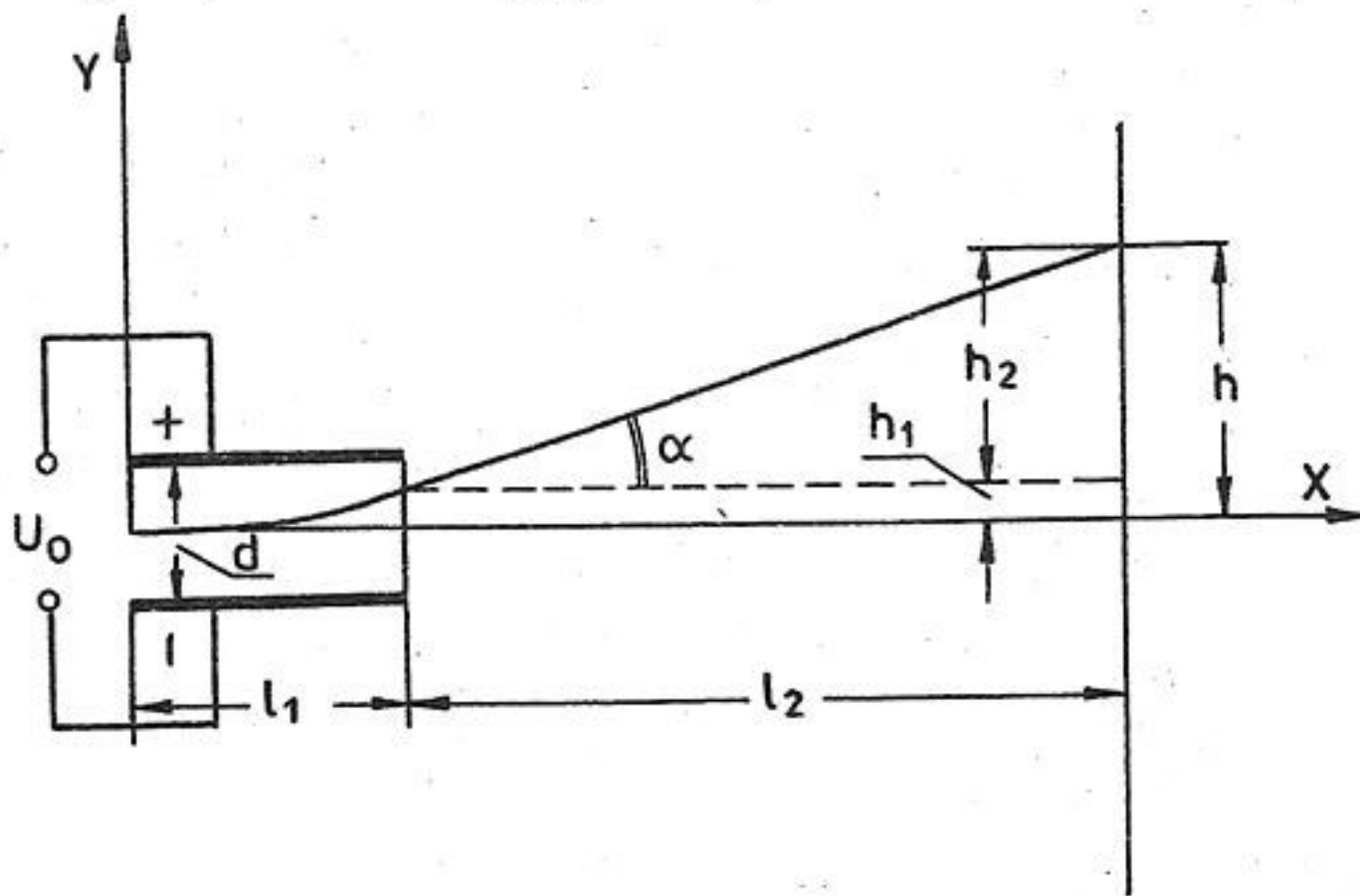
Pod wpływem napięć stałych na elektrodach wyrzutni elektronowej, wiązka elektronów biegnie wzdłuż osi lampy i plamka świetlna jest widoczna na osi ekranu. Do odchylenia wiązki, z położenia centralnego i odpowiedniego przesuwania plamki po ekranie, stosuje się dwa sposoby:

1. Elektrostatyczny, przy którym określone napięcie jest przyłożone do dwu płytek umieszczonych wewnątrz lampy. Ze względu na duże częstotliwości, które układ taki może przenosić, jest on stosowany w oscyloskopach

2. Magnetyczny, przy którym określony prąd przepływa przez cewki, umieszczone na zewnątrz lampy, a wiązka elektronów przechodzi przez ich pole magnetyczne. Sposób ten jest stosowany w kineskopach telewizorów oraz monitorach komputerów.

3.1 Elektryczny układ odchylający

W celu otrzymania na ekranie oscyloskopu nie zniekształconych obrazów badanych przebiegów konieczne jest, aby przemieszczenie się plamki na ekranie było wprost proporcjonalne do napięcia odchylającego. Stosunek wielkości przesunięcia plamki na ekranie, do wielkości napięcia odchylającego, nazywa się czułością lampy oscyloskopowej i określa się ją w mm/V.



Rys.12. Płasko-równoległy elektrostatyczny układ odchylający

Obliczymy czułość oscyloskopu, o odchyłaniu elektrostatycznym, dla najprostszego przypadku płytek odchylających, płaskorównoległych, rys.12. Jeżeli napięcie między płytkami wynosi U_0 , a odległość między nimi jest równa d [cm], to natężenie pola poprzecznego działającego na elektrony będzie: $E = U_0/d$ [V/cm]. Pod wpływem siły: $F = eE$ elektron będzie doznawał przyspieszenia swego ruchu

w kierunku elektrody dodatniej. Możemy powiedzieć, że w kierunku osi Y będzie poruszał się on ruchem jednostajnie przyspieszonym. Natomiast, w kierunku osi X jego prędkość będzie stała, równa prędkości nabytej w układzie przyspieszającym.

Drogę h_1 przebytą w kierunku osi Y, podczas poruszania się w obszarze pola elektrycznego, obliczymy ze wzoru na drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym: $h_1 = at^2/2$. Przyspieszenie a , w kierunku osi Y w tym ruchu będzie wynosić:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{eU_o}{d \cdot m}$$

t – oznacza czas, w którym elektron przechodzi obszar płytek odchyłających. Gdy znamy długość płytek odchyłających l_1 , czas ten policzymy jako $t = l_1/v$, gdzie v jest prędkością elektronów wzdłuż osi X. Prędkość tę wyznaczymy z energii kinetycznej elektronów, jaką one uzyskały w polu między elektrodami przyspieszającym – ogniskującym a cylindrem Wehnelta. Energia kinetyczna elektronu $mv^2/2$ równa jest pracy przyspieszającego pola elektrycznego eU_p . Stąd otrzymujemy $v = \sqrt{2eU_p/m}$. Zatem czas $t = l_1\sqrt{m/2eU_p}$. Podstawiając otrzymane wielkości: a i t , do wzoru na drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym mamy:

$$h_1 = \frac{1}{2} \frac{e U_o}{d m} l_1^2 \frac{m}{2eU_p} = \frac{1}{4} \frac{U_o}{d \cdot U_p} l_1^2 \quad (5)$$

gdzie: U_o i U_p , oznaczają odpowiednio napięcie odchyłające i przyspieszające elektrony.

Po wyjściu z pola elektrycznego płytek odchyłających, elektron będzie poruszał się po stycznej do swego toru w obszarze pola. Równanie stycznej do toru możemy napisać jako: $y = x \operatorname{tg} \alpha$, gdzie $\operatorname{tg} \alpha$ jest pochodną h_1 względem l_1 i wynosi:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dh_1}{dl_1} = \frac{1}{2} \frac{U_o}{d \cdot U_p} l_1$$

Pełne odchylenie plamki na ekranie lampy oscyloskopowej

$$h = h_1 + h_2 = \frac{1}{4} \frac{U_o}{U_p d} l_1^2 + \frac{U_o l_1 l_2}{2U_p d} = \frac{1}{2} \frac{U_o l_1}{U_p d} \left(\frac{l_1}{2} + l_2 \right) \quad (6)$$

Czułość płytek odchyłających lampy oscyloskopowej możemy zatem napisać jako:

$$h_e = \frac{h}{U_o} = \frac{1}{2U_p} \frac{l_1}{d} \left(\frac{l_1}{2} + l_2 \right) = \frac{1}{2U_p} \frac{l_1 l}{d} \quad (7)$$

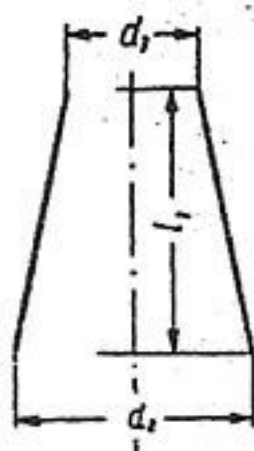
gdzie przez l oznaczyliśmy odległość ekranu od środka płytek odchyłających.

W rzeczywistości elektrody odchyłające lampy oscyloskopowej nie są do siebie równoległe lecz są ustawione pod pewnym kątem, (rys.13); przez co efektywnie zwiększa się długość drogi, na której działa pole elektrostatyczne oraz

czułość układu odchyłającego. Przybliżony wzór na czułość płytek odchyłających ma wtedy postać:

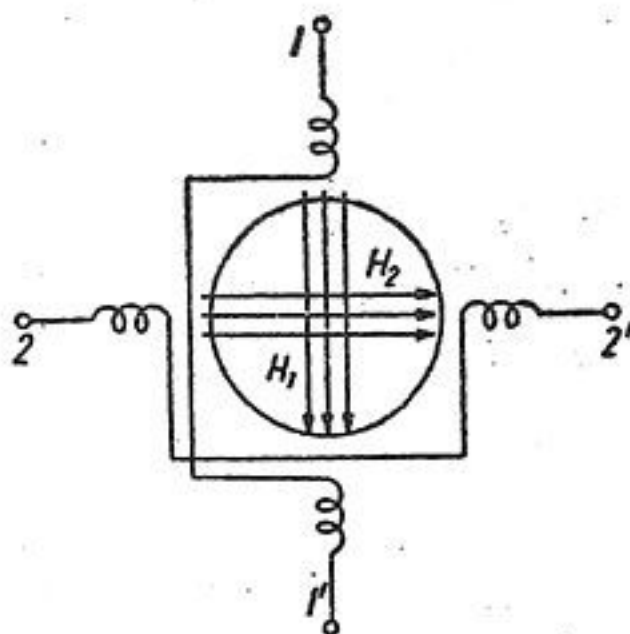
$$h_e \simeq \frac{l_1 l}{2U_p d} \ln \frac{d_2}{d_1}$$

Otrzymane wyrażenia pokazują, że w celu zwiększenia czułości płytek odchyłających należy zwiększyć długość płytek i ich odległość od ekranu, a zmniejszyć odległość między nimi oraz napięcie przyspieszające. Jak zwykle wymagany jest pewien kompromis. W obecnie wytwarzanych lampach oscyloskopowych, czułość płytek odchyłających wynosi 1 do 5 mm/V. Zatem, aby odchylić wiązkę na szerokość całego ekranu, na płytki odchyłające należy doprowadzić napięcie rzędu dziesiątek woltów.



Rys.13. Rzeczywisty układ odchyłający lampy oscyloskopowej

3.2 Magnetyczny układ odchyłający



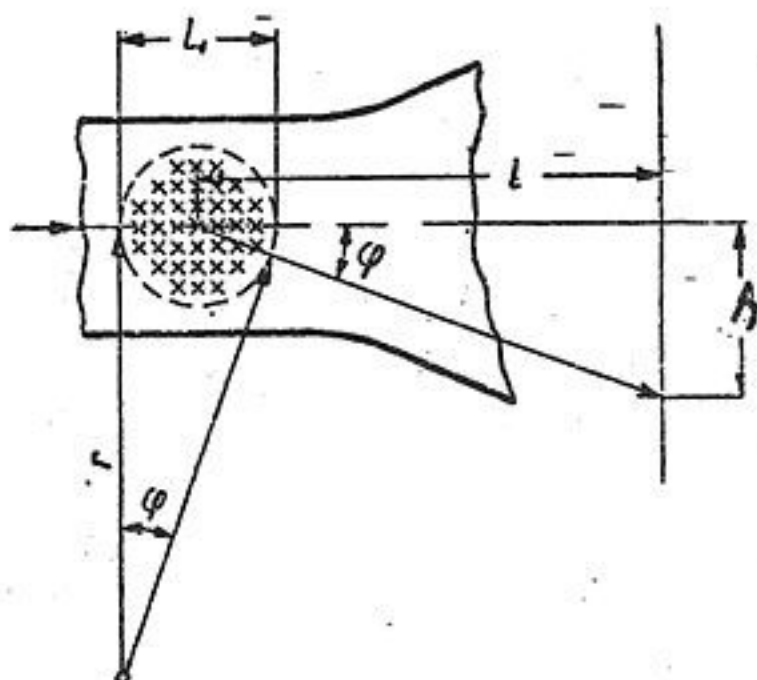
Rys.14. Magnetyczny układ odchyłający wiązkę elektronową

W lampach kineskopowych telewizorów oraz monitorach komputerów, do odchylenia wiązki elektronów, stosuje się pole magnetyczne. Dzieje się tak z następujących powodów:

- 1). Ze względu na duże rozmiary ekranów tych lamp, wiązka elektronowa musi być odchyłona o duży kąt, na stosunkowo małym odcinku przebytej drogi. Warunek ten łatwo spełnia pole magnetyczne.
- 2). Częstość wymagana do pracy kineskopów jest niewielka (ok. 13 kHz), więc zastosowanie cewek magnetycznych, które ze swej natury odznaczają się stosun-

kowo dużą indukcyjnością, nie przeszkadza w sterowaniu strumieniem elektronów. Cewki odchylające wykonane są bez rdzenia żelaznego.

Aby uzyskać odchylenie wiązki elektronowej w pionie i poziomie, pole wytworzone jest przez dwie pary cewek, ustawionych do siebie prostopadle, jak na rysunku 14. Cewki, w parze, są połączone ze sobą szeregowo. Pole magnetyczne cewek ustawionych pionowo przesuwają wiązkę elektronów w poziomie, natomiast cewki ustawione poziomo przesuwają plamkę na ekranie w kierunku pionowym. W celu zapewnienia stałej czułości lampy, przy przesuwaniu plamki po ekranie, cewki magnetyczne muszą mieć specjalny kształt.



Rys.15. Zasada magnetycznego odchylenia elektronów

Tutaj przeprowadzimy uproszczone obliczenia czułości lampy o odchyłaniu magnetycznym. Założymy, że pole magnetyczne wytworzone przez cewki ma kierunek "od nas do rysunku" i zajmuje obszar l_1 , rys.15. Na wiązkę elektronów wchodzących do tego pola będzie działała siła Lorentza

$$F = \frac{evB}{r}$$

i pod jej wpływem, elektron będzie poruszał się po torze kołowym – wewnątrz pola i po stycznej do tego toru – po wyjściu z pola. Promień tego koła

$$r = \frac{mv}{eB}$$

Po przebyciu drogi: $s = r\varphi \simeq l_1$, wiązka wychodzi z pola pod kątem φ w stosunku do osi lampy. Odchylenie plamki na ekranie wynosi: $h = ltg\varphi$, które dla małych kątów odchylenia możemy przyjąć jako: $h = l\varphi$. Na podstawie rysunku widać, że kąt φ równa się kątowi środkowemu opartemu na łuku s elektronu w polu magnetycznym. Zatem:

$$\varphi = \frac{s}{r} \simeq \frac{l_1}{r} = \frac{e}{mv} Bl_1 l$$

Wyrażając v przez napięcie przyspieszające oraz podstawiając wartość e/m dla

elektronu równą $1,7588047\text{C/kg}$ otrzymamy:

$$h \simeq 0,3l_1l \frac{B}{\sqrt{U_p}}$$

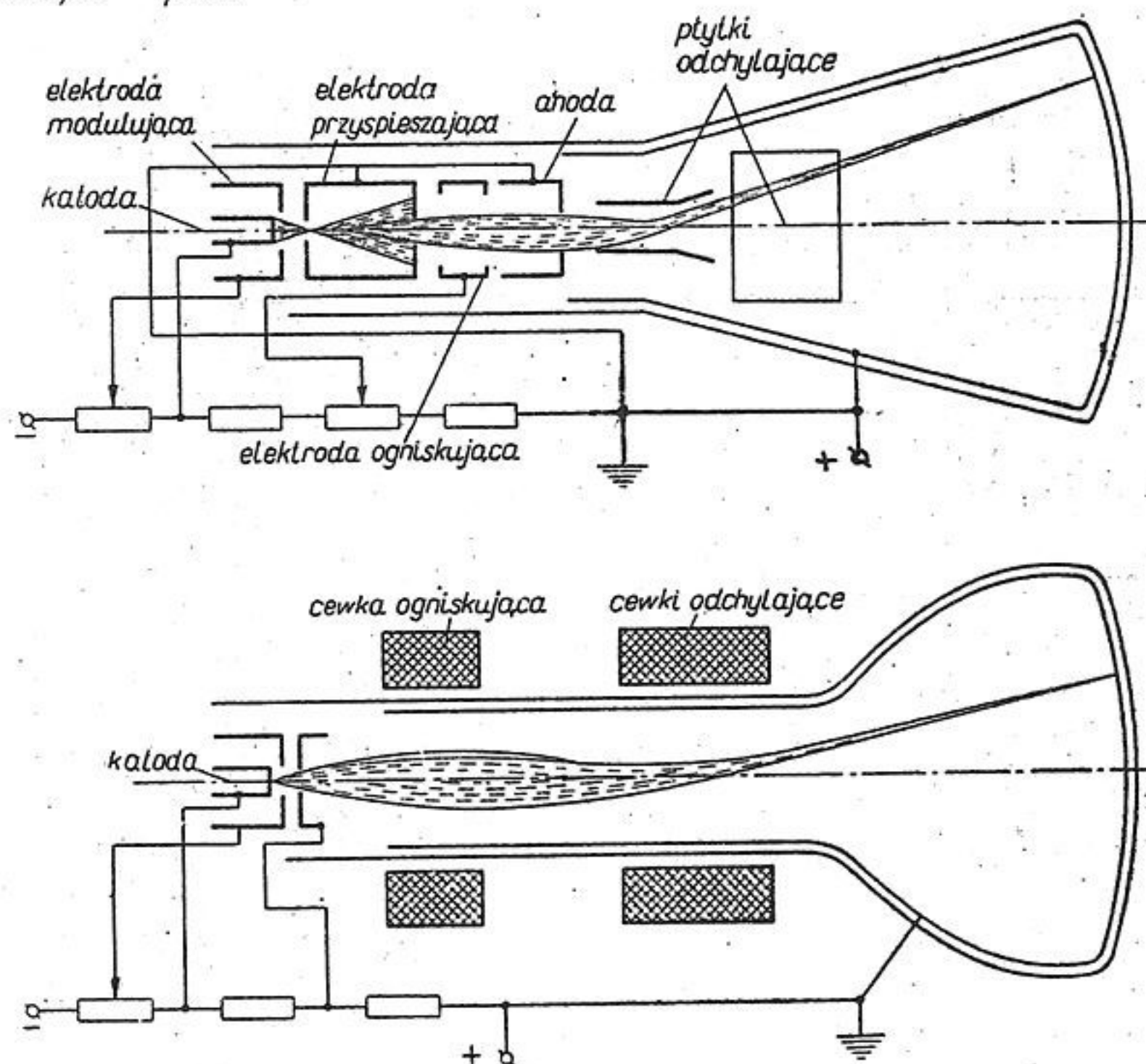
Ponieważ wektor indukcji magnetycznej cewek jest proporcjonalny do liczby amperozwojów, $B = knI$; gdzie k jest współczynnikiem proporcjonalności, zatem:

$$h \simeq 0,3kl_1l \frac{nI}{\sqrt{U_p}}$$

a czułość oscyloskopu, o odchyłaniu magnetycznym, wyniesie:

$$h_m = \frac{h}{nI} = \gamma \frac{l}{\sqrt{U_p}}$$

gdzie: $\gamma = 0,3kl_1$ zależy od rozmiarów i ukształtowania cewek magnetycznych i jest rzędu $0,1\text{V}^{1/2}/\text{Az}$.⁵



Rys.16. Elektryczne i magnetyczne odchyłanie wiązek elektronowych w lampach oscyloskopowych [3]

⁵W lampach o odchyłaniu magnetycznym czułość określona jest przez wielkość przesunięcia plamki, odpowiadającą jednemu amperozwojowi [Az].

Ostatni wzór pokazuje, że czułość oscyloskopu, o odchyłaniu magnetycznym, zależy od napięcia przyspieszającego w mniejszym stopniu, niż to miało miejsce dla odchyłania elektrycznego. Schematy lamp oscyloskopowych o odchyłaniu elektrycznym i magnetycznym, wraz z dzielnikami zasilającymi, pokazane są na rysunku 16.

4 Ekran lamp oscyloskopowych

Ekran oscyloskopu lub lampy kineskopowej od wewnątrz pokryty jest substancją emitującą światło w zakresie widzialnym pod wpływem bombardowania wiązką elektronową. Energia elektronów wywołujących zjawisko elektroluminescencji w luminoforze wynosi: $12 \div 18$ keV – w kineskopach powszechnego użytku i typowych lampach oscyloskopowych oraz $25 \div 100$ keV – w kineskopach projekcyjnych. Jako luminofory wykorzystywane są głównie: tlenek cynku (ZnO), siarczek cynku (ZnS) oraz tlenki i siarczki niektórych innych metali, jak: kadm, wolfram, wapń, magnez, miedź i chrom. Dodanie do luminoforu małych domieszek tzw. aktywatorów: srebra, manganu, miedzi i chromu, zwiększa wydajność luminoforu i zmienia barwę świecenia.

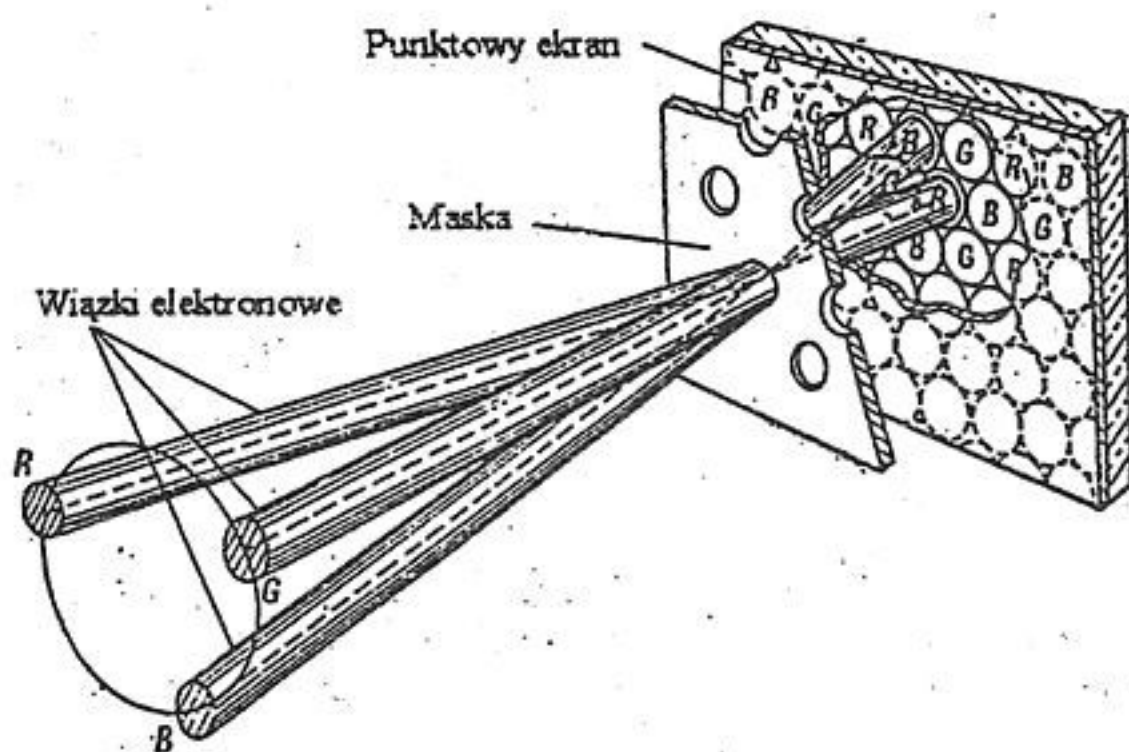
Ekran lamp oscyloskopowych składają się z pojedynczej warstwy luminoforu, emitującej światło jednobarwne. W celu zabezpieczenia luminoforu przed "zatruciem" jonami, które powstają w lampie w wyniku bombardowania wiązką elektronową różnych detali lampy oraz z gazów resztkowych, pokrywa się go od wewnątrz warstwą aluminium. Wskutek odbijania światła zwiększa ona dodatkowo jasność ekranu. Ponadto, warstwa aluminium naniesiona na ekran czyni go przewodzącym prąd elektryczny. Gdyby nie było tej warstwy, bombardowanie ekranu elektronami spowodowałoby, po pewnym czasie, jego naładowanie do bardzo dużego ujemnego potencjału i strumień elektronów zostałby od niego odepchnięty. Dzięki warstwie aluminium, ładunek elektryczny przyniesiony przez wiązkę elektronów jest odprowadzony do zasilacza wysokiego napięcia, a ekran jest utrzymywany na stałym potencjale. Metalizacja ekranu zapobiega również zniekształceniom obrazu, które mogłyby powstać przy dotknięciu ręką do zewnętrznej części ekranu oraz przedostawaniu się światła z rozgrzanej katody. Grubość napyłonego aluminium musi być dobrana odpowiednio: nie może być za gruba – aby nie zatrzymywać nadmiernie bombardujących elektronów, które muszą dotrzeć do luminoforu z odpowiednią energią oraz nie za cienka – aby zabezpieczyć jej przewodność prądową i własności lustrzane. Doświadczalnie stwierdzono, że grubość ta powinna się zawierać w granicach: $5 \cdot 10^{-5} \div 50 \cdot 10^{-5}$ cm.

Wydajność luminoforów jest rzędu $1 \div 20$ cd/W, zależnie od rodzaju luminoforu i energii bombardujących elektronów. Natomiast sprawność przemiany energetycznej elektronów na energię świetlną wynosi $0,3 \div 5\%$. Pozostała część energii jest zamieniana na ciepło ogrzewające luminofor. Wydajność luminoforu maleje wraz ze wzrostem temperatury. Większość ekranów lamp oscyloskopowych jest mało odporna na przegrzanie. Jeżeli wiązka elektronów pada na ekran przez długi czas w tym samym miejscu z dużą intensywnością, to następuje w tym miejscu jego lokalne przegrzanie, co może doprowadzić do zniszczenia struktury krystalicznej luminoforu i utraty zdolności luminescencyjnych. **Aby uniknąć "wypalenia" ekranu, nie wolno zostawiać jaskrawej plamki lub intensywnego nieruchomego obrazu w jednym miejscu.**

Nadmierna jaskrawość plamki powoduje pogorszenie kontrastu obrazu, wsku-

tek zjawiska zwanego "halo", polegającego na otoczeniu plamki przez jasne kręgi. Przyczyną "halo" są wielokrotne wewnętrzne odbicia emitowanego światła, w materiale bańki szklanej i od warstwy aluminium.

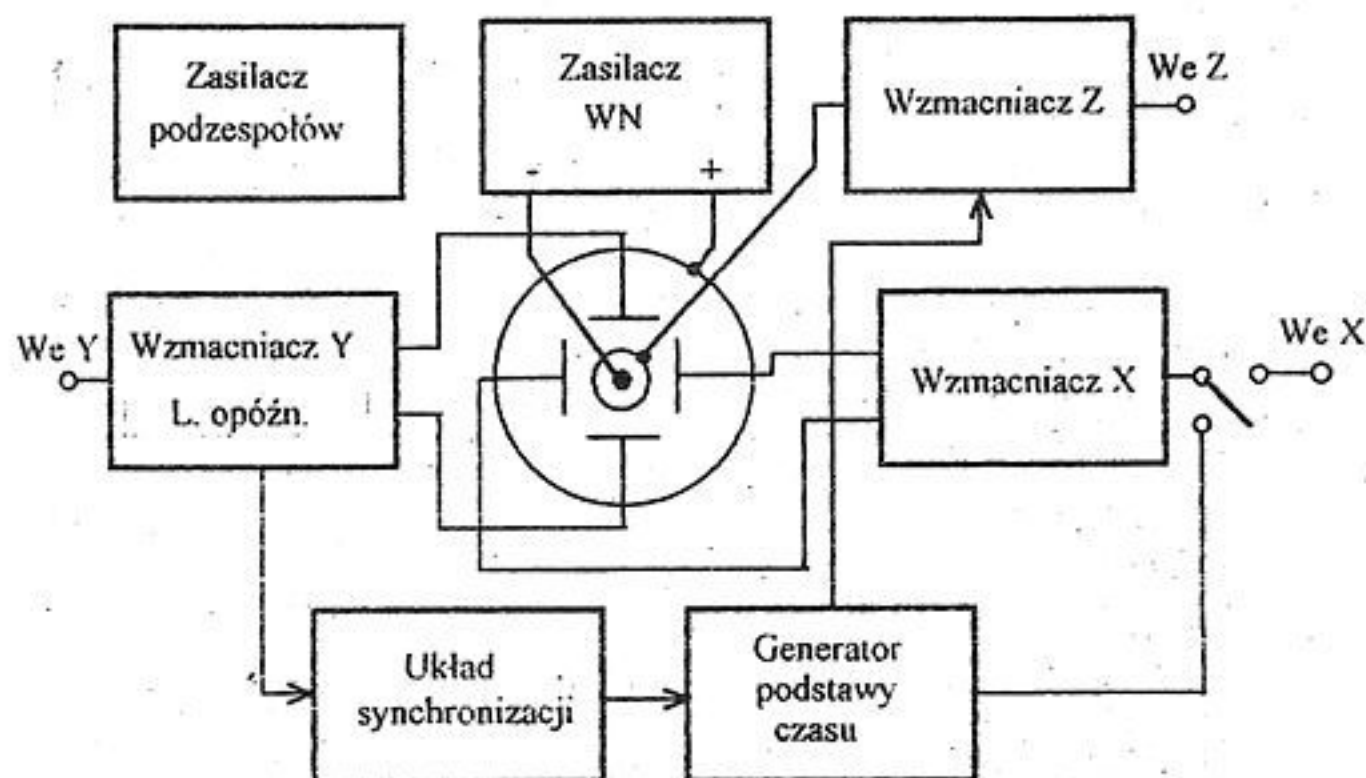
Ważną własnością luminoforów jest czas poświaty, który dla różnych luminoforów może się zmieniać od ok. 5×10^{-6} s. do ok. 20 s. Oznacza to, że w specjalnych oscyloskopach o długim czasie wyświecania, ekran może świecić przez około 20 sekund po jednokrotnym przebiegu wiązki. Oscyloskopy tego typu wykorzystuje się do obserwacji niepowtarzalnych przebiegów elektrycznych. W latach siedemdziesiątych były budowane specjalne lampy oscyloskopowe, które dzięki odpowiedniej konstrukcji i dobudowanemu działu elektronowemu "zapamiętywały" jednorazowy przebieg i następnie utrzymywały go na ekranie.



Rys.17. Działanie maski w monitorze kolorowym

Ekran kineskopów wielobarwnych wykonane są w postaci mozaiki punktów, które pod wpływem wiązki elektronów emitują światło o trzech zasadniczych barwach: R-czerwone, G-zielone, B-niebieskie, rys.17. Każdy punkt barwny ma średnicę 0,3 mm. Obraz barwny na ekranie, otrzymywany jest w wyniku złożenia tych trzech podstawowych kolorów. Intensywność świecenia każdego koloru jest zmieniana, poprzez sterowanie intensywnością wiązki elektronowej, w odpowiadającym mu dziale elektronowym. Ogniskowanie i odchylenie wiązki odbywa się przy pomocy cewek magnetycznych. Aby każda z trzech wiązek popadała na swój luminofor, między działami elektronowymi a ekranem mozaikowym, równoległe do niego, umieszczona jest maska z okrągłymi otworami. Ilość otworów w masce równa się ilości trójkątnych grup różnych luminoforów na ekranie. Każdy otwór w masce przepuszcza trzy wiązki elektronowe w ten sposób, że każda wiązka pada tylko na odpowiadający jej luminofor z danej grupy. Obserwator ekranu widzi sumaryczny efekt świetlny powstały w wyniku złożenia trzech kolorów podstawowych. Sterując odpowiednio intensywnościami poszczególnych wiązek można otrzymać dowolny kolor w odpowiedniej grupie punktów luminoforów – barwny obraz na ekranie.

5 Krótki opis działania głównych układów oscyloskopu



Rys.18. Schemat blokowy oscyloskopu

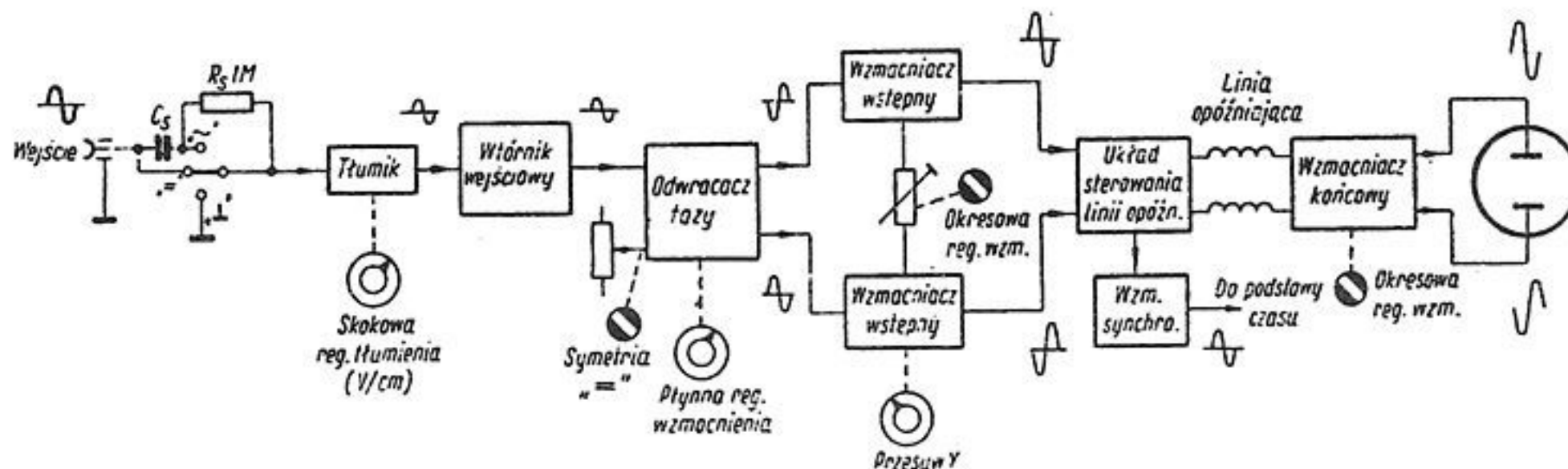
Schemat blokowy oscyloskopu przedstawiono na rysunku 18. Napięcie badane, w większości oscyloskopów, wprowadza się na parę płytek odchylających wiązkę w płaszczyźnie pionowej, (wejście Y). Jak powiedziano w rozdziale 3.1, na płytce lampy oscyloskopowej, należy podać napięcie rzędu kilkudziesięciu woltów. Napięcia, które są badane przy pomocy oscyloskopu, są na ogół znacznie mniejsze i należy je wzmacnić. Wzmocnienie sygnałów odbywa się we wzmacniaczu odchylenia pionowego (wzmacniaczu Y), który znajduje się wewnątrz oscyloskopu. W większości oscyloskopów stosuje się wzmacniacze prądu stałego, dla których dolna częstota graniczna wynosi 0. Częstota górna zależy od celu, do którego przeznaczony jest oscyloskop i zawiera się w granicach: od kilkuset kHz do około 500 MHz. Im szersze jest pasmo oscyloskopu, tym bardziej dokładnie mogą być mierzone sygnały zmienne o dużej częstoci.⁶

Ponieważ plamka na ekranie oscyloskopu jest odchylana od położenia środkowego w górę i w dół, wzmacniacze te buduje się z symetrycznym wyjściem. Aby wzmacniacz mógł wzmacniać przebiegi elektryczne, o różnych kształtach i częstociach, powinien dobrze spełniać wymagania postawione przed oscyloskopem. Powinien to być wzmacniacz posiadający szerokie pasmo przenoszenia – od prądu stałego do 10 MHz, a w oscyloskopach przeznaczonych do specjalnych celów nawet wyżej, do 100 i więcej MHz.

⁶Pasmo wzmacniacza jest to zakres częstoci, zawartych między dolną i górną częstocią graniczną, przy których amplituda odpowiedzi wzmacniacza, na pobudzenie sinusoidalne, maleje do wartości 0,707 (-3dB) amplitudy, przy częstoci wewnątrz zakresu.

5.1 Odchylenie pionowe plamki

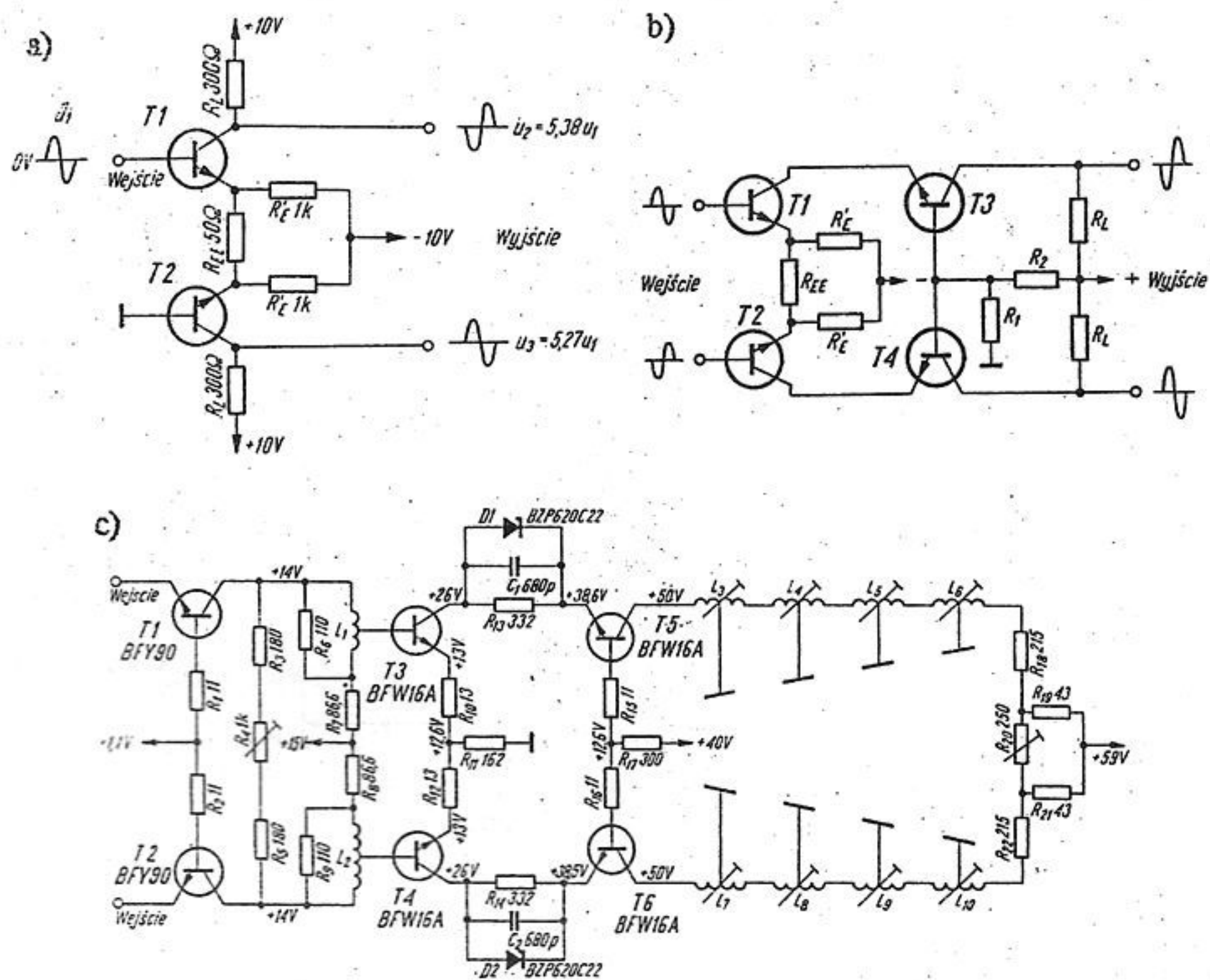
Na rysunku 19 pokazano schemat blokowy wzmacniacza odchylenia pionowego o sprzężeniu bezpośrednim (stałoprądowym). Sygnał z gniazda wejściowego jest doprowadzony do tłumika przez kondensator separujący składową stałą C_s – wejście zmiennoprądowe "∞" i bezpośrednio – wejście stałoprądowe "=". W pozycji "⊥", wejście oscyloskopu jest odłączone od gniazda wejściowego i dołączone do masy. Pozycja ta pozwala ustalić położenie "zera" (0 V) bez odłączania źródła sygnału od wejścia oscyloskopu.



Rys.19. Schemat blokowy wzmacniacza odchylenia pionowego oscyloskopu [4]

Tłumik stanowi dzielnik napięcia wejściowego. Przy jego pomocy można zmniejszać sygnał wejściowy, do wartości zależnej od czułości wzmacniacza i wymaganej wysokości obrazu na ekranie. Tłumik, umieszczony na wejściu wzmacniacza Y, zapobiega przesterowaniu stopni wejściowych wzmacniacza. Za tłumikiem znajduje się wtórnik wejściowy, zbudowany na ogół na tranzystorze polowym, o małej pojemności wejściowej i małym oporze wyjściowym. Zadaniem wtórnika emiterowego jest odseparowanie wejścia wzmacniacza od dużej pojemności wejściowej oscyloskopu. Sygnał z wtórnika emiterowego steruje układ odwracania fazy, którego zadaniem jest przetworzenie asymetrycznego sygnału z wtórnika wejściowego na dwa symetryczne przeciwne sygnały wyjściowe, sterujące dalsze stopnie oscyloskopu. Po wyjściu z układu odwracania fazy sygnał jest symetryczny, aż do końca wzmacniacza. W układzie odwracania fazy znajduje się potencjometr płynnej regulacji wzmacnienia, którego pokrętko jest wyprowadzone na zewnątrz przedniej płyty oscyloskopu oraz potencjometr, (dostępny od wewnątrz dla śrubokręta), służący do korekcji symetrii stałoprądowej. Przy pomocy potencjometru korekcji ustala się punkt pracy odwracacza fazy, tak aby płynna regulacja wzmacnienia nie powodowała ruchu plamki w kierunku osi Y. Jeżeli wzmacnienie odwracania fazy jest niewystarczające, wtedy sygnał można wzmocnić we wzmacniaczu wstępnym, z którym są powiązane układy przesuwu Y i okresowej regulacji wzmacnienia. Wzmocniony sygnał jest dalej doprowadzony do układu sterowania linią opóźniającą. Opóźniony, o czas konieczny do wystartowania podstawy czasu, sygnał steruje wzmacniacz końcowy. Ze wzmacniacza końcowego sygnał jest doprowadzony do płytek odchylających.

Przykład tranzystorowego układu odwracania fazy pokazany jest na rysunku 20a. Rys.20b przedstawia kaskodowy stopień wzmacniający, a rys.20c stopień końcowy wzmacniacza odchylenia pionowego – wzmacniacz mocy. Regulację wzmocnienia, w tym wzmacniaczu, uzyskuje się przez zmianę oporności R_4 w układzie tranzystorów T1 i T2. Tranzystory T5 i T6 sterują lampą oscyloskopową z dzielonymi płytkami. Cewki $L_3 \div L_{10}$ wraz z pojemnościami płytek tworzą linię opóźniającą, zamkniętą dokładnie dobieranym oporem R_{20} , tak aby był on równym oporności falowej linii. Przedstawiony układ wzmacniacza mocy był stosowany w oscyloskopie OS-710, pracującym przy górnej częstotliwości około 120 MHz. Przy dużych częstotliwościach pracy oscyloskopu, normalne jednorodne płytki odchyłające posiadają zbyt dużą indukcyjność i dlatego stosuje się płytki dzielone lub spiralne.

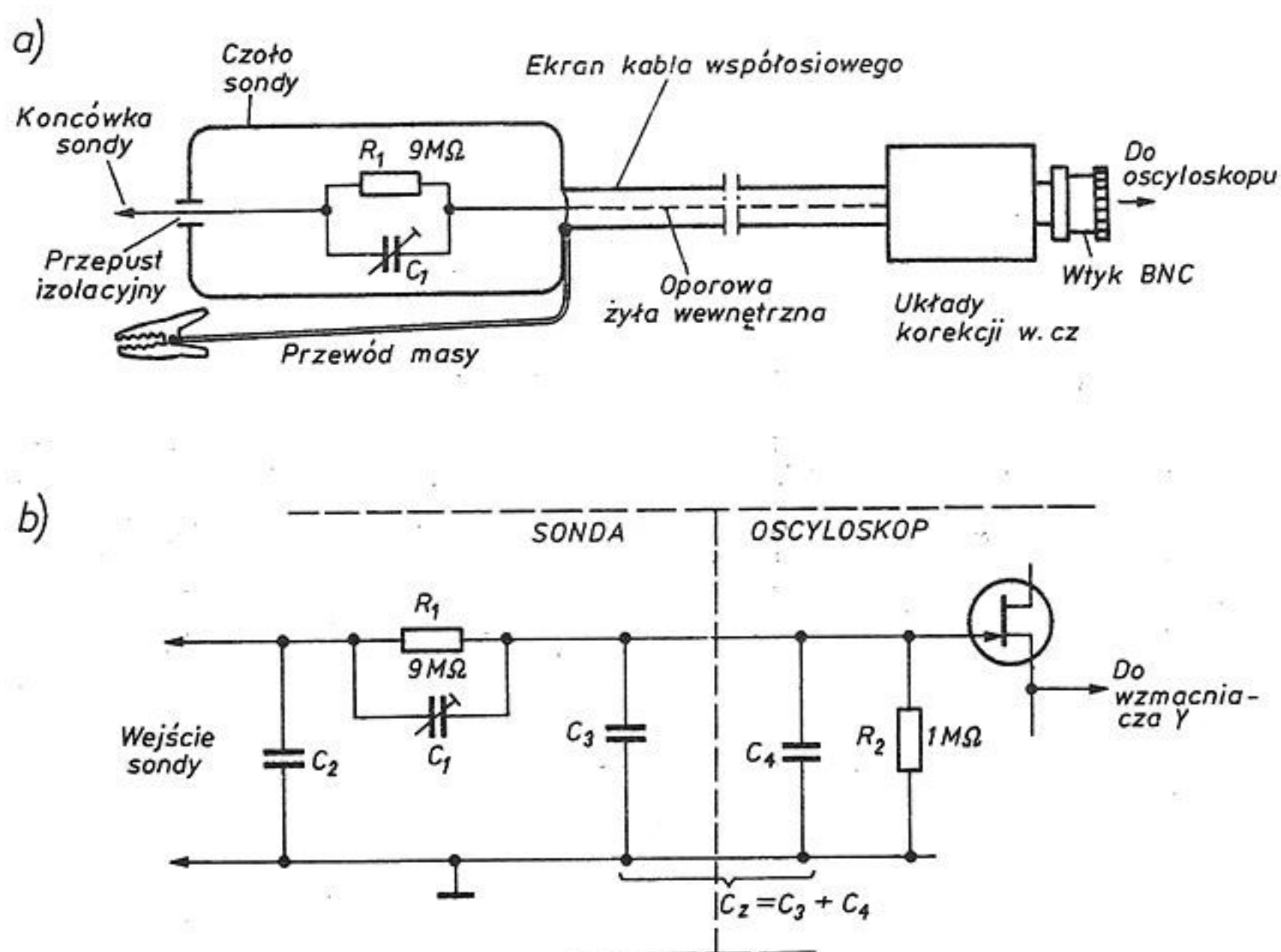


Rys.20. Schematy ideowe: a) układu odwracania fazy, b) kaskodowego stopnia wzmacniacza w torze Y, c) wzmacniacza mocy [4]

Współczynnik wzmocnienia większości wzmacniaczy, stosowanych w torze Y oscyloskopów, zawiera się w granicach od kilkuset do kilku tysięcy. Wzmocnienie wzmacniaczy można zmieniać w sposób skokowy i płynny. Dzięki temu można zmieniać amplitudę obserwowanego sygnału w szerokim zakresie i dobrać taką jej

wartość, aby uzyskać najlepsze warunki obserwacji. Pokrętko do regulacji skokowej wzmocnienia wzmacniacza, jest na ogół opisane w ten sposób, że w każdej pozycji podana jest wartość zmiany napięcia na wejściu wzmacniacza, potrzebnego do wychylenia plamki o jedną jednostkę skali na ekranie oscyloskopu. Poprzez zmianę położenia tego pokrętkła, można zmieniać czułość płytek odchylenia pionowego oscyloskopu, np. od jednego mikrowolta na centymetr ($\mu\text{V}/\text{cm}$), do kilku wolt na centymetr. Aby otrzymać niesfałszowany wynik pomiaru, pokrętko regulacji płynnej wzmocnienia wzmacniacza Y powinno być ustawione w położeniu "kalibrowane". Jeżeli amplituda badanego sygnału jest duża, to można sygnał ten wprowadzić bezpośrednio na płytki odchylające lampy. Do obserwacji sygnałów o bardzo dużej amplitudzie, rzędu setek i więcej woltów, stosuje się specjalne dzielniki napięcia. Zmniejszone w znanym stosunku napięcie, z wyjścia takiego dzielnika, podaje się bezpośrednio na płytki lampy.

5.2 Sonda wejściowa



Rys.21. Sonda RC o tłumieniu 1:10: a) schemat ideowy, b) układ zastępczy [5]

W przypadku, gdy badane źródło posiada małą moc, prądy płynące w kablu łączącym to źródło z oscyloskopem, (wskutek oporności kabla oraz jego pojemności), mogą powodować że obraz oglądany na oscyloskopie będzie znacznie odbiegać od kształtu sygnału wytwarzanego w źródle. Aby oscyloskop możliwie wiernie odtwarzał takie słabe przebiegi, stosuje się sondy, włączane między źródło

a wejście Y oscyloskopu. Schemat takiej sondy przedstawiony jest na rysunku 21.

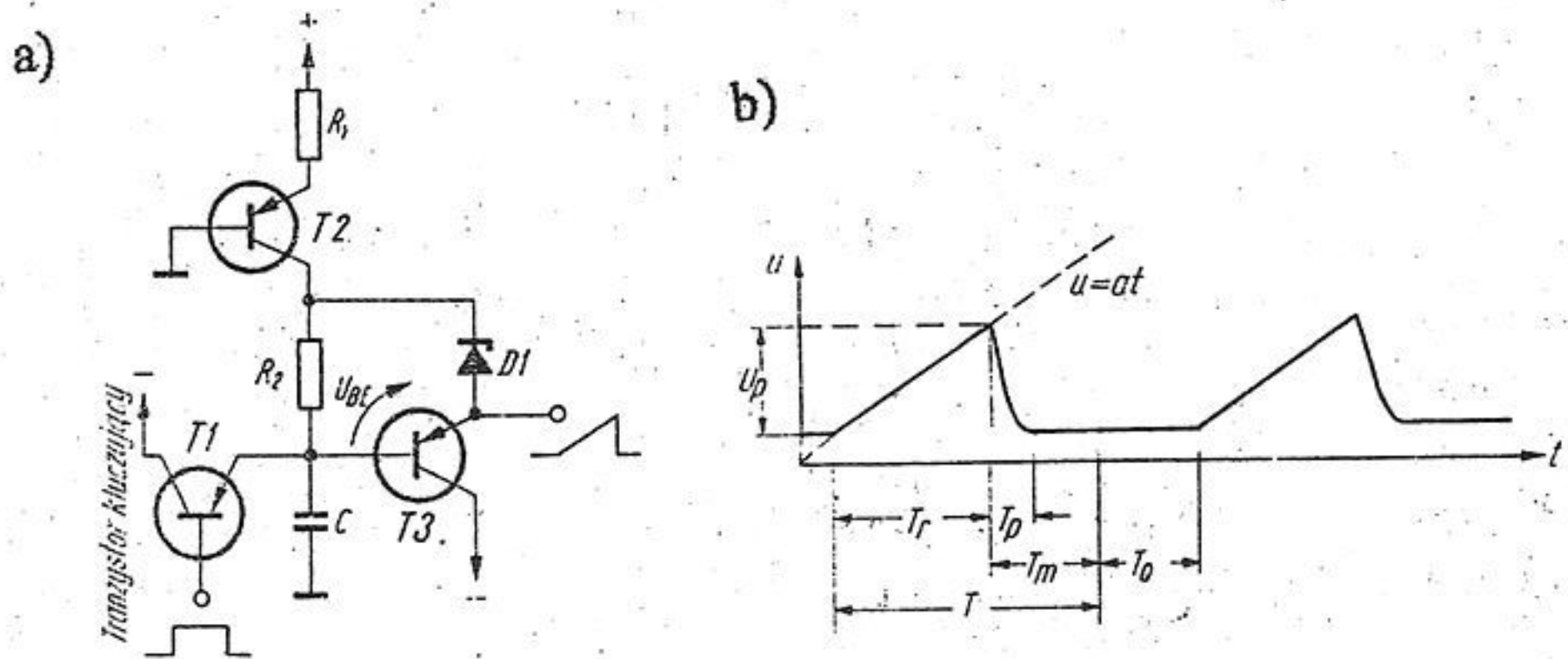
Jak widać ze schematu zastępczego sondy, (rys.21b), oporność omowa sondy ($9M\Omega$) i opór wejściowy oscyloskopu ($1M\Omega$) stanowią dzielnik napięciowy. Jedna dziesiąta wartości napięcia na wejściu sondy jest podawana na bramkę tranzystora polowego w oscyloskopie. Mówimy, że sonda tłumi sygnał wejściowy 10 razy lub że posiadamy sondę o tłumieniu dziesięciokrotnym. Poprzez podłączenie sondy, badane źródło jest obciążone opornością $10 M\Omega$, a nie $1 M\Omega$ jak przy podłączeniu bezpośrednim. Zwiększając opór R_1 uzyskujemy wzrost oporu wejściowego i jednocześnie wzrost tłumienia. Wzrost oporu wejściowego powoduje mniejsze obciążenie źródła. Natomiast sygnał zmniejszony przez sondę można wzmocnić zwiększając czułość oscyloskopu. Produkowane są sondy o tłumieniu 1000.

Wierne przekazanie sygnałów zmiennych wymaga płaskiej charakterystyki częstotściowej dzielnika R_1C_1 i R_2C_z , gdzie C_z jest sumą pojemności kabla C_3 i pojemności wejściowej oscyloskopu C_4 . Płaską charakterystykę, w szerokim zakresie częstotści w takim układzie, otrzymuje się gdy spełniony jest warunek: $R_1C_1 = R_2C_z$. Ponieważ pojemność C_z nie jest dokładnie określona, więc skompensowanie dzielnika uzyskuje się poprzez dostrojenie pojemności C_1 . Zwykle jest to trymer o pojemności rzędu $8\div 15$ pF. Sondę stroi się doprowadzając do jej wejścia sygnał prostokątny z generatora impulsów lub korzystając z impulsów kalibracyjnych o częstotści 1 kHz, na ogół wyprowadzonych na odpowiednie gniazdo w każdym współczesnym oscyloskopie. Sondy budowane są zwykle w ten sposób, że poprzez obrót obudowy sondy w stosunku do jej korpusu zmienia się pojemność trymera. Obserwując na oscyloskopie kształt sygnału kalibracyjnego podłączonego na wejście sondy i pokręcając obudową sondy doprowadzamy do zniknięcia zaokrągleń na narożach impulsu prostokątnego. Wtedy sondę uważamy za skompensowaną.

5.3 Odchylenie poziome

Na drugą parę płytek (oś X) wprowadza się napięcie zmieniające się w znany sposób od czasu. Napięcie to, w oscyloskopie wytwarzane jest przy pomocy specjalnego "generatora podstawy czasu". Na ogół, w oscyloskopach stosowana jest liniowa podstawa czasu, w której napięcie jest proporcjonalne do czasu. Do wytworzenia takich napięć wykorzystywane są generatory drgań piłowych. Uproszczony schemat generatora drgań piłowych pokazany jest na rysunku 22a. Tranzystory T1 i T3 włączone są do układu jako wtórnik emiterowe, natomiast tranzystor T2 stanowi źródło stałoprądowe. Jeżeli na bazie tranzystora T1 pojawi się napięcie dodatnie, to tranzystor ten zostaje zablokowany i kondensator C zaczyna się ładować przez opór R_2 i diodę Zenera D1. Prąd płynący przez diodę D1 utrzymuje na niej stałe napięcie. Napięcie na oporniku R_2 , równa się sumie napięć na diodzie D1 i złączu baza-emiter tranzystora T3. Stała wartość napięcia na oporniku R_2 oznacza, że kondensator C jest ładowany stałym prądem, a więc napięcie na nim i na emiterze tranzystora T3 rośnie liniowo z czasem, do momentu aż impuls

na bazie tranzystora T1 nie zniknie. Z chwilą zakończenia impulsu kluczującego kondensator C rozładowuje się przez tranzystor T1, napięcie na nim spada do zera, a prąd źródła stałoprądowego płynie teraz przez tranzystor T1.



Rys.22. a) Uproszczony schemat elektryczny generatora drgań piłowych, b) kształt drgań elektrycznych z generatora piłowego. T_r – czas roboczy, T_p – czas powrotu, T_m – czas martwy, T_o – czas oczekiwania na impuls wyzwalający, T – minimalny okres powtarzania, U_p – amplituda sygnału piłokształtnego, a – średnia prędkość narastania impulsu piłokształtnego

Kształt impulsów piłokształtnych wytworzonych na emiterze tranzystora T3 przedstawiony jest na rysunku 22b. Można wyróżnić na nim cztery odcinki odpowiadające: czasowi roboczemu T_r , czasowi powrotu T_p , czasowi martwemu T_m i czasowi oczekiwania na impuls wyzwalający T_o . Czas martwy jest to okres czasu, w którym przychodzący impuls wyzwalający nie może wyzwolić podstawy czasu. Czas martwy jest dłuższy od czasu powrotu o czas potrzebny na zakończenie procesów nieustalonych w układzie i powrotu do stanu wyjściowego. W tym czasie układ nie jest zdolny do prawidłowego wygenerowania impulsu piłowego, zapewniającego dokładną powtarzalność kolejnych odcinków podstawy czasu. Zazwyczaj w oscyloskopach laboratoryjnych czas martwy jest równy, a nawet dłuższy od minimalnego czasu roboczego; kiedy oscyloskop pracuje przy maksymalnej częstotliwości. Minimalny czas powtarzania impulsów T nie może być mniejszy od sumy czasu roboczego i czasu martwego.

Dla prawidłowej pracy oscyloskopu, na płytce odchylenia poziomego, należy podać napięcie o amplitudzie kilkudziesięciu woltów. Konieczne jest więc wzmocnienie impulsów piłokształtnych do takiej amplitudy. Wzmacnianie to dokonuje się przy pomocy wzmacniacza X, na którego końcu znajdują się płytki odchyłające poziomo. Przewidziana jest możliwość, odłączenia wejścia tego wzmacniacza od generatora podstawy czasu i podłączenia go do innego gniazda wejściowego oscyloskopu – "Wejścia X". Na wejście X można podać wtedy jakieś inne na-

pięcie, umożliwiając obserwację zjawiska obserwowanego na osi Y od przebiegu na osi X. Charakterystyki wzmacniaczy X, w oscyloskopach laboratoryjnych, są podobne do charakterystyk wzmacniaczy Y.

Wzmocnienie wzmacniacza osi X można zmieniać, w ograniczonym zakresie w sposób płynny i w niektórych oscyloskopach w sposób skokowy. Jest to czasami przydatne do rozciągnięcia na ekranie badanego impulsu dla dokładniejszego jego obejrzenia. Przy skokowej zmianie, wzmocnienie wzmacniacza X zmienia się na ogół kilkakrotnie, wskutek czego obraz na ekranie zostaje rozciągnięty w kierunku poziomym poza ekran. Interesującą część przebiegu można wtedy wprowadzić na ekran przy pomocy pokrętła przesuwu plamki wzdłuż osi X. Kilkakrotne rozciągnięcie obrazu wiąże się ze zmniejszeniem jaskrawości obserwowanego przebiegu, która maleje proporcjonalnie do rozciągnięcia. Rozciąganie obrazu jest wygodne wtedy, gdy interesujący fragment przebiegu znajduje się na prawym brzegu ekranu. Wzrost prędkości podstawy czasu, (zmiana częstości bez rozciągania), spowodowałby usunięcie tego fragmentu w prawo poza ekran.

Częstość generatora podstawy czasu można zmieniać skokowo i płynnie. Połączka przełącznika od skokowej zmiany częstości odpowiada podanym jednostkom czasu na centymetr osi X, gdy pokrętło odpowiadające płynnej zmianie częstości znajduje się w położeniu wykalibrowania lub odpowiednia lampka z nim związana nie świeci się.

5.4 Układ wygaszania biegu powrotnego plamki

Spadek napięcia na wyjściu wzmacniacza X (rys.22b), od wartości maksymalnej, odpowiadającej prawemu skrajnemu położeniu plamki do wartości minimalnej, gdy plamka znajduje się na lewym brzegu ekranu byłby widoczny w postaci smugi, gdyby oscyloskop nie posiadał układu do wygaszania powrotnego biegu plamki. Układ wygaszania produkuje ujemny sygnał, podawany na cylinder Wehnelta, w czasie gdy napięcie generatora podstawy czasu spada od wartości maksymalnej do minimalnej oraz gdy generator podstawy czasu oczekuje na kolejny impuls wyzwalający. Oprócz metody wygaszania biegu powrotnego plamki, stosowana jest metoda rozjaśniania obrazu tylko w czasie ruchu roboczego plamki. Ponieważ metoda wygaszania nie nadaje się do zastosowania w oscyloskopach z wyzwalaną podstawą czasu, które obecnie są produkowane prawie wyłącznie, więc ostatnio prawie się jej nie stosuje. Metoda rozjaśniania biegu roboczego plamki polega na podaniu, na elektrodę sterującą (cylinder Wehnelta), dodatniego skoku napięcia na czas trwania przebiegu roboczego. Gdy nie ma tego impulsu, na elektrodzie Wehnelta panuje takie napięcie, że plamka na ekranie oscyloskopu z wyzwalaną podstawą czasu jest słabo widoczna w lewym skraju ekranu. Jaskrawość tej plamki można zmieniać potencjometrem, zmieniając wartość składowej stałej potencjału cylindra Wehnelta.

5.5 Układ wyzwalań i synchronizacji

Obserwowanie na ekranie przebiegów, w postaci nieruchomych figur, wymaga zsynchronizowania generatora podstawy czasu z częstotliwością badanego przebiegu. Osiąga się to poprzez zmianę częstotliwości podstawy czasu. Stosunek częstotliwości badanego przebiegu do częstotliwości generatora podstawy czasu powinien być równy stosunkowi liczb całkowitych. Nieruchomy obraz na ekranie oscyloskopu oznacza, że napięcie piłokształtne zaczyna się stale w analogicznym punkcie oglądanego przebiegu, tzn. w tej samej fazie. Jeżeli w kolejnych okresach podstawy czasu moment wyzwolenia podstawy czasu przypada na inne fazy, to obraz przebiegu na ekranie jest niestabilny i przesuwa się w lewo lub prawo. Stabilny obraz na ekranie uzyskuje się dzięki dodatkowemu stopniowi "impulsatora", w układzie generatora podstawy czasu, który wykorzystuje część napięcia pobieranego ze wzmacniacza Y. Zadaniem impulsatora jest przekształcenie sygnału, o dowolnym kształcie i częstotliwości na sygnał znormalizowany, o stałej amplitudzie i kształcie, który wyzwala lub synchronizuje podstawę czasu.

Do badania przebiegów nieokresowych lub jednorazowych stosuje się wyzwalaną podstawę czasu oscyloskopu, która uruchamia generator podstawy czasu gdy na wejście układu przychodzi sygnał badany. Wprowadzenie badanego napięcia na zaciski wejściowe oscyloskopu powoduje jednorazowe zadziałanie układu spustowego – wiązka raz przechodzi przez ekran lampy i układ wraca do stanu wyjściowego. Wyzwalana podstawa czasu oscyloskopu umożliwia obserwację impulsów pojawiających się nieperiodycznie, np. impulsów z licznika Geigera-Müllera. Wadą tej metody jest opóźnione uruchomienie podstawy czasu w stosunku do początku przebiegu, (gdy napięcie w impulsie narosło już do pewnej wartości). Początkowych zmian badanego przebiegu nie można obserwować, gdyż zanim zostanie uruchomiona podstawa czasu część przebiegu już przeminęła. Aby tego uniknąć, należy przebieg badany doprowadzić do płytek odchylających z opóźnieniem, większym od opóźnienia startu podstawy czasu. W tym celu, w tor wzmacniacza odchylenia pionowego wbudowuje się specjalną linię opóźniającą, rys.19, o czasie opóźnienia około $0,2 \mu\text{s}$. W ten sposób, podstawa czasu oscyloskopu zostaje uruchomiona przez wstępnie wzmocniony sygnał wejściowy, który wyprzedza całkowicie wzmocniony sygnał podawany na płytki Y. Na ekranie oscyloskopu otrzymuje się najpierw poziomy odcinek, odpowiadający upływowi czasu między uruchomieniem podstawy czasu i pojawieniem się opóźnionego impulsu na wyjściu wzmacniacza Y, a dopiero po nim widoczny jest cały impuls badany.

5.6 Regulacja jasności plamki – wzmacniacz Z

Trzecie wejście oscyloskopu służy do regulacji jasności plamki świetlnej na ekranie (tzw. oś Z). Zmiana jasności plamki pozwala na wyodrębnienie określonych części badanego przebiegu. W dobrych oscyloskopach obserwator ma możliwość

wpływania na podświetloną część na ekranie oscyloskopu, może ją rozszerzać i przesuwac po ekranie, co pozwala mu na dokładniejsze określenie parametrów amplitudowych i czasowych obserwowanego sygnału. W niektórych oscyloskopach modulację jasności plamki stosuje się w celu naniesienia znaczników czasowych. Modulację taką osiąga się poprzez podanie na cylinder Wehnelta krótkotrwałych, prostokątnych impulsów dodatnich, o dokładnie znanym czasie repetycji. Wtedy na kreślonej przez wiązkę linii na ekranie lampy pojawiają się odcinki o odmiennej jasności. Jak powiedziano poprzednio (pkt.2.1), zmiana napięcia na elektrodzie Wehnelta prowadzi do częściowego rozogniskowania wiązki, dlatego przerywane przebiegi na ekranie oscyloskopu są częściowo rozmyte. Nowoczesne oscyloskopy są wyposażone w tzw. znaczniki (dwie pary przesuwalnych linii – poziomych i pionowych) między którymi można umieścić badany sygnał. Amplitudę oraz czas między tymi znacznikami otrzymuje się w postaci wydruku na brzegach ekranu.

5.7 Pamięć cyfrowa

Oscyloskopy przeznaczone do specjalnych celów, produkowane przez renomowane firmy zachodnie, wyposażone są w pamięci, które zapamiętują jednorazowy impuls badany i odtwarzają go na ekranie. W takich oscyloskopach, badany impuls jest próbkowany, przy pomocy przetwornika amplituda-cyfra, a poszczególne jego części są zapamiętane w pamięci oscyloskopu. Oscyloskopy takie są często sprzężone z komputerem, co pozwala na opracowywanie otrzymywanych przebiegów przy pomocy odpowiednich programów.

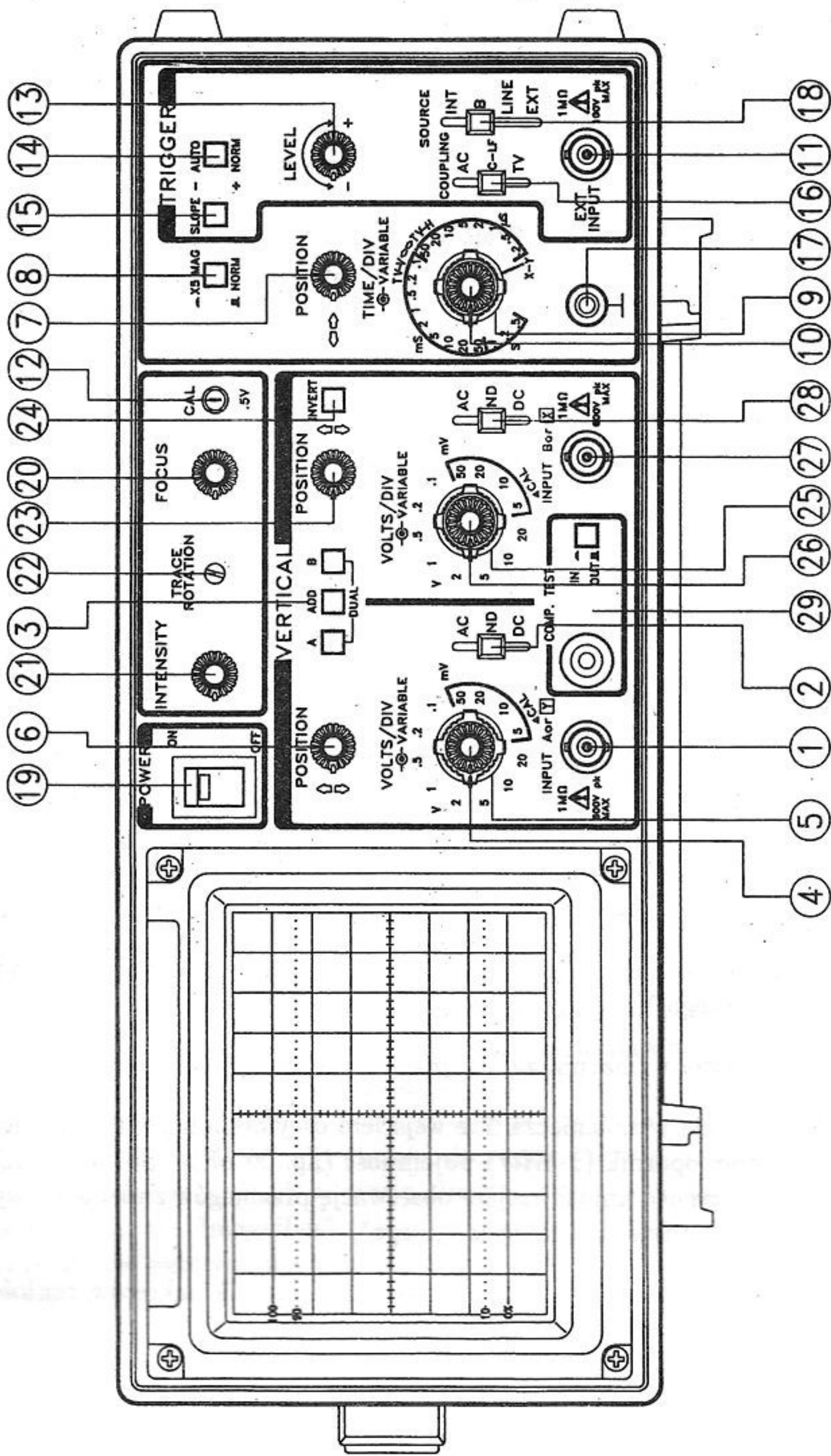
6 Płyta czołowa oscyloskopu

Większość pokręteł służących do regulacji układów elektronicznych oscyloskopu oraz gniazd wejściowych umieszczonych jest na przedniej ścianie przyrządu – płycie czołowej oscyloskopu. Wygląd typowej płyty czołowej przedstawiony jest na rysunku 23. Opisy poszczególnych elementów są zazwyczaj wykonane w języku angielskim. Jak widać z rysunku, na płycie czołowej można wyróżnić kilka pól z przełącznikami i pokrętłami, odpowiadających różnym układom elektronicznym oscyloskopu:

- ekran lampy oscyloskopowej ze skalą,
- tor odchylenia pionowego "VERTICAL",
- tor odchylenia poziomego z pokrętłem "TIME/DIV",
- tor wyzwalań "TRIGGER".

Oprócz wyżej wymienionych układów, na ogół w pobliżu ekranu lampy oscyloskopowej, znajduje się jeszcze szereg przełączników i pokręteł. Przełącznik "POWER" (19) służy do włączenia oscyloskopu do sieci prądu zmiennego. Pokrętłem "INTENSITY" (21) można nastawić odpowiednią jasność plamki, a tym samym jasność otrzymywanego obrazu. Przy pomocy pokrętła "FOCUS" (20) ustawia się ostrość obrazu. Przełącznik "BEAM FINDER" (nie pokazany na rysunku), umieszczony w niektórych oscyloskopach, może być czasem pomocny przy braku obrazu na ekranie do znalezienia miejsca dokąd "uciekła" plamka z ekranu oscyloskopu; jest to tzw. przycisk przywołujący plamkę. Przycisk "TRIGGER VIEW", występujący także nie we wszystkich oscyloskopach, pozwala wyświetlić sygnał wyzwalający podstawę czasu oscyloskopu. Gniazdo "CAL" (*calibrating*) (12) jest źródłem kalibrowanego sygnału o amplitudzie, podanej obok niego lub przy odpowiednim przycisku, pozwalającym wybrać odpowiednią jej wartość. Włącznik "COMP TEST" (29) służy do testowania układów elektronicznych oscyloskopu w celu ustawienia ich prawidłowej pracy.

Główną częścią płyty czołowej oscyloskopu jest ekran lampy oscyloskopowej. Ekran współczesnych lamp oscyloskopowych są płaskie, co ułatwia wyskalowanie w kierunkach X i Y. Celem uniknięcia paralaksy skala wykonana jest na wewnętrznej stronie szklanej części ekranu. Dzięki temu wytworzony na ekranie obraz znajduje się w tej samej płaszczyźnie co skala. Skala główna wykonana jest w postaci pionowych i poziomych linii prostych, narysowanych na szkłe i zaczernionych, tworzących kwadratową siatkę o rozmiarach "oczka" w przybliżeniu $1\text{cm} \times 1\text{cm}$. Linie środkowe siatki: pionowe i poziome; tworzące osie X i Y, mają naniesioną drobniejszą podziałkę. Bok oczka na tych osiach podzielony jest jeszcze na 5 części. Ta drobniejsza skala pozwala na dokładniejszy odczyt, zarówno



Rys.23. Typowy wygląd płyty czołowej oscyloskopu

amplitudy sygnału jak i czasu jego trwania. Amplitudę i czas trwania obserwowanego impulsu odczytuje się jako iloczyn podziałek skali głównej, zajętych przez sygnał, pomnożonych przez wartość napięcia lub czasu odpowiadających jednemu oczku skali, wskazanej przez pozycje przełączników "VOLTS/DIV" (5 i 25) i "TIME/DIV" (9). W większości produkowanych obecnie oscyloskopów, dwie skrajne linie poziome skali oznaczone są (z lewej strony) jako 0% i 100%. W ich pobliżu znajdują się kropkowane linie 10% i 90%. Dzięki tym liniom można łatwo określić czas narastania i spadku impulsu, umieszczając go poprzez zmianę wzmocnienia wmacniacza Y (pokrętko 4 lub 26) i położenia pionowego (6 lub 23) między liniami 0% i 100%. Czas odpowiadający przejściu impulsu między liniami 10% i 90% jest jego czasem narastania, a czas przejścia opadającego zbocza impulsu między liniami 90% i 10% jest czasem spadku.

6.1 Tor odchylenia pionowego

Oscyloskopy produkowane obecnie mają zazwyczaj dwa kanały wejściowe, służące do obserwacji dwóch przebiegów jednocześnie, (rys. 23), co pozwala określić związki czasowe między tymi sygnałami. Wejścia tych kanałów widoczne są w ramce "VERTICAL" pod napisami "INPUT A" i "INPUT B", oznaczonymi na dole rysunku numerami (1) i (27). Zazwyczaj obok takich wejść podana jest oporność wejścia (na rysunku $1\text{ M}\Omega$) oraz napięcie przebicia, tj. maksymalne napięcie między masą oscyloskopu a gniazdem wejściowym nie powodujące uszkodzenia wejściowych układów oscyloskopu (na rysunku 500V). Czasami podawana jest wartość pojemności włączonej równolegle z oporem wejściowym (np. 20pF).

Powyżej i nieco na prawo wejścia znajduje się zazwyczaj przełącznik rodzaju sprzężenia wejścia każdego kanału (2) i (28) pozwalający na:

- bezpośrednie połączenie wejścia oscyloskopu z wejściem wmacniacza odchylenia pionowego Y – pozycja "DC" (*direct current*),
- połączenie wejścia wmacniacza Y z masą – pozycja "GND" (*ground*),
- połączenie wejścia wmacniacza Y z wejściem oscyloskopu poprzez równolegle połączone: opornik ($1\text{ M}\Omega$) i pojemność (np. 20 pF) – pozycja "AC" (*alternating current*); umożliwiające obserwację przebiegów zmiennych występujących na podkładzie napięcia stałego.

Każdy kanał wyposażony jest w kalibrowany przełącznik zakresów czułości wejściowej wmacniacza odchylenia pionowego Y oznaczony "VOLTS/DIV" (5) i (25). Przy pomocy tego przełącznika można ustawić najdogodniejszą do obserwacji wielkość obrazu na ekranie oscyloskopu. Wartość napięcia sygnału wejściowego określamy jako iloczyn zajmowanych przez sygnał pionowych działek ekranu pomnożonych przez "czułość", wskazywaną przez pokrętko przełącznika zmian skokowych. Odczyt amplitudy badanego sygnału będzie prawidłowy gdy

pokrętko potencjometru płynnej regulacji wzmocnienia (4) lub (26), znajdujące się w centrum przełącznika zmian skokowych, będzie ustawione w pozycji odpowiadającej wykalibrowaniu, jak wskazuje napis "CAL" (*calibrating*). Może to być skrajne prawe położenie pokrętła lub zasygnalizowane przez wygaszenie odpowiedniej lampki.

Ponadto, w polu wzmacniacza odchylenia pionowego, znajdują się jeszcze pokrętła: przesuwające obraz w pionie – "POSITION" (6) dla kanału A i (23) dla kanału B, przycisk odwracania fazy sygnału (przynajmniej w jednym kanale) – "INVERT" (24) oraz przyciski trybu odchylenia pionowego (3). Wciśnięcie przycisku "A" lub "B" powoduje wyświetlanie obrazu jednego przebiegu podanego na wejście "INPUT A" (1) lub "INPUT B" (27). Wciśnięcie obu przycisków jednocześnie "DUAL" uruchamia tryb dwukanałowy. W tym rodzaju pracy, zależnie od częstości podstawy czasu oscyloskopu, przebiegi są oglądane w trybie "chopping" (*siekany*) – przy małej częstości podstawy czasu lub w trybie "alternating" (*przemienne*) – przy dużej częstości podstawy czasu. W trybie siekanym, w czasie jednego przebiegu plamki po ekranie oscyloskopu, wyświetlane są wielokrotnie wycinki obrazów z obu kanałów. Częstość przełączania kanałów wynosi: $0,1 \div 1$ MHz i jest znacznie większa od nastawionej częstości podstawy czasu. W trybie przemienne, w czasie jednego przebiegu plamki przez ekran lampy, oglądany jest przebieg z jednego wejścia, a w czasie następnego okresu roboczego podstawy czasu wyświetlany jest przebieg z drugiego wejścia i tak kolejno.

6.2 Tor odchylenia poziomego "horizontal"

W polu odpowiadającym poziomemu odchyleniu wiązki znajduje się przełącznik skokowej regulacji okresu podstawy czasu "TIME/DIV" (9). Liczba odpowiadająca określonej pozycji pokrętła wskazuje czas (w ms lub μ s), w którym plamka przebiega na ekranie odcinek wyznaczony przez jedno "oczko" skali, jeżeli pokrętko potencjometru płynnej regulacji okresu podstawy czasu (10) znajduje się w położeniu wykalibrowania. Obrót przełącznika w skrajne położenie włącza tryb odchylenia X – Y. Wtedy sygnał podany na wejście kanału B steruje odchyleniem poziomym plamki.⁷ Powyżej tego pokrętła znajduje się pokrętko potencjometru "POSITION" (7) służące do przesuwania całego obserwowanego obrazu poziomo w lewo lub w prawo. Jeszcze wyżej znajduje się przycisk rozciągu podstawy czasu "magnifier" (8). Wciśnięcie tego przycisku pozwala na 5-krotne zwiększenie wzmocnienia wzmacniacza podstawy czasu, a więc na 5-krotne, a w niektórych oscyloskopach 10-krotne rozszerzenie obrazu w poziomie. Na samym dole pola toru odchylenia poziomego znajduje się zacisk (17) służący do uziemiania obudowy oscyloskopu.

⁷W oscyloskopach jednokanałowych starszego typu, w celu sterowania plamką w poziomie z zewnętrznego źródła, np. do obserwacji figur Lissajous, na obudowie oscyloskopu wykonane jest specjalne "wejście X" włączane odpowiednim przyciskiem.

6.3 Tor wyzwiania "trigger"

Tor wyzwiania służy do uzyskania stabilnego obrazu na ekranie. Mianowicie, jeżeli przy powtarzającym się w czasie sygnale wejściowym, plamka oscyloskopu nie będzie zaczynać swojego ruchu po ekranie w tym samym punkcie narastania obserwowanego sygnału, to obraz na ekranie będzie miał postać wielu krzywych przesuwających się w lewo lub w prawo. Mówimy, że obraz jest niestabilny, niesynchronizowany. Obraz stabilny otrzymuje się wtedy, gdy położenia plamki na ekranie, odpowiadające tym samym momentom powtarzającego się badanego sygnału będą popadały w te same miejsca ekranu przy kolejnych przebiegach plamki – przy kolejnych okresach podstawy czasu. Inaczej, warunkiem uzyskania stabilnego obrazu na ekranie jest wyzwolenie podstawy czasu zawsze w tej samej fazie sygnału wejściowego. Układ wyzwiania pozwala wybrać poziom "LEVEL" (13) sygnału wejściowego, przy którym rozpoczyna się ruch plamki, a więc zostaje wyzwolony układ podstawy czasu. Chodzi tutaj o wartość napięcia do której wzrósł lub opadł sygnał wejściowy. Dodatnie lub ujemne zbocze sygnału można wybrać ustawiając przycisk wyboru zbocza wyzwiania "SLOPE" (15) w pozycji "+" lub "—".

Oprócz opisanego sposobu pracy układu wyzwiania, które nazywane jest normalnym i uzyskuje się go gdy przycisk trybu wyzwiania (14) ustawiony jest w pozycji "NORM" istnieje jeszcze praca "AUTO" (14), w której podstawa czasu oscyloskopu wyzwala się okresowo sama jeżeli nie ma sygnału. Praca w trybie "AUTO" jest szczególnie pożyteczna w początkowym okresie obserwacji badanych sygnałów lub w przypadkach gdy amplituda badanego sygnału maleje w czasie. Wtedy obraz na ekranie nie znika pozwalając zorientować się jak zmienia się badany sygnał. W praktyce poziom wyzwiania dobiera się tak, aby otrzymać stabilny obraz na ekranie.

Do wyzwiania podstawy czasu można wybrać sygnały z różnych źródeł, przy pomocy przełącznika "SOURCE" (18). Gdy przycisk wyzwiania (14) znajduje się w pozycji "NORM" a przełącznik (18) ustawiony jest w pozycji:

- "INT" (*internal*) – sygnałem wyzwającym jest suma przebiegów wejściowych obu kanałów,
- "B" – podstawa czasu wyzwiana jest sygnałem z kanału B,
- "LINE" – źródłem wyzwiania są impulsy generowane synchronicznie ze zmieniającym się napięciem sieciowym. Praca w tym trybie jest bardzo owocna przy poszukiwaniu zakłóceń w badanym układzie, pochodzących od sieci prądu zmiennego.
- "EXT" (*external*) – sygnałem wyzwającym jest sygnał pochodzący z zewnętrznego źródła, podany na gniazdo "EXT INPUT" (11).

Przełącznik rodzaju sprzężenia sygnałów wejściowych "COUPLING" (16) pozwala wybrać rodzaj sprzężenia sygnału wyzwalającego z układem generatora synchronizującego. W pozycji "AC" tego przełącznika wszystkie składowe zmienne sygnału wyzwalającego są przekazywane do generatora synchronizującego; składowa stała jest odcięta, przez co poprawia się stabilność obrazu. Jest to najczęściej stosowany rodzaj sprzężenia. Przy sprzężeniu "HF REJ" (*high frequency rejection*) sygnał wyzwalający przechodzi przez filtr dolnoprzepustowy. W ten sposób wyższe częstotliwości, jak: radiowe i szумы w.cz. (szpilki) nie powodują wyzwalania podstawy czasu. W pozycji "TV" lub w niektórych oscyloskopach "LF REJ" (*low frequency rejection*) do generatora impulsów wyzwalających doprowadzone jest pasmo sygnałów wysokiej częstotliwości. Ten tryb pracy jest wykorzystywany przy naprawie urządzeń telewizyjnych.

W przypadku, gdy oscyloskop pracuje jako układ jednokanałowy wybrany przełącznikiem (3), sygnały wyzwalające wybrane przełącznikami: "NORM" (14) i "INT" (18) są pobierane z sygnału badanego, podawanego na odpowiednie wejście A lub B oscyloskopu.

7 Pomiar częstości drgań przy pomocy krzywych Lissajous

Wyobraźmy sobie, że na płytce odchylającej X podajemy z generatora napięcie zmieniające się według równania:

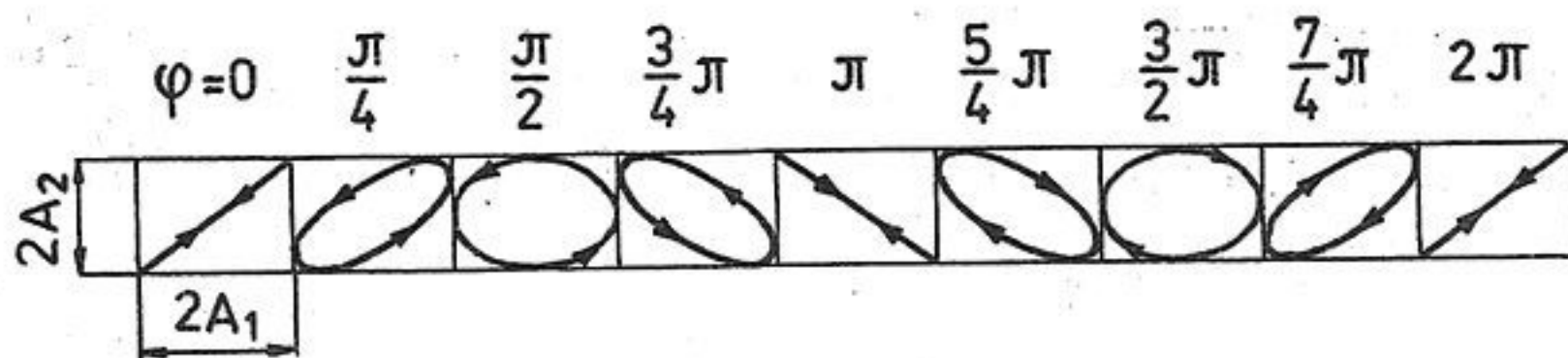
$$V_1 = V_0 \sin \omega_1 t$$

gdzie: $\omega_1 = 2\pi/T_1 = 2\pi f_1$ jest częstością kołową, T_1 i f_1 odpowiednio okresem i częstością drgań, a V_0 amplitudą napięcia zmiennego. Pod wpływem tego napięcia, plamka na ekranie oscyloskopu będzie poruszać się po ekranie poziomo ruchem harmonicznym, który możemy opisać jako:

$$x = A_1 \sin \omega_1 t$$

gdzie A_1 jest amplitudą drgania, równą połowie odcinka otrzymanego na ekranie. Podobnie, przykładając napięcie zmienne sinusoidalnie do płytek Y otrzymalibyśmy na ekranie drganie w kierunku pionowym według równania:

$$y = A_2 \sin \omega_2 t$$



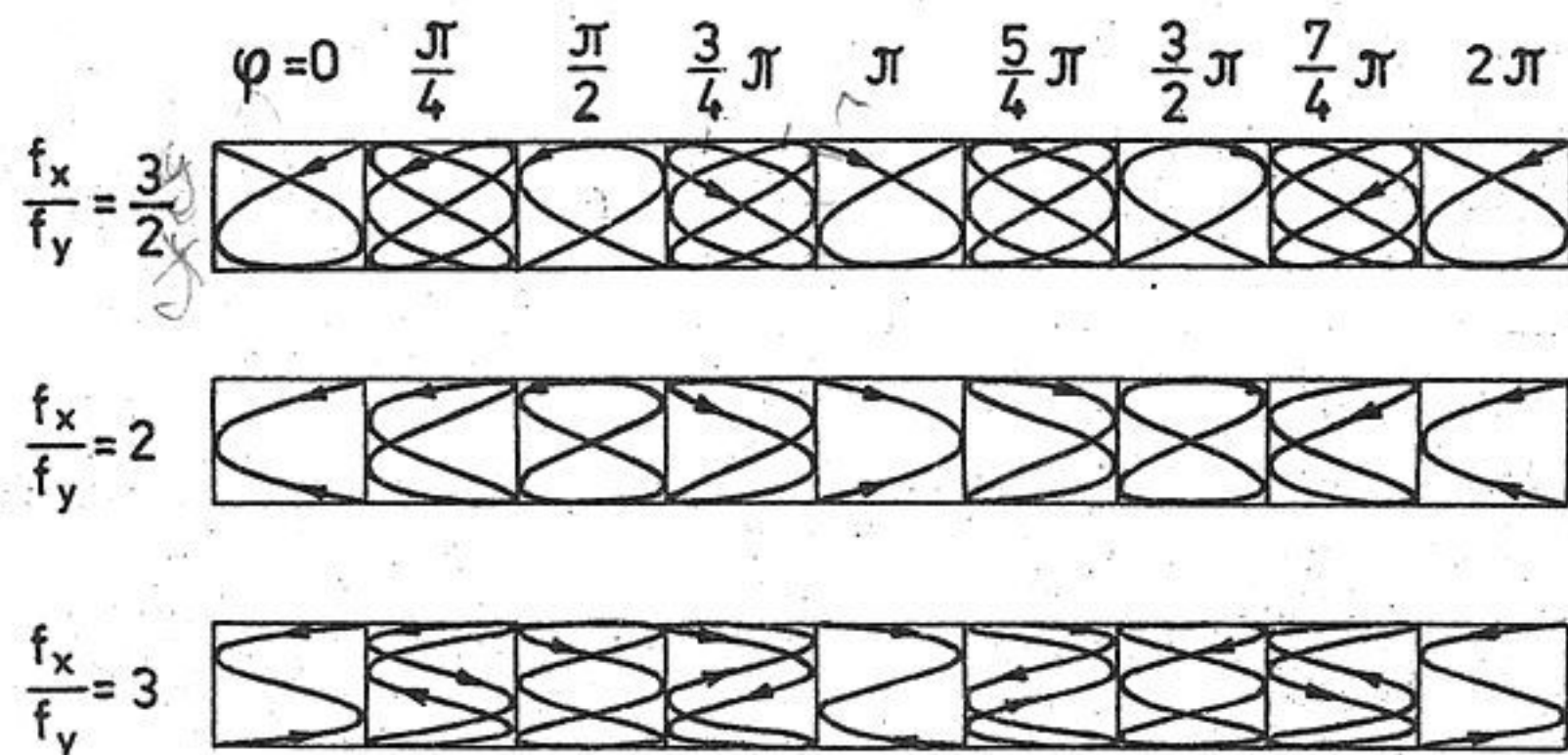
Rys.24. Krzywe Lissajous dla drgań x i y jednakowej częstości różniących się jedynie fazą

Przypuśćmy teraz, że na wejścia wzmacniaczy X i Y podajemy jednocześnie napięcia zmienne sinusoidalnie z dwóch generatorów. Jak łatwo się domyśleć, ruch plamki na ekranie będzie wynikiem złożenia dwóch ruchów harmonicznym prostych. Jeżeli częstości obu ruchów będą jednakowe oraz generatory będą ustawione w ten sposób, że w chwili $t = 0$ wychylenia x i y będą równe zeru, wtedy wychylenia plamki w kierunku osi X i Y będą proporcjonalne do czasu t i plamka na ekranie będzie poruszać się po prostej, przechodzącej przez środek ekranu i nachylonej do osi X pod pewnym kątem. W przypadku, gdy amplitudy drgań A_1 i A_2 będą w przybliżeniu jednakowe kąt nachylenia prostej będzie wynosił $\sim 45^\circ$.

Jeżeli drgania generatorów nie są zsynchronizowane, co możemy opisać poprzez wprowadzenie do jednego z równań różnicy faz φ , np:

$$x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi)$$

wtedy plamka będzie poruszać się na ekranie po elipsach, których kształt przedstawiony jest na rysunku 24. Widać z niego, że w zależności od różnicy faz φ między drganiami, krzywe kreślone na ekranie oscyloskopu zmieniają się w proste i elipsy, różnie nachylone do osi X. Szczególnym przypadkiem jest koło, kiedy różnica faz między drganiami wynosi 90° lub 270° i gdy amplitudy A_1 i A_2 są jednakowe. Drgania dla różnych częstości ω_1 i ω_2 i dla różnych faz przedstawia rys.25.

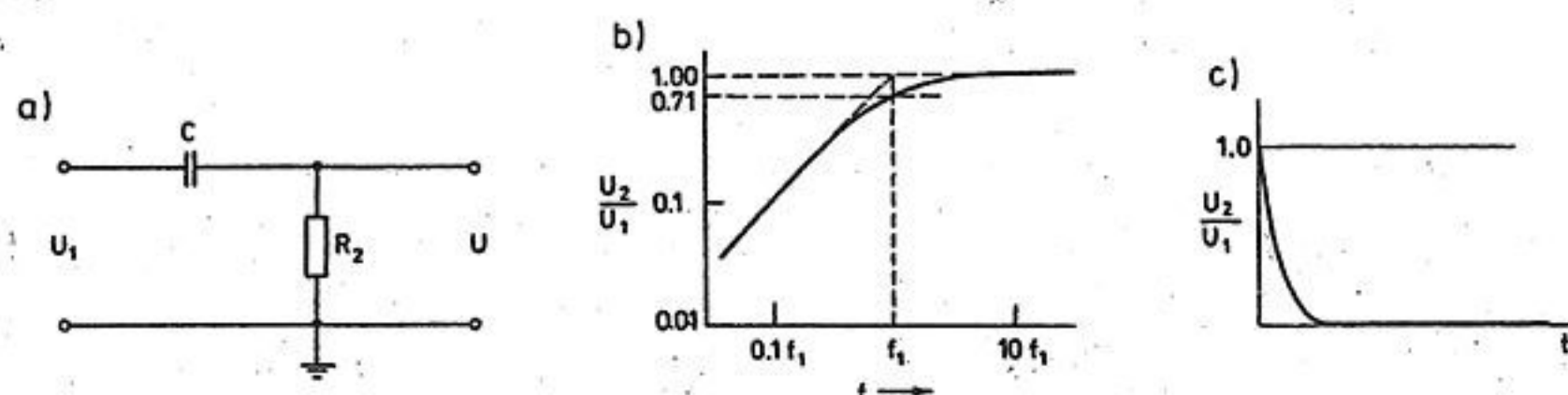


Rys.25. Krzywe Lissajous dla drgań różnych częstości i o różnych fazach. Stosunek częstości drgań podany jest z lewej strony

Obserwacja kształtu krzywych Lissajous pozwala w łatwy sposób znaleźć stosunek częstości dwóch drgań harmoniczných, a więc wyznaczyć częstość drgań jednego generatora, gdy znana jest częstość drgań generatora drugiego. Jak widać z rysunków: 24 i 25, krzywe Lissajous są zawarte w prostokącie o bokach $2A_1$ i $2A_2$. W zależności od stosunku częstości ω_1 i ω_2 , krzywe stykają się z bokami prostokąta w różnych punktach. Np. dla drgania odpowiadającego różnicy faz $3\pi/4$ i stosunkowi częstości $f_x/f_y = 2$ widzimy, że krzywa Lissajous styka się z bokami prostokąta równoległymi do osi Y w dwu punktach, natomiast z bokami równoległymi do osi X tylko w jednym punkcie. Oznacza to, że częstość generatora podłączonego do osi X jest dwa razy większa od częstości na osi Y. Zatem, znajdując stosunki ilości punktów styczności krzywej Lissajous z bokami X i Y prostokąta, można określić stosunki częstości generatorów, podłączonych do płytek X i Y oscyloskopu.

8 Przechodzenie sygnałów prostokątnych przez filtry RC: górnoprzepustowy i dolnoprzepustowy

8.1 Górnoprzepustowy filtr RC — "układ różniczkujący"



Rys.26. Górnoprzepustowy filtr RC : a) schemat filtru, b) jego charakterystyka częstotściowa, c) odpowiedź układu na pobudzenie skokiem napięcia

Filtr górnoprzepustowy, przedstawiony na rysunku 26a, jest układem tłumiącym niskie częstotliwości i powodującym zniekształcenie impulsów prostokątnych, polegające na opadaniu napięcia w części wierzchołkowej. Zawadę takiego układu, dla napięcia zmieniającego się sinusoidalnie, można zapisać w postaci:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \quad (8)$$

Ze wzoru widać, że dla małych częstotliwości zawada układu wzrasta do ∞ gdy $\omega \rightarrow 0$. Napięcie U_2 , powstające w wyniku przepływu prądu zmiennego przez opór R i wyrażające się wzorem:

$$U_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}$$

maleje wraz ze zmniejszaniem się częstotliwości. Charakterystyka częstotściowa takiego filtru przedstawiona jest w części b) rysunku, a zależność napięcia wyjściowego jako funkcja częstotliwości ma postać:

$$U_2 = \frac{U_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_1}{f}\right)^2}}$$

Jak widać z rysunku, dla częstotliwości $f_1 = 1/2\pi RC$, współczynnik przenoszenia układu wynosi: $0,707 = 1/\sqrt{2}$, co odpowiada tłumieniu sygnału o 3 dB. Częstotliwość f_1 jest nazywana dolną częstotliwością graniczną. Maksymalnie możliwe wzmocnienie układu wynosi 1. Kąt fazowy, o który przebieg wyjściowy wyprzedza sygnał pobudzający: $\varphi = \text{arctg}(f_1/f)$.

Założymy teraz, że na wejście filtru podane jest napięcie narastające skokowo, jak to przedstawiono na rysunku 26c. Skok taki można opisać funkcją, która posiada wartość równą zero, dla czasów mniejszych od zera oraz wartość U_1 dla czasów $t > 0$. W celu określenia odpowiedzi układu na taki sygnał, rozważymy sytuację w momencie pojawienia się skoku napięcia i po nim, a więc w chwili $t = 0+$. Jeżeli założymy, że na wyjściu układu nie jest włączony żaden odbiornik prądu, tzn. na wyjściu prąd nie płynie, to napięcie zasilające U_1 będzie się równać sumie spadków napięć na kondensatorze i oporniku.

$$U_1 = \frac{Q}{C} + R \frac{dQ}{dt}$$

gdzie Q jest ładunkiem gromadzącym się na kondensatorze. Kondensator ładuje się prądem, który przepływa przez opornik R . Porządkując powyższe równanie, możemy je zapisać jako równanie różniczkowe, opisujące zmiany elektryczne w układzie:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{RC} - \frac{U_1}{R} = 0 \quad (9)$$

Jest to równanie liniowe, pierwszego stopnia z członem stałym $-U_1/R$.⁸ Rozwiązanie równania wygląda następująco:

$$Q = e^{-t/RC} (0 + U_1 C e^{t/RC} - U_1 C) = U_1 C (1 - e^{-t/RC})$$

a napięcie na oporniku R

$$U_2 = I \cdot R = R \frac{dQ}{dt} = U_1 e^{-t/RC} = U_1 e^{-t/\tau} \quad (10)$$

gdzie: $\tau = RC$, określa stałą czasową układu. Rozwiązując równanie założyliśmy, że w chwili $t = 0$, napięcie wejściowe U wzrasta nagle, od zera do wartości U_1 . Jak widać z rozwiązania, napięcie na wyjściu maleje eksponencjalnie, od wartości U_1 do zera, ze stałą czasową τ , jak to przedstawia rys.26c. Napięcie wyjściowe osiąga 0,61 swej początkowej wartości po czasie 0,5 RC i odpowiednio: 0,37 po 1RC, 0,14 po 2RC, 0,05 po 3RC, 0,02 po 4RC i 0,01 po 5RC.⁹

⁸Rozwiązanie równania liniowego

$$y' + P(x) + Q(x) = 0$$

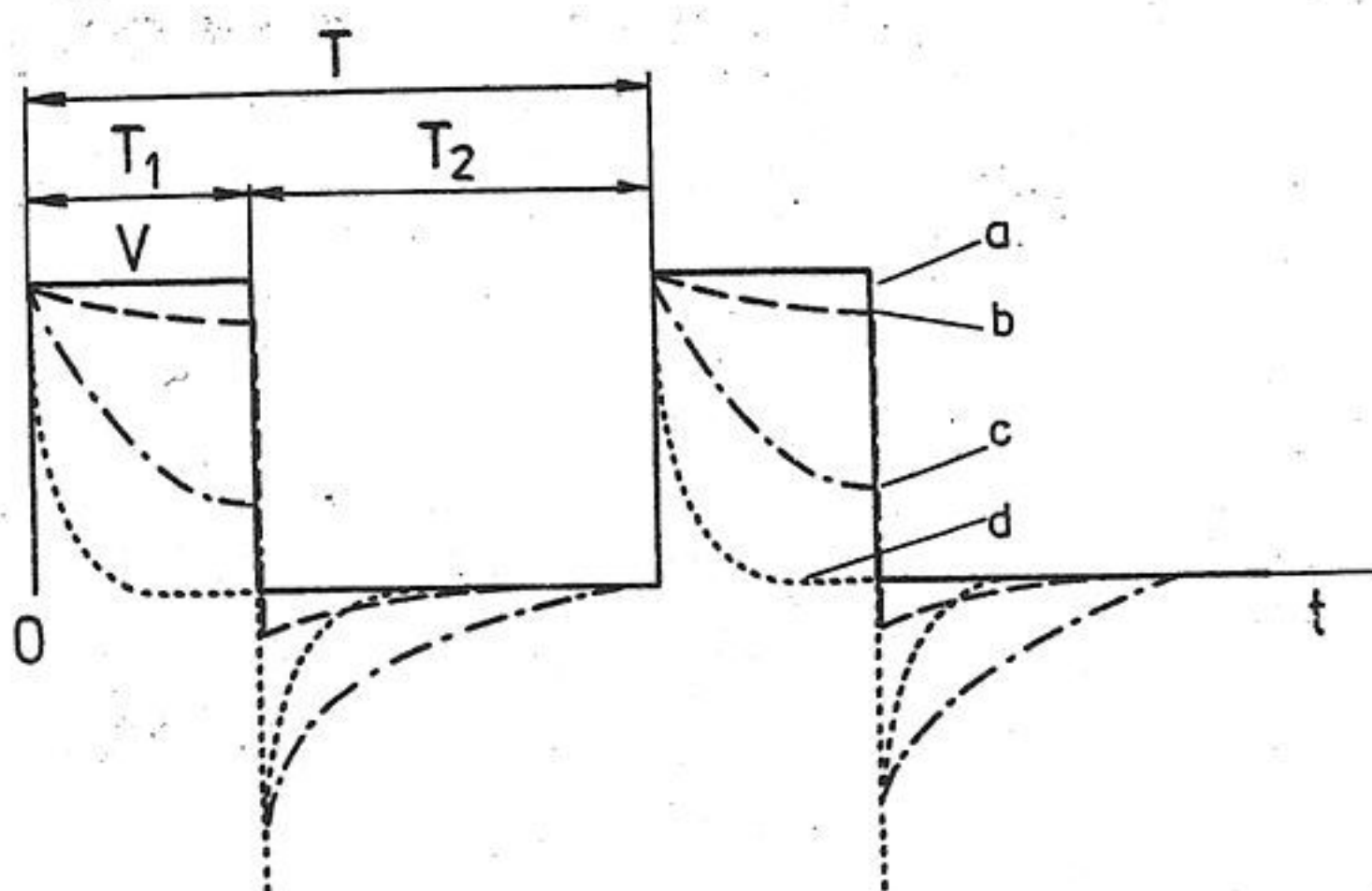
ma postać:

$$y = e^{-\int_{x_0}^x P(x) dx} \left[y_0 - \int_{x_0}^x Q(x) e^{\int_{x_0}^x P(x) dx} dx \right]$$

gdzie y_0 znajdujemy z warunków początkowych.

⁹Staża czasowa układu τ wyraża się w sekundach, jeżeli R jest wyrażone w omach, a C w faradach.

W celu łatwiejszego zrozumienia występujących tutaj procesów, przytoczymy jeszcze inne, bardziej pogładowe rozumowanie. Przyjmijmy stwierdzenie, że napięcie na kondensatorze nie może się zmienić momentalnie, jeśli prąd przyjmuje skończone wartości, jako zasadę odnoszącą się do układów RC . Stosując tę zasadę do naszego przypadku, trzeba zauważyć, że jeżeli w chwili $t = 0$ napięcie wejściowe zmienia się skokiem o wartość U_1 , to zgodnie z powyższą zasadą, na wyjściu powinno się pojawić napięcie tej samej wartości, ponieważ kondensator nie był naładowany. Dla $t > 0$ napięcie wejściowe jest stałe, a ponieważ kondensator blokuje składową stałą napięcia wejściowego, więc po pewnym czasie U_2 osiągnie wartość równą zeru.



Rys.27. Odpowiedzi filtru górnoprzepustowego RC na impulsy prostokątne: a) impuls wejściowy, b) impuls wyjściowy dla stałej czasowej układu τ , dużej w porównaniu z okresem T , c) $\tau \simeq T$, d) $\tau \ll T$

Jeżeli do wejścia układu doprowadzony zostanie przebieg prostokątny, pokazany na rysunku 27 linią ciągłą, to odpowiedź układu na zbocze narastające impulsu będzie taka sama jak na pobudzenie skokiem. Na końcu impulsu, napięcie wejściowe maleje gwałtownie o wartość U_1 . Tak więc, w czasie $t = T_1$ (lub $t = T_1 +$), napięcie wyjściowe: $U_2 = U_{pocz} - U_1$, (gdzie U_{pocz} jest wartością napięcia na wyjściu układu, w chwili T_1 - na końcu impulsu wejściowego), staje się ujemne i maleje wykładniczo do zera. W zależności od czasu trwania impulsu T_1 oraz stałej czasowej układu RC kształt impulsów na wyjściu układu będzie się zmieniał: od małego pochylenia tylnej części impulsu i małego przerzutu na końcu impulsu, poprzez odpowiednio większe pochylenia i przerzut, aż do dwu szpilek dodatniej na początku i ujemnej na końcu impulsu. Ten ostatni przypadek występuje, gdy stała czasu układu RC jest znacznie mniejsza od czasu trwania impulsu i jest wykorzystywany w różnych układach elektronicznych do skracania impulsów oraz sterowania szpilekami różnych układów spustowych.

Składowa stała odpowiedzi układu górnoprzepustowego jest zawsze równa zeru i nie zależy od składowej stałej na wejściu układu. Napięcie wyjściowe przyjmuje wartości zarówno dodatnie jak i ujemne, a pola powyżej i poniżej osi czasu są sobie równe. Gdy pobudzenie zmienia się w sposób nieciągły o wartość U_1 , napięcie wyjściowe zmienia się również skokowo i w tym samym co na wejściu kierunku, o tą samą wartość U_1 . W przedziale czasu, w którym sygnał wejściowy posiada stałą wartość, sygnał wyjściowy zdąża wykładniczo do zera. Gdy stosunek RC/T jest dostatecznie duży, w porównaniu z jednością, sygnał wyjściowy ma kształt identyczny, jak sygnał wejściowy, lecz jest pozbawiony podkładu składowej stałej. W drugim granicznym przypadku, gdy RC/T_1 i RC/T_2 są bardzo małe, w porównaniu z jednością, odpowiedź układu będzie się składać z dodatnich i ujemnych "szpilek", o amplitudach równych amplitudzie impulsu wejściowego.

W ostatnim przypadku, gdy stała czasu układu RC jest bardzo mała, w porównaniu z czasem, jaki musi upłynąć aby sygnał wejściowy uległ znacznej zmianie, układ górnoprzepustowy może być uważany za układ różniczkujący. Prąd płynący przez pojemność C i opornik R jest równy:

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU_1}{dt}$$

a napięcie wyjściowe:

$$U_2 = R \cdot I = RC \frac{dU_1}{dt} \quad (11)$$

jest pochodną napięcia wejściowego. Różniczkowanie fali prostokątnej daje w wyniku przebieg, dający wartość zero wszędzie z wyjątkiem punktów nieciągłości.

Aby określić warunki dobrego różniczkowania, rozpatrzmy falę sinusoidalną, doprowadzoną do wejścia układu:

$$U = U_m \sin \omega t$$

Na wyjściu pojawi się fala sinusoidalna, wyprzedzająca w fazie przebieg wejściowy o kąt Θ , taki że

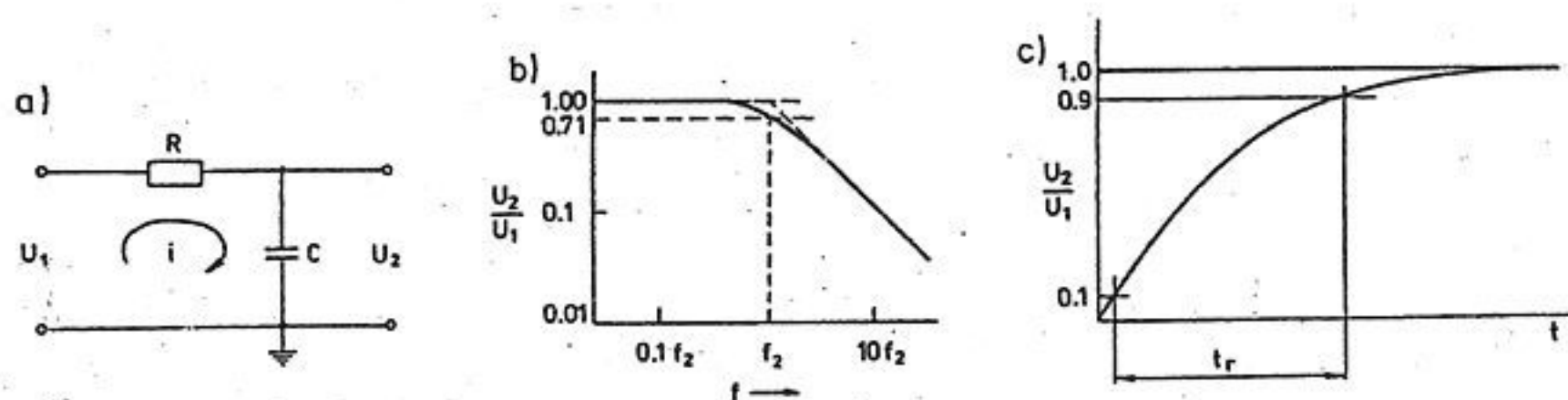
$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{1}{\omega RC}$$

Wyjściowy przebieg będzie proporcjonalny do $\sin(\omega t + \Theta)$. Dla dobrego różniczkowania powinien być spełniony warunek

$$RC \frac{dU}{dt} = U_m \omega RC \cos \omega t = U_m \omega RC \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (12)$$

a więc kąt Θ powinien być równy 90° . Dla $\omega RC = 0,01$, wartość $\operatorname{tg} \Theta = 1/(\omega RC) = 100$, kąt Θ wynosi $89,4^\circ$ i stanowi wystarczające przybliżenie. Tak więc, jeśli $\omega RC \ll 1$, sygnał wyjściowy jest w przybliżeniu równy pożądanemu przebiegowi: $U_m \omega RC \cos \omega t$, odpowiadającemu różniczkowaniu przebiegu wejściowego. Warunki dobrego różniczkowania przebiegów elektrycznych spełniają układy różniczkujące, pracujące w oparciu o wzmacniacze operacyjne, które stanowią temat osobnego ćwiczenia.

8.2 Dolnoprzepustowy filtr RC — "układ całkujący"



Rys.28. Dolnoprzepustowy filtr RC: a) schemat filtru, b) jego charakterystyka częstotliwościowa, c) odpowiedź filtru na skok napięcia

Układ dolnoprzepustowy, przedstawiony na rysunku 28a, tłumi wysokie częstotliwości powodując pochylenie zboczy impulsu prostokątnego. Zawada układu dla napięcia zmieniającego się sinusoidalnie jest taka sama jak dla układu górnoprzepustowego i wyraża się wzorem (8), a napięcie wyjściowe

$$U_2 = U_1 \frac{\frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} = U_1 \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (13)$$

Z ostatniego wzoru widać, że wraz ze wzrostem częstotliwości napięcie wyjściowe dąży do zera. Charakterystyka filtru dolnoprzepustowego przedstawiona jest na rysunku 28b. Napięcie wyjściowe, jako funkcję częstotliwości, można opisać wzorem:

$$U_2 = \frac{U_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_2}\right)^2}}$$

a kąt fazowy Θ , o który sygnał wyjściowy wyprzedza sygnał wejściowy

$$\Theta = -\text{arctg} \frac{f}{f_2}$$

gdzie f_2 jest górną częstotliwością graniczną. Tak jak w przypadku poprzednim, częstotliwość f_2 oznacza górną częstotliwość, przy której wzmacnienie przebiegu wyjściowego spada do wartości: $0,707 = 1/\sqrt{2}$, tj. o 3 dB. Łatwo się przekonać, że jeżeli na wejście układu podany zostanie skok napięcia, to równanie różniczkowe dla tego przypadku jest identyczne z równaniem wyprowadzonym dla układu górnoprzepustowego (9). Z wartości Q , otrzymanej z jego rozwiązania, możemy obliczyć wartość napięcia wyjściowego na kondensatorze

$$U_2 = \frac{Q}{C} = U_1 [1 - e^{-t/RC}] \quad (14)$$

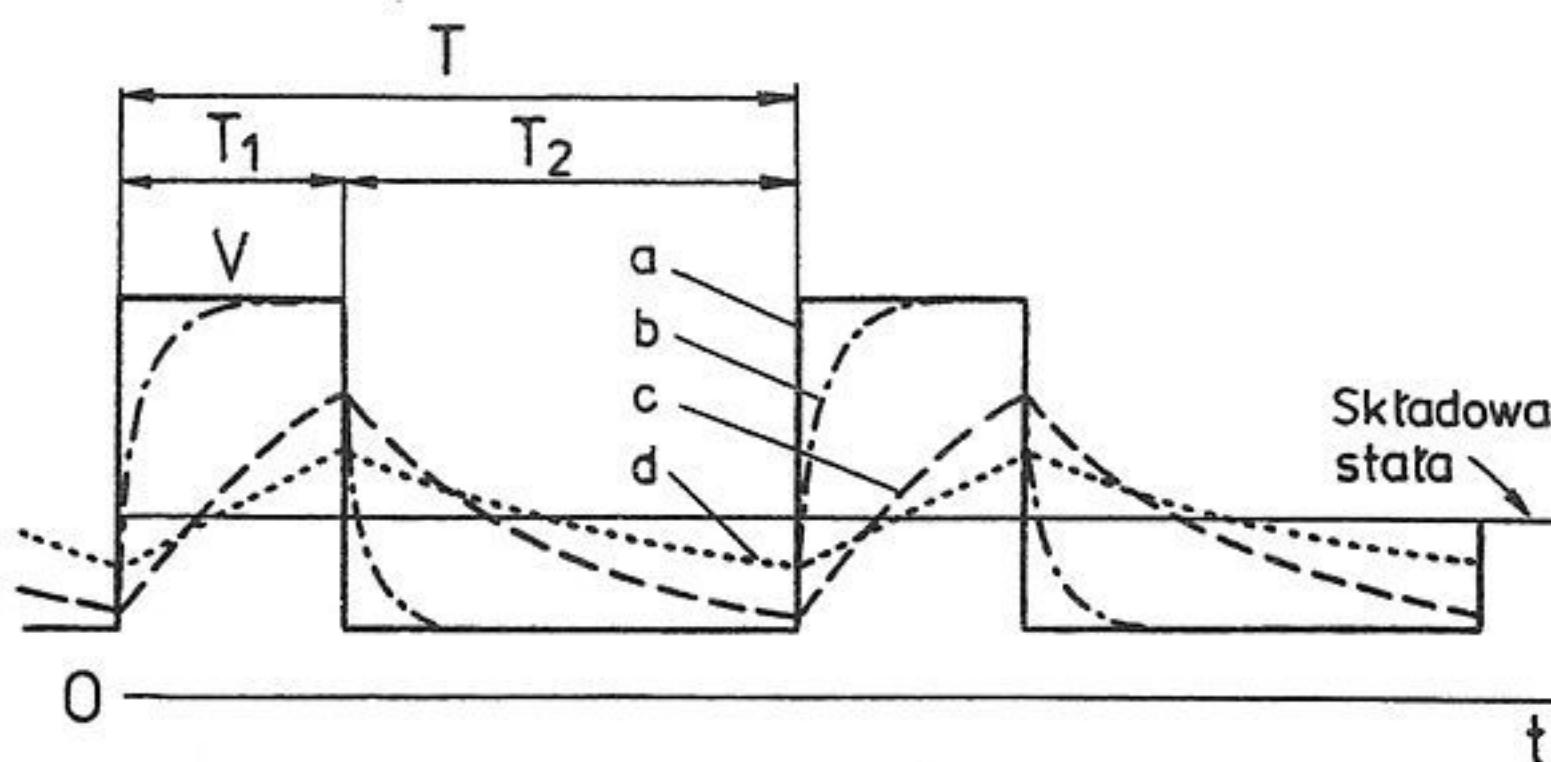
którego przebieg jest przedstawiony na rysunku 28c. Jak widać z rysunku, napięcie U_2 narasta stopniowo, od zera do wartości równej U_1 . Czas narastania t_r

impulsu, określa się jako odstęp czasu między momentami, w których napięcie osiąga 10% i 90% swej maksymalnej wartości. Impuls osiąga 10% wartości końcowej po $0,1RC$, a 90% po $2,3RC$. Zatem, czas narastania impulsu wyjściowego:

$$t_r = 2,2RC = \frac{2,2}{2\pi f_2} = \frac{0,35}{f_2}$$

Odpowiedź układu dolnoprzepustowego na impuls prostokątny, dla czasów mniejszych od czasów trwania impulsu, jest identyczna jak dla pobudzenia skokiem napięcia i jest określona równaniem (14). W momencie, gdy napięcie impulsu wejściowego spada do zera, napięcie wyjściowe zacznie również spadać eksponencjalnie do zera, ze stałą czasu RC , jak to pokazuje rys.29.

Jak widać z rysunku, czas trwania impulsu wyjściowego będzie zawsze dłuższy od czasu trwania impulsu wejściowego, ponieważ napięcie na kondensatorze nie może zaniknąć momentalnie. W celu skrócenia impulsu wyjściowego i możliwie wiernego jego przekazania należy dążyć do tego, aby czas narastania impulsu był mały w porównaniu z czasem jego trwania. Kształt impulsu będzie zachowany, gdy częstość graniczna f_2 układu będzie równa w przybliżeniu odwrotności czasu trwania impulsu T_1 lub jeśli spełniona będzie zależność: $t_r \approx 0,35T_1$. Na przykład, dla wiernego przekazania impulsu, o czasie trwania $0,5 \mu\text{sek}$, potrzebny jest układ, o górnej częstości granicznej rzędu 2 MHz , zapewniający czas narastania $0,17 \mu\text{sek}$.



Rys.29. Odpowiedzi dolnoprzepustowego obwodu RC na pobudzenie falą prostokątną: a) sygnał wejściowy, b) odpowiedź układu w przypadku małej w porównaniu z okresem T stałej czasu, c) – stała czasu układu porównywalna z okresem, d) – duża stała czasowa

Gdy na wejście układu dolnoprzepustowego podawana jest fala prostokątna, kształt impulsów wyjściowych będzie miał wygląd jak na rysunku 29. Dla małej stałej czasowej układu, w porównaniu do okresu T impulsu, kształt impulsu

wyjściowego przedstawia krzywa b, która pokazuje, że impuls wejściowy jest zniekształcony w małym stopniu. Dla stałej czasu układu RC , porównywalnej z okresem T (krzywa c), impuls wyjściowy jest rozciągnięty znacznie w czasie, a jego amplituda maksymalna spada do 0,63 wartości impulsu wejściowego. W przypadku $RC \gg T$, wykładnicze fragmenty impulsu wejściowego mają prawie liniowy charakter. Składowa stała przebiegu wejściowego jest przekazywana na wyjście, a jej wartość jest taka sama jak w przebiegu wejściowym.

Układem całkującym nazywa się układ, w którym napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do całki z napięcia wejściowego. Układ dolnoprzepustowy będzie realizował operację całkowania, jeżeli stała czasowa tego układu będzie znacznie większa od stałej czasowej, która wywołuje wyraźne zmiany sygnału wejściowego. W tym przypadku, napięcie wyjściowe U_2 , będzie bardzo małe, w porównaniu ze spadkiem napięcia na oporniku R i spadek ten można uważać za równy napięciu wejściowemu U_1 . Wtedy, napięcie na kondensatorze określone zależnością:

$$U_2 = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^T i dt = \frac{1}{RC} \int_0^T U_1 dt$$

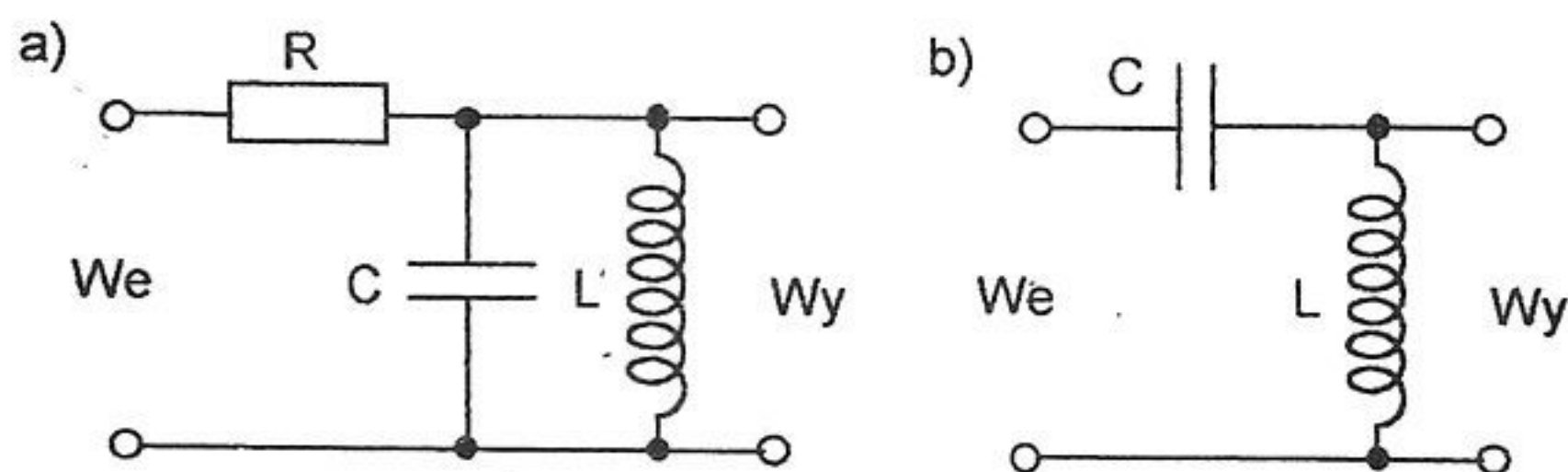
według definicji, spełnia warunek całkowania sygnału wejściowego U_1 .

9 Plan ćwiczenia

1. Obserwacja przebiegów z generatora: sinusoidalnych, piłowych i prostokątnych. Określenie amplitudy i okresów drgań.
2. Cechowanie generatora drgań sinusoidalnych o małej częstotliwości, przy pomocy oscyloskopu i generatora wzorcowego - metodą figur Lissajous. Sporządzić krzywą cechowania generatora, dla podanego przez prowadzącego zakresu częstotliwości drgań.
3. Pomiar częstotliwości rezonansowych: szeregowego i równoległego obwodów LC , przy pomocy generatora drgań sinusoidalnych i oscyloskopu. Obliczyć indukcyjność cewki obwodu, dla podanej pojemności kondensatora.
4. Badanie różniczkowania i całkowania impulsów prostokątnych, o różnych okresach drgań, przy pomocy podanych obwodów. Przebadać po 4 przebiegi: od impulsów niezniekształconych do silnie zniekształconych. Przerysować otrzymane przebiegi i podać stosunki T/RC . Dla jednego przebiegu, w układzie całkującym, określić czasy narastania i opadania impulsów.
5. Przy pomocy mikrofonu zaobserwować na ekranie oscyloskopu drgania akustyczne.

Wykonanie punktu 3-ciego ćwiczenia.

Sporządzamy układ pomiarowy według schematu:



Rys.30. Schemat układów LC a) równoległego, b) szeregowego

Na wejście badanego układu należy podłączyć generator drgań sinusoidalnych, natomiast wyjście podłączyć do oscyloskopu. Zmieniając częstość generatora, obserwować obraz na ekranie oscyloskopu. Gdy amplituda drgań na oscyloskopie osiągnie maksimum, odczytać częstość generatora. Zmieniając kilkakrotnie częstość generatora, w pobliżu maksimum amplitudy drgań, znaleźć dokładną wartość częstości rezonansowej układu. Ze wzoru:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

obliczyć indukcyjność cewki.

Wykaz literatury:

1. J. Antoniewicz: *Elektronika – podstawy fizyczne, elementy, układy*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, W-wa 1979.
2. B. Paszkowski: *Optyka elektronowa*, Państwowe Wydawnictwo Techniczne, W-wa 1960.
3. A. M. Boncz-Brujewicz: *Zastosowanie lamp elektronowych w fizyce doświadczalnej*, PWN, W-wa 1957.
4. J. Rydzewski: *Oscyloskop elektroniczny*, Wyd. Komunikacji i Łączności, W-wa 1976.
5. J. Rydzewski: *Pomiary oscyloskopowe*, Wyd. Naukowo-Techniczne, W-wa 1994.