

E. AISBERG

RADIO... I TELEWIZJA?

ależ to bardzo proste!

Rysunki marginesowe wykonała
Catherine Aisberg

NT

WYDAWNICTWA NAUKOWO-TECHNICZNE
WARSZAWA 1974

SPIS TREŚCI

Przedmowa	7
Pogawędka pierwsza. Telegraf bez drutu—Radio—Elektronika	9
Podbój wszechświata. Wszechstronność elektroniki. Narodziny telegrafu bez drutu. Epoka radia. Rozkwit elektroniki	
Komentarze. Budowa materii	14
Małość cząsteček. Mikrokosmos i makrokosmos. Rozmieszczenie elektronów. Co za pustka!... Koniec pojemności. Wartościowość. Przewodniki, izolatory i półprzewodniki	
Pogawędka druga. Spacerujące elektrony	19
Nieskończenie duże i nieskończenie małe. Wędrowka elektronów. Źródła napięcia. Umowa i prawda. Pytalski formuluje prawo Ohma. Rezystancja i rezystywność	
Komentarze. Obwody prądu stałego	24
Wielokrotne i podwielokrotne. Zastosowanie prawa Ohma. Moc elektryczna. Spadek napięcia	
Pogawędka trzecia. Magnetyzm	26
Przyciąganie i odpychanie. Spacer po polach. Narodziny magnetyzmu. Solenoid. Elektromagnes. Narodziny prądu elektrycznego. Prąd zmienny lub stały. Prądnicą zamieniona na silnik	
Komentarze. O indukcji i reaktancji indukcyjnej	31
Wywody na temat indukcji. Przekładnia. Działanie na samego siebie. Budowa galvanometru. Przyrządy pomiarowe	
Pogawędka czwarta. Pojemność i reaktancja pojemnościowa	34
Ładunek przewodnika. Narodziny kondensatora. Ładowanie i rozładowanie. Wartość pojemności. Kondensatory stałe, nastawne i zmiennie. Przepływ prądu zmiennego. Pojemność i reaktancja pojemnościowa	
Komentarze. Połączenia elementów	41
Współlistnienie R , L i C . Połączenia szeregowo. Połączenia równoległe. Układy złożone. Zjawisko rezonansu	
Pogawędka piąta. Obwód drgań. Fale elektromagnetyczne	46
Ładowania i rozładowania. Podtrzymywanie drgań. Fale elektromagnetyczne. Zakresy fal. Odbiór fal. Dostrojenie i selektywność	
Komentarze. Nadajniki i odbiorniki radiofoniczne	53
Fale akustyczne. Mikrofony. Zasada pracy nadajnika. Budowa odbiornika. Słuchawki i głośniki	
Pogawędka szósta. Od anteny ramowej do diody	58
Anteny ramowe. Radiogeniometria. Anteny ferrytowe. Emisja elektronowa. Prostowanie prądu i detekcja	

Komentarze. Od diody do triody	65
Temperatura i próżnia. Prędkość, natężenie i nasycenie prądu. Prostowanie dwupółkowe. Działanie siatki. Współczynnik amplifikacji i nachylenie. Charakterystyki triody. Rezystancja wewnętrzna. Zależność między trzema parametrami. Zastosowanie triody we wzmacniaczu wielkiej częstotliwości (w.cz.). Polaryzacja przez spadek napięcia. Sprzężenia międzystopniowe	
Pogawędka siódma. Wzmacniacze m.cz.	71
Wzmacniający detektor. Wzmacniacze m.cz. Sprzężenie oporowo-pojemnościowe. Układ przeciwobny. Lampowy odwracacz fazy. Katodyna	
Komentarze. Dodatnie sprzężenie zwrotne, nadawanie i lampy wieloelektrodowe	79
Detekcja + wzmacnienie. Zalety dodatniego sprzężenia zwrotnego. Detekcja z reakcją. Układy generatorów. Zjawisko interferencji. Modułacja i nadawanie. Kłopoty z dodatnim sprzężeniem zwrotnym. Tetroda. Emisja wtórna. Pentoda. Lampy wielokrotne. Heptody. Oktody	
Pogawędka ósma. Superheterodyna	85
Kłopoty ze wzmacnianiem w.cz. Zasada superheterodyny. Przemiana częstotliwości. Od lampy dwusiatkowej do oktody. Częstotliwości lustrzane. Współbieżność	
Komentarze. Układy zasilania	91
Parametry sieci. Prądy zasilające. Jak uzyskać się napięcie żarzenia i napięcie anodowe. Filtracja napięcia anodowego. Kondensatory elektrolityczne. Prostowniki półprzewodnikowe	
Pogawędka dziewiąta. Zaniki odbioru i automatyczna regulacja wzmacnienia	96
Propagacja fal. Wokół Ziemi i w kosmosie. Zasada automatycznej regulacji wzmacnienia. Zmienne nachylenie. Napięcie automatycznej regulacji wzmacnienia. Automatyka opóźniona. Ręczna regulacja głośności	
Komentarze. Półprzewodniki	103
Zalety półprzewodników. Przewodniki, izolatory i półprzewodniki. Przewodnictwo samoistne. Fotoelektryczność. Półprzewodniki ujemne. Półprzewodniki dodatnie. Złącze n-p. Napięcie przeciwnej polaryzacji. Napięcie odpowiedniej polaryzacji. Dioda półprzewodnikowa	
Pogawędka dziesiąta. Tranzystor	108
Atomy są nieruchome. Złącze + złącze = tranzystor. Tranzystor p-n-p. Tranzystor n-p-n. Analogia tranzystora i triody. Różne symbole graficzne. Stopień wzmacniający. Rezystancje wejściowa i wyjściowa	
Komentarze. Technologia tranzystorów.	115
Oczyszczanie półprzewodników. Grzanie w.cz. Aby uzyskać monokryształ. Proces stapiania. Dyfuzja i elektroliza. Wielka częstotliwość stwarza problemy. Metody rozwiązania problemu. Tranzystory mesa. Warstwa epitaksjalna. Proces wytwarzania tranzystora planarnego. Zastosowanie warstwy fotoczułej	
Pogawędka jedenasta. Tranzystory polowe	121
Zjawisko zwięzania. Pokrewieństwo z triodą. Nieskończenie duża rezystancja wejściowa. Nachylenie tranzystora. Polaryzacja bramki. Tranzystorowy odbiornik radiofoniczny	
Komentarze. Trzy podstawowe układy pracy tranzystorów	126
Podstawowe układy pracy triody. Układ ze wspólnym emiterem. Układ ze wspólną bazą. Układ ze wspólnym kolektorem	
Pogawędka dwunasta. Dopasowanie wyjścia i wejścia. Ujemne sprzężenie zwrotne	129
Podobieństwa i różnice. Dopasowanie źródła do obciążenia. Idealny sposób dopasowania wejścia do wyjścia. Przeciwdziałanie wpływowi temperatury. Zmniejszanie zniekształceń za pomocą ujemnego sprzężenia zwrotnego. Układy ujemnego sprzężenia zwrotnego	
Komentarze. Układy sprzęgające	136
Transformatory w zakresie w.cz. i p.cz. Sprzężenie oporowo-pojemnościowe. Sprzężenie bezpośrednie. Tranzystorowy układ przeciwobny. Z odwróceniem lub bez odwrócenia fazy. Sprzężenie mieszane	

Pogawędka trzynasta. Tranzystorowy odbiornik superheterodynowy	140
Wzmacnienie sprzężenie zwrotne. Automatyczna regulacja wzmacnienia. Dioda tłumiąca. Odbiór wielu stacji fal. Odbiornik kieszonkowy	
Komentarze. Obwody drukowane i układy scalone	145
Planowanie obwodów drukowanych. Sposób wytwarzania. Fotografia w służbie elektroniki. Budowa układów scalonych. Wytwarzanie elementów biernych. Układy scalone MSI i LSI. Przyczyny mikrominiaturyzacji	
Pogawędka czternasta. Modułacja częstotliwościowa.	148
Ile nadajników w każdym zakresie fal? Szerokość wstęg bocznych przy modulacji częstotliwościowej. Zasięg fal metrowych. Zasada i zalety modulacji częstotliwościowej. Jak moduluje się częstotliwość?	
Komentarze. Odbiór sygnałów modulowanych częstotliwościowo	154
Wzmacniacz częstotliwości pośredniej. Wzmacniacz w.cz. i przemiana częstotliwości. Układy demodulacji. Dyskryminator. Detektor stosunkowy	
Pogawędka piętnasta. Analiza obrazów w telewizji.	158
Kino = przysyłanie obrazów w czasie. Przesyłanie kolejne w telewizji. Brak standardu międzynarodowego. Pasmo częstotliwości wizyjnych. Nadawanie sygnału telewizyjnego. Wybieranie międzyliniowe. Podstawowe zasady telewizji	
Komentarze. Lampy elektronopromieniowe	164
Wyrzutnia elektronów. Sposoby ogniskowania. Odchylenie za pomocą pola elektrycznego. Luminescencja ekranu. Odchylenie magnetyczne. Odprowadzanie elektronów. Czy istnieje niebezpieczeństwo implozji? Ekran płaski przyszłości	
Pogawędka szesnasta. Podstawa czasu	169
Odchylenie zębami piły. Układ podstawowy. Krzywe wykładnicze. Działanie sygnałów synchronizacji. Ionizacja tytratronu. Dobrodziejstwa nasycenia. Podstawa czasu z generatorem samodławnym. Generator samodławnny tranzystorowy	
Komentarze. Lamp analizujących	177
Wymagania, które powinna spełniać lampa analizująca. Fotoemisja i fotokonduktancja. Ikonoskop, topoplasta lamp analizujących. Superikonoskop. Ortikon obrazowy. Powielacz elektronowy. Widikon i plumbikon	
Pogawędka siedemnasta. Nadajniki i odbiorniki telewizyjne	182
Amplituda sygnału wizyjnego. Kształt sygnału synchronizacji. Fale modulowane obrazem i dźwiękiem. Budowa nadajników telewizyjnych. Budowa odbiorników telewizyjnych	
Pogawędka osiemnasta. Fizyka i fizjologia koloru	189
Widmo kolorów. Dodawanie kolorów. Psychologia widzenia. Postrzeganie kolorów. Przesyłanie kolorów w telewizji	
Komentarze. Zasady nadawania telewizji kolorowej	195
Luminancja = suma chrominancji. Sygnały przesyłane w telewizji kolorowej. Kamera telewizji kolorowej. Przesyłanie trzech sygnałów. NTSC-SECAM-PAL.	
Pogawędka dziewiętnasta. Odbiorniki telewizji kolorowej	199
Odbiornik telewizji kolorowej wymyślony przez Pytalskiego. Kineskop maskowy. Wysoka precyzja. Chromatron. Obraz czarno-biały na ekranie kineskopu kolorowego. NTSC i PAL. Zasada systemu SECAM. Linie opóźniające	
Komentarze. Rejestracje i odtwarzanie dźwięków i obrazów	207
Trzy sposoby przetwarzania. Przodkowie współczesnych płyt gramofonowych. Rejestracja na płycie. Wytwarzanie płyt. Głowice odczytujące. Film dźwiękowy. Magnetofony. Magnetowidy i płyty wizyjne	
Pogawędka dwudziesta i ostatnia. Zastosowania elektroniki	212
Elektroniczny pomiar temperatury. Elektronika medyczna. Radar. Informatyka, automatyka, zdalne sterowanie	

PRZEDMOWA

W 1926 r. napisałem swoją pierwszą książkę pt. „J'ai compris la T.S.F.". Przetłumaczona na polski i wielokrotnie wydawana służyła bardzo wielu ludziom w różnych krajach świata do zdobywania podstawowych wiadomości z dziedziny radioelektryczności. Właśnie niektórzy z nich stali się wybitnymi specjalistami, od których zależą praktyczne i teoretyczne postępy naszej techniki.

W okresie, kiedy ukazała się ta pierwsza książka, odbiorniki radiofoniczne były wyposażone w lampy triody, żarzone bezpośrednio; trzeba je było zasilać z baterii. Od 1930 r. wprowadzenie lamp żarzonych pośrednio umożliwiło zasilanie z sieci prądu zmiennego, co znacznie zmieniło koncepcję odbiorników. Również ja napisałem nową książkę, zatytułowaną „Radio?... ależ to bardzo proste!”

Pierwsza książka składała się z serii 16 pogawędek, w czasie których inżynier Radiol wyjaśniał podstawy radiotechniki swojemu siostrzeńcowi – Mądralskiemu. W drugiej już Mądralski z kolei opowiadał tej techniki swojego przyjaciela Pytańskiego.

Następne książki również składały się z dialogów między tymi dwoma młodymi przyjaciółmi: „Telewizja?... ależ to bardzo proste!” „Tranzystor?... ależ to bardzo proste!” itd.

W tymczasem elektronika robi coraz większe postępy. Jej technologia zmienia się szybko, a jej zastosowania obejmują wszystkie dziedziny nauki, przemysłu i wszystkie inne dziedziny ludzkiej działalności.

Przedstawić w jednej książce wszystkie aspekty tej techniki i jej zastosowania w całej ich różnorodności byłoby zadaniem zbyt skomplikowanym i nie spotkałoby się chyba z aprobatą Czytelników. W istocie, użyteczne jest przybliżenie im tej szerokiej dziedziny, jaką jest elektronika, i ułatwienie im dostępu do jej różnych działów.

W tym celu przedstawiłem najpierw podstawy nauki o elektryczności, co umożliwi nawet tym, którzy nie zgłębiali fizyki, zrozumienie wszystkiego, co następuje potem.

Następnie robię przegląd techniki nadawania i odbioru radiofonicznego z uwzględnieniem aparatury wyposażonej w lampy i w półprzewodniki. Po czym Czytelnik nauczy się bez trudu, jak działa telewizja czarno-biała i telewizja kolorowa.

Po wyjaśnieniu w ten sposób przesyłania dźwięków i obrazów w przestrzeni, rozpatruję technikę ich przesyłania w czasie, to znaczy rejestrację i odtwarzanie sygnałów dźwiękowych i wizyjnych.

Aby uniknąć wrażenia monotonii przeplatam w tej książce pogawędki Mądralskiego i Pytańskiego monologami profesora Radiola. Mam nadzieję, że humorystyczne rysunki na marginesach pogawędek – uczynią – podobnie jak w poprzednich książkach – lekturę przyjemniejszą a przyglądanie treści – łatwiejsze.

Ważne jest dobre zrozumienie wszystkich wiadomości podanych w jednym rozdziale, przed przystąpieniem do lektury następnego. Często pożyteczne również będzie ponowne przeczytanie.

Życzę moim droгим Czytelnikom łatwego pierwszego kroku w cudowną dziedzinę elektroniki i szybkich postępów. Powodzenia!

Osoby

Mądralski — młody profesor elektroniki, który początki swojej wiedzy w tej dziedzinie zawdzięcza rozmowom ze swoim wujem Radiolem — znanym profesorem.

Ignas Pytalski — młody człowiek wykazujący się jedynie podstawowymi wiadomościami z dziedziny fizyki i matematyki. Trudno go jednak nazwać głupcem, ponieważ z łatwością przyswaja sobie zagadnienia, które go pasjonują, a właśnie elektronika jest dziedziną najbardziej go interesującą.

POGAWĘDKA PIERWSZA

Dwaj przyjaciele przed przystąpieniem do studiowania elektroniki robią przegląd tego, co w przeszłości złożyło się na współczesny kształt elektroniki, począwszy od pierwszego doświadczalnego wytworzenia fal elektromagnetycznych, realizacji telegrafu bez drutu i pierwszych stacji radiofonicznych, odbiorników radiowych itd. Historia ta dzieli się na trzy okresy, które można nazwać następująco:

TELEGRAF BEZ DRUTU - RADIO - ELEKTRONIKA

Podbój wszechświata

Pytalski — Wczoraj wieczorem z dużym zainteresowaniem obejrzałem kolorową transmisję telewizyjną z Marsa. Automatyczny pojazd, który został tam umieszczony przez amerykańsko-radziecką grupę kosmonautów, porusza się w naprawdę ciekawym krajobrazie. I to jest niesamowite, jak się pomyśli, że widzimy to wszystko bezpośrednio, w tym samym momencie co kamera telewizyjna zainstalowana na pokładzie pojazdu.

Mądralski — W przypadku, o którym mówisz, drogi przyjacielu, transmisja bezpośrednia nie oznacza, że obraz jest odbierany natychmiast. Nie zapominaj, że fale elektromagnetyczne, przenoszące sygnały foniczne i wizyjne, rozchodzą się z prędkością światła, tzn. 300000 kilometrów na sekundę. Jak wiadomo, Mars jest oddalony od Ziemi o 225 milionów kilometrów. Pozostawiam Ci wykonanie dzieła tej odległości przez prędkość fal i określenie w ten sposób czasu, który fale elektromagnetyczne potrzebują do zrobienia tej potwornej marszruty.

Pyt. — Rzeczywiście, otrzymuję 750 s, czyli dwanaście i pół minuty. Masz rację Genku: to nie jest natychmiast, ale sam fakt nie jest przez to mniej pasjonu-



225 000 000	300 000
210 0000	750
1500000	
1500000	
0000000	



jący. Dzięki telewizji docieramy do różnych elementów układu słonecznego. A wkrótce jestem tego pewien, umożliwi nam ona obejrzenie innych gwiazd i ich układów planetarnych.

Mądr. — Bez wątpienia, ale wzięwszy pod uwagę prędkość rozchodzenia się fal należy się liczyć z tym, że transmisja obrazów będzie trwała wiele lat. W przypadku gwiazd najbliższych ziemi, fale dotrą do nas po upływie około czterech i pół lat.

Pyt. — Uzbroimy się w cierpliwość konieczną dla tego niezwyklego podboju wszechświata. Rozwój elektroniki zniósł zaporę odległości. Dźwięki i obrazy przenoszą się z trudną do wyobrażenia człowiekowi prędkością światła i dzięki temu bez opuszczania mieszkania słyszymy i widzimy to, co dzieje się na pięciu kontynentach, a nawet w kosmosie.

Wszechstronność elektroniki

Mądr. — Poza trzema wymiarami przestrzeni, elektronika podbiła również to, co nazywamy „czwartym wymiarem” — czas. To prawda, można zarejestrować, a następnie odtworzyć zarówno dźwięki jak i obrazy. Spójrz Ignasiu, oto magnetofon, który od początku rejestruje naszą rozmowę.

Pyt. — Jak on działa?

Mądr. — Aby to zrozumieć, trzeba sporo wiedzieć: na przykład, na jakiej zasadzie działa mikrofon i głośnik, co to jest wzmacnianie, magnetyzm itp. Będziemy o tym wszystkim rozmawiać.

Pyt. — Bardzo się cieszę, ponieważ jestem pod wrażeniem wszechstronności elektroniki, która wniknęła we wszystkie dziedziny ludzkiej działalności. W przemyśle wiele procesów dokonuje się automatycznie dzięki urządzeniom sterowania automatycznego. Badania naukowe w jakże wielu przypadkach opierają się na urządzeniach i systemach elektronicznych. Lekarze korzystają z niej zarówno w diagnostyce jak i w terapii.

Mądr. — Zapomniałeś wymienić maszyny cyfrowe. Tak jak maszyna parowa od ponad dwóch wieków zastępuje w wielu przypadkach pracę naszych mięśni, podobnie maszyna cyfrowa dzięki swoim funkcjom obliczeniowym i logicznym jak również dzięki pamięci, w którą jest wyposażona, odciąża pracę ludzkich mózgów.

Pyt. — Sądzę, że maszyna cyfrowa jest wynalazkiem znacznie późniejszym niż maszyna parowa.

Mądr. — Oczywiście! Pierwsza elektroniczna maszyna cyfrowa została opracowana w 1944 r. Jednakże postęp jest coraz szybszy i właśnie rozwój maszyn cyfrowych jest tego najbardziej uderzającym przykładem.

Narodziny telegrafu bez drutu

Pyt. Powiedz mi, jak powstała ta cudowna dziedzina techniki, jaką jest elektronika?

Mądr. — Zaczęło się to wszystko od tzw. telegrafu bez drutu.

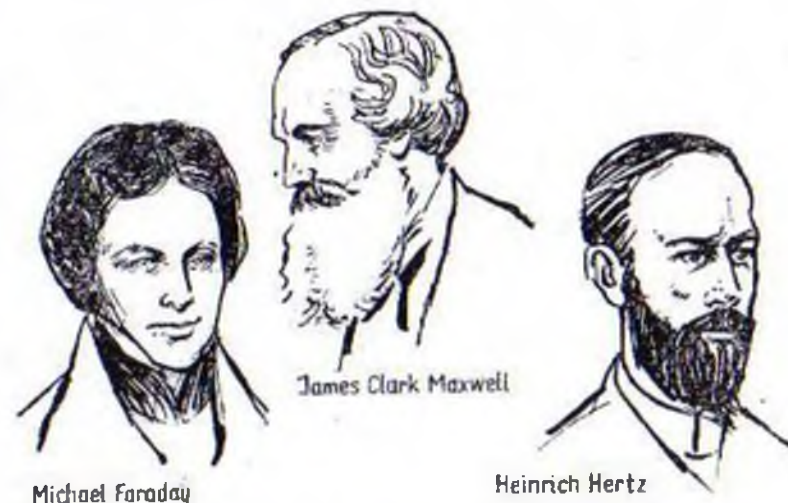
Pyt. — Jak nazywa się ten genialny człowiek, który go wynalazł.

Mądr. — Telegraf bez drutu jest wynalazkiem zbiorowym i powiedziałbym jednocześnie — pięknym przykładem współpracy międzynarodowej. Zaczniemy jednak od początku. W 1832 r. genialny samouk, angielski fizyk Michał Faraday formułuje intuicyjnie brzemiennej w skutki teorii pól elektrycznych i magnetycznych. Inny uczonego angielski, z pochodzenia Szkot, rozwija ideę Faradaya i wykazuje, że zmiany pola elektromagnetycznego przemieszczają się w przestrzeni w postaci fal. Zależ-

ności matematyczne znane pod nazwą równań Maxwella umożliwiają obliczenie prędkości rozchodzenia się — propagacji — tych fal w zależności od ośrodka, w którym się poruszają. Maxwell wykazał, że światło jest również falą lub zbiorem fal elektromagnetycznych, a następnie obliczył ich prędkość, która jak wykazały przeprowadzone znacznie później pomiary — okazała się dokładnie taka sama.

Pyt. — Niesamowite! Matematycy wyprzedzili tu doświadczenie.

Mądr. — Tak, to prawda. Pierwszym, któremu udało się wytworzyć fale elektromagnetyczne, był niemiecki profesor fizyki Heinrich Hertz. W 1887 r. w swoim laboratorium w Karlsruhe wywoływał on powstawanie iskier elektrycznych dzięki wy-



Rys. 1. Twórcy teoretycznych podstaw telegrafu bez drutu

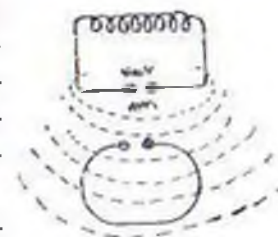
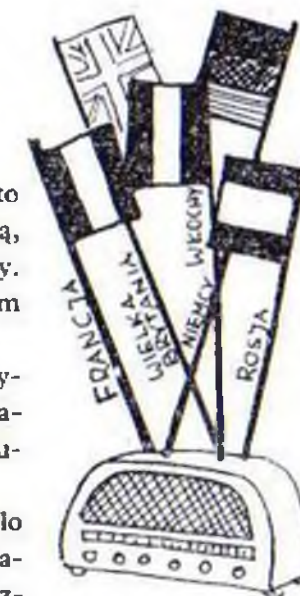
sokim napięciem wytwarzanym przez cewkę Rhumkorffa. A jeżeli idzie o fale, to doszedł do ich detekcji za pomocą rezonatora utworzonego przez pętlę metaliczną, której zbliżone do siebie końce umożliwiły pod wpływem fal Hertza przeskok iskry. Powiedziałem „fal Hertza”, ponieważ fale elektromagnetyczne nazywamy tak czasem od nazwiska człowieka, który jako pierwszy wytworzył je doświadczalnie.

Pyt. — Przypuszczam, że termin „detekcja”, którego użyłeś oznacza „wykrycie”. To właśnie robią detektywi w kryminalach, którymi się pasjonuję... Ale wracając do rzeczy, czy rezonator Hertza umożliwiał wykrywanie wysyłanych fal w dużej odległości?

Mądr. — Właśnie, że nie. Detektor ten był bardzo mało czuły. Trzeba było dopiero odkrycia w 1890 r. francuskiego fizyka Edwarda Branly prowadzącego badania w laboratorium Paryskiego Instytutu Katolickiego, że rezystancja (opór), proszku metalicznego zmniejsza się znacznie pod wpływem fal elektromagnetycznych. W ten sposób powstał „koherer” — czuły detektor fal, który pięć lat później umożliwił rosyjskiemu profesorowi Aleksandrowi Popowowi realizację pierwszych transmisji za pomocą telegrafu bez drutu. Demonstrację telegrafu bez drutu przeprowadził Aleksander Popow 7 maja 1895 r. przed członkami Rosyjskiego Towarzystwa Fizyki i Chemii w Petersburgu.

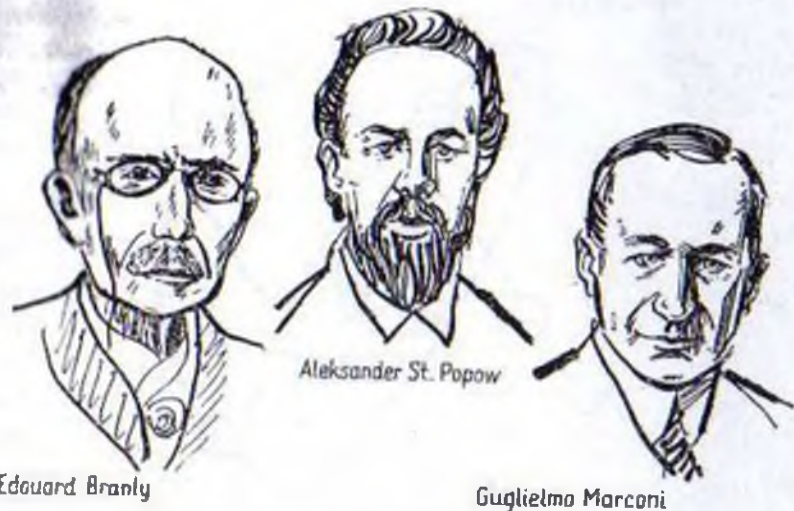
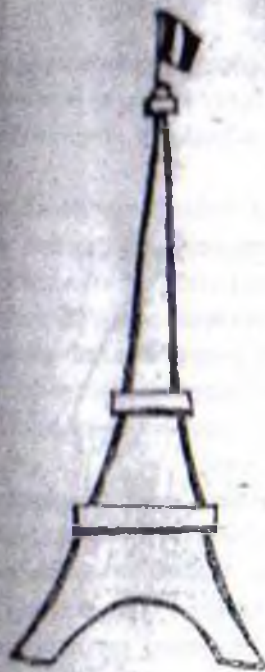
Pyt. — Miałeś rację Genku mówiąc o współpracy międzynarodowej. Do narodzin telegrafu bez drutu były potrzebne badania prowadzone przez dwóch Anglików, Niemca, Francuza i Rosjanina.

Mądr. — Do nich nie ogranicza się ten piękny przykład nie uznającej granic współpracy. Pierwsze seanse łączności na duże odległości zostały zrealizowane przez



koherer





Edouard Branly

Aleksander St. Popow

Guglielmo Marconi

Rys. 2. Pionierzy radia

młodego Włocha Guglielmo Marconiego. W 1899 r. nawiązał on łączność przez kanał La Manche, a w dwa lata później 12 grudnia 1901 r., spowodował, że fale elektromagnetyczne przebyły całą szerokość Oceanu Atlantyckiego. Następny najważniejszy wynalazek w dziedzinie, która nas interesuje, został dokonany w 1906 r. przez Amerykanina Lee de Foresta, który w swoim drzewie genealogicznym miał Francuza.

Pyt. — Co on takiego wynalazł?

Mądr. — Pierwszą lampę do telegrafu bez drutu, jak mówiono w owych czasach, a mówiąc językiem współczesnym — lampę elektronową.

Epoka radia

Pyt. — Jeżeli nie myłę się, termin „elektronika” powstał względnie niedawno.

Mądr. — Masz rację. Powiedziałbym nawet, że historię naszej techniki można podzielić na trzy okresy: telegrafu bez drutu, następnie radia i wreszcie elektroniki.

Pyt. — A od kiedy zaczyna się epoka radia?

Mądr. — Epoka radia datuje się od początków radiofonii. Wynalezienie lampy elektronowej umożliwiło zastosowanie fal elektromagnetycznych do przesyłania dźwięków. Wtedy właśnie narodziła się radiotelefonja, a na początku lat dwudziestych, w wielu krajach powstała radiofonia. We Francji pierwszy nadajnik radiofoniczny zainstalowano w 1921 r. na Wieży Eiffla.

Pyt. — Jak wówczas odbierano programy nadawane przez te nadajniki?

Mądr. — Przed 1930 r. odbiorniki radiofoniczne wyposażone w lampy musiały być zasilane prądem stałym. Dlatego w tym celu stosowano baterie lub akumulatory. Do zasilania odbiornika były potrzebne dwie baterie: jedna z napięciem 4 V do żarzenia lamp i druga o napięciu 80 V stanowiąca napięcie anodowe. Obydwie zresztą były umieszczone na zewnątrz odbiornika.

Pyt. — Już się zgubiłem. Co to jest „żarzenie” i „napięcie anodowe”?

Z wyjątkiem portretu Edouarda Branly, pozostałe portrety wielkich pionierów radia zostały zaczerpnięte z książki „Elektronik, woher-wohin” W. Glasera wydanej w Lipsku.

Mądr. — Wyjaśnię Ci to później. A na razie kontynuujemy krótki przegląd historii naszej techniki. Wracam więc do odbiorników lat dwudziestych. Ze względu na dużą czułość wymagały one często stosowania anteny zewnętrznej lub anteny ramowej. Jeśli idzie o głośniki, to umieszczano je na zewnątrz odbiornika. Muszę Ci powiedzieć, że te zestawy były narażone na mnóstwo kpin, ponieważ liczne przesady do połączeń zewnętrznych wydawały się zaprzeczeniem „bezdrutowości”.

Pyt. — A kiedy się to wszystko zmieniło?

Mądr. — Począwszy od 1930 r. zaczęto przechodzić na zasilanie odbiorników z sieci. W większości tych odbiorników zastosowano zasadę przemiany częstotliwości wynalezioną w 1917 r. przez francuskiego inżyniera Lucien Lévy. Umożliwiło to uzyskanie dużej czułości przy zastosowaniu jedynie wewnętrznej anteny ramowej. Głośnik również był umieszczany we wnętrzu odbiornika.

Pyt. — W ten sposób przesyłanie dźwięków stało się proste i łatwe. A przesyłanie obrazów?

Mądr. — Telewizja, z którą przeprowadzano eksperymenty w połowie lat dwudziestych, zaczęła być nadawana w latach trzydziestych. Jednakże druga wojna światowa przeszkodziła w jej powszechnym zastosowaniu.

Rozkwit elektroniki

Pyt. — Oczywiście wojna zahamowała rozwój techniki.

Mądr. — Mylisz się Ignasiu. Dla potrzeb militarnych rozwinięto szybko niektóre dziedziny, które doprowadziły do powstania elektroniki. Dlatego właśnie opracowano radar, który służył do obrony miast przed atakami powietrznymi.

Pyt. — Masz rację. Jak to się mówi — nie ma tego złego, co by na dobre nie wyszło.... Przypuszczam, że po zakończeniu działań wojennych nastąpił nowy rozkwit naszej techniki.

Mądr. — Tak, mój przyjacielu. Wtedy właśnie zaczęła ona wnikać we wszystkie dziedziny ludzkiej działalności. Fantastyczny postęp w rozwoju elektroniki wywołało wynalezienie w 1948 r. tranzystora. Dokonali tego trzech uczeni amerykańscy Bardeen, Brattain i Shockley, wyróżnieni później za ten przełomowy wynalazek nagrodą Nobla. Nagroda ta była w pełni zasłużona. Nowa technika półprzewodnikowa, która narodziła się wraz z tranzystorem, doprowadziła do mikrominiaturyzacji i niezwykle zwiększyła zastosowania elektroniki.

Pyt. — Dziękuję Ci bardzo, drogi Genku za tę interesującą opowieść o telegrafie bez drutu, który poprzez radio stał się wreszcie elektroniką. Stanowi ona dla mnie kolosalną zachętę do studiowania tej dziedziny. Mógłbyś mi wyjaśnić podstawowe pojęcia i omówić ich zasadnicze zastosowania, a więc radio i telewizję?

Mądr. — Bardzo chętnie. Ale najpierw poproszę swojego wuja profesora Radiola, aby mi doradził najlepszą metodę wprowadzenia Cię w arkana naszej techniki.

Pyt. — Mam nadzieję, że nie będzie miał za złe mojej ignorancji w dziedzinie fizyki, a zwłaszcza w nauce o elektryczności.

Mądr. — Kiedy wuj uczył mnie elektroniki, atmosfera była dobra. A więc zgoda, wyślę mu taśmę z nagraniem całej naszej rozmowy, dzięki czemu będzie wiedział dokładnie o co idzie. W ten sposób elektronika odda nam przysługę.



Profesor Radiol wyjaśnia:

BUDOWA MATERII

Profesor Radiol omawia budowę cząsteczek i atomów, przyciąganie, które wywołują przeciwstawne ładunki elektryczne, zachowanie się powłok walencyjnych oraz to co charakteryzuje przewodniki, izolatory i półprzewodniki.

Mój kochany Genku i Ignasiu!

Z dużym zainteresowaniem wysłuchałem Waszej rozmowy zarejestrowanej za pomocą magnetofonu. Korzystam z tej samej taśmy (oczywiście po skasowaniu Waszego nagrania), aby omówić zagadnienia, które Was tak bardzo interesują.

Moim zdaniem, przed rozpoczęciem nauki o elektronice w ścisłym znaczeniu tego słowa, jest konieczne, abyś otrzymał Ignasiu, dobre podstawy z elektryczności, a żeby nie były one powierzchowne trzeba dojść do sedna sprawy i zapoznać się z budową materii. Elektronika jest przecież — jak sama nazwa wskazuje — oparta na zachowaniu się elektronów, a te z kolei stanowią składnik wszystkich istniejących na świecie substancji.

Małość cząsteczek

Wiesz, zapewne, że najmniejsze ziarenko jakiegokolwiek materii posiadające jeszcze jej wszystkie cechy charakterystyczne nazywa się *cząsteczką*. W przypadku substancji złożonych, każda cząsteczka składa się z pewnej liczby *atomów*; na przykład cząsteczka wody zawiera dwa atomy wodoru i jeden atom tlenu.

Cząsteczki są bardzo małe i bardzo lekkie. Jeden milimetr sześcienny wody zawiera około 40 miliardów cząsteczek. Mogę Ci powiedzieć, że gdybyś chciał te cząsteczki ułożyć w linii prostej łączącej Ziemię z Księżycem, a więc na odległości 380 000 km, to na każdym centymetrze musiałbyś ich ułożyć jeden miliard.

Myślę, że teraz łatwiej będzie Ci zrozumieć ten mikrokosmos, który w porównaniu z otaczającym nas światem jest tak samo mały, jak świat w porów-

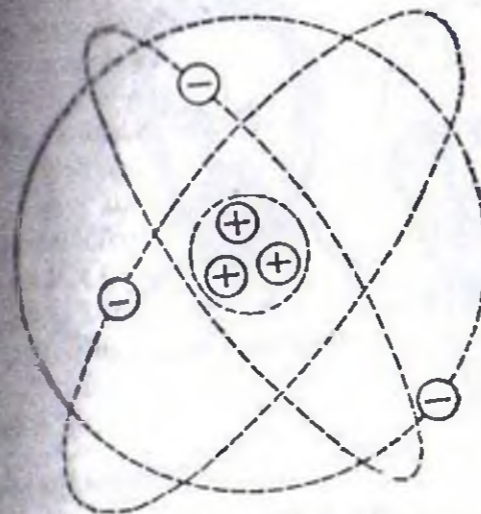
naniu z makrokosmozem — wszechświatem, gdzie odległości wyraża się w latach świetlnych. A musisz wiedzieć, że rok świetlny jest odległością, którą światło przebywa z prędkością 300 000 km/s w ciągu jednego roku, a więc w około 32 miliony sekund. Czini to po obliczeniu 9,5 tysiąca miliardów czyli 9,5 biliona kilometrów.

Mikrokosmos i makrokosmos

Wróćmy jednak od makrokosmosu, gdzie takie odległości są elementarne (czyż nie mówi się o milionach lat świetlnych?) do mikrokosmosu, w którym mała cząsteczka składa się z jednego lub wielu atomów. To słowo pochodzenia greckiego oznacza „niepodzielny”. W istocie, przez wieki myślano, że atom jest najmniejszą cząstką materii. Wyobraź sobie, że atom wodoru waży tylko 1,673 — kwadrylionową część grama. Jeśli nie przywykłeś do terminu „jedna kwadrylionowa część”, to przypomnij Ci, że oznacza on 1:1 000 000 000 000 000 000 000!

W mikrokosmosie dużo brakuje do tego, aby jakiś ciężar określić jako bardzo mały, ponieważ atom składa się jeszcze z dużo mniejszych elementów, a mianowicie z jądra i krążących wokół niego *elektronów*. Jak się domyślasz wewnętrzna struktura atomu jest podobna do układu słonecznego z tą jednak różnicą, że planety krążą po orbitach znajdujących się prawie na jednej płaszczyźnie, a orbity elektronów są umieszczone w różnych płaszczyznach.

Jeżeli wbrew sile odśrodkowej planety poruszają się po swoich torach nie wykazując tendencji do opuszczenia układu słonecznego, to dzieje się tak dzięki siłom grawitacyjnym, które wywołują



Rys. 3. Budowa atomu. Jądro jest utworzone z dodatnich protonów i neutronów (niezaznaczonych na rysunku). Wokół jądra krążą ujemne elektrony

wzajemne przyciąganie wszystkich ciał. Podobnie elektrony krążą wokół jądra nie oddalając się od niego, ponieważ istnieje siła przyciągająca, która je tam zatrzymuje.

Siła ta jest natury elektrycznej. W istocie

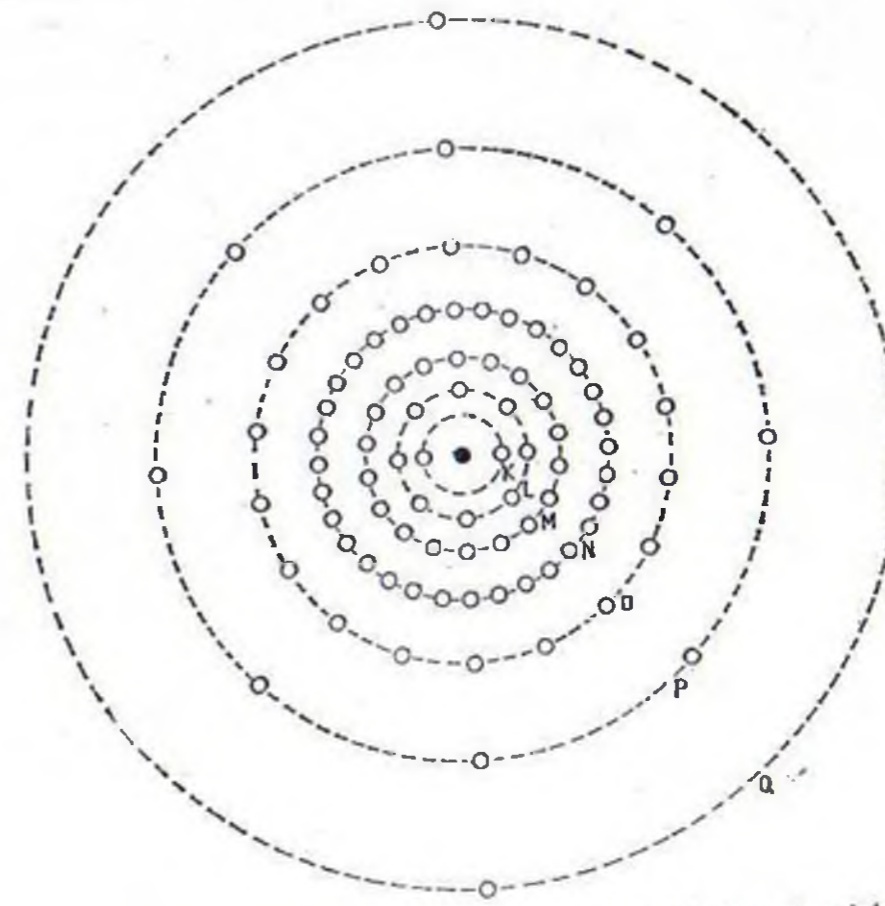
elektrony są ładunkami elementarnymi elektryczności ujemnej. Co się tyczy jąder, to składają się one z *protonów* będących ładunkami elementarnymi elektryczności dodatniej.

Otóż między ładunkami ujemnymi a dodatnimi działa siła przyciągania analogiczna do siły grawitacyjnej. Ta ostatnia jest, jak wiadomo, proporcjonalna do masy i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu ich odległości. W przypadku ładunków elektrycznych przyciąganie jest proporcjonalne do wartości ładunków i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości między nimi.

W jądrze atomu poza protonami znajdują się jeszcze cząstki zwane *neutronami*. Nazwa ich pochodzi stąd, że nie wykazując żadnego ładunku elektrycznego są obojętne (neutralne). Obecność ich zwiększa po prostu masę atomu.

Rozmieszczenie elektronów

Powiedziałem Ci już, że orbity elektronów nie znajdują się w tej samej płaszczyźnie, tak jak to jest w przypadku planet układu słonecznego. Jed-



Rys. 4. Schematyczne przedstawienie atomu radu pokazujące rozdział elektronów między różne powłoki. W rzeczywistości orbity znajdują się w różnych płaszczyznach

nakże nie są one dowolnie usytuowane. W rzeczywistości orbity mogą zajmować siedem poziomów lub, jak wolisz, siedem powłok, przy czym środkiem jest jądro atomu. Poziomy te oznacza się literami K, L, M, N, O, P i Q.

Powłoka K jest najbliższa jądra. Jej promień wynosi 5 miliardowych części centymetra. Promienie następnych powłok są proporcjonalne do kwadratu ich numeru porządkowego. I tak powłoka L, druga z kolei, ma promień 4 razy większy niż powłoka K. Promień ostatniej, siódmej powłoki (Q) jest 49 razy większy od promienia pierwszej powłoki (K).

Na pierwszej orbicie nie może znajdować się więcej niż 2 elektrony. W każdej powłoce liczba ich jest również ograniczona. Maksymalna możliwa liczba elektronów na każdej powłoce jest proporcjonalna do promienia powłoki. W przypadku powłoki L, której promień jest 4 razy większy od promienia powłoki K, maksymalna liczba elektronów wynosi $2 \cdot 4 = 8$. Podobnie jest dla następnych.

Co za pustka!...

Jeśli idzie o wymiary poszczególnych elementów składowych atomu, to wyrobisz sobie o nich lepsze wyobrażenie zakładając, że atom został powiększony sto milionów milionów razy. Protony będą miały wówczas wymiary jabłek, a elektrony – piłek futbolowych. Orbita najbliższa jądra, to znaczy na powłoce K, będzie miała promień długości 5 km, następna orbita – 20 km. W przypadku atomu mającego elektrony na orbitach wszystkich powłok, a takim atomem jest atom uranu, orbita zewnętrzna będzie miała promień długości 245 km.

Muszę Ci powiedzieć, że wewnątrz materii prawie w całości jest zajęte przez próżnię. Jeśli złączylibyśmy wszystkie elementy cząsteczek wchodzące w skład słońca nie zostawiając między nimi wolnej przestrzeni, to otrzymalibyśmy drobiny

ledwie widoczne pod silnie powiększającym mikroskopem; ciężar tej drobiny byłby jednak równy ciężarowi słońca.

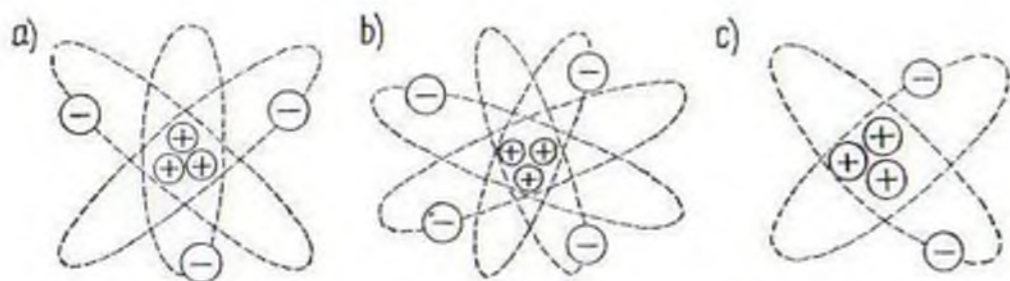
Bez wątpienia, żaden słoń nie zniósłby takiego ciśnienia. Zdarza się to jednak w przypadku starzejących się gwiazd, które po prostu zapadają się. W następstwie takiej implozji średnica gwiazdy zmniejsza się dziesięć tysięcy razy, a jej zwłoki są już tylko czarną dziurą w niebie. Olbrzymia gęstość materii tego nowego ciała niebieskiego wywołuje tak silne pole grawitacyjne, że zgodnie z prawami ogólnej teorii względności, zakrzywia ono tory promieni świetlnych.

Koniec obojętności

Wróćmy ponownie z makrokosmosu do mikrokosmosu. A oto bardzo ważna sprawa: normalnie liczba elektronów w atomie jest równa liczbie protonów. W rezultacie ogólny ładunek elektryczności ujemnej ma taką samą wartość, co ogólny ładunek elektryczności dodatniej. Ładunki te neutralizują się wzajemnie dzięki czemu zrównoważony w ten sposób atom nazywa się atomem elektrycznie obojętnym.

Jednak w pewnych substancjach elektrony znajdujące się na zewnętrznej powłoce atomów, a w związku z tym mniej związane z jądrem, mogą te atomy opuszczać. Zdarza się to pod wpływem zewnętrznych ładunków dodatnich lub w wyniku podwyższenia zewnętrznej temperatury ciała. W tej sytuacji, równowaga atomu zostaje zachwiana, dodatni ładunek jądra staje się większy od sumy ujemnych ładunków elektronów. Mówi się wtedy, że atom został *zjonizowany* dodatnio lub stał się *jonem* dodatnim.

Zdarza się również sytuacja odwrotna. Jeden lub nawet kilka elektronów z sąsiednich atomów może przejść na zewnętrzną powłokę jakiegoś ato-



Rys. 5. Różne stany elektryczne atomów: a) obojętny, b) ujemny c) dodatni

mu. Ich ładunki, dodając się do ujemnych ładunków elektronów tego atomu, powodują, że ogólny ładunek atomu staje się ujemny. Mamy wówczas do czynienia z jodem ujemnym.

Wartościowość

Powłoka zewnętrzna odgrywa również zasadniczą rolę w tworzeniu cząsteczek – tych związków atomów, które składają się na różne substancje. To właśnie ta powłoka może mieć elektrony należące do różnych atomów.

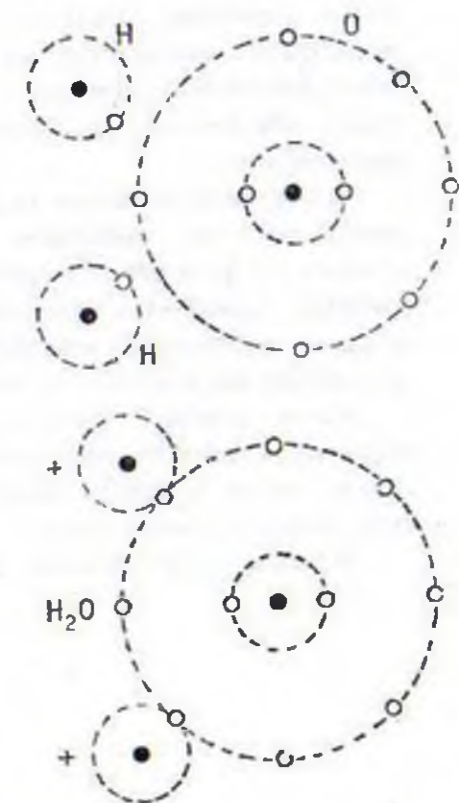
Mówiąc obrazowo, powłoka zewnętrzna jest nasyconiona, kiedy na jej orbitach krąży 8 elektronów. Dlatego też, jeżeli jakiś atom ma ich na powłoce wewnętrznej tylko 7, to na pewno ma ochotę przechwycić jeden dodatkowy elektron. Mówimy, że ten atom jest *jednowartościowy*, ponieważ powłoka zewnętrzna nazywa się powłoką wartościowości lub *powłoką walencyjną*. Ten drugi termin jest nawet częściej stosowany. Jeżeli na powłoce zewnętrznej atomu znajduje się 6 elektronów, to taki atom jest *dwuwartościowy*.

Tak jest właśnie w przypadku tlenu, którego atomy mają na powłoce zewnętrznej L tylko 6 elektronów. Jeżeli tlen wejdzie w kontakt z wodorem, który jest najlżejszym pierwiastkiem, ponieważ składa się tylko z jednego elektronu krążącego wokół tylko jednoprotowego jądra, to wówczas każdy atom tlenu łączy się z dwoma atomami wodoru na swojej powłoce zewnętrznej. W ten sposób powstaje tlenek wodoru, który jest bardziej znany jako ... woda.

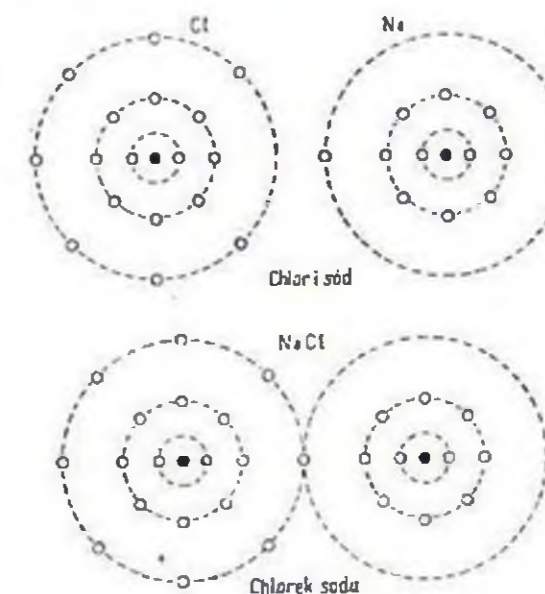
Rozpatrzmy jeszcze przypadek atomu chloru, którego powłoka zewnętrzna zawiera 7 elektronów, co czyni go pierwiastkiem jednowartościowym. Chlor w obecności sodu, który na powłoce zewnętrznej M ma tylko jeden elektron, łączy się z nim tworząc chlorek sodu. To uczone słowo, drogi Ignasiu, oznacza po prostu sól kuchenną.

Przewodniki, izolatory i półprzewodniki

Widzisz więc, że atomy, których powłoka zewnętrzna przyciąga elektrony z sąsiednich atomów, zostają zjonizowane ujemnie, a atomy tracące w ten sposób swoje elektrony – dodatnio. A ponieważ to, co jest ujemne, jest przyciągane przez to, co



Rys. 6. Elektrony dwóch atomów wodoru (H) uzupełniają do 8 liczbę elektronów znajdujących się na powłoce L atomu tlenu (O). W ten sposób z dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu powstaje cząsteczka tlenku wodoru pospolicie zwanego wodą



Rys. 7. Z połączenia atomu chloru (Cl) i atomu sodu (Na) powstaje cząsteczka chlorku sodu

jest dodatnie, związek takich dwóch atomów tworzących cząsteczkę jest bardzo stabilny.

Możesz teraz dojść do wniosku, że atom, którego powłoka zewnętrzna zawiera mniej niż 8 elek-

tronów, wykazuje tendencję do łączenia się ze swoimi sąsiadami. Tendencja ta nie występuje w przypadku neonu, który ma na powłoce zewnętrznej dokładnie 8 elektronów i z tego powodu jest gazem szlachetnym nie łączącym się z innymi pierwiastkami.

Kiedy liczba elektronów na powłoce zewnętrznej atomu, czyli tzw. elektronów peryferyjnych, jest mniejsza niż 4, to taki atom przekazuje je wspaniałomyślnie sąsiadnemu atomowi. Taka sytuacja występuje w przypadku wszystkich metali i to właśnie określa ich przewodność elektryczną.

Kiedy powłoka zewnętrzna atomu zawiera więcej niż 4 elektrony, atom niechętnie się ich pozbawia. Jest to przypadek materiałów izolacyjnych, czyli izolatorów elektrycznych.

Wreszcie jeżeli powłoka zewnętrzna atomu

zawiera 4 elektrony, a tak właśnie jest w przypadku krzemu i germanu, to mamy do czynienia z materiałem, który nie jest ani przewodnikiem, ani izolatorem, a półprzewodnikiem. Wiesz chyba jak ważną rolę odgrywają półprzewodniki we współczesnej elektronice.

Nie chcę Cię już dłużej męczyć, skazując Cię na życie w świecie atomów. Zanim jednak opuścimy mikrokosmos, chciałbym Ci powiedzieć, że atomy ciał stałych są na ogół ułożone w doskonałym porządku dzięki przyciąganiu elektronów peryferyjnych przez jądra sąsiednich atomów. Dlatego właśnie większość ciał stałych ma budowę krystaliczną.

Teraz, kiedy Ci przedstawiłem podstawy budowy materii, bez trudności zrozumiesz Ignasiu to, co mój drogi siostrzeniec Mądrałski będzie Ci mówił na temat prądu elektrycznego.

POGAWĘDKA DRUGA

Ignasz Pytalski po zapoznaniu się z budową materii i szczególnie rolą elektronów nie będzie miał trudności w przyswojeniu podstawowych wiadomości dotyczących prądu elektrycznego, źródeł napięcia, zależności między natężeniem prądu a napięciem i rezystancją oraz wartości rezystancji w zależności od rodzaju i wymiarów przewodnika.

SPACERUJĄCE ELEKTRONY

Nieskończenie duże i nieskończenie małe

Madr. — Co sądzisz Ignasiu, o wysłuchanym przed chwilą monologu mojego wuja Radiola?

Pyt. — Jestem pod wrażeniem dziwnej analogii istniejącej między mikrokosmo-
sem a makrokosmo-
sem. W rezultacie atom jest równoważny układowi słonecznemu,
a system, moim zdaniem, cząsteczka odpowiada konstelacji.

Madr. — Można nawet iść dalej i przyjąć, że cały Wszechświat składa się z szeregu takich konstelacji połączonych w galaktyki i tworzy jakiś ogromny organizm sytuowany w Super-Wszechświecie.

Pyt. — Zgoda, ja również mam swoją hipotezę. Skoro stworzyłeś obraz tego, to można by nazwać „makro-makrokosmo-
sem”, spróbuję Ci wyczarować „mikro-
kosmos”. Kto wie, czy każdy elektron nie jest prawdziwą planetą — być może nawet zamieszkałą — złożoną z nieskończenie mniejszych cząsteczek, które z ko-
bi...

Wędrowka elektronów

Madr. — Pozwól, że Ci przerwę Ignasiu. Zamiast wymyślać takie rzeczy, które nie mogą być nawet prawdziwe, lepiej zrobimy jak zaczęliśmy studiować elektryczność. Wiesz już, dzięki wyjaśnieniom mojego wuja, kiedy atom jest dodatni, a kiedy ujemny. W pierwszym przypadku brak elektronów powoduje, że przeważa dodatni ładunek jądra, w związku z czym ogólny ładunek elektryczny atomu jest dodatni. W drugim przypadku nadmiar elektronów decyduje o ogólnym ładunku elektrycznym — ujemnym. W obu tych przypadkach równowaga elektryczna atomu jest zachwiana. Załóżmy teraz, że masz drut będący przewodnikiem...

Pyt. — Chcesz powiedzieć drut wykonany z materiału, którego atomy mają mniej niż cztery elektrony na powłokach zewnętrznych?

Madr. — Oczywiście, na przykład drut miedziany. Załóżmy, że na jednym jego końcu zgromadziliśmy atomy dodatnie, a na drugim — ujemne. Co się teraz będzie działo?



Pyt. — Przyroda lubi równowagę. Dlatego przypuszczam, że elektrony znajdujące się w nadmiarze na końcówce ujemnej pospieszą tam, gdzie ich brakuje, a więc do końcówki dodatniej.

Mądr. — Bardzo dobrze. W rzeczywistości jednak wędrówka elektronów jest bardziej skomplikowana. Nie można powiedzieć, że elektrony zgromadzone na jednym końcu przewodnika przebiegają całą długość drutu, aż do drugiego końca. To właśnie atomy dodatnie, umiejscowione na tym drugim końcu, przyciągają elektrony z sąsiednich atomów. Te z kolei stając się dodatnimi będą przyciągały elektrony z dalej położonych atomów. I w ten sposób wędrówka elektronów będzie następowała do momentu, kiedy elektrony znajdujące się w nadmiarze na końcówce ujemnej zostaną przyciągnięte przez najbliższej niej położone atomy.

Pyt. — Jeżeli dobrze rozumiem, to jest właśnie to, co nazywamy *prądem elektrycznym*. Ale biorąc pod uwagę złożoność procesu, który mi przed chwilą opisałeś, należy się spodziewać, że prędkość prądu jest raczej nieduża — prawda?

Mądr. — Mylisz się, przyjacielu. Prędkość ta może być równa prędkości światła. Trzeba jednak rozróżniać prędkości poszczególnych elektronów przechodzących z jednego atomu do drugiego od prędkości ogółu elektronów.

Kiedy sznur samochodów stoi na skrzyżowaniu pod czerwonym światłem, i kiedy to światło zmienia się na zielone, każdy z samochodów rusza powoli. Jeżeli jednak kierowcy mają wszystkie odruchy natychmiastowe, to ruszają w chwili, w której zobaczą, że nastąpiła zmiana światła. W tym przypadku chwila, w której samochody ruszają, określa czas, w którym światło dociera do oczu każdego kierowcy. Można więc powiedzieć, że proces ruszania kolejnych samochodów przesuwa się wzdłuż sznura samochodów z prędkością światła, to jest 300000 kilometrów na sekundę. Podobnie prąd elektryczny ma również prędkość bliską prędkości światła.

Źródła napięcia

Pyt. — Czy po przywróceniu równowagi dwóm końcówkom przewodnika przepływ elektronów zanika?

Mądr. — Przepływ ten trwa, jeżeli podtrzymamy brak równowagi między — jak to określamy — *potencjalami elektrycznymi* obu końcówek. Aby wytworzyć różnicę potencjałów zwaną również *napięciem*, można wykorzystać różne sposoby. W istocie wszystkie rodzaje energii mogą być zamienione na energię elektryczną. Wytwarza się ją równie dobrze ogrzewając termoparę jak i oświetlając komórkę fotoelektryczną. Możesz również łatwo przetworzyć energię chemiczną na energię elektryczną. Wystarczy, żebyś włożył do roztworu wodnego kwasu siarkowego dwa pręty: jeden z miedzi, drugi z cynku. Reakcje chemiczne spowodują natychmiast to, że potencjał elektryczny cynku, będzie ujemny w porównaniu z potencjałem elektrycznym miedzi. Jeżeli teraz połączysz oba pręty przewodem, oczywiście poza roztworem, to przez ten przewód będzie płynął prąd elektronów w kierunku od cynku do miedzi.

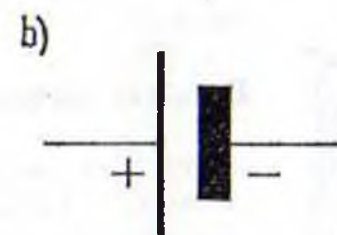
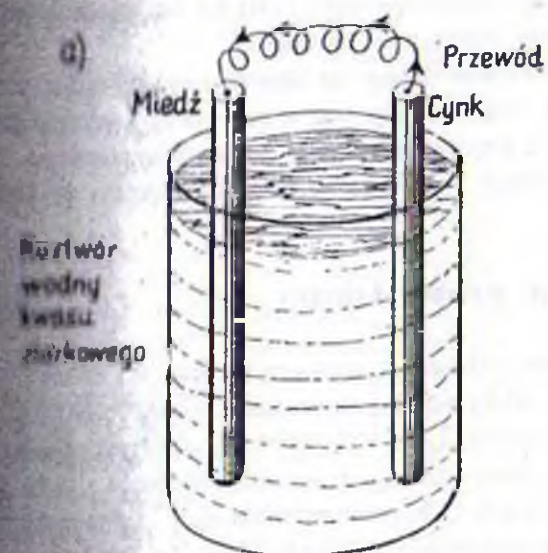
Pyt. — Czy to jest właśnie *ogniwo elektryczne*?

Mądr. — Tak, ale najprostsze. Między wspomnianymi prętami ustala się napięcie rzędu 1,5 volta, ponieważ różnice potencjałów mierzy się w voltach. Jeżeli jest potrzebne wyższe napięcie, można połączyć szeregowo kilka ogniw, łącząc kolejno dodatni biegun jednego ogniwa z ujemnym biegunem następnego.

Pyt. — Przypuszczam, że termin „*biegun*” oznacza tutaj każdą z końcówek ogniwa. I bardzo możliwe, że przy takim szeregowym połączeniu, napięcia dodają się.



Przewodnik



Rys. 8. Najprostsze ogniwo elektryczne (a) i jego symbol (b). Strzałki pokazują kierunek przepływu elektronów przez przewód. Elektrony płyną od bieguna ujemnego (cynk) do bieguna dodatniego (miedź)

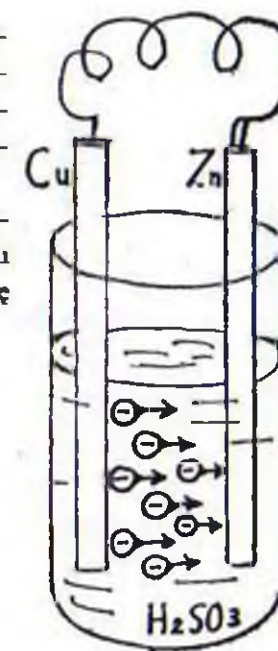
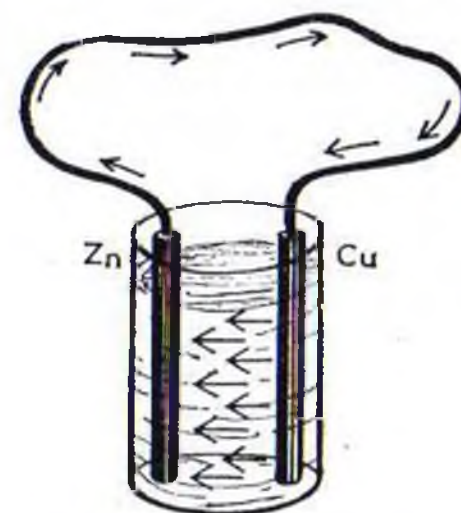
Możemy się, że w ten właśnie sposób otrzymuje się *baterie* stosowane w odbiornikach radiowych.

Mądr. — Brawo Ignasiu! Intuicja Cię nie zawiodła. Rzeczywiście powszechnie stosowane baterie składają się z wielu połączonych szeregowo ogniw.

Umowa i prawda

Pyt. — Jednak jest coś, co mnie w tym wszystkim dziwi. Według Ciebie elektrony w przewodniku poruszają się od bieguna ujemnego w kierunku bieguna dodatniego. Otóż słyszałem od osób zorientowanych w zagadnieniu, że prąd elektryczny płynie od „plusa” (czyli bieguna dodatniego) do „minusa” (bieguna ujemnego). Gdzie więc leży prawda?

Mądr. — To, o czym słyszałeś, to umowny kierunek przepływu prądu elektrycznego. Przyjęto go w bardzo dawnych czasach, kiedy nie wiadano o istnieniu elektronów i, w konsekwencji, również o zasadach ich ruchu. Weź więc pod uwagę



Rys. 9. Kierunek ruchu elektronów wewnątrz i zewnątrz ogniwa

prawdziwy kierunek prądu elektronowego, który na zewnątrz źródła napięcia płynie od bieguna ujemnego do bieguna dodatniego.

Pyt. — Dlaczego kładziesz nacisk na słowa: „na zewnątrz źródła napięcia”?

Mądr. — Ponieważ wewnątrz ogniwa w roztworze wodnym kwasu siarkowego elektrony przepływają od pręta miedzianego do pręta cynkowego. Widzisz więc, że w ten sposób krzywa obiegów zostaje całkowicie zamknięta i że elektrony pokonują całą trasę.



Pytalski formułuje prawo Ohma

Pyt. — A jaka liczba elektronów wybiera się na taki spacer?

Mądr. — Liczba ta zależy od dwóch czynników: napięcia źródła i oporu czynnego, czyli *rezystancji* obwodu. Liczba elektronów, która przepływa w czasie jednej sekundy, nazywa się *natężeniem* prądu. Jednostką natężenia prądu jest amper, przy czym jeden amper odpowiada 6 miliardom miliardów elektronów na sekundę.

Pyt. — Jeżeli dobrze zrozumiałem, natężenie prądu jest wprost proporcjonalne do napięcia i odwrotnie proporcjonalne do rezystancji.

Mądr. — Brawo, drogi przyjacielu. W ten sposób sformułowałeś — i to bardzo ściśle — *prawo Ohma* — podstawowe prawo całej nauki o elektryczności. W istocie, aby obliczyć natężenie prądu I , wystarczy podzielić napięcie U przez rezystancję R . Tę ostatnią wyraża się w jednostkach zwanych omami i oznaczanych grecką literą Ω (omega). Jeden om jest rezystancją przewodnika, który pod wpływem napięcia o wartości 1 V, wywołuje przepływ prądu o natężeniu 1 ampera.

Pyt. — Myślę, że prawo Ohma można wyrazić za pomocą prostego wzoru matematycznego:

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

który oznacza, że natężenie prądu jest równe napięciu podzielonemu przez rezystancję. Chciałbym jednak wiedzieć, od czego zależy wartość tej rezystancji.

Rezystancja i rezystywność

Mądr. — Zależy ona od rodzaju i wymiarów przewodnika. Każdy materiał charakteryzuje się tym, co nazywamy jego *oporem właściwym* lub *rezystywnością*. Rezystywność jest to rezystancja, jaką przedstawia sześcian, o boku równym 1 centymetrowi, wykonany z danego materiału, między dwiema przeciwległymi ścianami.

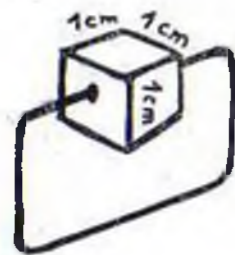
Najmniejszą rezystywność ma srebro; wynosi ona 0,000001492 Ωcm . Nieco większą, bo wynoszącą 0,000001584 Ωcm ma miedź. Natomiast rezystywność żelaza jest 6 razy większa od rezystywności srebra, a ołowiu nawet 15 razy.

Rozumiesz teraz, dlaczego stosuje się głównie przewody wykonane z miedzi, metalu dużo tańszego od srebra.

Pyt. Przypuszczam, że rezystywność izolatorów jest dużo większa.

Mądr. — Oczywiście. Rezystywność suchego powietrza jest nieskończenie duża, a szkła, materiałów plastycznych i gumy bardzo, bardzo duża.

Pyt. — Zgodnie z tym, co przed chwilą powiedziałeś, rezystancja przewodu zależy nie tylko od rodzaju materiału, z którego jest wykonany, a więc od rezystywności, ale również od wymiarów przewodu. Czy myślę się przypuszczając, że im przewód jest dłuższy, tym jego rezystancja jest większa?



Mądr. — Masz zupełną rację. Rezystancja R jest wprost proporcjonalna do długości l przewodu; zależy również od jego przekroju S . Zgadnij według jakiej zależności?

Pyt. — Oczywiście, im przekrój jest większy, tym łatwiej przechodzą elektrony, a zatem rezystancja R musi być odwrotnie proporcjonalna do przekroju S .

Mądr. — Bardzo dobrze. W takim razie, jeżeli oznaczymy rezystywność literą grecką ρ (ro), będziesz umiał podać wzór umożliwiający obliczenie rezystancji przewodu o długości l i przekroju S ?

Pyt. — Nic trudnego. Wystarczy pomnożyć rezystywność przez długość i podzielić ją przez przekrój

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

przy czym wymiary we wzorze powinny być wyrażone w centymetrach.

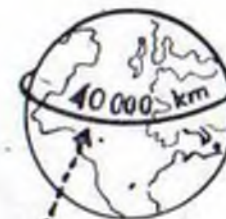
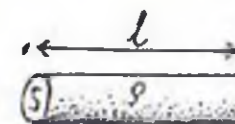
Mądr. — Doskonale Ignasiu. Stosując ten wzór obliczysz, że przewód miedziany o przekroju 1 mm^2 opasujący Ziemię wzdłuż równika, co odpowiada długości 40000 km, będzie miał rezystancję większą od 600000 Ω . Czyni to jednak tylko 15 Ω na kilometr i zaledwie 0,015 Ω na metr.

Pyt. — Jeżeli takim przewodem o długości 1 m połączymy dwa bieguny naszego ogniwa cynkowo-miedziowego o napięciu 1,5 V, to natężenie prądu w tym przewodzie wyniesie zgodnie z prawem Ohma:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1,5}{0,015} = 100 \text{ A}$$

Mądr. — Jest to natężenie zbyt duże dla takiego źródła napięcia jak ogniwo. Mówimy w tym przypadku, że zostało ono praktycznie *zwarte*. A takie zwarcie może je zniszczyć.

Pyt. — Zmęczyłem się Genku. Czuję, że rezystancja mojego mózgu maleje pod wpływem takiego ogromu nowych wiadomości. Dlatego, aby uniknąć zwarcia w mojej czaszce, proponuję odłożyć dalszy ciąg naszej pogawędki do następnego spotkania.



Przewód miedziany
 $S = 1 \text{ mm}^2$
 $R > 600\,000 \Omega$



Profesor Radiol omawia :

OBWODY PRĄDU STAŁEGO

W krótkim wystąpieniu wuj Mądralskiego wyjaśnia właściwe stosowanie symboli jednostek oraz ich wielokrotnych i podwielokrotnych; następnie omawia różne zastosowania prawa Ohma. Na zakończenie wprowadza pojęcie mocy elektrycznej.

Drogi Genku i Ignasiu!

Wasza ostatnia rozmowa była pasjonująca. Gratuluję Ci Ignasiu łatwości, z jaką przyswajasz sobie wszystkie omawiane zagadnienia.

Wielokrotne i podwielokrotne

Po wprowadzeniu podstawowych jednostek w nauce o elektryczności, sądzę, że byłoby bardzo pożyteczne omówienie ich wielokrotnych i podwielokrotnych. Często bowiem ma się do czynienia z bardzo dużymi lub przeciwnie, bardzo małymi wartościami napięcia, prądu, rezystancji lub innych wielkości.

W celu utworzenia odpowiednich terminów i symboli stosuje się przedrostki, które umieszcza się przed nazwami jednostek i skróty literowe, które umieszcza się przed symbolami jednostek. Podaję Wam tablicę przedrostków i odpowiadających im skrótów literowych oraz mnożników:

Zgodnie z tą tablicą milion omów nazywamy megaomem i oznaczamy symbolem $M\Omega$, tysięczną część wolta nazywamy miliwoltem i oznaczamy

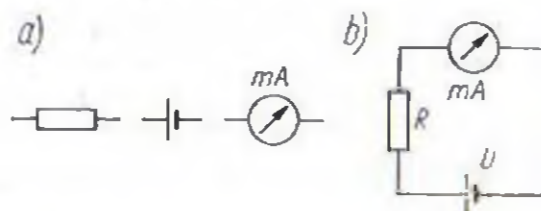
Jednostki wielokrotne	Jednostki podwielokrotne
10^{12} tera T	10^{-1} decy d
10^9 giga G	10^{-2} centy c
10^6 mega M	10^{-3} mili m
10^3 kilo k	10^{-6} mikro μ
10^2 hekto h	10^{-9} nano n
10^1 deka da	10^{-12} piko p
	10^{-15} femto f
	10^{-18} atto a

symbolem mV. Podobnie, milionowa część ampera to mikroamper, który zapisujemy symbolem μA .

Dodam jeszcze, że nie trzeba stawiać kropki po napisaniu symbolu, ponieważ taki symbol nie jest skrótem; oczywiście trzeba postawić kropkę, jeżeli symbol znajduje się na końcu zdania.

Zastosowanie prawa Ohma

Skoro umiemy już oznaczać różne wartości zajmę się teraz pokazaniem Wam również symboli graficznych rozmaitych elementów i urządzeń elektrycznych. Na początek zobaczcie, jak wyglą-



Rys. 10. Symbole graficzne rezystora, baterii i przyrządu do pomiaru natężenia prądu w miliamperach (a) oraz układ złożony z tych trzech elementów (b)

dają symbole graficzne ogniwa lub baterii, rezystora i przyrządu do pomiaru natężenia prądu zwanego w zależności od zastosowania amperomierzem lub miliamperomierzem. A oto najprostszy schemat układu składającego się z tych trzech elementów. Widzicie w tym układzie rezystor R połączony szeregowo z amperomierzem i dołączony do biegunów baterii składającej się z trzech połączonych szeregowo ogniw. Ponieważ każde ogniwo ma napięcie 1,5 V, napięcie baterii będzie wynosić $3 \cdot 1,5 = 4,5$ V. Załóżmy teraz, że wskazówka amperomierza pokazuje natężenie prądu równe

0,1 A. Czy będziecie umieli podać wartość rezystancji? Ty Ignasiu, skoro bezbłędnie sformułowałeś prawo Ohma, na pewno nie będziesz miał żadnych trudności w obliczeniu z wyrażenia

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

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4,5}{0,1} = 45 \Omega$$

Rozpatrzmy teraz przypadek baterii o nieznanym napięciu, która w rezystorze o wartości 50Ω wywołuje przepływ prądu o natężeniu 0,4 A. I znowu na podstawie prawa Ohma łatwo obliczyć, że napięcie baterii wynosi

$$U = I \cdot R = 0,4 \cdot 50 = 20 \text{ V}$$

Moc elektryczna

Skoro już tyle umiemy, obliczmy *moc* traconą w rezystorze. Mocą nazywa się ilość energii zużywaną w ciągu jednej sekundy. Jest ona oczywiście wprost proporcjonalna do napięcia i natężenia prądu. Jednostką mocy P jest wat, a jego symbolem litera W.

W naszym przypadku

$$P = U \cdot I = 20 \cdot 0,4 = 8 \text{ W}$$

Spadek napięcia

Rozważmy przypadek obwodu, w którym bateria o napięciu 40 V wywołuje przepływ prądu przez trzy rezystory połączone szeregowo. Wartości rezystorów wynoszą 10Ω , 30Ω i 40Ω , a więc rezystancja wypadkowa wynosi 80Ω . Zgodnie z prawem Ohma natężenie prądu w obwodzie

$$I = \frac{U}{R} = \frac{40}{80} = 0,5 \text{ A}$$

Przechodząc przez pierwszy rezystor prąd ten spowoduje, że między końcówkami rezystora wystąpi napięcie $0,5 \cdot 10 = 5 \text{ V}$. Na drugim rezystorze wystąpi napięcie $0,5 \cdot 30 = 15 \text{ V}$, a na trzecim $0,5 \cdot 40 = 20 \text{ V}$.

Suma tych trzech napięć

$$5 + 15 + 20 = 40 \text{ V}$$

a więc jest równa napięciu baterii.

Każde z tych napięć określamy nazwą: *spadek napięcia*.

Mam nadzieję, drodzy przyjaciele, że te elementarne obliczenia nie zmęczyły Was bardzo. A teraz radzę Wam zająć się magnetyzmem i prądem zmiennym. Umożliwi Wam to zrobienie następnego kroku w nauce o elektryczności i zbliżenie się do elektroniki.

POGAWĘDKA TRZECIA

W tej pogawędce nasi dwaj przyjaciele będą poruszali zagadnienia magnetyzmu, pola magnetycznego wytwarzanego przez prąd elektryczny i przeciwnie wytwarzanie prądu elektrycznego w polu magnetycznym. Wszystkie te wiadomości umożliwiają, na koniec, łatwe zrozumienie działania prądnic wytwarzających prąd zmienny.

MAGNETYZM

Przyciąganie i odpychanie



Mądr. — Idąc za radą wuja, przyniosłem busolę i dwa magnesy: jeden w postaci pręta, drugi w kształcie podkowy.

Pyt. — Obydwa przyciągają żelazo, ale również moją uwagę.

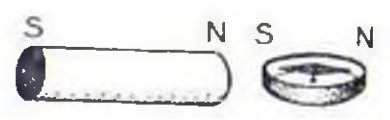
Mądr. — Skoro tak jest, to możesz mi powiedzieć, w jakim położeniu ustawi się strzałka busoli?

Pyt. — Oczywiście. Ustawi się tak, że kolorowy punkt na strzałce wskaże kierunek na biegun północny Ziemi.

Mądr. — Prawie ściśle. W rzeczywistości biegun magnetyczny naszej planety jest lekko odchylony od jej bieguna geograficznego. W każdym razie ten punkt strzałki busoli również nosi nazwę bieguna północnego. A teraz zbliżam do niej jeden koniec magnesu prostego.

Pyt. — Widzę, że strzałka busoli obróciła się i że właśnie biegun południowy został przyciągnięty przez magnes. Ale czy uważasz, że jestem ignorantem Genku? Wiem bardzo dobrze, że bieguny różnoimienne przyciągają się, i przeciwnie bieguny równoimienne odpychają się. A zatem do busoli zbliżyłeś biegun północny magnesu.

Mądr. — Tak jest. Pola magnetyczne zachowują się rzeczywiście w podobny sposób, jak pola elektryczne, w których ładunki o takiej samej polaryzacji odpychają się, podczas gdy ładunki o przeciwnych polaryzacjach (jak w przypadku protonów i elektronów) przyciągają się.



Rys. 11. Biegun północny N magnesu prostego przyciąga biegun południowy S ruchomego magnesu busoli

Pyt. — To jest ciekawe, że my, ludzie, nie jesteśmy zdolni do bezpośredniego dostrzegania pól elektrycznych i magnetycznych.

Mądr. — Nie narzekaj Ignasiu — to szczęście. Gdyby nasze organizmy były na

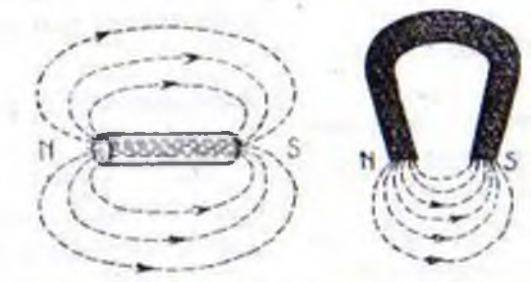
nie wrażliwe, odczuwalibyśmy jednocześnie wszystkie fale elektromagnetyczne wytwarzane zarówno w czasie burzy, jak i wysyłane przez nadajniki radiowe i telewizyjne.

Spacer po polach

Pyt. — Przyznaję, że to nie byłoby zbyt przyjemne. Ale w jaki sposób można określić rozkład pola magnetycznego?

Mądr. — Całkiem prosto. Wystarczy przesunąć w nim busolę i notować kierunek, w którym ustawia się strzałka. W ten sposób można wykreślić, to co nazywamy liniami sił pola. Widzisz, że dla każdego z naszych magnesów, linie te biegą od bieguna północnego do bieguna południowego.

Pyt. — Czy powiem głupstwo przeprowadzając analogię między magnesem a obwodem elektrycznym, w którym prąd elektronów na zewnątrz ogniwa płynie od bieguna ujemnego do bieguna dodatniego, a wewnątrz ogniwa od bieguna dodatniego do ujemnego? A więc zakładam, że wewnątrz magnesu linie sił biegą od bieguna południowego do bieguna północnego, co powoduje, że tworzą one krzywe zamknięte.



Rys. 12. Linie sił pola magnetycznego biegą od bieguna północnego do bieguna południowego

Mądr. — Moje gratulacje, Ignasiu. Zauważona przez Ciebie analogia między magnetyzmem a elektrycznością odpowiada w istocie tym zjawiskom. Ich pokrewieństwo jest jeszcze bliższe ponieważ w obu przypadkach siły przyciągania i odpychania podlegają tym samym prawom matematycznym: są wprost proporcjonalne do ilości elektryczności lub magnetyzmu i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości.

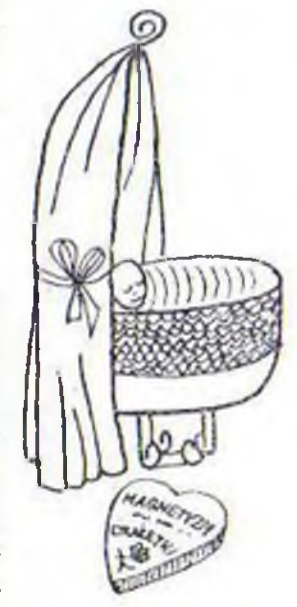
Pyt. — Tak, jak w przypadku sił grawitacyjnych. Przekonałem się, jak wielka jest jedność praw natury.

Narodziny magnetyzmu

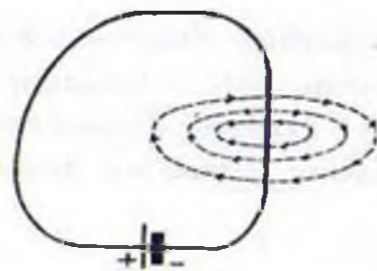
Mądr. — Zaraz Ci pokażę, że związek między elektrycznością a magnetyzmem jest jeszcze ściślejszy. Weźmy nasze ogniwo i dołączmy do jego biegunów przewód o dostatecznie dużej rezystancji, takiej aby nie spowodować zwarcia, niemniej jednak wywołać przepływ prądu o natężeniu wystarczającym do przeprowadzenia doświadczenia.

Widzisz, że zbliżam busolę do pionowej części przewodu. Co się teraz dzieje?

Pyt. — Zauważyłem, że strzałka busoli obróciła się i nie jest już skierowana na biegun północny. Widzę ponadto, że w miarę jak przesuwasz ją wokół przewodu — obraca się. Odnoszę wrażenie, że strzałka busoli ustawia się na obwodzie okręgu, przez środek którego przechodzi przewód.



Mądr. — Masz rację. Dowodzi to, że prąd płynący przez przewód wytwarza pole magnetyczne, którego linie sił tworzą okręgi. Przez środek tych okręgów przechodzi przewód.



Rys. 13. Przepływ prądu elektrycznego wywołuje powstanie pola magnetycznego wokół przewodnika

Pyt. — A jaki jest kierunek linii sił?

Mądr. — Wielki pionier elektryczności, francuski uczoney Andrzej Maria Ampère znalazł bardzo prostą metodę określania tego kierunku w zależności od kierunku przepływu prądu (oczywiście umownego: od plusa do minusa). Jeżeli weźmiemy korkociąg i zaczniemy go wkręcać w kierunku przepływu prądu, to jego obracająca się rączka, wskaże nam kierunek linii sił pola magnetycznego.

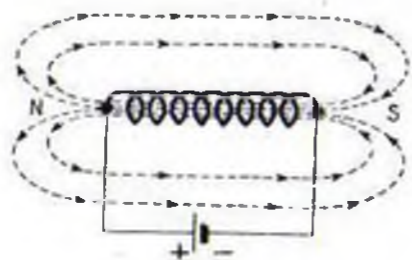
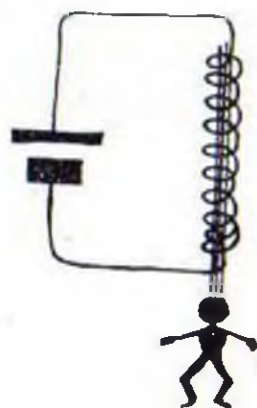
Solenoid. Elektromagnes

Pyt. — Przypuszczam, że natężenie tego pola zależy od natężenia prądu, który je wywołuje.

Mądr. — Nie mylisz się. Toteż aby zwiększyć natężenie pola magnetycznego, nie zwiększając przy tym natężenia prądu pobieranego z naszego ogniwa, połączę równolegle wiele części przewodu.

Pyt. — Naprawdę nie wiem jak to zrobisz.

Mądr. — Bardzo prosto, nawijając go tak, aby otrzymać spiralę cylindryczną. Otrzymane w ten sposób uzwojenie nosi nazwę solenoidu. Pola magnetyczne wytwa-

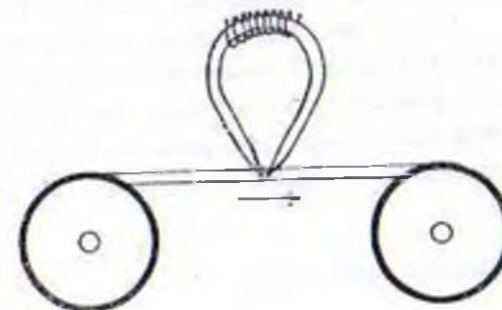


Rys. 14. Pole magnetyczne wytworzone przez prąd płynący przez solenoid

rzane przez każdy ze zwojów sumują się w taki sposób, że pole całości ma identyczny rozkład...

Pyt. — jak pole magnesu w kształcie pręta. Teraz rozumiem co to jest elektromagnes. Widziałem taki elektromagnes u swojego przyjaciela, który przy jego zastosowaniu zabawiał się poruszaniem małej żelaznej figurki. Mój przyjaciel nawinął na żelaznym trzpieniu uzwojenie i za każdym razem, gdy powodował przepływ prądu przez to uzwojenie, następowało przyciąganie figurki.

Mądr. — Tak, elektromagnesy mają liczne zastosowania. Stosuje się je w dzwonicach elektrycznych do poruszania małego młoteczka, który uderza w czaszę dzwonka. Magnetofon, który rejestruje naszą rozmowę, również zawiera elektromagnes. Przez uzwojenie tego elektromagnesu przechodzi prąd modulowany dźwiękami naszych



Rys. 15. Taśma w magnetofonie przesuwa się pod biegunami elektromagnesu, który jest zasilany prądem modulowanym rejestrowanymi dźwiękami

głosów. Powstające w ten sposób pole magnetyczne oddziałuje na taśmę pokrytą cienką warstwą sproszkowanego żelaza, która w rezultacie zostaje również namagnesowana. Szczegóły działania tego urządzenia wyjaśnię Ci później.

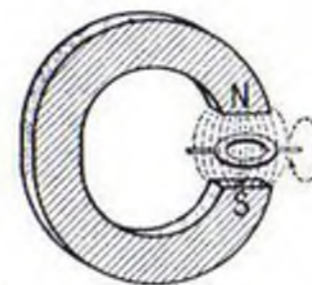
Narodziny prądu elektrycznego

Pyt. — Jest coś, co mi nie daje spokoju. Twój wuj powiedział, że większość zjawisk fizycznych jest odwracalna. Wyjaśniłeś mi już dokładnie, w jaki sposób prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne. Czy odwrotne zjawisko nie byłoby możliwe do zrealizowania?

Mądr. — Można by powiedzieć, że jesteś ze mną w kontakcie telepatycznym. Właśnie miałem Ci wyjaśnić, w jaki sposób magnesy, a ogólniej, pola magnetyczne biorą udział w wytwarzaniu prądów elektrycznych.

Pyt. — Przypuszczam, że w przewodniku znajdującym się w polu magnetycznym magnesu powstaje prąd.

Mądr. — Nie, ponieważ samo pole magnetyczne nie jest źródłem energii i dlatego nie może spowodować powstania energii. Ale gdy przewód porusza się i prze-



Rys. 16. W zwoju przewodnika obracającym się w polu magnetycznym powstaje prąd elektryczny

cina linie sił pola magnetycznego, wówczas energia mechaniczna potrzebna do poruszania przewodnika przekształca się w energię prądu elektrycznego, o ile oczywiście przewód tworzy obwód zamknięty.



Jest to zjawisko *indukcji* magnetycznej. Natężenie powstającego w tych warunkach prądu zależy od natężenia pola magnetycznego i prędkości poruszania się przewodnika.

Pyt. — A więc i tu obserwujemy zjawisko odwracalne. Przypuszczam, że indukcyjne czyli wzbudzające pole magnetyczne może pochodzić równie dobrze od magnesu trwałego jak i od elektromagnesu. Ale czy zjawisko indukcji jest praktycznie wykorzystywane do wytwarzania energii elektrycznej?

Mądr. — Jeszcze jak! Wszystkie generatory obrotowe energii elektrycznej opierają się na zjawisku indukcji. Najprostsze jest umieszczenie uzwojenia między dwoma biegunami magnesu, które obracając się będzie przecinać linie sił pola magnetycznego. Obracanie takiego uzwojenia czyli cewki może być dokonywane za pomocą maszyny parowej, silnika spalinowego lub turbiny wodnej.

Prąd zmienny lub stały

Pyt. — Nic dobrego z tego nie wyjdzie, ponieważ w czasie jednej połowy obrotu zwoje będą przecinać pole magnetyczne w jednym kierunku, a w czasie drugiej połowy obrotu — w przeciwnym kierunku.

Mądr. — No i w ten sposób prąd indukowany w cewce będzie prądem *zmiennym*. W czasie połowy obrotu będzie płynął w jednym kierunku, a w czasie drugiej połowy — w kierunku przeciwnym.

Czas trwania każdego obrotu decyduje o okresie prądu. Każdy okres składa się z dwóch półokresów: dodatniego i ujemnego. Liczba okresów na sekundę nazywa się *częstotliwością* prądu zmiennego.

Pyt. — Domyślam się, że prąd sieci o częstotliwości 50 okresów na sekundę jest wytwarzany przez taką właśnie maszynę.

Mądr. — Tak, Ignasiu. A nazywa się ją *alternatorem* lub *prądnicą* napięcia zmiennego. Bez wielkich komplikacji, za pomocą podobnej maszyny można wytworzyć prąd stały. Wystarczy w tym celu odbierać napięcie wyjściowe, to z jednego to z drugiego zacisku prądnicy. W ten sposób przy przejściu z jednego półokresu do drugiego prąd w sieci zewnętrznej zasilanej przez prądnicę płynie stale w jednym kierunku.

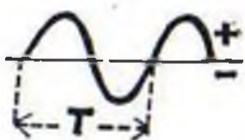
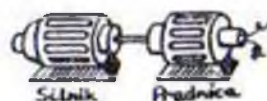
Prądnica zamieniona na silnik

Pyt. — Myślę znowu o zasadzie odwracalności zjawisk fizycznych. Jeżeli zamiast obracać cewkę doprowadzimy do niej prąd zmienny, czy stanie się ona wówczas magnesem, którego bieguny będą się zmieniać z każdą półówką. A wówczas, taka cewka znajdując się w stałym polu magnetycznym zacznie się z pewnością obracać. W ten sposób prądnica zamieni się w silnik elektryczny.

Czy nie palnąłem głupstwa?

Mądr. — Wcale nie. Jest mi bardzo miło stwierdzić, że doskonale zrozumiałeś to, o czym mówiłem i że wyciągnąłeś z tego właściwe wnioski.

Nie chcę jednak nadużywać dłużej Twoich możliwości intelektualnych. W czasie naszego następnego spotkania będziemy mogli poruszyć podstawy radiotechniki, ponieważ podstawowe wiadomości z elektryczności mamy już za sobą.



Profesor Radiol mówi:

O INDUKCJI I REAKTANCJI INDUKCYJNEJ

We wszystkich dziedzinach elektroniki cewki odgrywają bardzo ważną rolę i znajdują najróżniejsze zastosowania. Oto dlaczego profesor Radiol opisuje ich cechy charakterystyczne i wyjaśnia działanie transformatorów i galwanometrów.

Nie, mój zacny Mądralski, nie zgadzam się z tym, co powiedziałeś na zakończenie Waszej ostatniej pogawędki. Oceniełeś, że dokonałeś przeglądu wszystkich podstawowych zjawisk w nauce o elektryczności. A czy nie pominąłeś wyjaśnienia zjawiska indukcji i jego różnych zastosowań? Zaraz to zrobię w Twoim zastępstwie.

Wydoby na temat indukcji

Szybko pojąłeś Ignasiu, działanie prądnicy. Kiedy cewka obraca się w polu magnetycznym i przecina linie sił tego pola, to pojawia się prąd zmienny.

Jednakże nie jest niezbędne w tym celu wprawianie cewki w ruch. Nawet jeżeli jest ona nieruchoma, można w niej wywołać powstanie prądu zmiennego zmieniając pole magnetyczne, które ją przecina.

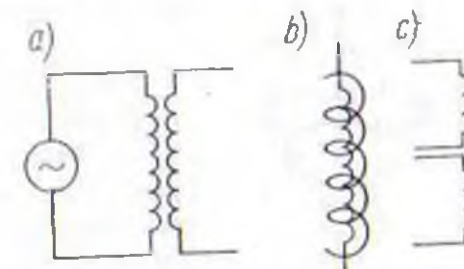
Ale jak zrobić to, żeby zmieniło się ono całkowicie, to znaczy zmieniło nawet kierunek linii sił?

Wydaje mi się, że słyszę Twój głos Ignasiu, jak dajesz mi prawidłową odpowiedź. Tak, właśnie tak, aby pole magnetyczne odwracało się bez przerwy jest na to bardzo prosty sposób: wytworzyć je za pomocą cewki, przez którą płynie prąd zmienny. Wówczas, dla każdej półówki prądu, kierunek linii pola magnetycznego ulega odwróceniu. I w ten sposób prąd zmienny powstaje w drugiej cewce umieszczonej w tym polu.

Zjawisko to nosi nazwę *indukcji*.

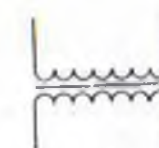
Ażby prąd indukował się łatwo, należy tę cewkę umieścić w osi cewki wzbudzającej. Można nawet jedną cewkę nawinąć na drugiej.

Zespół takich dwóch cewek (uzwojeń) nosi nazwę *transformatora*.



Rys. 17. Uzwojenie zasilane prądem zmiennym (a) indukuje prąd w drugim uzwojeniu umieszczonym w jego polu magnetycznym. Uzwojenie wzbudzone może być nawinięte na uzwojeniu wzbudzającym (b) lub umieszczone obok w tej samej osi (c)

Uzwojenie wzbudzające nazywa się uzwojeniem *pierwotnym* transformatora, a uzwojenie, w którym powstaje prąd indukowany — uzwojeniem *wtórnym*.



Rys. 18. Symbol graficzny transformatora wyposażonego w rdzeń magnetyczny

Jeżeli idzie o transformatory pracujące przy względnie małej częstotliwości, to wykonuje się je na rdzeniu z żelaza miękkiego. Rdzeń zwiększa natężenie pola magnetycznego, ponieważ linie sił przechodzą dużo łatwiej przez żelazo niż przez powietrze.

Przekładnia

Napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym zależy od napięcia na zaciskach uzwojenia pierwotnego wywołanego przepływem prądu: jest do niego

wprost proporcjonalne. Ponadto zależy od stosunku zwojów obu uzwojeń.

Jeżeli uzwojenia pierwotne i wtórne mają jednakową liczbę zwojów, na zaciskach uzwojenia wtórnego występuje takie samo napięcie jak na zaciskach uzwojenia pierwotnego. W przypadku ogólnym, napięcie U_2 na uzwojeniu wtórnym jest równe iloczynowi napięcia U_1 na uzwojeniu pierwotnym i stosunku liczby zwojów uzwojenia wtórnego z_2 do liczby zwojów uzwojenia pierwotnego z_1 ,

$$U_2 = U_1 \frac{z_2}{z_1}$$

Możemy powiedzieć prościej, że napięcia obu uzwojeń są wprost proporcjonalne do liczby ich zwojów

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{z_2}{z_1}$$

Działanie na samego siebie

Myślę, że następujące pytanie zrodziło się w Twoim umyśle: od czego zależy napięcie na uzwojeniu pierwotnym?

Idzie tu o spadek napięcia wywołany nie oporem czynnym, czyli rezystancją uzwojenia, która w ogólnym przypadku jest mała, a jego oporem biernym indukcyjnym lub jak zwykle mówimy *reaktancją indukcyjną*.

Reaktancja ta jest wynikiem zjawiska samoindukcji, występującego w każdej cewce, przez którą płynie prąd zmienny. Jak je wytłumaczyć?

Wyjaśniłem Ci przed chwilą, w jaki sposób prąd płynący przez uzwojenie pierwotne indukuje prąd zmienny w uzwojeniu wtórnym, dzięki wytworzeniu zmiennego pola magnetycznego. Istnieje jednak jeszcze drugie uzwojenie, które całkowicie znajduje się w tym polu magnetycznym: jest to — samo uzwojenie pierwotne!

W takim razie nie bądź zaskoczony, dowiadując się, że uzwojenie pierwotne powoduje zaindukowanie prądu nie tylko w swoim sąsiedzie, uzwojeniu wtórnym, ale również w sobie samym.

Nie ma w tym nic dziwnego. Kiedy mówimy lub krzyczymy do kogoś, to ten ktoś nas słyszy, ale my również siebie słyszymy.

Właśnie zjawisko samoindukcji zwiększa opór uzwojenia. Wynika to z faktu, że indukowany prąd zmienny nie pokrywa się z prądem indukującym:

jest przesunięty w fazie. To właśnie jest przyczyną wywołującą pojawienie się dodatkowego oporu, który nazywamy oporem biernym indukcyjnym lub reaktancją indukcyjną.

Wartość reaktacji indukcyjnej jest wprost proporcjonalna do częstotliwości prądu i *indukcyjności własnej* uzwojenia. Ta ostatnia zależy wyłącznie od konstrukcji cewki: liczby i średnicy zwojów oraz ich rozkładu. Im większa jest liczba zwojów, im te zwoje są większe i bardziej ściśnione, tym bardziej pole magnetyczne wywołane przepływem prądu, oddziałuje na samo uzwojenie i, w konsekwencji, tym większa jest indukcyjność własna.

Indukcyjność własna jest proporcjonalną do kwadratu liczby zwojów. Zwiększysz ją dwukrotnie, indukcyjność własna wzrośnie czterokrotnie.

Jednostką indukcyjności jest *henr*, a jej oznaczeniem literowym — *H*.

W rezultacie reaktancja indukcyjna X_L (wyrażana w omach, ponieważ jest oporem) jest proporcjonalna do iloczynu częstotliwości f i indukcyjności L , zgodnie ze wzorem

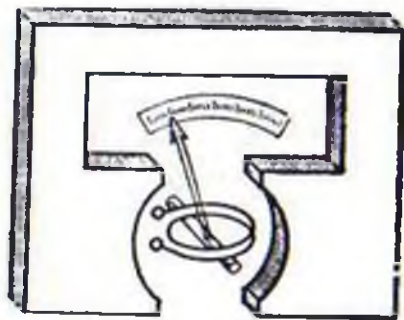
$$X_L = 2\pi fL$$

w którym $\pi = 3,14$ jest jak wiesz, stosunkiem obwodu okręgu do jego średnicy.

Budowa galwanometru

Ponieważ zajmujemy się różnymi aspektami elektryczności ściśle związanej z magnetyzmem, powrócę do zastosowania zespołu składającego się z magnesu i cewki umieszczonej na obrotowej osi między jego biegunami.

Widzieliśmy, że obracanie cewki powoduje indukowanie prądu zmiennego; w ten sposób pracuje prądnicą. Przeciwnie, jeżeli spowodujemy przepływ prądu zmiennego przez cewkę, to ta cewka



Rys. 19. Cewka galwanometru zasilana mierzonym prądem jest umieszczona w polu magnetycznym magnesu i może się obracać wokół osi poziomej

jest to zasada działania silnika elektrycz-

ego. Jest to zasada działania silnika elektrycznego. Zauważmy, teraz że rozpatrywana cewka jest zamocowana na elastycznym druciku przymocowanym do korpusu w dwóch punktach — z przodu i z tyłu. W takich warunkach cewka nie może wykonać wielu obrotów, ponieważ wywoływałoby to niebezpieczne skręcenie drucików podtrzymujących ją. A zatem rozpatrywany przez nas zespół nie jest silnikiem.

Zalóżmy jednak, że powodujemy przepływ prądu stałego, przez cewkę. Namagnesowana w ten sposób cewka wykazuje tendencję do obracania się. W zależności od elastyczności podtrzymujących ją drucików — i co jest bardzo ważne — od natężenia prądu, kąt obrotu cewki będzie mniejszy lub większy.

Na pewno zgadniesz, że jest to doskonały przyrząd do pomiaru natężenia prądu. Należy go tylko wyposażyć we wskazówkę zamocowaną do korpusu cewki oraz w tarczę z podziałką umieszczoną za wskazówką. Tak wyposażony przyrząd nosi nazwę *galwanometru*.

Gdy podziałka galwanometru jest wyskalowana w amperach wówczas jest to *amperomierz*. Do pomiaru małych prądów stosuje się *miliamperomierz*.

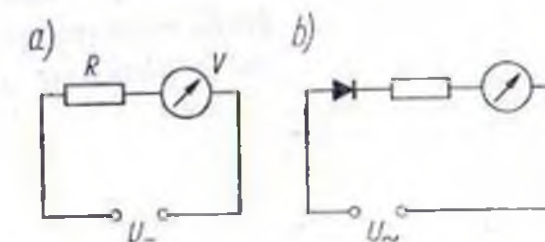
Przyrządy pomiarowe

W taki sam sposób można zrealizować przyrząd do pomiaru napięcia. Zawiera on oprócz cewki, szeregowo połączony z nią rezystor R . Po dołączeniu przyrządu do dwóch punktów, między którymi występuje mierzone napięcie, przez nasz galwanometr płynie prąd, którego natężenie zgodnie z prawem Ohma jest równe ilorazowi napięcia i sumy rezystancji cewki i rezystora R . Podziałka przyrządu jest wówczas bezpośrednio wyskalowana w voltach, milivoltach lub mikrowoltach, w zależności od tego, czy mamy *woltomierz*, *miliwoltomierz* lub nawet *mikrowoltomierz*.

Galwanometr umożliwia również pomiar napięć i prądów zmiennych. Musi być wówczas wyposażony w prostownik dokonujący przemiany prądu zmiennego na prąd stały. Innym razem wytłumaczę Ci, jaka jest zasada działania takiego prostownika.

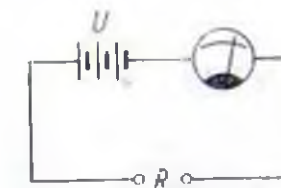
Nie mogę sobie jeszcze pozwolić na zakończe-

nie wykładu. Wytłumaczyłem Ci już, jak mierzy się napięcia i natężenia prądu. Ale na pewno Ignasiu, musisz sobie zadawać pytanie, w jaki sposób można



Rys. 20. Układ woltomierza do pomiaru napięcia stałego (a) i układ woltomierza, który dzięki zastosowaniu prostownika, może mierzyć napięcie zmienne (b)

zmierzyć trzecią wielkość występującą w prawie Ohma — rezystancję. Nic prostszego. Aby to było możliwe, galwanometr musi być wyposażony w baterię o stałym i znanym napięciu, połączoną szere-



Rys. 21. Budowa omomierza — przyrządu do pomiaru rezystancji R

gowo z cewką. Dołączając taki zespół do rezystora o nieznanej rezystancji, wywołuje się przepływ prądu przez cewkę. Natężenie prądu cewki jest odwrotnie proporcjonalne do mierzonej rezystancji. Skalę tak utworzonego omomierza można opisać bezpośrednio w omach.

Nawet bez dokonywania pomiaru, Drogi Ignasiu, jestem pewien że rezystancja Twojego mózgu maleje. Dlatego kończę swój wykład. Chciałbym tylko dodać, że w praktyce omawiane przyrządy pomiarowe mogą być bardziej skomplikowane. Galwanometr może być połączony z rezystorami o różnych wartościach, włączonymi nie tylko szeregowo, ale i równoległe (aby do ruchomej cewki doprowadzić tylko część mierzonego prądu); może współpracować z prostownikiem i baterią. Możliwy jest wówczas pomiar napięć, prądów i rezystancji o najrozmaitszych wartościach, od bardzo małych do największych.

POGAWĘDKA CZWARTA

Nasi dwaj przyjaciele analizują teraz ciekawe zachowanie się kondensatorów dołączanych do źródeł napięcia stałego lub zmiennego. Następnie rozpatrują budowę kondensatorów stałych, nastawnych i zmiennych. Na zakończenie ustalają wzór na reaktancję pojemnościową w zależności od pojemności i częstotliwości.

POJEMNOŚĆ I REAKTANCJA POJEMNOŚCIOWA

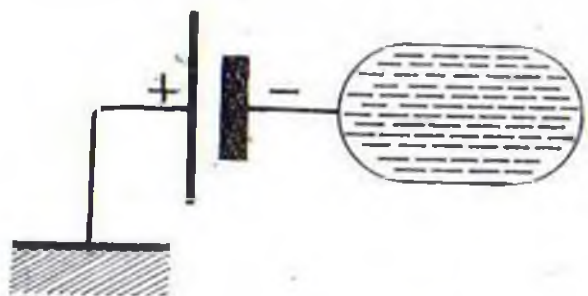
Ładunek przewodnika

Mądr. — Ostatnim razem mówiliśmy o magnetyzmie. Mój wuj Radiol powiedział Ci również o jego cechach charakterystycznych i zastosowaniach. Wróćmy teraz do analizy pól elektrycznych.

Pyt. — Myślę, że to będzie łatwiejsze dzięki analogii, która istnieje między elektrycznością a magnetyzmem. W obu tych dziedzinach fizyki mamy do czynienia z tym samym prawem przyciągania ładunków różnoimiennych i odpychania ładunków jednoimiennych. Również wytworzone w ten sposób siły są w obu przypadkach odwrotnie proporcjonalne do odległości.

Mądr. — Twoja wspaniała pamięć ułatwi mi wywód, jaki chcę przeprowadzić na temat *pojemności*. Tak nazywa się zdolność przewodnika do zachowywania ładunków elektrycznych dodatnich lub ujemnych.

Łatwo pojmujesz, że ten ładunek zależy głównie od kształtu i wymiarów przewodnika. Wartość pojemności jest określona stosunkiem ładunku do potencjału, który go wywołał. Oczywiście im wyższy jest potencjał tym bardziej naładuje dany przewodnik.

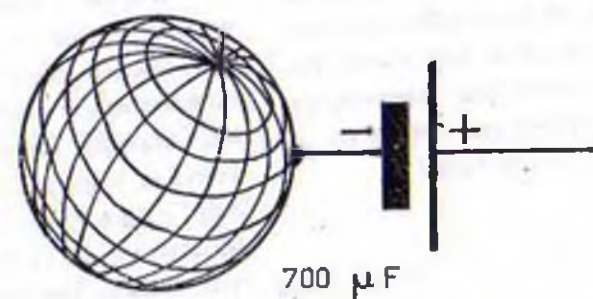


Rys. 22. Pojemność przewodnika umożliwia mu zachowanie ładunków ujemnych

Pyt. — A jak nazywa się jednostka pojemności?

Mądr. — Jednostką pojemności jest *farad*. Jest to pojemność przewodnika, który pod wpływem potencjału wynoszącego 1 V magazynuje w ciągu 1 sekundy energię elektryczną równą 1 W. Jest to bardzo duża wartość pojemności. Dlatego używa

się zwykle jednostki podwielokrotne, a zwłaszcza milionowe części farada tzn. mikrofarady. Symbolem jednostki jest litera F; w konsekwencji mamy zwykle do czytania z μF oraz z pikofaradami (pF), które są milionowymi częściami mikrofarada.



Rys. 21. Pojemność przewodnika kulistego o wymiarach globu ziemskiego wynosi tylko 700 μF

Pyt. — Jaka będzie w związku z tym pojemność przewodnika kulistego o wymiarach jabłka?

Mądr. — Znikoma. Jeżeli sobie wyobrazisz przewodnik kulisty o wymiarach globu ziemskiego, to pojemność takiego przewodnika, będzie tylko rzędu 700 μF .

Narodziny kondensatora

Pyt. — Dochodzę do wniosku, że pojemność jest czymś tak małym, że nie powinna odgrywać ważnej roli w elektronice.

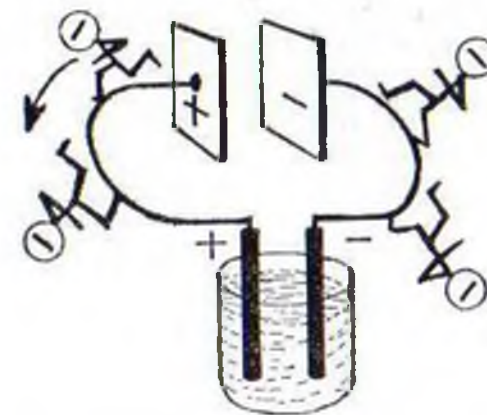
Mądr. — Mylisz się przyjacielu, ponieważ istnieje prosty sposób na zwiększenie pojemności lub mówiąc dokładniej — jej skondensowanie.

Pyt. — Nie wiem jak to zrobić bez powiększania wymiarów przewodnika.

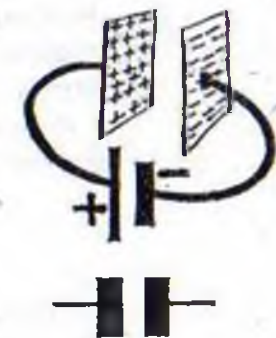
Mądr. — Bardzo prosto, zbliżając do niego — jednak tak, aby go nie dotknąć — inny przewodnik z ładunkiem elektrycznym o przeciwnym znaku. Co się wówczas dzieje? Ładunki o przeciwnych znakach ulegają przyciąganiu i w ten sposób wartość ładunku zostaje powiększona.

Pyt. — To wcale niegłupie! Jak się jednak postępuje w praktyce, aby wykorzystać to zjawisko?

Mądr. — Ustawia się blisko siebie dwa przewodniki. Tworzą one to co nazywamy *kondensatorem*. Każdy z przewodników tworzących kondensator nazywamy



Rys. 24. Dołączając kondensator do baterii powoduje się naładowanie elektronami jego okładziny ujemnej i rozładowanie dodatniej





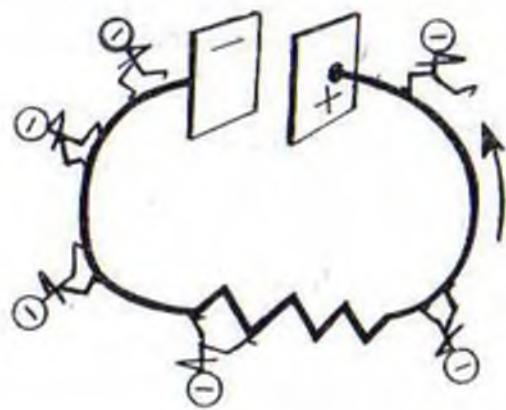
okładziną kondensatora. Wyobraźmy sobie na przykład dwie kwadratowe blaszki miedziane ustawione równolegle naprzeciw siebie. Połączmy teraz każdą z tych okładzin do jednego z biegunów baterii lub innego źródła napięcia. Co się teraz stanie?

Pyt. — Myślę, że elektrony znajdujące się na ujemnym biegunie baterii pospieszą do okładziny, która jest z nim połączona i w ten sposób naładują ją ujemnie. Ujemny ładunek spowoduje odpychanie elektronów znajdujących się na drugiej okładzinie. Opuszczą one chętnie swoje miejsce tym bardziej, że dodatni biegun baterii je przyciąga. To bardzo ciekawe zjawisko! Płynie prawdziwy prąd, jakby bieguny baterii były połączone przewodnikiem, podczas gdy w rzeczywistości izoluje je kondensator.

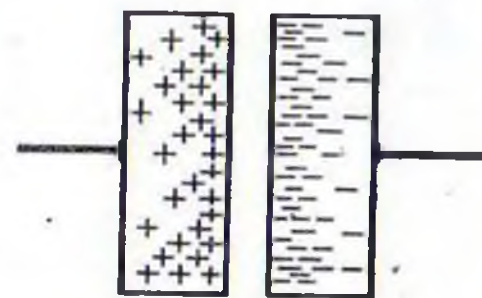
Ładowanie i rozładowanie

Mądr. — Prąd ładowania, którego przepływ tak ładnie uzasadniłeś zanika, gdy kondensator zostaje dobrze naładowany. Prąd ten jest duży na początku. Jednakże, im ładunek staje się większy, tym bardziej utrudniony staje się ruch elektronów, ponieważ elektrony, które już znajdują się na okładzinie ujemnej odpychają te, które chcą się tam jeszcze dostać. A te elektrony, które opuszczają okładzinę dodatnią, są coraz mniej liczne.

Pyt. — A co się stanie, jeżeli po ostatecznym naładowaniu kondensatora odłączymy baterię?



Rys. 25. Kondensator rozładowuje się przez rezystor



Rys. 26. Rozkład ładunków na okładzinach kondensatora

Mądr. — Ładunek zostanie na okładzinach. Ale, jeżeli chcesz, możesz kondensator rozładować, dołączając jego okładziny do rezystora, lub odcinka przewodu. Elektrony znajdujące się w nadmiarze na jednej z okładzin będą przepływać do drugiej okładziny, aż do momentu ustalenia się równowagi.

Pyt. — Zastanawiam się, czy nie można by kondensatora porównać do dwóch zbiorników przedzielonych membraną z elastycznej gumy. Jeżeli pompa zwiększa ciśnienie powietrza w jednym zbiorniku, a zmniejsza w drugim, to odpowiada to ładowaniu kondensatora. Pompa przestaje pracować, kiedy różnica ciśnień osiąga pewną graniczną wartość uzależnioną od wymiarów zbiorników i elastyczności membrany. Nasz kondensator jest więc naładowany. Czy takie porównanie jest właściwe?

Mądr. — W ogólnych zarysach — tak. Jednak jest jeden szczegół, w którym sprawy mają się inaczej. W każdym z Twoich zbiorników ciśnienie jest jednakowe

w wszystkich punktach. Natomiast ładunki na okładzinach kondensatora nie są równomiernie rozmieszczone. W częściach okładzin najbliższej sobie położonych gęstość elektronów jest największa, a z drugiej strony okładzin — najmniejsza. Wynika to stąd, że w elektryczności liczy się nie tylko „ciśnienie” źródła napięcia, ale również przyciąganie ładunków o przeciwnych polaryzacjach. Tymczasem w Twoich zbiornikach jedyną rolę, która odgrywa rolę, jest nacisk wywołany przez pompę.

Wartość pojemności

Pyt. — A co decyduje o pojemności kondensatora? Nie jest to już przecież przykład wydzielonego przewodnika, którego pojemność jest bardzo mała. Tutaj, bez względu na napięcie przyciąganie między okładzinami zapewnia znaczne zwiększenie ładunków, które mogą się na nich zmieścić.

Mądr. — To prawda. W takim razie łatwo zrozumiesz, że pojemność jest tym większa, im większe są powierzchnie okładzin umieszczonych naprzeciw siebie. Ponadto uwzględniając wpływ przyciągania zgadniesz również, że pojemność kondensatora jest tym większa, im bliżej siebie są umieszczone okładziny.

Pyt. — A więc jest ona wprost proporcjonalna do powierzchni umieszczonych naprzeciw siebie okładzin i odwrotnie proporcjonalna do odległości między nimi. Jeszcze raz mamy do czynienia z zależnością czysto geometryczną.

Mądr. — Wcale nie, Ignasiu, ponieważ jest jeszcze trzeci czynnik, który wchodzi w rachubę. Jego udział pojmiesz łatwo dzięki, Twojemu zresztą, przykładowi ze zbiornikami. W przypadku zbiorników poza objętością zbiornika i grubości membrany ważna jest również elastyczność materiału, z którego ta membrana jest wykonana.

W przypadku kondensatorów czynnikiem wpływającym na pojemność jest rodzaj dielektryka oddzielającego okładziny. Ten termin oznacza wszystkie materiały izolacyjne. Jeżeli dielektryk jest powietrzem, wówczas jego stała dielektryczna (lub inaczej przenikalność elektryczna), to znaczy współczynnik wchodzący do wzoru na pojemność jest równy 1. Jeżeli jednak zamiast powietrza, przestrzeń między okładzinami wypełnia mika, pojemność zwiększa się ośmiokrotnie, ponieważ stała elektryczna miki wynosi 8.

Pyt. — A jaki jest wpływ grubości okładzin? W jaki sposób wpływa ona na pojemność?

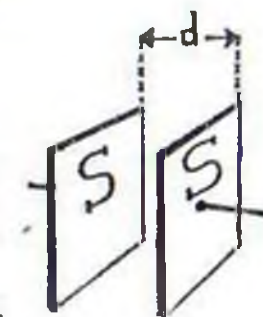
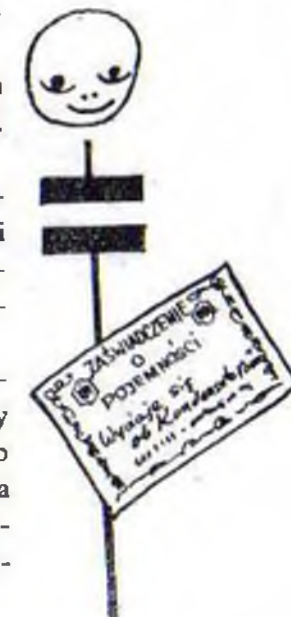
Mądr. — Grubość okładzin nie ma żadnego wpływu, ponieważ ładunki gromadzą się w tych obszarach okładzin, które są najbliższe sobie położone. Oto, zresztą ostateczny, wzór umożliwiający obliczenie pojemności C w pikofaradach (a więc milionowych milionowych części farada), w zależności od powierzchni S okładzin wyrażonej w centymetrach kwadratowych, odległości d między okładzinami wyrażonego w centymetrach i stałej elektrycznej ϵ

$$C = 0,0885 \epsilon \frac{S}{d}$$

Pyt. — Stwierdzam na podstawie tego wzoru, że pojemność kondensatora można łatwo zwiększyć o tyle, o ile się chce. W tym celu wystarczy coraz bardziej zbliżać do siebie okładziny. Im wartość d jest mniejsza, tym pojemność C jest większa. Dla wartości d nieskończenie małej, pojemność staje się nieskończenie duża.

Mądr. — Tak, ale z nieskończenie wielką pewnością siebie mogę powiedzieć, że to jest niemożliwe.

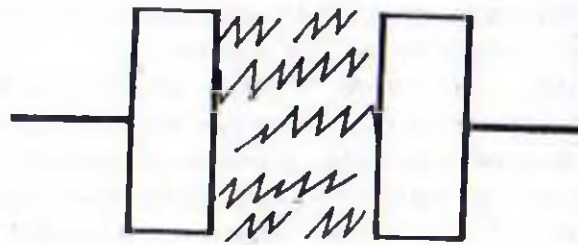
Pyt. — Dlaczego? Czyżby matematyka nie odpowiadała prawdzie?



Mądr. — Nie. Ale dielektryk może ulec przebiciu. W Twoim przykładzie ze zbiornikami, jeżeli będziesz zmniejszać grubość membrany, to nastąpi moment, w którym pod wpływem ciśnienia powietrza wywołanego przez pompę, membrana pęknie.

A więc w przypadku kondensatora sytuacja przedstawia się podobnie. Zbytnie przybliżenie okładzin powoduje przeskakiwanie między nimi iskier. Przyciąganie ładunków dodatnich i ujemnych umożliwi elektronom w tej właśnie postaci pokonanie warstwy powietrza lub innego dielektryka oddzielającego okładziny.

Pyt. — Reasumując, odległość między okładzinami kondensatora poniżej pewnej wartości nie może być zmniejszana. Przypuszczam, że ta graniczna wartość od-



Rys. 27. Jeżeli napięcie jest zbyt duże lub okładziny są bardzo blisko siebie, przeskakują iskry, które rozładowują kondensator

ległości zależy zarówno od rodzaju dielektryka, jak i napięcia występującego między okładzinami. Im ono jest wyższe, tym łatwiej zabłysną iskry. A z pewnością istnieją dielektryki, które temu zjawisku mniej lub więcej przeciwdziałają.

Kondensatory stałe, nastawne i zmienne

Mądr. — Masz całkowicie rację, drogi przyjacielu. Dodam tylko, że istnieją *kondensatory nastawne*, których pojemność zmienia się przez zbliżanie okładzin — oczywiście do pewnej granicy. W tym celu jedna z okładzin kondensatora jest elastyczna i zbliża się do drugiej pod wpływem nacisku wywołanego śrubą regulacyjną. Dielektryk stały umieszczony między okładzinami umożliwia ograniczenie przesuwu.

Pyt. — A więc w ten sposób realizuje się przeciwieństwo *kondensatora stałego*. Tak nazywa się z pewnością kondensator, którego pojemność nie może być zmieniana?

Mądr. — Nie, Ignasiu. Przeciwieństwem kondensatora stałego jest *kondensator zmienny*. W tym kondensatorze nie zmienia się odległości między okładzinami, a powierzchnię lub co najmniej część powierzchni okładzin znajdujących się naprzeciw siebie.

Pyt. — Sądzę, że w tym celu odsuwa się na bok jedną z okładzin.

Mądr. — Tak. Na ogół kondensator zmienny składa się z zespołu okładzin stałych, ułożonych równolegle jedna za drugą i połączonych ze sobą, oraz zespołu okładzin ruchomych, umieszczonych między okładzinami stałymi i oczywiście również ze sobą połączonych.

Obecnie stosowane kondensatory zmienne mają okładziny o kształcie zbliżonym do półokręgu. Okładziny ruchome są zamocowane na osi, która je łączy i która umożliwia ich obracanie. Przy obracaniu osi kondensatora, okładziny ruchome wchodzi lub wychodzą z zespołu okładzin stałych. Gałka zamocowana na osi kondensatora



Rys. 28. Gałka kondensatora zmiennego wyskalowana w wartościach pojemności, częstotliwości lub długości fali

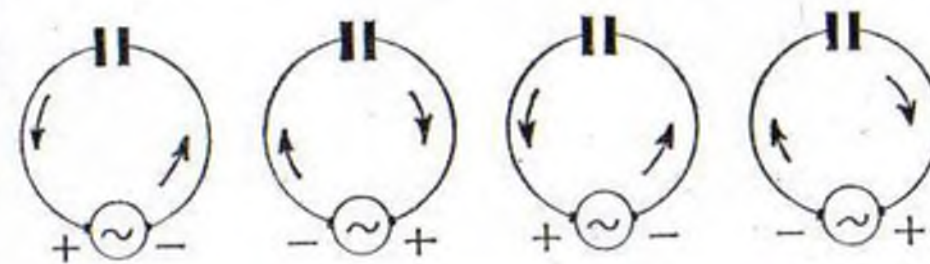
dołączona do jej obracania może być ewentualnie wyskalowana w wartościach pojemności lub w wartościach wielkości od niej zależnych: częstotliwości lub długości fali. Wyjaśnię Ci to później.

Przepływ prądu zmiennego

Pyt. — W tym wszystkim co dotyczy kondensatora jest jedna rzecz, która nie daje mi spokoju: brak ruchu. W naładowanym, czy rozładowanym kondensatorze ładunki elektryczne są nieruchome. Ja, który lubię ruch...

Mądr. — Będziesz zaraz zadowolony. Zamiast dołączyć kondensator do źródła napięcia stałego, dołącz go do źródła napięcia zmiennego. Co się wtedy stanie?

Pyt. — Pozwól mi pomyśleć. Zaczniemy od półokresu, w którym jedna okładzina jest naładowana dodatnio, a druga — ujemnie. Przy przejściu do następnego półokresu kondensator rozładowuje się, a następnie znowu naładuje się, ale przeciwnie.



Rys. 29. Ruch elektronów w obwodzie łączącym kondensator ze źródłem napięcia zmiennego (cztery kolejne półokresy)

Ten cykl powtórzy się, przy czym w każdym półokresie wystąpi ładowanie, a potem rozładowanie.

Mądr. — Będzie więc istniał ruch elektronów w przewodach łączących źródło napięcia zmiennego z okładzinami kondensatora. Ponadto kierunek ruchu będzie ulegał zmianie w każdym półokresie. Możemy zatem powiedzieć, że mamy do czynienia.....

Pyt. — z prawdziwym prądem zmiennym. To niezwykle! Prąd płynie w obwodzie, który mimo wszystko ma przerwę, ponieważ nie istnieje połączenie między okładzinami kondensatora.

Mądr. — Tak, drogi Ignasiu. Mówimy nawet, że kondensator „pozwała płynąć prądowi zmiennemu”. Z pewnością elektrony nie przechodzą przez kondensator, ale jego pojemność umożliwia ruch wahadłowy elektronów w obwodzie.

Pyt. — Łatwiej to sobie przyswoję, gdy powrócę do porównania z dwoma zbior-



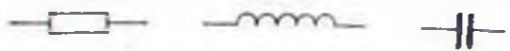
nikami powietrza przedzielonymi elastyczną membraną. Jeżeli połączę je teraz za pomocą dwóch rurek nie jak poprzednio do pompy, a do cylindra, w którym tłok wykonuje miarowe ruchy tam i z powrotem, to powietrze zostanie wprowadzone w ruch zmienny zwiększający ciśnienie raz w lewym, raz w prawym zbiorniku.

Pojemność i reaktancja pojemnościowa

Mądr. — Wspaniałe porównanie. Umożliwi nam ono zrobienie dalszego kroku w studiach nad kondensatorem. Według Ciebie od czego zależy natężenie wytworzonego w ten sposób zmiennego prądu powietrza?

Pyt. — W każdym półokresie ilość powietrza przepływającego przez rurki zależy od pojemności, tzn. objętości zbiorników i ciśnienia wytwarzanego przez tłok. Ponadto, im większa jest częstotliwość wahadłowego ruchu tłoka, tym większa jest ilość powietrza przepływającego w jednostce czasu przez przekrój rurek.

Mądr. — Takie same zjawiska występują w kondensatorze. Im większa jest pojemność kondensatora, tym większa jest liczba elektronów ładująca i rozładowująca ten kondensator w każdym półokresie. Ponadto, im większa jest liczba półokresów w każdej sekundzie lub inaczej mówiąc, im wyższa jest częstotliwość, tym większa jest liczba elektronów przepływających przez obwód w ciągu jednej sekundy.



Rys. 30. Trzy rodzaje przeszkód w przepływie prądu: rezystor, cewka, kondensator

Widzisz więc, że natężenie prądu jest wprost proporcjonalne do pojemności kondensatora i częstotliwości źródła.

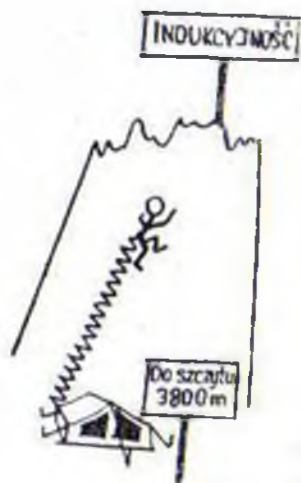
Pyt. — Stwierdzam również, że kondensator stanowi przeszkodę w przepływie prądu podobnie jak rezystor i cewka. Ciekawe, że wartość rezystancji nie zależy od częstotliwości. Reaktancja indukcyjna cewki wzrasta wprost proporcjonalnie do częstotliwości, natomiast opór, jaki stawia pojemność przepływowi prądu, zmniejsza się ze wzrostem częstotliwości.

I jeszcze jedna rzecz różni kondensator od cewki: im większa indukcyjność, tym trudniej płynie prąd, a w przypadku kondensatora, im większa pojemność, tym łatwiejszy przepływ prądu.

Mądr. — Miałeś świetny pomysł porównując reaktancję indukcyjną z reaktancją pojemnościową. Termin ten oznacza opór, jaki stawia kondensator przepływowi prądu. Reaktancja pojemnościowa jest więc odwrotnie proporcjonalna do pojemności C i częstotliwości f . Wyraża to prosty wzór

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Pyt. — Wszystko się zgadza. Jeżeli rozpatrzmy przypadek prądu stałego, a więc o częstotliwości f równej zero, to reaktancja pojemnościowa będzie nieskończona wielka. I tak jest w rzeczywistości, ponieważ prąd stały nie przepływa przez kondensator.



Profesor Radiol analizuje:

POŁĄCZENIA ELEMENTÓW

Każdy obwód elektryczny charakteryzuje się pewną rezystancją, pewną indukcyjnością i pewną pojemnością. Elementy realizujące wymienione wielkości fizyczne mogą być ze sobą połączone w różny sposób. Niżej analizowane są właściwości obwodów składających się z rezystorów, cewek i kondensatorów. Na zakończenie omówiono zjawisko rezonansu, które odgrywa podstawową rolę w radioelektronice.

Tak jest, moi drodzy, dokonaliście przeglądu elementów biernych. Tym terminem określa się rezystory, cewki i kondensatory, aby odróżnić je od elementów czynnych — lamp elektronowych i tranzystorów, o których zresztą wkrótce będziecie rozmawiać.

Współistnienie R , L i C

Wszystko to, drogi Mądralski, co wyjaśniłeś swojemu przyjacielowi jest prawdziwe. Muszę jednak dodać, że w rzeczywistości żaden element nie ma wyłącznie tych właściwości, które wynikają z jego nazwy.

Nawet prosty odcinek przewodu wykazuje jednocześnie rezystancję, indukcyjność i pojemność. W istocie przewód bez względu na to, jak duża jest jego przewodność, przedstawia zawsze pewną rezystancję.

Przypominacie sobie, że prąd płynący przez przewód wytwarza wokół niego pole magnetyczne. W takim razie, w przypadku prądu zmiennego to pole jest również zmienne i indukuje w przewodniku prąd, który przeciwdziała prądowi indukującemu. A zatem mamy do czynienia ze zjawiskiem samoindukcji.

Wreszcie, jak każdy przewodnik, nasz przewód jest zdolny do zmagazynowania pewnego ładunku elektrycznego, zarówno dodatniego jak i ujemnego. Możemy więc powiedzieć, że przedstawia również pewną pojemność.

To wszystko co powiedziałem o prostym odcinku przewodu dotyczy oczywiście również cewki:

poza indukcyjnością, która jest jej podstawową właściwością, przedstawia ona również pewną rezystancję i pewną pojemność.

Co się tyczy kondensatora, to poza pojemnością, która go charakteryzuje, wykazuje on pewną, na ogół bardzo, bardzo małą rezystancję. W istocie ładunki elektryczne przemieszczające się w okładzinach w kierunku dielektryka, lub w kierunku przeciwnym, muszą pokonać pewną masę okładzin, a to wiąże się jednak z pokonaniem niewielkiej rezystancji. Te małe przesunięcia ładunków wywołują również powstanie pewnej indukcyjności.

Widzicie więc, że żadna z wielkości, które symbolizują litery R , L i C nie może istnieć bez towarzysztwa dwóch pozostałych. Nie będziemy jednak w dalszych rozważaniach tego uwzględniać, ponieważ zasadniczą rolę odgrywa na ogół podstawowa właściwość elementu, a właściwości towarzyszące mają mniejsze znaczenie.

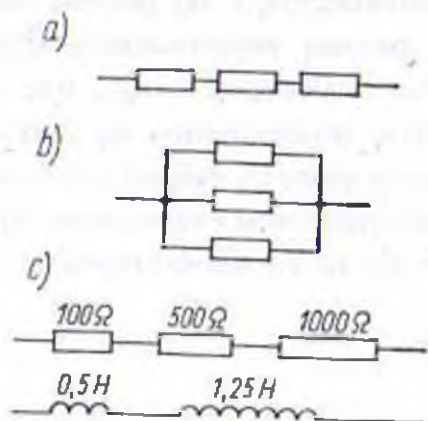
Połączenia szeregowe

Zajmiemy się teraz analizą połączeń elementów tego samego rodzaju i połączeń różnych elementów. Określimy wypadkową wartość wielkości wynikającej z połączenia i opór jaki ona stawia przepływowi prądu.

Elementy mogą być łączone bądź szeregowo, bądź równolegle. Mówimy, że elementy są połączone szeregowo, kiedy koniec pierwszego elementu jest dołączony do początku drugiego, koniec drugiego do początku trzeciego i tak dalej w ten sam sposób.

Prąd płynie wówczas kolejno przez wszystkie elementy tworzące cały układ.

Przy połączeniu równoległym wszystkie końcówki elementów z jednej strony są razem połączone i wszystkie końcówki elementów z drugiej strony



Rys. 31. Elementy połączone szeregowo (a), elementy połączone równolegle (b), rezystory i cewki połączone szeregowo. Wartości rezystancji i wartości reaktancji indukcyjnych dodają się (c)

są również razem połączone. Z takiego połączenia wynika, że prąd płynie jednocześnie przez wszystkie elementy układu. Oczywiście przez każdy element płynie tylko część prądu dopływającego do układu.

Bez trudu zrozumiecie, że rezystancje połączone szeregowo – dodają się. Weźcie na przykład trzy rezystory o wartościach 100, 500 i 1000 Ω i połączcie je szeregowo. Rezystancja tego układu

$$R = 100 + 500 + 1000 = 1600 \Omega$$

Weźmy teraz cewki i również połączmy je szeregowo. W warunkach, w których nie występuje między nimi indukcyjność wzajemna, indukcyjności cewek dodadzą się.

Rozpatrzmy na przykład cewkę o indukcyjności 0,5 H i cewkę o indukcyjności 1,25 H. Cewki są połączone szeregowo, ale umieszczone wystarczająco daleko od siebie, aby nie występowało między nimi zjawisko indukcji. Indukcyjność zespołu

$$L = 0,5 + 1,25 = 1,75 \text{ H}$$

Wszystko wydaje się bardzo proste. Czy tak samo będzie w przypadku kondensatorów połączonych szeregowo? Powiedzieliśmy, że w tego rodzaju połączeniu dodają się rezystancje elementów. Otóż w przypadku kondensatorów dodają się reaktancje pojemnościowe, które charakteryzują prze-

cież opór, jaki kondensatory stawiają przepływowi prądu zmiennego. Rozpatrzmy więc przypadek dwóch kondensatorów o pojemnościach C_1 i C_2



Rys. 32. Kondensatory połączone szeregowo. Pojemność zastępcza układu jest mniejsza od wartości pojemności każdego z kondensatorów składowych

połączonych szeregowo w obwodzie, w którym płynie prąd o częstotliwości f . Reaktancje pojemnościowe dodają się, w wyniku czego powstaje zastępcza reaktancja pojemnościowa

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_1} + \frac{1}{2\pi f C_2}$$

Uważając tę reaktancję za równoważną reaktancji kondensatora o pojemności C_s możemy napisać

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_s} = \frac{1}{2\pi f C_1} + \frac{1}{2\pi f C_2}$$

Po pomnożeniu obu stron równości przez $2\pi f$ otrzymujemy

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Widzicie więc teraz, że w przypadku połączenia szeregowego dwóch kondensatorów, w celu znalezienia odwrotności pojemności kondensatora równoważnego takiemu połączeniu, należy dodać do siebie odwrotności pojemności kondensatorów składowych.

Z ostatniego wzoru, bez specjalnych trudności matematycznych możecie wyznaczyć wartość pojemności zastępczej:

$$C_s = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

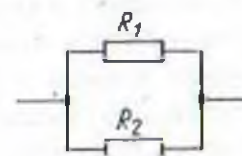
Połączenia równoległe

Przejdziemy teraz do analizy elementów połączonych równoległe. Ten sposób połączenia ułatwia przepływ prądu i dlatego w tym przypadku dodają się przewodności, czyli konduktancje elementów. Tymi terminami określa się odwrotność oporu czyli rezystancji.

Muszę zresztą zamiast słów „rezystancja” i „reaktancja” wprowadzić ogólniejszy termin „impedancja”, który obejmuje zarówno rezystancję, reaktancję pojemnościową, reaktancję indukcyjną jak i to co wynika z ich połączenia.

Impedancję oznaczamy literą Z . Odwrotność impedancji $1/Z$ nosi nazwę *admitancji*.

Rozpatrzmy przypadek rezystorów połączonych równoległe. Ich konduktancje $1/R$ dodają się. Zamiast słowa konduktancja możemy używać wyrażenia *przewodność czynna*. Jednostką konduktancji jest simens (S) – odwrotność oma.



Rys. 33. Przy równoległym połączeniu rezystorów wartość ogólna rezystancji jest mniejsza od rezystancji składowych

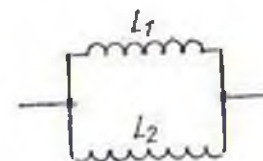
Jeżeli połączymy równoległe dwa rezystory R_1 i R_2 , to konduktancja takiego układu będzie równoważna konduktancji rezystora zastępczego R_r

$$\frac{1}{R_r} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Stwierdzacie z pewnością analogię z przypadkiem dwóch kondensatorów połączonych szeregowo i zapewne bez trudności wyznaczą wartość rezystancji zastępczej układu dwóch rezystorów połączonych równoległe

$$R_r = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Jeżeli Was to nie nudzi, rozważmy teraz przypadek połączonych równoległe cewek, oczywiście przy założeniu, że nie istnieje między nimi indukcyjność wzajemna. Ponieważ reaktancje indukcyjne są proporcjonalne do wartości indukcyjności, ich zachowanie jest analogiczne do zachowania się rezystancji.



Rys. 34. Cewki połączone równoległe

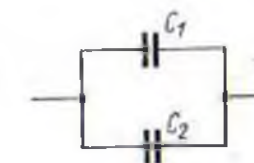
W związku z tym nie omylimy się twierdząc, że indukcyjność zastępcza dwóch cewek o indukcyjnościach L_1 i L_2 wyraża się wzorem

$$L_r = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

Rozpatrzmy wreszcie przypadek kondensatorów połączonych równoległe. Tutaj należy dodać admitancje, które są odwrotnościami impedancji, a więc w przypadku kondensatorów reaktancji pojemnościowych. Jednakże – jak wicie – reaktancje pojemnościowe są odwrotnie proporcjonalne do pojemności. A zatem admitancje są wprost proporcjonalne do pojemności i przy połączeniu równoległym dodają się

$$C_r = C_1 + C_2$$

Analizując zjawiska fizyczne związane z ładowaniem kondensatorów, z pewnością łatwo doszlibyście do tego samego wniosku.



Rys. 35. Kondensatory połączone równoległe

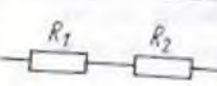
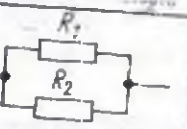
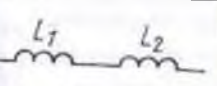
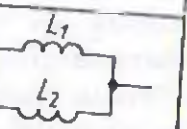
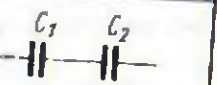
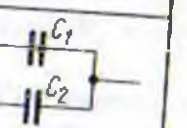
Zanotuj więc dobrze w swojej pamięci, drogi Ignasiu, że przy połączeniu szeregowym dodają się impedancje, a przy połączeniu równoległym – admitancje, tzn. odwrotności impedancji.

Układy złożone

Reguła ta odnosi się jednak tylko do układów zawierających wyłącznie elementy tego samego rodzaju. Przy połączeniu rezystorów, cewek i kondensatorów sprawy komplikują się.

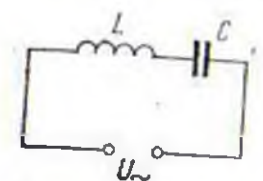
Nie chcę Was męczyć analizą wszystkich możliwych kombinacji. Ograniczymy się tylko do przypadków, które spotyka się w różnych układach elektronicznych.

Przyjrzyjmy się najpierw przypadkowi cewki i kondensatora połączonych szeregowo. Ich impedancje dodają się. Nie stanowi to jednak powodu dla którego można by napisać wzór ze znakiem „+”. W istocie reaktancja indukcyjna i reaktancja pojemnościowa zachowują się w odwrotny sposób.

Połączenie szeregowe	Połączenie równoległe
 $R = R_1 + R_2$	 $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$
 $L = L_1 + L_2$	 $L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$
 $C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$	 $C = C_1 + C_2$
Impedancja	
$Z = Z_1 + Z_2$	$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$

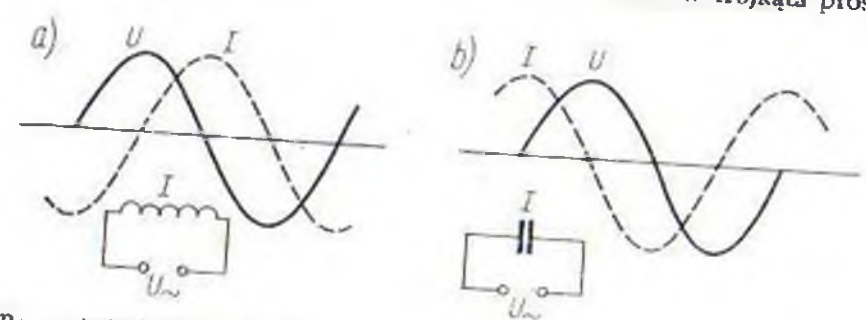
Rys. 36. Podsumowanie właściwości układów rezystorów, cewek i kondensatorów połączonych szeregowo lub równoległe oraz wypadkowe wartości ich impedancji

Zmiany natężenia prądu w cewce występują z pewnym opóźnieniem w stosunku do doprowadzonego do niej napięcia zmiennego. W obwodzie



Rys. 37. Cewka i kondensator w połączeniu szeregowym. Reakcja układu jest równa różnicy reaktancji indukcyjnej i reaktancji pojemnościowej

występuje więc tzw. przesunięcie fazowe między prądem a napięciem. Zjawisko to jest spowodowane działaniem prądu samoindukcji, który przeciwdzia-



Rys. 39. Przesunięcie fazowe prądu I w stosunku do napięcia U wywołane działaniem cewki (a) oraz przesunięcie fazowe wytwarzane przez kondensator. Prąd I wyprzedza napięcie U (b)

ła wzrostowi natężenia prądu, podobnie jak zmniejszaniu i zmianie polaryzacji.

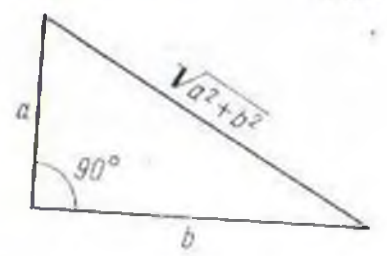
Odwrotnie zjawisko występuje w kondensatorze, w którym natężenie prądu jest przesunięte w przód w stosunku do napięcia. Rzeczywiście, w miarę ładowania kondensatora, napięcie między okładzinami wzrasta, ale ze względu na zbliżanie się do stanu nasycenia, natężenie prądu maleje.

W takim razie nie będziecie wcale zaskoczeni, jeżeli dodam reaktancję indukcyjną do reaktancji pojemnościowej poprzedzając tę ostatnią znakiem „-”

$$X = X_L - X_C = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}$$

Jeżeli rezystancja układu jest bardzo mała, powyższy wzór okazuje się wystarczający, ponieważ impedancja układu jest reaktancją wynikającą tylko z różnicy reaktancji indukcyjnej i pojemnościowej. Jeżeli jednak wartość R nie jest pomijalnie mała, nasz wzór staje się bardziej skomplikowany

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}$$



Rys. 39. Zależność długości przeciwprostokątnej od długości boków trójkąta prostokątnego

Widzicie, że trzeba wyciągnąć pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów rezystancji i reaktancji. Nie przypomina Wam to geometrii? Czyż nie w taki sam sposób oblicza się długość przeciwprostokątnej wyciągając pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów boków trójkąta prostokątnego?

Zjawisko rezonansu

Wróćmy do naszego układu. Załóżmy, że zmienimy częstotliwość f doprowadzonego napięcia. W miarę wzrostu częstotliwości reaktancja indukcyjna również wzrasta, ponieważ jest wprost proporcjonalna do częstotliwości. Jeśli idzie o reaktancję pojemnościową $\frac{1}{2\pi fC}$ to ta z kolei maleje, ponieważ jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości.

Przy częstotliwościach bardzo małych reaktancja indukcyjna jest bardzo mała i przeciwnie reaktancja pojemnościowa bardzo duża. W rezultacie reaktancja wypadkowa układu jako różnica reaktancji składowych jest duża.

Jednakże w miarę wzrostu częstotliwości wartości obu reaktancji zbliżają się do siebie. Przychodzi wreszcie chwila, kiedy reaktancja indukcyjna jeszcze dostatecznie duża staje się równa reaktancji pojemnościowej, która w trakcie zmiany częstotliwości zmalała. Ich różnica, to znaczy reaktancja wypadkowa układu staje się równa zero. A zatem we wzorze na impedancję pod znakiem pierwiastka pozostaje tylko R². Oznacza to, że impedancja staje się równa rezystancji R.

Otóż ta rezystancja może być bardzo, bardzo mała. W tych warunkach impedancja układu staje się prawie równa zero. Podkreślam, że dzieje się to przy częstotliwości, przy której wartość reaktancji indukcyjnej jest równa reaktancji pojemnościowej.

Mówimy, że nasz układ jest w rezonansie. Natężenie prądu, który przez niego przepływa osiąga największą wartość. Nie występuje już przesunięcie fazowe między prądem a napięciem, które wywołuje przepływ prądu. Wszystko dzieje się tak, jakby w układzie występowała tylko mała rezystancja.

Oczywiście, jeżeli przy dalszym wzroście częstotliwości doprowadzanego napięcia, przekroczy się częstotliwość rezonansową, znowu pojawia się pewna reaktancja, ponieważ reaktancja indukcyjna staje się wówczas większa od reaktancji pojemnościowej. Przedtem, w wyniku przesunięcia fazowego prąd wyprzedzał napięcie. Obecnie charakter prze-

sunięcia fazowego ulega zmianie: prąd jest opóźniony względem napięcia. Wynika to z wpływu reaktancji indukcyjnej, która powyżej częstotliwości rezonansowej odgrywa główną rolę.

Czy mogę Wam jeszcze zademonstrować elementarną analizę matematyczną? Jest ona bardzo użyteczna w określaniu wartości częstotliwości, przy której reaktancja układu staje się równa zero.

Dla wystąpienia równości

$$2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} = 0$$

jest konieczne, aby

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

Podzielmy dwie strony tej równości przez 2πL i pomnóżmy je przez f. Otrzymamy wówczas

$$f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC}$$

Nie pozostaje już nic innego, jak wyciągnąć pierwiastek kwadratowy z obu stron tej równości i otrzymać to co nazywa się *wzorem Thomsona*

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

Taka jest właśnie wartość częstotliwości rezonansowej. Wzór, który ją określa jest podstawowym wzorem w dziedzinie radioelektroniki.

Można również wyznaczyć wartość okresu T będącego odwrotnością częstotliwości ($T = \frac{1}{f}$). Wiecie, że okres T jest czasem trwania każdej pary półokresów napięcia zmiennego. Okres odpowiadający częstotliwości rezonansowej

$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$

Teraz, kiedy omówiliśmy już zjawisko rezonansu w obwodzie składającym się z cewki i kondensatora połączonych szeregowo, pozostawiam Ci, drogi siostrzeńcze, troskę o wyjaśnienie Ignasiowi co to jest obwód drgający, jego selektywność, podtrzymywanie drgań itp. Powodzenia!

POGAWĘDKA PIĄTA

W czasie tej pogawędki analizą obwodów drgań kończy się wyjaśnianie podstawowych zjawisk w nauce o elektryczności. Nasi przyjaciele przechodzą do podstaw radioelektroniki, omawiają zjawiska nadawania i odbioru fal elektromagnetycznych oraz analizują budowę obwodów wejściowych odbiorników.

OBWÓD DRGAŃ. FALE ELEKTROMAGNETYCZNE

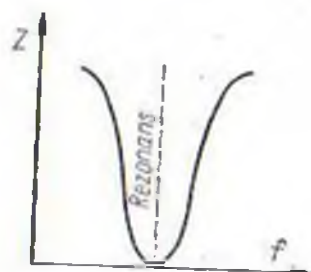
Ladowania i rozładowania

Mądr. — Dobrze zrozumiałeś wyjaśnienia wuja Radiola dotyczące rezonansu?

Pyt. — Wszystkie problemy związane z różnymi połączeniami rezystorów, cewek i kondensatorów są dość skomplikowane. Aby je lepiej zrozumieć, przesłuchałem jeszcze raz taśmę nagraną przez Twojego wuja. Teraz mogę już na pewno stwierdzić, że doskonale rozumiem zachowanie się obwodu, który tworzy cewka i kondensator połączone szeregowo.

W miarę jak częstotliwość napięcia zmiennego doprowadzonego do obwodu zbliża się do wartości rezonansowej, impedancja obwodu maleje. W rezonansie staje się ona prawie równa zero, ponieważ reaktancja spada do zera i pozostaje tylko rezystancja, która może być bardzo mała.

Kiedy częstotliwość przekracza wartość rezonansową, impedancja wzrasta, ponieważ zaczyna wzrastać reaktancja. Reaktancja ma jednak przeciwny znak w porównaniu z tą, która występowała przed rezonansem.



Rys. 40. Impedancja Z obwodu drgań zmienia się w funkcji częstotliwości prądu; w rezonansie staje się praktycznie równa zero



Rys. 41. Prąd w obwodzie drgań ma kształt sinusoidy

Mądr. — Stwierdzam z przyjemnością, że dobrze zrozumiałeś istotę zjawiska rezonansu, które impedancję obwodu zmniejsza prawie do zera, a tym samym wywołuje przepływ maksymalnego prądu.

W takim razie będziesz mógł mi powiedzieć, w jaki sposób rozładuje się naładowany kondensator, jeżeli do jego okładzin dołączy się nie rezystor — o czym mówiliśmy w czasie ostatniej pogawędki — a cewkę?

Pyt. — Myślę, że indukcyjność cewki nie umożliwi prądowi rozładowania osiągnięcia na początku dużego natężenia; będzie on narastał stopniowo i osiągnie wartość maksymalną wtedy, kiedy kondensator będzie rozładowany. Ze względu na działanie indukcyjności prąd nie zaniknie natychmiast, ale będzie się stopniowo zmniejszał ładując jednocześnie kondensator. Polaryzacja napięcia powstającego na kondensatorze będzie oczywiście przeciwna w porównaniu z polaryzacją początkową.

Kiedy prąd wreszcie zaniknie, kondensator będzie całkowicie naładowany i opisany przeze mnie cykl rozpocznie się od początku, ale w przeciwnym kierunku. W ten sposób prąd będzie płynął bez przerwy, raz w jednym raz w drugim kierunku i z odpowiednią polaryzacją ładował kondensator. Wszystko to dzieje się dzięki bezwładności, która charakteryzuje cewkę.

Mądr. — Zastanawiam się, Ignasiu, czy nie czytałeś po kryjomu podręcznika elektryczności, aby mi udzielić tak ścisłej odpowiedzi... W istocie, prąd w obwodzie wykonuje *oscylacje* i dlatego ten obwód nazywa się obwodem *oscylacyjnym* albo obwodem *drgań*. Nie wątpię, że potrafisz mi powiedzieć, jaka jest częstotliwość drgań w obwodzie.

Pyt. — Drgania te mają z pewnością częstotliwość rezonansową daną wzorem Thomsona. Właśnie przy tej częstotliwości nasz obwód drgań przedstawia impedancję równą zero lub najwyżej równą rezystancji.

Mądr. — Bardzo dobrze. A czy Twoim zdaniem drgania będą trwały nieskończenie długo?

Pyt. — Niestety, nic na Ziemi nie jest wieczne. Rezystancja, nawet najmniejsza, powoduje stratę energii w każdym cyklu oscylacyjnym, toteż drgania będą coraz mniejsze i w końcu zanikną.



Rys. 42. Drgania prądu wywołane rozładowaniem kondensatora przez cewkę są tłumione z powodu strat energii w rezystancji

Mądr. — Tak, i dlatego mówi się, że są to drgania *tłumione*. Tłumienie obwodu drgań jest więc głównie spowodowane rezystancją.

Gratuluje Ci Ignasiu tylu bezbłędnych wniosków.

Podtrzymywanie drgań

Pyt. — Pomogło mi znalezienie analogii między obwodem drgań a wahadłem naszego starego zegara. Nawet jeśli zegar jest nienakręcony, wystarczy odchylić wahadło w jedno z krańcowych położenia, a następnie swobodnie puścić, aby zaczęło ono wykonywać oscylacje. Oscylacje te powoli ale stopniowo maleją ze względu na opór powietrza. Jeśli idzie o częstotliwość wahań, to jest ona swego rodzaju częstotliwością rezonansową zależną od długości i masy wahadła.

Mądr. — Doskonale porównanie!... W takim razie wiesz, w jaki sposób uzyskuje się ciągły ruch wahadła. W tym celu nakręca się mechanizm zegara a wówczas jego sprężyna magazynuje pewną ilość energii. Przy każdej oscylacji wahadła, sprężyna przekazuje mu lekki impuls, który dokładnie wyrównuje stratę energii spo-



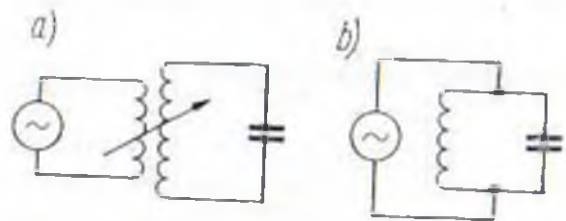


wodowaną oporem powietrza. W ten sposób zegar chodzi bez zatrzymywania się. Co w takim razie trzeba zrobić, aby prąd w naszym obwodzie drgań oscylował w taki sam sposób, to znaczy nie był mniejszy po każdej oscylacji.

Pyt. — Przez analogię do zegara przypuszczam, że w każdym okresie trzeba do obwodu doprowadzić małą ilość energii elektrycznej kompensującej stratę wywołaną istnieniem rezystancji. Nie wiem jednak, jak praktycznie można zapewnić takie okresowe doprowadzanie energii.

Mądr. — Można je zapewnić drogą indukcyjną powodując przepływ prądu o częstotliwości rezonansowej w cewce sprzężonej indukcyjnie z cewką naszego obwodu drgającego. Można również bezpośrednio przyłączyć źródło odpowiedniego¹¹ napięcia do okładzin kondensatora.

Pyt. — Przypuszczam, że to źródło będzie dostarczało bardzo mało energii, tyle tylko, ile trzeba na dokładne skompensowanie małych strat w rezystancji obwodu.



Rys. 43. Doprowadzanie prądu do obwodu drgań: drogą indukcyjną (a) i bezpośrednio (b)

Mądr. — Rzeczywiście, prąd pobierany ze źródła przez obwód drgań jest minimalny. Można więc powiedzieć, że nasz obwód przedstawia dla obwodu zewnętrznego bardzo dużą impedancję.

Pyt. — Cieszę się bardzo, że usłyszałem taki wniosek. Twój wuj nie mówił nam o połączeniu równoległym cewki i kondensatora, a to jest właśnie przypadek naszego obwodu drgań dołączonego bezpośrednio do źródła napięcia.

Mądr. — Dlatego też, o ile impedancja cewki i kondensatora połączonych szeregowo staje się równa zero przy częstotliwości rezonansowej, o tyle w przypadku ich równoległego połączenia, impedancja staje się prawie nieskończenie wielka przy tej samej częstotliwości rezonansowej.

Pyt. — A oscylacje w obwodzie nie są już tłumione, prawda?

Mądr. — Nie, zachowują stałą *amplitudę*. Ten termin oznacza maksymalną wartość występującą w każdym półokresie. Mówi się również, że w tym przypadku są to drgania *podtrzymywane* lub *nietlumione*.

Pyt. — Mnie również podtrzymują na duchu te zjawiska... A co się dzieje, jeżeli zmieniamy częstotliwość i oddalamy się od częstotliwości rezonansowej w jedną lub drugą stronę!

Mądr. — W obu przypadkach impedancja obwodu drgań maleje.

Fale elektromagnetyczne

Pyt. — Jakie jest praktyczne zastosowanie drgań nietlumionych?

Mądr. — Właśnie takie drgania są stosowane w radioelektronice. Służą one do wytwarzania fal elektromagnetycznych, a przy odbiorze są indukowane w obwodach rezonansowych.

¹¹ Autor ma na myśli źródło napięcia, które bez względu na obciążenie dostarcza stałego (jednakowej wartości) prądu, czyli tzw. źródło prądowe (przyp. tłum.).



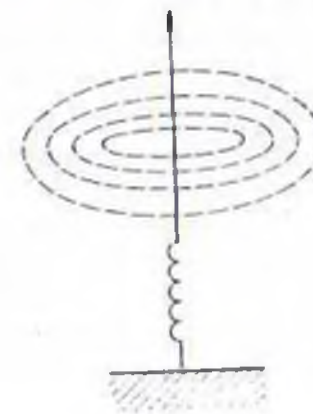
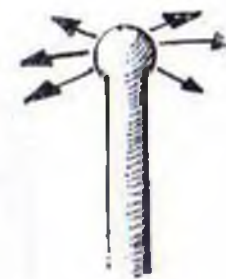
Pyt. — Jak się wytwarza fale elektromagnetyczne?

Mądr. — Bardzo prosto, przez doprowadzenie drgań do *anteny nadawczej*. Antena składa się z przewodu dołączonego do obwodu drgań i zakończonego masą metalową o pewnej pojemności. W ten sposób, w każdym półokresie, ładunki przepływają do tej pojemności, zwanej pojemnością końcową i wracają do obwodu drgań. W rezultacie mamy do czynienia z prawdziwym prądem płynącym w antenie.

Prąd ten wytwarza wokół anteny pole magnetyczne, którego kierunek linii sił zmienia się w każdym półokresie. Jeżeli te półokresy następują po sobie bardzo szybko, co właśnie ma miejsce w przypadku prądów wielkiej częstotliwości, każde następne pole „odpycha” to, które je poprzedzało. I tak powstają fale elektromagnetyczne, które rozchodzą się z prędkością światła tzn. 300000 km/s.

Pyt. — A w jakim kierunku rozchodzą się?

Mądr. — Jeżeli antena nadawcza jest pionowa, to rozchodzą się jednakowo we wszystkich kierunkach. Właśnie promień okręgu utworzonego przez każdą falę powiększa się z tą fenomenalną prędkością światła.



Rys. 44. Fale elektromagnetyczne wysyłane przez antenę nadawczą

Można jednak wykonywać również anteny kierunkowe, w których na przykład reflektor przewodzący odbija fale i koncentruje je w postaci wiązki.

Pyt. — Widzę, że postępuje się tutaj w taki sam sposób, jak w technice oświetleniowej. Można mieć lampę świecącą jednakowo we wszystkich kierunkach, ale można również skierować jej światło w określonym kierunku, jak w przypadku reflektorów samochodowych.



Zakresy fal

Mądr. — W tej analogii nie ma nic zaskakującego, ponieważ fale radiowe i fale świetlne są falami elektromagnetycznymi; różnią się tylko częstotliwością. A propo częstotliwości, wiesz, że jednostką częstotliwości *okres na sekundę* jest również nazywana *hercem* i oznaczana przez Hz. W radiotechnice mamy na ogół do czynienia z kilohercami (kHz), tysiącami herców, a nawet z megahercami (MHz), milionami herców i gigahercami (GHz), miliardami herców.

Częstotliwości fal elektromagnetycznych odpowiadające promieniom widzialnym zawierają się między 385 a 790 milionów megaherców. W radiotechnice stosuje się mniejsze częstotliwości: od 30000 Hz do 3000 MHz¹¹. Potrafisz obliczyć, jakie są długości odpowiadających im fal?

¹¹ Stosuje się również częstotliwości rzędu kilkuset tysięcy megaherców (przyp. tłum.).



Pyt. — Domyślam się, że tak nazywa się odległość, która dzieli dwie kolejno wysłane fale. Ponieważ rozchodzą się one z prędkością 300000000 m/s, dystans, jaki jedna fala pokona zanim następna zostanie wysłana, jest więc równy tej prędkości pomnożonej przez czas upływający między wysłaniem dwóch kolejnych fal. A ten czas, to po prostu okres prądu zmiennego wytwarzanego przez generator. Z kolei okres jest odwrotnością częstotliwości.

Mądr. — Bardzo dobrze, Ignasiu. A zatem, jeżeli oznaczymy okres przez T , to jako odwrotność częstotliwości będzie $T = \frac{1}{f}$. Wówczas długość fali λ (litera grecka lambda) wyrazi się wzorem

$$\lambda = 300000000 \cdot T = \frac{300000000}{f} \text{ [m]}$$

Pyt. — W związku z tym, jeżeli częstotliwość wynosi 30000 Hz, długość fali jest równa 10 kilometrów. W drugim krańcowym przypadku, przy częstotliwości 3000 MHz, fale mają tylko 10 centymetrów długości.

Mądr. — Twoje obliczenia są ścisłe. Dowiedz się więc jeszcze, że stosuje się zarówno fale długie, których λ jest większa od 1000 m, jak i fale średnie o długościach zawartych między 100 a 1000 m i wreszcie fale krótkie poniżej 100 m. W zakresie fal krótkich rozróżnia się fale dekametrowe o długościach dziesiątków metrów i fale metrowe. Istnieją również fale ultrakrótkie o długościach poniżej jednego metra, a więc decymetrowe i centymetrowe. W pewnych zastosowaniach specjalnych spotyka się nawet fale milimetrowe.

W celu umożliwienia wysyłania fal w określonym kierunku przy użyciu reflektorów, należy stosować fale krótkie lub ultrakrótkie, ponieważ nie jest możliwe realizowanie reflektorów o średnicy kilku kilometrów.

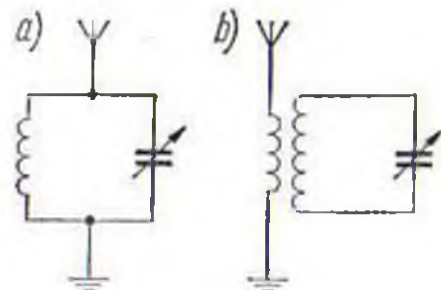
Odbiór fal

Pyt. — W jaki sposób odbiera się fale?

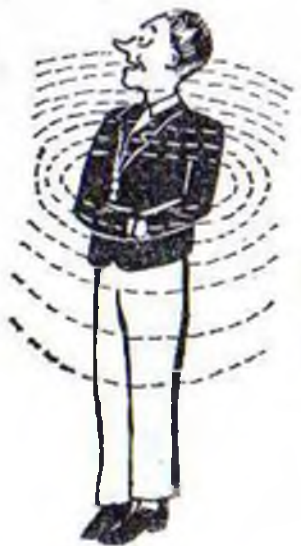
Mądr. — Za pomocą anteny odbiorczej utworzonej z przewodnika, w której docierające do niej fale elektromagnetyczne indukują odpowiednie prądy. Fale te przechodzą bez żadnego osłabienia przez izolatory, natomiast indukując prądy w przewodnikach tracą mniejszą lub większą część swojej energii.

Pyt. — Przerażasz mnie Genku. Ciało człowieka jest przewodnikiem elektryczności. W takim razie fale wszystkich nadajników radiofonicznych i telewizyjnych indukują prądy w moim ciele.

Mądr. — Oczywiście. Ale uspokój się: te prądy są niezwykle słabe i nie mogą Ci w żaden sposób wyrządzić krzywdy.



Rys. 45. Obwód rezonansowy odbiornika może być bezpośrednio włączony między antenę a uziemienie (a) lub sprzężony indukcyjnie z cewką antenową (b)



Pyt. — Tym lepiej. A jak zachowują się one w odbiornikach dźwięków lub obrazów?

Mądr. — I w tym przypadku prąd, który fale elektromagnetyczne indukują w antenie jest bardzo słaby. Antena jest dołączona bądź bezpośrednio, bądź indukcyjnie do wejściowego obwodu rezonansowego odbiornika. Jeżeli ten obwód jest dostrojony do częstotliwości odbieranego prądu, to zjawisko rezonansu wywoła w nim przepływ prądu względnie dużego.

Antena powinna być przez cewkę połączona z uziemieniem. W ten sposób dzięki falom możliwy jest przepływ ładunków elektrycznych — których nie brak na globie ziemskim — w obu kierunkach: od strony ziemi i w stronę ziemi. Tak samo zresztą jest w przypadku anten nadawczych.

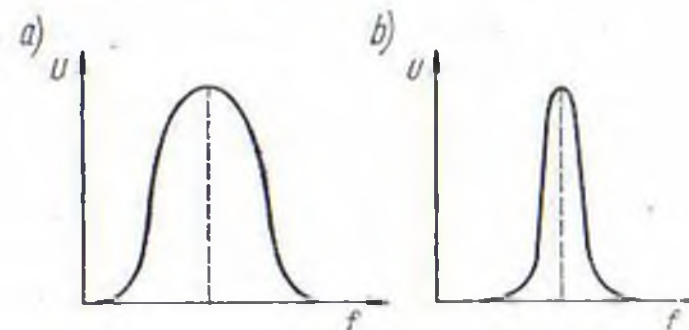
Jeżeli obwód rezonansowy jest bezpośrednio włączony między antenę a uziemienie i jest dobrze dostrojony do częstotliwości odbieranego prądu, to jego impedancja jest duża. Stąd spadek napięcia, który powstaje na końcówkach obwodu w wyniku przepływu prądu, jest względnie duży.



Dostrojenie i selektywność

Pyt. — A co się dzieje, gdy obwód nie jest w rezonansie z odbieranym prądem?

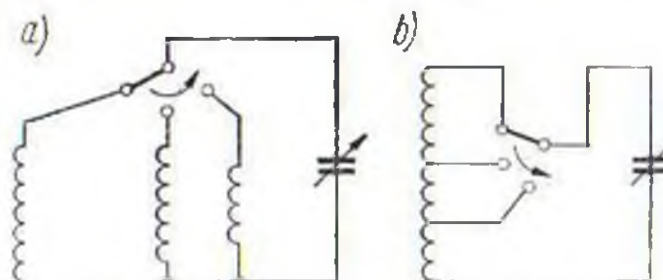
Mądr. — W tym przypadku jego impedancja jest mniejsza, co powoduje, że napięcie na jego końcówkach jest również mniejsze. I to jest właśnie zjawisko, które leży u podstawy selektywności obwodu: jego zdolności do najlepszego odbioru częstotliwości, do której jest dostrojony.



Rys. 46. Krzywe napięcia U na zaciskach obwodu rezonansowego w funkcji częstotliwości f sygnału: a) krzywa obwodu o małej selektywności; b) krzywa obwodu o dużej selektywności

Krzywą selektywności obwodu, która pokazuje, w jaki sposób napięcie na nim zmienia się w funkcji częstotliwości, można wykreślić mierząc napięcie na jego końcówkach (mówimy: na jego zaciskach) dla różnych częstotliwości prądu.

Pyt. — Czym określa się kształt tej krzywej? Domyślam się, że jej szerokością, ponieważ im ta krzywa jest węższa, tym — moim zdaniem — obwód jest bardziej selektywny.



Rys. 47. Z jednego zakresu fal na inny przechodzi się za pomocą zmiany wartości indukcyjności: a) trzy oddzielne cewki; b) przełącznik umożliwia dołączenie do kondensatora części cewki

Mądr. — Nie mylisz się. Z kolci o selektywności decyduje *współczynnik tłumienia* obwodu zależny głównie od rezystancji i ewentualnie od strat energii, które mogą powstać w cewce.

Pyt. — A w jaki sposób doprowadza się obwód do rezonansu przy częstotliwości nadajnika, który chcemy odebrać?

Mądr. — Mówi się: *dostroić* obwód do żądanej częstotliwości. Dostrojenie przeprowadza się zwykle za pomocą zmiany bądź indukcyjności cewki, bądź pojemności kondensatora.

Pojemność — przy zastosowaniu kondensatora zmiennego — może być zmieniana w sposób ciągły. Ten rodzaj strojenia zapewnia dokładne dostrojenie do żądanej częstotliwości.

Jeśli idzie o indukcyjność, to na ogół zmienia się ją skokowo. Następuje wówczas zdecydowane przejście z jednego zakresu fal do innego, na przykład z zakresu fal długich do zakresu fal średnich. W tym celu służy przełącznik, za pomocą którego zastępuje się jedną cewkę drugą cewką, albo stosuje się mniejszą lub większą część cewki wyposażoną po to w zaczepy.

Niegdyś korzystano również z cewki o ciągłej zmianie indukcyjności. Stosowano na przykład *wariometry*, które składały się z dwóch połączonych szeregowo cewek. Jedną z cewek można było obracać we wnętrzu drugiej i w ten sposób zmieniało się ich indukcyjność wzajemną.

Pyt. — Dobrze. Zrozumiałem jak fale są wysyłane i odbierane. Ale w jaki sposób przesyła się za ich pomocą dźwięki lub obrazy? I jak przy odbiorze dochodzi do ich odtwarzania?

Mądr. — Wszystko to wymaga sporo wyjaśnień. Mój wuj i ja będziemy mogli teraz omówić te sprawy, ponieważ zdobyłeś już podstawowe wiadomości z nauki o elektryczności. Ułatwi Ci to zrozumienie elektroniki.



Profesor Radiol analizuje :

NADAJNIKI I ODBIORNIKI RADIOFONICZNE

W jaki sposób dźwięki przetwarzają się na sygnały elektryczne? Jak te sygnały nanosi się na fale elektromagnetyczne? W jaki sposób fale elektromagnetyczne są odbierane, poddawane selekcji, wzmacniane i wreszcie jak wydziela się z nich sygnały dźwiękowe i z powrotem zamienia na dźwięki? Wszystkie wymienione zagadnienia są tu omówione, jednak bez wnikania w szczegóły układowe.

Sluchając Waszej ostatniej rozmowy doszedłem do wniosku, że weszliście już głęboko w dziedzinę radioelektroniki. Spróbuję Wam wyjaśnić — bez wnikania w szczegóły — podstawowe zasady tej techniki.

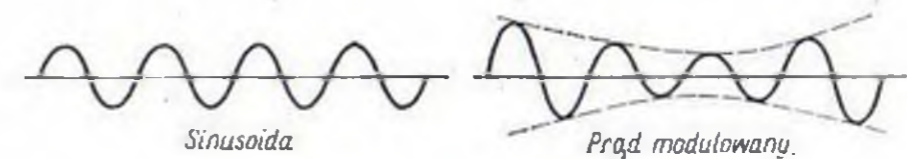
Fale akustyczne

Fale elektromagnetyczne są łącznikiem między nadajnikami a odbiornikami. Wiem Ignasiu, że chciałbyś wiedzieć, w jaki sposób te fale przenoszą dźwięki i obrazy.

przekazywać litery alfabetu Morse'a i realizować w ten sposób telegraf bez drutu.

Ja jednak chcę Ci wyjaśnić zasady radiofonii, która jest techniką przesyłania dźwięków. Nie wiem czy masz elementarne wiadomości z akustyki i na przykład czy wiesz co to jest dźwięk?

Jest to wynik działania¹⁾ fal rozchodzących się w powietrzu z prędkością 340 metrów na sekundę. Fale te mogą być wytwarzane wskutek drgania naszych strun głosowych (wytwarzam je właśnie w tej chwili, 'ponieważ mówię'), wskutek drgania strun instrumentów muzycznych, a mówiąc ogólniej są



Rys. 48. Prąd niemodulowany ma kształt sinusoidy

Czysty prąd wielkiej częstotliwości o kształcie krzywej noszącej nazwę *sinusoidy*, a więc w którego wszystkich półokresach amplitudy są równe i którego częstotliwość jest stała, nie przenosi żadnej informacji. Taki prąd wytwarza czyste fale elektromagnetyczne.

Oczywiście wysyłając je z przerwami, to w bardzo małym okresie czasu odpowiadającym kropce, to w nieco dłuższym odpowiadającym kresce, można

następstwem zjawisk, którym towarzyszy na przemian ściskanie i rozrzedzanie powietrza.

Częstotliwość drgań słyszalnych zawiera się w granicach od 16 Hz do 20 000 Hz. Zakres ten obejmuje całą gamę dźwięków: od najniższych, odpowiadających najmniejszej częstotliwości, aż do najwyższych. Zresztą w miarę starzenia się człowiek coraz gorzej słyszy najwyższe dźwięki. Górna granica słyszalności spada z wiekiem do 15 000 Hz, a nawet do 12 000 Hz.

Wynika to z faktu, że u ludzi starszych błony

¹⁾ Na zmysł słuchu (przyp. tłum.).

w uszach stają się mniej elastyczne, a właśnie te błony drgają pod wpływem fal dźwiękowych. Drgania błon oddziałują na nerwy akustyczne, które z kolei w naszych mózgach stwarzają odczucie dźwięku.

Nawiasem mówiąc, na pewno stwierdzasz pewną analogię między nadawaniem i odbiorem fal radiowych a fal dźwiękowych.

Zobaczmy teraz, w jaki sposób można przesyłać dźwięki za pomocą fal elektromagnetycznych. W tym celu trzeba najpierw przetworzyć dźwięki na sygnały elektryczne, a następnie nanieść je na prądy wielkości częstotliwości, które służą do wytwarzania fal.

Po stronie odbiorczej prądy są na ogół bardzo małe. Trzeba więc najpierw te prądy *wzmocnić*. Następnie trzeba z nich wydzielić te, które odpowiadają sygnałom dźwiękowym i po wzmocnieniu przetworzyć je z powrotem na fale dźwiękowe.

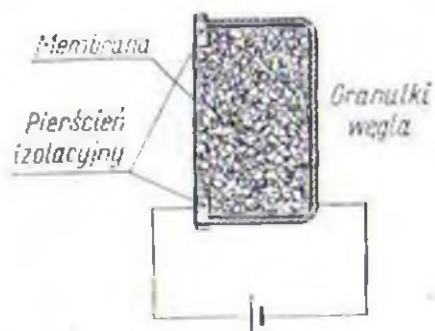
Jak przeprowadzić wszystkie te operacje? Nie będę miał czasu, aby Ci je wszystkie dokładnie opisać, dlatego ograniczę się do ich ogólnego omówienia.

Mikrofony

Na początku zobaczymy, w jaki sposób można przetworzyć dźwięki na sygnały elektryczne. Domyślasz się, że w tym celu stosuje się *mikrofony*. Przetworniki te, bez względu na zasadę działania, zawierają elastyczną membranę drgającą pod wpływem fal dźwiękowych. Widzisz więc, że w rezultacie mikrofon jest uchem elektrycznym.

W celu przetworzenia drgań membrany na zmienne prądy lub napięcia elektryczne należy uzależnić od ruchów membrany rezystancję, indukcyjność lub pojemność w obwodzie elektrycznym.

Mikrofony stosowane w aparatach telefonicznych należą do pierwszej grupy. Między metalową

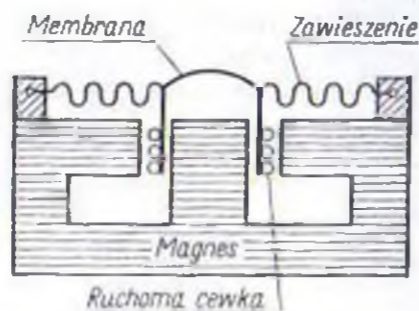


Rys. 49. Mikrofon, którego rezystancja zmienia się pod wpływem fal dźwiękowych

membraną a obudową, również metalową, cała przestrzeń jest wypełniona granulkami węgla. Pod wpływem zmiennego nacisku membrany, zmienia się rezystancja granulek: przy zwiększaniu nacisku — maleje, a przy zmniejszaniu — wzrasta.

Wystarczy więc dołączyć źródło napięcia między membranę a obudowę, aby uzyskać prąd, którego natężenie zmienia się w takt fal dźwiękowych i jest proporcjonalne do ich amplitudy.

Można również uzyskać mikrofon przez przytworzenie do membrany małej cewki umieszczonej jednocześnie w polu magnetycznym pierścieniowego magnesu trwałego. Uzyskany w ten sposób *mikrofon dynamiczny* charakteryzuje się dużą wiernością przetwarzania i dużą czułością. Rozumiesz na pewno, że poruszająca się cewka przecina linie sił pola magnetycznego. Dzięki temu w cewce powstają prądy odpowiadające dokładnie dźwiękom.



Rys. 50. Mikrofon dynamiczny, w którym cewka drga w polu magnetycznym magnesu trwałego

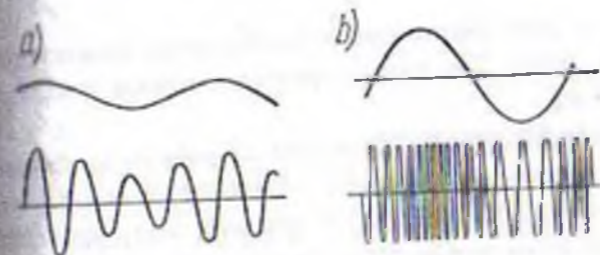
Wreszcie można również falami dźwiękowymi zmieniać pojemność *mikrofonu pojemnościowego*. Mikrofon ten składa się z cienkiej membrany umieszczonej bardzo blisko płaskiej i równoległej do niej przewodzącej elektrody. Drgania membrany pod wpływem fal dźwiękowych zmieniają pojemność, którą tworzy membrana i elektroda. Pojemność ta może wzrosnąć do wartości kilkudziesięciu pikofaradów. Do okładzin kondensatora jest doprowadzone napięcie rzędu kilkuset woltów. Rozumiesz chyba, że dzięki temu zmiany pojemności decydują o wartościach prądów ładowania i rozładowania wiernie odpowiadających dźwiękom.

Zasada pracy nadajnika

Mikrofon, bez względu na typ, umożliwia uzyskanie prądów *małej częstotliwości* (można również powiedzieć: o *częstotliwości akustycznej*), które słu-

żą do *modulowania* prądu wielkiej częstotliwości wytwarzającego fale elektromagnetyczne.

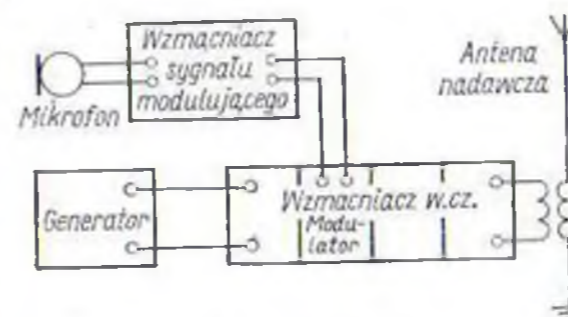
Termin „modulować” znaczy zmieniać w takt prądu małej częstotliwości jeden z dwóch zasadniczych parametrów prądu wielkiej częstotliwości:



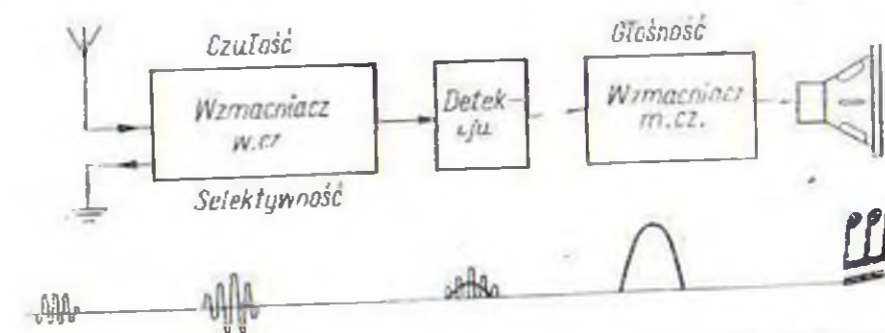
Rys. 51. Napięcie modulujące i prąd wielkiej częstotliwości modulowany amplitudowo (a) oraz napięcie modulujące i prąd wielkiej częstotliwości modulowany częstotliwościowo (b)

jego amplitudę lub jego częstotliwość. Chcę Ci przez to powiedzieć, że istnieją dwa różne możliwe sposoby realizacji radiofonii: z *modulacją amplitudową* i z *modulacją częstotliwościową*.

W pierwszym przypadku sama częstotliwość prądu wytwarzającego fale pozostaje stała; zmianie ulegają natomiast amplitudy odpowiadające jego poszczególnym okresom.



Rys. 52. Układ blokowy nadajnika radiofonicznego



Rys. 53. Układ blokowy odbiornika radiofonicznego i kształty prądów w jego poszczególnych blokach

Przeciwnie, w przypadku modulacji częstotliwościowej amplituda prądu wielkiej częstotliwości pozostaje stała, a właśnie częstotliwość zmienia się mniej lub więcej wokół pewnej wartości średniej.

Prąd modulowany zostaje jeszcze wzmocniony zanim zostanie doprowadzony do anteny nadawczej, gdzie wytworzy fale niosące dźwięki.

Budowa odbiornika

W ślad za falami elektromagnetycznymi przejdźmy teraz do odbiorników. W antenach odbiorczych nasze fale indukują prądy, mające taki sam kształt jak w antenach nadawczych, ale o dużo, dużo mniejszym natężeniu. Pomyśl tylko, że moc, która w dużych nadajnikach radiofonicznych może osiągać setki kilowatów, rozkłada się we wszystkich kierunkach na przestrzeni setek, a nawet tysięcy kilometrów. Oznacza to, że Twoja antena odbierze tylko nieskończenie małą część energii, chyba że mieszkasz w sąsiedztwie nadajnika, ale jak wiem w Twoim przypadku tak nie jest.

W związku z tym trzeba przede wszystkim ten słaby sygnał wzmocnić, oczywiście nie każdy, który odbiera antena. Wiesz przecież, że w antenie indukują się prądy wywołane falami pochodzącymi z wielu nadajników.

W celu wybrania sygnału nadajnika, którego chcesz słuchać, trzeba wykorzystać selektywność obwodu wejściowego przez dostrojenie go do częstotliwości tego nadajnika.

Na ogół do zapewnienia dobrej selektywności w członie wielkiej częstotliwości odbiornika służy wiele obwodów strojonych.

Po dostatecznym wzmocnieniu odebranego

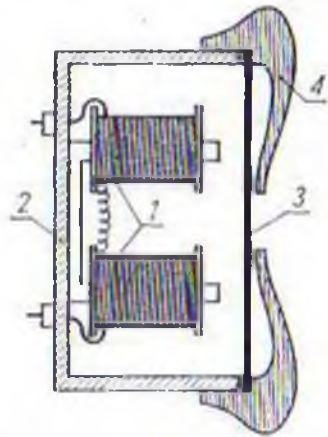
sygnału należy z niego wydzielić modulujący go sygnał małej częstotliwości. Do tego celu służy układ demodulatora. W przypadku sygnałów modulowanych amplitudowo stosuje się tzw. *detektory*¹⁾, a w przypadku sygnałów modulowanych częstotliwościowo — *demodulatory częstotliwościowe*.

Po otrzymaniu w wyniku demodulacji prądu małej częstotliwości należy go wzmocnić i dopiero wtedy przetworzyć na odpowiadające mu dźwięki.

Słuchawki i głośniki

Tej ostatniej operacji możesz dokonać za pomocą *słuchawek*, jeżeli audycji chcesz słuchać sam, bez dokuczania sąsiadom lub za pomocą *głośnika* jeżeli wspólnie chcesz uszczęśliwić wszystkich.

Najbardziej rozpowszechnionym typem słuchawek są słuchawki elektromagnetyczne. Słuchawka składa się z cienkiej membrany stalowej umieszczonej przed elektromagnesem. Gdy przez elektro-

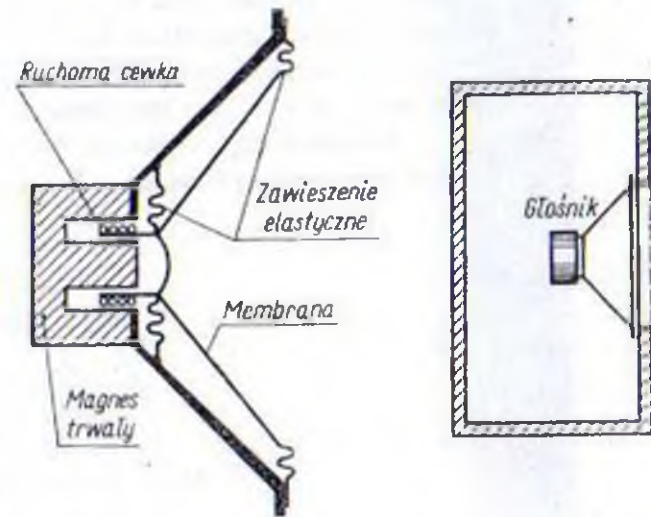


Rys. 54. Budowa słuchawki telefonicznej: 1 — elektromagnesy, 2 — obudowa, 3 — membrana, 4 — nakrętka mocująca membranę do obudowy

magnes przepływa prąd małej częstotliwości, wówczas powoduje drgania membrany, a ta z kolei wywołuje powstanie fal dźwiękowych.

Jeśli idzie o głośniki, to jeszcze niedawno były wykonywane zgodnie z zasadą działania słuchawki, która przed chwilą opisaliśmy. Przed membranę umieszczano stożkową tubę, która nadawała kierunek falam dźwiękowym.

Obecnie stosuje się przede wszystkim *głośniki elektrodynamiczne* oparte na tej samej zasadzie działania co mikrofony dynamiczne. Na dość dużej



Rys. 55. Głośnik elektrodynamiczny

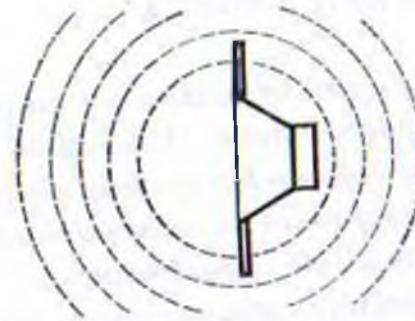
elastycznej membranie w kształcie stożka wykonanej z papieru impregnowanego lub z plastyku, na jej najwęższym końcu jest zamocowana ruchoma cewka, przez którą przepływa prąd małej częstotliwości. Cewka ta w kształcie cylindra, jest umieszczona w pierścieniowej szczelinie silnego magnesu trwałego.

Domyślasz się łatwo, że w tym przypadku powstaje zjawisko odwrotne do występującego w mikrofonie dynamicznym: w każdym okresie prądu ruchoma cewka przesuwa się w przód i w tył ze względu na wzajemne oddziaływanie jej zmiennego pola magnetycznego i pola magnesu trwałego.

Ruchoma cewka, pociągając za sobą dużą membranę powoduje wytwarzanie dość silnych fal dźwiękowych.

Jednakże, ze względu na to, że membrana skierowuje dźwięki równie dobrze do przodu jak i do tyłu, następuje osłabienie tonów niskich. Wynika to z faktu, że odpowiadające im fale dźwiękowe są dość długie. Kiedy fale przychodzące z tyłu spotykają się z falami wypromieniowanymi przez przednią ścianę membrany, następuje ich zsumowanie w przeciwnych fazach i w rezultacie wzajemne osłabienie.

Aby uniknąć tej niedogodności, należy dokonać oddzielenia fal promieniowanych do przodu i do tyłu. W tym celu można zastosować drewniany ekran, który dla zapewnienia właściwej skuteczności powinien mieć wymiary kilku metrów. Taki ekran zajmowałby zbyt dużo miejsca. Można również w tym celu stosować ścianę wybijając w niej otwór o wymiarach głośnika.



Rys. 56. Fale wysyłane przez głośnik: do przodu i do tyłu

Prostsze i praktyczniejsze rozwiązanie polega na zastosowaniu obudowy wystarczających rozmiarów, która pochłania fale wysyłane przez tylną ścianę membrany.

Obecnie właśnie to rozwiązanie jest stosowane dla większości głośników. W odbiornikach radiofonicznych zadanie obudowy spełnia sama skrzynka odbiornika.

W odbiornikach przenośnych skrzynka ta jest zbyt małych wymiarów, aby mogła zapewnić bardzo dobre odtwarzanie muzyki. Dlatego też w *torach Hi-Fi*¹⁾, tzn. w urządzeniach odtwarzających z najwyższą jakością, stosuje się głośniki w oddzielnych wystarczająco dużych obudowach.

Sądzę, że wyrobiłem Ci wystarczający ogólny pogląd na budowę nadajników i odbiorników radiofonicznych. Nie wyjaśniłem jednak żadnego z procesów wzmacniania, modulacji czy detekcji, a nawet wytwarzania drgań wielkiej częstotliwości.

Do zrozumienia tego wszystkiego trzeba przede wszystkim przestudiować działanie lamp elektronowych, tranzystorów i innych elementów półprzewodnikowych.

Myślę, że od Waszego następnego spotkania zaczniecie poruszać te zagadnienia.

¹⁾ Hi-Fi — High Fidelity (ang.) — wysoka wierność (odtwarzania) — (przyp. tłum.).

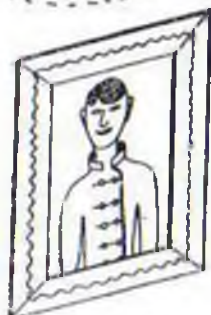
¹⁾ Czyli demodulatory amplitudowe (przyp. tłum.).

POGAWĘDKA SZÓSTA

Zwykła antena nie jest jedynym urządzeniem umożliwiającym odbiór fal elektromagnetycznych. Mądralski wyjaśnia teraz Pytalskiemu jak w tym celu wykorzystuje się antenę ramową. Następnie Mądralski wyjaśnia budowę i działanie diody oraz jej zastosowanie w procesie prostowania i detekcji. Kończy przypomnieniem niegdyś stosowanych detektorów kryształkowych.

OD ANTENY RAMOWEJ DO DIODY

Anteny ramowe



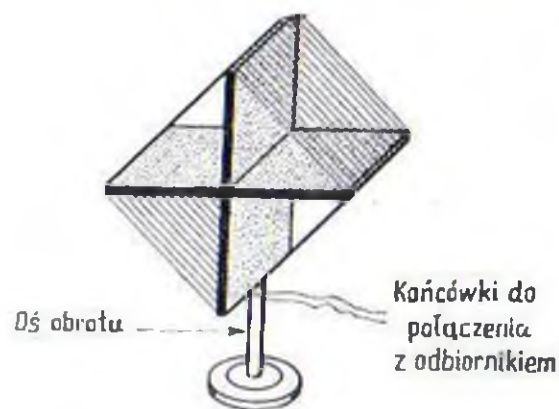
Mądr. — Teraz, mój drogi Ignasiu, dzięki wyjaśnieniom mojego wuja masz jasny pogląd na sposób, w jaki dokonuje się nadawania i odbioru radiofonicznego. Będziemy więc mogli przejść do analizy podstawowych elementów, które w obu tych procesach biorą zasadniczy udział. Zaczęę od lamp elektronowych.

Pyt. — Jest jednak coś co mi nie daje spokoju. Zgodnie z tym co mówił Twój wuj, fale elektromagnetyczne indukują w antenie odbiorczej bardzo małe prądy. Przypuszczam, że antena jest wykonana z przewodu o pewnej długości. Otóż mój przenośny odbiornik tranzystorowy działa bardzo dobrze bez żadnej anteny. Wystarczy, żebym go ustawił w określonym kierunku zależnym od nadajnika, którego chcę słuchać, i odbiór mam bardzo dobry. Jak to się dzieje bez żadnej anteny?

Mądr. — Nie masz racji mówiąc o braku anteny. Twój odbiornik ma doskonałą antenę. Ale to nie jest zwykła antena tylko antena ramowa.

Pyt. — Do tej chwili słyszałem tylko o programach ramowych, ale co to jest antena ramowa nie mam pojęcia.

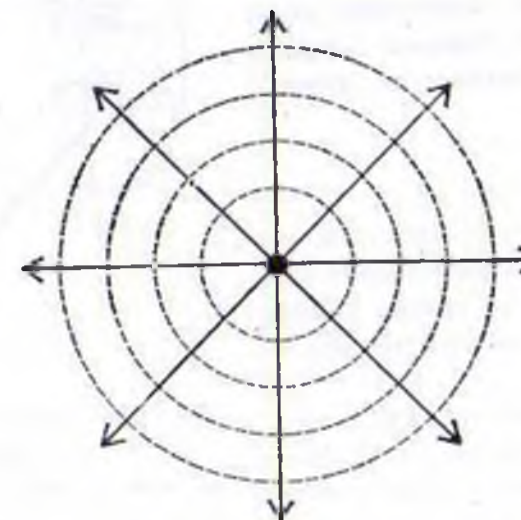
Mądr. — Jest to po prostu cewka, w której zmienne pole magnetyczne fal radiowych indukują prądy. Niegdyś stosowano anteny ramowe umieszczone na zew-



Rys. 57. Antena ramowa do odbioru fal elektromagnetycznych

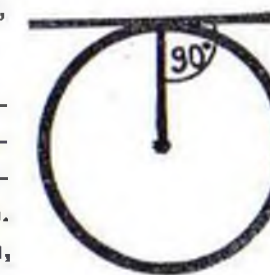
natrz odbiorników. Taką antenę stanowiła pewna liczba zwojów nawiniętych na dwóch skrzyżowanych deseczkach. Dzięki temu powstawała cewka o przekroju kwadratowym, a więc w kształcie ramy. Do pionowej deseczki była przymocowana podstawka, która służyła za oś obrotu umożliwiającą zorientowanie cewki we wszystkich kierunkach.

Jak sama nazwa wskazuje, w falach elektromagnetycznych występują jednocześnie linie pola elektrycznego i linie sił pola magnetycznego.



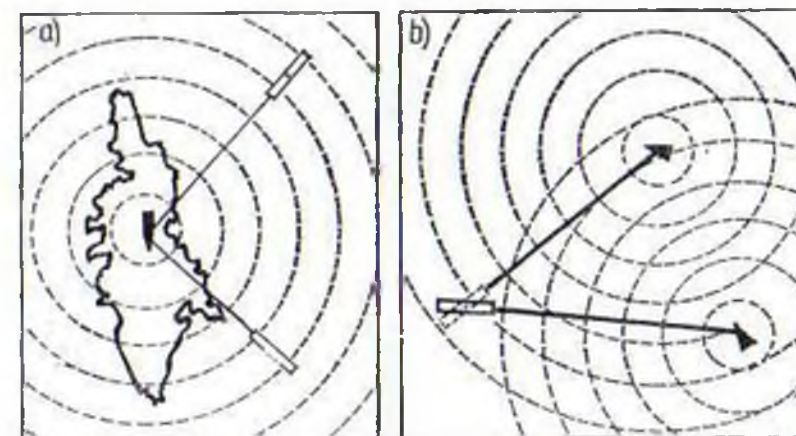
Rys. 58. W środku znajduje się antena nadawcza. Strzałki reprezentują linie sił pola elektrycznego, okręgi — linie sił pola magnetycznego

Pyt. — Myślę nawet, że jedne są prostopadłe do drugich. Linie sił pola elektrycznego są zorientowane w kierunku propagacji, ponieważ są prostopadłe do anteny nadawczej, w której przepływają ładunki elektryczne. Tworzą one swego rodzaju promienie okręgów utworzonych z kolei przez linie sił pola magnetycznego. Otóż można powiedzieć, że promień okręgu jest prostopadły do tej części okręgu, której dotyczy.

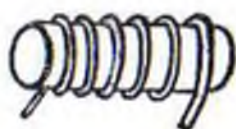


Radiogoniometria

Mądr. — Matematyk poprawiłby cię mówiąc, że promień jest prostopadły do stycznej do okręgu w rozpatrywanym punkcie. Wszystko to jednak, co przed chwilą powiedziałeś, jest całkowicie słuszne.



Rys. 59. Orientując dwie anteny ramowe w kierunku na nadajnik, wyznacza się jego położenie (a). Kierując antenę ramową na dwa nadajniki wyznacza się położenie odbiornika (b)



W takim razie łatwo zrozumiesz, że linie sił pola magnetycznego fali radiowej indukują prąd w cewce, którą jest antena ramowa wtedy, kiedy oś cewki pokrywa się z kierunkiem linii sił. Ponieważ linie sił pola magnetycznego są prostopadłe do kierunku na nadajnik, konieczne jest, aby płaszczyzna zwojów anteny ramowej była zorientowana dokładnie, właśnie w tym kierunku.

W rezultacie, aby odebrać fale określonego nadajnika należy ustawić płaszczyznę anteny ramowej w jego kierunku. Zjawisko to umożliwiło zresztą zrealizowanie radiogoniometrii, czyli systemu wyznaczania dokładnego kierunku, z którego są wysyłane fale elektromagnetyczne.

Przyznasz użyteczność tego systemu w nawigacji morskiej i lotniczej. Jeżeli ma się do dyspozycji dwa radiogoniometry umieszczone w dużej odległości jeden od drugiego, to wyznaczając za pomocą każdego z nich kierunek, z którego wysyła fale radiowe obiekt ruchomy np. statek lub samolot, można w łatwy sposób określić pozycję tego obiektu przez wykreślenie na mapie odpowiednich prostych. W punkcie przecięcia się tych prostych znajduje się szukany obiekt.

Pyt. — Zastanawiam się, czy nie jest możliwe odwrotne postępowanie polegające na wyznaczaniu ze statku lub samolotu kierunku na dwa stałe nadajniki o dokładnej znanej pozycji.

Mądr. — Oczywiście, ta metoda radiogoniometrii jest również stosowana. Jednakże, obecnie radiogoniometry są z powodzeniem zastępowane radarami, o których powiem Ci nieco później.

Anteny ferrytowe

Pyt. — Wróćmy więc do pytania, które postawiłem na początku naszej rozmowy. Czy mam uważać, że mój przenośny odbiornik ma wewnątrz antenę ramową?

Mądr. — Oczywiście, Ignasiu. Ale najprawdopodobniej w postaci cewki nawiniętej na rdzeniu ferrytowym, stanowiącej antenę ferrytową.



Rys. 60. Obwód rezonansowy, w skład którego wchodzi antena ferrytowa

Pyt. — A co to jest rdzeń ferrytowy?

Mądr. — Jest to rdzeń magnetyczny o dużej przenikalności; w omawianym przez nas przypadku, w postaci pręta, wykonany z materiału składającego się z różnych tlenków ferromagnetycznych. Poszczególne ziarna tego materiału są od siebie izolowane.

Pyt. — Dlaczego?

Mądr. — W celu zmniejszenia do minimum prądów Foucault, to znaczy prądów indukowanych przez zmienne pole magnetyczne cewki w każdym przewodniku znajdującym się wewnątrz cewki. Dzięki izolowaniu ziaren magnetycznych, rezystancja rdzenia magnetycznego jest tak duża, że można go w praktyce uważać za izolator. W ten sposób prądy Foucault mają wartości równe zeru i nasza cewka, służąca za antenę ramową, nie traci bezużytecznie energii.

Pyt. — Ale po co stosuje się ten rdzeń magnetyczny!



Mądr. — Ponieważ wymiary anteny ramowej umieszczonej we wnętrzu odbiornika muszą być bardzo małe. Zastosowanie rdzenia zwiększa indukcijność cewki, ale przede wszystkim, zwiększa prądy indukowane przez fale elektromagnetyczne. Wynika to z faktu, że rdzeń ferrytowy ze względu na dużą przenikalność magnetyczną ułatwia przechodzenie liniom sił pola magnetycznego, co pociąga za sobą koncentrację fal wewnątrz utworzonej w ten sposób anteny ramowej.

Pyt. — W jaki sposób końcówki anteny ferrytowej są połączone z wejściem odbiornika?

Mądr. — Na ogół antena ferrytowa stanowi cewkę wejściowego obwodu rezonansowego. Dlatego też jest dołączona do okładzin kondensatora dostrojeniowego.

Pyt. — Rozumiem. Mam jeszcze jedno, ostatnie pytanie dotyczące tej anteny. Nie ma oczywiście żadnych trudności w zorientowaniu we właściwym kierunku odbiornika przenośnego. Nie można jednak obracać dużego, ciężkiego aparatu. Co się wówczas robi?

Mądr. — W tym przypadku obraca się nie odbiornik, a małą antenę ferrytową umieszczoną w jego wnętrzu. Do manipulacji służy specjalna gałka umieszczona na zewnątrz odbiornika.

Pyt. — Dziękuję Ci za wyjaśnienie wszystkich spraw związanych z odbiorem za pomocą anteny ramowej.

Emisja elektronowa

Mądr. — Do chwili obecnej rozmawialiśmy tylko o elementach biernych, gdzie prąd przepływa w przewodnikach o mniejszej lub większej rezystancji. Najwyższy czas zająć się czynnikami elementami czynnymi (aktywnymi).

Pyt. — Gdzie prąd płynie w czym?

Mądr. — W próżni lub w półprzewodnikach.

Pyt. — Odnoszę wrażenie, że kpisz sobie ze mnie. Jak można sobie wyobrazić przepływ prądu w próżni, która jest idealnym izolatorem, jeszcze lepszym niż suche powietrze?

Mądr. — A jednak elektrony z łatwością pokonują próżnię, pod warunkiem, że je się w niej umieści. W tym celu należy rozgrzać przewodnik do wysokiej temperatury. Wiesz co się dzieje w rozżarzonej materii?

Pyt. — Wiem. Jej cząsteczki poruszają się ruchami bezładnymi z tym większą prędkością, im wyższa jest temperatura.

Mądr. — Masz rację. I przychodzi taki moment, kiedy cząsteczki są tak rozdrżane, że elektrony znajdujące się na zewnętrznych orbitach atomów — a więc słabiej przyciągane przez jądra — opuszczają materię przechodząc do otaczającej ją przestrzeni.

Pyt. — W sumie przypomina to tacę wypełnioną owocami, z której przy potrząsaniu niektóre spadają.

Mądr. — Porównanie jest dobre. Nie zapytałeś mnie jednak, w jaki sposób rozżarza się materię, aby wywołać taką emisję elektronów. Na pewno można to zrobić za pomocą płomienia węglowego, gazowego lub benzynowego. Ale jeżeli Ci powiem, że w elektronice pierwszeństwo daje się energii elektrycznej, na pewno się ze mną zgodzisz.

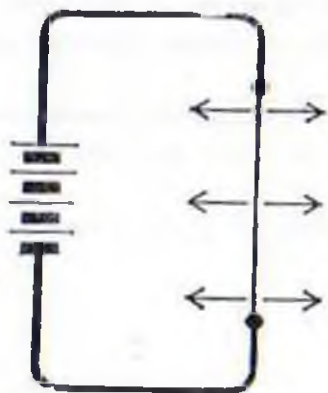
W praktyce stosuje się włókno, które zostaje rozżarzone do białości przez przepływający prąd elektryczny, podobnie jak to się dzieje w żarówce. Kiedy prąd przepływa przez rezystancję, energia elektryczna zamienia się w ciepło. A ponieważ



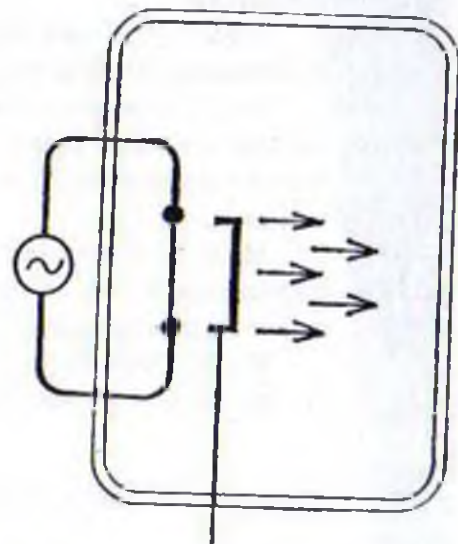
włókno jest bardzo cienkie więc jego rezystancja jest duża, a jego masa mała; kalorie, które się w nim wydzielają podnoszą jego temperaturę do wysokiej wartości.

Pyt. — I w taki właśnie sposób, jeżeli dobrze zrozumiałem, powstaje emisja elektronów na zewnątrz włókna?

Mądr. — Tak. Przynajmniej w przypadku lamp z *żarzeniem bezpośrednim*, w których włókno rozżarzone do białości emituje elektrony. Jednakże powszechnie stosuje się lampy z *żarzeniem pośrednim*, w których włókno jest otoczone cienką warstwą materiału izolacyjnego i umieszczone wewnątrz niklowej rurki. Na powierzchnię



Rys. 61. Emisja elektronów przez włókno żarzone bezpośrednio



Rys. 62. Elektrony wysyłane przez katodę żarzoną pośrednio

rurki jest naniesiona cienka warstwa emisyjna składająca się z rozmaitych tlenków, zwłaszcza baru i strontu, przystosowana do emitowania elektronów przy niezbyt wysokiej temperaturze.

Pyt. — Jaki jest cel komplikowania w ten sposób układu emisji elektronów?

Mądr. — Dzięki żarzeniu pośredniemu, żarzące się włókno jest elektrycznie odizolowane od warstwy emitującej elektrony. Umożliwia to dokonywanie żarzenia równie dobrze za pomocą prądu stałego, jak i zmiennego. *Prąd żarzenia* odgrywa oczywiście rolę zupełnie pomocniczą.

Lampy z żarzeniem pośrednim opracowano około 1930 r. Właśnie ten fakt umożliwił realizację odbiorników zasilanych z sieci. Przedtem, przy stosowaniu lamp żarzonych bezpośrednio, dla zapewnienia stałej emisji elektronów, trzeba było żarzyć włókna z baterii o napięciu 4 V.

Obecnie lampy z żarzeniem pośrednim są bez trudności żarzone napięciem zmiennym o wartości 6,3 V uzyskiwanym dzięki obniżeniu napięcia sieci za pomocą transformatora.

Prostowanie prądu i detekcja

Pyt. — Wiem już, w jaki sposób wywołuje się emisję elektronów, ale nie wiem po co? Do czego mogą służyć elektrony rozrzucone w przestrzeni? Zastanawiam się nawet czy nie będą narażone na zderzenia z cząsteczkami powietrza, które spotykają na swojej drodze?

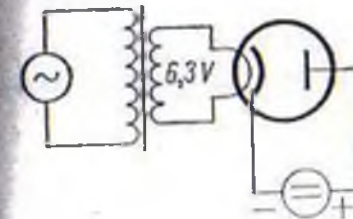
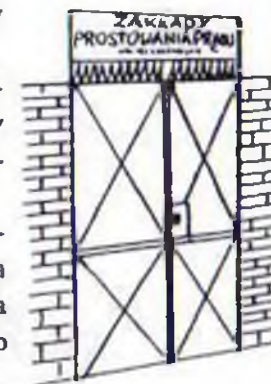
Mądr. — Nie ma obawy, ponieważ taki miotacz elektronów umieszcza się w



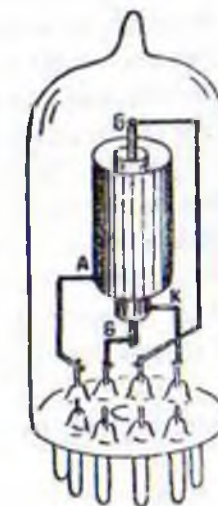
lampie próżniowej, to jest w bańce szklanej, z której wypompowano powietrze, aby utworzyć w niej prawie idealną próżnię.

Nie pozwolimy jednak elektronom odpoczywać w tej próżni. Na wprost elektrody, którą jest nasz — nazwijmy go — ciepły nadajnik elektronów, umieścimy przewodzącą płytkę podniesioną do potencjału dodatniego względem naszej elektrody. Co się będzie działo?

Pyt. — Płytkę, dzięki dodatniemu potencjałowi, będzie przyciągać ku sobie elektrony wysyłane przez elektrodę ciepłą. A ponieważ między elektrodą wysyłającą elektrony a płytką, która je przyciąga, jest w rezultacie włączone źródło napięcia stałego, w obwodzie, którego część stanowi próżnia, będzie płynął prąd stały. To jest jednak niesamowite!



Rys. 63. Anoda w diodzie ma potencjał dodatni względem katody, co umożliwia jej przyciąganie elektronów



Rys. 64. Budowa diody: G — żarzenie, A — anoda, K — katoda

Mądr. — Tak, tak, właśnie w ten sposób jest zbudowana *dioda*. Ma więc ona dwie elektrody: elektrodę, która wysyła elektrony i znajduje się na potencjale ujemnym, czyli *katodę*, oraz *anodę*, którą jest płytka podniesiona do potencjału dodatniego.

W obecnie produkowanych lampach katoda jest najczęściej umieszczana w osi pionowej bańki. Anoda jest wykonana w postaci cylindra otaczającego katodę.

Pyt. — A do czego może służyć taka dioda?

Mądr. — Załóżmy, że pomyliłeś się i załączyłeś odwrotnie baterię ustalającą napięcie między katodą a anodą. Anoda ma wtedy potencjał ujemny względem katody. Co się będzie działo w tym przypadku?

Pyt. — Anoda, mając potencjał ujemny, zamiast przyciągać, będzie odpychać elektrony wysyłane przez katodę. W rezultacie, w diodzie, między jej dwiema elektrodami nie będzie płynął żaden prąd.

Mądr. — Dobrze. Załóżmy teraz, że między dwie elektrody zamiast baterii dołączysz źródło napięcia zmiennego.

Pyt. — Zgoda. Widzę do czego prowadzisz. W tym przypadku, w tych półokresach, w których anoda ma potencjał dodatni, od katody do anody będzie płynął prąd¹⁾. Natomiast w pozostałych półokresach, kiedy anoda ma potencjał ujemny, nie będzie przepływu prądu.

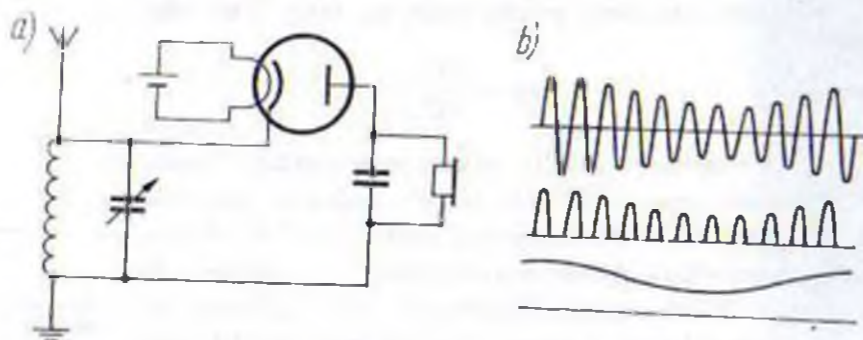
Mądr. — Widzisz więc, że nasza dioda przewodzi tylko w jednym kierunku i w związku z tym umożliwia *prostowanie* prądu zmiennego. Właśnie dlatego uważa się ją za *wentyl*.

¹⁾ Elektronowy (przyp. tłum.).



Właściwość prostowania, jaką wykazuje dioda jest bardzo cenna w radiofonii. Przypominasz sobie kształt prądu wielkiej częstotliwości modulowanego amplitudowo prądem małej częstotliwości uzyskiwanym w wyniku przetwarzania dźwięków na sygnały elektryczne.

Wspomniany prąd modulowany ustali w wejściowym obwodzie rezonansowym odbiornika napięcie o takim samym kształcie. Doprrowadźmy to napięcie między anodę a katodę diody. Zostanie ono wyprostowane, ponieważ przejdą tylko napięcia odpowiadające półokresom, w których anoda ma potencjał dodatni.



Rys. 65. Dioda w układzie detekcyjnym prądu wielkiej częstotliwości. W wyniku detekcji przez słuchawki płynie prąd małej częstotliwości (a). Prądy w układzie detekcyjnym; od góry do dołu: prąd wielkiej częstotliwości, prąd wyprostowany przez diodę, prąd małej częstotliwości uzyskany dzięki kondensatorowi (b)

Przepuśćmy uzyskany w ten sposób prąd przez słuchawki dołączone równolegle do kondensatora. Kondensator będzie się ładować „półwkami” napięcia wielkiej częstotliwości odtwarzając w ten sposób prąd małej częstotliwości odpowiadający nadawanym dźwiękom. I właśnie te dźwięki usłyszysz w słuchawkach.

W tym przypadku mówi się, że dioda dokonała detekcji, czyli *zdetektowała* prąd wielkiej częstotliwości. Dzięki detekcji, wydzielano z niego prąd małej częstotliwości, którym był modulowany.

Pyt. — Podsumowując, jeżeli dobrze zrozumiałem, zasadniczym zadaniem diody jest prostowanie prądu, co umożliwia detekcję prądów indukowanych przez fale radiowe.

Mądr. — Tak. Zanonuj sobie również, że oprócz diody próżniowej, do detekcji można wykorzystać każdy inny element wykazujący właściwość prostowania prądu. W początkach radiofonii stosowano szeroko, w tym celu, detektor kryształkowy. Detektor taki składał się z kryształu siarczku ołowiu, tak zwanej galeny, i sprężynki zakończonej ostrzem. Ostrze stykało się z kryształem, a w miejscu styku prąd płynął tylko w jednym kierunku. Detektor tego rodzaju był dużo czulszy od diodowego. Toteż „odbiornik kryształkowy” był bardzo rozpowszechniony w latach dwudziestych.

Mówiąc ogólniej, każdy styk między dwoma przewodnikami różniącymi się kształtem, materiałem lub nawet temperaturą powoduje powstanie asymetrii będącej przyczyną zjawiska prostowania.

Jednakże obecnie stosuje się przede wszystkim prostowniki półprzewodnikowe, których działanie wyjaśnię Ci w przyszłości.

Tymczasem stwierdzam, że jesteś zmęczony i że Twoja głowa pochylila się jakbyś miał zaraz zasnąć. Do jej wyprostowania potrzebny Ci odpoczynek.



Profesor Radiol przechodzi:

OD DIODY DO TRIODY

Profesor uzupełnia najpierw wypowiedzi swojego siostrzeńca szczegółami działania diody, następnie opisuje budowę triody, jej podstawowe parametry i charakterystyki oraz układy wzmacniaczy wielkiej częstotliwości.

Miło mi stwierdzić, Ignasiu, że doskonale opamiętałeś wiadomości związane z zasadą działania i szczegółami budowy tego wentyla elektronicznego, którym jest dioda.

Do wypowiedzi mojego drogiego siostrzeńca dorzucę kilka szczegółów, przede wszystkim kilka wartości liczbowych.

Temperatura i próżnia

Chciałbym Ci powiedzieć do jakich temperatur należy rozgrzać katody. W przypadku lampy żarzonej bezpośrednio, włókno, najczęściej wykonane z tungstenu, osiąga temperaturę rzędu 2000°C. W lampach żarzonych pośrednio cienki pokrywający katodę emitują elektrony przy niższych temperaturach, zawartych na ogół między 800 a 900°C.

Mądralski mówił Ci, że w lampie musi być próżnia. W istocie ilość powietrza w lampie znniejsza się dobre dziesięć miliardów razy. Nie przeszkadza to jednak, że nawet przy tak małym ciśnieniu w lampie znajduje się jeszcze kilkadziesiąt bilionów (milionów milionów) cząsteczek powietrza. W każdym milimetrze sześciennym jest ich około 80 000. Nie obawiaj się, gęstość cząsteczek w tych warunkach jest niezwykle mała. W istocie wymiary cząsteczek są tak mikro-mikroskopijne, że w tym przypadku średnia odległość między dwiema sąsiednimi cząsteczkami jest 20000 razy większa od ich średnicy. Oznacza to, że elektrony z łatwością pokonują odległość od katody do anody nie zderzając się z cząsteczkami powietrza.

Jest to bardzo ważne. Jeżeli elektron przenika do cząsteczki, to z uwagi na swój ładunek sprawia, że ta cząsteczka staje się ujemna lub jak często

mówimy zostaje *zjonizowana* ujemnie. Jon, który powstaje w ten sposób jest przyciągany przez nala-dowaną dodatnio anodę. Nie jest pożądane, żeby anoda pokrywała się wskutek tego warstwą cząste-czek powietrza.

Prędkość, natężenie i nasycenie prądu

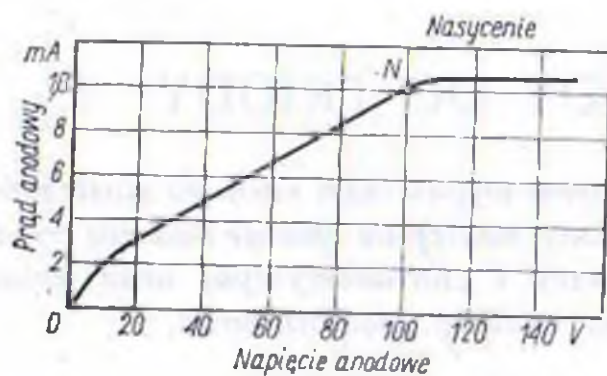
Jaka jest prędkość elektronów biegnących w próżni między katodą a anodą?

Ze względu na to, że nie napotykają one żadnych przeszkód pokonują tę przestrzeń z dużą prędkością. Jeżeli potencjał anody względem katody wynosi $U_a = 200$ V, prędkość elektronów jest rzędu 9000 km/s.

Przypominasz sobie, że w przewodnikach prędkość poszczególnych elektronów (nie mieszając z prędkością ogółu elektronów tworzących prąd) jest raczej mała.

Jeśli idzie o natężenie prądu anodowego diody, to zależy ono oczywiście od napięcia U_a między anodą a katodą. Im napięcie to jest wyższe, to jest im anoda jest bardziej dodatnia w stosunku do katody, tym silniej przyciąga ona elektrony emitowane przez katodę i tym samym natężenie prądu jest większe. Jeszcze raz mamy tu do czynienia z obwo-dem podlegającym prawu Ohma.

Jednakże to prawo nie może być stosowane powyżej pewnej wartości napięcia U_a między anodą a katodą. Rzeczywiście, przy pewnej wartości tego napięcia, prąd anodowy I_a osiąga *nasycenie*: wszystkie elektrony emitowane przez katodę zostają przy-ciągnięte przez anodę. W takim razie na nic się zda dowolne powiększanie jej potencjału; natężenie prądu nie może już wzrosnąć i zachowuje stałą wartość

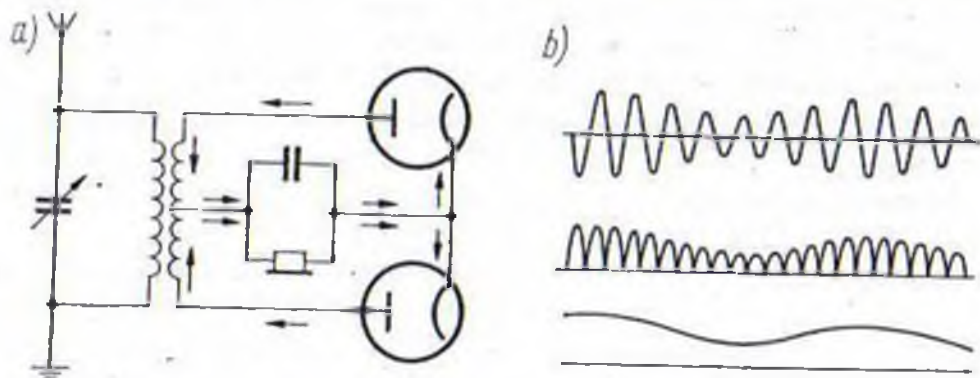


Rys. 66. Zmiany prądu anodowego w funkcji napięcia między anodą a katodą. Powyżej punktu N prąd już nie wzrasta, ponieważ osiąga nasycenie

Prostowanie dwupołówkowe

Wyjaśniłeś Genku, że dioda dzięki swoim właściwościom prostowniczym może służyć jako detektor. Pokazałeś również, w jaki sposób umożliwia ona wydzielenie z napięcia wielkiej częstotliwości modulowanego amplitudowo sygnału modulującego malej częstotliwości.

Jeszcze skuteczniejszą detekcję można zapewnić stosując dwie diody połączone zgodnie ze schematem, który dla Was rysuję. W układzie tym każda



Rys. 67. Układ umożliwiający dwupołówkowe prostowanie napięcia wielkiej częstotliwości (a). Prądy w układzie detekcyjnym; od góry do dołu: prąd wielkiej częstotliwości, prąd wyprostowany (prądy wyprostowane przez diody płyną w tym samym kierunku), prąd malej częstotliwości (b). (Uwaga: Na schemacie, podobnie jak i na dalej umieszczanych nie zaznaczono włókien żarzenia lamp)

z diod prostuje jedną z dwóch połówek prądu. Jeżeli w jednym półokresie dodatni potencjał na anodzie ma górna dioda, to w następnym półokresie — dolna. Prądy wyprostowane przez każdą z diod płyną przez słuchawki w tym samym kierunku. W ten sposób kondensator dołączony równolegle do słuchawek bez trudu formuje prąd wynikający z faktu, że wszystkie połówki mają ten sam kierunek.

wokół tego potencjału zmienia się w obu kierunkach potencjał siatki, ale w ten sposób, żeby nie osiągnął on nigdy wartości dodatniej.

Współczynnik amplifikacji i nachylenie

Zmiany potencjału siatki wywołują dużo większy wpływ na natężenie prądu anodowego niż zmiany potencjału anody. Siatka, umieszczona tuż przy

Działanie siatki

Przejdźmy teraz od diody do triody. W tym celu wstawmy między katodę a anodę trzecią elektrodę: *siatkę*. Siatka jest wykonana w postaci cylindrycznej spirali otaczającej katodę lub w postaci kratownicy o wąskich oczkach.

Jeżeli będziemy zmieniać potencjał takiej siatki względem katody, to zauważymy jak silny wpływ wywiera ona na natężenie prądu anodowego. W istocie im potencjał siatki jest bardziej ujemny, tym silniej odpycha ona elektrony emitowane przez katodę i tym bardziej przeszkadza elektronom w osiągnięciu anody.

I przeciwnie, jeżeli uczynisz potencjał siatki dodatni względem katody, to siatka przyciągając elektrony emitowane przez katodę będzie przyspieszać ich ruch, w związku z czym wzrośnie natężenie prądu anodowego.

Jednakże, gdy siatka ma potencjał dodatni, wówczas pomagając anodzie robi jej również konkurencję, gdyż przechwytuje pewną liczbę elektronów. Powstający w ten sposób prąd siatki nie jest zjawiskiem pożądanym. Dlatego, aby go uniknąć *polaryzuje* się siatkę ustalając na niej pewien stały potencjał ujemny w stosunku do katody. I właśnie

katodzie skutecznie reguluje liczbę elektronów docierających do anody.

To właśnie powoduje zdolność *wzmacniania* triody. Określa się ją stosunkiem zmiany potencjału anody dU_a do zmiany potencjału siatki dU_s , wywołujących jednakową zmianę prądu anodowego. Stosunek ten nosi nazwę *współczynnika amplifikacji* i jest oznaczany grecką literą μ_a (mi). Tak więc

$$\mu_a = \frac{dU_a}{dU_s}$$

Zalóżmy, że dla zwiększenia natężenia prądu anodowego o 1 mA należy podnieść potencjał anody U_a o 40 V potencjał siatki U_s o 2 V. W tym przypadku współczynnik amplifikacji $\mu_a = 40:2 = 20$

Współczynnik amplifikacji zależy głównie od bliskości siatki i katody. Im odległość między nimi jest mniejsza, tym współczynnik amplifikacji jest większy. Jest on odwrotnie proporcjonalny do kwadratu tej odległości.

Dlatego też w lampach o dużym współczynniku amplifikacji odległość między siatką a katodą wynosić może tylko 1/8 mm, co odpowiada grubości cienkiego papieru listowego. Współczynnik amplifikacji triod jest na ogół mniejszy od 100.

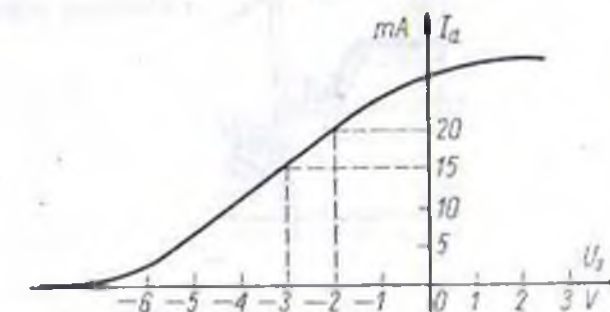
Podstawowym parametrem triody jest jej *nachylenie*. Terminem tym określa się zmianę natężenia prądu anodowego (w miliamperach) wywołaną zmianą potencjału siatki względem katody o 1 V. Nachylenie S_a , w zależności od konstrukcji lampy, może mieć wartość od 1 do 15 mA/V (miliamperów na volt).

Charakterystyki triody

Z pewnością zastanawiasz się, dlaczego ten parametr określa się słowem „nachylenie”. Zrozumiesz to rozpatrując krzywą pokazującą, jak zmienia się natężenie prądu anodowego I_a w funkcji potencjału siatki U_s . Widzisz, że im ta krzywa wzrasta szybciej, to znaczy im większe jest jej nachylenie, tym większa jest zmiana prądu I_a wywołana zmianą napięcia U_s o 1 V.

Można również wykreślić całą rodzinę takich krzywych, z których każda odpowiada określonej wartości napięcia anodowego U_a . Z pewnością zauważasz, że im ono jest większe, tym wcześniej rozpoczyna się przepływ prądu. Rzeczywiście, gdy potencjał siatki jest bardziej ujemny, to w większym

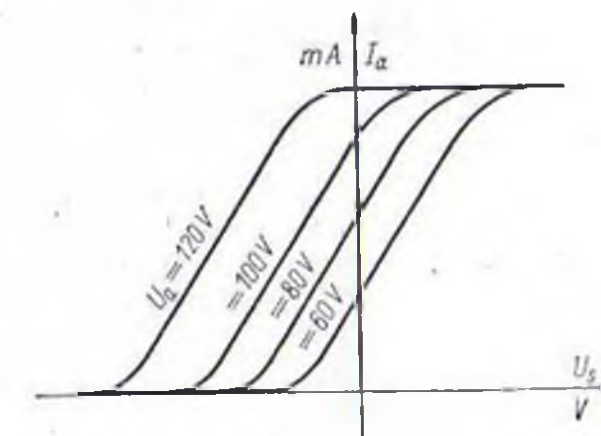
stopniu przeciwstawia się przepływowi elektronów. Jednakże jeżeli zwiększy się potencjał na anodzie, to przyciąganie wywołane tym potencjałem neutralizuje przeciwdziałanie siatki i umożliwia przepływ prądu.



Rys. 68. Charakterystyka triody pokazująca zmiany prądu anodowego I_a w funkcji napięcia na siatce U_s . Jest to tzw. charakterystyka siatkowa

W dużym zakresie zmian napięcia siatki, krzywe są prostoliniowe i równoległe. Oznacza to, że nachylenie pozostaje stałe i niezależne od wartości napięcia anodowego.

Wreszcie wszystkie krzywe zaginają się, stają się poziome i przechodzą w jedną krzywą. Następuje to wtedy, jak się bez wątpienia domyślasz, kiedy osiąga się wartość prądu nasycenia.

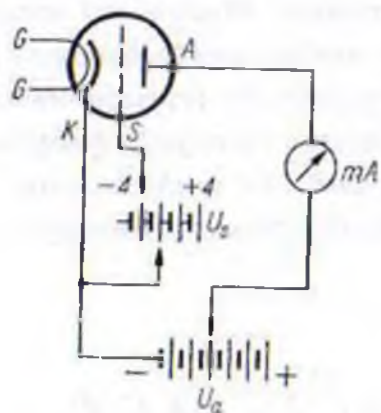


Rys. 69. Rodzina charakterystyk siatkowych dla różnych wartości napięcia U_a

Dysponując rodziną takich krzywych można łatwo znaleźć wartość nachylenia. Wystarczy w tym celu wyznaczyć różnicę prądów anodowych odpowiadających dwu punktom oddalonym o 1 V na prostej poziomej przecinającej krzywą.

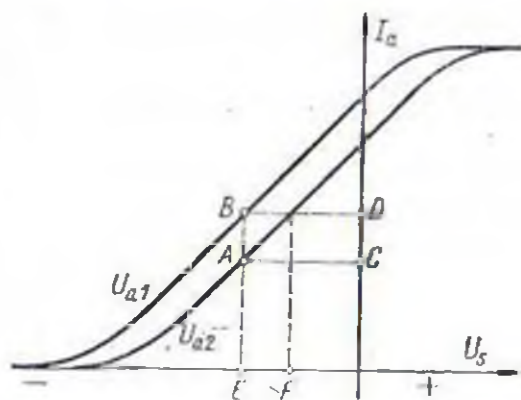
Można również z rodziny charakterystyk wyznaczyć wartość współczynnika amplifikacji. W tym celu patrzy się, jakie są wartości prądów anodowych

C i D odpowiadające punktom A i B, które znajdują się na dwóch różnych charakterystykach wykreślonych dla dwóch napięć anodowych U_{a1} i U_{a2} , ale odpowiadają temu samemu napięciu siatkowemu E.



Rys. 70. Układ do zdejmowania charakterystyk triody. Przy ustalonym napięciu anodowym U_a zmienia się napięcie siatki U_g i odczytuje się wskazania miliamperomierza. Do wyboru napięć służą zaczepty

mu E. Następnie na jednej z krzywych na przykład dla napięcia U_{a2} stwierdza się, że taką samą zmianę prądu anodowego uzyskuje się przez zmianę po-



Rys. 71. Za pomocą krzywych dla dwóch różnych napięć anodowych U_{a1} i U_{a2} wyznacza się współczynnik amplifikacji triody. Jest on równy ilorazowi $(U_{a1} - U_{a2})$ i $(E - F)$

tencjału siatki z E na F. Dla znalezienia wartości współczynnika amplifikacji wystarczy podzielenie różnicy $U_{a2} - U_{a1}$ przez różnicę potencjałów siatek.

Rezystancja wewnętrzna

Jest wreszcie trzeci podstawowy parametr, z którym powinienem Cię zapoznać: *rezystancja wewnętrzna* triody. Tak właśnie nazywa się stosunek zmiany napięcia anodowego dU_a do wywołanej nią

zmiany prądu anodowego dI_a . Rezystancję wewnętrzną oznacza się grecką literą ρ (ro). Tak więc

$$\rho_a = \frac{dU_a}{dI_a}$$

Bardzo łatwo jest wyznaczyć wartość ρ_a z krzywych, które wykreśliliśmy poprzednio. W tym celu na tej samej prostej pionowej (a więc przy stałym potencjale siatki) znajdujemy punkty A i B odpowiadające prądom C i D. Dzielimy różnicę napięć anodowych $U_{a1} - U_{a2}$ przez różnicę obu prądów i znajdujemy wartość rezystancji wewnętrznej. Rezystancja wewnętrzna triody ma wartość kilku, a nawet kilkudziesięciu tysięcy omów.

Zależność między trzema parametrami

Wszystkie trzy parametry, o których mówiłem, są ze sobą powiązane. W istocie, przypomnę Ci definicję tych trzech wielkości charakteryzujących triodę, a więc współczynnika amplifikacji μ_a , nachylenia S_a i rezystancji wewnętrznej ρ_a .

$$\mu_a = \frac{dU_a}{dU_g} \quad S_a = \frac{dI_a}{dU_g} \quad \rho_a = \frac{dU_a}{dI_a}$$

Pomnóżmy przez siebie dwie ostatnie wielkości.

$$S_a \cdot \rho_a = \frac{dI_a \cdot dU_a}{dU_g \cdot dI_a} = \frac{dU_a}{dU_g} = \mu_a$$

Widzisz więc, że współczynnik amplifikacji jest równy iloczynowi nachylenia przez rezystancję wewnętrzną.

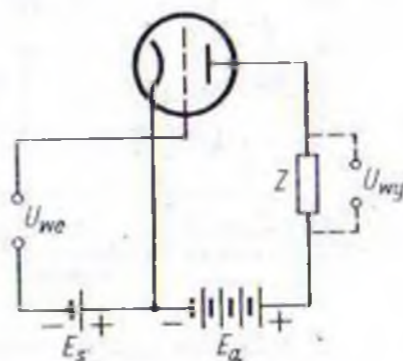
Zastosowanie triody we wzmacniaczu wielkiej częstotliwości (w.cz.)

Czuję Ignasiu, że słuchając mnie teraz wykazujesz pewne zniecierpliwienie. Zadajesz sobie pytanie, na co przyda Ci się cała ta teoria triody skoro nie wyjaśniłem Ci jeszcze jej zastosowania. Otóż teraz z łatwością możemy poruszyć ten temat.

Przede wszystkim zobaczymy, jakie zastosowanie może mieć trioda w procesie wzmacniania. Postępuje się tutaj w sposób następujący. Napięcie zmienne U_{we} , które trzeba wzmocnić, doprowadza się do wejścia lampy, to znaczy między siatkę a katodę. Domyślasz się z łatwością, dlaczego postępuje się właśnie w ten sposób. Otóż dlatego, że małe zmia-

ny napięcia między tymi dwiema elektrodami powodują duże zmiany natężenia prądu anodowego.

Właśnie te zmiany prądu anodowego wytwarzają interesujące nas napięcie wyjściowe. W tym



Rys. 72. Ogólny układ wzmacniacza. Napięcie wejściowe U_{we} zostaje wzmocnione przez triodę. Na wyjściu, na impedancji Z otrzymuje się napięcie wyjściowe U_{wy} .

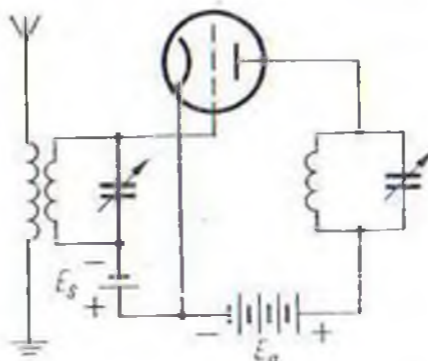
celu należy prąd anodowy przepuścić przez impedancję Z. Na tej impedancji powstaje napięcie wyjściowe U_{wy} .

Najbardziej ogólny układ wzmacniacza zawiera źródło napięcia polaryzacji siatki E_g oraz źródło napięcia anodowego E_a .

Znając właściwości triody rozumiesz z pewnością, że małym zmianom napięcia wejściowego U_{we} odpowiadają dużo większe zmiany napięcia wyjściowego U_{wy} .

Oczywiście źródła napięć stałych mogą być różne: zamiast baterii napięcia anodowego można zastosować wyprostowane napięcie sieci, a napięciem polaryzacji może być spadek napięcia na pewnej rezystancji. Wszystko to Ci wkrótce opiszę.

Tymczasem rozpatrzmy konkretny przypadek wzmacniania prądu wielkiej częstotliwości, takiego jaki pojawia się w wejściowym obwodzie rezonansowym odbiornika.



Rys. 73. Siatka może być spolaryzowana ujemnie za pomocą baterii E_g .

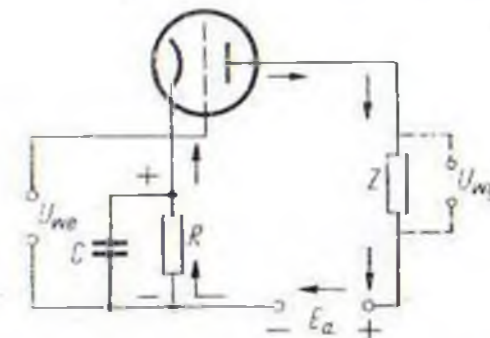
Napięciem wejściowym jest więc napięcie, które ten bardzo mały prąd wytwarza na zaciskach obwodu rezonansowego. Napięcie to doprowadza się między siatkę a katodę, przy czym siatkę polaryzuje się ujemnie za pomocą baterii E_g .

Jaki będzie charakter impedancji wyjściowej znajdującej się w obwodzie anodowym? Będzie to po prostu obwód rezonansowy dostrojony do tej samej częstotliwości co obwód wejściowy. W takim razie jego impedancja w rezonansie będzie duża, a w związku z tym zmiany natężenia prądu anodowego wytworzą na jego zaciskach napięcie dużo większe od napięcia wejściowego.

Zwróć uwagę, ponadto, że mała rezystancja cewki obwodu rezonansowego nie zmniejsza wartości stałego napięcia anodowego występującego między anodą a katodą. W ten sposób anoda ma stale duży potencjał dodatni.

Polaryzacja przez spadek napięcia

Nie chcę nadużywać Twojej cierpliwości i dlatego pokażę Ci teraz, jak w bardzo prosty sposób można uzyskać ujemną polaryzację siatki. W tym celu między katodę a ujemny biegun źródła napięcia anodowego E_a włącza się rezystor R. Prąd anodowy płynący w obwodzie, w którym znajduje się ten rezystor, wytwarza na nim spadek napięcia.



Rys. 74. Ujemną polaryzację siatki uzyskano tu dzięki spadkowi napięcia na rezystancji R wytworzonymu przez prąd anodowy

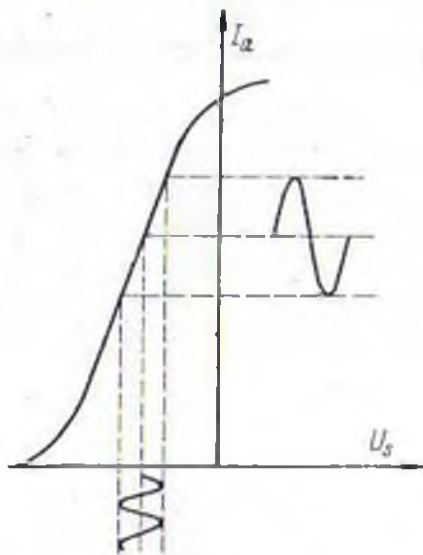
Dzięki temu spadkowi katoda uzyskuje potencjał dodatni względem ujemnego bieguna źródła napięcia anodowego E_a . Zwróć jednak uwagę, że siatka za pośrednictwem obwodu wejściowego, jest również połączona z tym biegunem, a zatem w prosty i piękny sposób zostaje spolaryzowana ujemnie względem katody.

Nie można jednak dopuścić przepływu składowej zmiennej prądu anodowego przez rezystor R, to jeżeli ta składowa przepływa przez rezystor R, to

wytwarza zmienne napięcie między siatką a katodą, i to napięcie, które jest w przeciwnej fazie w porównaniu z napięciem wejściowym. Smutną konsekwencją tego faktu jest zmniejszenie wzmacnienia.

W celu uniknięcia tej niedogodności należy równolegle do rezystora R przyłączyć kondensator C o wystarczająco dużej pojemności. Dzięki temu składowa zmienna prądu anodowego zostaje skierowana do kondensatora, ponieważ droga wiodąca przez kondensator jest dla prądu zmiennego dużo łatwiejsza do pokonania niż droga prowadząca przez rezystor. W ten sposób przez rezystor przepływa tylko składowa stała prądu anodowego, która zapewnia stałą polaryzację siatki.

Wartość rezystancji R należy dobrać tak, aby napięcie polaryzacji odpowiadało punktowi znajdującemu się na prostoliniowej części charakterystyki zmian prądu anodowego w funkcji napięcia

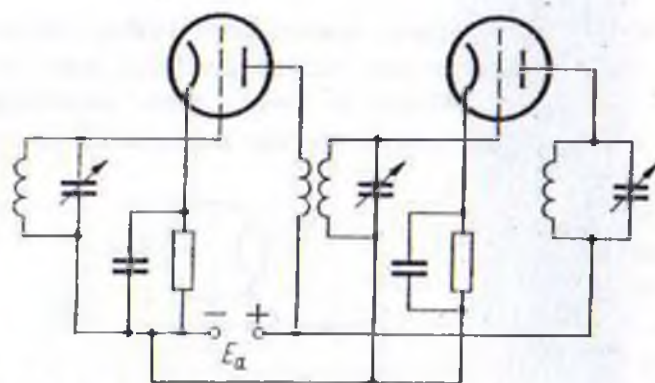


Rys. 75. Zmiany napięcia siatkowego we wzmacniaczu powinny ograniczać się do liniowej części charakterystyki prądu anodowego I_a w funkcji napięcia siatki U_g .

między siatką a katodą. Konieczne jest również, aby zmiany napięcia między siatką a katodą następowały na prostoliniowej części krzywej, gdyż tylko wówczas natężenie prądu anodowego będzie do nich proporcjonalne.

Sprzężenia międzystopniowe

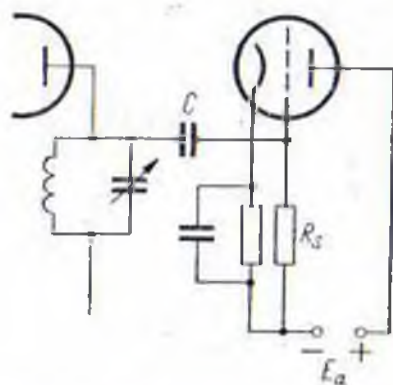
Domyślasz się, że ze względu na bardzo małe napięcie uzyskiwane w obwodzie wejściowym odbiornika, należy zapewnić wzmacnienie tego napięcia przez zastosowanie kilku wzmacniaczy lub, jak zwykle mówimy, kilku stopni wzmacnienia.



Rys. 76. Sprzężenie dwóch stopni wzmacniacza wielkiej częstotliwości za pomocą transformatora z dostrojonym obwodem wtórnym

W tym celu napięcie wyjściowe poprzedniego stopnia powinno stanowić napięcie wejściowe stopnia następnego. Jak to zrobić w stopniach wielkiej częstotliwości?

Sprzężenia obu stopni można dokonać za pomocą transformatora wielkiej częstotliwości, którego uzwojenie pierwotne jest włączone w obwód anodowy pierwszej triody, a uzwojenie wtórne w obwód wejściowy, a więc między siatką a katodę, drugiej triody. Jedno z dwu uzwojeń transformatora powinno być dostrojone do odbieranej częstotliwości. Można również dostroić obydwa uzwojenia.



Rys. 77. Sprzężenie dwóch stopni za pomocą kondensatora

Sprzężenia stopni można również dokonać za pomocą kondensatora C , który napięcie zmienne występujące na anodzie poprzedniej lampy przekazuje do siatki następnej lampy. W tym przypadku stały potencjał siatki — nie można jej jednak zostawić w powietrzu — zapewnia rezystancja R_s , na ogół o dużej wartości...

Widzę, że taśma magnetofonu zbliża się do końca. Kończę więc na tym. A jednak jest jeszcze tyle do powiedzenia na temat lamp elektronowych. Pozostawiam to mojemu drogiemu siostrzeńcowi.

POGAWĘDKA SIÓDMA

Po wyjaśnieniu w jaki sposób trioda może pracować jednocześnie jako detektor i wzmacniacz, Mądralski omawia różne sposoby wzmacniania napięć małej częstotliwości. Następnie robi przegląd układów sprzęgających: transformatorowych i oporowo-pojemnościowych zapewniających połączenie między stopniami wzmacniającymi. Na zakończenie analizuje różne warianty układu przeciwobnego.

WZMACNIACZE M.CZ.

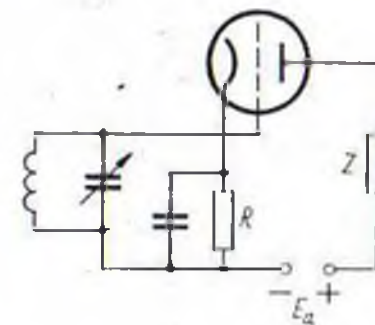
Wzmacniający detektor

Pyt. — Z dużym zainteresowaniem wysłuchałem wyjaśnień Twojego wuja dotyczących triody i jej zastosowania w układzie wzmacniacza wielkiej częstotliwości. Chciałbym teraz przejść do małej częstotliwości, oczywiście z pominięciem detekcji, ponieważ wiemy już w jaki sposób zapewnia ją dioda.

Mądr. — A czy wiesz, że detekcję można również przeprowadzić za pomocą triody?

Pyt. — Czy w tym celu trzeba ją przekształcić w diodę, łącząc na przykład siatkę z anodą?

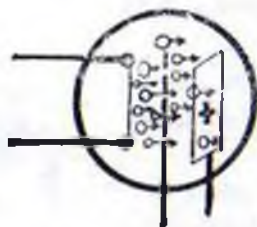
Mądr. — Można oczywiście to zrobić, ale po co?; ten sposób nie jest stosowany, ponieważ nie wykazuje żadnych zalet w porównaniu z układem ze zwykłą diodą. Natomiast układ, którego schemat właśnie Ci pokazuję zapewnia jednocze-



Rys. 78. Dzięki dużej wartości rezystancji polaryzującej R , lampa nie tylko wzmacnia, ale i poddaje detekcji napięcie wielkiej częstotliwości doprowadzone do siatki

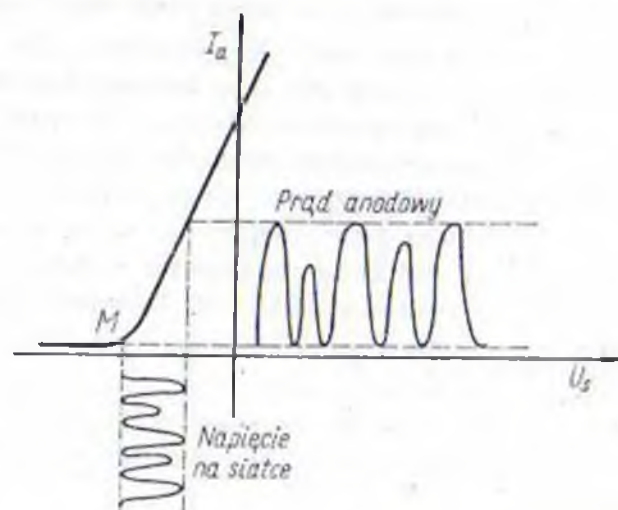
śnie detekcję i wzmacnienie. Na impedancji Z , znajdującej się w obwodzie anodowym pojawia się większe napięcie małej częstotliwości niż w przypadku zastosowania diody.

Pyt. — Kpisz sobie ze mnie, Genku? Układ przedstawia po prostu stopień wzmacnienia wielkiej częstotliwości taki, jaki opisał Twój wuj.

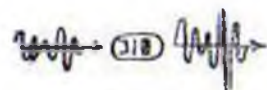


Mądr. — Istotnie. Ale tutaj rezystancji R w układzie polaryzacji daje się dostatecznie dużą wartość, aby punkt pracy odpowiadał najmniejszej wartości prądu anodowego. Na charakterystyce prądu anodowego ten punkt znajduje się całkiem z lewej strony.

W tych warunkach dodatnie połówki napięcia wielkiej częstotliwości doprowadzonego do siatki są wzmacniane, podczas gdy ujemne połówki zmniejszają tylko i tak prawie równy zeru prąd anodowy.



Rys. 79. Detekcja na zakrzywieniu charakterystyki prądu anodowego w punkcie pracy M



Wzmacniacz m.c.z.

Widzisz więc, że napięcie, które powstaje na impedancji Z składa się prawie wyłącznie z połówek odpowiadających dodatnim połówkom napięcia wielkiej częstotliwości doprowadzonego do siatki. W ten sposób jest ono jednocześnie wzmacnione i poddane procesowi detekcji.

Pyt. — Widzę, że trioda jest naprawdę uniwersalna. W takim razie możesz ją grzecznie poprosić również o wzmacnienie napięć małej częstotliwości? Przypuszczam, że wzmacniacz w.c.z. służy przede wszystkim do zwiększenia czułości odbiornika, natomiast wzmacniając napięcie m.c.z. zwiększamy głośność odbiornika.

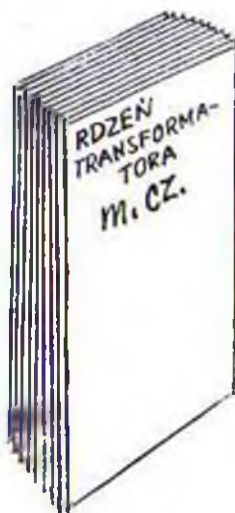
Wzmacniacze m.c.z.

Mądr. — Zapominasz, że wzmacniacz w.c.z. dzięki swoim obwodom strojonym służy również do zapewnienia dobrej selektywności. Ponadto, gdy amplituda napięć poddawanych detekcji jest dostatecznie duża — detekcja jest skuteczniejsza.

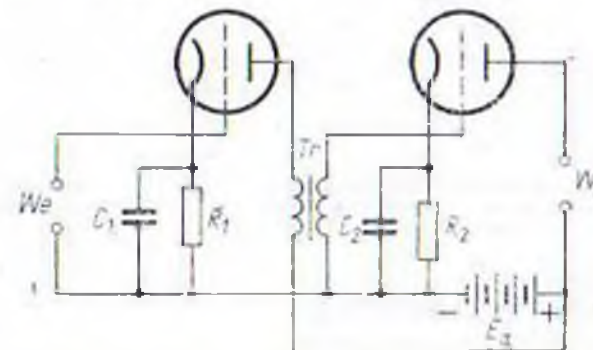
Ale masz rację twierdząc, że wzmacnienie sygnału małej częstotliwości zapewnia większą głośność. Głośnik, wymaga oczywiście pewnej mocy. W przypadku odbiornika domowego w zupełności wystarcza kilka watów. Jeżeli jednak chce się nagłośnić dużą salę, do głośników trzeba dostarczyć kilkadziesiąt watów. Setki watów są potrzebne wówczas, gdy głośniki mają być słyszane przez tłumy ludzi zgromadzone na wolnym powietrzu.

Moc wymaganą przez głośnik dostarcza normalnie stopień końcowy odbiornika. Co się tyczy stopni małej częstotliwości, które go poprzedzają, to ich zadanie ogranicza się do wzmacniania napięć uzyskanych w wyniku detekcji.

Pyt. — W jaki sposób napięcia małej częstotliwości są przekazywane z jednego stopnia do drugiego?



Mądr. — Istnieje kilka sposobów sprzężenia stopni. Można w tym celu zastosować transformator małej częstotliwości, którego uzwojenie pierwotne włącza się w obwód anodowy poprzedniego stopnia, a uzwojenie wtórne między siatkę a katodę następnego stopnia (szeregowo z rezystorem polaryzującym czyli katodowym i kondensatorem blokującym dołączonym równolegle do tego rezystora).



Rys. 80. Dwa stopnie wzmacniacza małej częstotliwości sprzężone za pomocą transformatora Tr

Pyt. — Jak jest wykonany taki transformator? Widzę, że ma rdzeń magnetyczny.

Mądr. — Jest to niezbędne w zakresie małej częstotliwości. Po to, aby w rdzeniu nie powstawały zbyt silne prądy Foucault, składa się go z zespołu blach wykonanych z miękkiego żelaza i wzajemnie izolowanych.

Pyt. — Słowem, jeżeli dobrze rozumiem zmienny prąd anodowy płynący w uzwojeniu pierwotnym, wywołuje powstanie zmiennego napięcia na zaciskach uzwojenia wtórnego. I to właśnie napięcie zostaje doprowadzone do siatki następnego stopnia.

Sprzężenie oporowo-pojemnościowe

Mądr. — Dobrze, i dobrze również, że ta metoda wychodzi z użycia. Dodam, że należy stosować transformatory dobrej jakości umożliwiające jednakowe przeniesienie całego zakresu częstotliwości akustycznych, co wcale nie jest łatwe.

Jeżeli nie chcesz wydawać pieniędzy na pokrycie względnie dużej ceny takiego urządzenia, sprzężenia obu stopni małej częstotliwości możesz dokonać za pomocą dwóch rezystorów i jednego kondensatora. Włączysz jeden rezystor w obwód anodowy pierwszego stopnia i napięcie zmienne powstające na tym rezystorze prześlesz za pośrednictwem kondensatora do siatki lampy drugiego stopnia.

Jednakże nie możesz zostawić siatki w powietrzu. Kondensator nie zapewni jej stałego potencjału niezbędnego dla utrzymania z kolei stałego punktu pracy lampy. Dlatego siatkę łączy się przez rezystor o dużej rezystancji, tzw. rezystor upływowy do ujemnego bieguna źródła napięcia anodowego. Dodam jeszcze, że w miejscu rezystora w obwodzie anodowym można włączyć indukcyjność na rdzeniu magnetycznym.

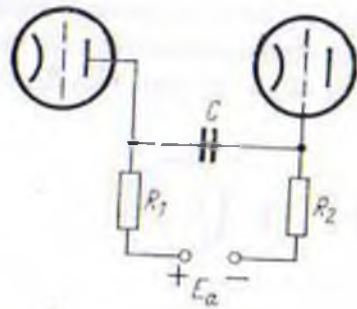
Pyt. — Nie można by zastosować układu oporowo-pojemnościowego we wzmacniaczu w.c.z.?

Mądr. — Można by oczywiście, ponieważ jego działanie jest praktycznie¹⁾ niezależne od częstotliwości. Ale to co jest korzystne w zakresie małej częstotliwości,

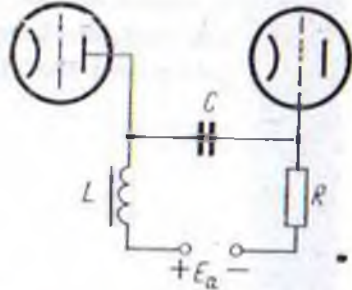
¹⁾ Przy założeniach upraszczających polegających m.in. na nieuwzględnianiu rozproszonych pojemności równoległych (przyp. tłum.).



nie jest korzystne w zakresie wielkiej częstotliwości, w którym należy zapewnić selektywność wzmacnienia. Tę natomiast można osiągnąć tylko przy zastosowaniu obwodów rezonansowych.



Rys. 81. Sprzężenie oporowo-pojemnościowe dwóch stopni małej częstotliwości



Rys. 82. Sprzężenie dwóch stopni wzmacniacza małej częstotliwości za pomocą indukcyjności i pojemności

Układ przeciwsobny

Pyt. — Ile stopni małej częstotliwości powinno być normalnie w odbiorniku radiofonicznym?

Mądr. — Najczęściej stosuje się dwa stopnie. Zadaniem pierwszego jest przede wszystkim zwiększenie napięcia małej częstotliwości. Głównym zadaniem drugiego, końcowego stopnia, polega na dostarczeniu do głośnika niezbędnej mocy.

Pyt. — Nie można w tym celu zastosować dwóch triod połączonych równolegle?, to znaczy z połączonymi razem katodami podobnie jak z połączonymi razem odpowiednio siatkami i anodami?

Mądr. — To jest możliwe do zrealizowania, a dzięki takiemu połączeniu podwaja się moc wyjściową. Korzystniej jednak dojść do tego realizując układ przeciwsobny, zwany często układem *push-pull*.

Pyt. — Co to jest? Po angielsku znaczy to „pchaj—ciągnij”. Co tu pcha za nim pociągnie?

Mądr. — Dotyczy to pola magnetycznego. Popatrz na schemat, który przed chwilą narysowałem. Widzisz, że lampa $L1$ przedwzmacniacza jest połączona ze stopniem końcowym składającym się z dwóch triod $L2$ i $L3$ za pomocą transformato-

ra m.c.z., którego uzwojenie wtórne, zawiera na środku odczep. Odczep ten jest połączony z ujemnym biegunem źródła napięcia anodowego.

Każda z końcówek uzwojenia wtórnego jest połączona z siatką jednej z dwu triod końcowych. Czy domyślasz się, w jaki sposób one pracują?

Pyt. — Myślę, że zachowują się one w sposób wyraźnie przeciwny. W istocie, przecież zmiany potencjału, doprowadzone do ich siatek za pośrednictwem uzwojenia wtórnego transformatora Tr_1 , mają przeciwne fazy.

Kiedy prąd indukowany w tym uzwojeniu płynie z góry na dół, to górną końcówkę czyni bardziej ujemną, a dolną bardziej dodatnią. W drugim półokresie sytuacja ulega odwróceniu. Oczywiście, jak zawsze, mówię Ci o kierunku prądu elektronów, a nie o umownym kierunku prądu elektrycznego.

Mądr. — A ja całkowicie Cię pochwalam.... Jak widzisz zmiany potencjałów doprowadzonych do siatek obu lamp końcowych zachodzą w przeciwnych kierunkach, co właśnie usprawiedliwia nazwę „push—pull”.

Pyt. — To mi przypomina dwóch chłopców, których widziałem w cyrku. Chłopcy ci stali na dwóch końcach deski opartej w środku o pręt. Kiedy jeden z nich skakał a potem spadał na deskę, wtedy z jego strony deska obniżała się względem pręta, ale w tym samym czasie następowało wyrzucenie do góry jego partnera. Ten z kolei, spadając przetrzucał deskę w drugą stronę. Cały cykl powtarzał się w jednokowy sposób... z małą częstotliwością.

Mądr. — No właśnie, nasze dwie lampy końcowe zachowują się w taki sam sposób. Tak więc w półokresie, w którym prąd anodowy jednej z dwu lamp wzrasta, to prąd drugiej — maleje. W czasie trwania drugiego półokresu sytuacja ulega zmianie.

Pyt. — To bardzo zabawne. Widzę jednak, że oba te prądy anodowe dopływają do końcówek uzwojenia pierwotnego drugiego transformatora, a ponieważ zmieniają się w przeciwnych kierunkach — zniosą się. A więc ten układ nic nie daje.

Mądr. — Bardzo się mylisz, Ignasiu. Popatrz uważnie na schemat. Stwierdzasz, że oba prądy anodowe wpływają do cewki z przeciwnych kierunków. A ponieważ zmiany tych prądów są również przeciwne, to w wyniku indukcji, w uzwojeniu wtórnym powstaną prądy płynące w tym samym kierunku, a więc prądy które się dodadzą.

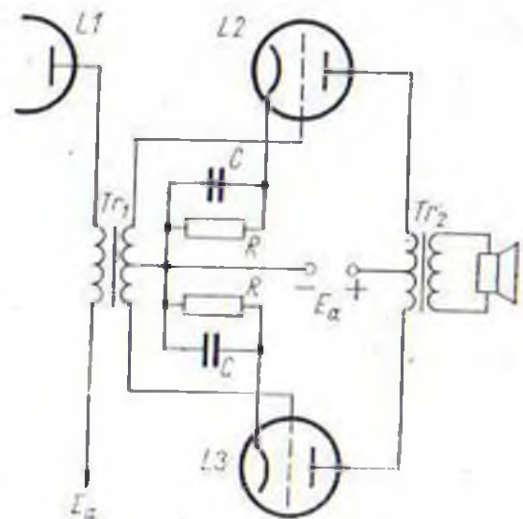
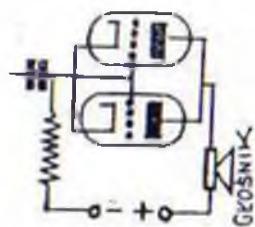
Pyt. — Poczekaj, Genku. Pozwól mi przeanalizować to dokładniej. Zakładam przypadek półokresu, w którym siatka lampy $L2$ staje się bardziej dodatnia, co pociąga za sobą wzrost jej prądu anodowego. W tym samym czasie siatka lampy $L3$ staje się bardziej ujemna, a więc jej prąd anodowy maleje.

Prąd wypływający z anody lampy $L2$ w górnej połowce uzwojenia pierwotnego transformatora wyjściowego Tr_2 płynie z góry na dół, natomiast prąd pochodzący z lampy $L3$ płynie z dołu do góry w dolnej połowce uzwojenia.

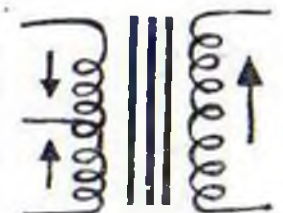
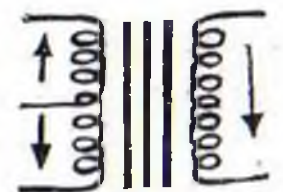
Założmy, że pierwszy z tych prądów indukuje w uzwojeniu wtórnym prąd, również płynący z góry na dół. Rzeczywiście — masz rację, drogi przyjacielu! — prąd lampy $L3$ zmniejsza się, ale płynie w przeciwnym kierunku niż prąd $L2$, a więc w uzwojeniu wtórnym zaindukuje prąd płynący również z góry na dół. Oba więc prądy bardzo grzecznie dodają się.

Mądr. — Cieszę się, że to dobrze zrozumiałeś. Dodam jeszcze, że układ przeciwsobny ma bardzo ważną zaletę wynikającą z faktu, że składowe stałe prądów anodowych lamp $L1$ i $L2$ płyną w uzwojeniu pierwotnym transformatora Tr_2 w przeciwnych kierunkach, w związku z czym w prosty sposób znoszą się bardzo dokładnie. Dzięki temu nie występuje magnesowanie rdzenia transformatora wyjściowe-

PUSH
PULL



Rys. 83. Wzmacniacz przeciwsobny małej częstotliwości



go, co znacznie zwiększa jego przenikalność magnetyczną i ułatwia indukowanie prądów w uzwojeniu wtórnym.

Ponadto, dzięki doskonałej symetrii układu, *zniekształcenia* wywołane pewną nieliniowością charakterystyk obu lamp końcowych znoszą się. Zjawisko to jest związane z przeciwnymi kierunkami przepływu prądów *anodowych*.

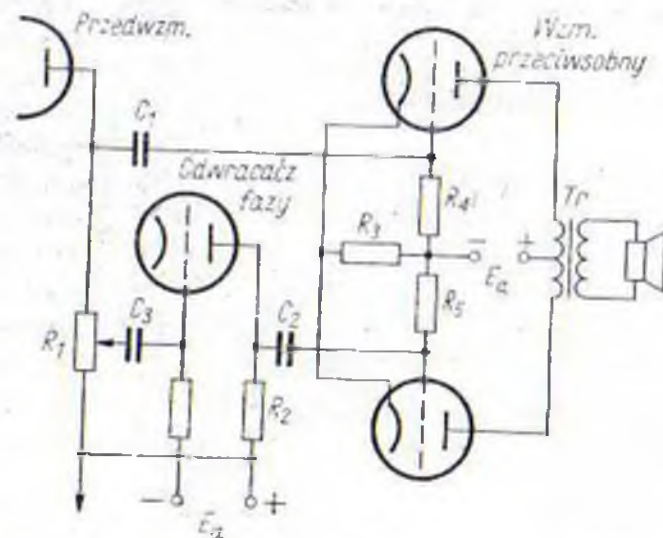
Lampowy odwracacz fazy

Pyt. — Stałem się teraz gorącym zwolennikiem układu przeciwsobnego. Obawiam się jednak, że jego koszt jest dość wysoki ze względu na cenę dwóch transformatorów małej częstotliwości z odczepami.

Mądr. — Jeżeli chcesz, to bez pierwszego można się obejść. Jego zadanie polegające na wytworzeniu dwóch napięć o przeciwnych fazach, doprowadzanych do lamp końcowych, można spełnić za pomocą innych środków. W tym właśnie celu można zastosować *odwracacz fazy*.

Wiesz, że napięcie zmienne pojawiające się na impedancji w obwodzie anody ma przeciwną fazę w porównaniu z napięciem występującym na siatce. Kiedy potencjał na siatce wzrasta, prąd anodowy również wzrasta, a to powoduje większy spadek napięcia na impedancji obciążenia w obwodzie anodowym, w związku z czym potencjał anody maleje.

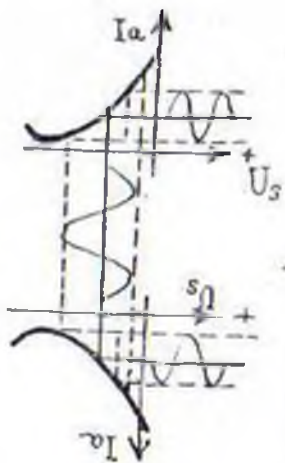
Tak więc, aby do jednej z dwu triod końcowych doprowadzić napięcie małej częstotliwości w przeciwnej fazie w porównaniu z fazą napięcia doprowadzonego do drugiej triody, stosujemy triodę odwracającą fazę.



Rys. 84. W tym układzie przeciwsobnym, transformator wejściowy zastąpiono odwracaczem fazy

W układzie, którego schemat leży przed Tobą, napięcie zmienne występujące na rezystancji R_1 , wskutek przepływu prądu anodowego lampy przedwzmacniacza, zostaje doprowadzone przez kondensator C_1 do siatki jednej z lamp układu przeciwsobnego.

Część tego napięcia występująca na odczepie rezystora R_1 zostaje doprowadzona przez kondensator sprzęgający C_3 do siatki lampy pracującej jako odwracacz fazy. Napięcie w odwróconej fazie występujące na rezystancji R_2 , która znajduje się w obwodzie anodowym odwracacza fazy, zostaje za pośrednictwem kondensatora C_2 doprowadzona do drugiej lampy układu przeciwsobnego.



Pyt. — A dlaczego do siatki odwracacza fazy doprowadza się tylko część napięcia występującego na rezystancji R_1 ?

Mądr. — Dlatego, że ta lampa, jak wszystkie w układzie, wzmacnia napięcie doprowadzone do jej siatki. Otóż konieczne jest, aby napięcia, które doprowadza się do siatek obu lamp układu przeciwsobnego, były równe, a różniły się tylko fazą. Właśnie dlatego zmniejsza się napięcie sterujące odwracacz fazy.

Jeżeli, na przykład, odwracacz fazy wzmacnia 5 razy, to z rezystora R_1 trzeba wziąć tylko 1/5 występującego na nim napięcia. W tym celu najlepiej jest zastosować rezystor z umieszczonym na nim ruchomym kontaktem, który umożliwia pobranie tylko części napięcia.

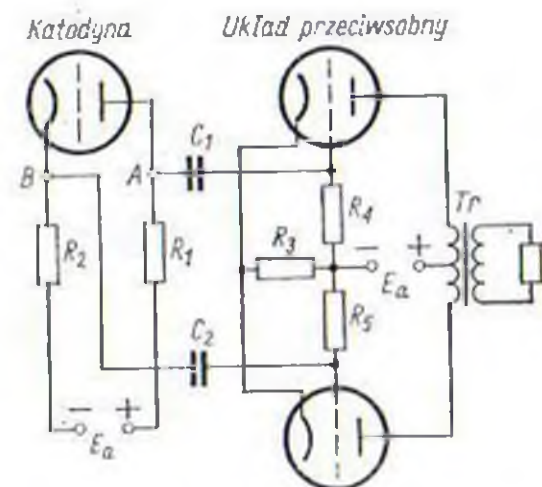
Taki rezystor wyposażony w regulowany odczep nosi nazwę *potencjometru*. Potencjometr jest na ogół¹⁾ wykonany z drutu oporowego nawiniętego na pasku materiału izolacyjnego. Po połączeniu obu końców paska powstaje cylinder. Na osi pionowej umieszczonej w środku cylindra zamocowuje się ruchomy kontakt dotykający drutu oporowego. Za pomocą gałki służącej do obracania osi, można tym kontaktem dotykać różnych punktów rezystora. W ten właśnie sposób powstaje zmienny odczep.

Katodyna

Pyt. — Nie głupi pomysł z tym odwracaczem fazy!

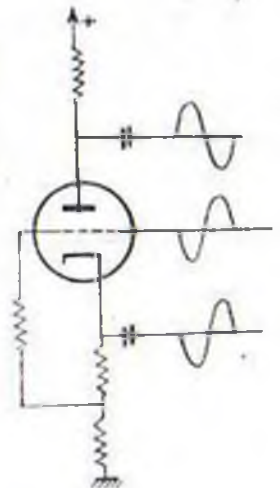
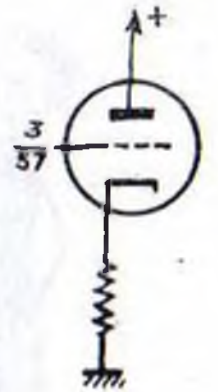
Mądr. — Odwrócenie fazy można również uzyskać za pomocą lampy pracującej w układzie *katodyny*. Termin i układ zostały zaproponowane przez pewnego francuskiego dziennikarza od spraw technicznych w 1930 r., wkrótce po ukazaniu się lamp pośrednio żarzonych. Tylko takie lampy umożliwiają realizację układu.

Pomysł jest bardzo prosty. Poza rezystancją umieszczoną między anodą a dodatnim biegunem źródła napięcia zasilania, obwód anodowy zawiera jeszcze drugą rezystancję włączoną między ujemnym biegunem źródła napięcia zasilania a katodę. Domyślasz się z łatwością, że kiedy potencjał siatki staje się bardziej dodatni, co powoduje wzrost prądu anodowego, potencjał na anodzie zmniejsza się, podczas gdy na katodzie zwiększa się.



Rys. 85. Układ przeciwsobny, w którym odwrócenie fazy napięcia wejściowego zapewnia katodyna. Napięcie sterujące lampy układu przeciwsobnego pobiera się z anody i z katody katodyny

¹⁾ Najczęściej stosuje się jednak potencjometry węglowe (przyp. tłum.).





Mamy więc na anodzie i katodzie katodiny napięcia o przeciwnych fazach. Za pomocą kondensatorów sprzęgających doprowadzamy je do siatek obu lamp układu przeciwsobnego.

Pyt. — Czy przy zastosowaniu katodiny uzyskuje się jednocześnie duże wzmocnienie?

Mądr. — Nie. Katodyna nie wzmacnia, ponieważ zmiany potencjału na katodzie są w fazie ze zmianami potencjału na siatce, w związku z czym napięcie sterujące katodynę zmniejsza się. Czego chcesz Ignasiu, nie można zbyt dużo wymagać od jednej triody.

Pyt. — I tak dobrze, że może służyć do detekcji i wzmacniania zarówno w zakresie wielkich jak i małych częstotliwości.

Mądr. — Jej możliwości nie ograniczają się tylko do tego. Stosuje się ją również do wytwarzania drgań. Dzisiaj jest zbyt późno, abym mógł Ci przedstawić budowę i działanie układu generacyjnego. Myślę jednak, że mój wuj nie odmówi sobie tej przyjemności, aby Ci to wyjaśnić.

Profesor Radiol rozpatruje:

DODATNIE SPRZĘŻENIE ZWROTNE, NADAWANIE I LAMPY WIELOELEKTRODOWE

Po wyjaśnieniu samego zjawiska dodatniego sprzężenia zwrotnego, profesor Radiol omawia jego różne zastosowania, a zwłaszcza tzw. detekcję z reakcją i wytwarzanie drgań. Następnie wyjaśnia, w jaki sposób w nadajniku drgania te zostają zmodulowane amplitudowo. Wreszcie, po rozpatrzeniu niebezpieczeństw związanych ze sprzężeniami szkodliwymi, omawia zastosowanie ekranów oraz działanie tetrod i pentod.

Macie rację, przyjaciele, podziwiając wszechstronność zastosowań lamp elektronowych. Bardzo chętnie wyjaśnię Wam, jak mogą one wytwarzać drgania. Przedtem jednak pokażę Wam, że trioda może również zapewnić tzw. detekcję siatkową.

Detekcja + wzmocnienie

Układ ten, niedawno bardzo popularny, narzuca siatce podwójną rolę: anody diody detekcyjnej i siatki lampy wzmacniającej.

Nasza siatka nie będąc spolaryzowana ujemnie przyjmuje pewną liczbę elektronów emitowanych przez katodę. Następuje to w czasie trwania dodat-

nich półokresów napięcia zmiennego występującego na zaciskach obwodu strojonego, a więc wtedy, kiedy siatka ma potencjał dodatni. Powstające w ten sposób jednokierunkowe prądy wytwarzają na rezystancji R_1 jednokierunkowe napięcia, które dzięki wygładzającemu działaniu kondensatora C_1 przetwarzają się w napięcie małej częstotliwości.

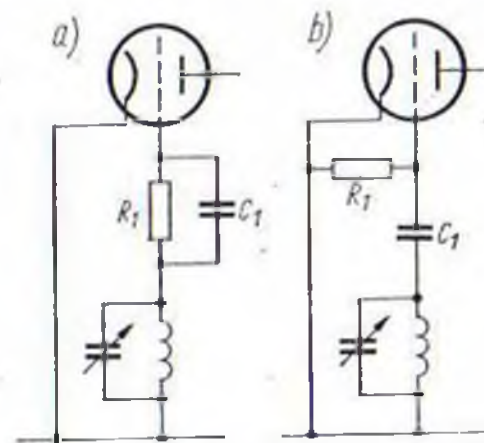
Napięcie to, wynikające z detekcji, wywołuje zmiany prądu anodowego lampy, która w ten sposób zapewnia również wzmocnienie małej częstotliwości.

Zauważcie, że rezystor R_1 o wartości jednego lub kilku megaomów może być również umieszczony bezpośrednio między siatką a katodą.

Zalety dodatniego sprzężenia zwrotnego

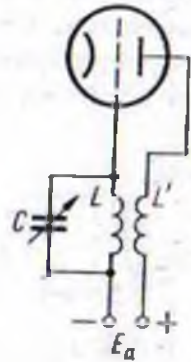
Do chwili obecnej posuwaliśmy się stale naprzód. W odbiorniku radiofonicznym przeszliśmy od anteny do obwodu wejściowego, następnie przez stopnie wzmocnienia wielkiej częstotliwości i detektor do wzmacniacza małej częstotliwości, którego stopień końcowy dostarcza mocy do głośnika.

Zobaczmy teraz, co się będzie działo, jeżeli prąd wielkiej częstotliwości, po wzmocnieniu, znowu doprowadzimy do wejścia odbiornika. W tym celu umieścimy w obwodzie anodowym lampy cewkę L' sprzężoną indukcyjnie z cewką L siatkowego obwodu rezonansowego.



Rys. 86. Detekcja siatkowa w triodzie następuje dzięki rezystorowi R_1 , który może być włączony między siatkę a katodę bądź przez obwód strojony (a), bądź bezpośrednio (b)

W cewce L' płynie prąd zmienny o takim samym kształcie jak w cewce L , ale wzmocniony. Będzie on indukował w cewce L prąd zmienny. Czy ten prąd będzie w fazie, czy w przeciwfazie w stosunku do prądu, który już płynie w cewce L ?



Rys. 87. Prąd anodowy przepływający przez cewkę L' indukuje prąd dodatniego sprzężenia zwrotnego w cewce L siatkowego obwodu rezonansowego

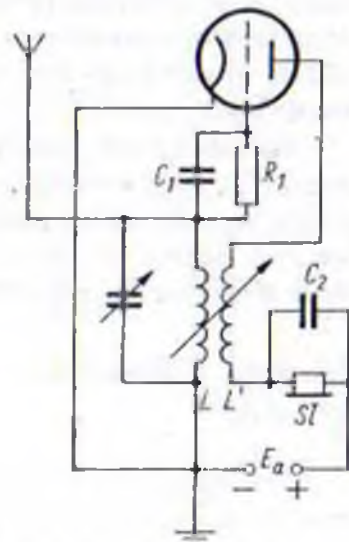
Zależy to od kierunku uzwojenia cewek. Przeto bez trudności, możemy tak nawinąć cewki, aby prąd indukowany w cewce L dzięki sprzężeniu jej z cewką L' zwiększał pierwotnie płynący prąd. W takich warunkach również napięcie zmienne występujące na siatce ulega powiększeniu. Napięcie to zwiększa z kolei zmiany prądu anodowego płynącego przez cewkę L' , w rezultacie również prądu indukowanego w cewce L i zjawiska przebiegają dalej w sposób, który już opisałem.

To zwrotne oddziaływanie z anody na siatkę nosi nazwę *dodatniego sprzężenia zwrotnego*. Domyślasz się na pewno, że wartość dodatniego sprzężenia zwrotnego zależy głównie od sprzężenia między cewkami. Im te cewki są silniej sprzężone, tym również dodatnie sprzężenie zwrotne jest silniejsze. W ten sposób wzmocnienie naszej triody może być znacznie zwiększone.

Detekcja z reakcją¹⁾

Jeszcze niedawno dodatnie sprzężenie zwrotne wykorzystywano w powszechnie wówczas stosowanym układzie detektora z reakcją²⁾. Był to detektor siatkowy (z układem R_1C_1), którego działanie opisałem Wam na początku. Cechą charakte-

rystyczną tego układu była obecność w obwodzie anodowym cewki L' włączonej szeregowo ze słuchawkami Sl , której sprzężenie z cewką L siatkowego obwodu rezonansowego było regulowane. W tym celu cewka reakcyjna L' była nawinięta na ruchomym korpusie, który umożliwiał zbliżanie lub oddalanie jej od nieruchomej cewki L .



Rys. 88 Odbiornik reakcyjny

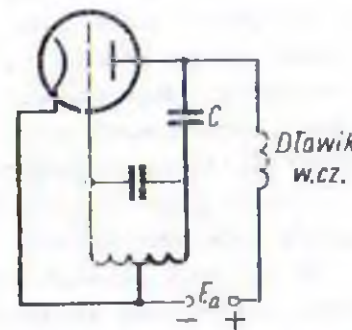
Reakcję (czyli dodatnie sprzężenie zwrotne) można było dzięki temu zwiększyć do maksimum, co zapewniało duże wzmocnienie i w rezultacie dużą czułość odbiornika. Za pomocą takich odbiorników radioamatorzy odbierali nawet bardzo odległe stacje.

Układy generatorów

Kiedy powiedziałem Wam, że zwiększano reakcję do maksimum, powinienem był Wam wyjaśnić, że nie należało przekraczać pewnej granicy, powyżej której lampa zaczynała wytwarzać drgania. I w ten oto sposób doszliśmy do zbadania podstawowego zjawiska, jakim jest wytwarzanie drgań za pomocą lamp elektronowych.

Drgania uzyskuje się więc dzięki skierowaniu do obwodu siatkowego dostatecznie dużej części energii występującej w obwodzie anodowym. Lampa wzmacnia napięcie pojawiające się w obwodzie siatkowym, a wzmocnione napięcie oddziałuje z powrotem na obwód siatkowy.

Dodatknie sprzężenie zwrotne, poza układem z cewką umieszczoną w obwodzie anodowym i sprzężoną z cewką obwodu siatkowego, można uzyskać za pomocą pomysłowego układu Hartleya. W ukła-



Rys. 89. W układzie Hartleya składowa zmienna prądu anodowego płynie przez część obwodu zaznaczoną grubszą linią

dzie tym prąd anodowy rozdziela się w dwu kierunkach: składowa zmienna przez kondensator C płynie w kierunku obwodu rezonansowego, podczas gdy składowa stała zostaje skierowana poprzez dławik w.c.z. do dodatniego bieguna źródła napięcia zasilania. Dławikiem w.c.z. nazywa się cewka, której indukcyjność przeciwdziała przepływowi prądu wielkiej częstotliwości.

Składowa zmienna prądu anodowego płynie więc przez część cewki obwodu rezonansowego, wyposażonej w zaczep połączony z katodą lampy. Składowa ta indukuje w obwodzie napięcie wystarczające do powstania drgań.

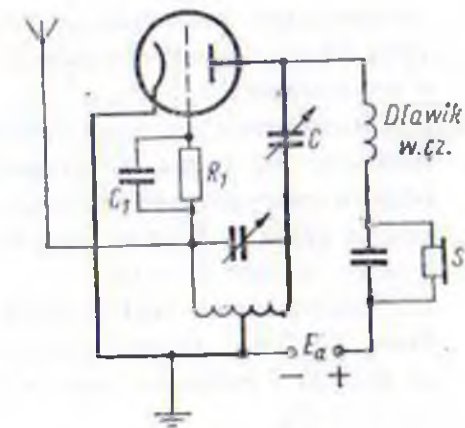
Na rysunku zaznaczyłem grubszą linią drogę prądu dodatniego sprzężenia zwrotnego. Myślę, że rysunek stał się przez to bardziej zrozumiały.

Zjawisko interferencji

Układ Hartleya mógł być również stosowany do odbioru reakcyjnego.

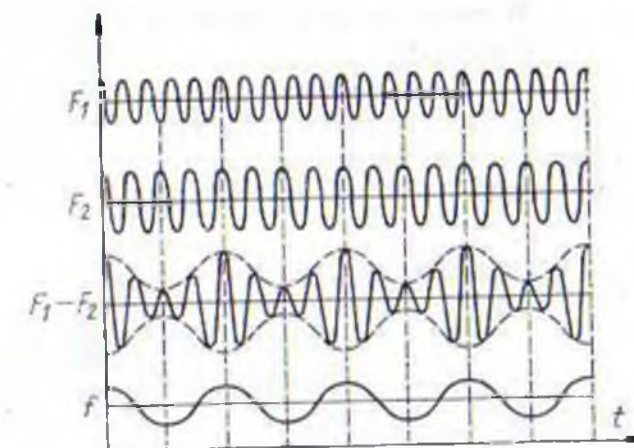
W tym celu do obwodu siatkowego włącza się rezystor R_1 i równolegle z nim połączony kondensator C_1 . Kondensator C , który przepuszcza prąd dodatniego sprzężenia zwrotnego, powinien być kondensatorem zmiennym umożliwiającym dokładne ustawienie reakcji. W ten sposób nie przekracza się punktu, poza którym zaczynają powstawać drgania. Obecność drgań sygnalizuje pojawienie się w słuchawkach gwizdu wywołanego zjawiskiem *interferencji*, o którym teraz pomówimy.

Zalóżcie, że drgania wytworzone dzięki dodatniemu sprzężeniu zwrotnemu mają częstotliwość F_1 ,



Rys. 90. Detekcja z reakcją przy zastosowaniu układu Hartleya

nico różną od częstotliwości F_2 sygnału odebranego przez antenę. Co da superpozycja tych dwóch częstotliwości: fal radiowych i wytworzonych drgań?



Rys. 91. W wyniku superpozycji dwóch drgań o częstotliwościach F_1 i F_2 powstaje drganie o częstotliwości $F_1 - F_2$. Po detekcji zostaje ono przekształcone w drganie f , którego częstotliwość jest równa różnicy częstotliwości drgań składowych

Rysuję dla Was przebiegi prądów o tych własnościach F_1 i F_2 . Na początku, jak widzicie, połówki obu przebiegów są ze sobą zgodne, w takim razie amplitudy odpowiadające przebiegowi wypadkowemu są równe sumie amplitud przebiegów składowych. Jednakże, ze względu na różnicę częstotliwości, zaczynają się uwidocznić odchylenia i wkrótce okazuje się, że nasze połówki są skierowane przeciwnie, a więc trzeba je odjąć. Następnie znowu zaczynają być w coraz większym stopniu zgodne i dalej tak jak już opisałem.

Stwierdzacie z pewnością, że amplitudy przebiegu wypadkowego okresowo zmieniają się.

Jeżeli policzycie liczbę okresów każdego z przebiegów składowych oraz liczbę okresów zmienności amplitudy przebiegu wypadkowego, dojdziecie do

¹⁾ Tym terminem określa się dodatnie sprzężenie zwrotne w zastosowaniu, o którym traktuje niniejsza część rozdziału (przyp. tłum.).

²⁾ Odbiornik, w którym stosowano taki detektor nazywał się odbiornikiem reakcyjnym (przyp. tłum.).

następującego podstawowego wniosku: superpozycja drgań o częstotliwościach F_1 i F_2 daje przebieg o częstotliwości $F_1 - F_2$.

Rzeczywiście, na moim rysunku drgania o częstotliwości F_1 , trwają 20 okresów. W tym samym odcinku czasowym drgania o częstotliwości F_2 wykazują 16 okresów. Przebieg wypadkowy $F_1 - F_2$ ma 4 okresy to jest 20 - 16.

Przepuszczając prąd o takim przebiegu przez diodę lub inny element prostowniczy, poddanie go detekcji i otrzymanie prąd małej częstotliwości $f = F_1 - F_2$.

Widzicie więc, że *superpozycja dwóch prądów zmiennych daje w wyniku prąd, którego częstotliwość jest równa różnicy częstotliwości tych dwóch prądów.*

Jeżeli są to dwa prądy wielkiej częstotliwości o mało różniących się częstotliwościami, ich superpozycja daje w wyniku prąd małej częstotliwości. W takim przypadku mówi się o *interferencjach* lub *dudnieniach*.

Można jednak dokonywać również superpozycji dwóch prądów o częstotliwościach bardzo różnych. I właśnie tak postępuje się przy nadawaniu w radiofonii.

Modulacja i nadawanie

Na stacji nadawczej wytwarza się najpierw drgania wielkiej częstotliwości. W tym celu stosuje się jeden z tych układów, które właśnie skończyliśmy omawiać, a w których drgania powstają dzięki dodatniemu sprzężeniu zwrotnemu. Otrzymane drgania wzmacnia się przy zastosowaniu metod, które już znamy.

Następnie moduluje się je prądami małej częstotliwości otrzymanymi w wyniku wzmacnienia prądów mikrofonowych. W jaki sposób przebiega proces modulacji?

Modulacja powstaje dzięki jednoczesnemu doprowadzeniu do siatki lampy napięcia wielkiej

częstotliwości i napięcia małej częstotliwości. Siatka powinna być spolaryzowana w taki sposób, aby punkt pracy lampy był umieszczony na początku charakterystyki. W takich warunkach, w czasie trwania ujemnych połówek napięcia małej częstotliwości, nie płynie żaden prąd anodowy. Natomiast w czasie trwania dodatnich połówek napięcia małej częstotliwości doprowadzone do siatki napięcie wielkiej częstotliwości spowoduje przepływ prądu anodowego, którego amplituda w każdym okresie w.c.z. będzie proporcjonalna do chwilowej wartości napięcia małej częstotliwości.

W ten sposób uzyskuje się prąd wielkiej częstotliwości modulowany amplitudowo sygnałem małej częstotliwości. Nie chcę Was męczyć obliczeniami trygonometrycznymi dotyczącymi przebiegów sinusoidalnych małej i wielkiej częstotliwości. Przyj-



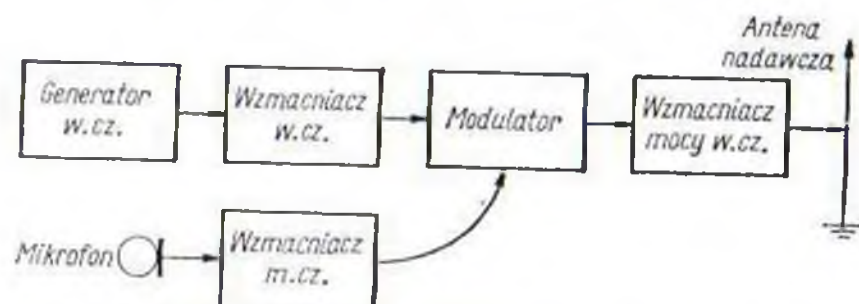
Rys. 92. Fala nośna o częstotliwości 1000 000 Hz modulowana sygnałem małej częstotliwości o wartości 3000 Hz

mijcie po prostu do wiadomości, że gdy prąd nośny wielkiej częstotliwości F jest modulowany amplitudowo prądem małej częstotliwości f , to powstaje w wyniku prąd, zawierający składowe o następujących dwóch częstotliwościach:

$$F - f \quad \text{oraz} \quad F + f$$

Na przykład, jeżeli prąd w.c.z. o częstotliwości 1 000 000 Hz jest modulowany prądem m.c.z. o częstotliwości 3000 Hz, to otrzymujemy prąd modulowany zawierający składowe o częstotliwości 997 000 Hz i 1 003 000 Hz.

W radiofonii szerokość pasma częstotliwości akustycznych ogranicza się do 4500 Hz. W ten



Rys. 93. Układ blokowy nadajnika radiofonicznego z modulacją amplitudową

sposób szerokość każdej z *wstęg bocznych* modulacji, usytuowanych z obu stron częstotliwości fali nośnej, jest równa 4500 Hz. W rezultacie nadajnik radiofoniczny zajmuje w widmie częstotliwości pasmo równe 9000 Hz czyli 9 kHz.

Dlatego też na międzynarodowej skali rozdzielności częstotliwości, częstotliwości fal nośnych umieszczone są w odstępach równych 9 kHz. Unika się w ten sposób jednoczesnego odbioru dwóch nadajników, wywołującego powstawanie gwizdów interferencyjnych.

Na zakończenie omawiania nadajników dodam jeszcze, że prąd modulowany, zanim zostanie doprowadzony do anteny nadawczej i wypromieniowany w postaci fal radiowych, zostaje wzmacniony w odpowiednim wzmacniaczu mocy.

Kłopoty z dodatnim sprzężeniem zwrotnym

Powróćmy teraz do zjawiska dodatniego sprzężenia zwrotnego. Jeżeli nad nim panujemy, wszystko jest dobrze. Umożliwia nam ono zwiększenie wzmacnienia lub, jeżeli sobie tego życzymy, uzyskanie drgań.

Niestety, możemy się również spotkać z niekontrolowanym dodatnim sprzężeniem zwrotnym, które wywołuje efekty niepożądane. Cewka, przez którą przepływa prąd anodowy, może — mimo, że sobie tego nie życzymy — indukować napięcie w cewce znajdującej się w obwodzie siatkowym. A to może być przyczyną powstania drgań. Tą przyczynę nazywamy *niepożądanym sprzężeniem*.

Również kondensator umieszczony między elementami obwodów wyjściowego i wejściowego lampy może powodować niepożądane sprzężenie.

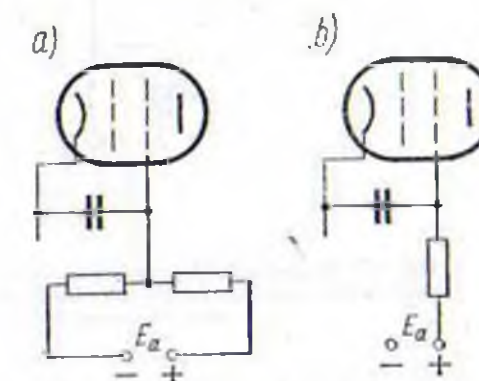
W celu uniknięcia takich sprzężeń, istniejących wskutek działania pól magnetycznych lub elektrycznych stosuje się *ekrany*. Ekrany są metalowe płytki lub pudełka, które stanowią przeszkodę na drodze linii sił. Pole magnetyczne cewek i transformatorów małej częstotliwości ogranicza się przez osłonięcie tych elementów ekranami wykonanymi z żelaza. W zakresie wielkiej częstotliwości stosuje się przede wszystkim ekrany miedziane.

Tetroda

Istnieje pojemność, która wywołuje dodatnie sprzężenie zwrotne szczególnie niebezpieczne: jest

to po prostu pojemność między anodą a siatką triody.

Pomyślcie, że dodatnia połówka napięcia występującego na siatce wywołuje wzrost prądu anodowego. Wskutek tego spadek napięcia na impedancji w obwodzie anodowym wzrasta, co powoduje obniżenie napięcia na anodzie. W związku z tym anoda, przez pojemność, która ją łączy z siatką, odpycha od siatki więcej elektronów, czyniąc ją w ten sposób jeszcze bardziej dodatnią.



Rys. 94. W celu ustalenia na siatce drugiej tetrody dodatniego napięcia, można zastosować dzielnik składający się z dwóch rezystorów (a) lub też połączyć siatkę drugą do dodatniego bieguna źródła napięcia zasilania za pośrednictwem rezystora (b)

Jak widzicie, mamy tu do czynienia ze sprzężeniem pasożytniczym. W jaki sposób mu przeciwdziałać?

I w tym przypadku musimy się odwołać do ekranowania. Nie Ignasiu, nie sądzę, że kpię z Ciebie. Wspomniane ekranowanie polega na umieszczeniu między siatką sterującą a anodą drugiej siatki o ustalonym potencjale. W ten sposób realizujemy lampę elektronową z czterema elektrodami zawierającą poza katodą, siatką i anodą jeszcze tę *siatkę ekranującą*, która służy do ekranowania. Dlatego też ta nowa lampa nazywa się tetrodą, ponieważ „tetra” po grecku znaczy „cztery”.

Po to, aby siatka druga, jak zwykle nazywamy siatkę ekranującą, nie przeszkadzała przepływowi elektronów, a wprost przeciwnie, ułatwiała ich przepływ, ustala się na niej duże napięcie dodatnie, niemniej jednak mniejsze od napięcia anodowego. W tym celu można połączyć siatkę drugą ze wspólnym punktem dwóch rezystorów połączonych szeregowo i znajdujących się między biegunami źródła napięcia zasilania. Mówimy, że takie dwa rezystory tworzą dzielnik napięcia.

Można również połączyć siatkę drugą z dodatnim biegunem źródła napięcia zasilania za pośred-

nictwem rezystora. Siatka druga, mając potencjał dodatni, przyciąga elektrony, a prąd, który w ten sposób powstaje, wywołuje spadek napięcia na rezystorze. Dzięki temu potencjał siatki drugiej ustala się na żądanej wartości.

Wskutek obecności siatki drugiej anoda wywiera bardzo mały wpływ na natężenie prądu, który przez nią przepływa. Na zmiany tego prądu ma wpływ prawie wyłącznie napięcie zmienne na siatce sterującej.

Mam nadzieję, że nie zapomnieliście definicji współczynnika amplifikacji, który jest stosunkiem zmiany potencjału anody do zmiany potencjału siatki wywołujących jednakową zmianę natężenia prądu anodowego. W takim razie zrozumiecie bez trudności, że współczynnik amplifikacji tetrody jest dużo większy od współczynnika amplifikacji triody. Może on mianowicie osiągać, a nawet przewyższać wartość 1000.

Jeśli idzie o nachylenie, to jest ono tego samego rzędu, jak w przypadku triod. Obecność siatki drugiej niewiele wpływa na oddziaływanie potencjału siatki sterującej na prąd anodowy.

Nie zapomnieliście, że współczynnik amplifikacji μ_a jest równy iloczynowi nachylenia S_a przez rezystancję wewnętrzną ρ_a

$$K_a = S_a \cdot \rho_a$$

Otóż, jeżeli μ_a jest w tetrodzie dużo większy niż w triodzie, a S_a ma podobną wartość, to należy przyjąć, że również ρ_a jest dużo większa. I rzeczywiście, rezystancja wewnętrzna tetrody jest bardzo duża; może osiągnąć nawet wartość 1 M Ω .

Emisja wtórna. Pentoda

Dotychczas mówiłem Wam tylko o zaletach tetrody. Niestety, obok swych pięknych stron ma ona również wielką wadę: *emisję wtórną*.

Co to takiego? Kiedy elektrony emitowane przez katodę uderzają w anodę, to uderzenia ich powodują wybite z cząsteczek usytuowanych na powierzchni anody pewnej liczby elektronów. Zjawisko to nie wywołuje ujemnych skutków w triodzie, ponieważ elektrony pochodzące z emisji wtórnej są również przyciągane przez dodatni potencjał anody.

W tetrodzie jednak sytuacja nie przedstawia się tak dobrze. Rzeczywiście, ze względu na spadki napięcia na impedancji, przez którą przepływa prąd anodowy, napięcie na anodzie spada chwilami poniżej napięcia na siatce drugiej, które ma stałą wartość. W tych momentach elektrony emisji wtórnej

są dużo silniej przyciągane przez siatkę drugą niż przez anodę. W rezultacie są wchłaniane przez siatkę drugą i zwiększają jej prąd.



Rys. 95. Symbol graficzny pentody

W ten sposób emisja wtórna jest przyczyną przepływu wcale niepomijalnego prądu o kierunku od anody do siatki drugiej, a więc w kierunku przeciwnym do prądu anodowego.

Jak usunąć tę istotną wadę tetrody? Całkiem prosto, umieszczając trzecią siatkę między siatką drugą a anodą. Siatka trzecia jest wewnątrz lampy połączona z katodą.

Niski potencjał tej siatki przeciwdziała przepływowi elektronów emisji wtórnej, które są względnie powolne i powoduje, że powracają one do anody.

Siatka trzecia nie przeszkadza natomiast w przepływie elektronów emitowanych przez katodę. Elektrony te przyspieszone przez siatkę drugą i silnie przyciągane przez anodę, przechodzą przez tę siatkę z dużą prędkością.

Lampa z trzema siatkami ma więc pięć elektrod, co usprawiedliwia nazwę *pentoda*, ponieważ „penta” znaczy po grecku „pięć”.

Lampy wielokrotne. Heptody. Oktody.

Musicie sobie teraz zadawać pytanie, dokąd może dojść powiększanie liczby elektrod w lampie. Uspokójcie się. Triody, tetrody i pentody są podstawowymi lampami.

Istnieją również lampy zawierające kombinacje takich lamp podstawowych. Mamy, z jednej strony lampy wielokrotne, gdzie poszczególne lampy są jak gdyby ustawione równolegle, na ogół przy zastosowaniu wspólnej katody. Jest to na przykład przypadek podwójnej diody stosowanej do prostowania prądów zmiennych.

Są jednak również lampy, w których poszczególne składniki są ustawione jak gdyby szeregowo. Właśnie w ten sposób zrealizowano lampy z 7 i 8 elektrodami, które nazywają się odpowiednio *heptodami* i *oktodami*.

O tych złożonych lampach pomówimy jednak innym razem.

POGAWĘDKA ÓSMA

Praktycznie wszystkie obecnie spotykane odbiorniki radiofoniczne i telewizyjne są superheterodynami. W niniejszej pogawędce przedstawiono zasadę przemiany częstotliwości, metody jej realizacji, stosowane w tym celu lampy wieloelektrodowe oraz metodę strojenia współbieżnego.

SUPERHETERODYNA

Kłopoty ze wzmacnianiem w.cz.

Pyt. — Przyznaję, Genku, że jestem pod wrażeniem ostatniego wystąpienia Twojego wuja. To dodatnie sprzężenie zwrotne, które w jednym przypadku może być czymś najlepszym, a w drugim — czymś najgorszym, ta superpozycja drgań o różnych częstotliwościach i lampy z wieloma elektrodami — wszystko to bez przerwy zaprzęta mi głowę.

Mądr. — Wszystko to umożliwi Ci jednak lepsze zrozumienie racji bytu i działania *superheterodyny*.

Pyt. — A co to za urządzenie nosi taką supernazwę?

Mądr. — Jest to odbiornik pomyślany w sposób niezwykle racjonalny a wynaleziony w 1917 r. przez francuskiego technika Lucien Lévy. Charakteryzuje się on dużą czułością i selektywnością oraz jest łatwy do strojenia.

Pyt. — Wydaje mi się, że wysoką czułość i bardzo dobrą selektywność można zapewnić łącząc po prostu wystarczającą liczbę kolejnych stopni wzmocnienia wielkiej częstotliwości.

Mądr. — Teoretycznie masz rację, ale uwzględniając praktykę — nie. Otóż kiedy łączy się jeden za drugim kilka stopni wielkiej częstotliwości, na nic zda się stosowanie ekranów, pentod i innych środków zabezpieczających przed sprzężeniami niepożądanymi. Są one na tyle duże, że wywołują powstanie drgań, które interferują następnie z sygnałami w.cz. odbieranymi przez antenę.

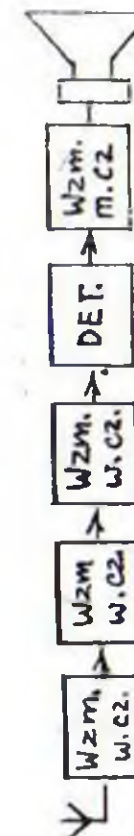
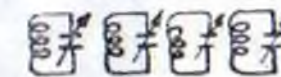
Im częstotliwość tych sygnałów jest większa, tym działanie sprzężeń pasożytniczych jest bardziej niebezpieczne. Dlatego też, do odbioru fal krótkich, a w jeszcze większym stopniu fal ultrakrótkich nie jest praktycznie możliwe zapewnienie wystarczającego wzmocnienia wielkiej częstotliwości.

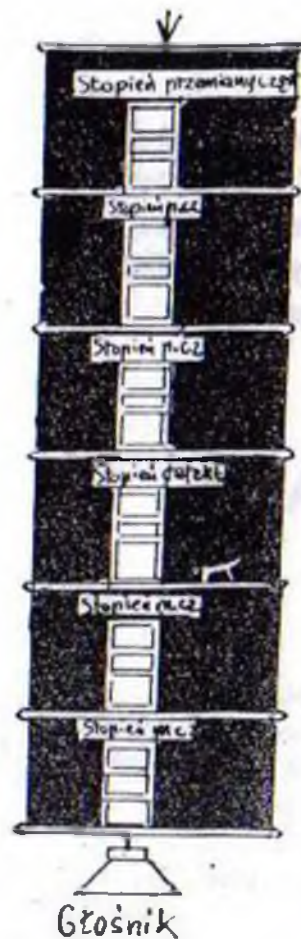
Ponadto, każdy stopień wielkiej częstotliwości powinien w zasadzie zawierać co najmniej jeden obwód dostrojony do częstotliwości odbieranego sygnału. Rozumiesz, jak strojenie tylu obwodów może być skomplikowane.

Zasada superheterodyny

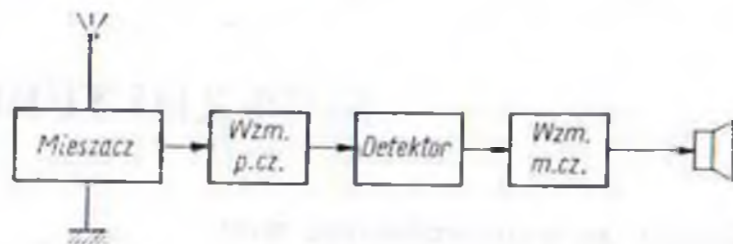
Pyt. — Rozumiem teraz trudności, które sprawia wielostopniowy wzmacniacz wielkiej częstotliwości. Jakie jest więc rozwiązanie tego problemu?

Mądr. — *Przemiana częstotliwości*. Polega ona na zmniejszaniu częstotliwości





odbieranych sygnałów do pewnej wartości stałej zwanej *częstotliwością pośrednią*. Częstotliwość ta jest wystarczająco mała i dlatego umożliwia uzyskanie odpowiedniego wzmocnienia bez trudności, o których mówiliśmy przed chwilą. Jednocześnie obecność obwodów dostrojonych do częstotliwości pośredniej (często używa się skrótu p.cz.) zapewnia bardzo dobrą selektywność, bez komplikowania procesu dostrajania. Wynika to z faktu, że po przemianie częstotliwości, bez względu na częstotliwość odbieranego sygnału, mamy jedną częstotliwość pośrednią. W związku z tym obwody pośredniej częstotliwości są raz na zawsze dostrojone do rezonansu z częstotliwością pośrednią w procesie produkcji odbiornika. Wartość częstotliwości pośredniej wynosi na ogół 455 kHz¹⁾.



Rys. 96. Schemat blokowy superheterodyny

Pyt. — Zaczynam doceniać zalety tak pomyślanego odbiornika. Chciałbym jednak wiedzieć, w jaki sposób przeprowadza się przemianę częstotliwości. Nie można by tego zrobić metodą superpozycji częstotliwości sygnału odbieranego i częstotliwości drgań różniącej się od tej pierwszej o wartość częstotliwości pośredniej? W takim przypadku interferencja tych dwóch częstotliwości da w wyniku częstotliwość równą ich różnicy, czyli dokładnie częstotliwość pośrednią.

Przemiana częstotliwości

Mądr. — Stwierdzam Ignasiu, że gdyby superheterodyna nie była wynaleziona w roku 1917, zostałaby wynaleziona właśnie dziś, przez Ciebie... Rzeczywiście, aby uzyskać przemianę częstotliwości miesza się częstotliwość odbieranego sygnału z częstotliwością drgań wytworzonych w odbiorniku. Częstotliwość tych drgań jest albo większa albo mniejsza od częstotliwości odbieranego sygnału o wartość częstotliwości pośredniej.

Na przykład, jeśli mamy wzmacniacz pośredniej częstotliwości dostrojony do 455 kHz i chcemy odebrać falę o długości 25 m z zakresu fal krótkich, jaka według Ciebie, powinna być częstotliwość generatora lokalnego zwanego najczęściej *heterodyną*?

Pyt. — Fala o długości 25 m odpowiada częstotliwości $300000000 : 25 = 12000000 \text{ Hz} = 12000 \text{ kHz}$. Ponieważ wzmacniacz pośredniej częstotliwości jest dostrojony do 455 kHz, nasza heterodyna powinna wytwarzać drgania o częstotliwości bądź $12000 + 455 = 12455 \text{ kHz}$, bądź $12000 - 455 = 11545 \text{ kHz}$.

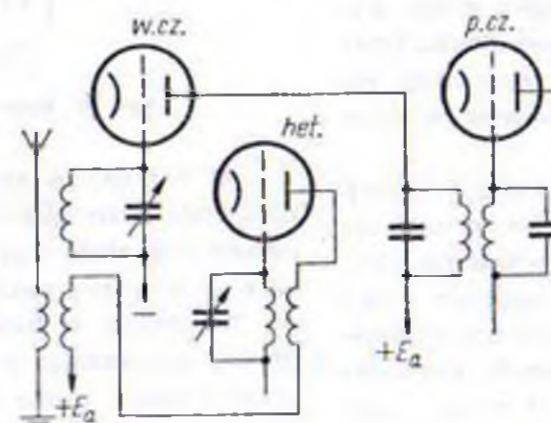
W obu przypadkach superpozycja częstotliwości heterodyny z częstotliwością 12000 kHz da w rezultacie różnicę równą właśnie 455 kHz.

Mądr. — Dochodzę do wniosku, że jesteś bardzo silny w arytmetyce... A ponieważ tak szybko chwyciłeś zasadę superheterodyny, przejdziemy teraz do rozpatrzenia sposobów przemiany częstotliwości.

¹⁾ W Polsce przyjęto wartość 465 kHz (przyp. tłum.).



Na początku, stosowano w tym celu oddzielny generator. Na bardzo uproszczonym schemacie, który Ci rysuję, widzisz, że prąd anodowy heterodyny indukującej za pośrednictwem małej cewki, prąd w obwodzie wejściowym dostrojonym do częstotliwości odbieranego sygnału.



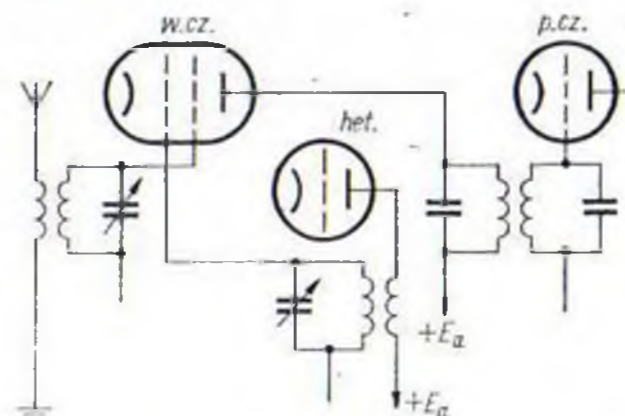
Rys. 97. W mieszaczu dokonuje się superpozycji sygnału odebranego przez antenę i napięcia drgań wytworzonych w układzie heterodyny. Uzyskany w ten sposób sygnał pośredniej częstotliwości doprowadza się do lampy wzmacniacza p.c.z.

W ten sposób na siatce pierwszej triody następuje superpozycja dwóch częstotliwości: nadajnika i heterodyny. Siatka triody jest spolaryzowana ujemnie. Ponieważ detekcji siatkowej poddaje się prąd wypadkowy, w rezultacie w obwodzie anodowym płynie prąd pośredniej częstotliwości: sygnał pośredniej częstotliwości steruje wzmacniacz za pośrednictwem transformatora, którego uzwojenia pierwotne i wtórne są dostrojone do częstotliwości pośredniej. W okresie, w którym stosowano ten układ, po pierwszym stopniu p.c.z. z reguły następował drugi stopień.

Od lampy dwusiatkowej do oktody

Pyt. — Czy mam rozumieć, że później drgania wytwarzano w tej samej lampie, w której dokonywano mieszania dwóch częstotliwości?

Mądr. — Osiągnięto to stopniowo. Najpierw stosowano tzw. lampę dwusiatkową. Nie mieszaj jej z tetrodą. Lampa dwusiatkowa miała dwie siatki sterujące. Do pierwszej doprowadzano napięcie heterodyny, a do drugiej napięcie sygnału odebranego przez antenę.



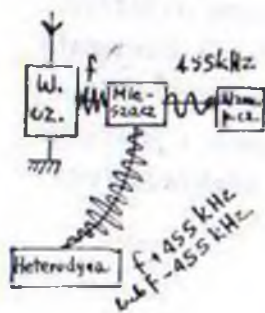
Rys. 98. Dzięki lampie dwusiatkowej dokonuje się skutecznej superpozycji sygnału odebranego przez antenę i napięcia heterodyny



Fala długości 25 m
Częstotliwość:

$$\frac{300\,000\,000}{25} = 12\,000\,000 \text{ Hz} = 12\,000 \text{ kHz}$$



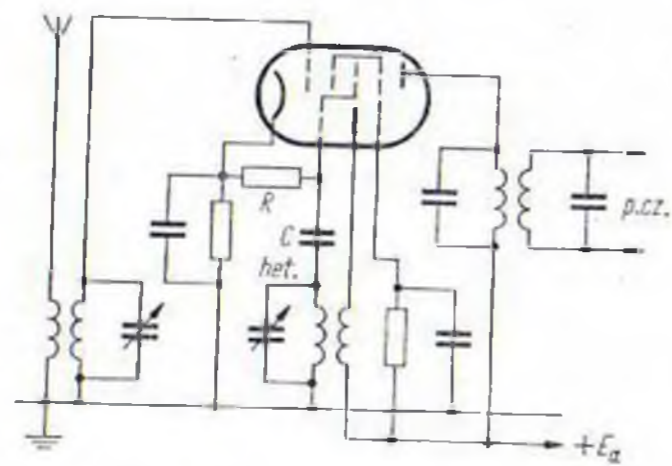
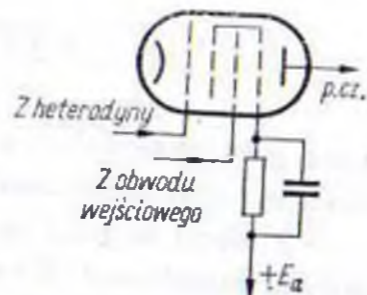


Rys. 99. W celu uniknięcia wpływu pojemności między siatkami sterującymi lampy dwusiatkowej można ją zastąpić heksodą

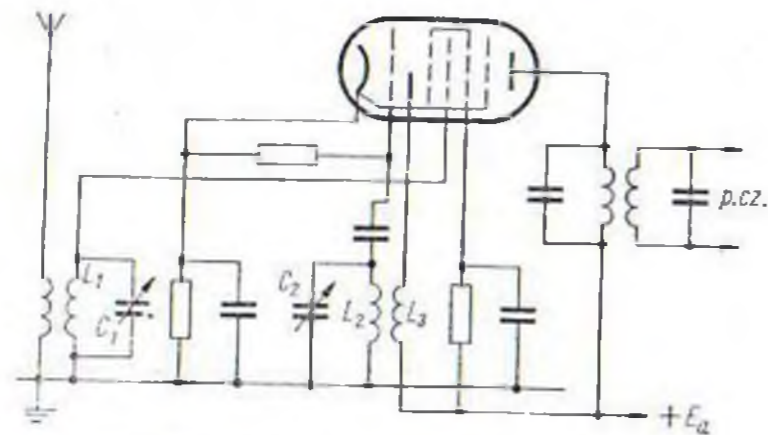
Lampa dwusiatkowa była dość dobrym mieszaczem. Jednakże pojemność między siatkami sterującymi tej lampy powodowała niekiedy sprzężenie obwodu wejściowego z obwodem heterodyny. W wyniku takiego sprzężenia heterodyna zaczynała wytwarzać drgania o częstotliwości rezonansowej obwodu wejściowego, co uniemożliwiało oczywiście działanie układu.

Pyt. — Jak temu zapobiegano? Czy uciekano się do stosowania siatki ekranującej służącej jako ekran oddzielający obie siatki sterujące?

Mądr. — Nawet lepiej: otoczono drugą siatkę sterującą dwiema siatkami ekranującymi. Pierwsza oddzielała ją od pierwszej siatki sterującej, a druga od anody. I tak oto powstała heksoda, składająca się z sześciu elektrod. Stąd zresztą pochodzi jej nazwa, bo „hexa” to po grecku „sześć”.



Rys. 100. Przemiana częstotliwości za pomocą triody-heksody



Rys. 101. Przemiana częstotliwości za pomocą oktody



Pyt. — Stale mamy do czynienia z dwiema lampami: heksodą — służącą za mieszacz dwóch częstotliwości i triodą stanowiącą heterodynę.

Mądr. — No więc skończono wreszcie na realizacji lampy kombinowanej triody-heksody. Obie części mają wspólną katodę, a trzecia siatka heksody jest połączona bezpośrednio, wewnątrz lampy z siatką triody generacyjnej.

Pyt. — Taka lampa z ośmioma elektrodami powinna nazywać się oktodą. Czyż nie mam racji?

Mądr. — Nie. Oktodą nazywa się kombinacja triody z pentodą, której siatka ekranująca otacza z obu stron siatkę sterującą.

Trioda ma anodę małych wymiarów, aby nie stanowiła ona przeszkody w przepływie strumienia elektronów do części pentodowej. Część triodowa spełnia funkcję heterodyny. Napięcie sygnału odebranego przez antenę zostaje doprowadzone do siatki sterującej części pentodowej.

Częstotliwości lustrzane

Pyt. — Jest coś co zaprzęta mi głowę. Czy w superheterodynie nie istnieje niebezpieczeństwo jednoczesnego odbioru dwóch różnych nadajników. Załóżmy, że chcemy odebrać falę o długości 300 m, co odpowiada częstotliwości 1000 kHz. Ponieważ częstotliwość pośrednia wynosi 455 kHz, heterodynę dostroimy do częstotliwości 1455 kHz. Różnica obu częstotliwości da nam właśnie częstotliwość pośrednią.

Załóżmy, że nasza antena odbiera również program nadawany na częstotliwości 1910 kHz. Z superpozycji tej częstotliwości z częstotliwością heterodyny 1455 kHz powstaje również częstotliwość pośrednia o wartości 455 kHz. W ten sposób odbierzemy również i ten drugi program.

Mądr. — Rzeczywiście, w superheterodynie istnieje ryzyko jednoczesnego odbioru fali pożądanego i fali, której częstotliwość różni się również o 455 kHz od częstotliwości heterodyny. Ta druga częstotliwość nazywa się częstotliwością lustrzaną, ponieważ jest umieszczona symetrycznie względem częstotliwości heterodyny.

Pyt. — W jaki sposób można uniknąć tej niedogodności?

Mądr. — Zapewniając wystarczającą selektywność odbiornika przed stopniem mieszającym. W tym celu przed mieszaczem można zastosować strojony stopień wielkiej częstotliwości.

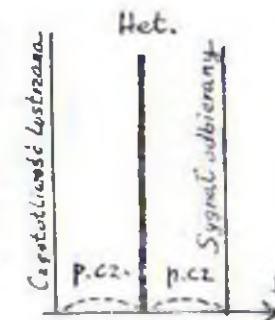
Jednakże, w rzeczywistości niebezpieczeństwo wynikające z istnienia częstotliwości lustrzanych jest znikome ze względu na dość znaczną wartość częstotliwości pośredniej. Częstotliwość lustrzana jest odległa od częstotliwości sygnału pożądanego o podwójną wartość częstotliwości pośredniej, to jest o $455 \cdot 2 = 910$ kHz.

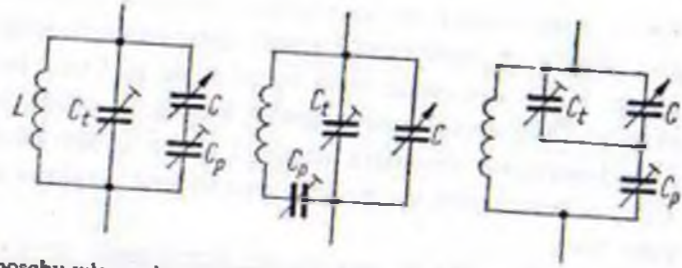
Do wyeliminowania tak odległej częstotliwości nie potrzeba zbyt dużej selektywności.

Współbieżność

Pyt. — Uspokoilem się. Myślę również, że strojenie superheterodyny jest bardzo proste: moje dwie ręce powinny wystarczyć. Jedną obracam gałką kondensatora zmiennego strojącego obwód wejściowy, a drugą — gałką kondensatora dostrajającego heterodynę.

Mądr. — Jedną ręką wystarczy, drogi Ignasiu. Oba kondensatory zmienne są strojone za pomocą jednej gałki, ponieważ ich rotory (okładziny ruchome) znajdują się na jednej osi.





Rys. 102. Trzy sposoby włączenia trymerów C_t i paddingów C_p do obwodu drgań heterodyny. Kondensatory te służą do zapewnienia współbieżności obwodów wejściowego i heterodyny.

Pyt. — Nie sądzę, żeby to mogło dobrze działać. Konieczne jest przecież, aby między częstotliwościami obu obwodów istniała zawsze taka sama różnica. Otóż, jeżeli dwa kondensatory są przestrajane razem, nie widzę możliwości spełnienia tego warunku, chyba że wartości pojemności obu kondensatorów są różne.

Mądr. — Nie, tak nie jest. Pojemność obu kondensatorów zmiennych jest identyczna we wszystkich położeniach rotorów.

W celu uzyskania różnicy pojemności stosuje się dwa kondensatory nastawne, z których jeden zwany trymerem jest dołączony równolegle do kondensatora zmiennego w obwodzie drgań heterodyny, a drugi zwany paddingiem o znacznie większej pojemności jest włączony szeregowo z tym kondensatorem.

Trymer powiększa pojemność utworzonego, w ten sposób zespołu, podczas gdy padding ją zmniejsza. Dobierając odpowiednie wartości pojemności obu kondensatorów nastawnych doprowadza się do takiej zmiany pojemności zespołu w czasie strojenia kondensatorów zmiennych, że w wyniku przemiany uzyskuje się zawsze częstotliwość pośrednią.

Pyt. — Dochodzę do wniosku, że realizacja superheterodyny wymaga sporo skomplikowanej pracy. Jednak uzyskiwany rezultat z pewnością jest tego wart.



Profesor Radiol opisuje różne

UKŁADY ZASILANIA

Podczas gdy przenośne odbiorniki tranzystorowe są na ogół zasilane z baterii, to inne odbiorniki radiofoniczne i telewizyjne — z sieci. W jaki sposób uzyskuje się napięcie żarzenia i napięcie anodowe? Wszystko jest tutaj wyjaśnione. Profesor Radiol przedstawia różne układy prostowania i filtracji prądu anodowego oraz budowę kondensatorów elektrolitycznych.

Do chwili obecnej, drodzy Przyjaciele, mówiliście wyłącznie o układach z lampami elektronowymi. Nie robię Wam wyrzutów z tego powodu. Mimo, że większość aktualnie produkowanych i eksploatowanych odbiorników jest wyposażona w półprzewodniki, to jednak istnieje jeszcze sporo aparatów lampowych. Ponadto istnieją układy, w których lampy elektronowe zawsze znajdują zastosowanie.

Następnym razem przedstawię Wam fizyczne podstawy półprzewodników. Tymczasem jest jednak dziedzina, o której jeszcze nie wspominaliście, a która powinna Was zainteresować: zasilanie.

Parametry sieci

Wszystkie urządzenia elektroniczne wymagają źródła zasilania. Przenośne odbiorniki radiofoniczne zadowolają się bateriami o małych napięciach zawartych między 4,5 a 9 V.

Jednakże duże odbiorniki stołowe i telewizory są nadal zasilane z sieci. Jakie są jej parametry?

Niegdyś istniały sieci prądu stałego o napięciu rzędu 110 V. Prawie wszędzie zostały one zastąpione sieciami prądu zmiennego. W Europie częstotliwość sieci wynosi 50 Hz, ale w Stanach Zjednoczonych — 60 Hz.

Jeśli idzie o wartość napięcia, to istnieje tendencja do ustalenia wszędzie 220 V¹⁾. Są jednak jeszcze sieci o napięciach 110, 117, 130 a nawet

240 V. Chcę Wam przez to powiedzieć, że układy zasilania powinny być przystosowane, o ile to możliwe, do wielu napięć sieci.

Prądy zasilające

Zobaczymy przede wszystkim, jakich prądów i napięć zasilających wymaga lampowy odbiornik radiofoniczny lub telewizyjny.

Najpierw trzeba zapewnić żarzenie lamp. Na szczęście istnieje w tej dziedzinie unifikacja w skali światowej: praktycznie wszystkie włókna żarzenia wymagają takiego samego napięcia równego 6,3 V.

Ze względu na najczęściej stosowane katody żarzone pośrednio, można stosować napięcia zmienne, chyba że z jakichś względów jest to niewskazane.

Do polaryzacji siatek sterujących nie potrzeba oddzielnych źródeł zasilania: służy do tego celu spadek napięcia na rezystorze katodowym. Omówiliście już to zagadnienie, podobnie jak sprawę zasilania siatek drugich.

Pozostaje zagadnienie napięcia dodatniego do zasilania obwodów anodowych lamp. Napięcie to musi być koniecznym napięciem stałym.

W zależności od typu zastosowanych lamp wynosi ono nawet kilkaset woltów. Prąd może mieć wartość od kilku miliamperów do części ampera w przypadku lamp mocy.

W jaki sposób uzyskać takie dwa źródła napięcia, to znaczy źródło napięcia żarzenia i źródło napięcia do zasilania anod?

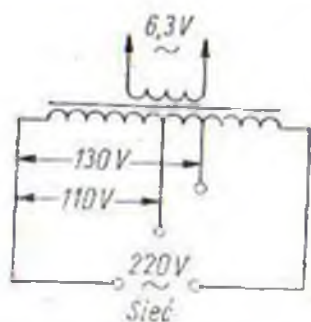
¹⁾ W Polsce istnieje jednolita sieć prądu zmiennego o napięciu 220 V (przyp. tłum.).

Jak uzyskuje się napięcie żarzenia i napięcie anodowe

W celu obniżenia napięcia sieci do wartości 6,3 V wymaganej do żarzenia lamp, stosuje się transformator. Jest on oczywiście wykonany na rdzeniu magnetycznym. Uzwojenie pierwotne może mieć kilka odczepów umożliwiających zasilanie transformatora z sieci o różnych napięciach.

Widzicie, że zagadnienie żarzenia zostaje w ten sposób rozwiązane bardzo prosto. Nie tak prosty jest problem napięcia anodowego. W tym przypadku trzeba nie tylko zwiększyć wartość napięcia, ale również przekształcić je na napięcie stałe.

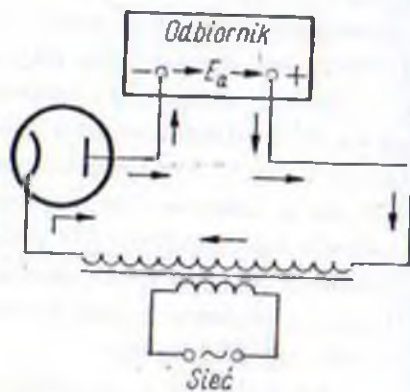
Oczywiście w celu uzyskania wyższego napięcia stosujemy transformator. Zwracam Wam od razu uwagę na fakt, że w zasilaczu stosuje się jeden transformator zawierający kilka uzwojeń wtórnych. Jedno dostarcza napięcia żarzenia 6,3 V, o którym mówiliśmy przed chwilą. Drugie – wysokiego napięcia, które wytwarza prąd, przekształcony następnie na prąd stały.



Rys. 103. Transformator dostarczający napięcia żarzenia 6,3 V z sieci o napięciu 220, 130 lub 110 V

Przekształcenie prądu zmiennego na prąd stały dokonuje się dzięki prostowaniu, to znaczy umożliwieniu przepływu prądu tylko w jednym kierunku. Znaczący element służący do tego celu – diodę.

Na rysunku zaznaczyłem strzałkami kierunek prądu elektronowego prostowanego przez diodę. Stwierdzacie z pewnością, że w ten sposób prostowanie następuje tylko w czasie trwania jednego półokresu. Jest to tzw. prostowanie jednopółkowe. Uzyskane napięcie w wyniku takiego prostowania trudno jest wygładzić, a jest to konieczne przed doprowadzeniem go do anod lamp. Dlatego też znacznie korzystniejsze jest prostowanie dwupółkowe. Jak się je przeprowadza?



Rys. 104. Układ prostownika diodowego jednopółkowego

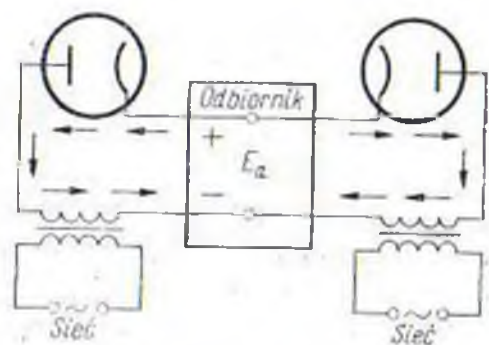
Rysuję Wam układ zawierający dwa prostowniki. W czasie trwania pierwszego półokresu, prąd płynie przez jeden z tych prostowników, a w czasie trwania drugiego – przez drugi.



Rys. 105. Linia ciągłą zaznaczono połówki przebiegu prądu przechodzącego przez diodę, a linią przerywaną połówki niewykorzystane

Czy naprawdę trzeba stosować dwa transformatory i dwie diody?

Można zastosować tylko jeden transformator, ale którego uzwojenie wtórne ma w połowie odczep. Podobnie dwie diody, których katody – jak



Rys. 106. Dzięki zastosowaniu dwóch diod, prostowanie następuje w obu półokresach

widzicie – są ze sobą połączone, można zastąpić jedną podwójną diodą ze wspólną katodą.

Zauważcie, że prąd w każdym półokresie płynie tylko przez połowę uzwojenia wtórnego transformatora: raz przez lewą, raz – przez prawą. Oznacza to, że całkowite napięcie występujące na obwo-

ki sposób wygładzić, lub jak często mówimy, *wy-filtrować* ten prąd, aby uczynić go naprawdę stałym?

W tym celu należy go uznać za sumę dwóch składowych: zmiennej, dwukierunkowej i stałej, na tyle dużej, żeby po dodaniu jej do składowej zmiennej sumaryczny prąd był jednokierunkowy.

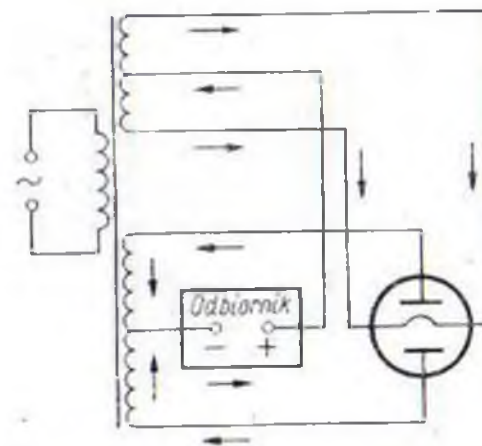


Rys. 109. Linia ciągłą zaznaczono kształt prądu uzyskiwanego w wyniku prostowania dwupółkowego. Linia przerywana pokazuje połówki zatrzymane przez jedną diodę, ale przechodzące przez drugą

Rys. 107. Zamiast dwóch diod i dwóch transformatorów, jak na poprzednim rysunku, stosuje się podwójną diodę i transformator z odczepem w połowie uzwojenia wtórnego

dzie wtórnym powinno być dwa razy większe od napięcia, które chce się otrzymać.

W rzeczywistości, nasz transformator jest bardziej skomplikowany, ponieważ zawiera jeszcze dwa inne uzwojenia wtórne: uzwojenie żarzenia lamp odbiornika i uzwojenie żarzenia podwójnej diody prostowniczej.



Rys. 108. Układ zasilacza z podwójną diodą żarzoną bezpośrednio. Strzałki wskazują rzeczywisty kierunek przepływu prądu wyprostowanego

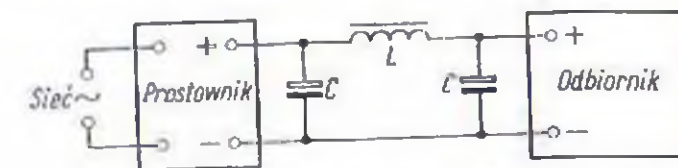
Stosuje się również podwójne diody żarzone bezpośrednio, w których włókno żarzenia spełnia jednocześnie zadanie katody. W tym przypadku dodatnim biegunem źródła napięcia anodowego jest odczep w połowie uzwojenia żarzenia lampy prostowniczej.

Filtracja napięcia anodowego

Kształt prądu uzyskanego w wyniku prostowania dwupółkowego jest już bliższy poziomej linii prostej reprezentującej przebieg prądu stałego. W ja-

filtr powinien zatem eliminować składową zmienną umożliwiając jednocześnie przepływ składowej stałej. W tym celu na drodze przepływu prądu należy ustawić cewkę o dużej indukcyjności nawiniętą na rdzeniu magnetycznym.

Ponadto, aby w pewnym sensie zewrzeć składową zmienną przepuszcza się ją przez kondensator o dużej pojemności załączony między zaciskiem



Rys. 110. Między prostownikiem a układem odbiornika znajduje się ogniwo filtrujące, składające się z dwóch kondensatorów elektrolitycznych C i dławika o indukcyjności L

dodatnim a ujemnym zasilacza. W praktyce stosuje się dwa kondensatory: jeden przed cewką, którą zwykle nazywamy dławikiem, a drugi za cewką. W ten sposób powstaje *ogniwo filtracyjne*. Niekiedy stosuje się nawet dwa ogniwa połączone szeregowo.

Kondensatory elektrolityczne

Jak Wam już powiedziałem, kondensatory w filtrze powinny charakteryzować się dużą pojemnością. Toteż stosuje się tam *kondensatory elektrolityczne*, których pojemność może osiągać wartości wielu dziesiątek mikrofaradów. Jakże kondensatory określamy taką nazwą?

Są to kondensatory, w których okładziną dołączoną do bieguna dodatniego źródła napięcia jest płytka aluminiowa o dużej powierzchni uzyskanej dzięki poddaniu jej procesowi trawienia. Okładzinę

ujemną stanowi płyn przewodzący lub masa pól-plyna. Całość jest zamknięta w metalowej obudo-wie w kształcie cylindra będącej w bezpośrednim kontakcie z *elektrolitem*, który jest okładziną ujemną kondensatora.

Po doprowadzeniu napięcia między okładziny, elektrolit ulega rozkładowi i wytwarza na powierz-chni aluminium cienką warstwę tlenku. Mam rację, mówiąc, że jest cienka, ponieważ jej grubość jest rzędu mikrometra.

Nie zapomnieliście, że pojemność kondensato-ra jest odwrotnie proporcjonalna do grubości die-lektryka oddzielającego obie okładziny. Rozumiecie więc, dlaczego pojemność kondensatora elektro-litycznego jest tak duża.

Niestety, nigdy nie ma pełni szczęścia. Bardzo mała grubość warstwy dielektryka stwarza niebez-pieczestwo powstawania przebić, w przypadku gdy napięcie między okładzinami przekracza pewną war-tość. Wartość tego napięcia jest podawana dla każ-dego typu kondensatora elektrolitycznego.

Jeżeli zastosujecie taki kondensator i przekro-czycie przewidziane napięcie dopuszczalne, nastąpi przebicie warstwy tlenku. Ale nie obawiajcie się, nie powoduje to zniszczenia kondensatora, natych-miast po obniżeniu napięcia następuje regeneracja warstwy tlenku. Zwykle kondensatory nie mają ta-kiej właściwości. Jeżeli zbyt duże napięcie spowoduje powstanie przebicia, a więc przeskoczenie iskry przez warstwę dielektryka stałego, następuje zwę-glenie dielektryka. W miejscu zwęglenia, dielektryk nabiera cech przewodnika.

Nie zapomnij Ignasiu, że w przeciwieństwie do zwykłych kondensatorów, elektrolit jest spolary-zowany. Należy więc go odpowiednio włączać do układu: określoną okładzinę do bieguna ujemnego, a drugą do bieguna dodatniego.

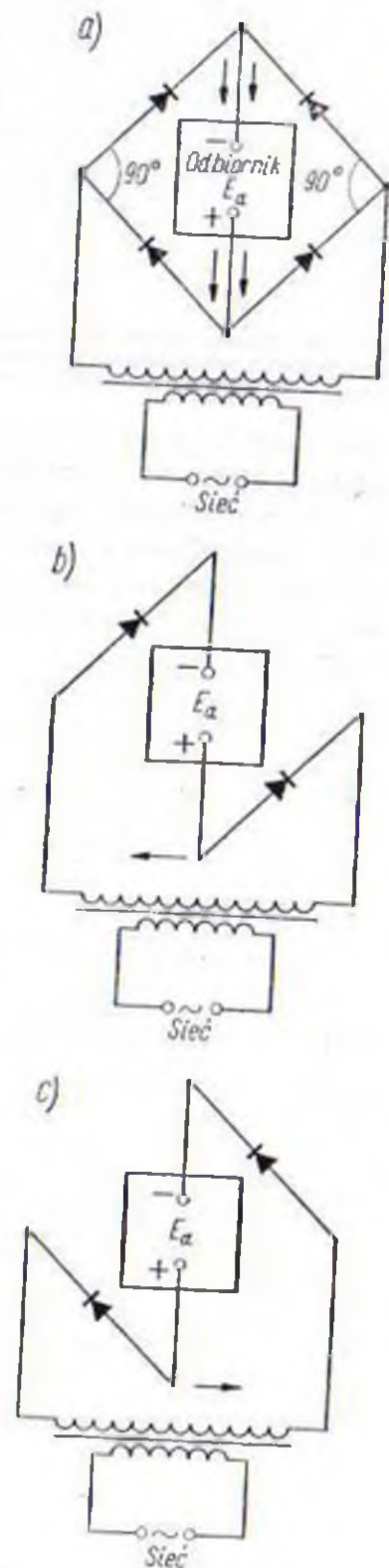
Prostowniki półprzewodnikowe

Obecnie, po omówieniu budowy ogniw filtra-cyjnych, powróćmy do zagadnienia prostowania.

Przedstawiłem Wam układy prostowania z dio-dami próżniowymi. Jednakże od dłuższego czasu stosuje się również w tym celu prostowniki półprze-wodnikowe. Jeżeli zapewni się styk między czystą miedzią a tlenkiem miedzi zwanym kuprytem, uzys-kuje się doskonały prostownik. W istocie, po dopro-wadzeniu napięcia zmiennego między dwa elementy

wykonane z takich materiałów okazuje się, że prąd bez trudu płynie w kierunku od miedzi do kuprytu, ale nie w kierunku przeciwnym.

Można więc płytki wykonane ze wspomnianych



Rys. 111. Układ prostownika mostkowego zawierającego czte-ry diody półprzewodnikowe (a) i schematy pokazujące drogę przepływu prądu w dwóch kolejnych półokresach (b), (c)

materiałów umieścić obok siebie i zapewnić między nimi styk, aby uzyskać prostownik. Natężenie prądu płynącego przez płytki może być tym większe, im większa jest powierzchnia płytek.

Bardzo często tego rodzaju prostowniki zes-tawia się w układ mostkowy. Widzicie, że taki układ zawiera cztery prostowniki, połączone w ten spo-sób, że na schemacie tworzą kwadrat. Jedna z prze-kątnych tego kwadratu jest połączona z uzwojeniem wtórnym transformatora sieciowego; w drugą prze-kątną są włączone zaciski powstałego w ten sposób źródła napięcia stałego.

Na oddzielnych rysunkach pokazuję Wam dro-gę prądu w czasie trwania pierwszego i drugiego półokresu.

Zwróćcie uwagę, że stosując symbol graficzny prostownika rysuję strzałkę w kierunku ruchu elek-tronów. Na schematach jednak, strzałka jest zwykle skierowana w stronę przeciwną, to znaczy w umow-nym kierunku przepływu prądu elektrycznego od bieguna dodatniego do ujemnego.

Reasumując musicie przyznać, że zasilanie od-biornika z sieci nie przedstawia specjalnych pro-blemów. Transformator dostarcza napięcia żarzenia lamp i ewentualnie napięcia żarzenia diod prostow-nicznych oraz napięcia, które po wyprostowaniu i wyfiltrowaniu zostaje doprowadzone do obwodów anodowych lamp w odbiorniku.

Mam nadzieję, że zaspokoilem już Waszą żądę wiedzy o zasilaniu.

POGAWĘDKA DZIEWIĄTA

Jak rozchodzą się fale długie, średnie i krótkie? Co powoduje zmianę ich natężenia w miejscu odbioru i co nazywamy zanikiem odbioru? Jak zwalczać te efekty i utrzymać jednakową głośność odbiornika? Wszystkie te zagadnienia są omówione w niniejszej pogawędce.

ZANIKI ODBIORU I AUTOMATYCZNA REGULACJA WZMOCNIENIA

Propagacja fal



Pyt. — Twój wuj i Ty sam, drogi przyjacielu wyjaśniliście mi już budowę i działanie nadajników radiofonicznych i odbiorników wyposażonych w lampy. O tym jednak co dzieje się między nimi wiem tylko, że fale radiowe rozchodzą się z prędkością światła, to jest 300 000 km/s. Nie mówiłeś mi nigdy, którędy przebiega droga tych fal. Czy przechodzą one przez kulę ziemską, dzięki czemu odbieramy na falach krótkich nadajniki znajdujące się na antypodach?

Mądr. — Nie, Ignasiu, fale nie mogą przechodzić przez Ziemię. Wszystko co chociaż trochę jest przewodnikiem elektryczności — a tak właśnie jest w przypadku skorupy ziemskiej — pochłania fale lub w najlepszym przypadku odbija je. Odbicie powstaje wówczas, gdy fale padają na warstwę przewodzącą pod względnie małym kątem.

Rozchodzenie się fal zależy w zasadniczy sposób od częstotliwości nadawania. Fale długie posuwają się wzdłuż krzywizny Ziemi, a napotykając na całej trasie przewodniki — tracą energię. Oznacza to, że zasięg nadajników długofalowych jest ograniczony.

Pyt. — Rzeczywiście, o ile dobrze odbieram nadajniki długofalowe z sąsiednich krajów jak na przykład Luksemburg, Droitwich (Anglia), o tyle nigdy nie udało mi się złapać fal długich nadawanych w bardziej odległych krajach. Natomiast dobrze odbieram fale średnie dalekich stacji zwłaszcza po zapadnięciu nocy. Jeśli idzie o fale krótkie, to do dyspozycji mam cały świat. Przypuszczam, że ich trasy są krzywoliniowe w odróżnieniu od tras fal długich, a to umożliwia im przebycie połowy obwodu kuli ziemskiej.

Mądr. — Twoje przypuszczenie jest błędne. Im fale są krótsze, tym w większym stopniu wykazują tendencję do poruszania się wzdłuż linii prostych. Pomyśl Ignasiu o rozchodzeniu się fal ultra-ultrakrótkich, jakimi są fale świetlne. Czy można sobie wyobrazić prostsze promienie od promieni świetlnych?



Pyt. — A więc nie rozumiem, w jaki sposób wbrew krzywiznie powierzchni Ziemi odbieramy fale krótkie nadawane na antypodach. Jeżeli te fale naprawdę rozchodzą się wzdłuż linii prostych, to powinny ginąć gdzieś w przestrzeni pozaziemskiej.

Wokół Ziemi i w kosmosie

Mądr. — Oczywiście są fale, które przenikają do przestrzeni kosmicznej. Właśnie dlatego istnieje łączność z kosmonautami lecącymi w pojazdach międzyplanetarnych lub spacerującymi po powierzchni księżycy, a w przyszłości również po powierzchni planet.

Wróćmy jednak na Ziemię jak to czynią również fale radiowe. A czynią to dlatego, że na wysokości 100 do 125 km zostają odbite przez warstwę atmosfery przewodzącą elektryczność. Warstwa ta nosi nazwę *warstwy Kenelly-Heaviside'a* od nazwisk dwóch uczonych, którzy pierwsi odkryli jej istnienie.

W istocie idzie tu o warstwę *jonosfery* składającej się z powietrza zjonizowanego pod wpływem działania promieni słonecznych ultrafioletowych. Wiesz już przecież, że jonizacja wywołuje przewodnictwo danej substancji.

Pyt. — W rezultacie fale średnie i krótkie, po odbiciu w jonosferze, powracają na powierzchnię Ziemi. W takim razie nie wiem, w jaki sposób można utrzymać łączność kosmiczną, o której przed chwilą wspomniałeś.

Mądr. — Wszystko zależy od wartości kąta, pod którym fale dochodzą do jonosfery. Jeżeli ten kąt przekracza pewną wartość, fale wnikają do jonosfery, przechodzą ją i dalej rozprzestrzeniają się już z łatwością w przestrzeni kosmicznej. Przeciwnie, jeżeli wartość kąta padania jest mniejsza od wartości granicznej, fala pod takim samym kątem zostaje odbita w kierunku Ziemi.

Pyt. — I tam jest pochłaniana przez powierzchnię globu?

Mądr. — Niekoniecznie. Ziemia z kolei również odbija fale, ponieważ padają one na jej powierzchnię pod pewnym kątem. W ten sposób fale odbywają wielokrotnie drogę między jonosferą a Ziemią, co umożliwia im docieranie bardzo daleko, a nawet okrążenie globu ziemskiego.

Pyt. — Rozumiem teraz, w jaki sposób odbiera się bardzo odległe stacje. Jednakże natężenie dźwięku przy odbiorze takiej stacji ulega chwilami zmianie? Czy wynika to z faktu, że fale nie zawsze dobrze odbijają się od jonosfery?

Mądr. — Te zmiany natężenia noszą nazwę *zaników*¹⁾. Zanik jest spowodowany jednoczesnym odbiorem fal przebiegających różne drogi. Zjawisko to występuje zwłaszcza przy odbiorze fali bezpośredniej i fali odbitej, co zdarza się często w zakresie fal średnich. Fale te mogą rozchodzić się wzdłuż krzywizny Ziemi, jeżeli oczywiście moc nadajnika jest dostatecznie duża.



Rys. 112. Fale z nadajnika N do odbiornika O mogą dotrzeć dwiema drogami: bezpośrednio i po odbiciu w górnych warstwach atmosfery od warstwy zjonizowanego powietrza Kenelly-Heaviside'a

¹⁾ Dosłowny termin angielski — *fading* (przyp. tłum.).



W pewnej odległości od nadajnika odbiera się więc jednocześnie falę bezpośrednią i falę odbitą od jonosfery. Odległość, którą te fale pokonują nie jest jednako, fala odbita przebywa drogę dużo dłuższą niż fala bezpośrednia.

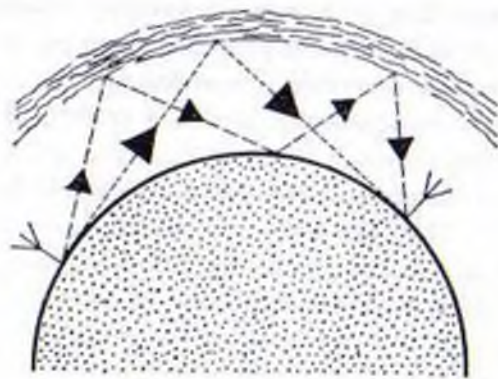
Pyt. — Pozwól, że Ci przerwę. Myślę, że wyjaśnię już przyczyny zaniku.

Kiedy dwie fale dochodzą do anteny odbiorczej w fazie, wszystko jest w porządku. Prądy indukowane przez nie dodają się i odbiór jest dobry.

Jednak, jeżeli fale odbita i bezpośrednia nie są w fazie, to prądy indukowane w antenie nawzajem sobie przeszkadzają. A jeżeli fale te są dokładnie w przeciwfazie, to po prostu odejmują się. Czy to jest właśnie przyczyna zaniku?

Mądr. — Świetnie to wyjaśniłeś.

Pyt. — Jednak nie wiem, w jaki sposób powstaje zanik w przypadku odbioru fal krótkich pochodzących z bardzo odległych nadajników. Mówiłeś mi, że te fale nie mogą rozchodzić się wzdłuż krzywizny Ziemi. A zatem odbiera się tylko falę odbitą. Zastanawiam się więc i nie mogę dojść, co w tym przypadku wywołuje zanik.



Rys. 113. Jednoczesny odbiór dwóch fal pochodzących z jednego nadajnika i odbitych od jonosfery różną liczbę razy (na rysunku: raz i dwa razy)

Mądr. — Po prostu fakt, że można odbierać jednocześnie dwie fale odbite od jonosfery i od Ziemi, ale różną liczbę razy.

Pyt. — Rozumiem. Ale jak wyjaśnić zmiany, które charakteryzują zanik. Czy zmienia się długość drogi fal odbitych?

Mądr. — Oczywiście! Nie myśl, że jonosferę można porównać ze zwierciadłem stałym. Jonosfera drga, faluje, jej wysokość zmienia się w zależności od kierunku promieni słonecznych, jej powierzchnia nie ma nic z regularności.

Właśnie dlatego przesunięcie fazowe między jednocześnie odbieranymi falami stale ulega zmianie.

Zasada automatycznej regulacji wzmocnienia

Pyt. — Zastanawiam się, czy nie można uniknąć tego nieprzyjemnego zjawiska zaniku stosując odbiór kierunkowy tak, aby odbierać tylko jedną falę.

Mądr. — Oczywiście jest to możliwe. Dlatego, aby uzyskać stałą łączność między dwoma punktami globu ziemskiego, stosuje się anteny kierunkowe zarówno po stronie nadawczej, jak i odbiorczej.

Jednak w radiofonii nie jest to wskazane. Skoro program ma być odbierany wszędzie, antena nie może promieniować fal tylko w jednym kierunku. Podobnie, aby odbiornik mógł odbierać różne nadajniki, jego antena nie może być kierunkowa.

Pyt. — Reasumując, musimy pogodzić się ze zjawiskiem zaniku, ponieważ nie możemy mu zapobiegać?



Mądr. — Uspokój się Ignasie. Wszystkie odbiorniki są wyposażone w układ *przeciwzanikowy*, który umożliwia wyeliminowanie wpływu zaników na natężenie dźwięku wydobywającego się z głośnika.

W tym celu stosunkowo prosty układ zmienia automatycznie czułość odbiornika, zmniejszając ją, gdy moc sygnału odebranego wzrasta i powodując jej zwiększenie, gdy zanik spowoduje spadek mocy sygnału.

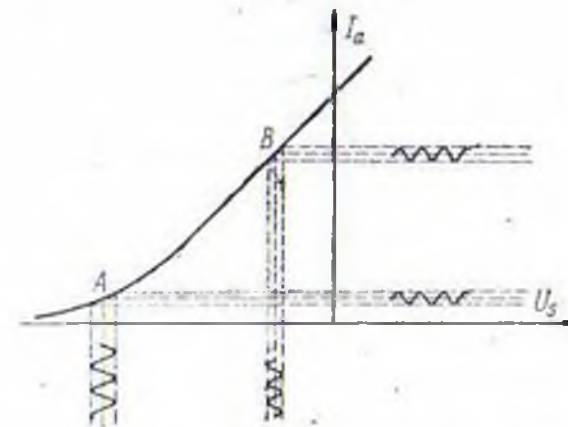
Pyt. — Czy mam przez to rozumieć, że ten układ oddziałuje na lampy wzmacniaczy w.c.z. i p.c.z., od których zależy czułość odbiornika? A jeżeli tak jest, to czy działanie układu polega na wywieraniu wpływu na jedną z charakterystyk tych lamp?

Mądr. — Na oba Twoje pytania odpowiadam twierdząco. Tak, oddziałuje się na wzmocnienie tych lamp. Wartość jego, jak wiadomo zależy w zasadniczym stopniu od nachylenia, dlatego stosuje się w tym celu lampy o *zmiennym nachyleniu*.

Zmienne nachylenie

Pyt. — W jaki sposób można je zmieniać? Dokładnie mi wyjaśniłeś, że siatki lamp polaryzuje się w ten sposób, aby punkt pracy lampy znajdował się na prostoliniowej części charakterystyki prądu anodowego w funkcji napięcia na siatce. Wiem, że gdy punkt pracy znajduje się na dolnym zakrzywieniu charakterystyki, lampa wzmacnia niewiele, a przeciwnie, sygnał poddaje detekcji.

Mądr. — Wszystko to jest prawda, drogi przyjacielu, w przypadku lamp, które mają charakterystykę prostoliniową. Jednak, aby zapewnić automatyczną regulację wzmocnienia stosuje się lampy o *zmiennym nachyleniu*. Krzywa ... jest krzywa.



Rys. 114. Dzięki krzywiźnie charakterystyki o zmiennym nachyleniu nierówne amplitudy sygnałów doprowadzonych do siatki prowadzą do jednakowych amplitud prądu anodowego. Jest to możliwe dzięki różnym punktom pracy na charakterystyce prądu anodowego w funkcji napięcia siatki

Widzisz, że w miarę jak napięcie siatki w punkcie pracy staje się mniej ujemne — nachylenie wzrasta. W punkcie B jest ono większe niż w punkcie A.

Niemniej jednak krzywizna jest bardzo łagodna. Można powiedzieć, że każdy mały wycinek tej krzywej niewiele różni się od odcinka linii prostej. W rezultacie sygnał o małej amplitudzie nie stwarza niebezpieczeństwa powstania chociaż trochę zniekształconych zmian prądu anodowego.

Pyt. — Tak jest! Zrozumiałem jak się sprawy mają na podstawie rysunku, który mi pokazałeś. W punkcie A, gdzie występuje małe nachylenie, amplituda zmian napięcia siatkowego jest większa niż w punkcie B, gdzie nachylenie jest większe.

Mimo to dla obu amplitud zmian napięcia siatkowego występują jednakowe amplitudy zmian prądu anodowego.

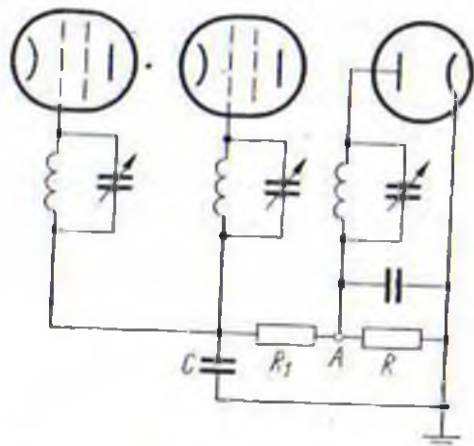
Przypuszczam, że postępuje się tak, aby punkt pracy przesunąć w zależności od wielkości sygnału na wejściu odbiornika. Im ten sygnał jest słabszy tym bardziej punkt pracy przesunę się w prawą stronę, gdzie większe nachylenie zapewnia większe wzmocnienie.

Mądr. — Tak, właśnie tak to wygląda w lampach o zmiennym nachyleniu.

Pyt. — W rezultacie, im większy jest odbierany sygnał, tym większy ujemny potencjał powinien wystąpić na siatkach lamp wzmacniaczy w.cz. i p.cz. Jak to zapewnić w układzie automatycznej regulacji wzmocnienia?

Napięcie automatycznej regulacji wzmocnienia

Mądr. — Bardzo prosto: stosować w tym celu napięcie uzyskane w wyniku detekcji. Napięcie to jest proporcjonalne do amplitudy sygnału odbieranego przez antenę. Właśnie w punkcie *A* na końcu rezystora *R*, przez który przepływa prąd po detekcji, powstaje napięcie automatycznej regulacji wzmocnienia, które doprowadza się do siatek lamp pracujących przed stopniem detektora.



Rys. 115. Napięcie automatycznej regulacji wzmocnienia (punkt *A*) po wyfiltrowaniu za pomocą układu R_1C zostaje doprowadzone do siatek dwóch lamp wzmacniacza w.cz.

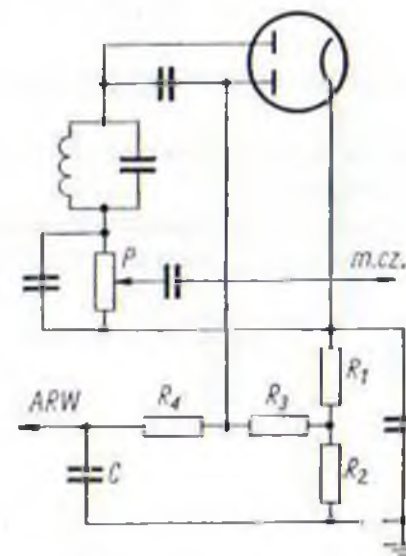
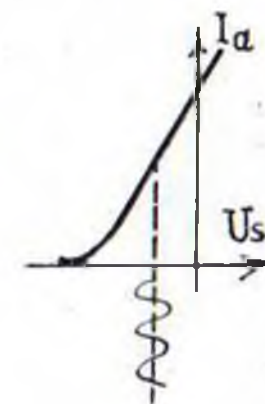
Pyt. — Ależ, drogi Genku, to co robisz, to szaleństwo. Napięcie w punkcie *A* jest napięciem małej częstotliwości. Nie chcesz chyba wprowadzić sprzężenia zwrotnego, powiedziałbym nawet — ujemnego sprzężenia zwrotnego, doprowadzając napięcie małej częstotliwości do siatek lamp przed detektorem.

Mądr. — Uspokój się Ignasiu. Tego napięcia nie doprowadza się bezpośrednio. Przechodzi ono przez rezystor R_1 o dużej wartości przeciwdziałający przenikaniu nawet powolnych zmian. Pomaga mu jeszcze kondensator C , również o dużej wartości, połączony z katodą diody detekcyjnej. Zapewniam Cię, że napięcie małej częstotliwości nie przedostanie się do siatek lamp.

Pyt. — Ten układ, R_1C przypomina mi teraz ogniwo filtracyjne. Pojmuję w takim razie, że siatki lamp o zmiennym nachyleniu nie są sterowane napięciem małej częstotliwości, a jedynie stałym napięciem ujemnym, którego wartość zależy od stopnia zaniku. Im odbierany sygnał jest silniejszy, tym większy ujemny potencjał występuje na siatkach lamp o zmiennym nachyleniu, a to powoduje zmniejszenie czułości odbiornika. W ten sposób wbrew zanikom, natężenie dźwięku pozostaje na normalnym poziomie.

Automatyka opóźniona

Mądr. — Widzę, że dobrze zrozumiałeś zasadę automatycznej regulacji wzmocnienia. Dodam tylko, że stosuje się często lampy zawierające dwie diody ze wspólną katodą. Jedna z nich spełnia zadanie detektora, a uzyskany na jej wyjściu sygnał steruje wzmacniacz małej częstotliwości. Druga wytwarza napięcie automatycznej regulacji wzmocnienia doprowadzane do wzmacniaczy wielkiej i pośredniej częstotliwości.



Rys. 116. Zastosowanie podwójnej diody umożliwia rozdzielenie funkcji detektora sygnału m.c.z. i układu automatycznej regulacji wzmocnienia, a ponadto wprowadzenie do tego ostatniego opóźnienia co powoduje zwiększenie czułości odbiornika

To rozdzielenie funkcji umożliwia zrealizowanie *automatycznej regulacji wzmocnienia opóźnionej*. W tego rodzaju układzie działanie regulacyjne rozpoczyna się wtedy, kiedy odbierany sygnał przekracza pewną wartość. Dzięki temu, jeżeli sygnał jest jeszcze słaby, nie występuje zmniejszenie wzmocnienia. A zatem przy braku napięcia automatycznej regulacji wzmocnienia odbiornik pracuje z maksymalną czułością.

Opóźnienie automatycznej regulacji wzmocnienia uzyskuje się przez ujemne spolaryzowanie diody, która wytwarza napięcie regulacyjne. Napięcie to nie pojawia się, zanim amplituda napięcia zmiennego doprowadzonego do diody nie przekroczy wartości ujemnego napięcia na anodzie diody.

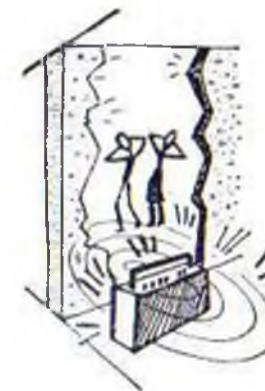
Ręczna regulacja głośności

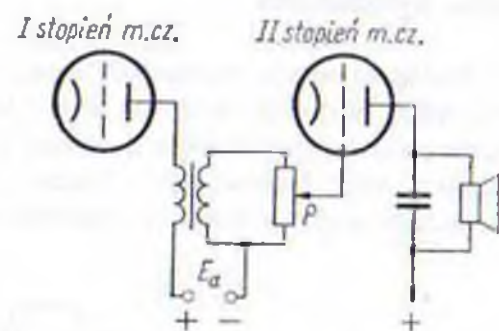
Pyt. — Wyjaśniłeś mi różne aspekty automatycznej regulacji wzmocnienia chroniącej głośność odbiornika przed zmianami poziomu odbieranego sygnału.

Czy mogę Cię zapytać, w jaki sposób reguluje się głośność odbiornika, aby nie dokuczać sąsiadom lub przeciwnie — przeszkadzać im w spaniu?

Mądr. — Regulacji tej dokonuje się po detekcji, za pomocą potencjometru umożliwiającego doprowadzenie do stopnia małej częstotliwości, mniejszej lub większej części napięcia.

Na schemacie, który narysowałem, aby wyjaśnić automatyczną regulację wzmocnienia opóźnioną, widzisz taki potencjometr *P* przyłączony do układu detekcji.





Rys. 117. Potencjometr P umożliwi regulację głośności odbiornika

Potencjometr ten może być również umieszczony między pierwszym a drugim stopniem małej częstotliwości.

Pyt. — Stwierdzam z przyjemnością że, zrobiono wszystko, aby ułatwić regulację odbiorników, dostrojenie, głośność... Nasze dwie ręce wystarczą do tego w zupełności.

Profesor Radiol porywa się na:

PÓŁPRZEWODNIKI

W tym celu przypomina najpierw podstawy fizyczne elektryczności oraz budowę przewodników, półprzewodników i izolatorów, o których mówił w swoim pierwszym monologu. Warto ten monolog jeszcze raz przeczytać. Następnie wyjaśnia cechy charakterystyczne półprzewodników typu n i p i analizuje zachowanie się ich złącza w funkcji polaryzacji i wartości doprowadzonych napięć.

Zrobiliście, drodzy przyjaciele, prawie pełny przegląd różnych układów radioelektronicznych wyposażonych w lampy. Zagadnienie, którego nie rozpatrywaliście — to modulacja częstotliwości. Mam nadzieję, że przeanalizujemy je później.

Obecnie jest właściwy moment do zainteresowania się rozległą dziedziną półprzewodników, do której należą tranzystory. Pojawiły się one w połowie naszego wieku, aby z powodzeniem zastąpić lampy próżniowe.

Zalety półprzewodników

Wyższość ich wynika przede wszystkim z tego, że zadowolają się w przeciwieństwie do lamp dużo mniejszymi napięciami. Anody lamp wymagają napięcia stu lub nawet kilkuset woltów. Tranzystorowi wystarczy napięcie mniejsze od dziesięciu woltów, i co jest warte podkreślenia, pochodzące z małej baterii.

Jeszcze ważniejsze jest to, że tranzystor nie wymaga żarzenia. Lampa, która musi być żarzona, pochłania sporo kalorii. Jest to niekiedy przyczyną uszkodzeń odbiornika, ponieważ są w nim elementy, które źle znoszą podwyższoną temperaturę.

W porównaniu z lampami półprzewodniki szczególnie się wyróżniają bardzo dużą niezawodnością. Czas ich życia jest nieskończenie długi i, o ile nie są źle traktowane, nie ulegają uszkodzeniu. A wicie przecież, że lampy starzeją się i w końcu, po pewnym okresie eksploatacji, nie nadają się do dalszego użytkowania.

Tranzystory są również znacznie mniej żarłoczne niż lampy: zadowolają się sto razy mniejszą mocą od tej, której potrzebują lampy.

Wreszcie zastosowanie półprzewodników skierowało całą elektronikę na drogę *miniaturyzacji*, a powiedziałbym nawet *mikrominiaturyzacji*. W istocie wymiary tranzystorów i innych elementów półprzewodnikowych są bardzo małe. Powiem więcej: wytwarza się obecnie układy *scalone*, zawierające oprócz wielu elementów półprzewodnikowych również rezystory i kondensatory. Każdy z tych elementów ma wręcz mikroskopijne wymiary.

Przewodniki, izolatory i półprzewodniki

O mikroelektronice porozmawiamy nieco później. Dzisiaj chciałbym Wam przedstawić podstawowe pojęcia z dziedziny półprzewodników. Mam nadzieję Ignasiu, że nie zapomniesz nic z tego, co mówiłem na temat budowy materii.

Przypomnę Ci, że atom jest obojętny, jeżeli zawiera jednakową liczbę elektronów i protonów. Jeżeli liczba elektronów jest większa od liczby protonów — atom jest ujemny, a w przeciwnym przypadku — dodatni.

Elektrony, które mogą się przemieszczać, są usytuowane na zewnętrznej powłoce atomu. Jeżeli na powłoce zewnętrznej znajduje się mniej niż cztery elektrony, to mogą one tę powłokę opuszczać, zwłaszcza jeżeli są przyciągane przez inne atomy naładowane dodatnio. W rezultacie substancje,

których atomy mają na powłoce zewnętrznej mniej niż cztery elektrony są przewodnikami. Uwolnione elektrony, które przemieszczają się w przewodniku, tworzą właśnie prąd elektryczny.

Gdy elektron opuszcza atom obojętny, atom ten staje się zjonizowany dodatnio.

Jeżeli powłoka zewnętrzna atomu zawiera więcej niż cztery elektrony, to elektrony te uparcie odmawiają jej opuszczenia. Taka substancja nie zawiera więc wolnych elektronów i jest w związku z tym *izolatorem*.

Wreszcie istnieją substancje takie jak krzem lub german, których atomy mają cztery elektrony na powłoce zewnętrznej, nie są więc ani przewodnikami, ani izolatorami tylko *półprzewodnikami*.

Nazwa ta jest w pełni usprawiedliwiona ich rezystywnością. Przypominam Wam, że rezystywność jest rezystancją sześcianu o boku długości 1 cm wykonanego z danego materiału.

Rezystywność przewodników zawiera się między 1 a 100 mikroomów. Rezystywność półprzewodników osiąga wartości od 0,01 do 1000 Ω . Jeśli idzie o izolatory, to rezystywność ich może przyjmować wartości od 10 M Ω aż do biliona megaomów (w przypadku kwarcu). Widzicie więc, że półprzewodniki rzeczywiście są czymś pośrednim między przewodnikami a izolatorami.

Przewodnictwo samoistne

Czym jest spowodowane *przewodnictwo samoistne* półprzewodników? Po prostu wpływami cieplnymi (termicznymi) na ich atomy. Wiecie, że ciepło wywołuje nieskoordynowany ruch cząsteczek tym intensywniejszy, im wyższa jest temperatura.

Jeżeli temperatura otoczenia wynosi 20°C to z 10 miliardów atomów germanu zostają wyrwane dwa elektrony. Z pewnością nie jest to liczba ogromna. Pomyślcie jednak, że w miligramie tej substancji jest 10^{19} atomów, co oznacza, że uwalnia się w nim 2 miliardy elektronów. Umożliwia to już przepływ bardzo małego prądu rzędu miliardowej części ampera.

Prąd ten można zwiększyć podwyższając temperaturę półprzewodnika. Należy jednak tego unikać, ponieważ — jak zobaczymy za chwilę — w półprzewodnikach nie wykorzystuje się przewodnictwa samoistnego wywołanego wpływem temperatury.

Dlatego najczęściej stosuje się krzem — mniej wrażliwy na temperaturę niż german. Rezystywność krzemu zmienia się w dużo mniejszym stopniu.

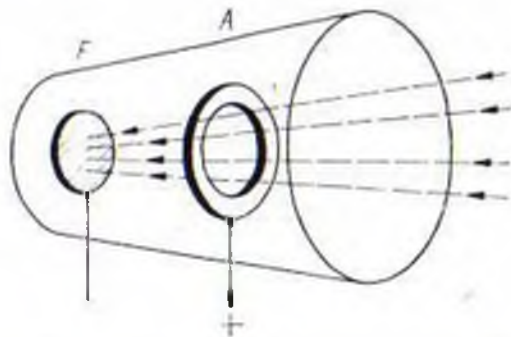
Fotolektryczność

Przewodnictwo półprzewodników można również zwiększyć przez bombardowanie ich atomów *fotonami*. Co to jest foton? Po prostu cząstka światła. Otóż według teorii Louis de Broglie'a promienie świetlne mają dwoistą naturę: składają się z tych właśnie cząstek i są jednocześnie falami elektromagnetycznymi.

Poddając działaniu światła płytkę selenową, a stwierdzicie, że rezystywność tego półprzewodnika zmniejsza się. Przyczyną tego zjawiska są fotony, które uderzając w atomy uwalniają elektrony peryferyjne i umożliwiają przepływ prądu elektrycznego.

Właśnie w ten sposób są realizowane *fotorezystory* (oporniki fotolektryczne) służące do przetwarzania zmian natężenia światła na sygnały elektryczne.

Fotorezystory umożliwiły realizację pierwszych urządzeń do przesyłania obrazów stałych (np. *belinograf* wynaleziony w latach dwudziestych przez francuskiego inżyniera Edwarda Belin) i przesyłania obrazów ruchomych za pomocą pierwszych nadajników telewizyjnych.



Rys. 118. Ogniwko fotolektryczne składające się z fotoczułego półprzewodnika *F* i elektrody *A* na potencjale dodatnim

Następnie umożliwiono uwolnionym dzięki uderzeniom fotonów elektronom opuszczenie powierzchni półprzewodnika takiego jak na przykład kadm. W ten sposób uzyskano *ogniwka fotolektryczne*. W tego typu ogniwie półprzewodnik jest umieszczony w próżni, a uwolnione elektrony są przyciągane przez elektrodę znajdującą się na potencjale dodatnim. Przypomina Wam ono słusznie budowę diody.

Półprzewodniki ujemne

Tymczasem, to co przede wszystkim liczy się w działaniu półprzewodników, to ani wpływ temperatury ani efekt fotolektryczny, lecz obecność pewnych *domieszek*. Tak Ignasiu, nie ma tego zlego, co by na dobre nie wyszło. Właśnie bardzo mała ilość obcych substancji, powiedzmy 1 atom na 10 milionów atomów czystego półprzewodnika, całkowicie zmienia zachowanie się tego ostatniego.

Rozpatrzmy przypadek domieszek pięciowartościowych, to znaczy złożonych z atomów, których powłoka zewnętrzna ma 5 elektronów. Jest to przypadek arsenu i antymonu.

Przypomnijcie sobie strukturę krystaliczną półprzewodników, w których każdy z czterech elektronów walencyjnych jest powiązany z sąsiednimi atomami. Obecność obcego atomu z pięcioma elektronami walencyjnymi zakłóca idealny porządek tej struktury.

Cztery elektrony walencyjne tworzą powiązania walencyjne z sąsiednimi atomami. Ale co zrobi piąty elektron? O właśnie — pozostaje wolny. Atom domieszki z pierwiastka pięciowartościowego nazywamy *donorem*, a półprzewodnik uważamy wówczas za półprzewodnik *typu n*, to znaczy ujemny.

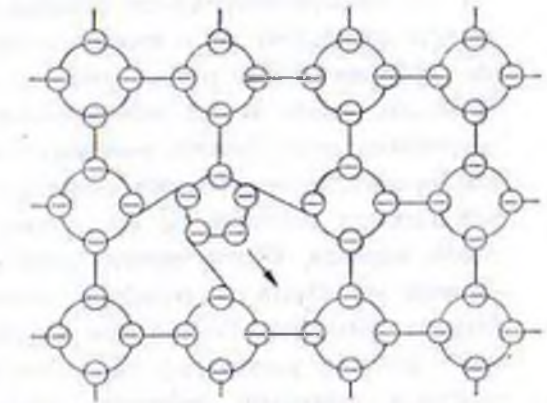
Jeżeli do takiego półprzewodnika doprowadzicie pewną różnicę potencjałów, to elektrony swobodne będą przyciągane w kierunku potencjału dodatniego. Zacznie płynąć prąd, przy czym kolejne elektrony będą dołączać od tej strony, do której doprowadzono potencjał ujemny.

Najciekawszy jest fakt, że w półprzewodniku ujemnym atomy domieszek stają się dodatnie. W istocie, wytrącenie piątego elektronu walencyjnego niweczy obojętność atomu i czyni go dodatnim. Luka, która w ten sposób powstaje, umożliwia wywrwanie innych elektronów.

Półprzewodniki dodatnie

Zobaczmy teraz co się będzie działo, kiedy domieszka jest pierwiastkiem trójwartościowym jak w przypadku aluminium, indu, galu, których atomy mają na powłoce zewnętrznej tylko trzy elektrony.

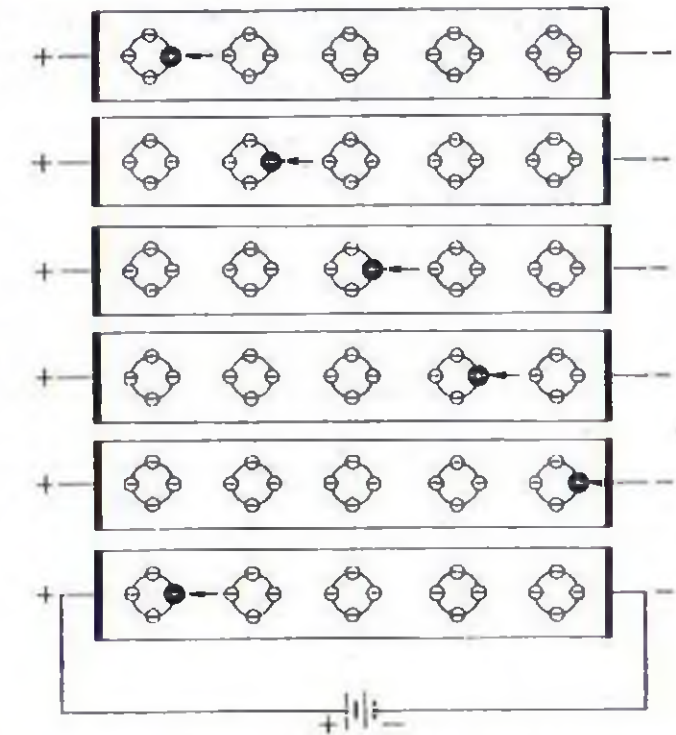
Atom takiego pierwiastka umieszczonego w sieci krystalicznej atomów mających cztery elektrony walencyjne, tworzy powiązania walencyjne z trzema sąsiednimi atomami. Jednakże czwarty chce również stworzyć połączenie z atomem domieszki, aby



Rys. 119. W strukturze krystalicznej atomów o czterech elektronach walencyjnych występuje obcy atom mający pięć elektronów walencyjnych

zachować normalną strukturę kryształu. Toteż przesyła do niego jeden ze swoich czterech elektronów walencyjnych.

W takim przypadku atom, który przekazał atomowi domieszki jeden elektron, staje się dodatni, ponieważ brak elektronu wytwarza dziurę, lukę. Taki atom wykazuje tendencję do jej wypełnienia i przyciąga elektron z sąsiedniego atomu.



Rys. 120. W półprzewodniku dodatnim „dziura” pochodząca od domieszki trójwartościowej jest wypełniona przez elektron biegnący od strony bieguna ujemnego; tworzy to nową „dziurę”, która z kolei jest wypełniona przez elektron wędrujący od sąsiedniego atomu i tak od nowa. Na rysunku pokazano kolejne fazy tego przepływu, w którym elektrony przesuwają się w kierunku bieguna dodatniego a „dziura” (tworząca lukanek dodatni) przesuwa się w kierunku bieguna ujemnego. W ostatniej fazie elektron przybiegający ze źródła prądu wypełnia „dziurę” najbliższą bieguna ujemnego; w tym samym czasie inny elektron opuszcza atom najbliższy położony bieguna dodatniego tworząc nową „dziurę”. I wszystko zaczyna się od nowa

W rzeczywistości proces przemieszczania elektronów rozpoczyna się w momencie doprowadzenia do półprzewodnika pewnej różnicy potencjałów. Wówczas dziura atomu trójwartościowego zostaje wypełniona przez elektron poruszający się z kierunku doprowadzenia potencjału ujemnego. W ten sposób elektron przybliży się do bieguna dodatniego źródła napięcia. W tym samym czasie jednak uformowała się dziura w sąsiednim atomie bliższym bieguna ujemnego. Zostaje ona wypełniona przez nowy elektron poruszający się z kierunku doprowadzenia potencjału ujemnego. Opisany proces przebiega dalej w taki sam sposób z tym, że coraz bliżej punktu doprowadzenia ujemnego potencjału.

Widzicie więc, że dzięki domieszkom trójwartościowym, dziury, czyli ładunki dodatnie, przemieszczają się w kierunku od bieguna dodatniego do bieguna ujemnego, a elektrony w kierunku przeciwnym.

Tego rodzaju półprzewodnik nazywamy półprzewodnikiem typu p (dodatnim). I tutaj zjawisko jest równie paradoksalne jak w półprzewodniku typu n – atomy domieszek po przyjęciu do powłoki zewnętrznej dodatkowego elektronu stają się ujemne. Atomy te w przeciwieństwie do donorów domieszek pięciowartościowych nazywa się *akceptorami*.

Złącze $n-p$

Zobaczmy teraz co się stanie, jeżeli złączymy dwa półprzewodniki przeciwnych typów. Czy powstałe w ten sposób złącze $n-p$ zmieni rozkład ładunków wewnątrz każdego z tych półprzewodników?

Domyslcie się, że zjonizowane dodatnio atomy donorowe części typu n przyciągają zjonizowane

- ⊖ Elektron
- ⊕ Dziura
- ⊕ Donor zjonizowany
- ⊖ Akceptor zjonizowany



Rys. 121. Złącze półprzewodników n i p . Należy zwrócić uwagę na zwiększoną gęstość zjonizowanych atomów w pobliżu złącza. Odpychają one od złącza dziury i elektrony

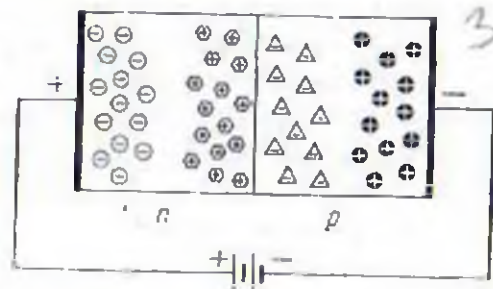
ujemnie atomy akceptorowe części typu p . W ten sposób, w pobliżu złącza, z jego obu stron, zwiększy się gęstość atomów zjonizowanych.

Jeżeli jednak ładunki o przeciwnych polaryzacjach przyciągają się wzajemnie, to ładunki o jednakowych polaryzacjach odpychają się. W rezultacie jony dodatnie, które w części n zgrupowały się w pobliżu złącza, odepchną dodatnie dziury w części p . Podobnie, atomy zjonizowane ujemnie zgrupowane w pobliżu złącza w części p odepchną swobodne elektrony w części n .

Możecie więc stwierdzić, że w wyniku istnienia złącza półprzewodników typu p i n nastąpiło wewnątrz każdego z nich przesunięcie elektronów swobodnych. Ładunek całego układu nie uległ zmianie i jest w dalszym ciągu równy zeru. Wynika to stąd, że zarówno w półprzewodniku typu n , jak i typu p , jest tyle samo ładunków dodatnich co ujemnych.

Napięcie przeciwnej polaryzacji

Doprowadźmy teraz źródło napięcia do tego zespołu półprzewodników $n-p$. Połączmy biegun dodatni z półprzewodnikiem typu n , a biegun ujemny z półprzewodnikiem typu p . Co z tego wyniknie?



Rys. 122. Po doprowadzeniu do złącza $n-p$ napięcia o przeciwnej polaryzacji biegun dodatni przyciąga elektrony, a biegun ujemny – dziury, w rezultacie prąd nie może płynąć

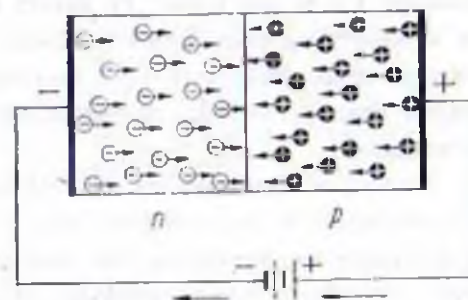
Potencjał dodatni w części n przyciągnie więcej elektronów swobodnych, których było już zresztą dużo w tym rejonie; jednocześnie odepchnie jony dodatnie zwiększając tym samym ich gęstość w pobliżu złącza.

Jeśli idzie o potencjał ujemny doprowadzony do części p , to przyciągnie on dalsze dodatnie dziury, odepchnie również w kierunku złącza jeszcze większą liczbę atomów spolaryzowanych ujemnie.

Widzicie więc, że przez złącze nie płynie praktycznie żaden prąd, a fakt doprowadzenia napięcia zwiększył tylko gęstość atomów zjonizowanych, dodatnich dziur i swobodnych elektronów.

Napięcie odpowiedniej polaryzacji

Zobaczmy teraz co się stanie, jeżeli doprowadzimy napięcie o przeciwnej polaryzacji. Każdy z biegunów źródła napięcia doprowadzimy do półprzewodnika mającego to samo oznaczenie, a więc biegun dodatni do półprzewodnika typu p , a biegun ujemny do półprzewodnika typu n .



Rys. 123. W tym przypadku napięcie jest doprowadzone we właściwym kierunku: biegun ujemny jest połączony z półprzewodnikiem typu n , a biegun dodatni z półprzewodnikiem typu p . Przez złącze może więc płynąć prąd

Potencjał ujemny odepchnie swobodne elektrony z półprzewodnika typu n w kierunku złącza. Elektrony te przejdą ochoczo przez złącze, ponieważ są przyciągane przez dodatni potencjał źródła. Z drugiej strony potencjał dodatni odepchnie dodatnie dziury przez złącze do półprzewodnika typu n .

Jeżeli chcecie dokładniejszego wyjaśnienia, to powiem Wam, że dodatni biegun źródła napięcia przyciągnie i pochłonie każdy elektron w półprzewodniku typu p , który zanalazł się tam dzięki przekroczeniu złącza $n-p$. Dziura, która powstała w ten sposób w atomie znajdującym się w pobliżu krawędzi półprzewodnika typu p zostanie wypełniona elektronem z atomu położonego bliżej złącza. Następna dziura wywołana ubytkiem elektronu zostanie wypełniona z kolei przez elektron pochodzący z atomu jeszcze bliższego złącza. I tak dalej w ten sam sposób. Ten mechanizm wyjaśnia przepływ dziur przez złącze od półprzewodnika typu p do półprzewodnika typu n . Jednocześnie elektrony pokonują złącze w przeciwnym kierunku.

Dioda półprzewodnikowa

Widzicie więc, że układ półprzewodników $n-p$ umożliwia przepływ prądu w jednym kierunku i przeciwstawia się przepływowi prądu w kierunku przeciwnym.

Oznacza to, że złącze półprzewodników typu n i typu p stanowi wentyl podobny do diody próżniowej. Dlatego też złącze $n-p$ nazywa się *diodą półprzewodnikową*.

Dioda półprzewodnikowa zastępuje z powodzeniem diodę próżniową i to we wszystkich jej zastosowaniach, może więc pracować jako detektor i jako prostownik prądu zmiennego w zasilaczu. Zwróćcie uwagę, że nie musimy zajmować się tutaj zagadnieniem żarzenia, jak to było w przypadku lamp.

Jednakże przy stosowaniu diod półprzewodnikowych należy zachować środki ostrożności wynikające z faktu, że napięcie doprowadzone w kierunku nieprzewodzenia nie powinno przekraczać pewnej wartości granicznej. Powyżej tej wartości, bariera potencjału którą przedstawia złącze, zostaje przerwana i w kierunku, który jest normalnie zabroniony, zaczyna płynąć prąd o dużym natężeniu.

Zjawisko to zostało przeanalizowane przez Zenera, stąd napięcie graniczne, którego nie można przekroczyć nazwano jego nazwiskiem. Jeżeli stosujecie diodę półprzewodnikową jako prostownik napięcia zmiennego, to oczywiście napięcie, które chcecie prostować nie może przekraczać *napięcia Zenera*.

Teraz po wyjaśnieniu podstawowych pojęć dotyczących półprzewodników, a zwłaszcza zachowania się złącza $n-p$, sądzę Genku, że z łatwością wyjaśnisz Ignasiowi zasadę pracy i sposób stosowania tranzystorów.



Rys. 124. Symbol graficzny diody półprzewodnikowej

POGAWĘDKA DZIESIĄTA

Przedstawiono tu podstawowe wiadomości o tranzystorze, budowę, sposób zasilania, przepływ prądu w obwodach wejściowym i wyjściowym, podstawowy układ stopnia wzmacniającego, zależność prądu kolektora od napięcia wejściowego, rezystancję wejściową i moc traconą w obwodzie wejściowym.

TRANZYSTOR

Atomy są nieruchome

Pyt. — Dziwnie skomplikowana wydaje mi się budowa tych półprzewodników, które z domieszkami trój- i pięciowartościowymi tworzą część dodatnią i ujemną złącza $p-n$. Przy ich rozpatrywaniu trzeba brać pod uwagę atomy domieszek zjonizowane ujemnie i dodatnio, same atomy półprzewodników, które po utracie elektronu stają się dodatnimi dziurami i wreszcie swobodne elektrony. Po doprowadzeniu napięcia wywołującego przepływ prądu następuje bardzo skomplikowany ruch tych różnych cząstek.

Mądr. — Uspokój się drogi przyjacielu. W rzeczywistości przepływ prądu nie pociąga za sobą praktycznie żadnego przemieszczenia atomów. Tylko elektrony są w ruchu, podobnie jak to się normalnie dzieje w przewodnikach.

Nie zapominaj, że atomy naszych półprzewodników rozmieszczone są w sieci krystalicznej, dzięki czemu w trwały sposób znajdują się na swoich miejscach.

Pyt. — W takim razie nie rozumiem tego co mówił nam Twój wuj, kiedy wyjaśniał jak w złączach $n-p$ gęstość atomów zjonizowanych: akceptorów i donorów zmienia się w zależności od tego, czy są one bliżej czy dalej złącza. W jaki sposób może się ona zmieniać, jeżeli atomy są nieruchome?

Mądr. — Po prostu dzięki ruchowi elektronów, które opuszczają mniejszą lub większą liczbę donorów usytuowanych w jednym miejscu, aby ulokować się na powłoce zewnętrznej akceptorów usytuowanych w innym miejscu.

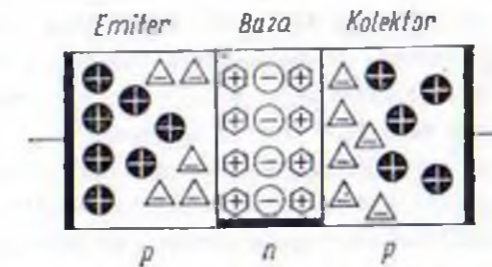
Kiedy mówimy, że dziura — to znaczy atom dodatni wskutek braku elektronu — przesuwa się od bieguna dodatniego w kierunku bieguna ujemnego, nie dotyczy to w rzeczywistości ruchu atomu, ale szeregu przejść elektronów przechodzących z jednego atomu do sąsiedniego, bliższego bieguna dodatniego. W ten sposób dziura powstaje w jakimś atomie, następnie w sąsiednim, bliższym bieguna ujemnego, dalej znowu w sąsiednim i tak przesuwa się w kierunku bieguna ujemnego.

Pyt. — Uspokajasz mnie Genku. W rezultacie przesuwiają się wyłącznie elektrony. Zmieniają się tylko ładunki pewnych atomów, które przestają być obojętne i stają się dodatnimi, jeżeli tracą elektron lub ujemnymi, jeżeli go zyskują.

Złącze + złącze = tranzystor

Mądr. — Stwierdzam z przyjemnością, że chwyciłeś to co dzieje się w złączu. Dzięki temu mogę już połączyć dwa takie złącza i otrzymać w ten sposób *tranzystor*.

Pyt. — Nie bardzo wiem, jak połączysz te dwie pary, z których każda tworzy złącze.



Rys. 125. Rozkład elektronów, dziur i atomów zjonizowanych w trzech częściach tranzystora przed doprowadzeniem napięcia

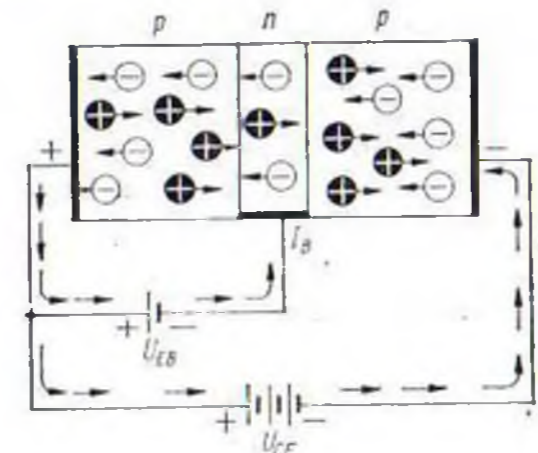
Mądr. — Weź dwa przeciwne złącza, na przykład $p-n$ oraz $n-p$ i połącz ich część n . Otrzymujesz w ten sposób tranzystor $p-n-p$. Część środkowa, w tym przypadku część n , powinna być bardzo cienka. Nazywa się ją *bazą*. Jeden z krańcowych półprzewodników typu p nazywa się *emiterem*, a drugi *kolektorem*.

Pyt. — Bardzo ładne nazwy. Według mnie to się nie zda na nic! Twój tranzystor stanowi doskonałą przeszkodę dla przepływu prądu. Połączyłeś przecież przeciwobnie dwie diody. Każda z nich umożliwia przepływ prądu tylko w jednym kierunku, a w takim połączeniu kierunki przewodzenia diod są przeciwne. Możesz więc doprowadzić między Twój emiter a kolektor napięcie o dowolnej polaryzacji, a prąd i tak nie popłynie.

Tranzystor $p-n-p$

Mądr. — Zgoda. Zobaczmy jednak co się zmieni, jeżeli napięcie doprowadzi się również między bazą a emiter.

Umieścimy baterię o napięciu kilku woltów między emiterem a kolektorem, z tym, że biegun dodatni połączymy z emiterem, a ujemny z kolektorem. Dołączmy również drugą baterię o mniejszym napięciu między emiter (przy czym połączmy



Rys. 126. Ruch nośników ładunków w tranzystorze $p-n-p$ wywołany odpowiednimi potencjałami na jego elektrodach





go z biegunem dodatnim) a bazę, którą dołączymy do bieguna ujemnego. Co się wtedy stanie Ignasiu?

Pyt. — Po prostu popłynie prąd z emitera do bazy, ponieważ Twoja druga bateria jest prawidłowo dołączona dzięki czemu elektrony mogą pokonać złącze p-n. Nie wiem jednak do czego może służyć bateria włączona między emiter a kolektor.

Mądr. — Nasza ujemnie spolaryzowana baza będzie z powodzeniem przyciągać z emitera dużą liczbę dodatnich dziur. Mała część tych dziur dojdzie do bieguna ujemnego baterii, przejdzie przez baterię i przez dodatni biegun baterii powróci do emitera. Oczywiście w przeciwnym kierunku będą płynęły elektrony tworząc prąd emiter-baza I_B o małym natężeniu.

Przypomnij sobie jednak, że baza jest bardzo cienka. Toteż większa część dodatnich dziur, która tam dotrze w drodze od emitera, przedłuży swoją drogę i dojdzie do kolektora. Kolektor spolaryzowany ujemnie przyciąga jeszcze te dziury, które jak sobie przypominasz są dodatnie.

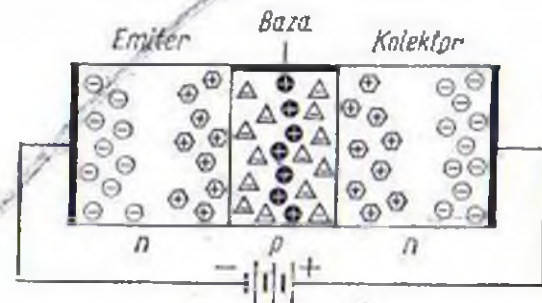
Pyt. — Rozumiem teraz, że mały prąd emiter-baza wywołuje prąd o większym natężeniu płynący z emitera przez bazę do kolektora.

Mądr. — Rzeczywiście, prąd bazy I_B wynosi na ogół kilkadziesiąt lub kilkaset mikroamperów, podczas gdy prąd kolektora I_C kilka lub nawet kilkadziesiąt miliamperów. W tranzystorach mocy prąd ten jest jeszcze większy.

Zanim jednak przejdziemy do liczbowych wartości tych parametrów, chciałbym zobaczyć, czy dasz sobie radę z analizą działania tranzystora n-p-n, który jak z samej nazwy wynika, jest odwrotnie spolaryzowany w porównaniu z tranzystorem p-n-p, którego pracę właśnie skończyliśmy analizować.

Tranzystor n-p-n

Pyt. — Spróbuję. Przy braku napięć zasilających, emiter typu n będzie miał więcej elektronów swobodnych w części najbardziej odległej od bazy, podczas, gdy od strony złącza większa będzie gęstość dodatnich jonów. W związku z tym w bazie, w pobliżu złącza emiter-baza, więcej będzie jonów ujemnych. Idealnie symetryczny rozkład wystąpi między bazą a kolektorem. Jeśli idzie o środek bazy, to zgrupuje się tam pewna liczba dziur, ponieważ z atomów, które są w środku bazy, elektrony zostały wyrwane przez atomy usytuowane w pobliżu złącza.



Rys. 127. Tranzystor n-p-n

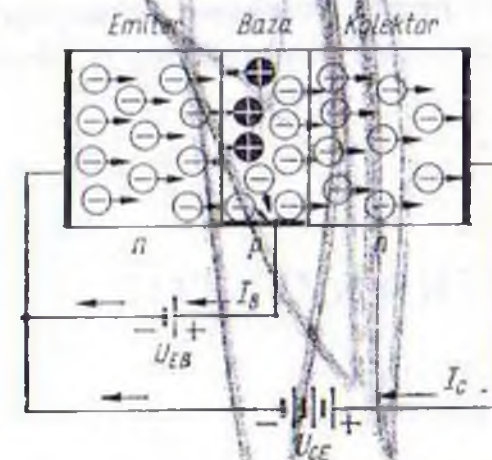
Mądr. — Wszystko co mówisz jest słuszne. Widzę, że dobrze znasz rozkład różnych ładunków w złączach. Zrób mi teraz przyjemność i doprowadź napięcie do wszystkich trzech elektrod tranzystora.

Pyt. — Dołączam ujemny biegun baterii do emitera, a dodatni do kolektora. Jednocześnie doprowadzam napięcie o małej wartości między emiter a bazę z tym, że potencjał bazy czynię dodatni względem emitera.



Mądr. — Co się będzie działo?

Pyt. — I tym razem napięcie jest doprowadzone w kierunku przewodzenia emiter-baza. W takim razie elektrony swobodnie będą przepływać od emitera do bazy. Pewna liczba tych elektronów skieruje się do bieguna dodatniego źródła napięcia, a następnie do emitera. To będzie prąd bazy, tak samo mały jak w poprzednio omawianym typie tranzystora. Większa część elektronów ze względu na minimal-



Rys. 128. Źródło napięcia U_{EB} powoduje przepływ elektronów z emitera do bazy i otwiera im drogę do kolektora

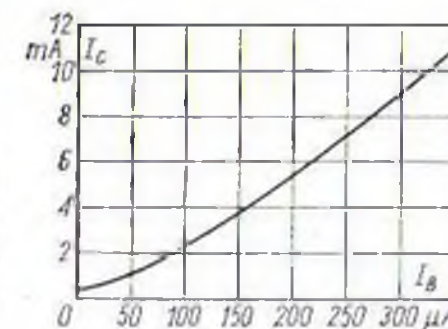
na grubość bazy pokona drugie złącze tym bardziej, że przyciąga je dodatni potencjał kolektora. Elektrony te przejdą przez kolektor do dodatniego bieguna baterii U_{CE} i dojdą w końcu do emitera.

Mądr. — Brawo Ignasiu! Mógłbyś dodać, że w tym samym czasie dodatnie dziury, które przed doprowadzeniem napięcia znajdowały się w środkowym obszarze bazy, skierują się do emitera, ponieważ są przyciągane przez jego potencjał ujemny

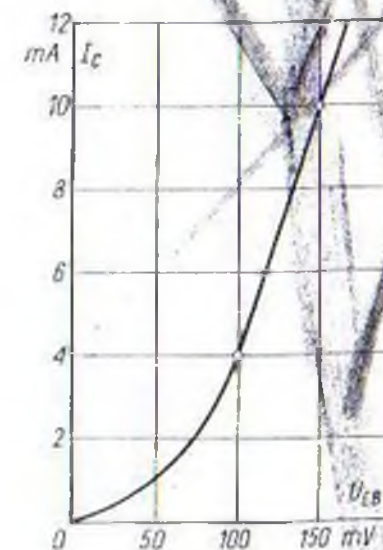
Analogia tranzystora i triody

Pyt. — Jak zmienia się prąd kolektora w funkcji prądu bazy?

Mądr. — Można powiedzieć, że prąd I_C jest praktycznie proporcjonalny do prądu I_B . Krzywa, którą Ci teraz pokazuję, jest rzeczywiście linią prostą. Władzisz



Rys. 129. Krzywa zmienności prądu kolektora I_C w funkcji prądu bazy I_B



Rys. 130. Charakterystyka prądu kolektora I_C w funkcji napięcia U_{EB} między emiterem a bazą





również, że gdy prąd bazy wzrasta o $100 \mu\text{A}$, prąd kolektora zwiększa się o 3 mA , a więc trzydzieści razy więcej.

Jeszcze ciekawsze są jednak krzywe pokazujące zmianę prądu kolektora I_C w funkcji napięcia emiter-baza U_{EB} . Widzisz z charakterystyki, którą Ci pokazuję, że przy wzroście napięcia U_{EB} ze 100 mV do 150 mV , prąd I_C wzrasta od wartości 4 mA do 10 mA . Inaczej mówiąc, prąd ten wzrasta o 6 mA , gdy napięcie bazy wzrasta o 50 mV , tzn. $1/20 \text{ V}$.

Pyt. — W rezultacie otrzymujemy nachylenie 6 podzielone przez $1/20$ a więc 120 mA/V . To fantastyczne!

Mądr. — Nie tak bardzo. Istnieją tranzystory o nachyleniu 300 mA/V a nawet większym.

Pyt. — Co mnie jednak uderza, to daleko idąca analogia między tranzystorem a triodą. Emiter odpowiada katodzie, baza siatce, a kolektor anodzie.

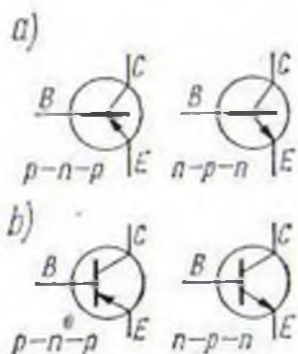
Mądr. — Istotnie, podobnie jak w lampie małe zmiany potencjału siatki wywołują duże zmiany prądu anodowego, tak i tu przy dużych zmianach prądu kolektora, potencjał bazy zmienia się niewiele.

Przypominasz sobie, że wejście tranzystora tworzy baza i emiter. Między te dwie elektrody doprowadza się prąd, który należy wzmocnić. Wyjście tranzystora znajduje się między kolektorem a emitrem, a więc między elektrodami, przez które płynie wzmocniony prąd.

Różne symbole graficzne

Pyt. — Mógłbyś mi pokazać układ stopnia wzmacniającego wyposażonego w tranzystor? Ale najpierw pokaż mi, jaki jest symbol graficzny tranzystora?

Mądr. — Ze względu na to, że istnieją dwa rodzaje tranzystorów, muszą być dwa różne symbole graficzne. Bazę oznacza się kreską; natomiast emiter — strzałką skierowaną do bazy w tranzystorze $p-n-p$ i skierowaną przeciwnie w przypadku tranzystora $n-p-n$.



Rys. 131. Symbole graficzne tranzystorów: a) symbole rzadko stosowane, mimo że odzwierciedlają budowę tranzystora; b) symbole powszechnie stosowane

Pyt. Jeżeli dobrze rozumiem, to ta strzałka wskazuje umowny kierunek prądu od plusa do minusa.

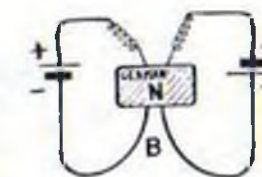
Mądr. — Masz rację. Jeśli idzie o kolektor, to oznacza się go ukośną kreską stykającą się z bazą.

Zgodnie z logiką symbole emitera i kolektora powinny znajdować się po przeciwnych stronach bazy, tak jak to jest w rzeczywistości. Jednak w literaturze technicznej znajdziesz najczęściej układy, w których symbol graficzny tranzystora ma oznaczenia emitera i kolektora z jednej strony bazy.

Pyt. Jak wytłumaczyć taki brak logiki?

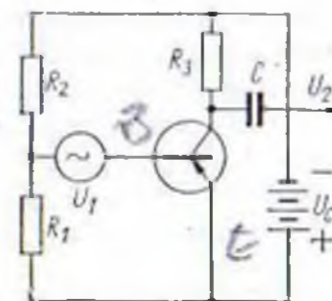
Mądr. — Po prostu pamięć dla historii. Pierwsze tranzystory zrealizowane w 1948 r. nie miały prawdziwych złącz. Emiter i kolektor tworzyły ostrza cieniutkich prętów metalicznych stykających się z kryształem germanu służącego za bazę.

Pyt. — Przypuszczam, że wynalazcy tego tranzystora byli inspirowani pamięcią o detektorze kryształkowym ... Nie można jednak stale żyć przeszłością. Mnie bardziej odpowiada symbol graficzny tranzystora, w którym emiter i kolektor oznaczają się z przeciwnych stron bazy, zgodnie z ich rzeczywistym umiejscowieniem w tranzystorze złączowym.



Stopień wzmacniający

Mądr. — No dobrze. Oto najprostszy układ wzmacniacza. Napięcie zmienne wejściowe na schemacie układu jest oznaczone jako U_1 , a napięcie wzmocnione, uzyskane na wyjściu dzięki przepływowi prądu kolektora przez rezystancję obciążenia R_3 — jako U_2 . Napięcie wyjściowe doprowadza się na wyjście układu przez kondensator sprzęgający C .



Rys. 132. Ogólny układ tranzystorowego stopnia wzmacniającego: U_1 — napięcie wejściowe, U_2 — napięcie wyjściowe

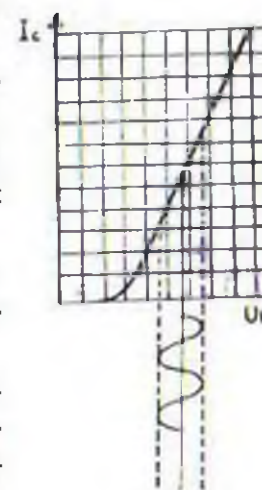
Pyt. — A do czego służą rezystory R_1 i R_2 , połączone szeregowo i włączone między bieguny baterii U_{CE} , która dostarcza napięcia emiter-kolektor?

Mądr. — Oba rezystory tworzą dzielnik tego napięcia. Punkt połączenia rezystorów znajduje się w rezultacie na niższym potencjale niż dodatni biegun baterii. W ten sposób baza tranzystora połączona z tym punktem (poprzez źródło napięcia zmiennego) zostaje spolaryzowana ujemnie w stosunku do emitera, który jest bezpośrednio dołączony do dodatniego bieguna baterii.

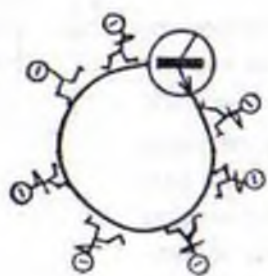
Pyt. — Nieglupio! Dzięki temu można się obejść bez baterii służącej do polaryzacji bazy. A jakie powinny być wartości rezystancji wchodzących w skład dzielnika napięcia?

Mądr. — Polaryzacja bazy powinna być taka, aby punkt pracy na charakterystyce prądu kolektora I_C w funkcji napięcia U_{EB} znajdował się na jej prostoliniowej części. Musi być on wystarczająco odległy od dolnego zakrzywienia charakterystyki, aby również szczyty napięcia zmiennego między emitrem a bazą nie wchodziły w zakres krzywoliniowy charakterystyki. Tylko w ten sposób można uniknąć zniekształceń.

W praktyce napięcie polaryzacji jest małą częścią napięcia baterii, toteż rezystancja R_1 wynosi tylko dziesiątki omów, podczas, gdy rezystancja R_2 musi być trzydzieści do pięćdziesięciu razy większa.



Rezystancje wejściowa i wyjściowa



Pyt. — Stanowczo podobieństwo między tranzystorem a triodą jest jeszcze większe niż myślałem. Siatkę w triodzie polaryzuje się za pomocą spadku napięcia na rezystancji, a tutaj również polaryzację bazy zapewnia spadek napięcia na rezystancji R_1 .

Mądr. — Muszę Cię ostrzec przed przesadnym doszukiwaniem się podobieństwa. Między lampą próżniową a tranzystorem istnieje sporo podstawowych różnic.

Przede wszystkim pomyśl o istnieniu prądu płynącego z emitera do bazy. W przypadku tranzystora $n-p-n$ prąd ten płynie z emitera do bazy wewnątrz tranzystora i wraca do emitera przez obwód zewnętrzny. Odwrotnie jest w przypadku tranzystora $p-n-p$. W obu przypadkach prąd bazy ma wartość kilkudziesięciu lub nawet kilkuset mikroamperów. To znaczy...

Pyt. — ... że tranzystor jednak różni się od triody, w której nie powinien występować prąd siatki. Dlatego właśnie siatka jest tak spolaryzowana, aby go całkowicie uniknąć.

Mądr. — Zdaj sobie sprawę Ignasiu, że w celu wywołania prądu bazy, prąd zmienny doprowadzony do wejścia musi dostarczyć pewnej mocy. A ta, nie zapominaj jest iloczynem napięcia przez natężenie prądu.

Pyt. — Myślę o innym aspekcie tego zjawiska. Ponieważ napięcie doprowadzone między bazę a emiter wywołuje przepływ prądu, to za pomocą prawa Ohma powinna się dać obliczyć rezystancja wejściowa tranzystora.

Mądr. — Rzeczywiście. W ten sposób stwierdza się, że rezystancja wejściowa wynosi tylko kilkaset omów. Widzisz więc jak bardzo tranzystor różni się od triody i innych lamp wzmacniających, których rezystancja wejściowa ze względu na brak prądu siatki jest nieskończenie duża.

Pyt. — A jaka jest rezystancja całego tranzystora, między emiterem a kolektorem?

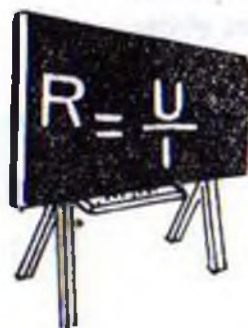
Mądr. — To jest właśnie rezystancja wyjściowa. Wynosi ona kilkadziesiąt kiloomów, a w przypadku tranzystorów mocy jest dużo mniejsza.

Pyt. — Myślę, że wartość rezystancji obciążenia, która znajduje się w obwodzie kolektora, ustala się przy uwzględnieniu rezystancji wyjściowej tranzystora.

Mądr. — Oczywiście. Rezystancja obciążenia nie może być zbyt duża. Jeżeli tak jest, to w momentach występowania szczytowych wartości napięcia zmiennego, na jej końcówkach może nastąpić zmiana znaku potencjału doprowadzonego do kolektora.

Pyt. — Zaczynam się zastanawiać Genku, czy stosowanie tranzystorów nie jest bardziej skomplikowane niż stosowanie lamp.

Mądr. — Nie, uspokój się. Porozmawiamy o tym w czasie naszego następnego spotkania. Dzisiaj mam wrażenie, że Twój mózg jest już w stanie nasycenia. Toteż skończmy naszą pogawędkę.



Profesor Radiol omawia

TECHNOLOGIĘ TRANZYSTORÓW

Jak wykonuje się różne rodzaje tranzystorów?... W jaki sposób oczyszcza się półprzewodniki i nadaje się im strukturę monokryształu?... Jakie procesy umożliwiają wprowadzenie do półprzewodnika domieszek typu p i typu n?... Jak wytwarza się tranzystory klasyczne, typu mesa i planarne?... Jakie skomplikowane problemy stwarza kształt bazy przy wzmacnianiu prądów w.cz.? O wszystkich tych sprawach mówi profesor Radiol.

Z zainteresowaniem wysłuchałem Waszej rozmowy na temat tranzystorów. Nie bez satysfakcji stwierdzam, że Mądralski podał Ci wszystkie podstawowe wiadomości dotyczące tych elementów czynnych (aktywnych), które w ciągu niewielu lat zastąpiły lampy próżniowe w większości urządzeń elektronicznych.

Dobrze zrozumiałeś Ignasiu, że sygnał doprowadzony między bazę a emiter wywołuje przepływ prądu bazy, który z kolei sprawia pojawienie się prądu kolektora.

Można powiedzieć, że wzmocnienie tranzystora określa stosunek przyrostu prądu kolektora do przyrostu prądu bazy.

Oczyszczanie półprzewodników

Myślę, że chciałbyś wiedzieć, jak wytwarza się tranzystory i jakie są rodzaje tranzystorów. Toteż spróbuję Ci opisać ich różne technologie i podstawowe cechy charakterystyczne.

Tranzystory wykonuje się na bazie germanu lub krzemu. Zarówno w pierwszym jak i w drugim przypadku trzeba dysponować już na wstępie bardzo, bardzo czystym i doskonale krystalicznym półprzewodnikiem.

W celu wyeliminowania zanieczyszczeń stosuje się ogrzewanie, w wyniku którego następuje *oczyszczanie strefowe*. Przeprowadza się je w następujący sposób. Pręt półprzewodnika umieszcza się w tyglu kwarcowym i wąską strefę tego pręta podgrzewa się aż do stopienia. Powoli stopioną stre-

fę przesuwa się z jednego do drugiego końca wzdłuż półprzewodnika. Co się teraz dzieje?

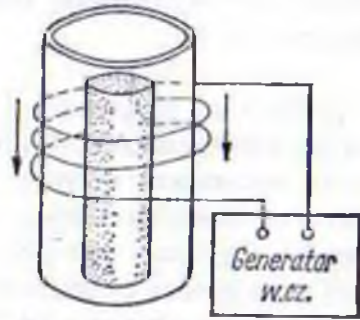
Zanieczyszczenia mają tendencję do pozostawania w stopionej części półprzewodnika. Oznacza to, że przesuając źródło ciepła, a co za tym idzie — również stopioną strefę półprzewodnika, przenosimy zanieczyszczenia w jeden koniec pręta, reszta zostaje oczyszczona. Pozostaje teraz tylko odcięcie końca pręta, w którym zgrupowały się zanieczyszczenia. W części oczyszczonej pręta znajduje się co najwyżej jeden atom zanieczyszczeń na sto milionów atomów półprzewodnika.

Grzanie w.cz.

Prawdopodobnie chcesz wiedzieć, w jaki sposób przeprowadza się ogrzewanie strefowe i osiąga się jednocześnie temperaturę 940°C w przypadku germanu i 1420°C w przypadku krzemu.

I tutaj trzeba się odwołać do elektroniki. W tym celu, na zewnątrz tygla otacza się uzwojeniem strefy, która ma być stopiona. Przez uzwojenie przepuszcza się prąd wielkiej częstotliwości o dużym natężeniu. Prąd ten indukuje w masie półprzewodnika prądy, które powodują jego silne nagrzanie. Uzwojenie przesuwa się powoli wzdłuż tygla. Pociąga to za sobą przesuwanie się stopionej strefy.

Grzanie za pomocą pola magnetycznego wytwarzanego przez prąd wielkiej częstotliwości, które z kolei wzbudza prąd w masie półprzewodnika, jest zupełnie inne niż grzanie za pomocą płomienia.



Rys. 133. Oczyszczanie półprzewodnika metodą oczyszczania strefowego. Polega ono na lokalnym podgrzewaniu półprzewodnika za pomocą prądu wielkiej częstotliwości o dużym natężeniu indukowanym przez prąd płynący w uzwojeniu

Plomień powoduje podwyższenie temperatury na powierzchni ciała. Energia cieplna, dzięki przewodnictwu wnika dopiero do jego wnętrza.

W przypadku grzania za pomocą prądów wielkiej częstotliwości, ciepło obejmuje natychmiast całą masę grzanego ciała.

Dodam jeszcze, że podobny system grzania może być również zastosowany w odniesieniu do dielektryków. Jednak w tym przypadku nie wytwarza się już pola magnetycznego, a pole elektryczne. W tym celu ciało, które ma być poddane procesowi grzania umieszcza się między okładzinami kondensatora, do którego doprowadza się napięcie wielkiej częstotliwości. System ten stosowany w terapii nosi nazwę *diatermii wielkiej częstotliwości*.

Aby uzyskać monokryształ

Wróćmy tymczasem do naszych dróg półprzewodników. Obecnie, kiedy są już oczyszczone, trzeba im zapewnić doskonałą krystalizację.

W istocie półprzewodnik składa się ze zbioru mniejszych lub większych kryształów, stanowiących nieuporządkowany zespół. Otóż taki zespół trzeba przetworzyć na *monokryształ*, którego struktura krystaliczna jest idealnie jednolita w całej masie.

W tym celu trzeba na nowo stopić cały dysponowany półprzewodnik. Robi się to również za pomocą prądu wielkiej częstotliwości płynącego w uzwojeniu, które otacza tygiel z umieszczonym w nim półprzewodnikiem. Następnie do roztopionego półprzewodnika wprowadza się małe krysztale służące jako zarodek krystalizacji.

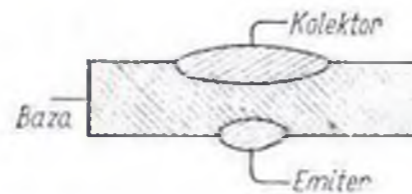
Jednocześnie do roztopionego półprzewodnika dodaje się niezbędną ilość domieszki typu *n* lub *p* w zależności od polaryzacji bazy przyszłych tranzystorów.

Po ochłodzeniu półprzewodnika dysponujemy zatem monokryształem ważącym kilka kilogramów. Trzeba go teraz pociąć na wielką liczbę małych kawałków, z których każdy będzie w przyszłości stanowił jeden tranzystor. Kawalki te mają bardzo małe wymiary. Na ogół są to prostopadłościany o wymiarach podstawy 2×2 mm i grubości kilku dziesiątych milimetra. Jeżeli taki prostopadłościan stanowi produkt wyjściowy tranzystora dużej mocy, wówczas jego wymiary są większe.

Proces stapiania

Jesteśmy więc w posiadaniu kawałków półprzewodnika, które służą jako bazy. Jak zrobić z nich tranzystory? Na pewno domyślasz się, że trzeba w tym celu uzyskać z obu stron bazy domieszki przeciwnego znaku w porównaniu z tymi, które zawiera baza.

Można to zrealizować różnymi metodami. Jeżeli mamy bazę germanową typu *p*, możemy do obu jej stron przyłożyć pastylki indu, który jest domieszką typu *n*. Podgrzejmy teraz całość do temperatury 600°C , w której topi się ind, ale nie german, który jak Ci już mówiłem przechodzi w stan płynny dopiero przy temperaturze 940°C . Atomy stopionego indu przechodzą do germanu, który dzięki podwyższonej temperaturze umożliwia penetrację swojej struktury.



Rys. 134. Układ trzech elementów tworzących tranzystor

I właśnie w ten sposób zostaje z jednej strony bazy uformowany emiter, a z drugiej kolektor. Kolektor powinien być większy niż emiter, ponieważ moc tracona w kolektorze jest większa.

Oczywiście do każdej z trzech elektrod należy przyspawać odpowiednią końcówkę.

Dyfuzja i elektroliza

System formowania emitera i kolektora, który przed chwilą opisałem, służy do wytwarzania tranzystorów *stopowych*. Elektrody te można również

otrzymać metodą *dyfuzji*. W tym celu półprzewodnik podnosi się do temperatury bliskiej temperaturze jego topnienia i umieszcza się go w atmosferze obrotowego gazu zawierającego domieszki służące do formowania emitera i kolektora. W tych warunkach atomy domieszek z łatwością wnikają do półprzewodnika.

W zależności od gęstości par domieszek i czasu trwania operacji, głębokość wnikania atomów domieszek jest różna. Dzięki temu można uzyskać różne grubości bazy.

Metoda dyfuzji bardzo dobrze nadaje się do produkcji tranzystorów mocy. Umożliwia ona wprowadzenie atomów domieszek na znacznych obszarach półprzewodnika, co prowadzi do uzyskania dużych powierzchni emitatorów i kolektorów. Przez tak wykonane elektrody mogą płynąć względnie duże prądy.

Analogiczną metodą do dyfuzji jest metoda *elektrolizy*. W tym przypadku półprzewodnik jest poddawany uderzeniom strumienia cieczy zawierającej domieszki przeciwnego typu.

Podsumowując widzicie, że do wytwarzania tranzystorów stosuje się również dobrze ciała stałe (technika stopowa), ciecze (elektroliza) jak i gazy (dyfuzja).

Tranzystor wytworzony jedną z wyżej podanych technik zamyka się w wodoszczelnej i nieprzezroczystej obudowie. Ten ostatni warunek wynika z konieczności ochrony tranzystora przed działaniem światła wywołującego efekt fotoelektryczny. Wewnątrz obudowy jest próżnia lub neutralny gaz np. azot. Dzięki temu nie następuje utlenianie germanu lub krzemu w wyniku działania tlenu zawartego w powietrzu.

W przypadku tranzystorów mocy obudowa jest wykonana w ten sposób, aby mogła odprowadzać ciepło. Unika się dzięki temu zbytniego przegrzewania tranzystora. Metalowa obudowa odgrywa rolę radiatora i dlatego jej wymiary są dość duże.

Wielka częstotliwość stwarza problemy

Przeciwnie, tranzystor *w.c.z.* może być umieszczony w bardzo małej obudowie. W tym przypadku nie ma problemu przegrzewania tranzystora, natomiast jest problemem grubość bazy.

Jeżeli baza jest bardzo cienka, między emitorem, a kolektorem powstaje dość duża pojemność. W takim przypadku prąd wielkiej częstotliwości zamiast

płynąć przez oba złącza płynie bezpośrednio od emitera do kolektora, które to elektrody stanowią swego rodzaju okładziny kondensatora.

Czy w celu uniknięcia tej niepożądanego pojemności należy zwiększyć grubość bazy? Jest to pewnie rozwiązanie, które zalecał Ignasiu. Zobaczmy, w jakim stopniu jest to rozwiązanie racjonalne. Zwiększając odległość między emitorem a kolektorem zmuszasz elektrony do przebycia między złączami dłuższej drogi. Otóż w półprzewodniku prędkość elektronów i dziur jest dość mała, rzędu czterdziestu kilometrów na sekundę.

Załóżmy, że grubość bazy wynosi 0,1 mm. Do przebycia tej małej odległości elektrony potrzebują $2,5 \mu\text{s}$. Otóż jest to czas trwania jednego półokresu prądu o częstotliwości 200 kHz, która odpowiada długości fali 1500 m. Widzisz więc, że przy takiej grubości bazy można wzmacniać zaledwie sygnały nadawane na falach długich.

Oto dlatego w tranzystorach wielkiej częstotliwości należy redukować grubość bazy do dużo mniejszych wymiarów. Przy grubości bazy 0,001 mm można wzmacniać sygnały o częstotliwości odpowiadającej długości fali 1,5 m. Jednak w przypadku fal decymetrowych, stosowanych zwłaszcza w telewizji, grubość bazy tranzystora do wzmacniania sygnałów o częstotliwościach odpowiadających tym falom powinna być jeszcze mniejsza.

Widzisz więc, że stoimy wobec dwóch przeciwnych wymagań: zwiększenia grubości bazy, aby pojemność między emitorem a kolektorem nie była zbyt duża i możliwie maksymalnego jej zmniejszenia, aby elektrony przebiegały bazę wystarczająco szybko.

Metody rozwiązania problemu

Jak wybrnąć z tego problemu?

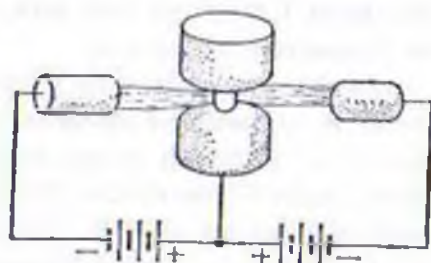
Po prostu przez zmniejszenie pojemności bez zwiększania odległości między okładzinami kondensatora, którym w tym przypadku są emiter i kolektor. Jest to możliwe do zrealizowania metodą maksymalnego zmniejszenia powierzchni emitera i kolektora w obszarach obu złączy.

W tym celu emiter i kolektor wykonuje się w postaci stożków, których szczyty są skierowane ku bazie. Taki kształt obu elektrod uzyskuje się dzięki odpowiedniej metodzie wprowadzania domieszek.

Polega ona na poddawaniu obu stron półprze-

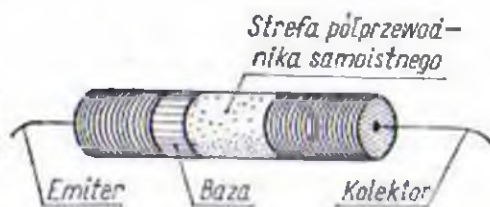
wodnika uderzeniom strumienia cieczy, która pod wpływem napięcia elektrycznego prowadzi do powstania zjawiska elektrolizy. W wyniku elektrolizy następuje wyrwanie atomów i drażnienie w półprzewodniku prawdziwych kraterów.

Kiedy szczyty obu kraterów są wystarczająco blisko, wtedy odwraca się kierunek napięcia, a ciecz wzbogaca się o pewną ilość domieszek. Domieszki, dzięki elektrolizie wnikają w szczyty kraterów i formują w ten sposób emiter i kolektor.



Rys. 135. Strumienie cieczy wywołujące elektrolizę

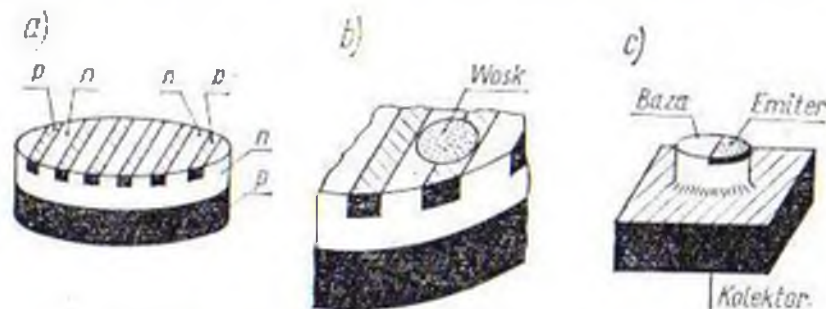
Istnieje również rodzaj tranzystorów wielkiej częstotliwości, w których warstwa bazy najbliższa emitera zawiera większą ilość domieszek. Powoduje to zwiększenie prędkości elektronów, a w związku



Rys. 136. Tranzystor zawierający między bazą a kolektorem strefę półprzewodnika samoistnego poprawiającego jego właściwości w zakresie wielkich częstotliwości

z tym umożliwia wzmocnienie sygnałów znacznie większych częstotliwości. Tego typu tranzystory *dryftowe* mogą być stosowane we wzmacniaczach sygnałów nadawanych na falach decymetrowych.

Można iść dalej w tym kierunku wstawiając



Rys. 137. Kolejne fazy wytwarzania tranzystora mesa

między bazą a kolektorem coś co można nazwać *strefą półprzewodnika samoistnego*. Strefa ta jest warstwą germanu lub krzemu o dużej czystości, a co za tym idzie, o miernej przewodności. Zadaniem strefy półprzewodnika samoistnego jest oddalenie bardzo cienkiej bazy od kolektora, co powoduje zmniejszenie pojemności między emiterem a kolektorem i umożliwia wzmocnienie sygnałów wielkich częstotliwości.

Tranzystory mesa

Inna technologia służy do wytwarzania tranzystorów *mesa*, które można stosować przy częstotliwościach rzędu kilku tysięcy megaherców. Dzięki temu mogą one pracować w stopniach wejściowych niektórych telewizorów.

Tranzystory mesa realizuje się w bloku germanu stanowiącym kolektor typu *p*. Do dolnej powierzchni tego bloku przyspawa się cienki tutek złota służący jako wyprowadzenie.

Na początku, drogą dyfuzji wprowadza się na górną powierzchnię bloku półprzewodnika atomy antymonu. Cienka warstwa domieszek typu *n*, których gęstość jest większa na powierzchni, tworzy bazę. Następnie z tej samej strony, pozwala się wniknąć, również metodą dyfuzji, domieszkom typu *p*. Domieszką jest zwykle aluminium. Warstwa utworzonego w ten sposób półprzewodnika typu *p* stanowi emiter. Najciekawsze jest jednak to, że tę dyfuzję przeprowadza się przez maskę w postaci siatki, dzięki czemu aluminium wnika do półprzewodnika tylko na obszarach stanowiących wąskie paski.

Po zakończeniu tych procesów na powierzchnię, składającą się na przemian z pasków półprzewodnika typu *n* i typu *p*, nakłada się maleńkie krople wosku. Krople te są tak rozmieszczone, że jedną połową powierzchni przykrywają półprzewodnik typu *p* (emitera), a drugą połową półprzewodnik typu

(bazy). Następnie całą płytkę trawi się za pomocą kwasu, który usuwa wszystkie części emitera i bazy z wyjątkiem tych, które są chronione kroplami wosku.

W końcu nie pozostaje nic innego, jak pociąć całą płytkę na tyle tranzystorów, ile na powierzchni kolektora znajduje się pagórków złożonych z bazy i emiterów. Ze względu na te pagórki omawiany tranzystor nosi nazwę *mesa*, gdyż przypomina tak właśnie nazywane płaskowięże w Ameryce Południowej.

Warstwa epitaksjalna

Zejdźmy teraz z góry na równinę. Panuje tam bardzo rozpowszechniony model tranzystora zwany *tranzystorem planarnym*. Swoje powodzenie zawdzięcza temu, że wytwarza się go łatwo jednocześnie w tysiącach egzemplarzy. Umożliwia on również dobrze wzmocnienie wielkich częstotliwości, jak i uzyskiwanie znacznych mocy. Ponadto nadaje się do daleko zaawansowanej miniaturyzacji.

Najczęściej tranzystor planarny wykonuje się w warstwie *epitaksjalnej* półprzewodnika. Co to takiego?

Zasadniczo kolektor powinien mieć małą rezystywność, aby mógł z łatwością przewodzić prąd. W związku z tym należy go wytwarzać z półprzewodnika znacznie nasyczonego domieszkami. Przeciwnie, baza i kolektor powinny zawierać ich dużo mniej.

Aby zapewnić niezbędną różnicę, bogaty w domieszki półprzewodnik pokrywa się cienką warstwą epitaksjalną. Rozważmy proces tworzenia się takiej warstwy na krzemie. W tym celu podgrzewa się go w atmosferze wodoru do temperatury niższej o około 100°C od temperatury topnienia. Następnie obniża się lekko temperaturę wprowadzając półprzewodnik do czterochloru krzemu.

Związek ten rozkładając się odkłada na powierzchni półprzewodnika warstwę epitaksjalną składającą się z atomów krzemu o idealnej siatce krystalicznej. Grubość takiej warstwy jest rzędu setnej części milimetra. Charakteryzuje się ona dużą rezystywnością ze względu na dużą czystość.

Przy okazji wspomnę, że obecnie warstwę epitaksjalną stosuje się również w procesie wytwarzania tranzystorów mesa. Zobaczmy jednak jak wytwarza się tranzystory planarne.

Proces wytwarzania tranzystora planarnego

Załóżmy, że dysponujemy płytką krzemu pokrytą warstwą epitaksjalną. Na początku nałożymy na warstwę epitaksjalną warstwę izolacyjną dwutlenku krzemu. Następnie działając na nią odpowiednią substancją chemiczną wydrążymy w niej okno. Pozwólmy teraz metodą dyfuzji wchłonąć warstwie epitaksjalnej domieszki typu *p* np. boru. W ten sposób utworzymy bazę przyszłego tranzystora.

Pokryjmy na nowo całość warstwą izolacyjną dwutlenku krzemu i za pomocą drugiego procesu chemicznego wydrążymy na środku małe okienko. Pozwólmy teraz, również metodą dyfuzji, wchłonąć warstwie epitaksjalnej, tym razem domieszki typu *n* np. fosfor. W rezultacie utworzymy emiter.

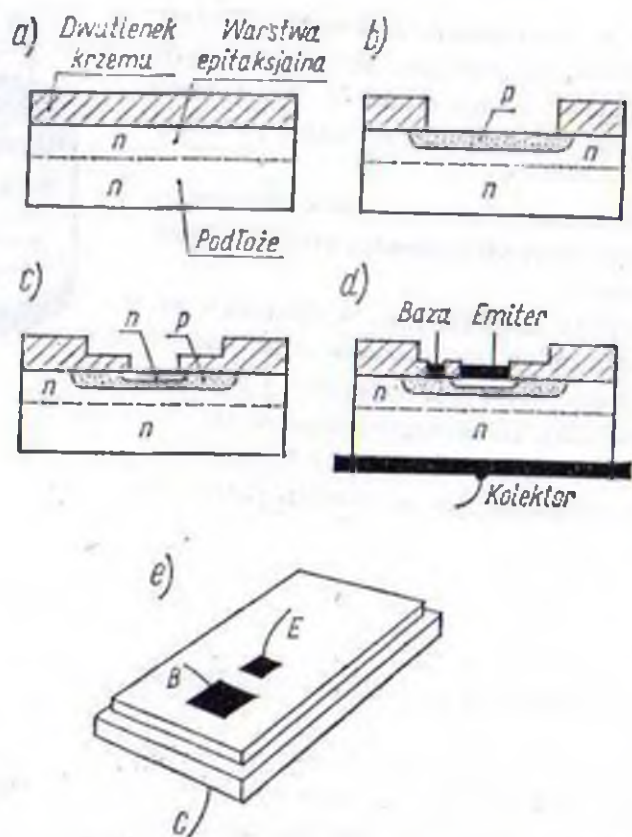
Jeszcze raz pokryjmy całość izolacyjną warstwą dwutlenku krzemu i wywierćmy dwa otwory: jeden do emitera i drugi — oddalony od środka — do bazy. Przez te otwory wyprowadzimy końcówki emitera i bazy wypełniając je metalem drogą naparowania aluminium lub złota. Jeśli idzie o końcówkę kolektora, to wykonujemy ją bez trudności, umieszczając na dolnej powierzchni kolektora przewodzącą płytkę.

Z pewnością zauważysz, że w tranzystorze planarnym o tego rodzaju strukturze wewnętrznej, krańce obu złączy nie mają żadnej styczności z otaczającą atmosferą ponieważ są izolowane warstwą dwutlenku krzemu. Dzięki temu tranzystor zachowuje stale te same właściwości. Dodam jeszcze, że dwutlenek krzemu jest bardziej znany pod nazwą kwarcu.

Jeżeli chce się powiększyć moc tranzystora planarnego, należy w zasadzie zwiększyć powierzchnię emiter-baza; można również w tym celu wydłużyć po prostu linię styku między emiterem a bazą wykonując emiter nie w postaci małego okręgu, a w postaci gwiazdy lub powierzchni ograniczonej linią łamaną.

Zastosowanie warstwy fotoczułej

Po wysłuchaniu moich wyjaśnień dotyczących produkcji tranzystorów planarnych, która wymaga znacznej liczby operacji, bez wątpienia myślisz, Ignasiu, że cena wytwarzania tego typu tranzystorów jest bardzo wysoka. Śpieszę Cię więc uspokoić.



Rys. 138. Proces wytwarzania tranzystora planarnego: a) na izolacyjną warstwę epitaksjalną nakłada się dwutlenek krzemu; b) w warstwie izolacyjnej zostaje otwarte „okno”, przez które dyfundują domieszki typu p; c) po ponownym nałożeniu warstwy izolacyjnej otwiera się drugie okno, węższe od poprzedniego, przez które następuje dyfuzja domieszek typu n; d) wykonuje się otwory do bazy i emitera, które wypełnia się metalem, a następnie wyprowadza się końcówki; e) pastylkę podłoża umieszcza się na metalowej płytce spełniającej zadanie końcówki kolektora

Jednocześnie produkuje się dziesiątki a nawet setki tego typu tranzystorów, z których niektóre są niemal wymiarów mikroskopijnych. W tym celu wykorzystuje się metody zapożyczone z fotolitografii, które są jeszcze bardziej przydatne przy produkcji układów scalonych; pomówimy o nich innym razem.

Musisz wiedzieć, że małe otwory uzyskuje się dzięki pokryciu powierzchni płytki warstwą fotoczułą. Warstwa ta pod wpływem światła utrwala się i nie daje się rozpuścić w roztworze, do którego płytka zostaje zanurzona w kolejnym procesie obróbki. W ten sposób naświetlone części powierzchni zostają ochronione, przy czym zadanie środka ochronnego stanowi swego rodzaju lakier powstały z utrwalonej warstwy fotoczułej.

Domyślasz się z pewnością, że na warstwę fotoczułą rzutuje się w tym celu obraz świetlny tych części warstwy epitaksjalnej, które nie powinny być poddawane trawieniu w roztworze chemicznym. Na ogół projekcji dokonuje się za pomocą obiektywów umożliwiających zmniejszenie rzutowanych obrazów do wymiarów mikrominiaturowych.

Mógłbym jeszcze Ci opowiadać o innych tranzystorach, jak na przykład opartych na działaniu pola – czyli tranzystorach polowych. Nie chcę jednak dalej Cię męczyć i przeto zostawiam Cię w spokoju. Możesz wyłączyć magnetofon.

POGAWĘDKA JEDENASTA

Zasada działania tranzystorów polowych jest zupełnie inna niż zasada działania klasycznych tranzystorów omówionych poprzednio przez naszych dwóch przyjaciół. Pod pewnymi względami, dzięki swoim właściwościom, te szczególne tranzystory są jeszcze bardziej podobne do triod. W poniższym dialogu po przeanalizowaniu budowy i parametrów tych tranzystorów omawia się sposoby ich zastosowania praktycznego.

TRANZYSTORY POLOWE

Zjawisko zwężania

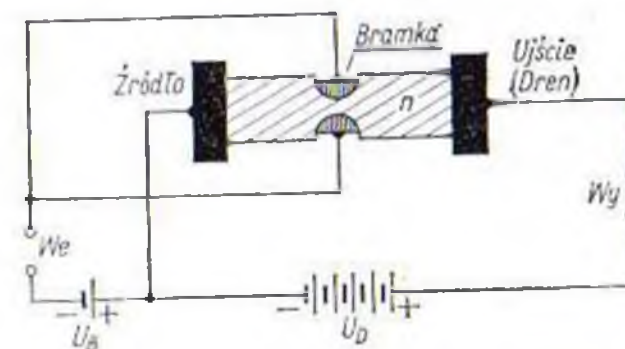
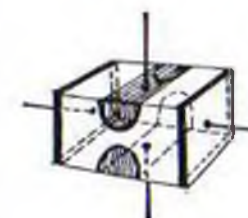
Pyt. — Twój wuj wspominał o istnieniu tranzystorów polowych. Przypuszczam, że realizuje się je dzięki otoczeniu półprzewodnika uzwojeniem, którego pole magnetyczne oddziałuje na...

Mądr. — Nie, mój przyjacielu. Idzie tutaj o działanie pola elektrycznego. Tranzystor tego typu niewiele przypomina te, którymi zajmowaliśmy się do chwili obecnej. Nie ma on jak tamte takich elektrod jak emiter, baza i kolektor.

Tranzystor polowy składa się z płytki półprzewodnika, najczęściej typu n o znacznie zredukowanej grubości w środkowej części. W utworzonych w ten sposób wydrążeniach jest umieszczona elektroda, która wytwarza pole elektryczne. W przypadku półprzewodnika typu n pole powinno być ujemne, aby mogło przeciwstawić się w mniejszym lub większym stopniu przepływowi elektronów wywołanemu napięciem, które jest doprowadzone między oba końce półprzewodnika.

Pyt. — Jeżeli dobrze rozumiem, to pole ujemne w pewien sposób zwęża strumień elektronów przemieszczających się od ujemnej do dodatniej końcówki półprzewodnika.

Mądr. — To jest właśnie zasada działania tranzystora polowego. Oddziaływanie pola na natężenie prądu jest podstawą właściwości wzmacniania tego typu tran-



Rys. 139. Tranzystor polowy wykonany z półprzewodnika typu n

zystora. Napięcie zmienne, które należy wzmocnić doprowadza się między elektrody wytwarzające pole elektryczne a jedną z końcówek półprzewodnika. W ten sposób powstaje obwód wejściowy. Wyjście tworzy obwód zewnętrzny umieszczony między końcami półprzewodnika.

Pokrewieństwo z triodą

Pyt. – Twój tranzystor polowy dziwnie przypomina triodę! W triodzie napięcie, które chcemy wzmocnić, doprowadzamy między siatkę a katodę. Zmiany potencjału siatki przeciwstawiają się w mniejszym lub większym stopniu przepływowi strumienia elektronów od katody do anody.

Takie same zjawiska występują w tym tranzystorze. Wywołuje je właśnie elektroda umieszczona między dwoma końcami półprzewodnika, w zależności od swojego potencjału w mniejszym lub większym stopniu przeciwdziała ona przepływowi prądu.

Przypuszczam, że skoro tak jest, to jedną końcówkę półprzewodnika można nazwać katodą, drugą – anodą, a elektrodę wytwarzającą pole – siatką.

Mądr. – Analogia, o której mówisz jest rzeczywiście dokładna. Nie nadano jednak poszczególnym elektrodom tego tranzystora nazw ich odpowiedników w triodzie.

Elektroda, która wytwarza pole otwierające przejście elektronom, została nazwana *bramką*. Bardzo często stosuje się termin angielski *gate*.

Końcówka, z którą zostaje połączony drugi biegun źródła napięcia sterującego bramkę nazywa się *źródłem*, natomiast końcówka, z której wypływa elektronowy prąd wyjściowy nosi nazwę *ujścia* albo *drenu*.

Pyt. – Widzę na Twoim rysunku, że między bramką a źródłem występuje suma napięć: napięcia stałego U_B polaryzacji bramki i napięcia zmiennego, które ma być wzmocnione. Sądzę, że napięcie stałe ma wystarczająco dużą wartość, taką aby przeciwnie skierowane połówki napięcia zmiennego nie odwracały polaryzacji bramki.

W rozpatrywanym przez nas przypadku, bramka jest spolaryzowana ujemnie. A zatem z pewnością trzeba unikać tego, aby dodatnie połówki napięcia wejściowego miały większą wartość od napięcia U_B baterii.

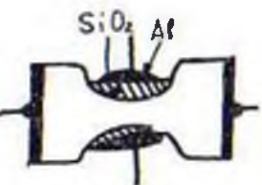
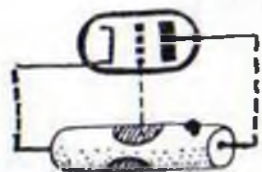
Mądr. – Można by powiedzieć, Ignasiu, że stosowałeś już tranzystory polowe...

Nieskończenie duża rezystancja wejściowa

Pyt. Jeszcze nie, ale mam nadzieję, że to pewnego dnia nastąpi. Tymczasem chciałbym wiedzieć czy napięcie U_B wywołuje przepływ prądu między źródłem a bramką, o znacznej wartości.

Mądr. – Absolutnie nie! W tego typu tranzystorach bramkę tworzy warstwa domieszek (wprowadzonych do półprzewodnika drogą dyfuzji) o przeciwnym znaku w porównaniu ze znakiem półprzewodnika. Gdy półprzewodnik ma znak *n*, bramkę tworzą dwie strefy domieszek typu *p*. Otóż kiedy do tak uformowanego złącza *p-n* doprowadza się napięcie polaryzujące część *p* ujemnie względem części *n*, złącze stanowi dla prądu przeszkodę nie do pokonania. Co najwyżej płynie przez nie prąd o wartości pomijalnie małej rzędu miliardowej części ampera, lub jak zwykle mówimy – nanoampera.

Istnieją zresztą tranzystory polowe, w których bramka jest wykonana w postaci płytek aluminiowych oddzielonych od półprzewodnika bardzo cienką warstwą izolacyjną dwutlenku krzemu.



Pyt. – Coraz bardziej utwierdzam się w przekonaniu, że tranzystor polowy jest niezwykle podobny do triody. W triodzie nie powinien płynąć prąd siatki. W tym celu siatka zostaje spolaryzowana ujemnie względem katody. Wzmocnienie wynika wyłącznie ze zmian prądu anodowego wywołanych zmianami potencjału siatki.

W tranzystorze polowym również nie występuje prąd w obwodzie wejściowym, to znaczy między bramką a źródłem. I w tym przypadku zmienny potencjał bramki decyduje o zmianach natężenia prądu ujścia.

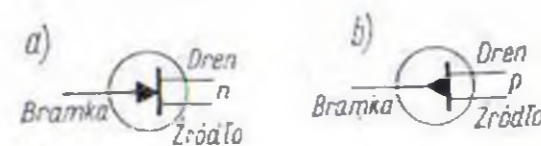
Sytuacja jest tu dużo lepsza niż w zwykłych tranzystorach. W obwodach wejściowych tych tranzystorów płynie prąd baza-emiter, co powoduje stratę mocy.

Mądr. – To jest właśnie powodem częstego stosowania tranzystorów polowych w stopniach wejściowych odbiorników. Dzięki temu nie występuje strata energii bardzo słabych sygnałów odbieranych przez antenę, tylko ich skuteczne wzmacnianie. Widzisz więc, że w tranzystorze polowym, podobnie jak w triodzie, rezystancja wejściowa jest prawie nieskończenie duża.

Nachylenie tranzystora

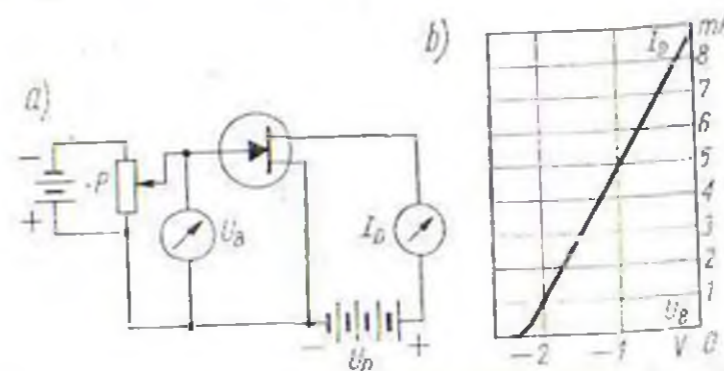
Pyt. – Jak można zmierzyć, ile zmieni się prąd ujścia w zależności od zmiany potencjału bramki?

Mądr. – Narysuję Ci zaraz bardzo prosty układ, który w tym celu trzeba zrealizować. Przedtem jednak pokażę Ci symbole graficzne tranzystorów polowych. W zależności od typu półprzewodnika strzałka, która symbolizuje bramkę, jest skierowana w jednym lub w drugim kierunku.

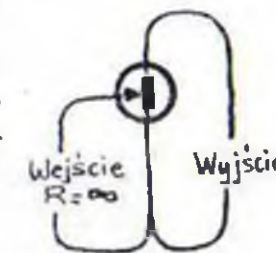


Rys. 140. Symbole graficzne tranzystorów polowych wykonanych z półprzewodnika typu *n* (a) i typu *p* (b)

A oto układ pomiarowy, który Cię interesuje. Widzisz że potencjał bramki może być zmieniany za pomocą potencjometru *P* dołączonego równolegle do baterii dostarczającej odpowiedniego napięcia. Voltomierz wskazuje nam, jaka jest wartość napięcia U_B doprowadzonego między bramkę a źródło.



Rys. 141. W tranzystorze polowym wykonanym z półprzewodnika typu *n* mierzy się zmianę prądu I_a w funkcji napięcia U_B doprowadzonego między bramką a źródło, przy czym wartość napięcia U_B ustala się za pomocą potencjometru *P* (a). Uzyskana w ten sposób krzywa (b) przypomina charakterystykę prądu anodowego triody w funkcji napięcia siatkowego



Poza tym miliamperomierz umożliwia nam pomiar natężenia prądu I_D płynącego dzięki napięciu U_D .

Po wykonaniu pomiarów prądu I_D dla różnych wartości napięcia U_B , wykreśliła się krzywą charakteryzującą zmienność prądu I_D w funkcji napięcia U_D . Możesz stwierdzić, że większa część tej krzywej ma przebieg prostoliniowy. Właśnie na podstawie tej części krzywej wyznaczamy nachylenie tranzystora.

Widzisz, że gdy napięcie U_B wzrasta od -2 V do -1 V , natężenie prądu I_D wzrasta od 1 mA do prawie 5 mA . Nachylenie wynosi więc około 4 mA/W . To nie jest dużo. Niektóre tranzystory polowe mają jednak nachylenie rzędu kilkudziesięciu miliamperów na wolt.

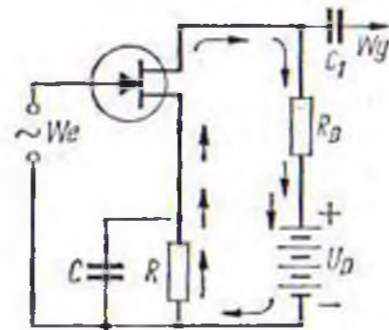
Polaryzacja bramki

Pyt. — Widzę, że w porównaniu ze zwykłymi tranzystorami $n-p-n$ oraz $p-n-p$ tranzystor polowy wykazuje sporo zalet. Co jednak wydaje mi się mniej korzystne, to konieczność stosowania dwóch źródeł napięcia: polaryzacji bazy i zasilania drenu.

Mądr. — Uspokój się Ignasiu, wystarczy napięcie zasilania drenu. Przypomnij sobie jak polaryzuje się ujemnie siatkę triody?

Pyt. — Oczywiście. Wytwarza się spadek napięcia na rezystancji, przez którą płynie prąd anodowy. Dzięki niemu potencjał katody staje się dodatni względem potencjału siatki.

Mądr. — A więc tak samo postąpimy w przypadku naszego tranzystora. Między źródło a ujemny biegun baterii U_D włączamy rezystor R z dołączonym równolegle do niego kondensatorem C zawierającym składową zmienną prądu drenu. Składowa stała tego prądu, płynąc przez rezystancję R wytwarza spadek napięcia, który powoduje, że potencjał źródła staje się dodatni względem ujemnego bieguna baterii U_D . Otóż bramka jest właśnie połączona z tym biegunem przez źródło napięcia zmiennego. W ten sposób zostaje ona spolaryzowana ujemnie względem źródła¹⁾.

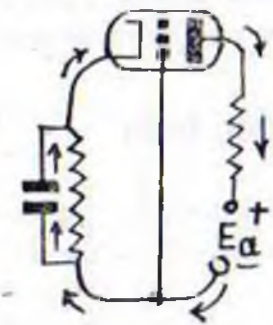


Rys. 142. Dzięki spadkowi napięcia na rezystancji R bramka zostaje spolaryzowana ujemnie względem źródła. Prąd płynący przez rezystancję obciążenia R_B wytwarza napięcie, które przez kondensator C_1 zostaje doprowadzone do wyjścia. Układ jest po prostu stopniem wzmacniającym

Na rysunku zamieściłem również rezystancję obciążenia R_B . Prąd drenu płynący przez nią wytwarza wzmacnione napięcie, które przez kondensator sprzęgający C_1 zostaje doprowadzone do następnego stopnia.

Pyt. — Reasumując, narysowany przez Ciebie układ przedstawia stopień wzmacniający.

¹⁾ W tym przypadku chodzi o elektrodę tranzystora polowego (przyp. tłum.).



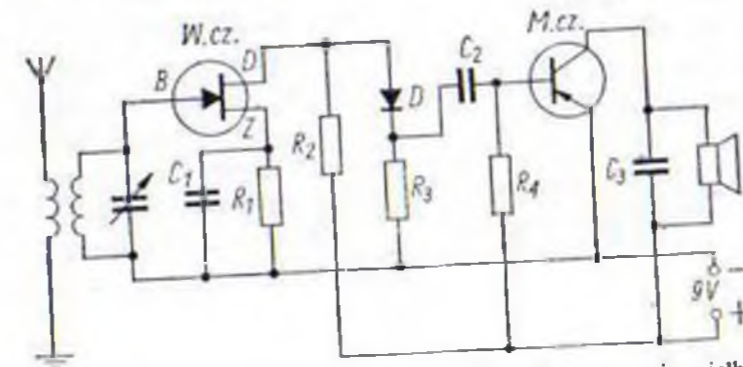
Tranzystorowy odbiornik radiofoniczny

Mądr. — Tak, ale w sposób bardzo uproszczony. Mogę jednak jeżeli chcesz, pokazać Ci kompletny układ odbiornika zawierający stopień wzmacnienia wielkiej częstotliwości z tranzystorem polowym, półprzewodnikowy detektor diodowy i stopień małej częstotliwości z tranzystorem klasycznym.

Pyt. — Stwierdzam z radością, że schematy czytam równie łatwo jak powieści Wiktora Hugo i nawet z taką samą przyjemnością...

Rezystor R_1 służy do ujemnego spolaryzowania bramki pierwszego tranzystora względem jego źródła. Sygnal wielkiej częstotliwości odebrany przez antenę zostaje doprowadzony między bramką a źródło. Kondensator C_1 zwiera dla wielkiej częstotliwości rezystor R_1 .

Prąd drenu płynący przez rezystor R_2 wytwarza wzmacnione napięcie wielkiej częstotliwości, które zostaje doprowadzone do diody detekcyjnej D . Uzyskany w wyniku detekcji prąd małej częstotliwości wytwarza z kolei spadek napięcia na rezystancji R_3 . Napięcie to, przez kondensator sprzęgający C_2 zostaje doprowadzone między bazę a emiter tranzystora małej częstotliwości. Baza tego tranzystora jest spolaryzowana ujemnie dzięki spadkowi napięcia na rezystancji R_4 . Prąd kolektora pobudza głośnik.



Rys. 143. Tranzystorowy odbiornik radiofoniczny składający się ze stopnia wielkiej częstotliwości z tranzystorem polowym, diody półprzewodnikowej i stopnia małej częstotliwości

Czy powiedziałem jakieś głupstwa?

Mądr. — Wcale nie! Twoja analiza schematu jest w stu procentach identyczna z moją. Gratuluję Ci i aby pozostać pod bardzo miłym wrażeniem, jakiego doznałem kończę naszą pogawędkę.



Profesor Radiol omawia

TRZY PODSTAWOWE UKŁADY PRACY TRANZYSTORÓW

Bez względu na funkcje, jakie spełniają tranzystory pracują one zawsze w jednym z trzech niżej opisanych układów podstawowych. Układy te są analogiczne do stosowanych w przypadku triod.

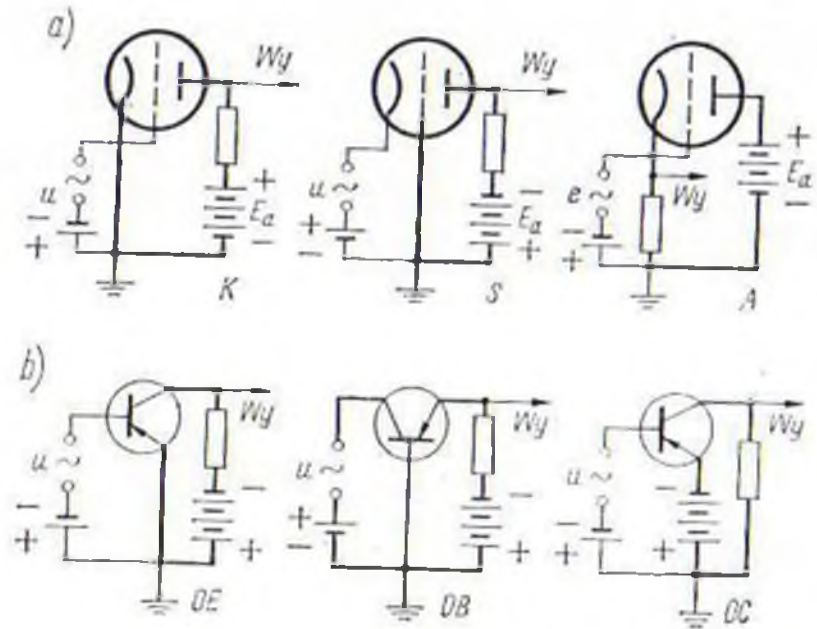
Podzielam pogląd mojego siostrzeńca Mądralskiego i stwierdzam z zadowoleniem, że rzeczywiście bardzo dobrze zrozumiałeś zasadę działania tranzystorów polowych. Gratuluję Ci Ignasiu.

Wróćmy jednak teraz do zwykłych tranzystorów, tych, które mają emiter, bazę i kolektor. Wyjaśnię Ci za chwilę trzy podstawowe układy pracy tych tranzystorów. Ponieważ bardzo dobrze zrozumiałeś analogię, która istnieje między tranzystorem a triodą, oprę swoje wywody właśnie na tym podobieństwie.

Podstawowe układy pracy triody

Omówmy najpierw trzy podstawowe układy pracy triody. Każdy z tych układów jest określony wyborem elektrody, która jest połączona z masą. Ten ostatni termin oznacza po prostu punkt o stałym potencjale, który jest zwykle połączony z zaciskiem Ziemi i z którym w aparatach lampowych łączy się biegun ujemny źródła napięcia zasilającego.

W klasycznych układach z masą jest połączona katoda, bądź bezpośrednio, bądź przez rezystor ka-



Rys. 144. a) Trzy podstawowe układy pracy triody: K — ze wspólną katodą, S — ze wspólną siatką, A — ze wspólną anodą b) Trzy podstawowe układy pracy tranzystora: OE — ze wspólnym emiterem, OB — ze wspólną bazą, OC — ze wspólnym kolektorem

nowy. Rysunek K, podobnie jak i następne rysunki, które dla Ciebie wykonałem, upraszczam polewując siatkę za pomocą baterii. Grubszą linią zaznaczam obwód, przez który płynie prąd anodowy. W tym właśnie obwodzie umieszczam rezystancję obciążenia, która zresztą może być zastąpiona impedancją. Napięcie zmienne powstające na rezystancji dzięki przepływowi prądu anodowego służy do sterowania następnego stopnia. Zacisk, z którego odbiera się napięcie wyjściowe, oznaczam symbolem Wy.

Układ K, co już Ci mówiłem, jest najbardziej klasyczny w tym sensie, że napięcie zmienne jest doprowadzone między siatkę a masę.

Można jednak postąpić również odwrotnie, jak pokazano na rysunku S, gdzie siatka jest połączona z masą, a więc potencjał siatki jest stały. Napięcie zmienne, które należy wzmocnić, zostaje doprowadzone do katody.

Można nawet uczynić stałym potencjał anody, łącząc ją z masą przez źródło napięcia anodowego, jak to wyraźnie widać na rysunku A. W tym przypadku impedancja obciążenia znajduje się między katodą a masą.

Nie bądź zaskoczony, Ignasiu, przy analizowaniu tego układu. W rzeczywistości znasz już ten układ, ponieważ rysowałem Ci schemat katodyny, tyle że nie w tak uproszczonej postaci.

Układ ze wspólnym emiterem

Teraz, gdy — mam — nadzieję — uważnie przeanalizowałeś te trzy podstawowe układy pracy triody, możemy przejść do analogicznych układów tranzystorowych. Już Ci podaję ich nazwy „układ ze wspólnym emiterem” (OE), „układ ze wspólną bazą” (OB) i „układ ze wspólnym kolektorem” (OC).

Mówimy, że elektroda jest wspólna, gdy jednocześnie znajduje się w obwodzie wejściowym i wyjściowym i ponadto gdy ma potencjał stały dzięki połączeniu z masą bądź bezpośrednio, bądź przez źródło napięcia stałego.

Układem klasycznym jest układ ze wspólnym emiterem analogiczny do lampowego układu ze wspólną katodą. W układzie OE rezystancja wejściowa jest względnie mała, kilkaset omów, a w najlepszym przypadku 2000 Ω . Jeśli idzie o rezystancję wyjściową obejmującą całość tranzystora od emitera do kolektora, to zawiera się ona między 10 a 100 k Ω , a więc jest dość duża.

Układ OE zapewnia bardzo duże wzmocnienie. Zmiany prądu wejściowego wywołują od 20 do 200 razy większe zmiany prądu wyjściowego. Wzmocnienie napięciowe osiąga wartości rzędu kilkuset. Oznacza to, że moc (która — jak dobrze wiesz — jest iloczynem napięcia i natężenia prądu) jest wzmocniana kilka tysięcy razy.

Zwróć jeszcze uwagę, że w omawianym układzie zmiany potencjału bazy mają przeciwną fazę w porównaniu ze zmianami potencjału, które występują na kolektorze w obwodzie wyjściowym. Rzeczywiście, gdy potencjał bazy staje się bardziej ujemny, prąd kolektora wzrasta, i potencjał na kolektorze wzrasta (staje się mniej ujemny).

Układ ze wspólną bazą

Przeanalizujemy teraz układ OB. W tym układzie baza ma potencjał stały, a napięcie zmienne, które należy wzmocnić doprowadza się do emitera. Domyślasz się więc, że w tym przypadku zmiany potencjału na kolektorze są w fazie ze zmianami potencjału na emiterze. W istocie, kiedy potencjał emitera staje się bardziej ujemny, prąd kolektora maleje, spadek napięcia na rezystancji obciążenia zmniejsza się i w rezultacie potencjał kolektora staje się również bardziej ujemny.

Zobaczmy teraz, jaka tu może być wartość rezystancji wejściowej. Napięcie zmienne doprowadzone między emiter a masę wywołuje w obwodzie wejściowym zmiany prądu emitera, natomiast w przypadku układu OE w obwodzie wejściowym ulegał zmianie tylko prąd bazy i tylko ten prąd należało uwzględnić, przy obliczaniu rezystancji wejściowej.

Otóż w układzie OB prąd emitera płynący całkowicie w obwodzie wejściowym jest znacznie większy od prądu bazy ponieważ składa się z prądu bazy i prądu kolektora.

W związku z tym dzieląc, zgodnie z prawem Ohma, napięcie przez prąd otrzymasz dość małą wartość rezystancji wejściowej. Wynosi ona zwykle kilkadziesiąt omów, a niewiele przekracza sto omów.

Zmiany prądu emitera (który, powtarzam, jest sumą prądu bazy i prądu kolektora) są większe niż zmiany prądu kolektora. Oznacza to, że mamy do czynienia raczej z tłumieniem niż wzmocnieniem prądowym.

Przeciwnie, w układzie występuje bardzo duże wzmocnienie napięciowe. Wynika to z faktu, że obwód wyjściowy ma bardzo dużą rezystancję wynoszącą od 0,5 do 2 MΩ. W tych warunkach rezystancja obciążenia powinna mieć również dużą wartość a wówczas mniejsze zmiany prądu kolektora wywołują pojawienie się dużych zmian napięcia. Właśnie dlatego wzmocnienie napięciowe osiąga wartości rzędu kilkuset, jeśli nie tysięcy razy.

Układ OB ze względu na dużą rezystancję wyjściową jest szczególnie wskazany do sterowania układów o dużej impedancji.

Układ ze wspólnym kolektorem

Zobaczmy wreszcie jak działa układ ze wspólnym kolektorem. Tutaj obwód wejściowy jest identyczny z obwodem wyjściowym układu OB, który właśnie skończyliśmy omawiać. Stąd wniosek, że jego rezystancja wejściowa jest duża. Rzeczywiście, wynosi ona od kilkuset kiloomów do megaoma. Przeciwnie, obwód wyjściowy ma małą rezystancję, ponieważ właśnie ta rezystancja separuje emiter i kolektor; wartość jej nie przekracza pół kilooma.

W takim razie rozumiesz, że małe zmiany prądu wejściowego pociągają za sobą dużo większe zmiany prądu wyjściowego. Wzmocnienie prądowe zawiera się zwykle w granicach od 20 do 200.

Podobnie jednak jak w analogicznym układzie katodiny, zmiany napięcia wyjściowego są takie same jak zmiany napięcia wejściowego. Wynika to stąd, że na rezystancji obciążenia, która powinna mieć małą wartość, nawet duże zmiany prądu mogą wywołać tylko małe zmiany napięcia.

Bez trudu dojdiesz do wniosku, że te zmiany są w fazie ze zmianami napięcia wejściowego.

Do czego może służyć układ, w którym nie występuje wzmocnienie napięciowe? Stosuje się go tam, gdzie istnieje potrzeba sterowania układem o małej impedancji wejściowej, który w związku z tym wymaga prądu o znacznej wartości.

Widzisz więc, że zawsze musi istnieć właściwe dopasowanie impedancji wyjściowej — poprzedniego stopnia i wejściowej — następnego stopnia.

Teraz, kiedy już znasz podstawowe układy pracy tranzystora będziesz mógł z łatwością analizować układy praktyczne.

Odwagi i wszystkiego najlepszego!

POGAWĘDKA DWUNASTA

W układach tranzystorowych występuje szczególne zagadnienie dopasowania wyjścia jednego stopnia do wejścia następnego. Wynika to stąd, że rezystancja wejściowa tranzystora nie jest, jak w przypadku lamp nieskończenie duża. Mądralski przedstawia tu różne sposoby rozwiązania tego zagadnienia. Następnie analizuje układy ujemnego sprzężenia zwrotnego służące do zwalczania wpływu temperatury i zmniejszania zniekształceń.

DOPASOWANIE WYJŚCIA I WEJŚCIA. UJEMNE SPRZĘŻENIE ZWROTNE

Podobieństwa i różnice

Pyt. — Uwagi Twojego wuja na temat trzech podstawowych układów bardzo mnie zainteresowały. Dotyczyły one jednak wyłącznie tranzystorów typu *p-n-p*. Chciałbym wiedzieć, czy w przypadku tranzystorów *n-p-n* można stosować podobne układy.

Mądr. — Tak jest, pod warunkiem odwrócenia polaryzacji obu źródeł napięcia występujących w każdym z tych układów.

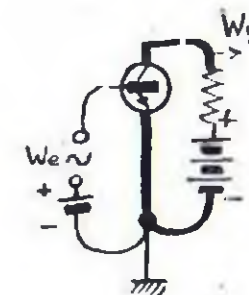
W praktyce stosuje się tylko jedną baterię, a polaryzację bazy zapewnia się za pomocą spadku napięcia na rezystancji lub za pomocą dzielnika napięcia składającego się z dwóch rezystorów połączonych szeregowo i przyłączonych do biegunów baterii.

Pyt. — Ponieważ trzy podstawowe układy pracy tranzystorów są analogiczne do układów pracy triody, myślę, że wszystkie układy wzmacniaczy w.c.z. i m.c.z., przemiany częstotliwości i detekcji, którymi zajmowaliśmy się poprzednio, mogą być również zastosowane w odbiornikach tranzystorowych.

Mądr. — Twój wniosek jest zbyt pochopny. Analogia nie oznacza identyczności. Zapominasz, że niektóre parametry tranzystorów różnią się znacznie od odpowiednich parametrów lamp elektronowych. Lampy mają na przykład rezystancję wejściową nieskończenie dużą, a rezystancja wejściowa tranzystora może być mała.

W związku z tym, w przypadku lamp elektronowych, każdy stopień musi dostarczyć do następnego tylko napięcie. W przypadku tranzystorów natomiast, powinien dostarczyć pewnej mocy. Wynika to stąd, że napięcie doprowadzone do następnego stopnia wywołuje przepływ prądu w jego obwodzie wejściowym.

Pyt. — Rzeczywiście, to zmienia wszystko. Rozumiem teraz dlaczego Twój wuj w swoich ostatnich wyjaśnieniach kładł nacisk na rezystancje wejściową i wyjściową każdego z omawianych układów podstawowych. Podsumował to zresztą mówiąc, że trzeba zapewnić właściwe dopasowanie między dwoma kolejnymi stopniami przez możliwie dokładne zrównanie impedancji wyjściowej pierwszego stopnia z impedancją wejściową drugiego stopnia.

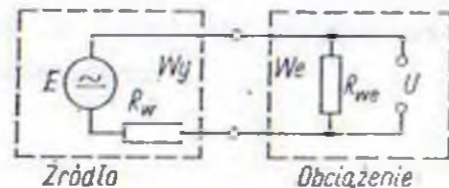


Dopasowanie źródła do obciążenia

Mądr. — Jest to zasada ogólna we wszystkich dziedzinach elektrotechniki i elektroniki. Trzeba zawsze odróżniać *źródło* prądu od tego co stanowi jego *obciążenie*. Dla przykładu bateria jest źródłem, a cały układ odbiornika jego obciążeniem.

Otóż samo źródło ma *rezystancję wewnętrzną* R_w , która może być duża albo mała. Napięcie stałe lub zmienne, które powstaje wewnątrz źródła nosi nazwę *sily elektromotorycznej (SEM)*.

Pyt. — W sumie jest to napięcie, które mierzymy na zaciskach baterii?



Rys. 145. Do źródła napięcia E o rezystancji wewnętrznej R_w dołącza się obciążenie o rezystancji wejściowej R_{we} . Napięcie na zaciskach wejściowych jest równe U

Mądr. — Nie Ignasiu, ponieważ prąd, który płynie przez baterię, wytwarza spadek napięcia na jej rezystancji wewnętrznej. Toteż na jej zaciskach pojawia się napięcie, równe sile elektromotorycznej zmniejszonej właśnie o ten spadek napięcia.

Pyt. — Jeżeli jednak bateria nie jest z niczym połączona, a w związku z tym nie płynie przez nią żaden prąd...

Mądr. — W takim przypadku, rzeczywiście na jej zaciskach pojawia się w całej okazałości siła elektromotoryczna, ponieważ nie ma spadku napięcia na rezystancji wewnętrznej.

Właśnie dlatego woltomierz tylko wtedy mierzy dobrze siłę elektromotoryczną, kiedy jego rezystancja jest bardzo duża, to znaczy kiedy płynie przez niego bardzo mały prąd.

Zobaczmy teraz co się będzie działo, gdy do źródła dołączymy obwód obciążenia o rezystancji wejściowej R_{we} .

Pyt. — Stwierdzam, że rezystancja wewnętrzna R_w źródła i rezystancja R_{we} obciążenia są połączone szeregowo, a więc prąd, który płynie dzięki sile elektromotorycznej E , przepływa najpierw przez jedną, a potem przez drugą rezystancję.

Mądr. — Masz rację. I na każdej z tych rezystancji wywołuje spadek napięcia tym większy, im większa jest wartość rezystancji.

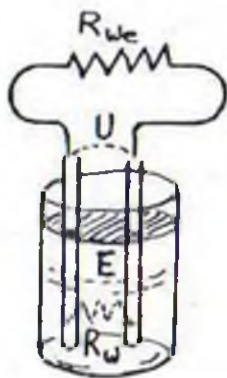
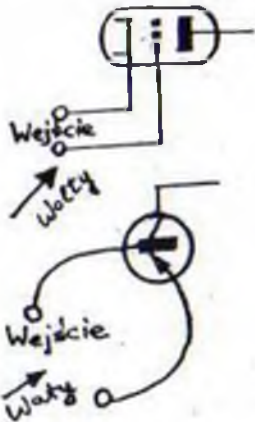
Pyt. — Oczywiście. Widzę już dokąd zmierzasz. Jeżeli rezystancja obciążenia R_{we} jest bardzo, bardzo duża, a rezystancja źródła R_w mała, to prawie cała siła elektromotoryczna jako napięcie U pojawia się na rezystancji obciążenia R_{we} .

Tak właśnie dzieje się w przypadku lamp elektronowych, których rezystancja wejściowa jest nieskończenie duża. W związku z tym całe napięcie występujące na wyjściu jednego stopnia może być doprowadzone do następnego.

Tranzystory jednak mają rezystancję wejściową dość małą. W rezultacie, jeżeli rezystancja wyjściowa poprzedniego stopnia jest względnie duża, to na wejściu następnego stopnia wystąpi małe napięcie U .

Sądzę, więc że należy tak projektować układy, aby rezystancja wejściowa danego stopnia była większa niż rezystancja wyjściowa stopnia, który go poprzedza.

Mądr. — Wniosek niezbyt ścisły, Ignasiu. Zapominasz, że do wejścia tranzystora należy doprowadzić pewną moc, a nie samo napięcie. Jak wiesz moc jest iloczynem



napięcia i prądu. W związku z tym układ należy tak zaprojektować, aby przez rezystancję wejściową płynął pewien prąd (a zatem nie powinna ona być zbyt duża) i aby ten prąd wytwarzał na niej pewien spadek napięcia (a więc rezystancja nie może być zbyt mała).

Wyjaśnia Ci to wreszcie korzyść wynikającą z istnienia wartości rezystancji wejściowej tego samego rzędu wielkości co rezystancja wyjściowa poprzedniego stopnia. W ten sposób uzyskuje się wystarczające wartości napięcia i prądu, a więc i mocy doprowadzonej do tranzystora, które zapewniają jego optymalną pracę.

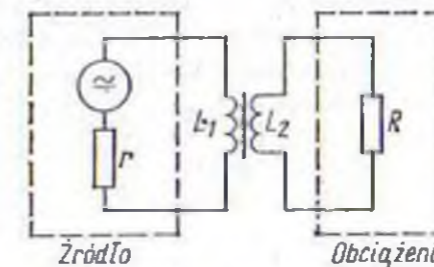
Idealny sposób dopasowania wejścia do wyjścia

Pyt. — Rozumiem! Przypuszczam zresztą, że to co powiedziałeś odnosi się nie tylko do rezystancji, ale ogólnie do każdego rodzaju impedancji.

Jednakże warunek zrównania impedancji wyjściowej i wejściowej współpracujących ze sobą stopni musi bardzo ograniczać możliwości łączenia różnych układów.

Mądr. — Nie domyślasz się Ignasiu, że istnieje urządzenie umożliwiające dokonanie przetworzenia impedancji. Za pomocą tego urządzenia można połączyć dwa stopnie, których impedancje nie pozwalają na ich bezpośrednie połączenie.

Pyt. — Myślę, myślę, ale nie wiem co można by tu zastosować.



Rys. 146. Zastosowanie transformatora umożliwia dopasowanie impedancji obciążenia do impedancji źródła

Mądr. — Po prostu transformator. Transformator ten powinien mieć indukcyjność uzwojenia pierwotnego tego samego rzędu wielkości¹⁾ co rezystancja wewnętrzna źródła; indukcyjność uzwojenia wtórnego powinna być w przybliżeniu równa rezystancji obciążenia. W ten sposób źródło i obciążenie zostają połączone przy zachowaniu najlepszych warunków.

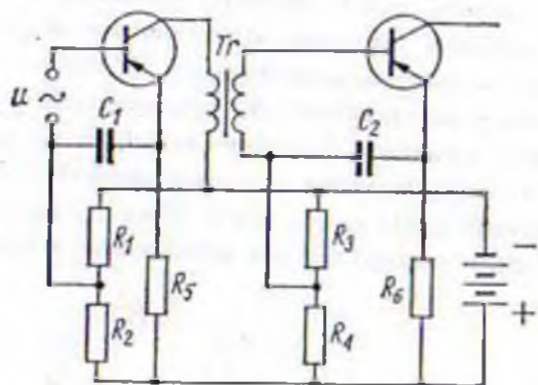
Pyt. — Przypominam sobie, że indukcyjność uzwojenia jest proporcjonalna do kwadratu liczby zwojów. W ten sposób, jeżeli uzwojenie wtórne L_2 transformatora ma dwa razy więcej zwojów niż uzwojenie pierwotne L_1 , to jego indukcyjność, a więc i indukcyjność będą cztery razy większe. Taki transformator umożliwi połączenie dwóch stopni, z których drugi ma impedancję wejściową cztery razy większą od impedancji wyjściowej poprzedniego stopnia.

Mądr. — Stwierdzam, że jesteś bardzo mocny w matematyce. W takim razie dam Ci zadanie. Oto schemat dwóch stopni wzmacnienia małej częstotliwości, wyposażonych w tranzystory pracujące w układzie ze wspólnym emiterem. Jaka powinna być przekładnia transformatora sprzęgającego, jeżeli rezystancja wyjściowa pierwszego stopnia wynosi $36 \text{ k}\Omega$, a rezystancja wejściowa drugiego — $1 \text{ k}\Omega$?

Pyt. — A więc, ponieważ rezystancja wyjściowa jest 36 razy większa od rezystancji wejściowej następnego stopnia, indukcyjność uzwojenia pierwotnego transfor-

¹⁾ Co najmniej (przyp. tłum.).





Rys. 147. Wzmacniacz m.cz. składający się z dwóch stopni tranzystorowych sprzężonych za pomocą transformatora, który zapewnia w racjonalny sposób wyrównanie rezystancji wyjściowej i wejściowej

matora powinna być 36 razy większa od indukcyjności uzwojenia wtórnego. A ponieważ indukcyjność jest proporcjonalna do kwadratu liczby zwojów, to uzwojenie pierwotne powinno mieć tych zwojów 6 razy więcej niż uzwojenie wtórne. W rezultacie przekładnia powinna być równa 6.

Dziękuję Ci, że specjalnie dobrałeś takie wartości rezystancji, aby nie sprawiało mi trudności wyciąganie pierwiastka kwadratowego z ich stosunku. Wiesz przecież, że obliczenia przekładni transformatora, czyli stosunku transformacji rezystancji R_{we} i R_w , dokonuje się na podstawie wzoru

$$n = \sqrt{\frac{R_{we}}{R_w}}$$

Mądr. — Przypuszczam Ignasiu, że zjadłeś mnóstwo ryb, wzbogaciłeś swój mózg w fosfor i dlatego tak świetnie rozumiesz.



Przeciwdziałanie wpływowi temperatury

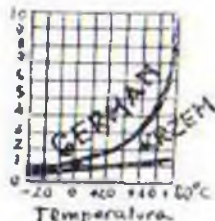
Pyt. — Niestety, musi mi brakować fosforu, ponieważ na Twoim schemacie są pewne rzeczy, których nie rozumiem. Widzę, że bazy tranzystorów są polaryzowane za pomocą dzielników napięcia składających się z rezystorów R_1 i R_2 w przypadku pierwszego tranzystora i rezystorów R_3 i R_4 w przypadku drugiego tranzystora. Rozumiem również, że kondensatory C_1 i C_2 umożliwiają przejście składowym zmiennym sygnału wejściowego.

Jaka jest jednak rola rezystancji R_5 i R_6 włączonych między emitery a dodatni biegun baterii?

Mądr. — Służą one do zmniejszenia wpływu podwyższonej temperatury na prąd kolektora. Przepływ prądu przez złącza tranzystora powoduje wydzielenie pewnej ilości ciepła. Wiesz przecież, że półprzewodniki są wrażliwe na zmiany temperatury. Gdy temperatura wzrasta, prąd I_C kolektora również wzrasta. Zjawisko to jest dużo wyraźniejsze w tranzystorach germanowych niż w krzemowych.

Otóż wzrost prądu kolektora pociąga za sobą taki sam wzrost prądu emitera. W moim układzie prąd ten płynie przez rezystancję, która oddziela emiter od dodatniego bieguna baterii. W rezultacie wzrost prądu emitera pociąga za sobą zwiększenie spadku napięcia stałego, co powoduje, że ujemny potencjał emitera wzrasta.

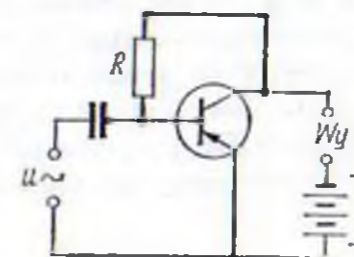
Wiadomo jednak, że stałe napięcie bazy nie ulega zmianie. W tych warunkach różnica potencjałów między bazą a emiterym zmniejsza się, w związku z czym prąd kolektora I_C maleje.



Pyt. — To bardzo zabawne! W wyniku zjawisk, które mi opisałeś, wzrost natężenia prądu wywołuje w końcu jego zmniejszenie i w ten sposób prąd kolektora pozostaje stały wbrew wpływowi podwyższonej temperatury.

Mądr. — W rzeczywistości jesteśmy tu świadkami zjawiska *ujemnego sprzężenia zwrotnego*. Prąd I_C oddziałuje na siebie, ale nie w ten sposób, aby powiększyć amplitudę swoich zmian, jak w przypadku dodatniego sprzężenia zwrotnego; przeciwnie — tutaj dąży do maksymalnego jej zmniejszenia.

Sprzężenie, które widzisz na schemacie wzmacniacza, nazywa się *ujemnym sprzężeniem zwrotnym szeregowym*. Można również zrealizować układ ujemnego sprzężenia zwrotnego *równoległego*. A oto bardzo uproszczony rysunek takiego układu.



Rys. 148. Układ ujemnego sprzężenia zwrotnego równoległego

Widzisz, że w tym przypadku rezystancja R ujemnego sprzężenia zwrotnego jest włączona równolegle do złącza baza-kolektor. W związku z tym przekazuje ona do bazy zmiany potencjału kolektora. Gdy prąd kolektora — przy wzroście temperatury — wzrasta, potencjał ujemny na kolektorze staje się mniej ujemny (bo wzrasta spadek napięcia na rezystancji obciążenia). Również potencjał bazy, dzięki rezystorowi R staje się mniej ujemny. W rezultacie następuje zmniejszenie różnicy potencjałów między bazą a emiterym, które pociąga za sobą zmniejszenie natężenia prądu kolektora.

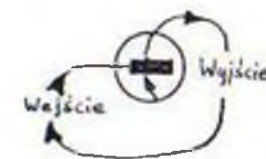
Pyt. — Bardzo mi się podoba to ujemne sprzężenie zwrotne. Będę się o nim zawsze dodatnio wyrażał.

Zmniejszanie zniekształceń za pomocą ujemnego sprzężenia zwrotnego

Mądr. — Skoro to zjawisko tak Ci się podoba, mogę Ci wyjawiać, że stosuje się je również do zmniejszania zniekształceń sygnałów małej częstotliwości. W tym przypadku ujemne sprzężenie zwrotne nie oddziałuje na składowe stałe napięcia lub prądu, ale na składowe zmienne. W związku z tym składowe te nie są zwierane przez kondensator dołączony równolegle do rezystora w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego; wytwarzają one na tym rezystorze spadek napięcia, który dodaje się do napięcia wejściowego w przeciwnej fazie.

Pyt. — Jakie są przyczyny i skutki zniekształceń małej częstotliwości, że trzeba je w ten sposób zwalczać?

Mądr. — Zarówno we wzmacniaczach lampowych jak i tranzystorowych mogą powstawać zniekształcenia napięć zmiennych małej częstotliwości. Wystarczy na przykład, żeby zmiany prądu anodowego nie były ściśle proporcjonalne do zmian napięcia doprowadzonego między siatkę a katodę, a już powstają zniekształcenia dźwięków. Ich moc nie odpowiada wtedy mocy, którą charakteryzowały się po stronie nadawczej, a co gorsze, ich jakość może ulec zmianie wskutek pojawienia się harmonicznych, które nie występowały w dźwiękach oryginalnych.





Pyt. — Co nazywasz „harmonicznymi”?

Mądr. — Są to składowe dźwięku o częstotliwościach będących wielokrotnościami częstotliwości podstawowej. Właśnie obecność tych harmonicznymi decyduje o barwie różnych instrumentów muzycznych. Szczególnie bogaty w harmoniczne dźwięk skrzypiec jest łatwo odróżnić od dźwięku fletu charakteryzującego się tylko częstotliwością podstawową.

Jeżeli nasz wzmacniacz małej częstotliwości wytwarza harmoniczne, których nie było w dźwiękach nadawanych, to barwa dźwięków odtwarzanych ulega zmianie.

Pyt. — Pojmuję, jak tego rodzaju zniekształcenia są niebezpieczne. A w jaki sposób zwalczą się je za pomocą ujemnego sprzężenia zwrotnego?

Mądr. — Po prostu doprowadzając do wejścia napięcie zmienne w przeciwnej fazie pobrane z wyjścia. W ten sposób wzmacnione zniekształcenia, w postaci napięć w przeciwnej fazie, doprowadzone do wejścia znoszą lub co najmniej dostatecznie zmniejszają zniekształcenia powstające na wejściu wzmacniacza.

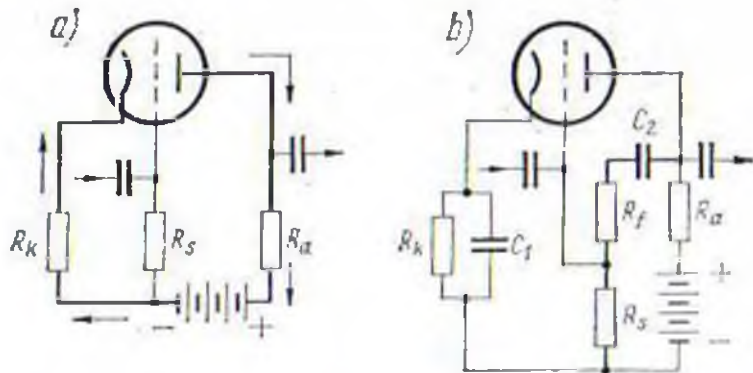
Pyt. — W jaki sposób praktycznie realizuje się tego rodzaju ujemne sprzężenie zwrotne?

Układy ujemnego sprzężenia zwrotnego

Mądr. — Pokażę Ci najpierw układy lampowe. Ujemne sprzężenie zwrotne można uzyskać, umieszczając między katodą a ujemnym biegunem napięcia zasilania rezystor R_k pozbawiony kondensatora blokującego. Dzięki temu przez rezystor płynie cały prąd anodowy. Składowa stała prądu zapewnia ujemną polaryzację siatki, natomiast składowa zmienna wytwarza napięcie o fazie przeciwnej w porównaniu z fazą napięcia doprowadzonego między siatkę a katodę. W ten właśnie sposób zniekształcenia ulegają zmniejszeniu.

Pyt. — Wydaje mi się jednak, że zmniejszeniu ulega również wzmacnienie. To ujemne sprzężenie zwrotne jest naprawdę przeciwieństwem dodatniego sprzężenia zwrotnego. W przypadku dodatniego sprzężenia zwrotnego do wejścia wzmacniacza doprowadza się napięcie wyjściowe, które jest w fazie z napięciem wejściowym. Powoduje to wzrost wzmacnienia.

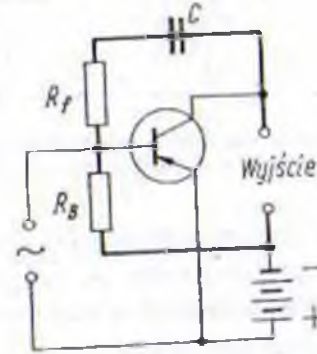
Mądr. — Oczywiście, Ignasiu. Nie można jednocześnie uzyskać lepszej wierności odtwarzania i większego wzmacnienia. Stosując ujemne sprzężenie zwrotne zapewnia się wierność odtwarzania, ale kosztem wzmacnienia.



Rys. 149. Ujemne sprzężenie zwrotne w stopniu lampowym: a) ujemne sprzężenie zwrotne prądowe uzyskane dzięki rezystancji R_k , znajdującej się jednocześnie w obwodzie siatkowym i anodowym b) ujemne sprzężenie zwrotne napięciowe. Do siatki lampy zostaje doprowadzona część napięcia zmiennego występującego na rezystancji obciążenia R_a . Podział napięcia zapewnia dzielnik R_f/R_g , sprzężony z rezystorem R_g za pomocą kondensatora C_1 . Zastosowany tu a niespotykany na ogół sposób rysowania schematów ułatwia zrozumienie zjawiska ujemnego sprzężenia zwrotnego

Pokażę Ci teraz układ ujemnego sprzężenia zwrotnego, w którym napięcie ujemnego sprzężenia zwrotnego doprowadzone do siatki stanowi część napięcia występującego na rezystancji anodowej R_a . W tym celu stosuje się dzielnik napięcia R_f/R_g , oddzielony od rezystancji R_a kondensatorem C_2 . Dobór stosunku wartości obu rezystancji umożliwia dozowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Pyt. — Odnoszę wrażenie, że poprzedni układ, w którym ujemne sprzężenie zwrotne powstaje dzięki rezystancji w obwodzie katodowym, jest bardzo podobny do układu, który zastosowałeś we wzmacniaczu tranzystorowym.



Rys. 150. Ujemne sprzężenie zwrotne napięciowe w przypadku stopnia tranzystorowego

Mądr. — Masz rację. Zarówno w układzie lampowym jak i tranzystorowym zastosowałem ujemne sprzężenie zwrotne prądowe. Nazwa pochodzi stąd, że ujemne sprzężenie zwrotne powstaje dzięki przepływowi prądu wyjściowego.

W ostatnim układzie lampowym, którego rysunek Ci pokazałem, występuje ujemne sprzężenie zwrotne napięciowe. A oto w jaki sposób można zastosować ten sam rodzaj ujemnego sprzężenia zwrotnego w układzie tranzystorowym.

Napięcie zmienne wyjściowe przez kondensator C zostaje doprowadzone do dzielnika napięcia R_f/R_g . Część tego napięcia steruje bazę.

Pyt. — Ja też muszę sterować w kierunku wyjścia. Jeżeli spóźnię się, moi rodzice będą niezadowoleni.



UKŁADY SPRZĘGAJĄCE

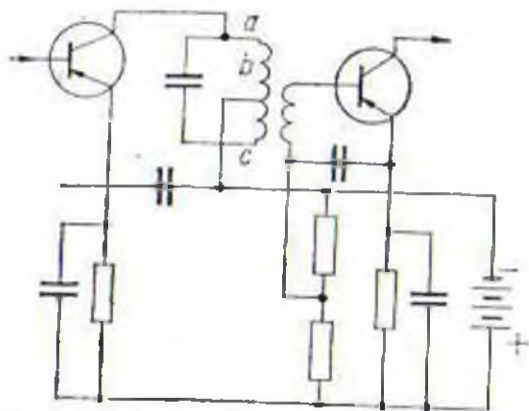
Właściwości tranzystorów, wyraźnie różniące się od właściwości lamp, mają wpływ na wybór międzystopniowego układu sprzęgającego. Dokonując przeglądu takich układów, profesor Radiol kładzie szczególny nacisk na ciekawe układy przeciwsołbne, stosowane w odbiornikach radiofonicznych.

Bardzo dobrze, Drodzy Przyjaciele, że zrobiliście przegląd różnych układów ujemnego sprzężenia zwrotnego. Nie mam nic przeciw temu, przeciwnie... Zabrakło Wam jednak czasu, aby przeanalizować różne układy sprzęgające stosowane między stopniami tranzystorowymi.

Przyznaję, że uważnie przeanalizowaliście sprzężenie transformatorowe. Musisz wiedzieć Ignasiu, że można je stosować równie dobrze we wzmacniaczu małej częstotliwości, jak i wielkiej oraz pośredniej częstotliwości.

Transformatory w zakresie w.cz. i p.cz.

Oczywiście w tym przypadku stosuje się obwody strojone. Tworzą one pierwotne i wtórne uzwojenie transformatora lub co najmniej jedno z nich. W zakresie wielkiej częstotliwości te obwody są przestrajane, co umożliwia dostrojenie odbiornika do żądanej stacji. W zakresie pośredniej częstotliwości, częstotliwości dostrojenia obwodów są stałe.



Rys. 151. Sprzężenie transformatorowe w układach w.cz. i p.cz.

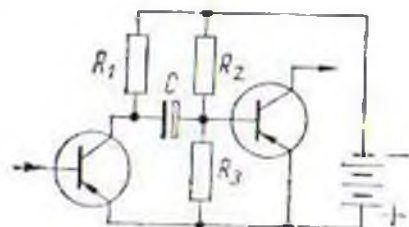
W obu wymienionych rodzajach wzmacniaczy istotne jest zagadnienie dopasowania impedancji wyjściowej i wejściowej. Rozwiązuje się je dzięki stosowaniu transformatorów o przekładni odpowiedniej do stosunku impedancji. Można nawet w tym celu zastosować odczepy na jednym z uzwojeń, które zachowuje się wówczas jak *autotransformator*. Część uzwojenia, przez którą przepływa prąd wejściowy, odgrywa rolę uzwojenia pierwotnego, a całość uzwojenia tworzy uzwojenie wtórne.

W układzie, którego rysunek masz przed sobą, część *a-b* służy za uzwojenie pierwotne, a część *a-c* za wtórne. Prawdziwe uzwojenie wtórne jest więc indukcyjnie sprzężone z całością uzwojenia pierwotnego.

Sprzężenie oporowo-pojemnościowe

Świadomy analogii, jaka istnieje między lampami a tranzystorami, domyślasz się, że te ostatnie mogą być również sprzężane ze sobą za pomocą układu oporowo-pojemnościowego.

Widzisz na rysunku, że R_1 jest rezystancją obciążenia pierwszego tranzystora. Napięcie zmienne, które powstaje na niej wskutek przepływu prądu kolektora, zostaje doprowadzone przez kondensator



Rys. 152. Sprzężenie oporowo-pojemnościowe dwóch tranzystorowych stopni wzmacnienia

C do bazy drugiego tranzystora. Baza tego tranzystora jest spolaryzowana za pomocą dzielnika napięcia R_2R_3 .

Jesteś prawdopodobnie zdziwiony widząc na rysunku symbol graficzny kondensatora elektrolitycznego. Dlaczego istnieje tu potrzeba zastosowania kondensatora sprzęgającego o znacznej pojemności, rzędu dziesiątka mikrofaradów.

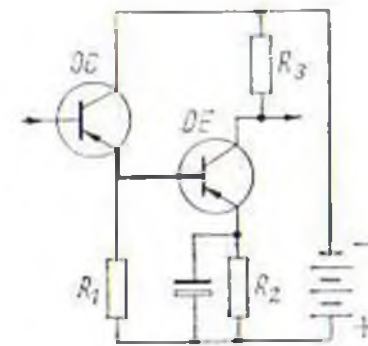
Przyczyną jest mała rezystancja wejściowa charakteryzująca tranzystory. Również wartości rezystancji R_2 i R_3 powinny być względnie małe, rzędu tysiąca omów. Przypominasz sobie, że w układach lampowych rezystancja wpływowa siatki ma na ogół wartość $1 M\Omega$.

Ponieważ wartość rezystancji R_3 jest tak mała, reaktancja pojemnościowa kondensatora C nie może być zbyt duża. W istocie, napięcie wyjściowe występujące na rezystancji R_1 zostaje doprowadzone do bazy drugiego tranzystora za pośrednictwem dzielnika napięcia utworzonego z szeregowo połączonych elementów C i R_2 . Jeżeli reaktancja pojemnościowa kondensatora C jest zbyt duża w porównaniu z wartością rezystancji R_3 , to biedna baza dostanie bardzo małą część napięcia wyjściowego pierwszego tranzystora.

Jeżeli zastosujemy kondensator elektrolityczny o pojemności $10 \mu F$, to jego reaktancja przy częstotliwości 50 Hz będzie wynosić 325Ω . W takim przypadku wszystko jest w porządku, ponieważ większa część napięcia zostanie uczciwie doprowadzona do bazy drugiego tranzystora.

Sprzężenie bezpośrednie

Musisz odnosić wrażenie, że stosowanie tranzystorów jest znacznie bardziej skomplikowane niż stosowanie lamp. A więc zaraz Cię uspokoję i poka-



Rys. 153. Sprzężenie bezpośrednie za pomocą rezystora R_1 umieszczonego na wyjściu pierwszego i wejściu drugiego tranzystora

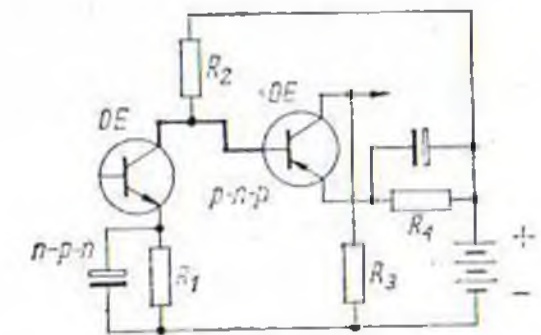
żę Ci, że w układach tranzystorowych można zrealizować sprzężenie tylko przy zastosowaniu rezystora bez żadnego kondensatora sprzęgającego.

Rzeczywiście, można bezpośrednio sprzężać dwa tranzystory. W tym celu pierwszy tranzystor pracuje w układzie ze wspólnym kolektorem, a drugi ze wspólnym emiterem. Grubą linią narysowałem bezpośrednie połączenie emitera pierwszego z bazą drugiego tranzystora.

W ten sposób napięcie zmienne powstające na rezystancji obciążenia R_1 (przez którą przepływa prąd kolektora) zostaje bezpośrednio doprowadzone do bazy drugiego tranzystora. Spadek napięcia wywołany przepływem składowej stałej prądu pierwszego tranzystora przez rezystancję R_1 polaryzuje bazę drugiego tranzystora ujemnie względem emitera.

Mamy tu jednak kondensator elektrolityczny. Służy on wyłącznie do zwierania rezystancji R_3 dla przebiegów zmiennych; rezystancja ta zapewnia ujemne sprzężenie zwrotne zmniejszające wpływ temperatury na pracę tranzystora.

Można również dokonać bezpośredniego sprzężenia kolektora pierwszego tranzystora z bazą drugiego, stosując w tym celu tranzystory przeciwstaw-



Rys. 154. Sprzężenie bezpośrednie dwóch tranzystorów przeciwstawnych: *n-p-n* oraz *p-n-p*

ne. Na rysunku, który Ci przedstawiam, pierwszy tranzystor jest typu *n-p-n*, a drugi *p-n-p*. Oba pracują w układzie ze wspólnym emiterem.

Napięcie zmienne na rezystancji R_2 wytwarzane przez prąd kolektora zostaje bezpośrednio doprowadzone do bazy drugiego tranzystora. W obwodach emiterów obu tranzystorów mamy rezystory R_1 i R_3 stabilizacji cieplnej (termicznej), zabocznikowane kondensatorami elektrolitycznymi.

Sprzężenie bezpośrednie występujące w obu ostatnich układach wykazuje duże zalety. W przypadku zastosowania kondensatora sprzęgającego,

jego reaktancja pojemnościowa zmienia się w funkcji częstotliwości i przy najmniejszych częstotliwościach jest bardzo duża.

Przy sprzężeniu bezpośrednim ten problem nie istnieje. W związku z tym wzmacniacze ze sprzężeniem bezpośrednim mogą służyć nawet do wzmacniania napięć stałych. Pod tym ostatnim terminem rozumiem powolne zmiany napięcia stałego.

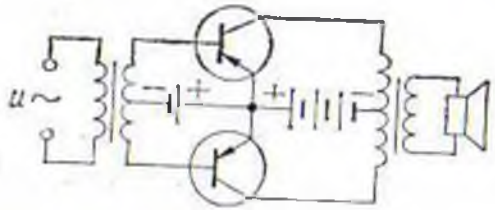
Tranzystorowy układ przeciwobny

Wróćmy jednak do wzmacniania napięć zmiennych. Aby nie oddalać się zbyt od napięcia stałego, rozpatrzmy budowę i działanie stopni małej częstotliwości.

Stopnie te mogą być ze sobą sprzęgane również dobrze za pomocą transformatorów na rdzeniu magnetycznym, jak i układów oporowo-pojemnościowych. Poznałeś już istotę tego rodzaju układów.

Szczególnie interesujące w wykonaniu tranzystorowym są stopnie wyjściowe pracujące w układzie przeciwobnym¹⁾. Zobaczysz, że rozwiązania tranzystorowe mogą różnić się od stosowanych w technice lampowej.

Oto dwa wzmacniacze przeciwobne, w których przesunięcie fazowe zapewniono dzięki zastosowaniu transformatora z odczepem w środku uzwojenia wtórnego. W pierwszym wzmacniaczu tranzystory pracują w układzie ze wspólnym emiterem, a w drugim — ze wspólną bazą.



Rys. 155. Wzmacniacz przeciwobny z tranzystorami pracującymi w układzie ze wspólnym emiterem

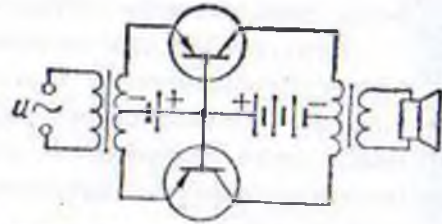
Dla możliwie największego uproszczenia schematów, przyjąłem, że bazy są polaryzowane za pomocą baterii. W rzeczywistości polaryzację baz zapewnia bądź spadek napięcia na rezystancji, bądź dzielnik napięcia. Znasz już obydwa rozwiązania.

Oczywiście nie widać tego na rysunku, ale można tak spolaryzować bazy, że w nieobecności napięcia zmiennego, prąd kolektora jest prawie równy zeru. W takim przypadku dodatnia połówka napię-

¹⁾ Spotyka się również nazwę: układ push-pull (przyp. tłum.).

cia zmiennego wywołuje przepływ prądu w jednym z tranzystorów, a ujemna — w drugim.

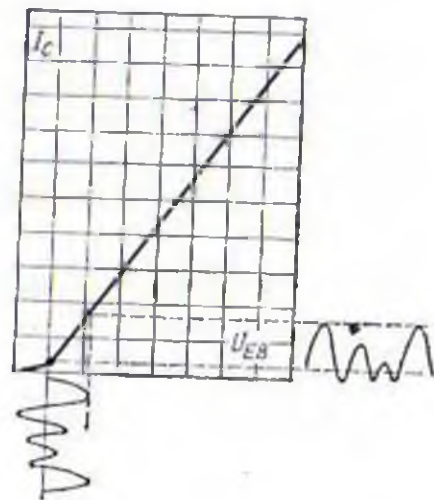
Jaki jest cel takiej polaryzacji? Umożliwia ona znaczne zmniejszenie poboru energii z baterii. Zastosowane tranzystory są oczywiście tranzystorami mocy, pobierającymi duży prąd. Jeżeli takie tran-



Rys. 156. Wzmacniacz przeciwobny z tranzystorami pracującymi w układzie ze wspólną bazą

zystory pracują w zakresie liniowej części charakterystyki prądu kolektora w funkcji napięcia emiter-baza, to natężenie prądu przepływającego przez nie jest bardzo duże, nawet przy braku modulacji w odbieranej emisji.

Dlatego też korzystne jest ustalenie punktu pracy na dolnym kolanie wspomnianej charakterystyki. Tego rodzaju pracę nazywa się pracą w klasie B.



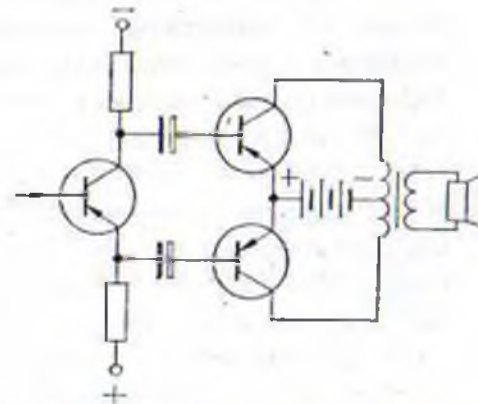
Rys. 157. Praca tranzystora w klasie B. Krzywa przedstawia natężenie prądu kolektora w funkcji napięcia emiter-baza

Przy zastosowaniu pojedynczego tranzystora praca w klasie B prowadzi do wzmacniania z jednoczesną detekcją. Wynika to ze wzmacniania tylko jednej połówki napięcia w każdym okresie. W układzie przeciwobnym natomiast transformator wyjściowy po kolei przejmuje najpierw jedną połówkę prądu z jednego z tranzystorów, a następnie drugą połówkę z drugiego tranzystora.

W ten sposób proces wzmacniania napięcia wejściowego przebiega prawidłowo, a pobór prądu jest zredukowany do niezbędnego minimum. Praca w klasie B zapewnia znaczną oszczędność źródła zasilania.

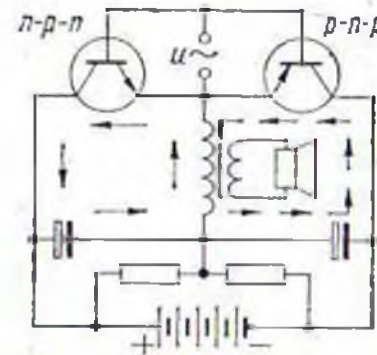
Z odwróceniem lub bez odwrócenia fazy

Możemy również zaoszczędzić transformator odwracający fazę. Tak jak w układach lampowych katodyna umożliwia uzyskanie dwóch napięć o przeciwnych polaryzacjach za pomocą rezystancji obciążenia umieszczonych w obwodzie anodowym i obwodzie katodowym, tak i w układach tranzysto-



Rys. 158. Układ przeciwobny, w którym odwrócenie fazy zapewnia tranzystor

rowych uzyskuje się dwa napięcia o przeciwnych fazach dzięki spadkom napięcia na rezystancjach umieszczonych w obwodach emitera i kolektora.



Rys. 159. Układ przeciwobny z parą tranzystorów przeciwstawnych, do których bezpośrednio doprowadza się napięcie wejściowe

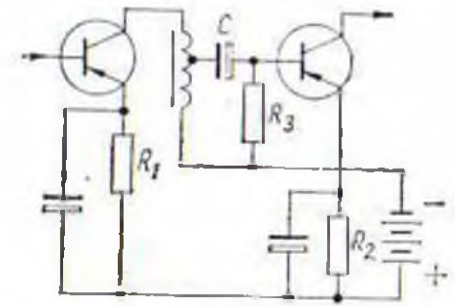
A teraz pokażę Ci najciekawszy układ przeciwobny, który może obejść się bez układu odwracania fazy. W jaki sposób? Po prostu dzięki zastosowaniu pary tranzystorów przeciwstawnych.

We wzmacniaczu, którego schemat widzisz, tranzystory *n-p-n* i *p-n-p* pracują w układzie ze wspólnym emiterem. W czasie trwania półokresu, który czyni potencjał obu baz bardziej dodatni, prąd kolektora tranzystora *n-p-n* wzrasta. Prąd ten w uzwojeniu pierwotnym transformatora płynie z dołu do góry (spójrz na rysunek). W czasie trwania następnego półokresu, który czyni potencjały baz bardziej ujemne, wzrasta prąd kolektora tranzystora *p-n-p*. Prąd ten płynie w przeciwnym kierunku: z góry na dół. Widzisz, że w tym przypadku transformator nie potrzebuje nawet mieć zaczeplu w środku uzwojenia pierwotnego.

Tranzystory umożliwiają w ten sposób realizację układów znacznie elegantszych od podobnych układów lampowych. Nie znasz ich wszystkich...

Sprężenie mieszane

Na zakończenie przedstawiam Ci układ wzmacniacza m.cz., w którym zastosowano sprzężenie mieszane jednocześnie autotransformatorowe — w celu dopasowania impedancji — i oporowo-pojemnościowe.



Rys. 160. Wzmacniacz m. cz. ze sprzężeniem mieszanym: autotransformatorowym i oporowo-pojemnościowym

Przeanalizuj go uważnie. Znasz już wystarczająco technikę tranzystorową, aby łatwo zrozumieć jego działanie.

Powodzenia!

POGAWĘDKA TRZYNASTA

Zjawisko dodatniego sprzężenia zwrotnego umożliwia realizację generatorów również w wykonaniu tranzystorowym. Takie generatory są stosowane w układach przemiany częstotliwości odbiorników superheterodynowych. Automatyczna regulacja wzmocnienia w odbiornikach tranzystorowych powoduje pewne komplikacje; skuteczną regulację wzmocnienia zapewnia jednak dioda tłumiąca obwód rezonansowy. Tą pogawędką nasi dwaj przyjaciele kończą analizę zastosowania półprzewodników w różnych stopniach odbiorników radiofonicznych.

TRANZYSTOROWY ODBIORNIK SUPERHETERODYNOWY

Dodatnie sprzężenie zwrotne

Pyt. — Od kiedy Ty i Twój wuj zapoznaliście mnie z różnymi układami tranzystorowymi doznaję dziwnego wrażenia. Wydaje mi się, że spaceruję po ulicy Półprzewodnikowej równoległej do ulicy Lampowej. Ulice są do siebie podobne, jednak kiedy przyjrzeć się bliżej budynkom zauważa się sporo różnic.

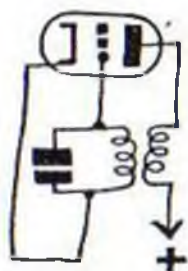
Mądr. — Nic dziwnego. Tranzystory muszą spełniać te same funkcje co lampy. Wiesz już w jaki sposób wzmacniają one napięcia zmienne różnych częstotliwości, jak są zbudowane tranzystorowe stopnie mocy; znasz już detektory półprzewodnikowe. Zrobiliśmy również przegląd różnych układów ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Pyt. — Nie poruszyłeś natomiast jeszcze zagadnienia dodatniego sprzężenia zwrotnego w układach tranzystorowych. Przypominam sobie, że w układach lampowych zapewnia się dodatnie sprzężenie zwrotne dzięki przekazaniu części napięcia lub prądu wyjściowego do obwodu wejściowego. Na ogół dokonuje się tego za pomocą sprzężenia indukcyjnego obwodów anodowego i siatkowego.

Dodatnie sprzężenie zwrotne każe mi nieodparcie myśleć o wężu, który odgryza własny ogon.

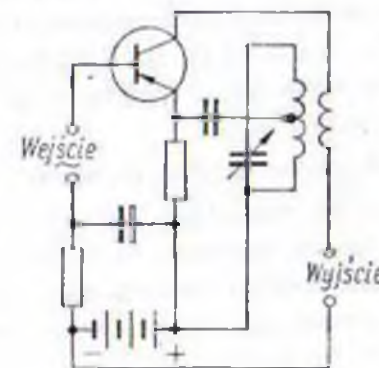
Przypominam sobie również, że dodatnie sprzężenie zwrotne zwiększa wzmocnienie i poprawia w ten sposób czułość odbiornika. Jeżeli dodatnie sprzężenie zwrotne przekracza określony poziom, w układzie powstają drgania. Zjawisko to ma zastosowanie nie tylko w nadajnikach do wytwarzania napięcia o częstotliwości nośnej, ale również w odbiornikach superheterodynowych w układach przemiany częstotliwości. Przemiana częstotliwości następuje dzięki interferencji drgań wytwarzanych przez heterodynę z sygnałem odbieranym przez antenę.

Mądr. — Twoja pamięć, drogi przyjacielu, zadziwia mnie. Będzie mi łatwiej wyjaśnić Ci następne zagadnienia.



Układ, który Ci pokazuję jest zupełnie podobny do układu lampowego z dodatnim sprzężeniem zwrotnym. Obwód rezonansowy jest włączony na wejściu tranzystora między bazę a emiter. Kondensatory znajdujące się między tymi elektrodami a zaciskami obwodu umożliwiają przepływ składowych zmiennych.

Ze względu na małą rezystancję wejściową tranzystora, równoległe do niej dołączono tylko część cewki obwodu. Dzięki temu obwód nie jest zbyt silnie tłumiony i jego selektywność jest wystarczająco duża.



Rys. 161. Mieszacz, w którym tranzystor wytwarza drgania i dokonuje przemiany częstotliwości dzięki superpozycji drgań własnych z sygnałem wejściowym

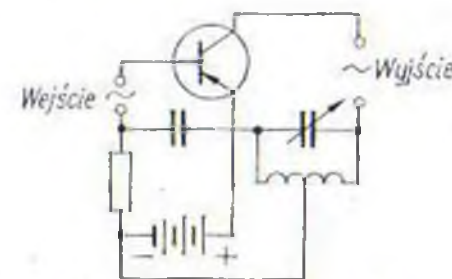
Pyt. — Widzę, że prąd dodatniego sprzężenia zwrotnego w tej cewce jest indukowany za pomocą sprzężonego z nią uzwojenia, przez które przepływa wzmocniony prąd kolektora.

Mądr. — Masz rację. Możesz przekonać się jak bardzo ten układ jest podobny do układu lampowego z dodatnim sprzężeniem zwrotnym. I w tym przypadku można zrealizować detekcję z reakcją. Wystarcza w tym celu zapewnić regulację sprzężenia między cewkami i dostatecznie spolaryzować bazę tranzystora, aby wywołać zjawisko detekcji.

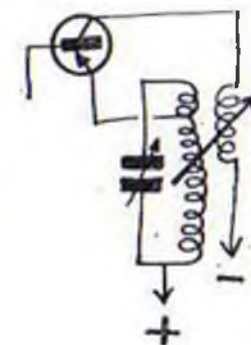
Pyt. — Nigdy nie widziałem odbiorników tranzystorowych z ruchomą cewką do regulacji poziomu dodatniego sprzężenia zwrotnego.

Mądr. — To co było niegdyś stosowane w odbiornikach lampowych nie jest już stosowane w odbiornikach tranzystorowych. Dodatnie sprzężenie zwrotne w tych ostatnich jest przede wszystkim stosowane do wytwarzania drgań potrzebnych do zapewnienia przemiany częstotliwości. W tym celu, w naszym układzie umieszcza się na wejściu obwód rezonansowy dostrojony do częstotliwości sygnału odbieranego przez antenę. Na wyjściu umieszcza się obwód rezonansowy pierwotny pierwszego filtru pośredniej częstotliwości.

Pyt. — W ten sposób doszliśmy do superheterodyny. Zanim jednak pomówimy o niej szczegółowo chciałbym Ci zadać niedyskretne pytanie: czy przy zastosowaniu



Rys. 162. Generator Hartleya



tranzystora można zrealizować generator analogiczny do układu Hartleya, w którym wzmocniony prąd wyjściowy płynie przez część cewki obwodu drgań?

Mądr. — Nic prostszego. Widzisz, że w tym układzie prąd kolektora płynie przez połowę cewki obwodu drgań.

Automatyczna regulacja wzmocnienia

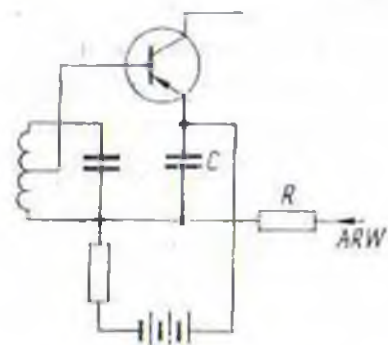
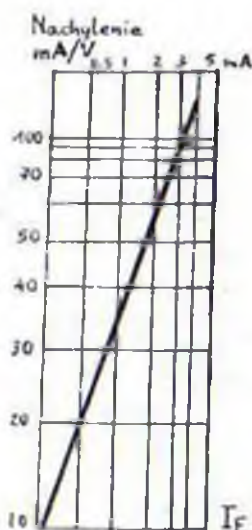
Pyt. — Ponieważ rozmawiamy o zwrotnym przesyłaniu wzmocnionych napięć, przypomniała mi się automatyczna regulacja wzmocnienia. Również i w tym przypadku wzmocnione napięcie, po detekcji, zostaje przekazane w kierunku wejścia odbiornika do lamp wzmacniaczy wielkiej lub pośredniej częstotliwości i zastosowane do regulacji ich nachylenia.

Czy podobny system można zastosować w odbiornikach tranzystorowych?

Mądr. — Owszem. Nachylenie tranzystora zależy od natężenia prądu emitera, a ono z kolei jest funkcją potencjału bazy. W rezultacie doprowadzając do bazy napięcie automatycznej regulacji wzmocnienia zmienia się wzmocnienie tranzystora. Wzmocnienie to wzrasta, gdy wskutek zaniku, sygnał wielkiej częstotliwości w antenie jest mniejszy.

Pyt. — Podsumowując, można powiedzieć, że automatyczna regulacja wzmocnienia jest tu równie prosta jak w odbiornikach lampowych. Napięcie uzyskane w wyniku detekcji zostaje wygładzone za pomocą rezystancji R i pojemności kondensatora C , a następnie doprowadzone do baz tranzystorów w stopniach wielkiej i pośredniej częstotliwości.

Mądr. — Niestety, Ignasiu. W przypadku tranzystorów zagadnienie jest dużo bardziej skomplikowane niż w przypadku lamp. Nie zapomnij, że obwód wejściowy ma tu rezystancję względnie małą i że rezystancja emiter-baza jest dołączona równolegle do obwodu rezonansowego.

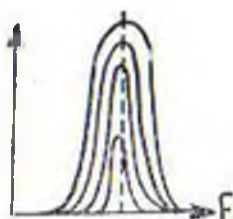


Rys. 163. Napięcie automatycznej regulacji wzmocnienia jest doprowadzone do bazy tranzystora

Otóż, kiedy napięcie automatycznej regulacji wzmocnienia zmienia potencjał bazy, wtedy zmienia się nie tylko wzmocnienie tranzystora, ale również jego rezystancja wejściowa. Gdy ta rezystancja wzrasta, tłumienie obwodu rezonansowego maleje i jego selektywność zwiększa się.

Pyt. — Tym lepiej!

Mądr. — Nie przyjacielu. Zbyt duża selektywność powoduje znaczne zmniejszenie szerokości pasma obwodu. Wskutek tego częstotliwości bardziej oddalone od częstotliwości nośnej zostają stłumione lub nawet wyeliminowane. Dla słuchacza tłumaczy się to osłabieniem lub nawet utratą tonów wysokich.

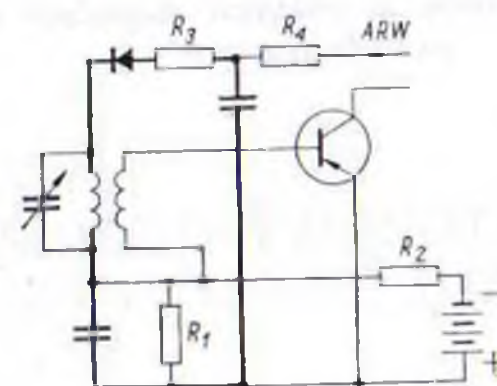


Dioda tłumiąca

Pyt. — Jaka jest rada w tej trudnej sytuacji?

Mądr. — Należy równolegle do obwodu rezonansowego włączyć diodę tłumiącą. Układ jest tak pomyślany, że gdy napięcie automatycznej regulacji wzmocnienia jest małe, wówczas dioda nie wprowadza żadnego tłumienia.

Jednak przy odbiorze silnych sygnałów, napięcie automatycznej regulacji wzmocnienia staje się bardziej dodatnie od potencjału występującego w punkcie połączenia rezystancji R_1 i R_2 tworzących dzielnik napięcia. Dioda zaczyna przewodzić, a to oznacza, że jej rezystancja przestaje być bardzo duża i staje się tym mniejsza, im większe jest napięcie automatycznej regulacji wzmocnienia.



Rys. 164. Dioda tłumiąca przyłączona równolegle do obwodu rezonansowego

Zmniejszenie rezystancji obwodu zaznaczonego grubą linią powoduje stłumienie obwodu rezonansowego i umożliwia w ten sposób utrzymanie stałej selektywności.

Pyt. — Bardzo sprytny układ! Widzę, że elektronicy rozwiązują najbardziej skomplikowane problemy w sposób elegancki.

Odbiór wielu zakresów fal

Mądr. — O! wierz mi, skomplikowane problemy istnieją we wszystkich dziedzinach radioelektroniki.

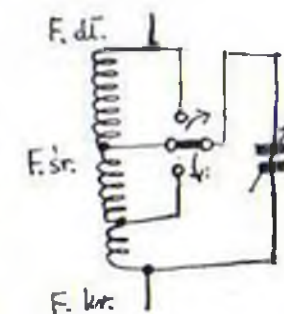
Chociażby odbiorniki wielozakresowe. Zastosowanie wielu zakresów fal wymaga opracowania tylu różnych cewek do obwodów rezonansowych wielkiej częstotliwości i do układu heterodyny.

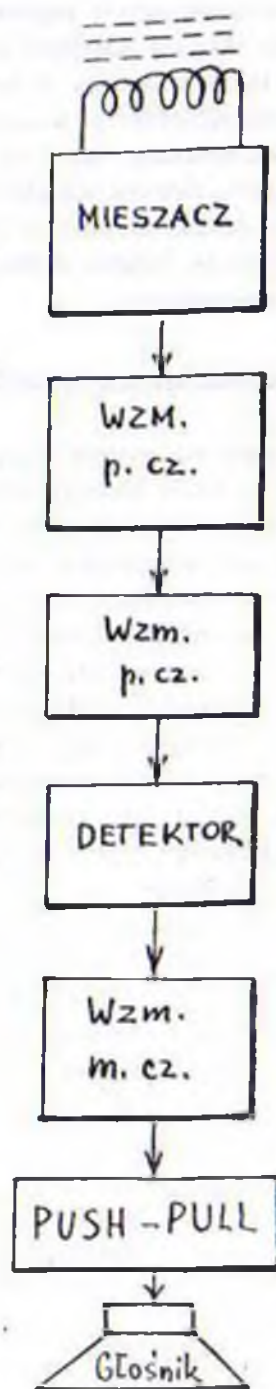
Jak Ci już wyjaśniłem w końcu naszej piątej pogawędki, do przechodzenia z odbioru fal długich do średnich i ewentualnie do krótkich stosuje się przełącznik umożliwiający wybór odpowiedniej cewki.

Można stosować oddzielne cewki, ale najczęściej stosuje się cewki połączone szeregowo. Najmniejsza cewka służy do odbioru fal krótkich, a połączona szeregowo z następną — do odbioru fal średnich. Przy szeregowym połączeniu trzech cewek odbiera się fale długie.

Pyt. — W takim przypadku antena również powinna być dołączana do jednej z tych trzech cewek.

Mądr. — Tak. Jednak w większości aktualnie produkowanych odbiorników antena służy tylko do odbioru fal krótkich. Jeśli idzie o fale średnie i długie to odbiera się je za pomocą miniaturowej anteny ferrytowej składającej się z uzwojenia





nawiniętego na rdzeniu magnetycznym. Przypominam Ci, że tego rodzaju rdzenie są doskonałymi przewodnikami linii sił pola magnetycznego i dzięki temu koncentrują w sobie pole elektromagnetyczne. W ten sposób te małe anteny są równoważne antenom ramowym o dużo większych wymiarach.

Odbiornik kieszonkowy

Pyt. — Rozumiem teraz jak odbiera się odległe stacje za pomocą małego odbiornika kieszonkowego. Zastanawiam się jednak, w jaki sposób jest zbudowany układ o tak małej objętości.

Mądr. — Może to być superheterodyna, która zawiera mieszacz, dwa stopnie wzmacnienia pośredniej częstotliwości, detektor diodowy i dwa stopnie wzmacnienia małej częstotliwości, z których stopień wyjściowy może pracować w układzie przeciwsobnym.

Pyt. — Kpisz sobie ze mnie, Genku! Chcesz, żeby w tym małym pudełeczku zmieściło się pół tuzina tranzystorów, jedna lub dwie diody, dwa kondensatory zmienne, spora liczba cewek, kondensatorów i rezystorów nie licząc przewodów połączeniowych i baterii zasilających...

Mądr. — A więc poproszę wujka, aby Ci wyjaśnił różne sposoby miniaturyzacji i mikrominiaturyzacji. Stosuje się je powszechnie z jednym wyjątkiem.

Pyt. — Jakim?

Mądr. — Nie udało się zmikrominiaturyzować istot ludzkich. Oto dlatego nie można zbyt zmniejszać wymiarów organów regulacyjnych, takich jak gałki, klawisze itp.

Pyt. — Moim zdaniem, to bardzo szczęśliwy wyjątek.

Profesor Radiol opisuje

OBWODY DRUKOWANE I UKŁADY SCALONE

Obecnie we wszystkich urządzeniach elektronicznych produkowanych seryjnie stosuje się obwody drukowane. Umożliwiają one uniknięcie pracochłonnego i drogiego okablowania. Jednocześnie coraz częściej stosuje się układy scalone. Jaka jest ich rola, budowa i sposób wytwarzania. Wszystko wyjaśnia tu profesor Radiol.

Przed II wojną światową wytwarzanie odbiorników radiowych wymagało długiego i skomplikowanego procesu montażu i okablowania. Wszystkie połączenia między elementami i podzespołami były wykonywane przewodami miedzianymi, których końcówki dla zapewnienia właściwego styku lutowano.

Narodziny obwodów drukowanych

Kiedy Stany Zjednoczone przystąpiły do wojny, uczeni amerykańscy opracowali pociski, które służyły do zwalczania samolotów. Pociski te były skuteczne nawet wówczas, gdy nie dochodziły bezpośrednio do celu. Specjalne urządzenie elektroniczne wmontowane do każdego pocisku powodowało jego wybuch już w pobliżu zestrzeliwanego samolotu.

Uwzględniając ogromne przyspieszenie, jakiemu podlega pocisk w momencie wystrzeliwania, stwierdzono, że nie wytrzyma go żadne klasyczne okablowanie. I właśnie wówczas, aby była możliwa realizacja omawianego urządzenia elektronicznego, opracowano *obwody drukowane*. Obwody te z powodzeniem zastępują przewody połączeniowe.

Seryjna produkcja obwodów drukowanych jest znacznie tańsza od pracochłonnego montażu, a co najważniejsze obwody te zapewniają bardziej niezawodne połączenia. Ten ostatni termin często używamy w dziedzinie elektroniki. Oznacza „godny zaufania, pewny, trwały”.

Sposób wytwarzania

Jak obecnie wytwarza się obwody drukowane? Nie robi się ich już metodą druku, jak na początku.

Do produkcji obwodów drukowanych stosuje się płytki z materiału izolacyjnego pokryte z jednej strony cienką warstwą miedzi.

Część powierzchni warstwy przewodzącej, która będzie stanowić połączenia, zostaje pokryta lakierem ochronnym. Płytkę zanurza się w roztworze kwasu, który usuwa niechronioną część miedzi.

Następnie wywierca się otwory we wszystkich punktach, do których powinny być przyłączone elementy. Elementy te umieszcza się z drugiej strony płytki, przy czym ich końcówki wkłada się w odpowiednie otwory.

W końcu pozostaje tylko dokonać lutowania końcówek elementów do miedzi znajdującej się wokół otworu. Lutowanie przeprowadza się w prosty i pewny sposób, a co najważniejsze — jednocześnie przez zanurzenie powierzchni płytki od strony miedzi w wannie z roztopioną cyną.

Fotografia w służbie elektroniki

Wiesz już teraz, o ile to wszystko jest prostsze i tańsze od dokonywania wielu połączeń za pomocą przewodów. Z pewnością zastanawiasz się jednak, w jaki sposób zabezpiecza się lakierem te części warstwy miedzi, które powinny pozostać, podczas gdy reszta zostaje usunięta pod wpływem działania kwasu.

No więc i w tym przypadku trzeba się odwołać do metody fotograficznej. Zaczyna się od wykonania rysunku połączeń, które powinny znajdować się na płytce. Następnie rysunek fotografuje się i w ten sposób uzyskuje się negatyw na przezroczystej błonie.

Błone kładzie się na powierzchni płytki (od strony miedzi) pokrytej uprzednio światłoczułym lakierem. Pod wpływem światła lakier ten staje się nierozpuszczalny w roztworze, mimo że normalnie rozpuszcza się w nim z łatwością.

W związku z tym prześwietlając negatyw silnym strumieniem światła powoduje się nierozpuszczalność lakieru pokrywającego czarne części rysunku oryginalnego. Na negatywie te właśnie części są przezroczyste.

Domyślasz się na pewno, że po tej operacji należy zanurzyć naszą płytkę do roztworu, który rozpuści lakier znajdujący się na powierzchni nie poddanej działaniu światła.

Mamy więc teraz płytkę, na której część powierzchni miedzi, przeznaczoną do utworzenia obwodu drukowanego zostaje zabezpieczona warstwą lakieru. Zanurzamy więc płytkę do kwasu i osiągamy nasz cel; pozostają tylko chronione części miedzi. Trzeba teraz usunąć lakier z tych części, ten właśnie lakier, który je tak skutecznie chronił. Jeszcze inny roztwór dokonuje tego z łatwością.

Oto, drogi Ignasiu, jak wytwarza się obwody drukowane, które oszczędzają tyle pracy przy montażu.

Budowa układów scalonych

Metoda wytwarzania obwodów drukowanych była opracowana w ten sposób, że po wynalezieniu tranzystora i rozwinięciu techniki półprzewodnikowej ułatwiła koncepcję i realizację *układów scalonych*. Już przedtem jednak — mam nadzieję, że przypominaś sobie moje wyjaśnienia dotyczące tego tematu — metoda ta umożliwiła wytwarzanie tranzystorów planarnych.

Co to jest układ scalony? Jest to mały blok półprzewodnika, w którym znajdują się układy zawierające wiele elementów czynnych i biernych. Nie dziwi Cię na pewno, że znajdują się tam tranzystory i diody. To jednak, że układ scalony zawiera również rezystory, kondensatory, małe cewki i połączenia między nimi wydaje Ci się bez wątpienia mało prawdopodobne. A to jednak prawda.

Rzeczą najbardziej niezwykłą jest jednak gęstość elementów wchodzących w skład układów scalonych. Dzięki nim mikrominiaturyzacja zrobiła wprost fenomenalny postęp. Musisz wiedzieć, że obecnie jest możliwa realizacja układu scalonego o wymiarach lebaka od szpilki, który zawiera sto tranzystorów!!! Tego rodzaju układy stosuje się w maszynach cyfrowych.

Wytwarzanie elementów biernych

Zobaczmy, w jaki sposób wytwarza się te małe układy. Nie dziwi Cię, że półprzewodnik przekształca się w diodę lub w tranzystor. Ale jak wykonuje się elementy bierny?

Rezystory wykonuje się przez wprowadzenie do masy półprzewodnika — metodą stopową lub dyfuzyjną — odpowiedniej ilości domieszek. Dzięki dobraniu długości i przekroju obszaru, w który wnikają domieszki uzyskuje się wymaganą rezystancję.

Można również wytwarzać rezystory przez pokrycie półprzewodnika cienką warstwą izolacyjną kwarcu i nałożenie na niej substancji oporowej. Powierzchnia, na którą zostaje nałożona substancja oporowa, może mieć fantazyjny kształt ze względu na konieczność uzyskania odpowiedniej długości rezystora.

Co się tyczy *kondensatorów*, to uzyskuje się je przez pokrycie półprzewodnika bardzo cienką warstwą izolacyjną i nałożenie na niej warstwy metalicznej tworzącej drugą okładzinę.

Małe wartości pojemności można otrzymać realizując po prostu diody spolaryzowane w kierunku zaporowym. W tym przypadku rolę dielektryka oddzielającego obie okładziny kondensatora odgrywa złącze diody.

Najtrudniejsze do zrealizowania w układzie scalonym są *cewki indukcyjne*. Wykonuje się je jednak, ale o bardzo małych wartościach indukcyjności do pracy w zakresie super wielkich częstotliwości. W tym celu na izolacyjnej warstwie kwarcu nakłada się warstwę metalu o kształcie płaskiej spirali.

Układy scalone MSI i LSI

Z pewnością wszystkie układy scalone nie są tak mikrominiaturowe jak ten, o którym wyżej wspomniałem. Istnieją również układy o średniej skali integracji tzw. układy MSI od pierwszych liter

angielskiego wyrażenia *Medium Size Integration*. Gęstość elementów w tego typu układach scalonych jest dużo mniejsza niż w układach scalonych o wielkiej skali integracji LSI (*Large Scale Integration*). Układy LSI mogą zawierać kilka tysięcy elementów.

Jak przeprowadza się omawiane wyżej operacje, takie jak nakładanie warstw izolacyjnych lub przewodzących na określonych powierzchniach albo wprowadzanie metodą stopową lub dyfuzyjną odpowiednio dozowanych domieszek do wybranych części półprzewodnika? Dlaczego to się udaje nawet w układach LSI?

I tutaj podstawową rolę odgrywa fotografia. W istocie podstawą każdej operacji jest rysunek przedstawiający kształt powierzchni poddawanych takiemu czy innemu procesowi. Oczywiście te rysunki są setki, jeśli nie tysiące razy, większe od rzeczywistych wymiarów płytki półprzewodnika stanowiącej później układ scalony.

W celu uzyskania negatywów na przezroczystych błonach, opracowane rysunki fotografuje się, znacznie zmniejszając przy tym ich wymiary. Negatywy rzutuje się następnie, również przy znacznym zmniejszeniu, na płytkę półprzewodnika pokrytą lakierem światłoczułym.

Widzisz, że stosowana tutaj metoda fotograficzna jest taka sama jak w przypadku obwodów drukowanych. Lakier światłoczuły ochrania te części powierzchni płytki półprzewodnika, na których dzięki naświetleniu poprzez błonę, stał się nierozpuszczalny.

Należy zauważyć, że długości fal świetlnych są zbyt duże biorąc pod uwagę realizację niektórych układów scalonych. Najmniejsza długość fali światła widzialnego — odpowiadająca kolorowi fioletowemu wynosi 380 nm (miliardowych części metra). Jest ona zbyt duża, jeśli idzie o wytwarzanie niektórych układów LSI. W tym przypadku trzeba się uciec do stosowania promieni nadfioletowych, o długości fali dużo krótszej od odpowiadającej fioletowi.

Najbardziej skomplikowanym zagadnieniem w procesie wytwarzania układów scalonych jest zapewnienie połączenia układu scalonego z końcówkami obudowy. W tym celu odpowiednie punkty wejściowe i wyjściowe układu scalonego łączy się z kontaktami obudowy, w której zamyka się układ scalony, za pomocą cienkich drucików, złotych lub aluminiowych. Jest to operacja bardzo delikatna, którą wykonuje się pod mikroskopem.

Przyczyny mikrominiaturyzacji

Musisz sobie zadawać pytanie Ignasiu, jakie są prawdziwe powody, które zmusiły uczonych do opracowania tak skomplikowanych systemów mikrominiaturyzacji. Czy naprawdę istnieje potrzeba zyskania miejsca przez zredukowanie do tego stopnia wymiarów układów scalonych? Nawet w odborniku kieszonkowym nie wydaje się to niezbędne.

Istotnie, rozwój mikroelektroniki został przede wszystkim wywołany postępami informatyki. Maszyny cyfrowe zawierają tysiące elementów. Przyczyną poszukiwania metod ich zmniejszenia jest dążenie nie tylko do zyskania miejsca, ale i do zwiększenia prędkości ich działania.

W istocie niektóre operacje w maszynach cyfrowych są dokonywane w czasie równym części nanosekundy. Otóż jaka jest długość drogi, którą prąd elektryczny przebywa w czasie jednej nanosekundy, nawet jeżeli płynie z prędkością światła? Przebywa tylko 30 cm. Znaczący to, że dla zapewnienia maksymalnej szybkości działania maszyny cyfrowej, należy do minimum zmniejszyć odległości między elementami.

Nie zagłębiajmy się jednak zbyt w skomplikowaną dziedzinę informatyki. Masz Ignasiu, jeszcze dużo rzeczy do nauczenia się w dziedzinie techniki audiowizualnej.

POGAWĘDKA CZTERNASTA

Jakie są zasady modulacji częstotliwościowej? Dlaczego nadajniki, w których ten rodzaj modulacji jest stosowany, pracują w zakresie fal metrowych? Jakie są zalety modulacji częstotliwościowej w porównaniu z klasyczną modulacją amplitudową? W jaki sposób realizuje się modulację częstotliwościową w nadajniku? Wszystkie te zagadnienia są tematem niniejszej pogawędki.

MODULACJA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA

Ile nadajników w każdym zakresie fal?

Pyt. — Na urodziny dostałem od rodziców prezent, który mnie zachwycił: wspaniały przenośny odbiornik radiowy sporych rozmiarów. Umożliwia on odbiór trzech zakresów fal: długich, średnich i metrowych. Ten ostatni zakres jest oznaczony literami FM, których znaczenia nie mogę zrozumieć. Na skali zaznaczone są częstotliwości od 87 do 104 MHz¹⁾. Obliczyłem, że odpowiadają one długościom fal od 3,5 do 2,8 m. Ten zakres jest więc strasznie wąski. Mimo to odbieram na nim wiele stacji, a najciekawsze jest to, że jakość dźwięku tych stacji jest znacznie lepsza.

Mądr. — Zakres, o którym mówisz obejmuje fale z modulacją częstotliwościową. Oznaczenie FM odpowiada pierwszym literom terminu angielskiego *Frequency Modulation*.

W porównaniu z modulacją amplitudową stosowaną w zakresie fal długich i średnich, modulacja częstotliwościowa zapewnia znacznie lepszą wierność odtwarzania dźwięku, a zwłaszcza audycji muzycznych.

Zanim jednak wyjaśnię Ci zasadę modulacji częstotliwościowej udowodnię Ci — wbrew temu co powiedziałeś — że zakres fal ultrakrótkich, w którym stosuje się ten rodzaj modulacji, nie jest wcale wąski.

Pyt. — Ależ drogi przyjacielu, jestem na tyle mocny w matematyce, aby twierdzić, że między 2,8 a 3,5 m jest tylko 70 cm różnicy. Wiadomo również, że zakres fal średnich obejmuje fale o długościach od 185 do 580 m, a więc jest to zakres o szerokości 200 m. Nie mówię już o falach długich, które obejmują odstęp długości fal około 800 m.

Mądr. — Chciałbym, żebyś odzwyczaił się od brania pod uwagę długości fal. Zrobimy parę obliczeń uwzględniając częstotliwości.

Przypominasz sobie, co wyjaśnił Ci mój wuj na temat szerokości pasma częstotliwości przy modulacji amplitudowej? Przy tego rodzaju transmisji, zakres częstotliwości akustycznych zostaje ograniczony do 4500 Hz. A zatem z jednej i z drugiej strony częstotliwości nośnej powstają wstęgi boczne o szerokości 4500 Hz. Oznacza

¹⁾ W Polsce nadajniki z modulacją częstotliwościową pracują w zakresie 64,5...73 MHz. Na skali odbiorników zakres ten oznacza się literami UK (fale ultrakrótkie) (przyp. tłum.).



to, że emisja przy zastosowaniu modulacji amplitudowej obejmuje w sumie pasmo o szerokości 9000 Hz, czyli 9 kHz.

Pyt. — Tak, przypominam sobie. Wiem również, że z tego właśnie powodu częstotliwości nośne nadajników są od siebie odległe o 9 kHz.

Mądr. — Tak. Możesz w takim razie powiedzieć mi, ile stacji nadawczych o częstotliwościach różniących się o 9 kHz może pracować w zakresie fal długich obejmujących częstotliwości od 150 kHz do 350 kHz.

Pyt. — Bardzo łatwo obliczyć. Różnica między górną a dolną częstotliwością zakresu wynosi 200 kHz. Dzieląc ją przez 9 kHz znajduję, że w zakresie fal długich mogą pracować 22 nadajniki o różnych częstotliwościach nośnych.

Mądr. — Oblicz to samo dla zakresu fal średnich, który obejmuje częstotliwości od 500 do 1650 kHz.

Pyt. — A więc dysponujemy w tym przypadku zakresem o szerokości 1150 kHz. Po podzieleniu tej liczby przez 9 otrzymuję 128, a ściślej prawie 128. Taka jest więc liczba nadajników pracujących w zakresie fal średnich, na różnych częstotliwościach nośnych.

Nie czekając na Twoje pytanie wykonam te same obliczenia dla zakresu fal z modulacją częstotliwościową, a więc tych które obejmują częstotliwości od 87 MHz do 104 MHz. Odstęp częstotliwości wynosi 17 MHz czyli 17000 kHz. Jeżeli podzielę to przez 9, otrzymam 1888. Niesamowite! ... Nigdy nie uwierzyłbym, że przy różnicy długości fal wynoszącej 70 cm, można dysponować taką liczbą nadajników, z których każdy będzie pracował na innej częstotliwości.

Szerokość wstęg bocznych przy modulacji częstotliwościowej

Mądr. — W rzeczywistości, Ignasiu, w tym przedziale częstotliwości może pracować nieco ponad pięćdziesiąt nadajników z modulacją częstotliwościową, jeżeli każdy z nich ma nadawać program na innej częstotliwości. Wynika to stąd, że częstotliwości nośne muszą być odległe nie o 9, ale o 300 kHz.

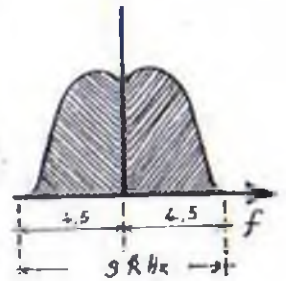
Pyt. — Skąd się bierze taki ogromny odstęp? Czyżby każda wstęga boczna wynosiła 150 kHz? Przecież zakres częstotliwości słyszalnych dźwięków nie przekracza 20 kHz.

Mądr. — Tak, to racja. Jednak przy modulacji częstotliwościowej odstępy częstotliwości od częstotliwości nośnej wynikają nie tylko z częstotliwości modulujących ją dźwięków, ale również z ich amplitudy. Jeżeli dźwięki są bardzo głośne, częstotliwość z każdej strony częstotliwości nośnej może się zmienić o 100 kHz. W ten sposób całkowite pasmo częstotliwości zajęte przez każdy nadajnik osiąga 200 kHz. W celu uniknięcia interferencji między dwoma nadajnikami, lepiej jest zapewnić odstęp między ich częstotliwościami nośnymi wynoszący 300 kHz.

Zasięg fal metrowych

Pyt. — W rezultacie, mimo tego straszego odstępu częstotliwości, można dysponować ponad pięćdziesięcioma nadajnikami, pracującymi w zakresie fal zawartym między 2,8 a 3,5 m.

Mądr. — W rzeczywistości mamy ich w Europie dużo więcej. Wiele nadajników może pracować na tej samej częstotliwości. Konieczne jest tylko, żeby odległości między tymi nadajnikami były wystarczająco duże. Wiesz oczywiście, że zasięg fal metrowych jest dość ograniczony, nie przekracza wiele ponad 100 km.



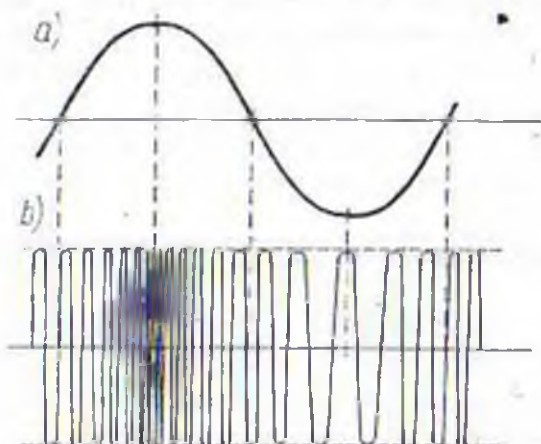
Pyt. — Tak, przypominam sobie. Fale metrowe zachowują się podobnie jak fale świetlne. Rozchodzą się wzdłuż linii prostych i nie są odbijane przez jonosferę, jak fale średnie, które dzięki temu mogą mieć duży zasięg.

Mądr. — Rzeczywiście, fale metrowe łatwo wnikają w jonosferę i są przez nią pochłaniane. Dla zapewnienia wystarczająco dużego zasięgu fal metrowych trzeba dysponować możliwie wysoką anteną nadawczą. Dlatego właśnie w Paryżu trzy programy nadawane przy zastosowaniu modulacji częstotliwościowej są emitowane przez anteny umieszczone na szczycie wieży Eiffla.

Zasada i zalety modulacji częstotliwościowej

Pyt. — Mógłbyś mi teraz wyjaśnić, jaka jest zasada modulacji częstotliwościowej i jakie są jej zalety w porównaniu z modulacją amplitudową?

Mądr. — Przy modulacji częstotliwościowej amplituda fali nośnej nie ulega zmianie. Parametrem, który zmienia się w funkcji chwilowych wartości modulujących ją sygnałów dźwiękowych, jest częstotliwość wysyłanych fal.



Rys. 165. Sygnał modulujący małej częstotliwości (a) i prąd wielkiej częstotliwości o stałej amplitudzie modulowany częstotliwościowo (b)

W rezultacie, sama częstotliwość zmian częstotliwości odpowiada częstotliwości sygnałów modulujących, a wartość tych zmian wynika z amplitudy sygnałów modulujących.

Pyt. — To właśnie wyjaśnia tę ogromną szerokość wstęg bocznych modulacji, która, jak mi powiedziałeś, może osiągnąć 100 kHz.

Mądr. — Oczywiście. Dzięki temu można osiągnąć bardzo duży stosunek między *fortissimo* a *pianissimo* nadawanych dźwięków, co nie jest możliwe w przypadku modulacji amplitudowej.

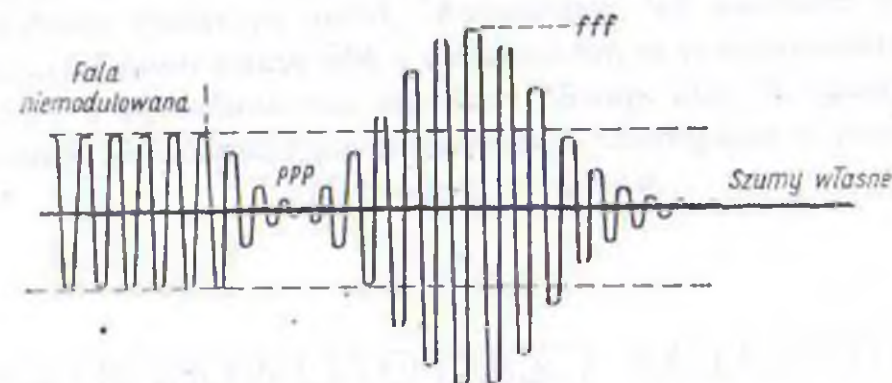
Pyt. — Dlaczego? W przypadku modulacji amplitudowej mamy przecież z jednej strony podwójną amplitudę fali nośnej, a z drugiej, prawie równą zero.

Mądr. — Ta druga możliwość jest ... niemożliwa. Nie można zbyt zmniejszać amplitudy fal. Najniższy poziom fali nośnej powinien przewyższać poziom szumów własnych.

Pyt. — Co to jest? Czy przypadkiem to nie jest szum, który słychać w odborniku przy braku dostrojenia do stacji?

Mądr. — To jest właśnie to. Szum jest spowodowany całym zespołem czynników zewnętrznych i wewnętrznych. Z jednej strony istnieją zaburzenia atmosferyczne i zakłócenia przemysłowe; a z drugiej strony w samym odborniku powstają

szumy wskutek wpływów termicznych na półprzewodniki i rezystory. Nawet najcichsze dźwięki nadawanej muzyki muszą przekraczać poziom tych szumów. W związku z tym, w przypadku modulacji amplitudowej stosunek najgłośniejszych do najcichszych dźwięków jest ograniczony.



Rys. 166. W przypadku modulacji amplitudowej górną granicę przebiegu modulowanego stanowi podwójna amplituda fali nośnej, a dolną — poziom szumów własnych

Pyt. — A ile wynosi stosunek między *fortissimo* a *pianissimo* orkiestry, której się słucha bezpośrednio?

Mądr. — Stosunek ten może osiągnąć wartość 10000. W radiofonii, nawet przy zastosowaniu modulacji częstotliwościowej, nie daje się osiągnąć takiego stosunku, przy nadawaniu zachowuje się jednak wystarczająco dużą wartość.

W podsumowaniu możemy stwierdzić, że fala modulowana częstotliwościowo ma stałą amplitudę. Jej częstotliwość zmienia się zgodnie z częstotliwością sygnału modulującego. Jeżeli częstotliwość sygnału modulującego wynosi 1000 Hz, częstotliwość nadawanej fali zmienia się 1000 razy na sekundę.

Wartość zmiany częstotliwości zależy od amplitudy sygnału modulującego.

Pyt. — Jeżeli dobrze rozumiem, to częstotliwość sygnałów akustycznych nie jest tu ograniczona do 4500 Hz, jak w przypadku modulacji amplitudowej?

Mądr. — Oczywiście. Właśnie powiększenie pasma nadawanych częstotliwości akustycznych i nieograniczony stosunek amplitud sygnałów modulujących stanowią o wyraźnej wyższości modulacji częstotliwościowej nad modulacją amplitudową. Ponadto stała amplituda fali modulowanej częstotliwościowo zapewnia bardzo dobrą sprawność nadajników.

Jak moduluje się częstotliwość?

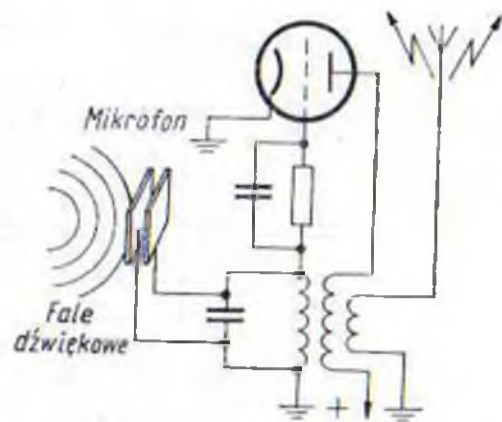
Pyt. — W jaki sposób w nadajniku przeprowadza się modulację częstotliwościową? Przypuszczam, że w tym celu należy przestrajać obwód rezonansowy generatora wielkiej częstotliwości.

Mądr. — Twoje przypuszczenie jest logiczne i zgodne z prawdą. Wiesz już od czego zależy częstotliwość dostrojenia tego obwodu.

Pyt. — Oczywiście, od wartości indukcyjności i pojemności. A jak się je uzależnia od prądu małej częstotliwości?

Mądr. — Zmienia się pojemność obwodu. Można by nawet w tym celu zrealizować mikrofon w postaci kondensatora. Jedna okładzina tego kondensatora musiałaby być sztywna, a druga wystarczająco elastyczna, aby mogła drgać pod wpły-





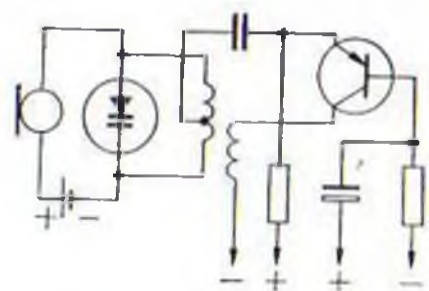
Rys. 167. Można by zapewnić modulację częstotliwościową stosując mikrofon w postaci kondensatora, którego pojemność zmieniałaby się pod wpływem fal dźwiękowych. Zmiana pojemności powodowałaby zmianę częstotliwości nadajnika

wem fal dźwiękowych. Tego rodzaju mikrofon nie zapewniałby jednak wystarczającej wierności odtwarzania.

Dlatego też stosuje się układy, w których fikcyjna pojemność między dwiema elektrodami lampy elektronowej zmienia się pod wpływem napięcia małej częstotliwości doprowadzonego do siatki sterującej. Jest to dość stary układ i dlatego Ci go nie narysuję.

Pyt. — Czy nie można w tym celu wykorzystać półprzewodników?

Mądr. — Tak. Istnieją diody półprzewodnikowe, które są prawdziwymi kondensatorami zmiennymi. Jeżeli doprowadzi się do nich napięcie w kierunku zaporowym, to znaczy w przeciwnym do kierunku przewodzenia, wówczas złącze odgrywa rolę dielektryka oddzielającego okładziny kondensatora. Otóż, w zależności od wartości doprowadzonego napięcia, ulega zmianie grubość złącza, co powoduje zmienność pojemności tego nietypowego kondensatora. Im napięcie jest większe, tym złącze jest grubsze, a pojemność mniejsza.



Rys. 168. Dioda D pod wpływem sygnałów mikrofonowych zmienia częstotliwość obwodu rezonansowego

Pyt. — W związku z tym, jeżeli do takiej diody doprowadzi się napięcie małej częstotliwości wywołane przepływem prądu mikrofonowego, a ta dioda stanowi część obwodu rezonansowego generatora wielkiej częstotliwości w nadajniku, wówczas istnieje możliwość zapewnienia modulacji częstotliwościowej. Prawda?

Mądr. — Widzę, że bardzo dobrze zrozumiałeś zasadę modulacji częstotliwościowej za pomocą diody pojemnościowej. Gratuluję.

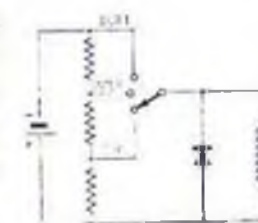
Pyt. — Zastanawiam się jednak, czy dioda pojemnościowa może mieć również inne zastosowania. Nie można by wykorzystać jej do przestrajania obwodów zamiast klasycznego, obrotowego kondensatora zmiennego? W tym celu wystarczyłoby zastosować potencjometr umożliwiający regulację napięcia doprowadzonego do diody, która byłaby równolegle przyłączona do obwodu rezonansowego odbiornika. Czy powiedziałem jakieś głupstwo?

Mądr. — Wcale nie. Oczywiście stosuje się diody pojemnościowe do przestrajania obwodów w zakresie bardzo wielkich częstotliwości i to w niektórych odbiornikach o bardzo małych wymiarach.

Jednak głównie stosuje się te diody w układach automatycznego dostrojenia. W niektórych odbiornikach wystarcza galką służącą do strojenia ustawić wskazówkę skali w pobliżu stacji, którą chcemy odebrać, aby dokładne dostrojenie nastąpiło w sposób automatyczny. W tym celu dioda pojemnościowa jest dołączona równolegle do kondensatora zmiennego i zasilana napięciem, które umożliwia ustalenie takiej wartości jej pojemności, że następuje dokładne dostrojenie odbiornika.

Pyt. — Jest to w pewnym stopniu środek popierający lenistwo ludzi, którzy zadowolają się dostrojeniem przybliżonym. Chciałbym jednak wiedzieć, w jaki sposób działają odbiorniki odbierające sygnały z modulacją częstotliwościową.

Mądr. — Wyjaśniłem Ci sposób nadawania takich sygnałów. Dzisiaj jest już za późno, abym mógł zająć się innymi aspektami tej szczególnej techniki. Zostawiam to więc troszeczkę mojego drogiego wuja.



ODBIÓR SYGNAŁÓW MODULOWANYCH CZĘSTOTLIWOŚCIOWO

Odbiór sygnałów modulowanych częstotliwościowo jest bardziej skomplikowany niż odbiór sygnałów modulowanych amplitudowo. Wynika to z jednej strony z zakresu częstotliwości i szerokości pasma, a z drugiej z trudności związanych z przejściem od zmian częstotliwości do zmian amplitudy. Wszystkie te zagadnienia, jak również metody ich rozwiązania, są przedstawione niżej.

Czy dobrze rozumiałeś, Ignasiu, dlaczego nadajniki z modulacją częstotliwościową pracują w zakresie fal metrowych?

Myślę, że po obliczeniach, których dokonałeś w trakcie ostatniej pogawędki z moim droгим siostrzeńcem, nie masz co do tego wątpliwości. Ogólnie rzecz biorąc, częstotliwość nośna powinna być dużo razy większa od szerokości pasma częstotliwości modulujących.

Kiedy zajmiesz się telewizją, dowiesz się, że szerokość pasma umożliwiająca przekazywanie sygnałów zwanych „wizyjnymi” dochodzi do 5 MHz. Nie zdziwisz się wówczas, że niektóre nadajniki telewizyjne pracują w zakresie fal decymetrowych, które odpowiadają częstotliwościom o wartości kilkuset megaherców.

Wzmacniacz częstotliwości pośredniej

Odbiór tak wielkich częstotliwości przedstawia sporo problemów tym bardziej, że szerokość pasma wzmacnianych sygnałów prowadzi do mniejszego wzmocnienia każdego stopnia.

Oczywiście do odbioru sygnałów modulowanych częstotliwościowo stosuje się układ superheterodyny. Na pewno domyślasz się, że stopnie wzmocnienia pośredniej częstotliwości takiej superheterodyny nie mogą być dostrojone do częstotliwości 455 kHz, jak w odbiornikach do odbioru sygnałów modulowanych amplitudowo. Ze względu na

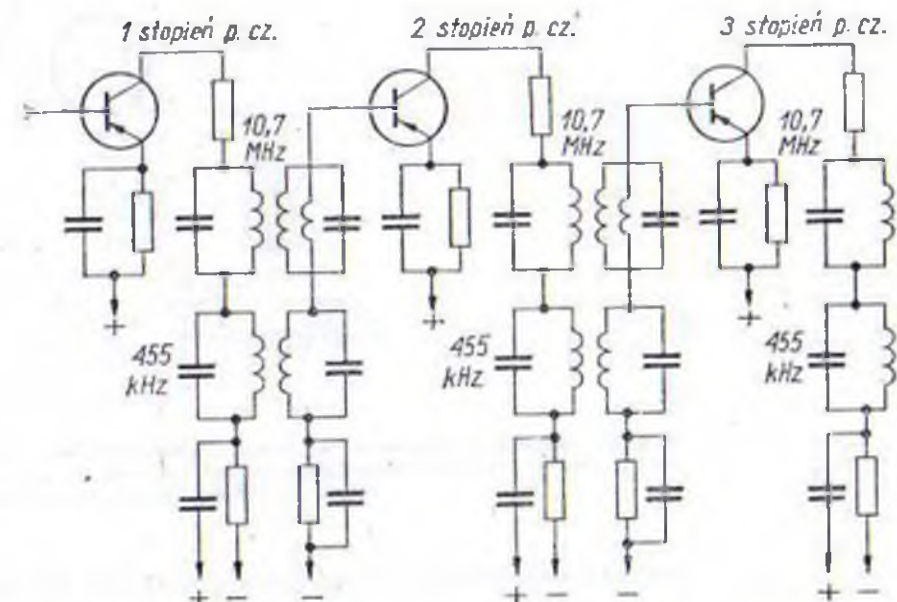
szerokość pasma wynoszącą 300 kHz, stopnie pośredniej częstotliwości są dostrojone do częstotliwości równej 10,7 MHz. Wzmacniacz składa się na ogół z trzech stopni wzmocnienia, ponieważ wzmocnienie każdego z nich jest odpowiednio mniejsze.

Nie sądz, że w odbiornikach przeznaczonych do jednoczesnego odbioru sygnałów modulowanych amplitudowo i częstotliwościowo istnieją dwa oddzielne wzmacniacze pośredniej częstotliwości. Do wzmacniania sygnałów o częstotliwości 455 kHz i 10,7 MHz stosuje się tam te same lampy lub tranzystory.

Jak to się robi? Po prostu łącząc szeregowo obwody dostrojone do częstotliwości 10,7 MHz z obwodami dostrojonymi do częstotliwości 455 kHz. Pierwsze z nich powinny być umieszczone możliwie blisko lamp lub tranzystorów, które je sterują.

Sygnały o częstotliwości 455 kHz przechodzą bez trudności przez obwody dostrojone do częstotliwości 10,7 MHz. Obwody dostrojone do częstotliwości 455 kHz przedstawiają natomiast dla tych sygnałów dużą impedancję.

Na schemacie trzystopniowego wzmacniacza pośredniej częstotliwości widzisz, w jaki sposób zapewnia się sprzężenie między stopniami. Do częstotliwości 455 kHz jest dostrojone tylko pierwotne uzwojenie filtru dwuobwodowego, natomiast do częstotliwości 10,7 oba uzwojenia. Przeanalizuj dokładnie ten układ, nie ma w nim nic skomplikowanego.



Rys. 170. Ten sam wzmacniacz pośredniej częstotliwości służy do wzmacniania sygnałów modulowanych amplitudowo ($f_p = 455$ kHz) i sygnałów modulowanych częstotliwościowo ($f_p = 10,7$ MHz)

Wzmacniacz w.cz. i przemiana częstotliwości

Zgodnie z logiką, przed omawianiem wzmacniacza pośredniej częstotliwości powinienem był omówić wzmacniacz wielkiej częstotliwości i układ przemiany częstotliwości.

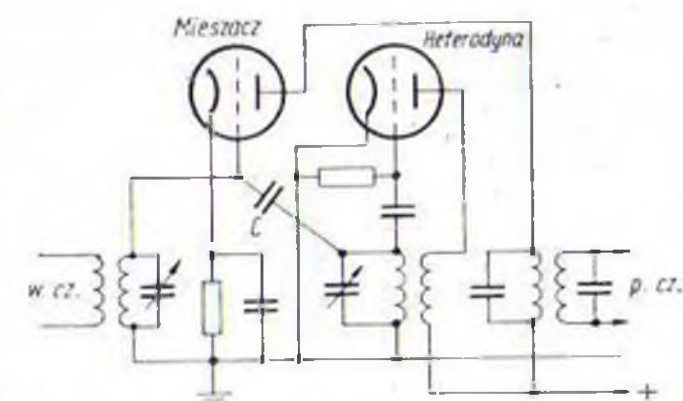
A więc zacznijmy od początku. Fale metrowe są odbierane przez antenę. W tym celu odbiorniki przenośne wyposaża się w tak zwaną antenę teleskopową. Jeżeli chcemy odbierać stacje nadające programy FM, musimy taką antenę wyciągnąć z odbiornika.

Mieszacz częstotliwości jest na ogół poprzedzony stopniem wzmocnienia wielkiej częstotliwości. W odbiornikach lampowych stopień wzmocnienia wielkiej częstotliwości jest wyposażony w triodę, ponieważ trioda przy tych częstotliwościach zapewnia większe wzmocnienie niż pentoda.

Jeśli idzie o układ przemiany częstotliwości, to preferuje się heterodynę z oddzielną lampą. Niemniej jednak można zastosować w tym celu podwójną triodę. Sprzężenie między generatorem a mieszaczem zapewnia w prosty sposób pojemność międzyelektrodowa. Pojemność ta jest łatwo pokonywana przez bardzo wielkie częstotliwości.

Układy demodulacji

Najbardziej charakterystycznym i dość skomplikowanym fragmentem odbiornika FM jest układ służący do demodulacji sygnału. Jakie jest jego za-



Rys. 171. Mieszacz z oddzielnym generatorem (heterodyną) sprzężonym z siatką lampy przemiany częstotliwości

danie? Zadanie to jest dokładnie odwrotne w porównaniu z zadaniem, które spełnia modulator w nadajniku.

Demodulator jest sterowany wzmocnionym napięciem pośredniej częstotliwości, które — pomijając przypadki zakłóceń lub zaników — charakteryzuje się stałą amplitudą, ale częstotliwością zmieniającą się w szerokich granicach. Właśnie te zmia-