

WYKŁAD 10

Modułowe systemy aparatury elektronicznej.

Konieczność stosowania dużej liczby urządzeń elektronicznych, niezbędnych do obsługi bardziej złożonych doświadczeń (jak np. eksperymenty fizyki nuklearnej), wywołała rozwój i upowszechnienie modułowych systemów elektronicznych. Dokonano w nich normalizacji mechanicznej, elektrycznej i logicznej, umożliwiając łatwy montaż systemów pomiarowych, stosowanie wspólnych zasilaczy dla wielu modułów oraz wzajemną wymianę sygnałów w systemie. Rozwiązanie to zaowocowało znacznym uelastycznieniem i wieloma uproszczeniami przy posługiwaniu się aparaturą elektroniczną. Łatwiejszy jest montaż układu pomiarowego, gdyż sprowadza się do składania urządzeń z poszczególnych modułów. Mniej skomplikowana jest również jego modyfikacja lub rozbudowa. Większość problemów związanych z chłodzeniem i zasilaniem modułów została rozwiązana przez konstruktorów systemu. W przypadku awarii, naprawa układu polega na wymianie uszkodzonych modułów, dzięki czemu przestoje aparatury są znacznie krótsze. Dlatego znaczne inwestycje ponoszone przy instalacji danego systemu modułowego, a związane z zakupem odpowiednich jego elementów mechanicznych, szybko zwracają się.

Choć w zasadzie producenci aparatury elektronicznej wytwarzają w postaci modułów większość układów niezbędnych w laboratoriach, w przypadku gdy trzeba samodzielnie wykonać pewien podzespół elektroniczny, konstruktor ma znacznie ułatwione zadanie. Dostarczane są zarówno standardowe obudowy modułów, uniwersalne płyty drukowane, złącza, jak i przełączniki, wyświetlacze oraz inne elementy montowane na płytach czołowych modułów. Nie trzeba budować zasilacza dla każdego podzespołu. Dzięki temu czas montażu ulega wielokrotnemu skróceniu. Współczesne systemy modułowe są w większości przystosowane do współpracy z komputerami. Przy ich zastosowaniu zautomatyzowanie eksperymentu jest znacznie uproszczone. Na świecie opracowano kilkadziesiąt standardów elektronicznych systemów modułowych. Część z nich stała się standardami międzynarodowymi.

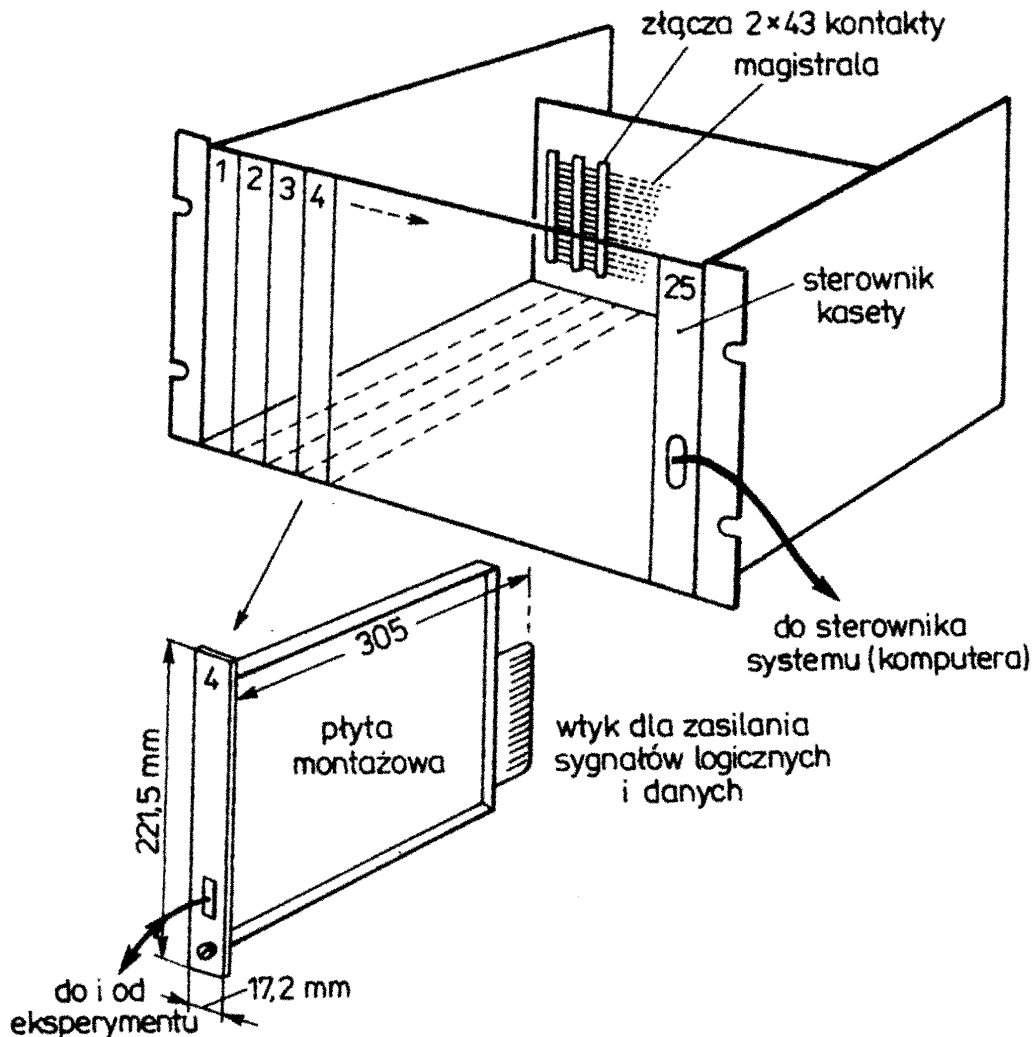
NIM

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych, a jednocześnie najstarszych systemów modułowych jest NIM (Nuclear Instrument Module). Podstawową jego jednostką mechaniczną jest kasecja (NIM bin), zawierająca stanowiska dla 12 bloków (modułów) o znormalizowanej szerokości 34,4 mm. Dopuszcza się stosowanie bloków o szerokości wielokrotnej. Z tyłu kasecji znajduje się zasilacz, dostarczający do każdego ze stanowisk standardowych napięć: 12 V (dopuszczalne obciążenie 2 A), 24 V (1 A) i 6 V (5 A). Bloki wsuwane są do prowadnic w kasecie i łączą się z liniami zasilającymi za pomocą odpowiednich złączy wielostykowych. Pod kasecją montuje się często panele z wentylatorami zwiększającymi wydajność chłodzenia aparatury.

Gniazda na ścianie tylnej kasecji umożliwiają również zrealizowanie przez użytkownika indywidualnych połączeń między blokami. Jednak w zasadzie sygnały są przesyłane za pośrednictwem zamontowanych na płytach czołowych gniazd koncentrycznych typu BNC lub LEMO i kabli koncentrycznych o impedancji 50 Ω . Standardami sygnałów cyfrowych są TTL lub NIM. W tym ostatnim przypadku przyjęto dla logicznego "1" sygnał prądowy o natężeniu od 12 do 32 mA (ujemny) lub napięcie od 0,6 do 1,6 V na rezystancji wejściowej 50 Ω , a dla logicznego "0" sygnał prądowy nie większy niż 1-2 mA lub napięciowy mniejszy niż 100 mV na 50 Ω .

Znacznym ograniczeniem systemu NIM jest brak znormalizowanego systemu sprzęgania go z komputerem oraz magistrali współpracy bloków. Jest to więc system przeznaczony przede wszystkim dla aparatury sterowanej ręcznie. Jest jednak bardzo szeroko rozpowszechniony. Wytwarza się kilkaset typów bloków NIM, a wielu producentów wykonuje w tym standardzie złożone urządzenia pomiarowe jak na przykład uśredniacze jednokanałowe, analizatory wielokanałowe, woltomierze fazowe itp.

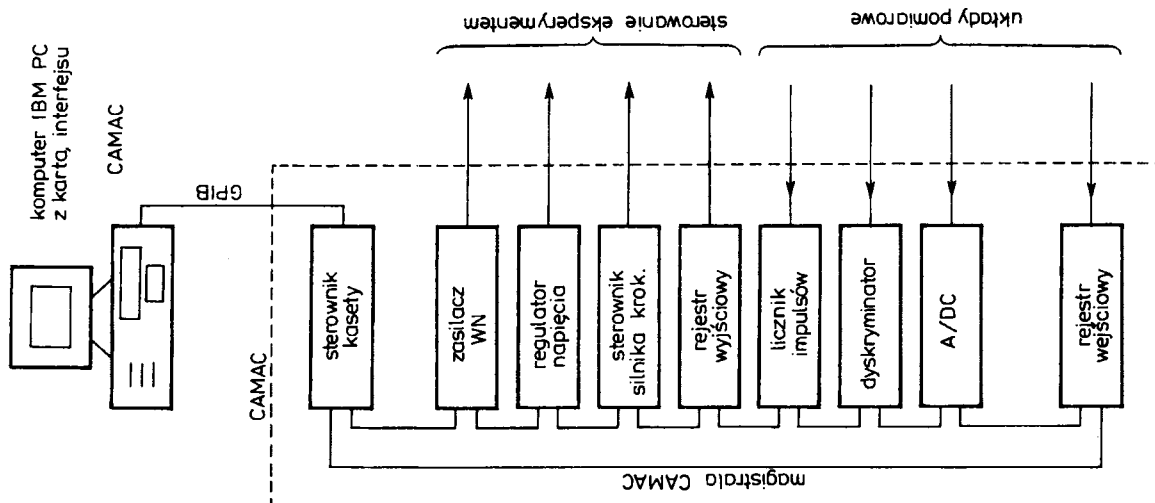
CAMAC



System CAMAC (Computer Application for Measurements and Control) powstał w międzynarodowym laboratorium fizyki jądrowej CERN w Genewie w 1968 r. Jego kaseca składa się z 25 stanowisk, przy czym 24 stanowiska przeznaczono na bloki wykonawcze, a ostatnie stanowisko na blok sterowania kasyety. Jako standard szerokości bloku przyjęto połowę szerokości bloku NIM. Pozwala to, przy zachowaniu tej samej wysokości modułu, na wykorzystanie bloków NIM w kasecie CAMAC z zastosowaniem odpowiedniego adaptera do ich zasilania. Na tylnej ścianie kasyety znajdują się złącza krawędziowe, zawierające 2 x 43 kontakty, służące do połączenia bloków z magistralą, zamontowaną za tylną ścianą. Za kasetą umieszcza się zasilacz dostarczający do magistrali napięcia 6 V, 24 V, a w szczególnych przypadkach dodatkowo napięcia 12 V, 200 V i zmiennego 117 V.

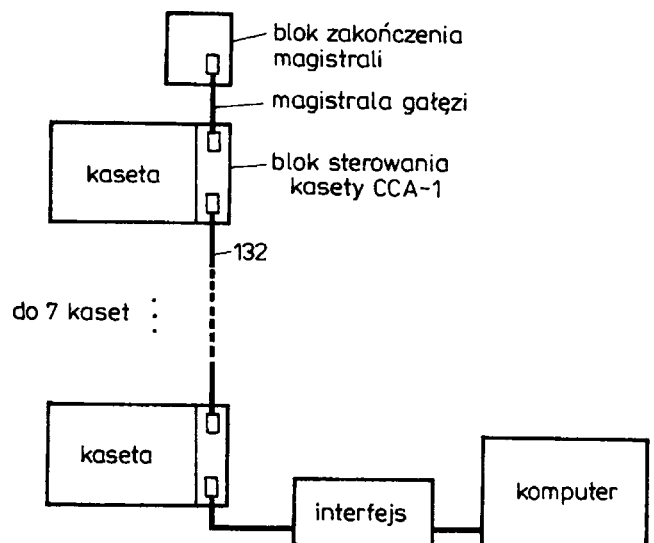
Poza liniami zasilającymi (2 x 7 linii) na magistrali, której uproszczony schemat przedstawiono na rys. 15.16, znajdują się szyny danych (2 x 24 linie) i szyny sterujące (2 x 12 linii). Adres danego bloku wybierany jest przez uaktywnienie odpowiednio jednej z 24 linii, łączącej blok sterowania kasety z pozostałymi stanowiskami. Tak więc, po ustaleniu adresu bloku jego położenie w kasecie nie może być zmieniane. Liniami A przesyła się czterobitowy kod jednej z 16 możliwych sekcji elektronicznych w bloku, liniami F (5 bitów) adresuje się do 32 operacji w każdej sekcji. Liniami W (Write) i R (Read) przesyłane są 24 bitowe słowa danych między blokiem a sterownikiem. W czasie trwania operacji na linii B (Busy) występuje sygnał zajętości magistrali. 24 linie L (Look at me) są wykorzystywane przez bloki do zgłaszania konieczności obsługi. Linie S (Strobe) służą do przesyłania impulsów synchronizujących. Czas trwania pojedynczej operacji na magistrali równy 1 μ s. Poziomy napięcia odpowiadają standardowi TTL przy logice ujemnej.

W systemie CAMAC opracowano kilka tysięcy bloków różnego rodzaju. W dobrze wyposażonym ośrodku organizacja eksperymentu z użyciem systemu CAMAC polega na dobraniu modułów, umieszczenia ich w kasetach, zapewnienia łączności z zewnętrznymi odbiornikami czy nadajnikami sygnałów i oprogramowaniu aparatury. Mimo, że system modułowy znacznie upraszcza fazę przygotowania elektroniki eksperymentu, na ogół jest to żmudne i czasochłonne.



Pełne wykorzystanie możliwości systemu CAMAC daje użycie jako kontrolera komputera połączonego ze sterownikiem kasety za pośrednictwem GPIB.

Do wad systemu należy przede wszystkim powolny, jak na możliwości dzisiejszej elektroniki, protokół komunikacji (1 MHz). Istnieje unowocześniona odmiana systemu CAMAC, zwana EC line oparta na standardzie układów cyfrowych ECL, o czasie trwania pojedynczej operacji na magistrali około 100 ns. Poza tym CAMAC nie pozwala na pełne wykorzystanie możliwości mikroprocesorów, których nie było w momencie tworzenia tego systemu.



Wadą jest także 24 bitowe słowo danych, nie pasujące do standardów, jakie się obecnie ustaliły.

FASTBUS

Standard FASTBUS został przyjęty w roku 1986 i jest obecnie najszybszym systemem gromadzenia danych. System ten ma wszystkie zalety, jakie charakteryzowały systemy opracowane wcześniej, lecz również pozwala na wykorzystanie możliwości współczesnej elektroniki. Dotyczy to parametrów takich, jak bardzo gęste upakowanie urządzeń elektronicznych, 32 bitowe słowo danych i adresów, jak również duża prędkość przesyłania danych (do 40 Mbajtów na sekundę), dzięki przystosowaniu magistrali do standardu sygnałów ECL oraz możliwość stosowania wielu procesorów

Aparatura zbudowana w systemie FASTBUS jest podzielona na segmenty, z których każdy ma niezależny kontroler (procesor). Jednak dostęp do danego segmentu mogą mieć i inne procesory, przy czym w przypadku powstania kolizji interesów o pierwszeństwie i wzajemnym podporządkowaniu procesorów decyduje procesor nadrzędny. Maksymalna szybkość transmisji danych zapewniona jest przy komunikacji synchronicznej. Jednak w przypadku gdy pewne moduły pracują wolniej niż pozostałe, stosować można również komunikację asynchroniczną z potwierdzaniem. W systemie FASTBUS wykorzystywać można trzy sposoby adresowania:

- geograficzne - gdy następuje komunikacja z modułem poprzez lokalizację danego stanowiska w danym segmencie,
- logiczne - gdy komunikacja z modułem następuje po wywołaniu go za pomocą przydzielonego mu zakodowanego adresu, co umożliwi dowolne umieszczenie modułu w segmencie, oraz powszechne czyli przesłanie informacji jednocześnie od pewnego procesora do grupy modułów w jednym lub kilku segmentach.

Adresowanie powszechne, które zwiększa szybkość pracy, stosuje się dla pewnych typów operacji jak inicjalizacja, zerowanie, zgłoszenie akwizycji danych itp. Możliwe jest również tzw. adresowanie wtórne, czyli uaktywnienie za pomocą danego adresu grupy nowych adresów, co umożliwi praktycznie nieograniczoną rozbudowę systemu.

Standardy mechaniczne FASTBUS, jak również napięcia na szynach zasilających kasety, różnią się od standardu CAMAC. Inna jest też organizacja magistrali przystosowanej do transmisji danych z użyciem sygnałów wielkiej częstotliwości. Jednak układy FASTBUS mogą się komunikować z innymi systemami za pośrednictwem odpowiednich sterowników

Znaczna gęstość upakowania aparatury elektronicznej, a przez to względnie niska cena urządzeń w systemie FASTBUS, jest możliwa dzięki kilkakrotnie większej wydajności chłodzenia modułów w stosunku na przykład do systemu CAMAC. Dla zestawów złożonych, pracujących bez przerwy przez długi czas, ważne jest również to, że dzięki zainstalowanym układom zabezpieczającym istnieje możliwość wyjęcia modułu z kasety przy włączonym jej zasilaniu bez obawy o spowodowanie uszkodzenia, co nie jest dopuszczalne w systemach NIM, CAMAC i VME. Pozwala to na przebudowę lub naprawę aparatury bez przerywania pracy całego zestawu.

VME

System VME (Versatile Module Europa) zaakceptowany został w 1987 r. Projektowano go jako elastyczny układ przeznaczony do rozszerzenia możliwości komputerów, by mogły spełniać różnorodne cele. Obecnie stał się w Europie (a szczególnie w Niemczech) bardzo popularnym systemem, stosowanym w nauce i przemyśle.

VME został zbudowany tak, by sprzężenie go z komputerem było jak najprostsze. W związku z tym ma magistralę złożoną z linii danych, linii adresowych i linii sterujących. Każdy z jego segmentów jest postrzegany jako obiekt o pewnym adresie. Dopuszcza się stosowanie słów 8, 16 i 32 bitowych, co pozwala na zaadresowanie do 4 gigabajtów. Przekazywanie danych przez magistralę odbywa się z częstotliwością 10 MHz. Przewidziano możliwość przekazywania informacji do pamięci operacyjnej za pomocą dostępu bezpośredniego (DMA). Dopuszcza się stosowanie wielu kontrolerów, choć muszą one znajdować się w kasetach na określonych stanowiskach (system FASTBUS zezwala na dowolne ich umieszczenie).

Standard mechaniczny przewiduje wykorzystanie bloków (Eurocard) w dwu wymiarach: 160 x 216 mm i 160 x 100 mm. W związku z tym stosuje się dwa wymiary kaset. W kasecie większej mogą być umieszczane obydwa rodzaje bloków. Małe bloki mogą współpracować tylko z magistralą 8 i 16 bitową. Standard sygnałów jest zgodny ze standardem TTL.

Ze względu na stosunkowo niewielką cenę i bardzo dobre parametry system ten jest bardziej rozpowszechniony niż FASTBUS.

AUTOMATYCZNY UKŁAD POMIAROWY PRACOWNI ELEKTRONICZNEJ

W skład układu wchodzi :

- komputer PC z interfejsem HP-IB :

- Równoległy interfejs 8-bitowy działający z pełnym potwierdzeniem.

- „Hardwarowo” ustalony adres sprzęgu :

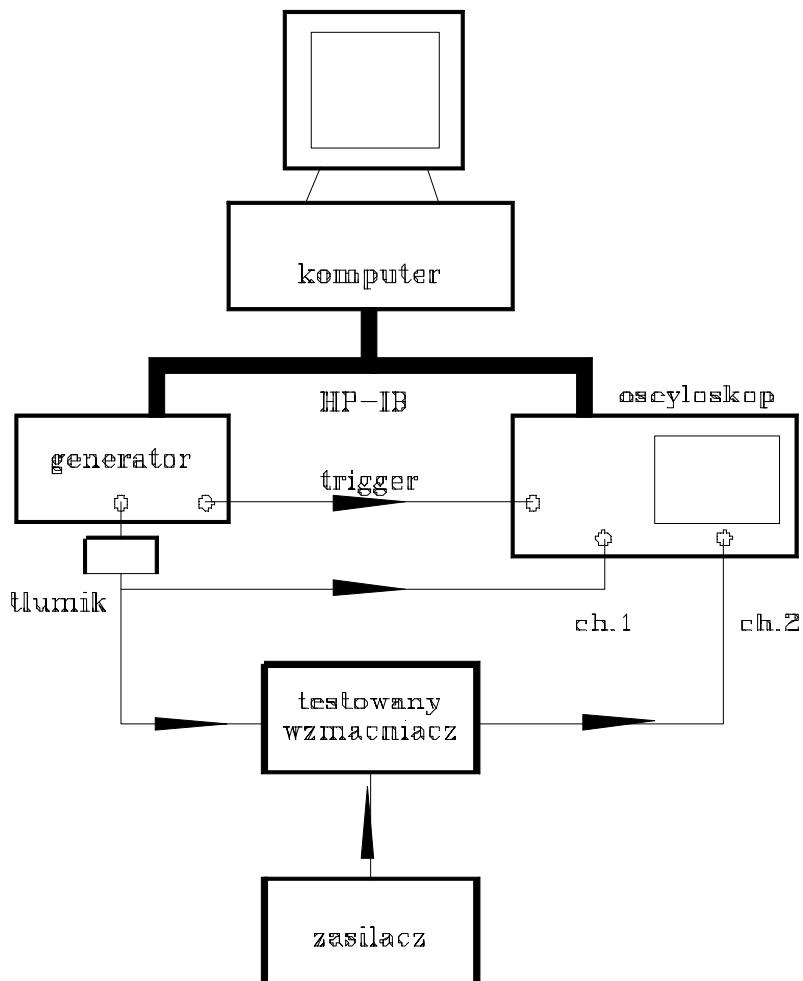
- dla komputera - 7,
- dla oscyloskopu - 7,
- dla generatora - 3.

Program ustala adresy komunikacyjne zgodnie z algorytmem :
100 x adres kontrolera + adres urządzenia pomiarowego.

A więc :

adres sprzęgu kontroler - oscyloskop : 707

adres sprzęgu kontroler - generator : 703



oscylloskop cyfrowy**HP-54605B:**

- Częstotliwość próbkowania 20 MHz ;
- Pasma przenoszenia 60 MHz ;
- Najszybsza podstawa czasu - 5 ns/cm ;
- Szerokość ekranu - 10 cm ;
- Wyzwalanie podstawy czasu: wewnętrzne, zewnętrzne, lub „auto”;
- Dwa kanały o czułości od 2 mV/cm do 5 V/cm ;
- Wysokość ekranu - 8 cm ;
- Zakres przetwornika analogowo-cyfrowego - 8 bitów (0-255) na całą wysokość ekranu (8 cm);
- Akwizycja danych zwykła lub z uśrednianiem po 8, 64, 256 przebiegach ;
- Liczba punktów pomiarowych (długość rekordu danych) - od 100 do 4000 ;
- Możliwość automatycznego pomiaru napięć przebiegu (V_{pp} , itp);
- Możliwość automatycznego pomiaru częstotliwości, okresu, przebiegu, czasu narastania i czasu opadania impulsu;
- Możliwość pełnej kontroli za pomocą interfejsu HP-IB.

Szybkość podstawy czasu może być w zasadzie dowolną liczbą rzeczywistą [z zakresu $5 \cdot 10^{-9}$ - 1 s/cm]; czułość - dowolną liczbą rzeczywistą [0.002 - 5 V/cm]. Jednak, aby uniknąć niekompletnych akwizycji, zaleca się stosowanie standardowych czułości kanałów i podstaw czasu, określonych postępująco: 1 - 2 - 5 - 10 - 20 - ...itd.

generator HP-33120A:

- umożliwia generację przebiegu : sinusoidalnego (0.1 mHz - 15 MHz)
 prostokątnego (0.1 mHz - 15 MHz)
 trójkątnego (0.1 mHz - 100 kHz);
 lub kilku innych zakodowanych w pamięci oraz dowolnego przebiegu zadanego za pomocą interfejsu;
- zakres napięć V_{pp} : 50 mV - 10 V na obciążeniu 50 Ω . Dla osiągnięcia mniejszych napięć stosuje się zewnętrzne tłumiki;
- zakres składowej stałej : \pm połowa amplitudy;
- generator może być w pełni kontrolowany za pomocą interfejsu HP-IB;

Ćwiczenie „Wzmacniacz operacyjny”.

Ćwiczenie polega na **zbudowaniu i zbadaniu dwóch układów ze wzmacniaczem operacyjnym** :

- wzmacniacza szerokopasmowego (np. odwracającego lub nieodwracającego fazę),
- wzmacniacza kształtującego (np. różniczkującego lub całkującego).

Schematy wzmacniaczy i szczegóły dotyczące konstrukcji można znaleźć w instrukcji do ćwiczenia „Linijowe układy scalone”. Płytki, na których wykonywane są układy, wyposażone są w gniazda typu CANON, które służą do połączenia badanego układu z automatycznym układem pomiarowym. Po zbudowaniu wzmacniaczy należy sprawdzić ich działanie za pomocą oscyloskopu i generatora. Następnie należy połączyć wejście, wyjście i masę wzmacniacza z odpowiednimi końcówkami tego gniazda, zgodnie z dostarczoną wskazówką.

Przed przystąpieniem do pomiaru automatycznego należy przygotować programy obsługi systemu w pakiecie AGILENT VEE: jeden do pomiaru **charakterystyki amplitudowej**: $U_{WY}=f(U_{WE})|_{1000\text{ Hz}}$, drugi do pomiaru **charakterystyki częstotliwościowej**: $U_{WY}/U_{WE} = f(\nu)$. **Charakterystykę amplitudową przedstawiamy na skali liniowej, charakterystykę częstotliwościową - na skali logarytmiczno-logarytmicznej.**

- Pomiarów dokonujemy za pomocą **sygnału o kształcie sinusoidalnym**.
- Dla charakterystyki amplitudowej pomiary należy zaplanować w zakresie napięć wyjściowych generatora od 5 V do 60 mV.
- Dla charakterystyki częstotliwościowej częstość powinna się zmieniać w zakresie od 10 Hz do 1 MHz. Amplitudę sygnału z generatora należy dobrać tak, **by wzmacniacz przerosił sygnał liniowo w całym zakresie pomiarowym**. Właściwy dobór amplitudy U_{WE} ma szczególnie istotne znaczenie przy badaniu wzmacniaczy kształtujących sygnał.
- Pomiaru parametrów sygnału dokonuje się wywołując odpowiednie procedury. Należy pamiętać, że **oscyloskop nie potrafi określić okresu lub częstotliwości sygnału, który na ekranie nie ma charakteru periodycznego**. Należy więc odpowiednio (automatycznie) dobierać podstawę czasu oscyloskopu, najlepiej tak, by na ekranie widoczne były 2 - 4 periody przebiegu. Jeżeli podstawa czasu będzie zbyt powolna w stosunku do zmienności sygnału, określenie jej częstotliwości i okresu będzie również niemożliwe. Wówczas : układ może zawiesić realizację programu (przypadek mniej szkodliwy) lub przesłać do danych wartość bezsensowną (przypadek bardziej szkodliwy). W drugim przypadku układ czasami generuje na ekranie oscyloskopu (lub generatora) informację o błędzie. **Należy więc sprawdzać, czy zmierzone wielkości mają sens.**
- **Oscyloskop nie potrafi określić amplitudy sygnału, którego wysokość przekracza rozmiary ekranu. Niemożliwy jest także pomiar sygnału zbyt małego.** Konsekwencje - jak wyżej. Należy więc dbać o odpowiednią czułość kanałów pomiarowych. Dobrze mierzy się takie sygnały, które dobrze widać !
- Należy **dbać o dobrą dokładność pomiaru**. Jeżeli wysokość sygnałów na ekranie jest mniejsza niż 1 cm to używając oscyloskopu 8-bitowego efektywnie mierzymy z dokładnością do 5 bitów.
- Próba ustawienia w oscyloskopie lub generatorze parametrów nieprzewidzianych przez konstruktora może spowodować wszystkie wymienione wyżej konsekwencje. Ustawianie niestandardowych podstaw czasu i czułości kanałów dla szybszych przebiegów może spowodować tzw. niepełne akwizycje i zawieszenie programu.
- **Zmiana parametrów oscyloskopu lub generatora jest operacją powolną** - szczególnie przy przebiegach wolnozmiennych. Przygotowując program należy przewidzieć czas

umożliwiający aparaturze ustalenie swych nastaw i dokonanie pomiarów (instrukcja „**delay**”).

AGILENT VEE

Do stworzenia programów wykreślających charakterystyki: amplitudową i częstotliwościową wzmacniaczy operacyjnych potrzebne będą następujące obiekty:

Standardowe Obiekty pakietu VEE:

- pętla **For Range** – na pinie wyjściowym daje ciąg liczb z zakresu od **From** do **Thru** z krokiem **Step**
- pętla **Log For Range** – na pinie wyjściowym daje ciąg liczb z zakresu od **From** do **Thru** z takim krokiem , aby w każdej dekadzie była zdefiniowana liczba punktów (w okienku / **Dec**) równo odległych na skali logarytmicznej , pętla szczególnie przydatna do charakterystyki częstotliwościowej
- **To file-** obiekt umożliwiający pisanie do zdefiniowanego przez użytkownika pliku (**my File**) , będzie przygotowany w ten sposób , że na jego wejście będzie trzeba podać dwie liczby. Te dwie liczby będą zapisane w pliku (oddzielone spacjami) w kolejnych liniach. Plik będzie w formacie tekstowym , łatwym do otwarcia np. w programie Excel.
- **X vs Y Plot** – obiekt rysujący wykres. Na wejścia należy podać dwie liczby – współrzędne kolejnych punktów. Ma możliwość ustawienia skali logarytmicznej , max. i min. na osiach itp.
- **Constans Real64** – obiekt służący do wysyłania stałej numerycznej.

Stworzone przez asystentów obiekty obsługujące generator i oscyloskop:

- **gener-> set all** – ustawia wszystkie parametry sygnału wysyłanego przez generator: kształt (przyciski “radiowe” **SIN** – sygnał sinusoidalny , **TRI** – sygnał trójkątny), napięcie „peak to peak” **VPP** ,składową stałą **OFFS** , częstość **FREQ**.
 - **gener->set VPP**-ustawia napięcie „peak to peak” na wartość podaną na wejście tego obiektu,
 - **gener->set FREQ** – ustawia częstość sygnału na wartość podaną na wejście tego obiektu,
 - **gener->READ FREQ**- odczytuje z generatora ustawioną częstość
 - **SOCPE->chan1 Y autoscale** oraz **socpe->chan2 Y autoscale** - automatycznie ustawia właściwą czułość kanałów,
- Socpe->chan1 Y autoscale with OFFS** oraz **socpe->chan2 Y autoscale with OFFS**- automatycznie ustawia właściwą czułość i pozycję zera kanałów. Funkcja ta może się przydać przy badaniu wzmacniacza całkowitego , który czasami dodaje sporą składową stałą. Lepiej używać jednak funkcji nie zmieniających offsetu kanałów i sprawdzać położenie sygnału na ekranie oscyloskopu. Dodawanie składowej stałej może być bowiem spowodowane uszkodzeniem wzmacniacza operacyjnego.
- scope->Time Base** –ustawia skalę czasową oscyloskopu. Na wejście należy podać częstość sygnału.
 - **scope->MEAS VPP** – mierzy napięcie „peak to peak” sygnału w wybranym kanale.

Charakterystyka amplitudowa

- ustawić parametry ,sygnały generatora (**gener->set all**)
- ustawić podstawę czasu na oscyloskopie (**scope->Time Base**) (jeśli będzie niewłaściwie ustawiona , funkcje automatycznie ustawiające czułość kanałów mogą nie zadziałać)
- w pętli (**For Range**) zmieniać amplitudę sygnału generowanego przez generator (**gener->set VPP**) i automatycznie dobierać czułość oscyloskopu (**scope->chan 1 Y autoscale** oraz **scope->chan 2 Y autoscale**), mierząc amplitudę sygnału wejściowego i wyjściowego (**scope->MEAS VPP**) i zapisać ją do pliku (**To file**) oraz wysłać na wykres (**X vs Y Plot**)

Charakterystyka częstotliwościowa:

- ustawić parametry sygnału generatora (**gener->set all**),
- ustawić podstawę czasu na oscyloskopie (**scope->Time Base**) (jeśli będzie niewłaściwie ustawiona ,funkcje automatycznie ustawiające czułość kanałów mogą nie zadziałać)
- w pętli (najlepiej **For Log Range**) zmieniać częstość sygnału generowanego przez generator (**gener ->set FREQ**), ustawiać podstawę czasu na oscyloskopie (funkcja **scope->Time Base** z podaną na wejściu częstością), automatycznie dobierać czułość oscyloskopu (**scope->chan1 Y autoscale** oraz **scope->chan2 Y autoscale**), mierząc amplitudę sygnału wyjściowego (**scope->MEAS VPP**), do pliku zapisywać ustawioną częstość i zmierzoną amplitudę wyjściową oraz wysłać na wykres (**X vs Y Plot**).

Wzmacniacze operacyjne.

Wzmacniacze należą do najbardziej uniwersalnych układów elektronicznych. Aby uwolnić konstruktorów od ich budowy wytwarza się uniwersalne wzmacniacze scalone zwane operacyjnymi. Posiadają one dwa wejścia: (-) -

odwracające fazę,

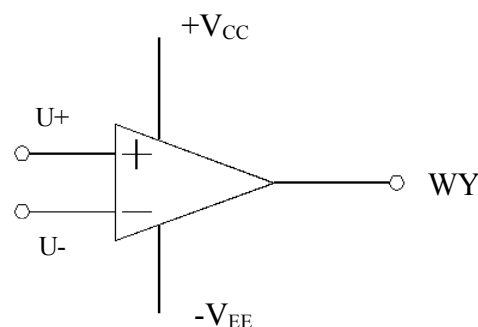
(+) -nieodwracające fazę

i realizują funkcję :

$$U_{WY} = A(U_+ - U_-)$$

W idealnym wzmacniaczu operacyjnym

wzmocnienie $A \rightarrow \infty$, rezystancje obu wejść są nieskończone, rezystancja wyjściowa jest pomijalnie mała. Będziemy także zakładać, że własności częstotliwościowe wzmacniacza (pasmo przenoszenia) nie mają wpływu na jego pracę. Zwykle wzmacniacze operacyjne charakteryzują się dwubaterijnym zasilaniem.



Podstawowym układem ze wzmacniaczem operacyjnym jest **wzmacniacz odwracający fazę**. Ponieważ napięcie wyjściowe układu jest skończone, lecz wzmocnienie układu scalonego $A \rightarrow \infty$, z powyższego równania wynika, że $U_+ = U_-$, czyli, że $U_- = 0$. Można więc napisać równanie ruchu prądów w układzie :

$$I_{WE} = \frac{U_{WE} - U_-}{R_1} = \frac{U_- - U_{WY}}{R_2} = I_f$$

Wykorzystaliśmy tutaj nieskończoną rezystancję wejściową wzmacniacza, co oznacza, że wpływające do wejść prądy są pomijalnie małe. Z powyższego wzoru otrzymujemy wyrażenie na efektywne wzmocnienie układu :

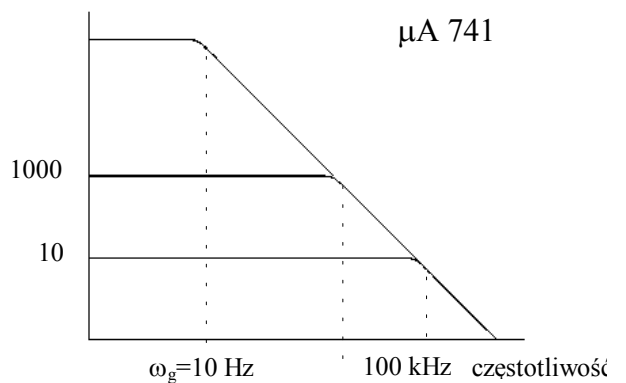
$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = - \frac{R_2}{R_1}$$

Ponieważ potencjał $U_- = 0$, rezystancja wejściowa układu wynosi R_1 .

Rzeczywiste wzmacniacze operacyjne

nie są aż tak idealne. Rezystancje wejściowe wynoszą : $10^4 - 10^{12} \Omega$, wyjściowe : $1 - 10^4 \Omega$. Wzmocnienie wzmacniacza dla sygnałów wolnozmiennych może sięgać 10^6 , jednak szybko spada wraz częstotliwością. Budując np. wzmacniacz o wzmocnieniu 10 możemy określić jego charakterystykę częstotliwościową i pasmo przenoszenia posługując się rysunkiem obok.

wzmocnienie



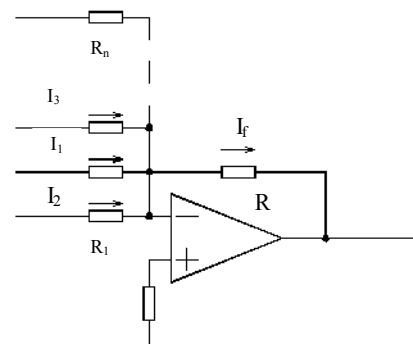
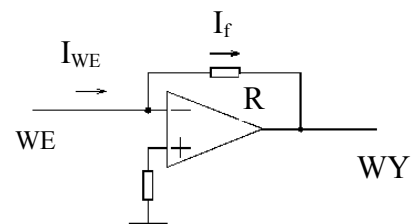
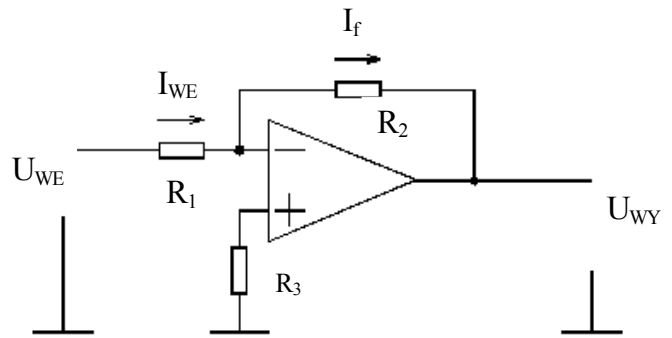
Ciekawą odmianą wzmacniacza odwracającego fazę jest **konwerter prąd-napięcie**, w którym rezystor R_1 nie istnieje ($R_1 \rightarrow 0$). Z powyższego wzoru : $U_{WY} = I_{WE} R_2$. Konwerter prąd napięcie wykorzystuje się do współpracy ze źródłami prądowymi, którymi są np. fotodiody, fotopowielacze itp.

Wzmacniacz odwracający fazę łatwo jest przekształcić we **wzmacniacz sumujący**. Suma prądów, które dopływają do wejścia odwracającego fazę jest równa prądowi sprzężenia zwrotnego :

$$\sum I_i = \sum \frac{U_{wei}}{R_i} = I_f = \frac{-U_{wy}}{R}$$

Otrzymujemy stąd, że :

$$U_{WY} = -R \sum \frac{U_{WEi}}{R_i}$$



We **wzmacniaczu nieodwracającym fazę** napięcie wejściowe podawane jest na wejście nieodwracające fazę wzmacniacza operacyjnego. Jednak różnica napięć między wejściami wzmacniacza operacyjnego jest infinitesimalnie mała. Można napisać równanie na prąd płynący przez układ sprzężenia zwrotnego :

$$I_f = \frac{U_{WY} - U_{WE}}{R_2} = \frac{U_{we}}{R_1} = I$$

skąd otrzymujemy wzór na wzmocnienie układu :

$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Rezystancja wejściowa układu jest nieskończona, dzięki temu można ją łatwo określić obciążając wejście rezystorem R_3 . Układ ten bardzo dobrze nadaje się do współpracy z wysokooporowymi źródłami sygnału jak np. termopary.

Za pomocą wzmacniacza operacyjnego można budować **wzmacniacze różnicowe**. Analizując schemat przedstawiony obok można pokazać, że napięcie wyjściowe jest równe :

$$U_{WY} = \frac{R_2}{R_1}(U_1 - U_2)$$

Poza dodawaniem i odejmowaniem napięć analogowych za pomocą układów ze wzmacniaczami operacyjnymi można wykonywać także i inne operacje matematyczne na sygnałach. Do najważniejszych układów należy **wzmacniacz całkujący**. Równanie prądów przepływających przez układ ma postać :

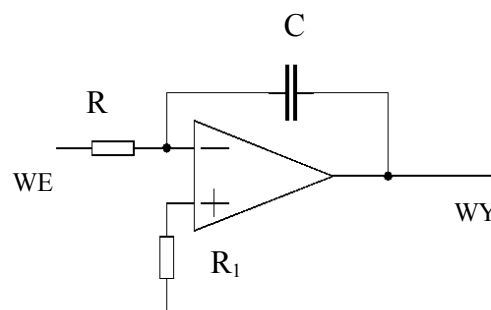
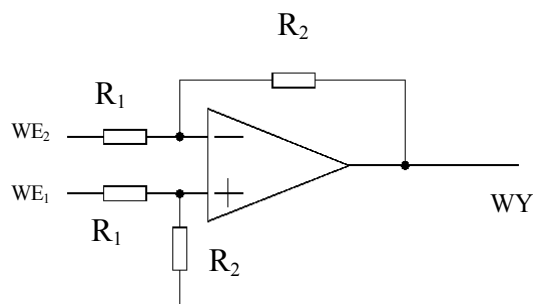
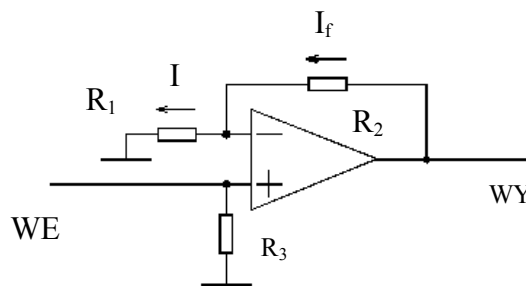
$$I_{WE} = \frac{U_{WE}}{R} = I_f = \frac{dq}{dt} = -C \frac{d}{dt} U_{WY}$$

stąd :

$$U_{WY} = \frac{-1}{RC} \int U_{WE} dt$$

Jeżeli sygnał wejściowy ma kształt sinusoidalny, możemy obliczyć charakterystykę częstotliwościową układu :

$$\left| \frac{U_{WY}}{U_{WE}} \right| = \frac{1}{\omega RC}$$



Zamieniając miejscami kondensator i opornik otrzymujemy **wzmacniacz różniczkujący**:

$$I_{WE} = \frac{dq}{dt} = C \frac{d}{dt} U_{WE} = I_f = -\frac{U_{WY}}{R}$$

czyli :

$$U_{WY} = -RC \frac{d}{dt} U_{WE}$$

Charakterystyka częstotściowa tego układu ma postać:

$$\left| \frac{U_{WY}}{U_{WE}} \right| = \omega RC$$

Wzmacniacze całkujące i różniczkujące szeroko wykorzystuje się do formowania sygnałów analogowych.

Umieszczając w obwodzie sprzężenia zwrotnego element o charakterystyce wykładniczej

$$I = I_0 \exp(XU)$$

można zbudować **wzmacniacz logarytmujący**.

$$I_{WE} = \frac{U_{WE}}{R} = I_f = I_0 \exp(-XU_{WY})$$

$$U_{WY} = \frac{-1}{X} \ln\left(\frac{U_{WE}}{RI_0}\right)$$

W praktyce rolę elementu nieliniowego o charakterystyce wykładniczej może pełnić wysokiej jakości tranzystor bipolarny.

Wzmacniacze logarytmujące służą do przetwarzania sygnałów o dużej dynamice zmian, a w połączeniu ze wzmacniaczami sumującymi i odejmującymi pozwalają budować **układy mnożące**.

Zamieniając miejscami rezystor i element nieliniowy otrzymuje się **wzmacniacz antylogarytmujący**:

$$I_{WE} = I_0 \exp(XU_{WE}) = I_f = \frac{-U_{WY}}{R}$$

$$U_{WY} = -I_0 R \cdot \exp(XU_{WE})$$

