

## MASZYNY CYFROWE

### 1. PROGRAMOWANE MASZYNY CYFROWE

[1.1. Wiadomości podstawowe, 1.2. Przedstawianie liczb, 1.3. Struktura rozkazów]

#### 1.1. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE

**1.1.1. Maszyny cyfrowe a maszyny analogowe.** W dalszym ciągu terminów *urządzenie* i *maszyna* będziemy używali w potocznym znaczeniu, przyjmując, że maszyna jest czymś bardziej skomplikowanym od urządzenia. Od wielu lat w technice obliczeniowej występowały dwa rodzaje urządzeń: urządzenia cyfrowe i urządzenia analogowe. W urządzeniach cyfrowych liczby są przedstawiane za pomocą układów cyfr, skąd dokładność bezwzględna urządzeń cyfrowych jest stała. W urządzeniach analogowych liczby przedstawiane są jako wielkości fizyczne. Najprostszym przykładem urządzenia cyfrowego są liczydła, na których cyfry reprezentowane są za pomocą zespołów krążków. Prostim, powszechnie znanym przykładem urządzenia analogowego jest suwak logarytmiczny; na suwaku logarytmicznym liczby przedstawione są jako odcinki.

Historia techniki obliczeniowej to zarówno historia urządzeń cyfrowych (od arytmometrów Leibniza i Pascala do współczesnych elektronowych maszyn cyfrowych), jak też historia urządzeń analogowych (od suwaka logarytmicznego poprzez planimetry, integratory itp. do współczesnych analogowych analizatorów). Powstanie nowoczesnych elektronowych maszyn cyfrowych pociągnęło za sobą gwałtowny rozwój matematyki obliczeniowej. Powstały nowe metody numeryczne dostosowane do rachunków automatycznych; metody te charakteryzują się wysokim stopniem formalizacji, automatyzacji procesu obliczeniowego odpowiada bowiem formalizacja rachunku.

Rywalizacja bezpośrednio po drugiej wojnie światowej między elektronowymi maszynami analogowymi a elektronowymi maszynami cyfrowymi zakończyła się przewagą cyfrówek.

Wypracowanie odpowiednich metod obliczeniowych jak i rozwój techniki zdecydowały o dużo szerszym zasięgu stosowalności maszyn cyfrowych. Nie wynika stąd, że elektronowe analogi są zbędne. Przeciwnie, analogi przy rozwiązywaniu wielu codziennych problemów techniki odgrywają poważną rolę. Jednakże w wielkich problemach techniki i to nie tylko w problemach czysto obliczeniowych, w potocznym znaczeniu

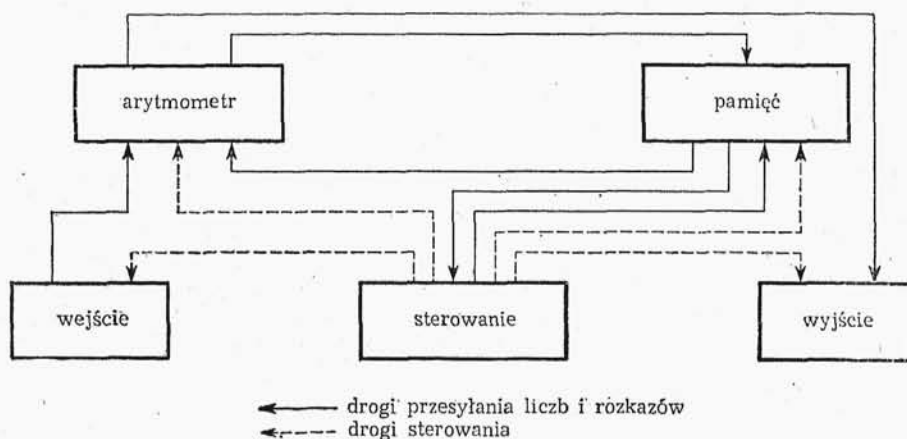
tego słowa, ale i w innych, np. w problemach analizowania i projektowania układów dynamicznych, programowane maszyny cyfrowe zdobyły sobie palmę pierwszeństwa.

W dalszych rozważaniach ograniczymy się wyłącznie do maszyn cyfrowych.

**1.1.2. Zasadnicze części programowanej maszyny cyfrowej oraz ich działanie.** Uniwersalna programowana maszyna cyfrowa (w skrócie UPMC) składa się z następujących pięciu zespołów:

- 1) pamięci,
- 2) układu sterowania,
- 3) arytmometru,
- 4) wejścia,
- 5) wyjścia.

Na rysunku 1-1 przedstawiono strukturę zasadniczych połączeń pomiędzy wyżej wymienionymi zespołami.



Rys. 1-1. Schemat blokowy UPMC

**1.1.2.1. Pamięć.** *Pamięć* jest to urządzenie służące do przechowywania *słów* (o określonej ilości cyfr), pamięć jest podzielona na komórki, z których każda służy do przechowywania jednego słowa. Wszystkie komórki pamięci są ponumerowane: numery przyporządkowane tym komórkom będziemy nazywali *adresami komórek pamięci* lub krótko *adresami*.

**1.1.2.2. Sterowanie.** *Sterowanie* kieruje pracą maszyny; działa ono w następujący sposób: rozkazy dla maszyny (czyli instrukcje postępowania maszyny) są zakodowane w postaci liczbowej i zapisane w pamięci maszyny; każdy rozkaz składa się z dwóch części: z części operacyjnej podającej rodzaj czynności, jakie ma wykonać maszyna, i części adresowej mówiącej, na jakich liczbach zapisanych w pamięci ma być wykonana operacja lub gdzie ma być (np. pod jakim adresem) zapisany wynik. O kolejności pobierania rozkazów z pamięci do wykonania decyduje zwykle specjalny rejestr, tzw. licznik rozkazów. W maszynie występują dwa rodzaje rozkazów:

1) rozkazy, które nie zmieniają kolejności wykonywania operacji (np. dodawanie, mnożenie, przesyłanie z komórki do komórki itp.),

2) rozkazy, które służą do zmiany skokowej zawartości licznika rozkazów.

Wykonanie rozkazów z grupy 1 powoduje tylko powiększenie zawartości licznika rozkazów o jeden, wykonanie zaś rozkazów z grupy 2 może spowodować dowolnie założoną zmianę zawartości licznika rozkazów. Wśród rozkazów grupy 2 zasadniczą rolę grają rozkazy, których wykonanie lub niewykonanie jest uzależnione od zachodzenia pewnej ustalonej relacji (np. od tego czy zawartość komórki pamięci o adresie  $n$  jest większa od zawartości komórki pamięci o adresie  $m$ ).

1.1.2.3. Arytmometr. *Arytmometr* służy do wykonywania operacji arytmetycznych i logicznych.

1.1.2.4. Wejście. *Wejście* służy do wprowadzenia liczb i rozkazów do maszyny; jest uruchamiane specjalnym rozkazem.

1.1.2.5. Wyjście. *Wyjście* służy do wyprowadzenia na zewnątrz z maszyny liczb i innych informacji. Jest ono uruchamiane specjalnym rozkazem.

Poza wymienionymi składowymi UPMC należy jeszcze wspomnieć o *pulpicie sterowania*. Jest to urządzenie połączone ze sterowaniem umożliwiające ręczną ingerencję obsługującego maszynę przy wykonywaniu zadań przez maszynę. Przełączniki i przyciski znajdujące się na pulpicie sterowania oddziałują na odpowiednie elementy maszyny umożliwiając ręczne wykonanie szeregu operacji maszyny. Do sprawy tej wrócimy w rozdz. 2 omawiając organizację UPMC wybranej jako maszyny przykładowej dla dalszych rozważań.

W dalszym ciągu będziemy używali wspólnego terminu dla liczb i rozkazów kodowanych cyfrowo. Liczby i rozkazy będziemy nazywali *słowami* (patrz pkt. 1.1.2.1)

Obecnie na świecie zainstalowanych jest kilka tysięcy UPMC. Maszyny te charakteryzują się różnymi parametrami i są stosowane do różnorodnych problemów. Obecnie już jest trudno sklasyfikować w jakiś dokładniejszy sposób istniejące czy też projektowane maszyny cyfrowe ze względu na możliwości obliczeniowe.

Tablica 1-1

Maszyny	Ilość operacji na sekundę
małe	do 1 000
średnie	1 000 ÷ 15 000
duże	15 000 ÷ 100 000
wielkie	powyżej 100 000

Szybki rozwój techniki urządzeń cyfrowych, doskonalenie i miniaturyzacja elementów, pozwala budować coraz szybsze i sprawniejsze maszyny cyfrowe. Klasyfikacja maszyn sprzed kilku lat stały się obecnie zupełnie nieaktualne. Maszyny, które uchodziły jeszcze niedawno za duże, są dziś maszynami średnimi.

Na użytek czytelnika wprowadzimy pewną prowizoryczną klasyfikację maszyn

uniwersalnych przeznaczonych do obliczeń naukowych i technicznych przedstawioną w tabl. 1-1 opartą o ilość operacji wykonywanych przez maszynę w ciągu sekundy.

Klasyfikacja powyższa nie jest doskonała, jednakże oparcie klasyfikacji o więcej czynników, jak pojemność pamięci, prędkość wejść i prędkość wyjść, na ogół nie prowadzi do dokładniejszych rozróżnień. Ponadto powierzchownie zajmowane przez maszyny jak też ilość i rodzaj elementów nie dają się wykorzystać przy klasyfikacji.

**1.1.3. Maszyny binarne a maszyny dziesiętne.** Wśród współcześnie budowanych i eksploatowanych UPMC rozróżniamy maszyny liczące na liczbach przedstawionych w rozwinięciu dwójkowym oraz maszyny liczące na liczbach przedstawionych w rozwinięciu dziesiętnym.

Maszyny pierwszego typu nazywamy *maszynami binarnymi* w odróżnieniu od maszyn drugiego typu zwanych *maszynami dziesiętnymi*.

Warto podkreślić, że ostatnio (1959 r.) została uruchomiona w Centrum Obliczeniowym Uniwersytetu Moskiewskiego pierwsza na świecie maszyna licząca w systemie trójkowym. Maszynę tę nazwano Sietuń; nie mieści się ona w wyżej przyjętym podziale na maszyny binarne i dziesiętne. Maszynę tę musimy zaliczyć do odrębnej grupy maszyn trójkowych.

**1.1.4. Maszyny stałoprzecinkowe a maszyny zmiennoprzecinkowe.** Maszyną *stałoprzecinkową* nazywamy UPMC, w której liczby, na których maszyna wykonuje operacje, przybliżają wszystkie liczby z danego przedziału ze stałym maksymalnym błędem bezwzględnym. Natomiast przez *maszyny zmiennoprzecinkowe* będziemy rozumieli wszystkie UPMC nie będące maszynami stałoprzecinkowymi.

**1.1.5. Maszyny szeregowy i równoległe.** UPMC, w których wszystkie cyfry liczb, na których wykonywane są operacje, przedstawione są za pomocą niezależnych układów, będziemy nazywali *maszynami równoległymi*. UPMC, w których przesyłanie liczb odbywa się za pomocą układów, w których w kolejnych chwilach czasu znajdują się kolejne cyfry dwójkowe liczby przesyłanej, będziemy nazywali *maszynami szeregowymi*.

#### **1.1.6. Najważniejsze typy pamięci stosowanych w UPMC.**

**1.1.6.1. Pamięć rtęciowa** (zwana również pamięcią ultrasoniczną). Jest to historycznie pierwszy masowo stosowany typ pamięci. Pamięć rtęciowa składa się ze sztywnej rury napełnionej rtęcią, zamkniętej na końcach płytkami kwarcu. Przyłożenie do jednej z płytek impulsu elektrycznego wywoła „skurcz“ (odkształcenie objętościowe) płytki, który z kolei zainicjuje powstanie podłużnej fali ultrasonicznej w rtęci. Fala ta przenosi się poprzez rtęć i wywołuje nacisk rtęci na płytkę kwarcową, znajdującą się na drugim końcu rury. Nacisk ten powoduje chwilowe odkształcenie płytki kwarcowej, która z kolei daje, pod wpływem tego odkształcenia, impuls elektryczny. Impuls ten jest wzmocniony i przekazany na wejściową płytkę kwarcową itp. Długość rury jest tak dobrana, aby w omówionym wyżej układzie mogły być zapamiętane całe serie impulsów.

Impulsy zapamiętywane w wyżej opisanym układzie pamięciowym można pobierać tylko wtedy, gdy znajdują się one na wyjściu z rury. Dlatego też przy pobraniu z pamięci rtęciowej słowa trzeba odczekać pewien czas, aż słowo to pojawi się na wyjściowej płytce kwarcowej. Czas ten będziemy nazywali *czasem oczekiwania*. Ze względów eksploata-

cyjnych interesować nas będą dwie wielkości: średni czas oczekiwania, równy połowie czasu opóźnienia uzyskiwanego w rurze rtęciowej i tzw. długość słowa w jednostkach czasu.

Pamięć rtęciowa ma szereg wad, które zdecydowały o zaniechaniu jej stosowania. Są to: stosunkowo powolne działanie, duże wymiary, znaczny wpływ temperatury na prawidłowość działania pamięci, duża czułość na zakłócenia zewnętrzne. Ponadto pamięć rtęciowa jest niesłychanie czuła na wstrząsy, które łatwo mogą spowodować uszkodzenie płytek kwarcowych.

1.1.6.2. Pamięć magnetostrykcyjna. Pamięć ta podobnie jak omawiana w punkcie 1.1.6.1. pamięć rtęciowa wykorzystuje zjawisko rozchodzenia się fali akustycznej w metalu, dokładniej w drucie niklowym. W odróżnieniu jednak od pamięci rtęciowej, wykorzystany tu został efekt rozchodzenia się fali poprzecznej. Nazwa pamięci magnetostrykcyjnej pochodzi od zjawiska magnetostrykcji, wykorzystanego dla wywołania poprzecznej fali w pręcie niklu. Wejściem do pamięci jest cewka nawinięta na jednym końcu drutu niklowego, wewnątrz której powstaje pole magnetyczne wywołane przez przyłożony impuls elektryczny. Pod wpływem pola magnetycznego w części pręta, znajdującego się wewnątrz cewki, powstaje „skurcz“ (fala poprzeczna). Fala ta przesuwa się wzdłuż pręta, ruchowi fali towarzyszy ruch pola magnetycznego. W umieszczonej na drugim końcu pręta cewce, pod wpływem pola magnetycznego jest indukowany prąd, który z kolei poprzez wzmacniacz jest przyłożony na cewkę wejściową. Ponieważ jednak tłumienie akustycznej fali poprzecznej w niklu jest duże, opracowanie więc tej pamięci nie było proste. Obecnie pamięć niklowa jest używana przez angielską firmę Ferranti w produkowanych przez nią maszynach (Pegasus I i II, Syrius itp.).

1.1.6.3. Pamięć ferrytowa. Oparta jest na zjawisku histerezy w materiałach ferromagnetycznych. Pamięć taka zbudowana jest z ferrytowych lub permalloyowych toroidalnych rdzeni, z których każdy jest wykorzystany do zapamiętania jednej cyfry binarnej (dwójkowej). Istnieją rozwiązania, w których dla zapamiętania jednej cyfry binarnej używane są dwa rdzenie ferrytowe. Rozwiązania takie mają lepsze parametry pracy, ze względu na równe obciążenia. Rozróżniamy dwa rodzaje pamięci ferrytowych: pamięci równoległe, używane w dużych i wielkich maszynach cyfrowych, jak radzieckie maszyny BESM-II i M-20, amerykańskie maszyny IBM 704, IBM 709, Larc, Lincoln TX-2 itp. oraz pamięci ferrytowe szeregowo, używane w małych maszynach cyfrowych, jak zachodniemiecka maszyna Zuse Z-22.

Pokrótkę omówimy zasady działania równoległej pamięci ferrytowej. Jak już wspominaliśmy, pamięć taka jest zbudowana z toroidalnych rdzeni magnetycznych o prawie prostokątnej pętli histerezy. Rdzeń taki ma dwa stany nasycenia magnetycznego, różniące się względem siebie znakiem. Jeśli przez uzwojenie nawinięte na rdzeniu przepuścimy dostatecznie duży prąd elektryczny, to pole magnetyczne w rdzeniu przyjmie jeden z dwóch stanów, w zależności od kierunku przepływu prądu. Jednemu z tych stanów przyporządkowujemy cyfrę binarną „0“, a drugiemu — cyfrę binarną „1“. Pamięć równoległa składa się z matryc złożonych z rdzeni; ilość matryc odpowiada ilości cyfr binarnych w liczbach, na których dana UMPC wykonuje działania. Ilość rdzeni w każdej z matryc odpowiada pojemności pamięci ferrytowej. Na każdym rdze-



niu w matrycy znajdują się trzy uzwojenia. Jedno z tych uzwojeń połączone jest szeregowo z analogicznymi uzwojeniami na wszystkich rdzeniach w danym wierszu. Drugie uzwojenie połączone jest szeregowo z analogicznymi uzwojeniami na wszystkich rdzeniach w danej kolumnie. Trzecie uzwojenie połączone jest szeregowo z analogicznymi uzwojeniami na wszystkich rdzeniach danej matrycy.

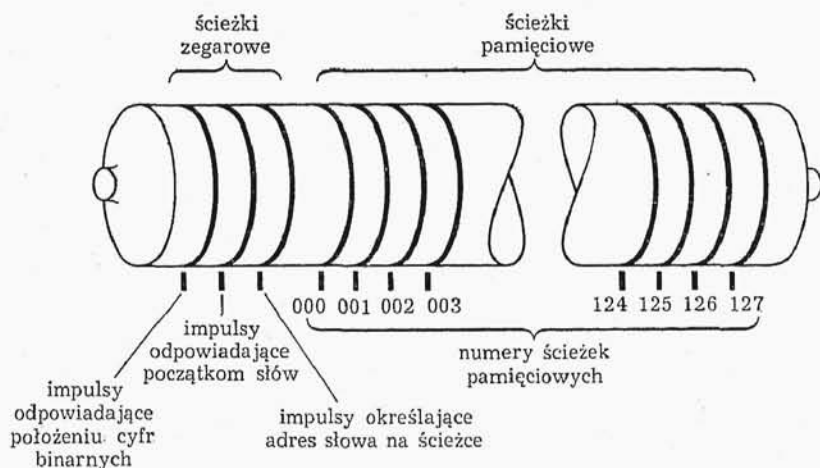
Dla zapisania „1” na rdzeniu będącym na przecięciu wybranego wiersza i kolumny (w danej matrycy) wystarczy przyłożyć do przewodów łączących uzwojenia rdzeni, znajdujących się w danym wierszu, impuls wytwarzający pole magnetyczne o natężeniu  $H_0$ , gdzie  $H_0$  jest tak dobranym natężeniem, że nie powoduje zmiany kierunku pola magnetycznego w rdzeniu, natomiast natężenie  $2H_0$  wystarczy już do zmiany kierunku pola magnetycznego w rdzeniu. Podobnie do przewodu łączącego uzwojenia rdzeni w danej kolumnie przykładamy impuls wytwarzający pole magnetyczne o natężeniu  $H_0$ . Jeśli impulsy te przyłożyliśmy jednocześnie, to w rdzeniu będącym na przecięciu wybranego wiersza i wybranej kolumny zostaje zapisana „1” (oczywiście, o ile oba uzwojenia mają tę samą kierunkowość).

Dla odczytania cyfry binarnej zapisanej na przecięciu wybranego wiersza i wybranej kolumny, podobnie jak dla zapisania, przykładamy impulsy do przewodów łączących odpowiednie uzwojenia, z tym że impulsy te muszą mieć napięcia przeciwne do napięcia impulsu zapisującego „1”, a to w celu wytworzenia pola o natężeniu  $2H_0$ , ale przeciwnie skierowanego. W przypadku gdy na wybranym rdzeniu była zapisana jedyńska, w trzecim uzwojeniu (przechodzącym przez wszystkie rdzenie matrycy) powstaje impuls.

Pamięć ferrytowa w odróżnieniu od omawianych poprzednio pamięci rtęciowej i magnetostrykcyjnej jest pamięcią statyczną i czas dostępu do każdego słowa zapisanego w tej pamięci jest stały. Równa się on czasowi przełączenia układów wybierających z pamięci. Czas dostępu do pamięci ferrytowej waha się od  $0,4 \mu s$  do kilku  $\mu s$  w zależności od techniki układów elektronowych, własności materiałów magnetycznych i rozmiaru geometrycznego rdzeni ferrytowych. Ponadto pamięć ferrytowa pamięta w sposób ciągły, tzn. jeśli wyłączymy maszynę z sieci i ponownie ją włączymy, to zawartość pamięci nie ulegnie wymazaniu, jak w przypadku pamięci rtęciowej czy też magnetostrykcyjnej. Pamięć ferrytowa jest obecnie jedynym typem szybkiej pamięci, masowo stosowanym w maszynach cyfrowych.

1.1.6.4. Pamięć bębnowa. Pamięć ta wykorzystuje podobnie jak pamięć ferrytowa zjawisko histerezy w materiałach ferromagnetycznych. Pamięć bębnowa składa się z bębna pokrytego warstwą materiału ferromagnetycznego, wirującego ze stałą prędkością, i głowic czytająco-piszących (w niektórych rozwiązaniach bywają używane pary głowic, z których jedna jest głowicą czytającą, a druga głowicą piszącą). Zapisywanie zer lub jedynek polega na przemagnesowaniu małego wycinka powierzchni bębna w jednym z dwóch kierunków. Czytanie polega na badaniu, w którą stronę wycinek powierzchni bębna został namagnesowany. Każda z głowic czytająco-piszących jest umieszczona na stałe na pewnym pasie powierzchni magnetycznej bębna. Pasy takie będziemy dalej nazywali ścieżkami. Każda ścieżka podzielona jest na części odpowiadające pojedynczym słowom. Współrzędne tych słów i poszczególnych cyfr binarnych,

z których złożone są słowa, mogą być określone za pomocą tzw. ścieżek zegarowych. Na ścieżkach zegarowych zapisane są stałe impulsy, odpowiadające bądź położeniu poszczególnych cyfr binarnych, bądź początkom słów, bądź wreszcie zakodowane są adresy poszczególnych słów na ścieżce. Na rysunku 1-2 pokazany jest schematyczny rysunek bębna magnetycznego. Podobnie jak w przypadku pamięci rtęciowej i magnetystrykcyjnej, pamięć bębnowa ma czas oczekiwania. Średni czas oczekiwania równa



Rys. 1-2. Schemat bębna magnetycznego

się czasowi połowy obrotu bębna. Dla bębna wirującego z prędkością 100 obr/s. średni czas oczekiwania wynosi 5 ms. W dużych maszynach pamięć bębnowa jest pamięcią pomocniczą. W małych maszynach bądź jest jedyną pamięcią, bądź jest używana równocześnie z małą pamięcią szybką. Pamięć bębnowa w różnych odmianach jest stosowana w większości UPMC. Obok szybkiej pamięci ferrytowej jest to powszechnie stosowany typ pamięci.

**1.1.7. Urządzenia zewnętrzne UPMC.** Wejścia, wyjścia oraz pomocnicze urządzenia pamięciowe, jak urządzenia z taśmami magnetycznymi, obejmujemy wspólną nazwą *urządzeń zewnętrznych*. Urządzenia zewnętrzne w małych i średnich maszynach oparte są w zasadzie bądź o urządzenia działające na taśmie dziurkowanej (np. pięciokanałowej taśmie dalekopisowej) i wykorzystujące typowe urządzenia dalekopisowe, łącznie ze specjalnymi szybkimi czytnikami i reperforatorami taśmy dalekopisowej, bądź o urządzenia na karty dziurkowane. Wyjątek w tym zakresie stanowią radzieckie maszyny typu Urał (Urał I, Urał II, Kristał i Pogoda), które korzystają ze specjalnych taśm celuloidowych 11-kanałowych oraz specjalnych drukarek równoległych (drukujących jednocześnie 16 cyfr dziesiętnych). W dużych i wielkich maszynach cyfrowych, wejścia i wyjścia są wąskim gardłem. Olbrzymiej prędkości wewnętrznej pracy maszyny odpowiada wielokrotnie mniejsza sprawność wejść i jeszcze niższa sprawność wyjść. Najlepsze rozwiązanie mechaniczne drukarek — wyjść dla dużych i wielkich UPMC (tzw. drukarki drukujące w biegu) — nie uzyskują większych prędkości niż

dwadzieścia kilka wierszy na sekundę. W praktyce nawet na drukarkach drukujących w wierszu 100 znaków, można wykorzystać od dwudziestu do trzydziestu znaków w wierszu. Stąd wynika, że na najlepszych mechanicznych drukarkach szybkich można praktycznie drukować nie więcej niż 600 znaków/s. Prędkość taka w porównaniu z prędkością maszyny jest mała i bardzo zmniejsza praktyczną prędkość pracy UPMC. Dlatego też stosuje się systemy kombinowane wyjść i wejść, gdzie wprowadzanie i wyprowadzanie odbywa się poprzez dodatkowe urządzenia z taśmami magnetycznymi.

Budowanie szybszych urządzeń mechanicznych wydaje się niemożliwe, natomiast w ostatnich latach opracowano pierwsze drukarki szybkie, wykorzystując zjawiska kserografii i elektrografii. Urządzenia takie dają daleko większe prędkości drukowania (rzędu 300 wierszy/s.). Jak dotychczas, koszt tego typu urządzeń jest duży.

**1.1.8. Zasadnicze typy UPMC, ze względu na zastosowanie.** Uniwersalne programowane maszyny cyfrowe możemy obecnie podzielić na trzy typy:

- 1) maszyny do przetwarzania danych,
- 2) maszyny uniwersalne do obliczeń naukowych i technicznych,
- 3) maszyny dla celów programowanego sterowania.

Postaramy się w możliwie krótki sposób o scharakteryzowanie każdego z tych typów:

1. Maszyny do przetwarzania danych stosowane są do zagadnień, w których stosunek ilości danych do ilości wykonywanych operacji jest rzędu 1/100. Maszyna taka jest przystosowana do wykonywania małej ilości prostych działań arytmetyczno-logicznych i przesyłania dużej ilości informacji między poszczególnymi miejscami pamięci. Dlatego też maszyny do przetwarzania danych są często maszynami dziesiętnymi. Pamięć w takiej maszynie jest bardzo rozbudowana, może mieć ona jednakże duże czasy oczekiwania. Ponadto maszyna taka musi mieć możliwość masowego wyprowadzania wyników na bieżąco zarówno dla dalszego przekształcenia, jak również na bezpośredni użytek zewnętrzny (np. taśma magnetyczna i drukarka).

2. Maszyna uniwersalna do obliczeń naukowych i technicznych charakteryzuje się dużym stosunkiem ilości operacji do danych wejściowych. Są to na ogół maszyny, które wykonują wielkie ilości złożonych operacji; pamięć wewnętrzna w takich maszynach ma czas oczekiwania stosunkowo mały.

3. Maszyny do celów programowanego sterowania rozwiązują problemy na bieżąco zwykle w czasie rzeczywistym przebiegania danego zjawiska. Dane wejściowe dostarczane są przeważnie w sposób ciągły <sup>(1)</sup>. Są to maszyny bardzo szybkie o dużej pojemności pamięci. Maszyny te zwykle pracują dla potrzeb sterowania, oczywiście mają one specjalne systemy wyjścia i wejścia.

Należy podkreślić, że UPMC typu 2 i 3 są z zasady maszynami binarnymi.

Maszyny do przetwarzania danych odgrywają wielką rolę w życiu gospodarczym wielu krajów. Na Zachodzie maszyn do przetwarzania danych jest mniej więcej dziesięciokrotnie więcej niż maszyn do obliczeń naukowych i technicznych. Istnieją systemy orga-

<sup>(1)</sup> W tym przypadku w skład urządzeń zewnętrznych wchodzi specjalne urządzenia zwane konwerterami, służące do zamiany wielkości funkcyjnych (ciągłych) na wielkości dyskretne (cyfrowe).



nizacji bankowej, handlowej, przemysłowej całkowicie oparte na elektronicznej technice cyfrowej.

Pod względem zastosowania można dokonać podziału maszyny typu 1, na trzy grupy:

- 1) maszyny współpracujące z istniejącą organizacją biurową przedsiębiorstw (np. z kartami dziurkowanymi, z księgowością ręczną itp.),
- 2) maszyny realizujące pełną automatyzację elektroniczną biura,
- 3) maszyny wykorzystywane w celach analitycznych — kalkulacyjnych (planowanie gospodarcze, planowanie zaopatrzenia i in.).

Użycie maszyn cyfrowych w biurach handlowych nawet przy dużym ich koszcie jest ekonomicznie uzasadnione w granicach 5÷7 lat amortyzacji, dając ponadto pewną rezerwę czasową na potrzeby dodatkowych prac np. analitycznych.

W ramach współpracy z istniejącą organizacją w biurach (punkt 1) maszyny sporządzają listy płacy, prowadzą księgowość finansową, materiałową, przeprowadzają inwentaryzację, kalkulację kosztów, analizę zapotrzebowania i zbytu. Koszty inwestycyjne takich zespołów wahają się od 500 000 do 2 000 000 dolarów USA. Koszt maszyny cyfrowej w takim zestawie stanowi 20÷40% kosztów całkowitych.

W dalszym etapie automatyzacji (punkt 2) w bankach, instytucjach ubezpieczeniowych oraz centralach handlowych i przemysłowych, wszelkie operacje, włącznie z drukowaniem wyciągów, polis i zapotrzebowań, wykonywane są całkowicie przez zespół urządzeń pracujących z niezwykłą niezawodnością. Koszt inwestycji zautomatyzowanego biura wynosi od 2 do kilkunastu milionów dolarów. Na pozycje te składa się przede wszystkim koszt urządzeń wyjściowych drukujących, taśmy magnetycznej dla wprowadzania i przechowywania danych; koszt samej maszyny cyfrowej pochłania około 10% całej sumy.

## 1.2. PRZEDSTAWIANIE LICZB

**1.2.0.** Jak już wspominaliśmy w punkcie 1.1.3, ze względu na przedstawienia liczb wyróżniamy dwa rodzaje UPMC, a mianowicie maszyny binarne i maszyny dziesiętne. Podział taki jest jeszcze bardzo powierzchowny, ponieważ w praktyce dysponujemy nie jedną arytmetyką binarną, ale co najmniej czterema takimi arytmetykami. Podobnie wygląda sprawa z maszynami dziesiętnymi. W dziesiętnych maszynach cyfrowych cyfry dziesiętne są kodowane za pomocą kilku cyfr binarnych (co najmniej czterech). Kodów takich można budować wiele, w każdym z nich inaczej wykonywane są działania arytmetyczne. Obecnie omówimy kolejno sposoby przedstawiania liczb w najważniejszych arytmetykach stosowanych w maszynach cyfrowych, ograniczając się do arytmetyk stałoprzecinkowych przedziału  $[-1,1]$ .

**1.2.1. Arytmetyka binarna prosta:** Liczby dodatnie  $x$  są postaci

$$x = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot 2^{-i}, \quad \text{gdzie} \quad \alpha_i \in \{0,1\}, \quad (1-1)$$

reprezentowane są w maszynie jako

$$0 \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n \quad (1-2)$$



natomiast liczby ujemne  $-x$  mają postać

$$1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot 2^{-i}; \quad (1-3)$$

reprezentowane są w maszynie jako

$$1 \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n. \quad (1-4)$$

Arytmetyka binarna prosta jest dostosowana do maszyn równoległych; stosowanie jej w maszynach szeregowych prowadzi bądź do zmniejszania prędkości pracy arytmometru, bądź do jego rozbudowy. Niewygodne jest ponadto występowanie dwu symboli zera: plus zero i minus zero.

**1.2.2. Arytmetyka binarna negacyjna.** Podobnie jak w punkcie 1.2.1, liczby dodatnie mają postać (1-1) i są reprezentowane w maszynie przez wyrażenie typu (1-2). Liczby ujemne  $-x$  mają postać

$$1 + \sum_{i=1}^n (1 - \alpha_i) 2^{-i}, \quad \text{gdzie } \alpha_i \in \{0,1\}, \quad (1-5)$$

reprezentowane są zaś w maszynie jako

$$1 \alpha'_1 \alpha'_2 \dots \alpha'_n, \quad \text{gdzie } \alpha'_i = (1 - \alpha_i). \quad (1-6)$$

Arytmetyka binarna negacyjna, podobnie jak arytmetyka binarna prosta, ma dwa wyrażenia na zero: „plus zero” — wyrażenie złożone z samych zer — oraz „minus zero” — wyrażenie złożone z samych jedynek.

Obie omawiane wyżej arytmetyki są w wielu maszynach stosowane wspólnie, a mianowicie w pewnych częściach maszyny, np. w rejestrze, zwanym akumulatorem, liczby są przedstawione w arytmetyce negacyjnej, w pamięci zaś liczby są przedstawione w arytmetyce prostej. Zmiana przedstawienia następuje automatycznie przy przesyłaniu liczb z jednej części maszyny do drugiej. Rozwiązanie takie jest spowodowane uproszczeniem pewnych algorytmów działań przy takim podwójnym przedstawieniu.

**1.2.3. Arytmetyka binarna uzupełnieniowa.** Podobnie jak w punktach 1.2.1 i 1.2.2, liczby dodatnie mają postać (1-1) i są reprezentowane w maszynie przez wyrażenie typu (1-2). Liczby ujemne  $-x$  przedstawiamy jako uzupełnienie do 2 liczby  $x$ , skąd zresztą nazwa arytmetyki,

$$-x \text{ odpowiada } 2-x. \quad (1-7)$$

Szczegółowo omówimy binarną arytmetykę uzupełnieniową w punkcie 2.1. Należy tu podkreślić, że arytmetyka ta ma pewną niesymetrię przedziału w odróżnieniu od arytmetyk omawianych w punktach 1.2.1 i 1.2.2. Mianowicie w binarnej arytmetyce uzupełnieniowej liczby przebiegają przedziały  $<-1, 1-2^{-n}>$ . W praktyce obliczeniowej pozbywamy się tej niesymetrii przez niekorzystanie z lewego końca przedziału „-1”. Binarna arytmetyka uzupełnieniowa jest stosowana w większości maszyn szeregowych, gdzie pozwala ona na nierozróżnianie pozycji uzupełnienia od pozostałych pozycji rozwinięcia przy dodawaniu pary liczb.

**1.2.4. Arytmetyka minus binarna.** W odróżnieniu od omawianych dotychczas przedstawień liczb, liczby dodatnie w tej arytmetyce nie mają tak regularnego przedstawienia. Liczby dodatnie i ujemne  $x$  mają wspólną postać

$$x = - \sum_{i=1}^{n+1} \alpha_i (-2)^{-i}, \quad \alpha_i \in \{0,1\}. \quad (1-8)$$

To pozorne uproszczenie (wspólne przedstawienie liczb dodatnich i ujemnych i prostota algorytmów dodawania i mnożenia) ma istotną wadę. Algorytm badania znaku liczby jest stosunkowo trudny w porównaniu z odpowiednim algorytmem w trzech poprzednio omawianych przedstawieniach, gdzie wystarczyło sprawdzić, jaka cyfra binarna znajduje się na najbardziej znaczącej pozycji. Ponadto w arytmetyce tej występuje bardzo poważna niesymetria przedziału (patrz Pawlak, Wąkulić [15]).

**1.2.5. Przedstawianie liczb dziesiętnych za pomocą czterocyfrowych kodów binarnych.** Wszystkie czterocyfrowe kody binarne cyfr dziesiętnych  $N$  mają postać:

$$N = \alpha_1 g_1 + \alpha_2 g_2 + \alpha_3 g_3 + \alpha_4 g_4 + a, \quad (1-9)$$

gdzie  $\alpha_i \in \{0,1\}$  dla  $i = 1,2,3,4$ , zaś  $g_1, g_2, g_3, g_4$  jest to tzw. baza kodu,  $a$  — tzw. akces kodu.

W tablicy 1-2<sup>(1)</sup> podane są wartości  $g_1, g_2, g_3, g_4$  dla bardziej znanych kodów o  $a = 0$ .

Tablica 1-2

$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$
5	2	1	1	6	4	2	1	7	4	2	-1	8	4	3	-2	6	5	2	-4
4	3	1	1	7	4	2	1	8	4	2	-1	6	2	1	-3	6	5	3	-4
5	3	1	1	8	4	2	1	6	2	1	-2	7	2	1	-3	6	4	3	-5
6	3	1	1	5	3	1	-1	5	3	1	-2	7	5	1	-3	7	5	3	-6
4	2	2	1	6	3	1	-1	6	3	1	-2	5	4	2	-3	6	3	-1	-1
5	2	2	1	5	2	2	-1	7	3	1	-2	6	4	2	-3	6	3	-2	-1
6	2	2	1	6	2	2	-1	4	4	1	-2	8	4	2	-3	5	4	-2	-1
3	3	2	1	4	3	2	-1	5	4	1	-2	6	2	1	-4	6	4	-2	-1
4	3	2	1	5	3	2	-1	6	4	1	-2	7	2	1	-4	7	4	-2	-1
5	3	2	1	6	3	2	-1	8	4	1	-2	8	2	1	-4	8	4	-2	-1
6	3	2	1	7	3	2	-1	6	3	2	-2	7	5	1	-4	7	2	-3	-1
7	3	2	1	4	4	2	-1	4	4	3	-2	8	6	1	-4	7	2	-4	-1
4	4	2	1	5	4	2	-1	5	4	3	-2	6	3	2	-4	8	4	-3	-2
5	4	2	1	6	4	2	-1	6	4	3	-2	8	3	2	-4	8	7	-4	-2

W tablicy 1-3<sup>(1)</sup> podana jest postać kolejnych cyfr dziesiętnych dla czterech kodów.

Spośród kodów  $a \neq 0$  zasluguje na uwagę kod tzw. akces trzy, dla którego  $g_1 = 8$ ,  $g_2 = 4$ ,  $g_3 = 2$ ,  $g_4 = 1$ , zaś  $a = 3$ . W tablicy 1-4 podana jest postać kolejnych cyfr dziesiętnych w kodzie akces trzy.

<sup>(1)</sup> Tablice 1-2 i 1-3 zostały zaczerpnięte z książki R. K. Richardsa (Bibliografia [17]).

Tablica 1-3

	8	4	2	1	2	4	2	1	5	4	2	1	7	5	3	—6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1
2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1
3	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
5	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
6	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1
7	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0
9	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1

Tablica 1-4

Cyfry dziesiętne	Kod cyfr dziesiętnych	Cyfry dziesiętne	Kod cyfr dziesiętnych
0	0 0 1 1	5	1 0 0 0
1	0 1 0 0	6	1 0 0 1
2	0 1 0 1	7	1 0 1 0
3	0 1 1 0	8	1 0 1 1
4	0 1 1 1	9	1 1 0 0

### 1.3. STRUKTURA ROZKAZÓW

W UPMC rozkazy składają się z dwu części: z części operacyjnej określającej rodzaj czynności wykonywanych przez dany rozkaz i z części adresowej podającej bądź adresy (lub adres) komórek pamięci, na których (lub na której) zawartości ma być wykonywana dana operacja, bądź pewne pomocnicze parametry operacji, bądź jedno i drugie.

Przez liczbę adresów będziemy rozumieli maksymalną liczbę adresów, jaka występuje w rozkazach arytmetycznych danej maszyny. Wśród współczesnych UPMC około 50% to maszyny o liczbie adresów jeden, tzw. maszyny jednoadresowe, na drugim miejscu znajdują się maszyny o liczbie adresów trzy, tzw. maszyny trójadresowe, na trzecim miejscu znajdują się maszyny o liczbie adresów dwa, tzw. maszyny dwuadresowe, na czwartym miejscu znajdują się pozostałe maszyny o liczbie adresów cztery (tzw. maszyny czteroadresowe) albo więcej.

W naszych rozważaniach ograniczymy się jedynie do UPMC z licznikiem rozkazów o liczbie adresów jeden, dwa i trzy<sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> Istnieją UPMC o liczbie adresów nie mniejszej od dwóch, nie mające licznika rozkazów. W maszynach tych jeden z adresów rozkazu wskazuje adres następnego rozkazu, który ma być wykonany, po wykonaniu bieżącego rozkazu.

Wprowadzimy następujące oznaczenia:  $A$  — rejestr podstawowy arytmometru,  $a, b, c$  — adresy komórek pamięci. Liczby zapisane w rejestrze podstawowym lub w komórkach pamięci będziemy dalej nazywali zawartością rejestru podstawowego czy też zawartością pamięci. Zawartość komórki pamięci o adresie  $a$  będziemy oznaczali  $(a)$ , podobnie zawartość rejestru  $A$ , będziemy oznaczali  $(A)$ .

Na ogół jednoadresowe rozkazy arytmetyczne mają postać:

$$\left. \begin{aligned} (A) \circ (a) &\rightarrow A, \\ g(a) &\rightarrow A, \\ g(A) &\rightarrow a, \\ g(A) &\rightarrow A, \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

gdzie przez „ $\rightarrow$ ” oznaczyliśmy przesyłanie zawartości pod adres, a przez „ $\circ$ ” i „ $g$ ” rodzaje operacji wykonywane na zawartościach rejestru podstawowego arytmometru lub zawartości dowolnej komórki pamięci.

Operacja mnożenia w większości jednoadresowych maszyn ma nieco inną strukturę

$$(M) \cdot (a) \rightarrow A, \quad (1-11)$$

gdzie  $M$  oznacza pomocniczy rejestr arytmometru, tzw. rejestr mnożnej.

W tym przypadku wraz z operacją mnożenia związana jest pomocnicza operacja przesyłania do rejestru  $M$

$$(a) \rightarrow M. \quad (1-12)$$

Na przykład jednoadresowe są następujące maszyny radzieckie: Urał I, Urał II, Urał IV, M-180; amerykańskie: IBM 701, IBM 704, IBM 709.

Typowymi arytmetycznymi rozkazami dwuadresowej maszyny są rozkazy

$$\left. \begin{aligned} (a) \circ (b) &\rightarrow A, \\ (a) \circ (A) &\rightarrow b, \\ (a) &\rightarrow A \rightarrow b. \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

Każdy z tych rozkazów można przedstawić za pomocą pary rozkazów jednoadresowych

$$\left. \begin{aligned} (a) &\rightarrow A \\ (A) \circ (b) &\rightarrow A \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} (A) \circ (a) &\rightarrow A \\ (A) &\rightarrow b \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} (a) &\rightarrow A \\ (A) &\rightarrow b \end{aligned} \right\},$$

Przykładami maszyn dwuadresowych są: radziecka maszyna M-3 i amerykańska maszyna ERA-1103.

W maszynach trójadresowych operacje arytmetyczne mają postać

$$(a) \circ (b) \rightarrow c; \quad (1-14)$$

co równoważne jest trzem rozkazom jednoadresowym

$$\left. \begin{aligned} (a) &\rightarrow A, \\ (A) \circ (b) &\rightarrow A, \\ (A) &\rightarrow c. \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$



Przykładami maszyn trójadresowych są: radzieckie maszyny BESM-II, M-20 i amerykańskie Bizmac, Datematic-1000, Ramac (IBM-305).

Przedstawione wyżej struktury rozkazów maszyn jedno-, dwu- i trójadresowych należy uznać za typowe. Struktury odmienne, np. maszyny trójadresowej o arytmometrze z rejestrem i rozkazach arytmetycznych postaci

$$\begin{aligned}(A) \circ (a) \circ (b) &\rightarrow c, \\(A) \circ (a) \circ (b) \circ (c) &\rightarrow A, \\(a) \circ (b) \circ (c) &\rightarrow A\end{aligned}\tag{1-16}$$

należy uznać za nietypowe. Rozkazy powyższego typu nie dają, mimo pozorów, ułatwień obliczeniowych, a stwarzają natomiast wiele trudności przy programowaniu. Czytelnik po zapoznaniu się z rozdz. 6 i 7 zrozumie, że proces automatyzacji kodowania, lub programowania jest prosty, jeśli rozkazy maszyny mają prostą, możliwie jednolitą strukturę.

Z punktu widzenia ekonomicznego wykorzystania pamięci i właściwej dokładności obliczeń w UPMC o słowach stałej długości ważny jest właściwy dobór długości rozkazów i liczb. Jak wykazało doświadczenie, ze względu na praktyczną prędkość liczenia i wykorzystywaną objętość pamięci, istnieje optimum tylko dla maszyn jedno- i trójadresowych. W maszynach dwuadresowych sprawy tej nie można rozwiązać; przy dopasowaniu długości słowa do rozkazu otrzymamy słowa 30-bitowe <sup>(1)</sup> (6 bitów — kod operacji, 12 bitów — pierwszy adres, 12 bitów — drugi adres), dla celów obliczeniowych 30 bitów jest dokładnością zbyt małą. W obecnie budowanych małych i średnich maszynach długość liczb waha się od 33 do 42 bitów.

Przy rozważaniu maszyn jednoadresowych ograniczymy się, przykładowo, do długości liczby około 40 bitów. W maszynie jednoadresowej możemy tę długość ekonomicznie wykorzystać, przyjmując, że rozkazy są o połowę krótsze od liczb. Będziemy więc mieli do czynienia z dwoma rodzajami słów, długimi 40 bitów i krótkimi 20 bitów. W większości maszyn jednoadresowych o rozkazach mających długość o połowę mniejszą od liczb pamięć jest podzielona na komórki odpowiadające słowom krótkim, których pary tworzą z kolei komórki długie (w większości maszyn jednoadresowych odczytywać i zapisywać można w pamięci zarówno słowa krótkie, jak i długie). W wyżej omawianych maszynach jednoadresowych rozkaz długości 20 bitów ma na ogół budowę następującą: 6 bitów — kod operacji, 13 bitów — adres, 1 bit — znak mówiący o tym, czy adres jest adresem słowa krótkiego, czy długiego.

W maszynach trójadresowych przy tej samej pojemności pamięci 2<sup>12</sup> słów, ekonomicznie możemy wykorzystać 42 bitowe słowa (6 bitów kod operacji, 12 bitów pierwszy adres, 12 bitów drugi adres i 12 bitów trzeci adres).

W większości produkowanych obecnie maszyn cyfrowych znajdują się specjalne rejestry, zwane B-rejestrami bądź modyfikatorami, służące do automatycznej zmiany adresu wykonywanego rozkazu. W UPMC z B-rejestrami rozkaz ma poza tym specjalną część określającą adres B-rejestru. Na przykład w maszynie jednoadresowej z mody-

<sup>(1)</sup> Bit — cyfra binarna, inaczej zwana cyfrą dwójkową, skrót od słów „binary digit”.

fikatorami rozkaz składa się z trzech części: części operacyjnej  $K$ , części adresowej  $a$  i części  $p$  podającej numer modyfikatora. Sterowanie wypełnia taki rozkaz w następujący sposób: część operacyjna  $K$  jest realizowana zgodnie z czynnością, którą reprezentuje, korzystając z adresu równego  $a + (p)$ . We współczesnych UPMC ilość B-rejestrów waha się od jednego do siedmiu (w maszynach binarnych), do dziewięciu (w maszynach dziesiętnych).

W. S. Linski (Bibliografia [10]) przeprowadził, opierając się na materiale statystycznym, analizę stopnia wykorzystania pamięci przez program w maszynach jedno-, dwu- i trójadresowych oraz analizę czasu potrzebnego na rozwiązanie tego samego zagadnienia na maszynie jedno-, dwu- i trójadresowej. Analiza powyższa została przeprowadzona przy założeniu, że czasy wykonania przez arytmometr operacji oraz czasy pobierania i zapisywania w pamięci w rozważanych jedno-dwu- i trójadresowych maszynach są równe.

Oznaczając przez  $M_1$  ilość rozkazów w programie dla rozwiązania danego zagadnienia na maszynie jednoadresowej, przez  $M_2$  ilość rozkazów w programie dla maszyny dwuadresowej, przez  $M_3$  ilość rozkazów w programie dla maszyny trójadresowej, Linski ustalił następujące nierówności:

$$M_3 \leq M_2 \leq M_1, \quad (1-17)$$

$$1,3 \leq \frac{M_1}{M_3} \leq 1,85, \quad (1-18)$$

przy czym wartość średnia  $M_1/M_3$  wynosi 1,52,

$$1,05 \leq \frac{M_1}{M_2} \leq 1,53, \quad (1-19)$$

przy czym wartość średnia  $M_1/M_2$  wynosi 1,28.

Przy założeniu, że jeden rozkaz trójadresowy jest dwukrotnie dłuższy od rozkazu jednoadresowego można przyjąć, że ilość wykorzystanych komórek długich w pamięci maszyny jednoadresowej wynosi około 0,76 ilości komórek pamięci w maszynie trójadresowej zajętej przez program dla rozwiązania danego zagadnienia.

Podobnie dla maszyn jedno- i dwuadresowych można przyjąć, że programy dla maszyny jednoadresowej zajmują około 0,64 ilości komórek potrzebnych dla zapamiętania programów maszyny dwuadresowej.

Oznaczając przez  $T_1$  czas potrzebny dla rozwiązania danego zagadnienia na maszynie jednoadresowej, przez  $T_2$  — czas potrzebny dla rozwiązania danego zagadnienia na maszynie dwuadresowej, przez  $T_3$  — czas potrzebny na rozwiązanie danego zagadnienia na maszynie trójadresowej, Linski pokazał, że zachodzi następująca nierówność:

$$T_1 < T_2 < T_3. \quad (1-20)$$

Trudno jednak powiedzieć, dla jakiej klasy problemów materiał statystyczny, na którym oparł swe rozważania Linski, był reprezentatywny.