PEŁNOMOCNIK RZĄDU
DO SPRAW
ELEKTRONICZNEJ TECHNIKI OBLICZENIOWEJ

ELEKTRONICZNA TECHNIKA OBLICZENIOWA

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA GLIWICE
P. 3057/68

NOWOŚCI

4/1968

INSTYTUT MASZYN MATEMATYCZNYCH
DZIAŁOWY OŚRODEK INTE

Wydaje

INSTYTUT MASZYN MATEMATYCZNYCH

D z i a ł o w y O ś r o d e k I n f o r m a c j i N a u k o w e j

T e c h n i c z n e j i E k o n o m i c z n e j

KOMITET REDAKCYJNY

Eugeniusz Nowak, Dorota Prawdzic /red. nacz./
Ryszard Rawski, Zbigniew Świątkowski
Witold Wudel /sekr. red./

Adres Redakcji: Warszawa, ul. Krzywickiego 34

Wykonano w Instytucie Maszyn Matematycznych

Nakład 450 egz. papier offset. kl.III g. 80, zam.nr 45/69, GP-II-1416/68, INDEKS-3580

P. 3057/68

ELEKTRONICZNA TECHNIKA OBLICZENIOWA

N O W O Ś C I

Rok VII Nr 4/14/ 1968

S p i s t r e ś c i

str.

Mgr Bartłomiej GŁOWACKI: Współczesne systemy cyfrowe. Część I . . . 3

Mgr inż. Andrzej ZIEMKIEWICZ: Systemy EMC z punktu widzenia szybkich pamięci 21

Dr inż. Zygmunt SAWICKI: Badania płatów pamięci na drutach magnetycznych 33

Mgr inż. Jan RYŻKO: Właściwości rdzeni stosowanych w nowoczesnych pamięciach ferrytowych 47

Dr inż. Jacek KULIKOWSKI, dr inż. Zygmunt SAWICKI, mgr inż. Jan RYŻKO: Niestabilność czasowa niektórych właściwości cienkich cylindrycznych warstw magnetycznych 75

Dr Antoni KWIATKOWSKI: Metaliczne warstwy magnetyczne wytwarzane w procesie chemicznego osadzania bezprądowego 91

Inż. Wacław KALINOWSKI; mgr inż. Mirosław ROTH: Wybrane zagadnienia mechaniki pamięci dyskowych 99

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA Gliwice

Mgr BARTŁOMIEJ GŁOWACKI
Zakład Organizacji Maszyn Cyfrowych IMM

681.3.01

WSPÓŁCZESNE SYSTEMY CYFROWE

Część I

1. Wstęp

Niezależnie od szybkości wzrostu mocy obliczeniowej elektronicznych maszyn cyfrowych napotykamy zawsze zadania, dla których istniejąca efektywność maszyn jest niedostateczna. Efektywność maszyny określa nie tylko klasę zadań, które mogą być rozwiązywane, lecz również, co jest znacznie ważniejsze, określa tempo badań w wielu dziedzinach nauki. Wynika stąd wniosek, że wzrost efektywności maszyn cyfrowych będzie zawsze jednym z podstawowych problemów technicznych i naukowych. Z drugiej strony rozwój zastosowań powoduje powstanie nowych złożonych kompleksów maszyn cyfrowych.

Zastosowanie maszyn do rozwiązywania problemów w czasie rzeczywistym wymaga od maszyn bezawaryjnego działania, które można uzyskać tylko na drodze rozbudowy maszyny o elementy redundacyjne co prowadzi m.in. do powstania kompleksów wielomaszynowych.

Coraz powszechniej stosowane jest łączenie liniami telekomunikacyjnymi wielu odległych maszyn w jednolitą sieć informacyjną pozwalającą na wymianę informacji pomiędzy maszynami sieci i znacznie większe wykorzystanie każdej maszyny.

Wzrost efektywności maszyn cyfrowych oraz rozszerzanie się obszarów ich zastosowań spowodowały powstanie nowej, jakościowo różnej, klasy maszyn, zwanych systemami cyfrowymi.

System cyfrowy jest to urządzenie automatycznie przetwarzające informacje dyskretne, którego różnorodne elementy mogą wykonywać równolegle kilka operacji procesu obliczeniowego [1].

Tak zdefiniowany system obejmuje swoim zakresem różnorodne typy urządzeń cyfrowych przetwarzających informacje. Obejmuje on zarówno maszyny posiadające proste zrównoleglenie operacji wprowadzania i wyprowadzania danych oraz liczenia, jak i urządzenia kompleksowe, złożone z kilku równolegle pracujących maszyn.

Elementy wchodzące w skład systemu cyfrowego realizujące równolegle szereg operacji procesu obliczeniowego będziemy nazywali maszynami elementarnymi - ME.

Klasyfikację systemów cyfrowych można przeprowadzić biorąc pod uwagę szereg kryteriów:

- zastosowania /uniwersalne, specjalizowane/,
- konstrukcję /jednorodne, niejednorodne, mieszane - w zależności od konstrukcji wszystkich ME i ich połączeń w ramach systemu/,
- strukturę /stałe, zmienne - w zależności od możliwości zmiany w czasie rozwiązywania zadania takich parametrów jak: połączenia pomiędzy ME, pojemność pamięci, lista rozkazów itp./,
- efektywność /małe, średnie, duże/.

Ponieważ dla efektywnego działania systemu cyfrowego podstawowe znaczenie posiada metoda organizacji zastosowana dla osiągnięcia zgodności współdziałania ME, zatem w niniejszym opracowaniu będziemy klasyfikować systemy według metod współdziałania ME.

Rozróżniać będziemy następujące klasy systemów cyfrowych:

- systemy o niejednorodnych ME ze stałym sterowaniem,
- systemy o jednorodnych ME ze stałym sterowaniem,
- systemy hierarchiczne,
- systemy o wspólnej pamięci głównej - wielomaszynowe,
- systemy o sterowaniu zmiennym.

Systemy hierarchiczne i wielomaszynowe będziemy nazywali wielosystemami. Z systemów hierarchicznych wydzielimy dodatkowo klasę sieci cyfrowych ze względu na specjalne metody organizacji pracy tego typu systemów.

2. Metody zrównoleglania operacji

Przy maksymalnym wykorzystaniu możliwości zwiększenia szybkości techniki realizacyjnej dalszy wzrost efektywności systemu

można uzyskać przez równoczesne wykonywanie operacji kosztem zwiększenia liczby elementów.

Zrównoleglenie wykonywanych przez system operacji może być dokonane na kilku poziomach:

a. Z r ó w n o l e g l e n i e m i k r o o p e r a c j i w r a m a c h p o j e d y n c z e j o p e r a c j i

Operacje systemu definiowane przez listę rozkazów dzielą się na ogół na mniejsze części zwane mikrooperacjami. Każdy system posiada zdefiniowany zbiór mikrooperacji. Z kombinacji elementów tego zbioru tworzone są wszystkie rozkazy. Zrównoleglając mikrooperację można przy proporcjonalnym wzroście sprzętu skrócić czas wykonania operacji. Metoda ta we współczesnych systemach cyfrowych jest stosowana bardzo rzadko, gdyż skrócenie czasu wykonania operacji osiąga się za cenę nieproporcjonalnie dużego wzrostu liczby elementów.

b. Z r ó w n o l e g l e n i e c z ę ś c i r ó ż n y c h o p e r a c j i

Sposób ten ma na celu lepsze wykorzystanie zastosowanego w systemie sprzętu. Różne bloki funkcjonalne systemu są tak zbudowane, że wykonują różne części operacji, na przykład jednocześnie z wykonywaniem określonej kodem rozkazu operacji prowadzi się przygotowanie następnej operacji /pobranie rozkazu, obliczenie adresu itp./. Sposób ten jest dość powszechnie stosowany we współczesnych systemach i powoduje tylko nieznaczny wzrost liczby elementów /10-30%/, a pełne jego zastosowanie pozwala na kilkakrotne skrócenie czasu wykonania operacji.

c. Z r ó w n o l e g l e n i e o p e r a c j i

Zrównoleglenie operacji to znaczy zrównoleglenie pracy kilku ME jest podstawowym sposobem podwyższenia efektywności współczesnych systemów.

Zrównoleglenie operacji może polegać na równoczesnym wykonaniu tej samej operacji przez wiele ME o jednorodnej strukturze lub na równoczesnym wykonaniu kilku kolejnych rozkazów jednego programu lub też równoległym wykonaniu sekwencji rozkazów należących do niezależnych programów przez kilka ME o niejednorodnych strukturach.

Pierwsza z metod jest stosowana w systemach specjalizowanych przeznaczonych do efektywnego rozwiązywania określonej klasy zadań. Druga z me-

tod, stosowana we współczesnych systemach uniwersalnych, ze względu na sekwencyjną strukturę programów, wymaga wbudowania w system specjalnych układów kontrolujących logiczną zależność operacji i wstrzymujących wykonanie dalszego ciągu operacji w każdym przypadku, w którym taka zależność może zachodzić. Pełną szybkość systemu tego typu można wykorzystać tylko wówczas, gdy program wykonywany przez system będzie uwzględniał właściwości jego struktury. Dlatego też szybkość wykonania programu jest zależna od algorytmu zastosowanego do rozwiązania zadania i może się różnić nawet o rząd wielkości.

3. Systemy o jednorodnych maszynach elementarnych ze stałym sterowaniem

Przykładami tej klasy systemów jest system UNGERA [2] lub system SOLOMON [3], [4]. W tego typu systemach wszystkie ME powinny wykonywać jednocześnie jedną i tę samą operację na własnych danych, określoną sterowaniem systemu. W systemie UNGERA wszystkie ME muszą wykonywać operację, w systemie SOLOMON niektóre z ME mogą przy określonych warunkach ignorować rozkaz.

S y s t e m U N G E R A

Informacja analizowana w procesie rozpoznawania obrazów jest zazwyczaj zadawana w postaci dwuwymiarowej siatki, w której każdym węźle umieszczona jest pojedyncza cyfra binarna. Operacje wykonywane w czasie rozpoznawania obrazów charakteryzują się tym, że pojedyncze, proste operacje są wykonywane na informacjach zadanych w postaci macierzy i że uzyskane wyniki też mają tę postać.

UNGER przedstawił [2] w 1959 r. projekt specjalizowanego systemu, przeznaczonego do rozwiązywania problemów rozpoznawania obrazów. System ten złożony jest z Układu Sterowania Centralnego /USC/, stanowiącego właściwie maszynę cyfrową wyposażoną w pamięć o dużej pojemności oraz z dużej liczby identycznych maszyn elementarnych /ME/ rozłożonych w węzłach jednorodnej sieci. ME posiada bardzo prostą strukturę logiczną złożoną z jednobitowego sumatora pamiętającego, kilku jednobitowych miejsc pamięci oraz układu sterowania kierującego wykonaniem operacji ME. Wszystkie ME wykonują jednocześnie tę samą operację określoną przez USC.

ME wykonują następujące operacje:

- negacja zawartości sumatora,
- iloczyn i suma logiczna zawartości sumatora i pamięci, przy czym wynik operacji jest umieszczany w sumatorze lub pamięci,
- iloczyn i suma logiczna zawartości sumatora z zawartością sumatora jednej z czterech sąsiednich ME,
- skok warunkowy /przy zerowej zawartości sumatorów wszystkich ME/ i bezwarunkowy,
- przesunięcia/w lewo, w prawo, w górę, w dół/, przy pomocy których można przesyłać informacje pomiędzy sumatorami ME sieci,
- przesunięcie cykliczne; zawartość sumatora każdej z ME jest przesyłana do sumatora sąsiednich /z prawej strony/ ME oprócz skrajnych prawych, których zawartość jest przesyłana do skrajnych lewych wyżej leżącego szeregu ME,
- łączność i rozprzestrzenianie - specjalne operacje ułatwiające rozwiązywanie zadania rozpoznawania obrazów. Operacje te wykonywane są przy pomocy specjalnych układów łączących każdą z ME z ośmioma sąsiednimi ME /włączając ME wzdłuż przekątnych/. Operacja łączności powoduje uruchomienie tych układów łączności pomiędzy dwoma ME, których sumatory zawierają jedynki. Operacja rozprzestrzeniania powoduje przesłanie z ME /której sumator zawiera 1/ informacji do wszystkich ME połączonych z nią uruchomionymi układami łączącymi.

Ponieważ wszystkie ME są jednakowe oraz posiadają jednakowe połączenia można sieć dowolnie powielać bez zmiany struktury logicznej systemu, umożliwia to stworzenie systemu złożonego nawet z kilku tysięcy ME, co powinno pozwolić na efektywne rozwiązywanie problemów rozpoznawania obrazów.

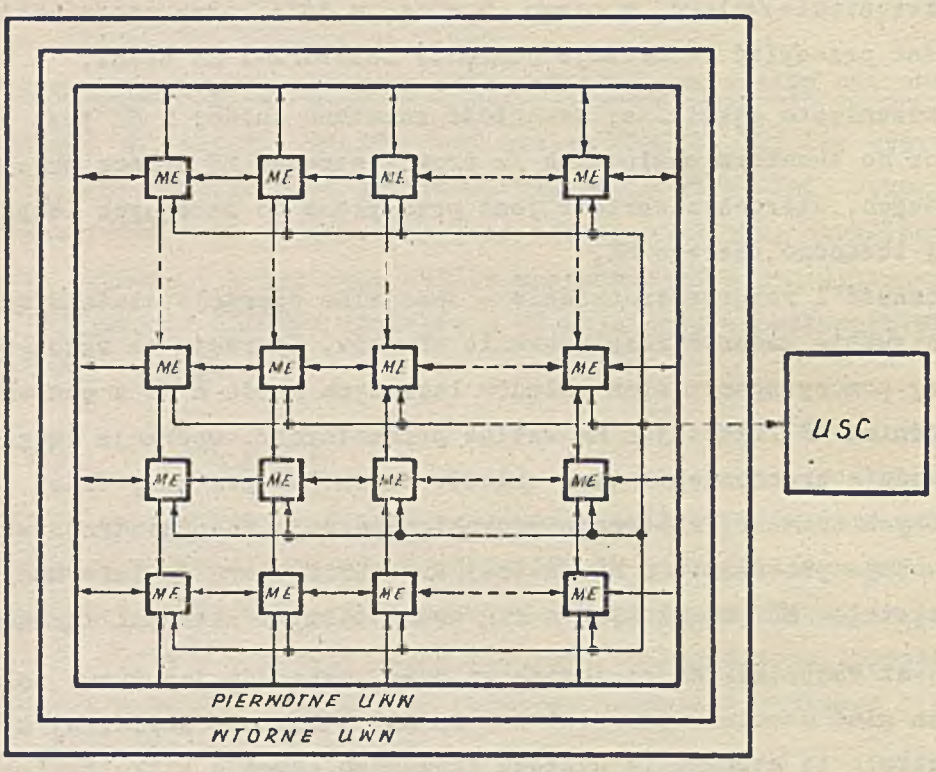
System UNGERA może być stosowany tylko do określonych problemów. Wynika to z niewielkich jego możliwości /jednorodne wykonanie niewielu operacji we wszystkich ME na jednobitowych danych/.

S O L O M O N

Projekt systemu cyfrowego SOLOMON - Simultaneous Operation Linked Ordinal MOdular Network [3], [4], został opracowany przez firmę Westighouse Electric Corp. z przeznaczeniem dla rozwiązywania zadań, w któ-

rych można równocześnie wykonywać jedną operację na wielu liczbach, na przykład: odwracanie macierzy, rozwiązywanie układu równań liniowych itp.

System SOLOMON składa się z Układu Sterowania Centralnego /USC/ i z sieci jednakowych i jednolicie połączonych maszyn elementarnych /ME/. Sieć zawiera 32 x 32 ME. Każda ME posiada arytmometr wykonujący szeregowo operacje arytmetyczne i logiczne oraz dwa bloki pamięci każdy o pojemności 2048 bitów. Każda ME jest połączona liniami współpracy z czterema sąsiadującymi z nią ME. Dodatkowo wszystkie ME są połączone pojedynczą linią z USC /rys. 1/.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu SOLOMON

Linie współpracy skrajnych ME wykorzystuje się do współpracy z urządzeniami wejścia/wyjścia /UWW/. Duża liczba równoległych linii współpracy zapewnia dużą szybkość współpracy z UWW. W projekcie SOLOMON przewidziano dwie konfiguracje UWW:

- pierwotna, w skład której wchodzą dyski magnetyczne i taśmy magnetyczne,
- wtórna, w skład której wchodzą standartowe urządzenia wejścia/wyjścia.

Tylko urządzenia konfiguracji pierwotnej współpracują bezpośrednio z ME i są używane jako pomocnicza pamięć dużej pojemności do zadań o dużej liczbie danych. Urządzenia konfiguracji wtórnej współpracują z systemem poprzez konfigurację pierwotną.

Wszystkie ME w określonej chwili mogą wykonywać tylko jedną operację na liczbach przechowywanych w ich pamięci, przy czym adres we wszystkich blokach pamięci jest identyczny. W systemie nie wszystkie ME muszą wykonywać rozkazy podawane przez USC, część z nich może rozkazy ignorować. Ignorowanie rozkazu umożliwia specjalny, cztero-pozycjowy rejestr sposobu wykonania rozkazu umieszczony w ME. Zawartość rejestru każdej z ME może być ustalona przez program specjalnymi rozkazami. USC równocześnie z rozkazem podaje cztero-bitowy kod określający sposób wykonania rozkazu. Rozkaz jest wykonywany przez ME tylko wówczas, jeśli kod sposobu wykonania jest równy zawartości rejestru sposobu tej ME. Zastosowanie takiej metody umożliwia indywidualne sterowanie przesyłania informacji.

System SOLOMON w porównaniu ze zwykłymi maszynami cyfrowymi posiada znacznie większą efektywność, uzyskaną przez:

- jednoczesne wykonywanie dużej liczby operacji /do 1024/,
- bardzo niewielkie straty czasu konieczne dla pobrania rozkazu, gdyż pojedynczy rozkaz umożliwia wykonanie maksymalnie 1024 operacji,
- matrycowy rozkład ME, co pozwala na uniknięcie operacji indeksowania,
- stosowanie danych o zmiennej długości,
- możliwość bezpośredniej współpracy sąsiednich ME.

Z drugiej strony system SOLOMON posiada pewne wady, które mają wpływ na spadek jego efektywności:

- szeregowe wykonywanie operacji przez system trwa znacznie dłużej niż w zwykłej równoległej maszynie cyfrowej,
- nie wszystkie zadania rozwiązywane przez system wymagają wykonania równoczesnego 1024 operacji, a przy mniejszej ich ilości stosunek efektywności do kosztów systemu dość szybko maleje.

Autorzy projektu oceniają, że efektywność systemu SOLOMON będzie większa 60-200 razy od efektywności zwykłej maszyny cyfrowej.

Dla systemów o jednorodnych ME ze stałym sterowaniem charakterystyczne jest, że funkcje sterowania są scentralizowane i określane przez sterowanie systemu. Wymiana informacji może następować tylko pomiędzy sąsiednimi ME zgodnie z rozkazem określanym przez sterowanie. Systemy tego typu są bardzo efektywne dla rozwiązywania określonej klasy problemów, ich efektywność spada znacznie, jeśli stosować je do rozwiązywania problemów zawierających dużą liczbę warunkowych rozgałęzień lub dla problemów, w których dane przeplatają się w taki sposób, że dowolna z ME musi czekać na rezultaty generowane przez inną ME.

4. Systemy o niejednorodnych maszynach elementarnych ze stałym sterowaniem

Jak już powiedziano w poprzednim rozdziale systemy ze stałym sterowaniem o jednorodnych ME są efektywne tylko dla określonej klasy zadań ze względu na brak możliwości wykonania przez różne ME różnych operacji. Rozszerzenie możliwości ME doprowadza do tego, że ME staje się maszyną cyfrową. Systemy cyfrowe omawiane w tym rozdziale są właściwie maszynami o klasycznej strukturze wewnętrznej, które wyposażone zostały w układy realizujące:

- zrównoleglenie pracy różnych ME w procesie wykonywania jednego rozkazu,
- zrównoleglenie przygotowania i wykonania kilku kolejnych rozkazów jednego programu,
- zrównoleglenie pracy różnych ME dla różnych i niezależnych programów,

przy czym najbardziej rozwiniętymi są dwie ostatnie. Jest oczywiste, że taki system musi być złożony z szeregu ME o różnej strukturze, przy czym każdej z nich przypisane są specyficzne funkcje.

Pierwszym systemem tego typu był system DYSEAC [5]. W niniejszym opracowaniu omówimy najbardziej rozwinięte ze współczesnych systemów tej klasy: IBM System/360 model 91 [6], [7] oraz modele 6600 i 6800 serii 6000 firmy CDC [8].

Systemy te /zapowiadane w roku 1964/ miały być zainstalowane po raz pierwszy w końcu roku 1967. Wskazuje to na szereg trudności związanych z opracowaniem i produkcją tej klasy systemów, wynikających przede wszystkim z niejednorodności ME.

IBM S y s t e m / 3 6 0 m o d e l 9 1

Model 91 jest najbardziej efektywnym w Systemie/360 firmy IBM. Oprócz wysokiego stopnia zrównoleglenia operacji jest on wyposażony w układy pozwalające na optymalizację czasu wykonania programu przez zrównoleglenie niezależnych części programu. Proste zrównoleglenie części różnych operacji zastosowane w modelu 91 /podobnie jak w IBM 7094/ pozwala na dwukrotny wzrost efektywności systemu. Zastosowanie optymalizacji /zrównoleglenie operacji/ powoduje dalszy pięciokrotny wzrost efektywności.

Szybkość stanowi jeden z ważniejszych parametrów określających wydajność systemu, jednakże dla większości rozwiązywanych problemów wzrost szybkości powoduje wzrost pojemności pamięci a z jej wzrostem konieczność wzrostu szybkości przesyłania informacji pomiędzy pamięcią a współpracującymi z nią elementami systemu.

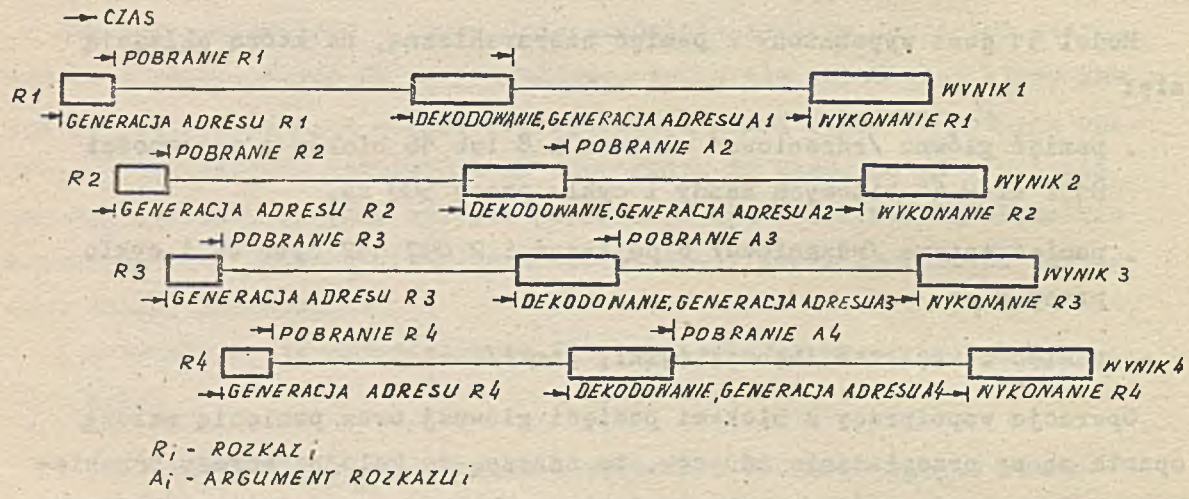
Model 91 jest wyposażony w pamięć hierarchiczną, na którą składają się:

- pamięć główna /rdzeniowa/ złożona z 8 lub 16 bloków o pojemności 8192 słów 64-bitowych każdy i cyklu pracy 500 ns,
- pamięć masowa /rdzeniowa/ o pojemności 2 097 152 bytów i cyklu pracy 8 μs,
- pamięć zewnętrzna /bębny, dyski, paski/.

Operacje współpracy z blokami pamięci głównej oraz pamięcią masową oparte są na przeplataniu adresów, to znaczy, że kolejne adresy przebiegają kolejno przez różne bloki pamięciowe. Każdy typ pamięci posiada niezależny układ sterowania. Układ sterowania pamięcią główną /USPG/ współpracuje z blokami pamięci, szyną adresową oraz niezależnymi szynami informacji odczytywanych i zapisywanych. Układ sterowania zapewnia możliwość wykonania do 8 odwołań do pamięci w pojedynczym cyklu pracy, jeśli tylko odwołania nie następują do tych samych bloków. Jeśli nastąpi odwołanie do bloku zajętego wykonaniem poprzedniego odwołania, to układ sterowania pamięcią główną nie wykonuje operacji, lecz pamięta odwołanie i adres w jednym z czterech rejestrów buforowych aż do zakończenia poprzedniego cyklu pracy pamięci. Dodatkowe układy kontrolują kolejność odwołań do pamięci, zawieszając odwołania do miejsc pamięci, których adresy są przechowywane w rejestrach buforowych.

W podobny sposób jest rozwiązany układ sterowania pamięcią masową i pamięciami zewnętrznymi.

Wykonanie typowego rozkazu w systemie składa się z ciągu kolejno wykonywanych operacji: pobranie rozkazu, dekodowanie rozkazu, wygenerowanie adresów argumentów, pobranie argumentów oraz wykonanie rozkazów /rys. 2/; każda z tych operacji wykonana jest przez niezależne układy systemu. Założono, że techniczna realizacja modelu 91 powinna zapewnić uzyskanie cyklu pracy pamięci równego 500 ns. Wynika stąd wniosek, że czas wykonania każdej z ciągu operacji dla typowego rozkazu powinien być nie większy od 67,5 ns. Przyjęto, że czas ten stanowi podstawowy cykl pracy modelu 91.

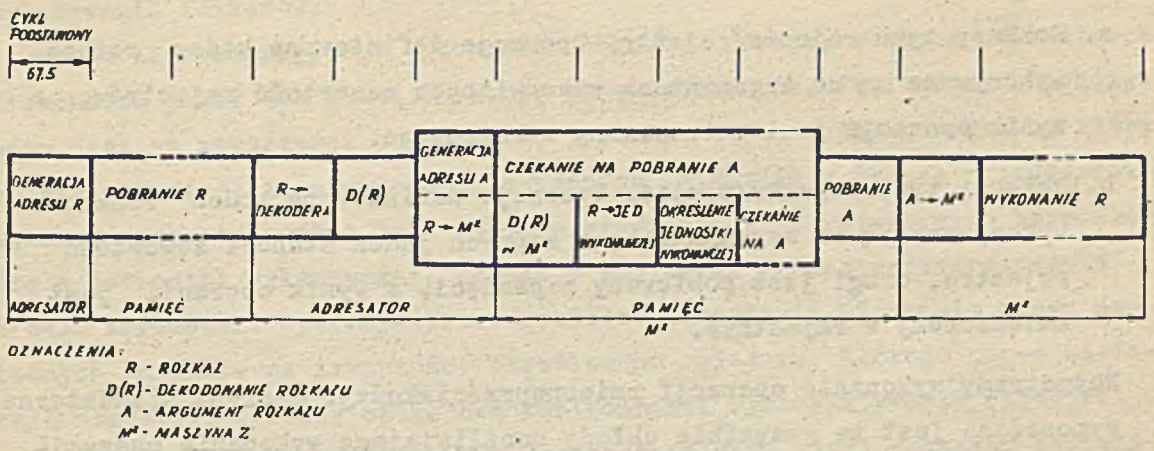


Rys. 2. Zrównoleglenie rozkazów w modelu 91 IBM System/360

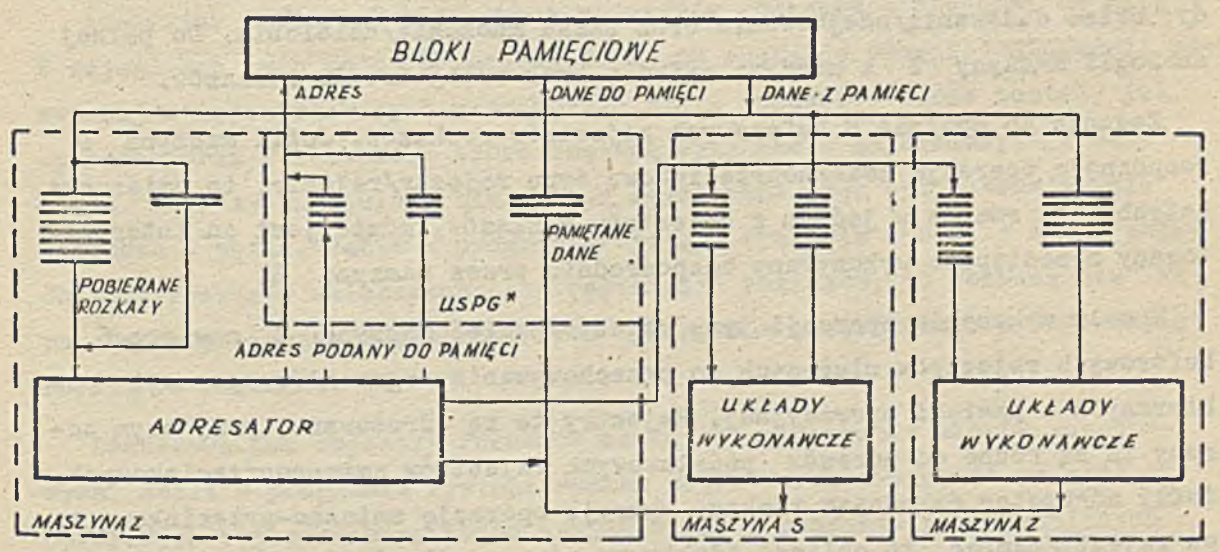
Podstawową cechą organizacji modelu 91 jest takie zrównoleglenie działania różnorodnych układów, że wykonanie przez określony układ identycznej operacji dla kolejnych rozkazów przebiega z przesunięciem o cykl podstawowy /rys. 3/.

Centralną jednostkę przetwarzania modelu 91 można podzielić na trzy maszyny elementarne /rys. 4/:

- adresator /D/, zawierający układy dekodowania operacji i obliczania efektywnych adresów pamięciowych oraz układy sterowania pamięcią główną,



Rys. 3. Wykonanie operacji zmiennoprzecinkowej w modelu 91 IBM System/360



*USPG - Układ sterowania pamięcią główną

Rys. 4. Schemat blokowy modelu 91 IBM System/360

- arytmometr stałoprzecinkowy /S/, zawierający blok rejestrów uniwersalnych oraz układy wykonujące wszystkie operacje logiczne i operacje stałego przecinka,
- arytmometr zmiennoprzecinkowy /Z/ zawierający blok rejestrów zmiennoprzecinkowych oraz układy wykonywujące wszystkie operacje zmiennego przecinka.

Rozkazy wykonywane przez system można podzielić na dwie grupy:

a. Rozkazy typu rejestr/rejestr. Operacje definiowane kodem rozkazu wykonywane są na argumentach stanowiących zawartość rejestrów, a wynik operacji jest umieszczany w rejestrze.

b. Rozkazy typu rejestr/pamięć. Operacje definiowane kodem rozkazu wykonywane są na argumentach, z których jeden stanowi zawartość rejestru, drugi jest pobierany z pamięci, a wynik operacji jest umieszczany w rejestrze.

Rozpatrzmy wykonanie operacji zmiennoprzecinkowej. Maszyna elementarna Z wyposażona jest we wszystkie układy umożliwiające wykonanie operacji zmiennoprzecinkowych typu rejestr/rejestr. W skład tych układów wchodzą dwie jednostki wykonawcze, z których każda zawiera dwa niezależne układy: układ dodawania/odejmowania oraz układ mnożenia/dzielenia. Do pełnej analogii maszyny Z z maszyną cyfrową brak tutaj źródła rozkazów.

Zadanie to spełnia 8 buforowych rejestrów rozkazów. Jeśli maszyna D rozpoznaje operację zmiennoprzecinkową typu rejestr/rejestr, to umieszcza natychmiast rozkaz w jednym z rejestrów rozkazów, gdzie jest on interpretowany a następnie wykonywany bezpośrednio przez maszynę Z.

W celu wykonania operacji typu rejestr/pamięć maszyna Z zawiera 6 buforowych rejestrów służących do przechowywania argumentów operacji pobieranych z pamięci operacyjnej. Rejestry te są adresowane, przy czym adresy te są różne od adresów podstawowych rejestrów zmiennoprzecinkowych. Jeśli adresator dekodując rozkaz, wykryje operację zmienno-przecinkową typu rejestr/pamięć, to oblicza efektywny adres pamięciowy, wykonuje operację pobrania argumentu i umieszcza go w jednym z buforowych rejestrów argumentów. Następnie adres tego rejestru wstawiany jest w miejsce adresu pamięciowego, co w rezultacie daje operację typu rejestr/rejestr. Teraz dopiero rozkaz zostaje umieszczony w jednym z buforowych rejestrów rozkazów maszyny Z i z punktu widzenia maszyny Z traktowany jest jak operacja rejestr/rejestr.

Dla eliminacji odczytów danych z pamięci, ulegających zmianie w wyniku zapisu, maszyna wyposażona jest w dwa rejestry buforowe, w których przechowywane są zapisywane dane oraz odpowiadające im dwa rejestry do przechowywania adresów miejsc pamięci dla tych danych. Adresy te są zawsze porównywane z adresami pobieranych danych.

W arytmometrze stałego przecinka została zastosowana identyczna metoda wykonywania rozkazów.

Celem niesekwencyjnego wykonania rozkazów, rozkazy w obu arytmometrach przechodzą przez tak zwaną operację przeadresowania. Jeśli rozkaz wykonywany jest na zawartości określonego rejestru a poprzedza go rozkaz, który ustala zawartość tego rejestru, wykonując działanie w jednej z jednostek wykonawczych, to rozkaz taki pobiera argument nie z rejestru, a bezpośrednio z jednostki wykonawczej. Uzyskuje się to na drodze przeadresowania źródła argumentu. Operacja przeadresowania umożliwia wykonanie ciągu zależnych rozkazów na zawartości określonego rejestru, którego adres zawierają wszystkie rozkazy ciągu bez konieczności wykorzystywania rejestru. Na skutek tego występujące w programie niezależne ciągi rozkazów zawierające adres tego samego rejestru mogą być wykonywane równolegle.

Adresator zawiera 8 buforowych rejestrów rozkazów o długości 64 bity. W rejestrach tych można przechowywać do 18 rozkazów średniej długości. Zazwyczaj w rejestrach tych przechowuje się 9 rozkazów, które zostały już wykonane oraz 9 rozkazów, które zostaną wykonane w najbliższym okresie czasu. Rozkazy znajdujące się w tych rejestrach mogą być automatycznie zamykane w pętle. Jeśli w progranie wystąpi operacja skocz, a adres skoku dotyczy rozkazów umieszczonych w rejestrach rozkazów, to rozkazy nie są powtórnie pobierane z pamięci, lecz wykonywane bezpośrednio z buforowych rejestrów rozkazów.

Dodatkowe dwa rejestry rozkazów służą do wykonywania skoków warunkowych. Jeśli w programie wystąpi rozkaz skoku warunkowego, to na ogół w buforowych rejestrach rozkazów znajduje się 9 rozkazów przedłużających prostą gałąź programu. Rozkazy te są dekodowane i następuje pobranie z pamięci ich argumentów a następnie są one umieszczane w rejestrach rozkazów maszyn elementarnych S lub Z. Wykonanie tych rozkazów zostaje zawieszone aż do podjęcia decyzji o wykonaniu skoku. Równocześnie w rejestrach pomocniczych umieszczane są dwa kolejne rozkazy, do których przechodzi się w wyniku skoku efektywnego. Tak więc w chwili podejmowania decyzji wykonania skoku w systemie istnieje zrównoleglenie rozkazów dla każdej z alternatywnych gałęzi.

Jeśli porównywać szybkość wykonania operacji w modelu 91 z analogiczną szybkością dla maszyny IBM 7094, to chociaż stosunek tych szybkości zależy od typu rozwiązywanego zadania, jednak dla większości zadań zmien-

noprzecinkowych jest ona 120 razy większa, kompilacja jest szybsza około 80 razy, mimo że technika realizacji modelu 91 zapewnia tylko czterokrotny wzrost szybkości w stosunku do IBM 7094.

C D C 6800

Seria 6000 firmy Control Data Corporation składa się z trzech modeli 6400, 6600 oraz 6800. Struktura systemu zostanie omówiona szczegółowo w punkcie 5.1.

Modele 6600 i 6800 posiadają identyczną strukturę logiczną z tym, że zastosowana w modelu 6800 technika realizacyjna powoduje czterokrotny wzrost szybkości w stosunku do modelu 6600.

W skład modelu 6800 wchodzi centralna jednostka przetwarzania oraz maksymalnie 64 peryferyjnych i sterujących jednostek przetwarzających. Wspólnym elementem łączącym jednostki peryferyjne oraz jednostkę centralną jest pamięć centralna o dużej pojemności.

Pamięć centralna składa się maksymalnie z 32 modułów. Pojemność modułu wynosi 4096 słów 60-bitowych, a cykl pracy 250 ns. Moduły są logicznie niezależne, a kolejne adresy przebiegają kolejno przez różne moduły. Odwołania do pamięci centralnej z wszystkich składników systemu są przesyłane do wspólnego układu adresowego, a stąd do wszystkich modułów pamięci. Układ adresowy może przyjąć w ustalonym priorytecie do 10 odwołań w jednym cyklu pracy pamięci. Układ ten wysyła adres do wszystkich modułów, a wybrany adresem moduł, jeśli może wykonać operację, przyjmuje adres i sygnalizuje to układowi adresowemu. Jeśli moduł jest zajęty przetwarzaniem poprzedniego adresu, to ignoruje podawany adres.

Aby zapewnić efektywność operacji pamięciowych układ adresowy wyposażony jest w rejestry, w których przechowywane są ignorowane adresy. Adresy te w następnej kolejce odwołań otrzymują najwyższe priorytety. Przesyłaniem informacji pomiędzy pamięcią centralną a pozostałymi składnikami systemu steruje dystrybutor. Dystrybutor wyposażony jest w szereg rejestrów służących do chwilowego przechowywania informacji zapisywanych w pamięci, gdy adres jest ignorowany przez odpowiedni moduł pamięciowy. Każda grupa 4 modułów komunikuje się z dystrybutorem przez niezależne szyny odczytu i zapisu. Jednostki peryferyjne dzielą wspólne dla nich szyny zapisu i odczytu.

Centralna jednostka przetwarzania współpracuje tylko z pamięcią centralną. Ponieważ szybkość działania jednostki centralnej zależy od minimalizacji odwołań do pamięci, wyposażono ją w 24 następujące rejestry:

- Rejestry argumentów /osiem rejestrów 60-bitowych/, w których są przechowywane argumenty i wyniki operacji. W pięciu z nich przechowywane są argumenty pobierane z pamięci, a w dwóch przechowywane są zapamiętywane wyniki.
- Rejestry adresowe /osiem rejestrów 18-bitowych/ odpowiadające rejestrom argumentów. W rejestrach adresowych przechowywane są adresy miejsc pamięci, w których umieszczone są lub mają być informacje umieszczane lub przechowywane w rejestrach argumentów.
- Rejestry indeksów /osiem rejestrów 18-bitowych/ służące do przechowywania indeksów, za pomocą których możliwa jest modyfikacja adresów rozkazów. Rejestry te nie posiadają bezpośrednich powiązań z pamięcią centralną.

Jeden z rejestrów argumentów oraz z rejestrów adresowych służą jako rejestry notatnikowe do natychmiastowych wyników. Zawartość jednego z rejestrów indeksów jest ustalona i równa zeru.

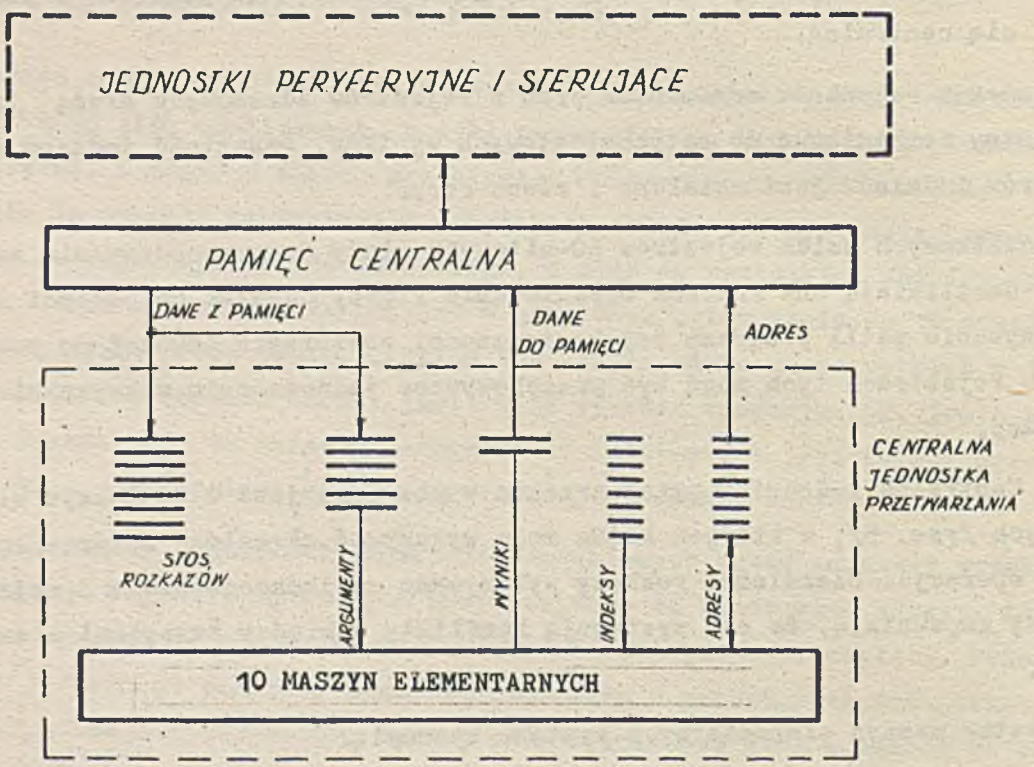
Dodatkowych osiem rejestrów 60-bitowych służy do przechowywania rozkazów. Umożliwiają one znaczne ograniczenie liczby odwołań do pamięci oraz wykonywanie pętli programu bez konieczności powtórnych odwołań do pamięci. W rejestrach tych mogą być przechowywane jednocześnie maksymalnie 32 rozkazy.

Centralna jednostka przetwarzania wyposażona jest w 10 maszyn elementarnych /rys. 5/, z których każda może wykonywać określony zbiór specyficznych operacji. Niezależne rozkazy wykonywane są jednocześnie a specjalne układy zapewniają, że nie występują konflikty pomiędzy maszynami elementarnymi.

Zestaw maszyn elementarnych systemu stanowią:

- 2 maszyny do indeksowania, wykonujące operację dodawania i odejmowania liczb 18-bitowych,
- 1 maszyna operacji typu skocz,
- 1 maszyna do dodawania, wykonująca dodawanie i odejmowanie liczb zmiennoprzecinkowych,

- 1 maszyna do dodawania długiego, wykonująca dodawanie i odejmowanie liczb stałoprzecinkowych,
- 1 maszyna do przesuwania, wykonująca operacje przesunięć arytmetycznych i cyklicznych, normalizacji, pakowania i rozpakowywania liczb zmiennoprzecinkowych,
- 2 maszyny do mnożenia, wykonujące mnożenie liczb zmiennoprzecinkowych,
- 1 maszyna do dzielenia, wykonująca dzielenie liczb zmiennoprzecinkowych
- 1 maszyna do operacji logicznych, wykonująca operację przesłań, iloczynu i sumy logicznej oraz różnicy symetrycznej.



Rys. 5. Schemat blokowy centralnej jednostki przetwarzania modeli 6600 i 6800 serii CDC 6000

Literatura

[1] JEVRIENOV E.V., KOSARJEV Ju. G.: O vozmožnosti postrojenija vyčislitel´nych sistem vysokoj proizvoditel´nosti SO izd-va AN SSSR, 1962.

[2] UNGER S.H.: A Computer Oriented Towards Spatial Problems. Proc. IEE, 1958, 48, No 10.

[3] SLOTNIC D.L. and oth.: The SOLOMON Computer. Proc. EJCC, 1962, pp. 97-107.

[4] GREGORI J., REYNOLDS M.R.: The SOLOMON Computers. IEEE Tran. EC, 1963, No 6, pp. 774-781.

[5] Vyčislitelnye mašiny /SEAK i DYSEAK/ Mašgiz. Moskva 1958.

[6] ANDERSON D.W., and oth.: The IBM System/360 Model 91: Machine Philosophy and Instruction Handling. IBM J. Res. Develop., 1967, 11, No 1, pp. 9-24.

[7] BOLAND L.J. and oth.: The IBM System/360 Model 91; Storage System. IBM J. Res. and Develop., 1967, 11, No 1, pp. 54-68.

[8] Control Data 600 Series Compute Systems - Reference Manual. Publ. CDC No 60100000, 1965.

Mgr inż. Andrzej ZIEMKIEWICZ
Zakład Organizacji Maszyn Cyfrowych IMM

681.327.66:681.322

SYSTEMY EMC Z PUNKTU WIDZENIA SZYBKICH PAMIĘCI

1. Wstęp

Firmy produkujące maszyny cyfrowe w walce o rynki zbytu dążą do tego, aby ich modele posiadały możliwie niski stosunek kosztów do efektywności. Prowadzi to zarówno do maszyn małych i tanich, jak również do maszyn drogich, ale charakteryzujących się wysoką wydajnością. Ponieważ zakres potrzeb użytkowników jest bardzo szeroki, powstały rodziny maszyn posiadających jednakową organizację logiczną i system programowania, ale różniących się znacznie parametrami technicznymi.

Przeprowadzimy analizę parametrów maszyn należących do większości najbardziej rozpowszechnionych rodzin, to jest IBM System/360, Honeywell 200, ICL System 4, RCA Spectra 70, Burroughs Seria 500, ICT 1900 oraz CDC 6000.

Pamięci stosowane w maszynach należących do tych rodzin można podzielić na kilka typów:

a. Pamięci operacyjne posiadające operacje: zapis, odczyt oraz odczyt, czekanie, zapis. Pamięci te posiadają konstrukcję modułową pozwalającą na łatwą rozbudowę. Ich parametry techniczne zawierają się w bardzo szerokich granicach.

b. Pamięci lokalne służące jako rejestry i miejsca robocze, o krótkim czasie cyklu i małych pojemnościach, posiadające operacje zapisu i odczytu.

c. Pamięci sterujące posiadające operację odczytu /i ew. możliwość zmiany zawartości przez obsługę konserwatorską/, o pojemnościach rzędu kilku tysięcy słów i krótkich czasach cyklu.

Omówimy najważniejsze parametry techniczne tych pamięci, tzn. czas cyklu, długość słowa i pojemność, oraz związek tych parametrów z organizacją maszyn.

2. Czas cyklu i długość słowa pamięciowego

Współczesne rodziny maszyn posiadają obszerne listy rozkazów, zawierające rozkazy arytmetyczne stało- i zmiennoprzecinkowe, operacje logiczne, działania arytmetyki dziesiętnej oraz rozkazy specjalizowane do przetwarzania danych alfanumerycznych. Działania arytmetyki dziesiętnej i rozkazy do przetwarzania danych wykonywane są zazwyczaj na argumentach o zmiennej długości.

Umożliwia to stosowanie pamięci operacyjnych o różnych długościach słowa w poszczególnych modelach każdej rodziny maszyn /Tabela 1/.

W najmniejszych modelach głównym celem jest osiągnięcie jak najniższej ceny. Pamięci w tych maszynach mają więc krótkie słowo, zwykłe długości jednego byte'u /8-bitowego/. Wykonanie operacji realizowane jest jako ciąg działań na 8-bitowych częściach argumentów.

Przy działaniach służących do przetwarzania danych powoduje to w zasadzie tylko wydłużenie czasu wykonania, natomiast dla działań arytmetycznych stanowi poważną komplikację sterowania. Firmy często rozwiązują ten problem w taki sposób, że najmniejsze modele w standartowym wykonaniu wyposażają tylko w podzbiór listy rozkazów dla przetwarzania danych, a urządzenie dla obliczeń numerycznych dołączają za dopłatą na specjalne zamówienie.

Modele te charakteryzuje mała szybkość działania, co wynika z ich organizacji logicznej, m.in. krótkie słowo pamięciowe i krótki arytmometr powodują, że każdy rozkaz wymaga wykonania długiej sekwencji czynności. Stosowanie w nich bardzo szybkiej pamięci byłoby więc niecelowe. Z tego powodu, a także ze względu na cenę stosowane pamięci mają cykl nie krótszy niż 2-2,5 μs.

W modelach średniej wielkości wzrost wydajności osiągany jest głównie na drodze technicznej poprzez zastosowanie środków nie powodujących zbytniego wzrostu kosztów. Cykl pamięci zostaje skrócony do około 1 μs, a słowo pamięciowe wydłużone tak, aby miało długość równą długości słowa maszynowego. Pozwala to oprócz zwiększenia szybkości na znaczne uproszczenie sterowania rozkazami stałego i zmiennego przecinka.

Osiągnięcie cyklu pamięciowego poniżej 1 μs, szczególnie w modułach o dużej pojemności, nastręcza poważne trudności techniczne i znacznie podwyższa koszty. W rezultacie pamięci tego rodzaju są stosowane przez firmy najbardziej zaawansowane technicznie i to tylko w największych modelach. Czasy cyklów pamięci w dużych modelach różnych firm są zbliżone i przeważnie mieszczą się w granicach pomiędzy 0,7 a 0,9 μs /podawany w prospektach reklamowych dla modelu Honeywell 4200 czas 188 ns/znak jest w rzeczywistości czasem 0,75 μs na słowo o długości 4 znaków/.

Monolityczna technika tranzystorowa o osiąganych czasach propagacji rzędu 2-5 ns i małych gabarytach pozwala na stosowanie w dużych modelach bardzo szybkich i złożonych arytmometrów i innych jednostek wykonawczych, o średnim czasie wykonania operacji krótszym od 100 ns. Efektywny czas dostępu do pamięci staje się więc parametrem limitującym wydajność maszyny.

Dalsze skrócenie cyklu pamięci napotyka na duże trudności techniczne, a ponadto powoduje wzrost kosztów niewspółmiernie duży w stosunku do przyśpieszenia. Możliwe jest natomiast skrócenie średniego czasu dostępu do pamięci metodami organizacyjnymi. Przede wszystkim stosowane jest dalsze wydłużenie słowa pamięciowego, które zazwyczaj osiąga podwójną długość słowa maszynowego.

Niezależnie od tego stosowane jest równoczesne wybieranie bloków pamięci i odpowiedni system adresowania, równoczesne pobieranie i wykonywanie kilku rozkazów oraz praca w systemach wielomaszynowych.

3. Pojemność modułów pamięci

Stosowane moduły pamięci znacznie różnią się pojemnością, nie tylko w ramach rodziny maszyn, ale również pomiędzy różnymi wykonaniami tego samego modelu. Typowe pojemności modułów podaje Tabela 1.

Względy ekonomiczne spowodowały, że w mniejszych modelach prawie wszystkich rodzin maszyn pamięć stanowi wspólny moduł z częścią centralną i nie jest przystosowana do rozbudowywania. Dla umożliwienia użytkownikowi dobrania konfiguracji systemu w sposób najbardziej dogodny każdy model posiada kilka wykonań różniących się pojemnością wbudowanej pamięci. Pojemność ta zawiera się w bardzo szerokich granicach, dla małych modeli przeważnie od 2k do 64k bytes'ów.

Realizacja pamięci o dużych pojemnościach dla większych modeli osiągana jest przez poszczególne firmy różnymi sposobami. Na ogół zarysowują się dwie tendencje.

Pamięć o niezbyt dużej pojemności podstawowej rozbudowywana jest przez dołączanie potrzebnej liczby standartowych modułów o pojemności nie przekraczającej 32k byte'ów /Burroughs, Honeywell/ lub też w modelu umieszczony zostaje jeden blok o odpowiedniej pojemności i wówczas model może posiadać kilka wykonań /jak przy małych modelach/.

Od strony realizacyjnej obie powyższe metody posiadają pewne zalety. Rozbudowa pamięci większą liczbą niedużych modułów zwiększa efektywność równoczesnego wybierania bloków, natomiast wbudowanie pamięci o ustalonej pojemności pozwala uniknąć trudności związanych z interface'm pomiędzy częścią centralną a pamięcią oraz z zagadnieniami synchronizacji czasowej występującymi przy pracy wielu modułów połączonych wspólnymi szynami.

Firmy najbardziej zaawansowane technicznie /np. IBM/ stosują rozwiązanie kompromisowe, zestawiając pamięć większych modeli z modułów standartowych, ale o dużej pojemności.

Efektywne wykorzystanie wielkich modeli wymaga stosowania systemów wielodostępnych i wielomaszynowych. Wiąże się to z koniecznością stosowania bardzo dużych pamięci. Firmy IBM i CDC używają jako pamięci pomocniczej modułów szybkiej pamięci o pojemnościach powyżej miliona byte'ów /zob. Tabela 1/.

4. Pamięci lokalne

Stosowane systemy maszyn posiadają dużą ilość rejestrów dostępnych programowo i dużą ilość stałych miejsc systemu operacyjnego. W wielu maszynach do przechowywania tych informacji używana jest tzw. pamięć lokalna, czyli bardzo szybka pamięć o małej pojemności /Tabela 2/.

W najmniejszych modelach często wykorzystuje się część pamięci operacyjnej jako pamięć lokalną. W średnich modelach jest to mała pamięć /np. na warstwach cienkich/ pozwalająca uzyskać czasy cyklu 1-0,25 μs. Dla efektywnego wykorzystania pamięci operacyjnej okazało się konieczne, aby cykl pamięci lokalnej był nie większy niż 0,2-0,25 cyklu pamięci operacyjnej. W dużych modelach nie stosuje się pamięci lokalnych, ponieważ osiągane czasy cykli pamięci cienkowarstwowych rzędu 0,2 μs byłyby

dłuższe niż czas wykonywania operacji w arytmometrze. W modelach tych jako pamięć lokalna używana jest duża ilość rejestrów półprzewodnikowych.

5. Pamięci stałe

Współczesne maszyny posiadają silne i obszerne listy rozkazów zawierające grupy rozkazów dotyczące różnych arytmetyk itp. Wysterowanie dużej liczby złożonych i różnorodnych rozkazów pochłania dużo sprzętu i jest bardzo kosztowne. Dla zmniejszenia kosztów w wielu maszynach stosowane jest sterowanie mikrorozkazowe przy pomocy mikroprogramów zapisanych w sposób trwały w specjalnej pamięci /Tabela 3/. Cykl pracy tej pamięci wyznacza takty wykonywania operacji w jednostce przetwarzającej.

Ponieważ najkrótsze rozkazy wykonuje się zwykle w trzech taktach, dla właściwego wykorzystania pamięci operacyjnej jest konieczne, aby cykl pamięci sterującej nie przekraczał 0,25-0,3 cyklu pamięci operacyjnej.

Sterowanie mikrorozkazowe stosowane jest w modelach małych i średnich. Sterowanie wykonywaniem operacji przez pamięć wprowadza ścisły synchronizm w jednostce przetwarzającej. Zastosowanie taktów wykonywania operacji o stałym czasie trwania wymaga dostosowania tego czasu do najdłuższego mikrorozkazu, co związane jest że stratami czasu dla pozostałych mikrorozkazów, natomiast zastosowanie taktów o różnych czasach trwania byłoby niezmiernie trudne w dużych modelach ze względu na stosowaną w nich równoległość wielu różnych czynności.

W dużych modelach stosowane jest więc sterowanie klasyczne za pomocą półprzewodnikowych funktorów logicznych.

Pojemność pamięci stałej zależy od ilości operacji wykonywanych w jednostce przetwarzającej, na przykład w modelach IBM Systemu 360 waha się od około 2800 do 8000 słów. Warto zauważyć, że większa pamięć potrzebna jest w mniejszych modelach, które posiadają krótki arytmometr i co za tym idzie, bardziej skomplikowane sterowanie operacjami. Duża część pamięci stałej przeznaczona jest jednak na wysterowanie operacji kontrolnych i diagnostycznych. Pojemność pamięci potrzebną do wysterowania operacji związanych z listą rozkazów można oszacować dla średnich modeli na 1024 do 2048 słów.

Pamięć sterująca może być w zasadzie pamięcią o trwałym zapisie z możliwością wykonywania tylko operacji odczytu. Istnieje jednak tendencja

do budowania pamięci sterujących z możliwością zmiany zawartości przez obsługę konserwatorską. Umożliwia to wbudowanie emulatorów, extra-kodów, zbioru standartowych podprogramów itp., dobieranych indywidualnie dla użytkownika.

Tabela 1. Pamięci operacyjne

Rodzina	Model	Cykl [µs]	Długość słowa [byte'ów][1]	Pojemność modułu [byte'ów]	U w a g i
1	2	3	4	5	6
IBM/360	30	1,5[2]	1	8-64 k[3]	[1] Bez bitów parzystości.
	40	2,5	2	16-128 k[3]	[2] We wczesnych egzemplarzach 2 µs.
	44	1	4	32-256 k[3]	[3] Pamięć stanowi wraz z częścią centralną wspólny moduł.
	50	2	4	64-512 k[3]	
	60	2	8	128-512 k	[4] Standartowy moduł pamięci dla modeli 65 i wyższych.
	62	1	8	128-512 k	
	2365[4]	0,75	8	128 k	[5] Wykonanie przeznaczone dla modelu 65.
	Mod. 1[5]	0,75	8	128 k	[6] Wykonanie przeznaczone dla modelu 75, zrealizowane jako moduł złożony z dwóch bloków o niezależnym wybieraniu.
	Mod. 2[5]	0,75	8	256 k	
	Mod. 3[6]	0,75	8	256 k	[7] Standartowy moduł b. dużej pojemności dla modeli 50 i wyższych.
	2361[7]				
	Mod. 1	8	8	1024	[8] Wykonanie przeznaczone dla modelu 91. Dołączony jest zestaw złożony z 4 bloków.
	Mod. 2	8	8	2048 k	
	Mod. 4[8]	8	8	256 k	[9] Moduł przeznaczony dla modelu 91.
	2395[9]				
	Mod. 1	0,78	8	2048 k	
	Mod. 2	0,78	8	4096 k	

1	2	3	4	5	6
Honey-well 200	120	3	1[1]	2 k[2]	[1] Znaków 6-bitowych, bez znaku słowa, bez znaku paragrafu.
	200	2	1[1]	4 k[2]	
	1200	1,5	1[1]	16 k[2]	[2] Rozszerzanie pamięci za pomocą modułów o pojemności takiej samej lub dwa razy mniejszej niż pojemność podstawowa
	2200	1	1[1]	16 k[2]	
	4200	0,75	4[1]	64 k[2]	
EELM System 4	10	1,5	1	4–16 k[1]	[1] Pamięć stanowi wspólny moduł z częścią centralną.
	30	1,5	2	16–64 k[1]	
	50	1,4	2	16–256 k[2]	[2] Pamięć o pojemności większej niż 64 k stanowi dwie lub trzy standartowe szafy.
	70	1	4	64–1024 k[2]	
RCA Spectra 70	15	2	1	4–8 k[1]	[1] Pamięć stanowi wspólny moduł z częścią centralną
	25	1,5	4	16–64 k	
	35	1,44	2	16–64 k	
	45	1,44	2	16–256 k	
	55	0,84	4	64–512 k	
Burroughs	B 2500[1]	2	2	20 k	[1] Rozszerzanie pamięci modułami po 10 k.
	B 3500[1]	1	2	20 k	[2] Standartowe moduły przewidziane dla modelu B 5500.
	460[2]	6	6	4 k	
	461[2]	4	6	4 k	

1	2	3	4	5	6
ICT 1900	1900	6	3	4–16 k	[1] Przy maksymalnej pojemności ulega wydłużeniu do 2,25 lub 1,25 µs odpowiednio.
	1902	6	3	4–16 k	
	1903	2	3	8–32 k	
	1904	2	3	16–32 k	
	1905	2	3	16–32 k	
	1906	2 lub 1[1]	3	32–256 k	
	1907	2 lub 1[1]	3	32–256 k	
CDC 6000	6400	1	60[1]		[1] bitów /bez bitów parzystości/.
	6600	0,25	60[1]		[2] oraz dodatkowa pamięć o cyklu 1 µs i pojemności 1024 k słów 60-bitowych.
	6800	0,25	60[1]		

Tabela 2. Pamięci lokalne

Rodzina	Model	Cykl /µs/	Długość słowa /byte'ów/	Pojemność /słów/	Uwagi
IBM/360	30[1]	2	1	512	[1] Stanowi część PAO.
	40	1,25	2	144	[2] Na żądanie zamieniana na rejestry półprzewodnikowe.
	44[2]	0,25	4	25	
	50	0,5	4	64	[3] Rejestry półprzewodnikowe.
	60/62[3] i wyższe	0,125	4	25	
Honeywell	modele 120–4200				Do 56 rejestrów półprzewodnikowych o długościach zależnych od pojemności pamięci.
ICL, System 4	50, 70	0,3	4		
RCA Spectra 70	45,55	0,3	4	128	

Tabela 3. .Pamięci stałe

Rodzina	Model	Cykl /µs/	Długość słowa /bitów/	Pojemność /słów/	Uwagi
IBM/360	30	1	64	8000	Pojemnościowa
	40	0,625	54	4096	Transformatorowa
	50	0,5	90	2816	Pojemnościowa
	60/62	0,25	100	2816	Pojemnościowa
	65	0,2			Pojemnościowa
RCA	35	0,48	54	1024	
Spectra 70	45	0,48	54	2048	

Dr inż. Zygmunt SAWICKI
Zakład Technologii Specjalnych IMM

681.327,66:621.317.799

BADANIA PŁATÓW PAMIĘCI NA DRUTACH MAGNETYCZNYCH

1. Wstęp

Pamięci na drutach magnetycznych mają coraz szersze zastosowanie w nowoczesnych maszynach cyfrowych [2]. Zasady ich pracy zostały opisane w szeregu publikacji /m.in. w[3], [4] /. Podobnie jak w przypadku innych urządzeń poziom niezawodności tych pamięci zależy od dokładności kontroli w trakcie produkcji ich zespołów, a w szczególności drutów magnetycznych i płatów. Metodom pomiarowym samych drutów poświęcona jest praca [1]. W niniejszym opracowaniu omówimy badania płatów, mające na celu wykrycie wszystkich elementów nie spełniających określonych granic parametrów.

Miarą jakości płatu pamięci jest przede wszystkim określony stosunek amplitudy sygnałów odczytu do poziomu zakłóceń uzyskiwany w najgorszych warunkach pracy. Stosunek ten zależy od szeregu czynników, takich jak:

- parametry drutów magnetycznych,
- konstrukcja płatu,
- parametry impulsów prądu w liniach słów i liniach bitowych,
- warunki zewnętrzne: klimatyczne i mechaniczne.

Uwzględniając wpływ niektórych z tych czynników, przedstawimy w kolejnych rozdziałach:

- charakterystyki dynamiczne płatu pamięci na drutach magnetycznych,
- impulsowy program testowy symulujący najgorszy przypadek pracy elementu pamięciowego,
- kryterium oceny komórki w płacie,
- ogólne wymagania w stosunku do aparatury pomiarowej.

2. Charakterystyki dynamiczne płatu pamięci

Jak wiadomo z wcześniejszych opracowań, m.in. [2], [3], obszary komórek jednobitowych wyznaczane są przez krzyżujące się linie słów i linie bitowe. Gęstość upakowania tych linii na jednostkę powierzchni płatu zależy od szeregu czynników ograniczających. Najsilniejsze i decydujące ograniczenie wynika ze szkodliwego oddziaływania na dany element pamięciowy pól magnetycznych od sąsiednich linii słów. Oddziaływanie to jest znane pod nazwą "pełzanie" /creep/. Polega ono na tym, że element pamięciowy poddany wielokrotnemu działaniu pola magnetycznego jest przemagnesowywany na coraz dłuższym odcinku drutu magnetycznego w miarę wzrostu ilości impulsów, przy czym zasięg obszaru przemagnesowywanego zbliża się asymptotycznie do pewnej stałej wartości. Stąd bierze się wymaganie, aby przy projektowaniu pamięci przyjmować taką długość odcinka dla jednego bitu, której nie przekroczyłby obszar przemagnesowywanej warstwy dla dowolnej ilości impulsów wzbudzających.

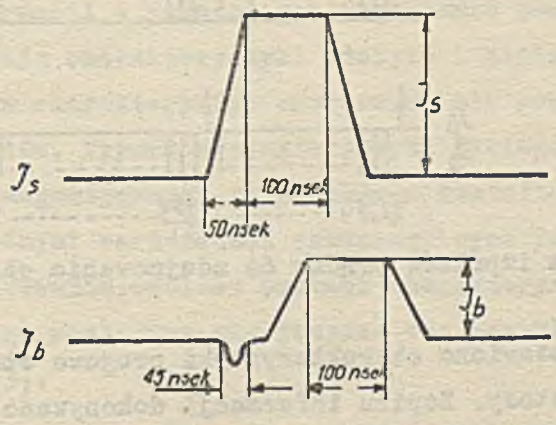
Długość odcinka drutu magnetycznego odpowiadającego jednemu bitowi zależy od średnicy drutu magnetycznego, grubości warstwy, rozkładu wzbudzającego pola magnetycznego i właściwości magnetycznych warstwy. Oczywiście pożądane jest, aby średnica drutu magnetycznego i grubość warstwy magnetycznej były jak najmniejsze. Obecnie stosowane druty mają średnice od 0,1 do 0,3 mm, a grubość warstwy od 0,5 do kilku mikronów. Dla przykładu w tabeli 1 podano parametry drutu magnetycznego z warstwą permalojową produkcji firmy TOKO /Japonia/.

Tabela 1

Średnica drutu /mm/	Grubość warstwy /µm/	Długość odcinka jednobitowego /mm/
0,2	2,1	2,0
0,2	0,7	1,0

Wszystkie odcinki drutu magnetycznego odpowiadające komórkom jednobitowym podlegają szkodliwemu oddziaływaniu nie tylko pola magnetycznego sąsiednich linii słów, lecz także pola magnetycznego linii bitowej dzia-

łającego w czasie zapisu. Pewną miarą odporności komórki pamięciowej na te zakłócenia są tzw. krzywe progowe /disturb threshold curves/. Wyznaczanie tych charakterystyk odbywa się poza płatem pamięci w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy badanej warstwy. Omówimy je, posługując się przykładem zaczerpniętym z badań japońskich [3]. W danym elemencie pamięciowym zostaje zapisana informacja jednobitowa pod wpływem działania jednorazowego impulsu I_s w linii słowa i impulsu I_b w linii bitowej. Zależności czasowe i charakterystyczne parametry tych impulsów są przedstawione na rys. 1.



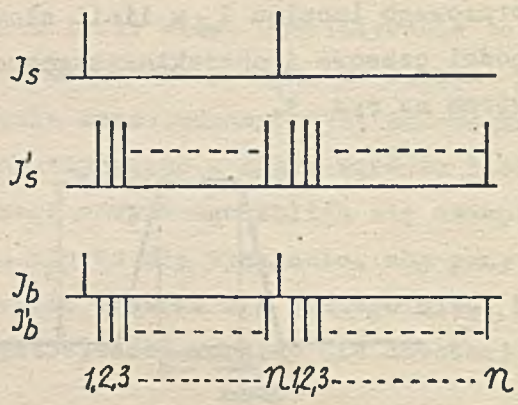
Rys. 1. Parametry i wzajemne położenie impulsów I_s i I_b

W czasie zapisu impulsy I_s i I_b całkowicie nasycają warstwę magnetyczną na pewnym odcinku. Odcinek ten zostaje z kolei poddany działaniu zewnętrznych pól magnetycznych, powodujących zmniejszanie się i w pewnej chwili zmianę kierunku wektora magnetyzacji. Pola magnetyczne są wytwarzane przez impulsy I_s' i I_b' /rys. 2/, o regulowanej amplitudzie i polaryzacji odpowiednio zgodnej z I_s i przeciwnej do I_b. Wartości progowe tych impulsów odpowiadają zerowej wartości aproksymowanego sygnału odczytu. Harmonogram ciągów impulsów I_s i I_b oraz I_s' i I_b' przedstawia rys. 2, przy czym wzajemne położenie impulsów jest zgodne z rys. 1.

Powyższą metodą bada się odcinek drutu magnetycznego o długości 8 mm, średnicy 0,2 mm i grubości warstwy 2,1 μm, włożony w otwór 60-zwojowego solenoidu o długości około 8 mm i średnicy wewnętrznej 0,35 mm, wykonanego izolowanym drutem o średnicy 0,07 mm. Przez solenoid płyną w odpowiednich przedziałach czasu impulsy prądu I_s', a przez badany odcinek drutu impulsy I_b i I_b'. Pośrodku solenoidu na jego obwodzie znajduje się uzwo-

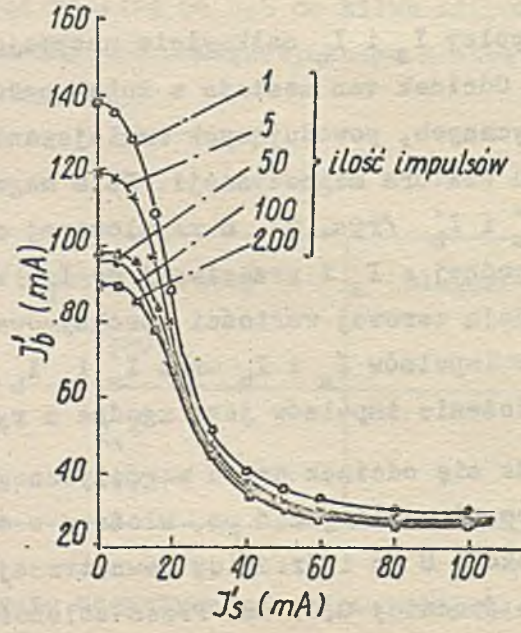
jenie dwuzwojowe wykonane drutem o średnicy 0,07 mm, symulujące linię słowa, przez którą w czasie zapisu i odczytu płynie impuls prądu I_s.

Dzięki zastosowaniu odpowiednio długiego solenoidu w stosunku do długości elementu pamięciowego stwarza się znacznie surowsze warunki zakłócania tego elementu niż to występuje w rzeczywistych warunkach pracy.



Rys. 2. Harmonogram impulsów prądów do zdejmowania charakterystyki progowej

Na rys. 3 przedstawiono charakterystyki progowe otrzymane przy zastosowaniu opisanej metody. Zapisu informacji dokonywano impulsami I_s = 0,5A i I_b = 50 mA.



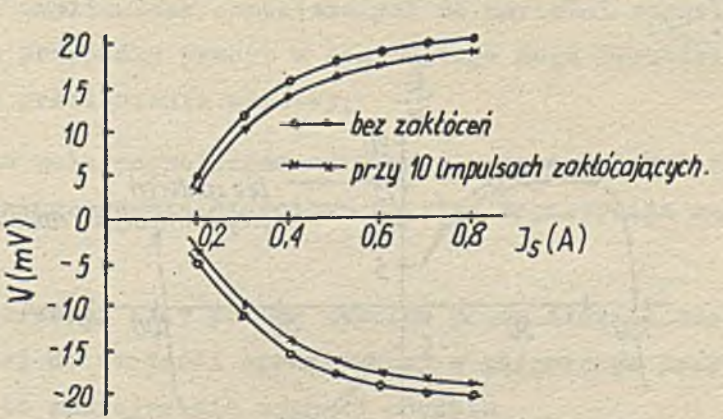
Rys. 3. Charakterystyki progowe drutu magnetycznego mm, grubość warstwy 2,1 µm/

Z rysunku wynika, że ten sam efekt może być wywołany większą ilością impulsów przy odpowiednio mniejszej amplitudzie. Jednakże przy amplitudach I_b' mniejszych od 50 mA wpływ ten prawie zanika, a impulsy prądu I_b' o amplitudzie I_b mniejszej od 25 mA praktycznie nie mają wpływu na wartość progową I_s'. Ma to duże znaczenie z punktu widzenia odporności elementów pamięciowych na szkodliwy wpływ impulsów zakłócających.

Jak widać z powyższego, przedstawiona metoda oceny elementów pamięciowych na podstawie charakterystyk progowych może dostarczyć cennych danych porównawczych dla konstrukcji płatu pamięci.

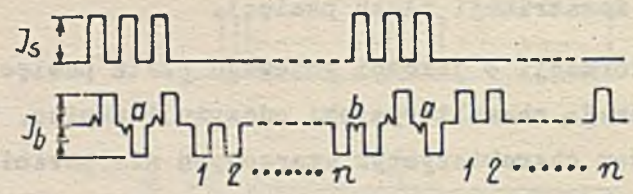
Dodatkowych informacji o jakości gotowego płatu pamięci na drutach magnetycznych dostarczają charakterystyki odczytu i zapisu. Rozrzut tych charakterystyk względem charakterystyk wzorcowych nie powinien być większy od założonych przedziałów. Typowe charakterystyki jakiegokolwiek typu płatu pamięci na drutach magnetycznych są podobnego kształtu, natomiast mogą różnić się bezwzględnymi wartościami poszczególnych porównywanych parametrów. W celu zilustrowania ogólnej postaci charakterystyk odczytu i zapisu elementu pamięciowego posłużymy się jeszcze raz przykładem pamięci japońskiej firmy TOKO [3].

Zarówno charakterystyki odczytu /rys. 4/ jak i zapisu /rys. 6/ zostały zdjęte przy pomocy standartowych ciągów impulsów testujących I_s i I_b, przedstawionych na rys. 5 i o wzajemnym położeniu w czasie określonym na rys. 1.



Rys. 4. Charakterystyka odczytu elementu pamięciowego na drucie magnetycznym

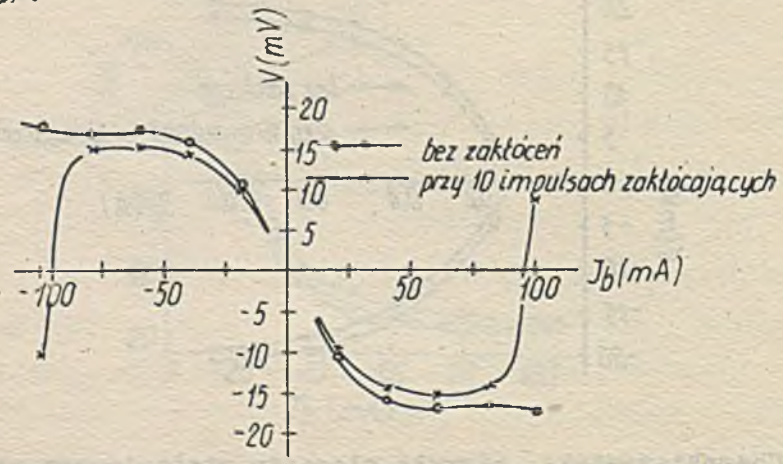
Charakterystyka odczytu /rys. 4/ została zdjęta po dokonaniu zapisu prądem I_b = 50 mA i I_s = 0,5 A. Widzimy, że amplituda odczytywanego sygnału V rośnie ze wzrostem amplitudy impulsów I_s w linii słowa, co tłumaczy się większym odchyleniem wektora magnetyzacji przy coraz to większym natężeniu impulsu I_s. Krzywa oznaczona kółeczkami została zdjęta przy braku impulsów zakłócających $-I_b$ /na rys. 5 oznaczonych 1,2,... n/, natomiast krzywa oznaczona krzyżykami-po serii impulsów zakłócających $-I_b$.



Rys. 5. Harmonogram ciągów impulsów I_s i I_b do zdejmowania charakterystyk odczytu i zapisu

Sygnał wyjściowy V mierzony jest w punkcie a zaraz po zapisie, a w punkcie b po serii impulsów zakłócających. Zakłócenia powodują malenie remanencji magnetycznej warstwy, w konsekwencji czego sygnał wyjściowy również maleje.

Na rys. 6 przedstawiono charakterystykę zapisu przy stałej amplitudzie I_s = 0,5 A i amplitudzie I_b regulowanej od kilkunastu do 100 mA. Krzywa oznaczona kółeczkami została zdjęta przy braku impulsów zakłócających, natomiast krzywa oznaczona krzyżykami-po serii impulsów zakłócających /zgodnie z rys. 5/.



Rys. 6. Charakterystyka zapisu elementu pamięciowego na drucie magnetycznym

Należy zwrócić uwagę na stałość amplitudy sygnału V w stosunkowo dużym zakresie zmian amplitudy impulsów I_b w linii bitowej. Początek tego zakresu określony jest w punkcie, w którym wartość amplitudy prądu zapisu I_b jest na tyle duża, że zaczyna wprowadzać warstwę magnetyczną w nasycenie. Koniec zakresu występuje w punkcie, w którym wartość amplitudy impulsów zakłócających $-I_b$ zaczyna powodować rozmagnesowywanie warstwy. Stałość amplitudy sygnału wyjściowego V dla znacznych zmian prądu I_b stanowi cenną zaletę pamięci na drutach magnetycznych.

3. Impulsowy program testowy

Omówione wyżej charakterystyki ilustrują nominalne parametry płatu w nominalnych warunkach pracy. W szczególności jednak trzeba wykryć w płacie elementy pamięciowe, które w najgorszych przypadkach pracy mogą powodować błędy w zapamiętanej informacji. W celu zidentyfikowania takich elementów stosuje się odpowiednie testy w postaci ciągów impulsów odczytu i zapisu, które obejmują wszystkie szkodliwe zjawiska występujące w płacie w czasie normalnej pracy. W szczególności uwzględnia się:

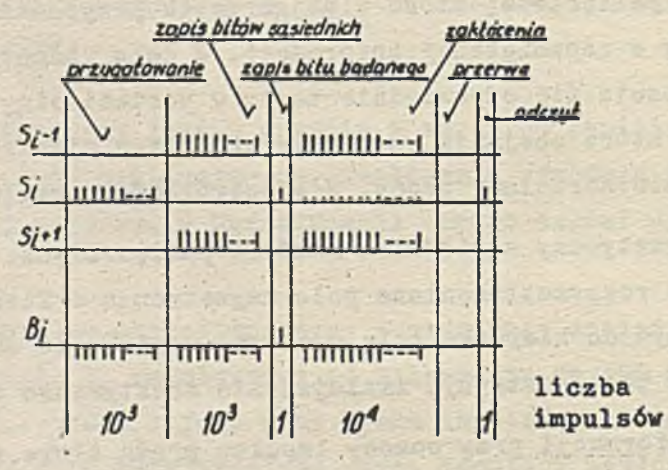
- stan magnetyczny sąsiednich komórek pamięciowych, które mają maksymalnie rozprzestrzenione pole magnetyczne o kierunku działania przeciwnym do kierunku pola w czasie zapisu; na skutek oddziaływania tego pola następuje zmniejszenie efektywnego pola zapisu;
- zapis informacji przy pomocy impulsu prądu słowa i impulsów prądów bitowych o amplitudach zmniejszonych do wartości spodziewanych w najgorszym przypadku pracy; w wyniku tego mogą zachodzić przypadki niepełnego przełączenia warstwy;
- rozproszone pola magnetyczne od prądów w sąsiednich liniach słów; pola te rozmagnesowują częściowo warstwę magnetyczną sąsiednich komórek;
- odczyt informacji przy pomocy impulsu prądu słowa o amplitudzie zmniejszonej do wartości spodziewanej w najgorszym przypadku pracy; spowoduje to zmniejszenie sygnału odczytu.

W najgorszym przypadku wymienione zdarzenia mogą wystąpić w jednym cyklu pracy komórki pamięciowej. Jeżeli jednocześnie komórka ta ma pewne parametry o wartościach granicznych lub poniżej granicznych, wtedy

odczytany sygnał będzie posiadał amplitudę o wartości granicznej lub poniżej tej wartości. Oczywiście taka komórka musi być wykryta w płacie i następnie wyeliminowana.

Z powyższego wynika, że program testowy powinien posiadać zdolność symulowania takich właśnie warunków pracy i wykrywania wadliwych komórek w płatach pamięci. Program o tego rodzaju właściwościach przedstawiono na rys. 7. Składa się on z pięciu faz:

- z przygotowania,
- zapisu informacji w sąsiednich komórkach,
- zapisu informacji w komórce badanej,
- generowania zakłóceń,
- odczytu informacji z komórki badanej.



Rys. 7. Test impulsowy symulujący najgorszy przypadek pracy komórki w płacie pamięci

W fazie pierwszej wybrana komórka o współrzędnych S_i, B_j /S_i - linia słowa, i = 1,2,... N; B_j - linia bitowa, j = 1,2,...M/ jest magnesowana kolejno przez 10^3 impulsów zapisu /działających w koincydencji w liniach S_i i B_j/ w kierunku przeciwnym do stanu magnetyzacji, jaki będzie określony w fazie trzeciej. Taka operacja jest niezbędna w celu maksymalnego wydłużenia warstwy przemagnesowywanej komórki bitowej na skutek zjawiska pełzania oraz aby każdy mikroobszar warstwy komórki był zorientowany przeciwnie do orientacji, jaka wystąpi w czasie zapisu.

W fazie drugiej działa seria 10^3 impulsów w dwóch sąsiednich liniach słów S_{i-1} i S_{i+1} oraz w linii bitowej B_j /polaryzacja w B_j przeciwna

jak w fazie trzeciej/. Powodują one wielokrotny zapis informacji w komórkach sąsiadujących z komórką badaną /S_i, B_j/, maksymalnie rozszerzając namagnesowanie tych komórek, co ze względu na przeciwną orientację do orientacji jaka wystąpi w komórce badanej w fazie trzeciej może powodować zmniejszenie jej efektywnego pola. Wystąpi to wtedy, gdy na skutek zjawiska pełzania obszary sąsiednich komórek będą częściowo zachodzić na obszar komórki badanej.

W fazie trzeciej następuje zapis informacji w komórce badanej. Amplitudy impulsów w linii S_i i linii B_j są równe najmniejszej spodziewanej wartości w najgorszym przypadku pracy.

W fazie czwartej badaną komórkę poddaje się działaniu ciągów impulsów zakłócających, występujących w sąsiednich liniach słów S_{i-1} i S_{i+1} w koincydencji z impulsami w linii bitowej B_j /o polaryzacji jak w fazie drugiej/. Taki test jest "ostrzejszy" niż w przypadku zastosowania tylko jednej linii zakłócającej, ponieważ tutaj zjawisko pełzania występuje po obu stronach badanej komórki, co w najgorszym przypadku może powodować zmniejszanie się wartości jej remanencji magnetycznej. Liczbę impulsów zakłócających przyjmuje się kompromisowo. Badania wykazują, że zasadnicze zmiany związane z pełzaniem zachodzą przy pierwszych impulsach zakłócających i szybko maleją ze wzrostem liczby tych impulsów. Przy setnym impulsie są już minimalne, a przy milionowym praktycznie zanikają. Przyjęcie liczby impulsów zakłócających rzędu 10^4 jest uzasadnionym kompromisem między liczbami 10^2 a 10^6.

Dodatkowo, obok tego rodzaju zakłóceń, wprowadza się impulsy zakłócające w linię słowa, przenikającą badaną komórkę. Symulują one prądy wywoływane w tej linii za pośrednictwem pojemności i indukcyjności rozproszonych. Amplituda tych impulsów nie powinna być większa od 1/20 amplitudy nominalnej.

W fazie piątej następuje odczyt pojedynczym impulsem, przyłożonym do linii słowa S_i po upływie czasu potrzebnego do zaniku stanów przejściowych w poszczególnych liniach płatu. Impuls odczytu posiada amplitudę równą najmniejszej spodziewanej wartości w najgorszym przypadku pracy. Odczyt sygnału odbywa się w linii bitowej, skompensowanej i zamkniętej na końcu w taki sposób, aby wystąpiło minimalne odbicie impulsu wyjściowego.

Impulsowy program testowy opisany wyżej będzie stwarzał najgorszy przypadek pracy elementów pamięciowych, jak również najgorszy przypadek wa-

runków pracy pamięci, jeżeli założy się nie mniejszą jak $\pm \gamma$ % tolerancję amplitud impulsów w liniach słów i liniach bitowych podczas testowania, przy czym w czasie zapisu i odczytu prądy powinny być odpowiednio mniejsze od wartości nominalnych, a w czasie przygotowania i zakłóceń odpowiednio większe.

Na tej podstawie możemy sformułować kryterium oceny komórki pamięciowej w płacie. Oznaczmy przez V_n nominalny sygnał odczytu w nominalnych warunkach pracy, a przez V_d dopuszczalną dolną granicę tego sygnału. Z warunków pracy pamięci wynika potrzeba tylko jednostronnego ograniczenia od dołu dopuszczalnych odchyłek wartości sygnału odczytu od wartości nominalnej.

$$V_d = V_n - \Delta V = V_n \cdot \frac{V_n - \Delta V}{V_n} = V_n \cdot \varepsilon \qquad /1/$$

gdzie:

$$\varepsilon = \frac{V_n - \Delta V}{V_n} \qquad /2/$$

Kryterium oceny komórki pamięciowej wyrazimy w sposób następujący: komórka spełnia najgorsze warunki pracy, jeżeli odczytany z niej sygnał V_s w piątej fazie testowania jest nie mniejszy od V_d, w przeciwnym razie musi być uznana za wadliwą i wyeliminowana.

Biorąc pod uwagę dane doświadczalne w zakresie konstrukcji i produkcji pamięci ze stałym nośnikiem informacji, wydaje się być słuszne założenie, że współczynnik ε jest określony przez dwie wielkości, z których każda wyraża dopuszczalną granicę jego zmian w ramach określonej grupy przyczyn. Jest więc:

$$\varepsilon = \sigma_S \cdot \sigma_K, \quad \text{gdzie:}$$

σ_S - współczynnik dopuszczalnych granicznych zmian sygnału odczytu wywołanych zmianą amplitud impulsów sterujących o $\pm \gamma$ % w kierunkach niekorzystnych,

σ_K - współczynnik dopuszczalnych granicznych zmian sygnału wywołanych niejednorodnością parametrów komórek pamięciowych dla określonych warunków zewnętrznych.

$$v_d = \sigma_S \cdot \sigma_K \cdot v_n \qquad /3/$$

Współczynnik σ_K obejmuje zmiany parametrów komórek pamięciowych wywoływane niestałością warunków zewnętrznych, a w szczególności temperatury otoczenia badanego płatu. Jakkolwiek wpływ ten jest prawie o rząd mniejszy, jak np. w przypadku komórek na ferrytowych rdzeniach manganowych, to jednak podczas testowania płatów należy bezwarunkowo utrzymywać temperaturę w określonych granicach. Dla uzasadnienia tego wymagania można przytoczyć chociażby fakt, że w typowych komórkach na drutach magnetycznych, w celu utrzymania w przybliżeniu na stałym poziomie sygnału odczytu, trzeba zwiększać w linii bitowej prąd zapisu o około 0,4 mA na każdy $1^{\circ}C$ spadku temperatury otoczenia. Taka zależność jest wprawdzie słuszna tylko w pewnym zakresie temperatur, jak się jednak okazuje zgodnym z wymaganym zakresem temperatur w rzeczywistych warunkach pracy.

4. Wymagania na przyrząd do badania płatów pamięci

Praktyczne badania płatów pamięci, mające na celu wykrycie elementów, które w najgorszych warunkach pracy mogą powodować błędną interpretację informacji, przeprowadza się w dwóch etapach:

- pomiary zgrubne,
- pomiary dokładne.

Pomiary zgrubne wykonywane są stosunkowo szybko przy zastosowaniu uproszczonego impulsowego programu testowego, odpowiadającego schematycznie programowi omówionemu w rozdziale 3 i różniącego się jedynie ilością impulsów w poszczególnych fazach:

- 10 - przygotowanie,
- 10 - zapis informacji w sąsiednich komórkach,
- 1 - zapis informacji w komórce badanej,
- 100 - generowanie zakłóceń,
- 1 - odczyt.

Pomiary zgrubne mają za zadanie wykrycie wszystkich błędów montażu i wyraźnie złych komórek bitowych. Po wyeliminowaniu usterek przechodzi się do badań etapu drugiego.

Pomiary dokładne wykonywane są w pełnej zgodności z impulsowym programem testowym, przedstawionym na rys. 7. Polegają one na sprawdzeniu

wszystkich komórek na zgodność z kryterium amplitudowym. Przeprowadza się je dwukrotnie, raz zapisując "1", drugi raz "0". Komórki nie spełniające założonego kryterium wykrywane są przy pomocy układów progowych i decyzyjnych.

Obydwa rodzaje pomiarów przeprowadzane są przy pomocy tego samego przyrządu, a przejście od jednego z nich do drugiego powinno być możliwie proste. Przyrząd powinien zapewniać generację ciągów impulsów o parametrach i zależnościach /rys. 1/ występujących w normalnych warunkach pracy pamięci oraz umożliwiać ich regulację w odpowiednich zakresach. Dotyczy to w szczególności amplitudy impulsów, ich czasu narastania i trwania. Powinien być również zapewniony pomiar tych parametrów przy pomocy oscyloskopu.

Oczywiście przyrząd będzie wyposażony tylko w jeden zespół układów wzbudzających linie płatu oraz w jeden zespół układów pomiarowych, przełączanych elektronowo na kolejne linie słów i linie bitowe z szybkością występującą w rzeczywistych warunkach pracy pamięci.

Należy jeszcze dodać, że przyrząd tego rodzaju powinien umożliwiać:

- pracę ciągłą /bez zatrzymywania/, polegającą na sprawdzaniu kolejnych komórek płatu,
- automatyczne zatrzymywanie się w wypadku błędu i wyświetlanie współrzędnych błędnej komórki,
- ciągłe sprawdzanie dowolnej komórki.

5. Zakończenie

Niniejszy artykuł, przedstawiający metodę badań płatów pamięci, jest kolejnym opracowaniem mającym na celu ułatwienie szerszemu gronu inżynierów zapoznania się z problemami pamięci na drutach magnetycznych. Wydaje się, że opracowanie to może również stanowić znaczną pomoc w formułowaniu szczegółowych wymagań technicznych na urządzenia pomiarowe, a także w rozwiązaniu tych urządzeń.

Literatura

[1] Z. SAWICKI: Kryteria oceny i dynamiczne metody pomiarowe parametrów drutów magnetycznych. ETO Nowości, Nr 2/18/, 1968.

[2] Z. SAWICKI: Bloki nośnika informacji na drutach magnetycznych pamięci EMC. Biuletyn IMM Nowości Techniczne, Nr 3, 1967.

[3] H. MAEDA, A. MATSUSHITA: Woren Thin Film Wire Memories. Intermag Conf., 1964.

[4] E.W. PUGH, U.T. SHAHAN, W.T. SIEGLE: Device and Array Design for a 120-Nanosecond Magnetic Film Main Memory. IBM Journal, March 1967.

Mgr inż. Jan RYŹKO
Zakład Techniki Cyfrowej IMM

681.327.66

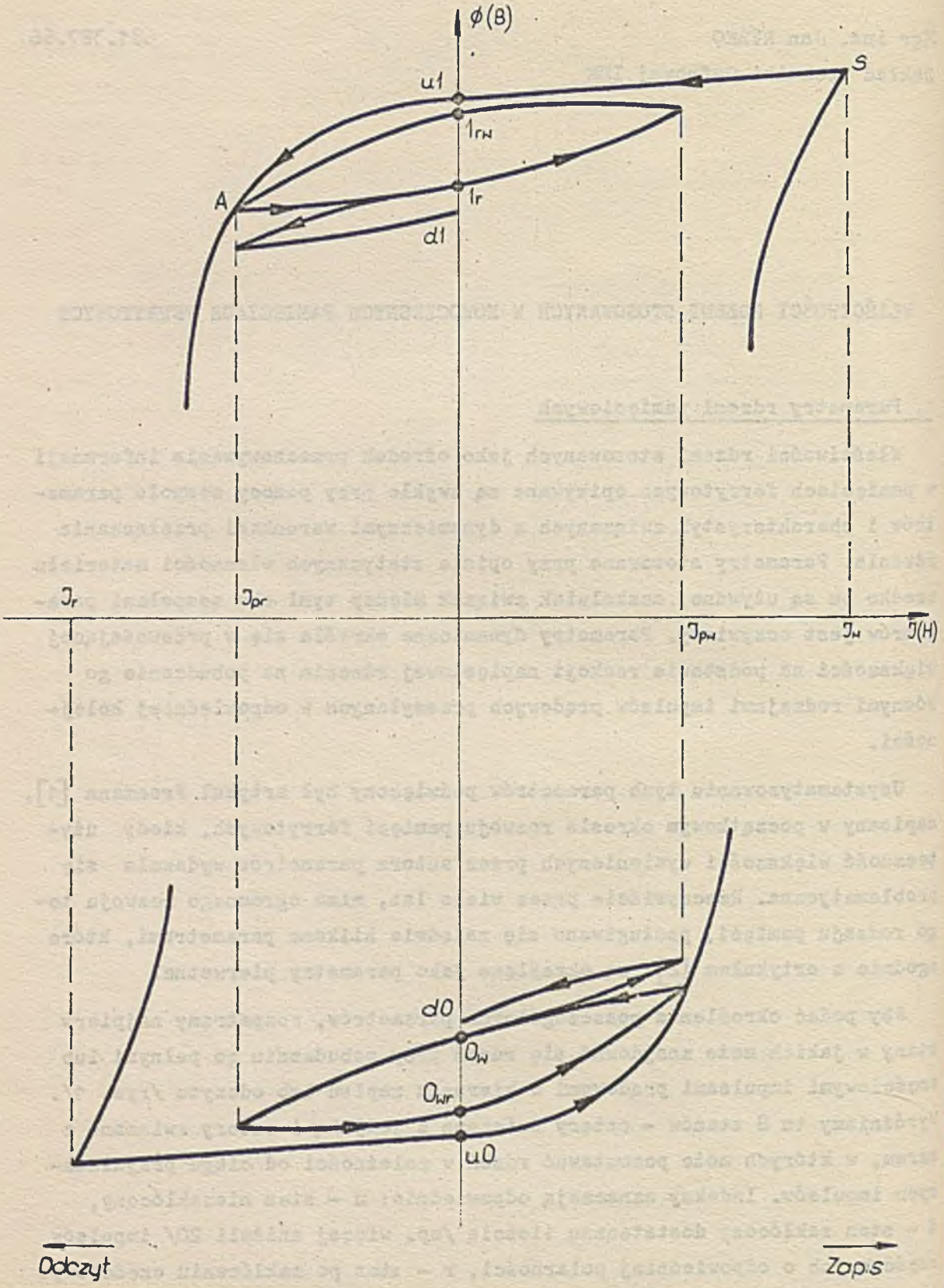
WŁAŚCIWOŚCI RDZENI STOSOWANYCH W NOWOCZESNYCH PAMIĘCIACH FERRYTOWYCH

1. Parametry rdzeni pamięciowych

Właściwości rdzeni stosowanych jako ośrodek przechowywania informacji w pamięciach ferrytowych opisywane są zwykle przy pomocy zespołu parametrów i charakterystyk związanych z dynamicznymi warunkami przełączania rdzenia. Parametry stosowane przy opisie statycznych własności materiału rzadko tu są używane, aczkolwiek związek między tymi obu zespołami parametrów jest oczywisty. Parametry dynamiczne określa się w przeważającej większości na podstawie reakcji napięciowej rdzenia na pobudzanie go różnymi rodzajami impulsów prądowych przesyłanych w odpowiedniej kolejności.

Usystematyzowaniu tych parametrów poświęcony był artykuł Freemana [1], napisany w początkowym okresie rozwoju pamięci ferrytowych, kiedy użyteczność większości wymienionych przez autora parametrów wydawała się problematyczna. Rzeczywiście przez wiele lat, mimo ogromnego rozwoju tego rodzaju pamięci, posługiwano się zaledwie kilkoma parametrami, które zgodnie z artykułem [2] są określane jako parametry pierwotne.

Aby podać określenia poszczególnych parametrów, rozpatrzmy najpierw stany w jakich może znajdować się rdzeń przy pobudzaniu go pełnymi lub częściowymi impulsami prądowymi w kierunku zapisu lub odczytu /rys. 1/. Wyróżniamy tu 8 stanów - cztery związane z jedynką i cztery związane z zerem, w których może pozostawać rdzeń w zależności od ciągu przykładanych impulsów. Indeksy oznaczają odpowiednio: u - stan niezakłócony, d - stan zakłócony dostateczną ilością /np. więcej aniżeli 20/ impulsów częściowych o odpowiedniej polarności, r - stan po zakłóceniu częściowym impulsem działającym w kierunku odczytu oraz w - częściowy impuls



Rys. 1. Stany rdzenia pamięciowego

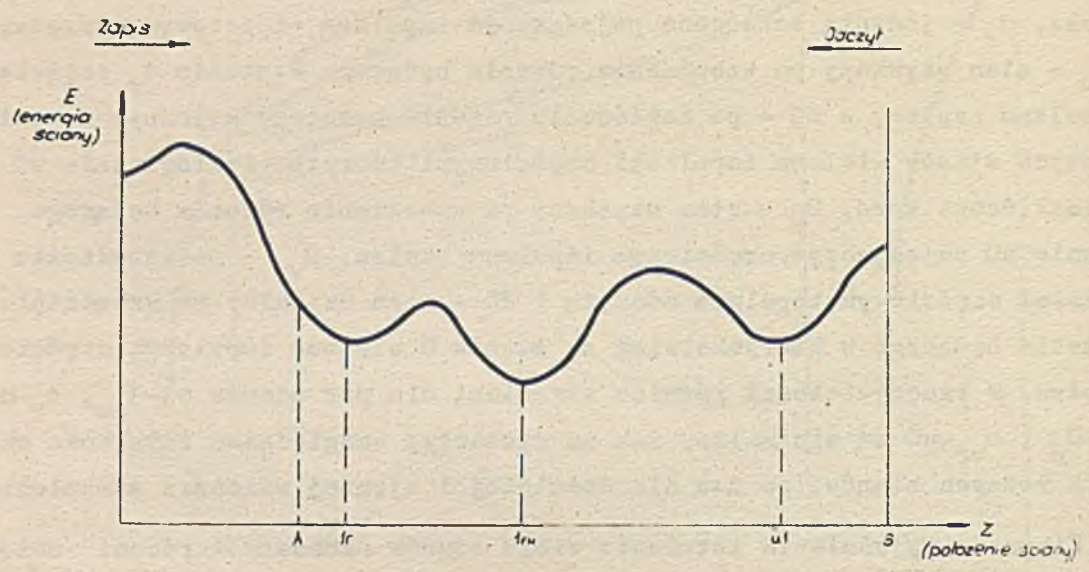
zapisu. Stany u i d są stanami granicznymi, natomiast stany wywołane pojedynczymi impulsami częściowymi o odpowiedniej polarności lub ich naprzemianległym ciągiem - stanami pośrednimi. Tak więc u1 - to niezakłócona jedynka, 1_r - jedynka zakłócona pojedynczym impulsem częściowym odczytu, 1_{rw} - stan uzyskany po wzbudzeniu rdzenia będącego w stanie 1_r częściowym impulsem zapisu, a d1 - po zakłóceniu rdzenia będącego w jednym z wymienionych stanów wieloma impulsami częściowymi odczytu. Analogicznie u0 to niezakłócone zero, 0_w - stan uzyskany po wzbudzeniu rdzenia będącego w stanie u0 pojedynczym, częściowym impulsem zapisu, 0_{wr} - po wzbudzeniu go z kolei częściowym impulsem odczytu i d0 - stan uzyskany po wzbudzeniu rdzenia będącego w którymkolwiek ze stanów 0 wieloma impulsami częściowymi zapisu. W rzeczywistości różnice strumieni dla par stanów $u1-1_{rw}$, 1_r-d1, $d0-0_w$ i $0_{wr}-u0$ są minimalne, tak że wystarczy uwzględniać istnienie czterech różnych stanów, po dwa dla dodatniej i ujemnej wartości strumienia.

Fizyczne wyjaśnienie istnienia wielu stanów remanencji rdzeni może być dokonane przy założeniu, iż ferryt składa się z przypadkowo zorientowanych sześciennych ziaren [3]. Każde ziarno podtrzymuje 180^o ścianę domenową, która w stanie remanencji znajduje się blisko i jest równoległa do jednej z płaszczyzn ziarna. Pod wpływem działania pola zewnętrznego ściana porusza się wzdłuż ziarna, lecz ruch jej hamowany jest przez przeszkody /niejednorodności materiału/, których wielkość wyrażona jest wartością pola niezbędnego do przyłożenia, aby ściana pokonała daną przeszkodę. Mbżna to wyrazić /rys. 2/, przy pomocy wykresu energii ściany w funkcji jej położenia. Wielkość przeszkody określona jest tu jako

$$H = \frac{1}{2M_s} \frac{dE}{dz}, \qquad /1/$$

gdzie M_s jest namagnesowaniem nasycenia, a $\frac{dE}{dz}$ nachyleniem krzywej z rys. 2. W stanie remanencji ściana zajmuje położenie odpowiadające stanowi u1, które dla uproszczenia oznaczono na tym rysunku nazwą tego stanu. Po przyłożeniu impulsu zakłócającego odczytu ściana w każdym ziarnie będzie poruszać się, aż napotka nachylenie takie iż

$$\frac{1}{2M_s} \frac{dE}{dz} > H, \qquad /2/$$



Rys. 2. Energia ściany w funkcji jej położenia

co ją zatrzyma w punkcie A.Po zakończeniu impulsu ściana cofnie się do najbliższego minimum energii $/1_r/$.

1.1. P a r a m e t r y p i e r w o t n e

Do parametrów pierwotnych zaliczamy:

- amplitudę sygnału indukowanego przez prądowy impuls odczytu, gdy w rdzeniu zapamiętywana była jedynka $/uV_1$ lub dV_1 w zależności od stanu rdzenia jak na rys. 1/,
- amplitudę sygnału zakłóconego zera dV_z indukowanego przez impuls odczytu z rdzenia będącego w stanie d0,
- czas przełączania określany na sygnale uV_1 lub dV_1 jako odstęp czasu pomiędzy momentem, gdy impuls wzbudzający osiąga 10% swej maksymalnej wartości, a chwilą, gdy sygnał zmniejszy się dziesięciokrotnie w stosunku do swej amplitudy,
- czas szczytu definiowany analogicznie z tym, że moment końcowy określony jest przez maksimum przebiegu napięciowego,
- amplitudę prądowego impulsu wzbudzającego I_m /zarówno odczytu jak i zapisu/, przy której określone są wymienione wyżej parametry,

- amplitudę prądowego impulsu zakłócającego /częściowego/ I_z,
- prąd łamiący I_b tzn. taką wartość prądu I_z, przy której na charakterystykach dV_1 i $dV_z = f(I_m)$ występuje gwałtowne załamanie,
- prąd odcięcia I_o - wartość prądu odciętą na osi I_m przez prostoliniową aproksymację zależności $1/t_s = f/I_m/$.

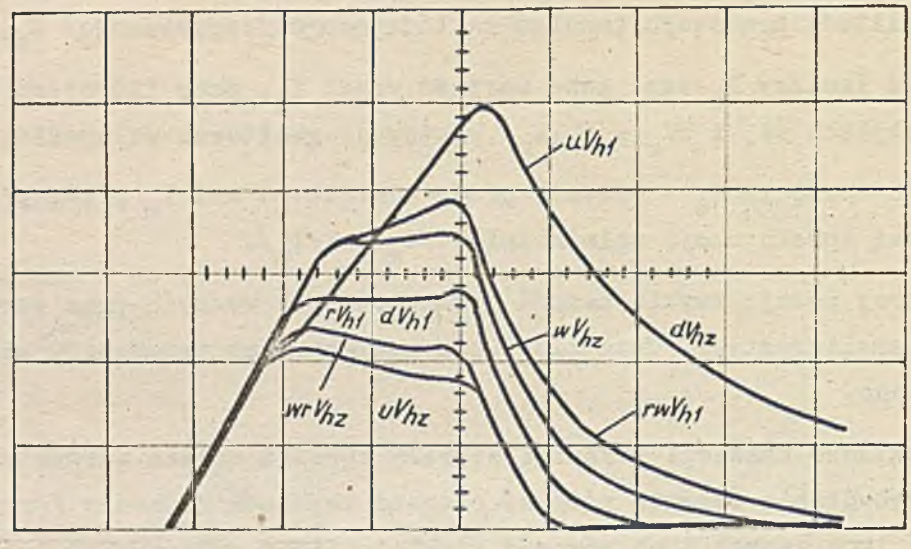
Wytwórcy podają zwykle zespół parametrów pierwotnych oraz wspomniane wyżej charakterystyki. Ostatnie dwa z wymienionych parametrów nie zawsze są podawane.

Początkowo katalogi rdzeni zawierały również dalsze parametry wynikające z wzbudzania rdzenia różnymi ciągami impulsów /rdzenie Ferroxube S1, S2, S3/, lecz danych tych wówczas nie potrafiono wykorzystać i następnie ograniczono się do podawania jedynie parametrów pierwotnych. Parametry te charakteryzują zadawalająco sygnały z bloku nośnika informacji, ale posiadają tę wadę, że dV_z nie może być w dużych i szybkich pamięciach miarą zakłócenia, gdyż odnosi się tylko do pojedynczego rdzenia, podczas gdy zakłócenie, jak to szczegółowo pokażemy w punkcie 3 i 4, składa się z sumy przebiegów z rdzeni pobudzonych prądem połówkowym. Dlatego wraz z doskonaleniem parametrów pamięci, wynikła potrzeba oceny wypadkowego zakłócenia, przy czym niezbędna okazała się tu znajomość tzw. parametrów wtórnych rdzeni.

1.2. Parametry wtórne

Parametrami wtórnymi rdzeni nazywamy amplitudy sygnałów napięciowych indukowanych przy wzbudzaniu rdzenia impulsem połówkowym, przy różnych stanach tego rdzenia. Wielkość tych sygnałów określona jest ilością strumienia przełączanego w czasie narastania impulsu wzbudzającego. Z rys. 1 określającego stany rdzenia, można w przybliżeniu określić te zmiany strumienia. Można dla każdej z nich wyróżnić składowe: odwracalną i nieodwracalną. Jak widać z rysunku, dwa spośród czterech stanów mają znaczną składową nieodwracalną. Dla jedynki, stany u1 i 1_{rw} będą wytwarzać, przy wzbudzeniu ich połówkowym impulsem odczytu, nieodwracalne zmiany strumienia. Natomiast stany 1_r i d1 są dla większości rdzeni stanami stabilnymi i tutaj wytwarzane są tylko odwracalne zmiany strumienia.

W pracy niniejszej będziemy stosować oznaczenia sygnałów napięciowych powszechnie używane w literaturze i katalogach [1, 2] /rys. 3/. Duża



Rys. 3. Przebiegi napięciowe indukowane przez impulsy połówkowe

litera V oznacza sygnał napięciowy, poprzedzające litery - stan rdzenia, indeks h oznacza wzbudzenie impulsem połówkowym, a 1 lub z - jedynkę lub zero. Dla zapamiętywanej jedynki, kolejność sygnałów od największego do najmniejszego jest następująca: uV_{h1}, rwV_{h1}, rV_{h1} i dV_{h1}. Odpowiednio dla zera: dV_{hz}, wV_{hz}, wrV_{hz} i uV_{hz}. Na rys. 3 zaznaczono te przebiegi. Jak widać przebiegi wV_{hz} i dV_{hz} oraz rV_{h1} i dV_{h1} są parami identyczne, a więc stany 1_r i d1 oraz d0 i 0_w są praktycznie nierozróżnialne.

2. Rola poszczególnych parametrów w różnych systemach pamięciowych

Omówione parametry bywają w różnym stopniu wykorzystywane przy ocenie całego systemu pamięciowego, w zależności od rodzaju tego systemu. Najprościej wygląda ta sprawa w przypadku pamięci z liniowym wybieraniem, inaczej zwanej systemem 2D. W czasie odczytu nie mamy tutaj do czynienia z połówkowym wybieraniem rdzeni, a więc parametry wtórne nie mają żadnego zastosowania. Występuje tu tylko pełny impuls odczytu oraz połówkowe impulsy zapisu, zarówno w uzwojeniu bitowym jak i w liniach słowa. Mogą one wywołać znaczne zakłócenia w czasie zapisu, co może wydłużyć cykl pamięci. Jest to jedyny system, w którym parametry pierwotne określają sygnał i zakłócenie całego płatu pamięciowego.

System $2^1/_2D$ [4], a zwłaszcza jego odmiana "fazowa", dająca znaczne oszczędności na elektronice, jest najbardziej skomplikowanym systemem, jeśli chodzi o ciągi impulsów jakie wzbudzają poszczególne rdzenie pa-

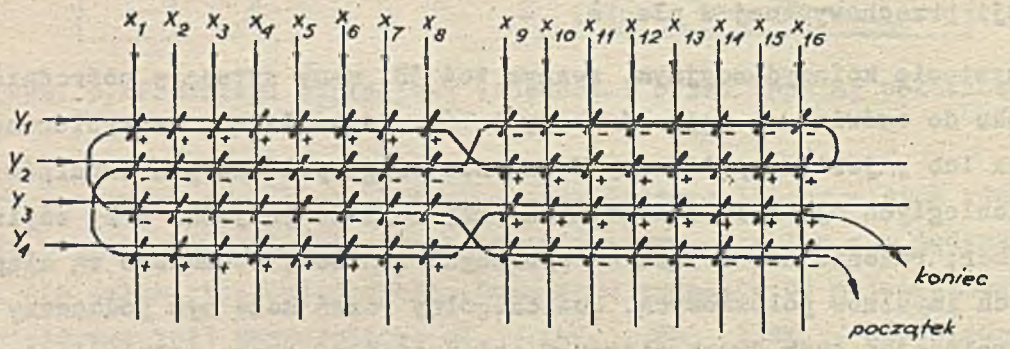
mięciowe. Może to być bowiem ciąg naprzemianległych impulsów dodatnich i ujemnych dostarczanych ze wzmacniaczy adresowych x lub y przy zapisywaniu jedynek, bądź ciąg impulsów ujemnych i dodatnich, dostarczanych ze wzmacniacza y przy zapisie jedynek w połówkę płatu o odwróconej fazie. Wreszcie przy zapisie zer rdzenie pobudzane są ciągiem jednokierunkowych impulsów połówkowych ujemnych lub dodatnich w zależności od tego, w którą połówkę płatu dokonywany jest zapis. W rezultacie każdy z rdzeni może znajdować się w dowolnym z pokazanych na rys. 1 stanów, a więc indukowane mogą być dowolne z wymienionych sygnałów. Zakłócenie wypadkowe płatu zależeć tu będzie od kolejności zapisywania i rodzaju informacji przechowywanej w płacie.

W systemie koincydencyjnym, zwanym też 3D, mamy sytuację pośrednią w stosunku do omówionych poprzednio systemów. Rdzeń leżący na wybieranej linii x lub y jest tu poddawany działaniu ciągu połówkowych impulsów naprzemianległych ujemnych i dodatnich przy zapisie jedynek. Przy zapisywaniu zer, rdzenie nie leżące na wybranych liniach, pobudzane są ciągiem ujemnych impulsów połówkowych. Poszczególny rdzeń może być poddawany różnym kombinacjom tych dwóch ciągów w zależności od swego położenia i postaci zapisywanej informacji. dV_1 odpowiada sygnałowi indukowanemu z przełączanego rdzenia w płacie, natomiast zakłócenie wypadkowe płatu określone będzie zakłóceniem różnicowym, które szczegółowiej zostanie omówione w następnych punktach. Sygnał dV_z w zasadzie tu nie występuje, chyba że częściowy prąd zapisu będzie większy od częściowego prądu odczytu. Wtedy taki niesymetryczny ciąg może doprowadzić rdzeń do stanu d0. W rzeczywistości różnicowe wypadkowe zakłócenia są znacznie większe.

3. Konfiguracje uzwojenia odczytu płatu bitowego

O wypadkowych własnościach płatu decydują parametry rdzeni, ciągi impulsów wzbudzających i konfiguracja uzwojenia odczytu. Te dwa ostatnie czynniki wiążą się z przyjętym systemem pamięci. W pamięci z liniowym wybieraniem /2D/ jako uzwojenie odczytu może być wykorzystane tzw. uzwojenie bitowe, do którego posyła się również prąd bitowy, przechodzący przez wszystkie rdzenie danego bitu, prostopadle do linii słowa. Jeśli istnieje oddzielne uzwojenie odczytu, przebiega ono równolegle do uzwojenia bitowego.

Rys. 4 pokazuje uzwojenie płatu 4 x 16 systemu $2^1/2$ D. Przewody wzbudzające X i Y przebiegają prostopadle, krzyżując się w każdym rdzeniu. Natomiast uzwojenie odczytu prowadzone jest równolegle do uzwojenia Y tak jednak, aby w połowie rdzeni przebiegało ono zgodnie z kierunkiem prądu wzbudzającego, w połowie zaś przeciwnie. W ten sposób uzyskujemy znoszenie się zakłóceń od rdzeni wzbudzonych impulsami połówkowymi, oczywiście przy założeniu całkowitej jednorodności indukowanych sygnałów. Przy odczycie i zapisie jedynki następuje znoszenie się sygnałów z półwybranych rdzeni w obu wybranych współrzędnych X i Y. Przy zapisie zera sygnały te indukowane są tylko we współrzędnej X.

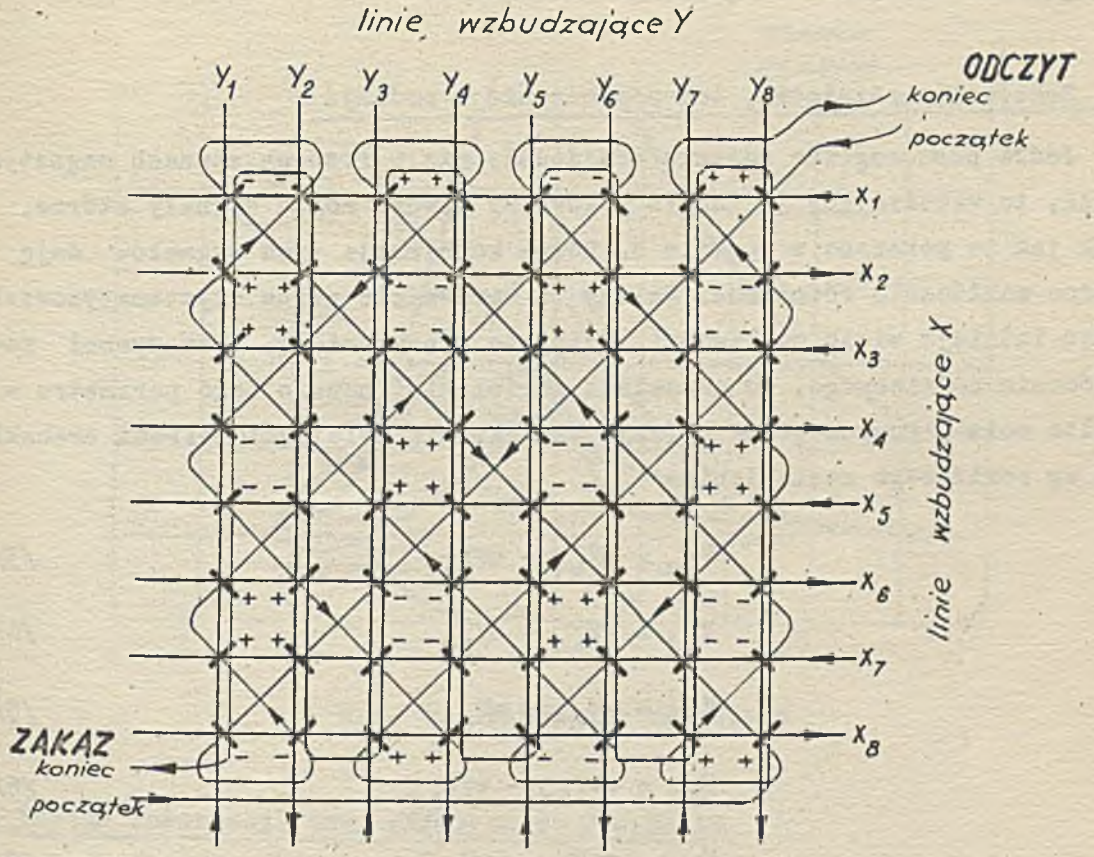


Rys. 4. 3-uzwojeniowy płat systemu $2^1/2$ D

Istnieją również 2-uzwojeniowe pamięci $2^1/2$ D - wówczas odczyt dokonywany jest bezpośrednio z uzwojenia X. Ma to miejsce zwykle w pamięciach masowych, gdzie dla oszczędności stosuje się system dwufazowy i wtedy uzwojenia X z obu połówek płatu doprowadza się symetrycznie do wzmacniacza odczytu, uzyskując znoszenie się zakłóceń.

Wreszcie na rys. 5 pokazane mamy wszystkie uzwojenia płatu 8x8 pamięci koincydencyjnej /3D/. Mamy tu podobnie jak poprzednio prostopadłą siatkę uzwojeń X i Y oraz uzwojenia zakazu i odczytu przechodzące przez wszystkie rdzenie w płacie. Pierwsze z nich przebiega równolegle do uzwojeń Y, przy czym prądy wzbudzające Y muszą mieć kierunek przeciwny do prądu zakazu. Uzwojenie odczytu prowadzone jest prostopadle do płaszczyzny poszczególnych rdzeni tak, aby objęło wszystkie rdzenie płatu. Znak "plus" oznacza, iż uzwojenie odczytu przechodzi zgodnie z prądami wzbudzającymi, a "minus" - przeciwnie. W takim przypadku mamy zapewnione znoszenie się zakłóceń zarówno na wybranych współrzędnych jak i wzdłuż

całego uzwojenia zakazu. Taki system uzwojenia nosi nazwę systemu MIT lub diagonalnego.



Rys. 5. 4-uzwojeniowy płat systemu 3D

Należy zauważyć, że zakłócenie od zakazu będzie większe, gdyż powstaje ono przy udziale wszystkich rdzeni płatu. Na szczęście w cyklu zapisu nie ma problemu rozróżnienia sygnału od zakłócenia i nadmierne zakłócenie może tylko wydłużyć cykl, zachodząc na następny odczyt. W czasie odczytu natomiast wzbudzone są 2 współrzędne to znaczy dla przytoczonego przykładu mamy 14 rdzeni wzbudzonych prądem połówkowym i jeden wybrany. Ogólnie, jeśli N jest pojemnością całej pamięci w bitach, a M ilością bitów w słowie, istnieje w płacie $2\frac{N}{M} - 2$ rdzeni półwybranych, wśród których $\frac{N}{M}$ rdzeni jest w jednej fazie, a $\frac{N}{M} - 2$ w przeciwnej fazie.

Jeśli pominiemy, jako nieistotne, dwa rdzenie nieskompensowane, okaże się, iż w pamięciach o dużych pojemnościach przy wypadkowym zakłóceniu z płatu decydujący udział mają zakłócenia różnicowe, to znaczy sygnały indukowane z poszczególnych par rdzeni, gdzie nie zachodzi idealna kompensacja na skutek różnic stanów i własności rdzeni.

Inne konfiguracje uzwojeń odczytu pamięci koincydencyjnej podane są w pracy [5], gdzie opisana jest również interesująca metoda oceny poszczególnych uzwojeń ze względu na zakłócenia.

4. Zakłócenia różnicowe, ich pochodzenie i rodzaje

Jeśli poszczególne rdzenie znajdowały się w różnych stanach magnetycznych, to wzbudzający je impuls połówkowy wywoła różne sygnały wtórne, tak jak to pokazano w punkcie 1. Różne kombinacje tych sygnałów dają różne zakłócenia różnicowe. Należy tu wprowadzić pewne usystematyzowanie, gdyż istnieje wiele możliwości. Przyjęto oznaczenie V_δ jako symbol zakłócenia różnicowego, co odpowiada angielskiej nazwie tego parametru - delta noise. Poszczególne rodzaje oznacza się kolejnymi cyframi arabskimi wg poniższego zestawienia:

$$V_{\delta 1} = uV_{h1} - uV_{hz} \qquad /3/$$

$$V_{\delta 2} = rV_{h1} - uV_{hz} \qquad /4/$$

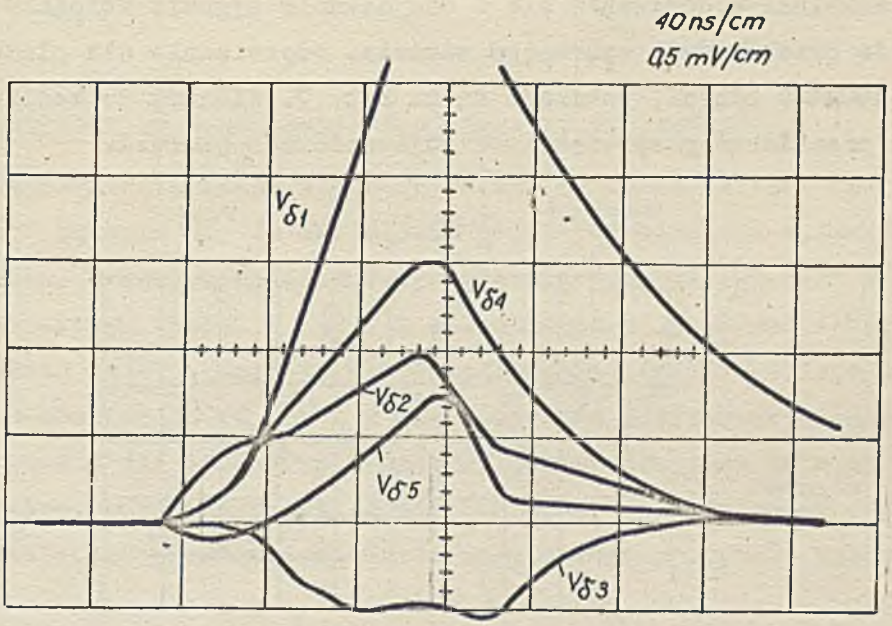
$$V_{\delta 3} = rV_{h1} - wV_{hz} \qquad /5/$$

$$V_{\delta 4} = rwV_{h1} - wrV_{hz} \qquad /6/$$

$$V_{\delta 5} = rwV_{h1} - wV_{hz} \qquad /7/$$

Oczywiście listę tę możnaby znacznie wydłużyć, ale chodzi o te zakłócenia, które występują najczęściej. Przebiegi ich pokazane są na rys. 6. Jak widać z oscylogramu, zgodnie zresztą z analizą pętli histerezy, największą amplitudę posiada $V_{\delta 1}$, lecz sygnał ten w rzeczywistych warunkach pracy nigdy nie występuje, gdyż zapisywanie informacji w innych rdzeniach powoduje różne stany ich zakłócenia. Występuje natomiast sygnał $V_{\delta 4}$, następne co do wielkości zakłócenie, które przy większych pojemnościach może stwarzać poważne trudności konstruktorom pamięci. Dlatego często wprowadza się specjalne układy dla eliminacji tego rodzaju zakłócenia jak np. tzw. "zakłócenie po zapisie" /post write disturb - PWD/, gdy wszystkie rdzenie płatu pobudzane są po dokonaniu zapisu impulsem połówkowym działającym w kierunku odczytu i sprowadzającym wszystkie rdzenie do stanów d1 lub 0_{wr}. Aby nie wydłużać nadmiernie cyklu, impuls ten może być odpowiednio krótki, gdyż nie wywołuje on pełnego przełączania rdzenia. Przy

stosowaniu tego rozwiązania najczęściej występującym zakłóceniem różnicowym jest $V_{\delta 2}$.



Rys. 6. Zakłócenia różnicowe

5. Postać informacji tzw. najgorszego przypadku

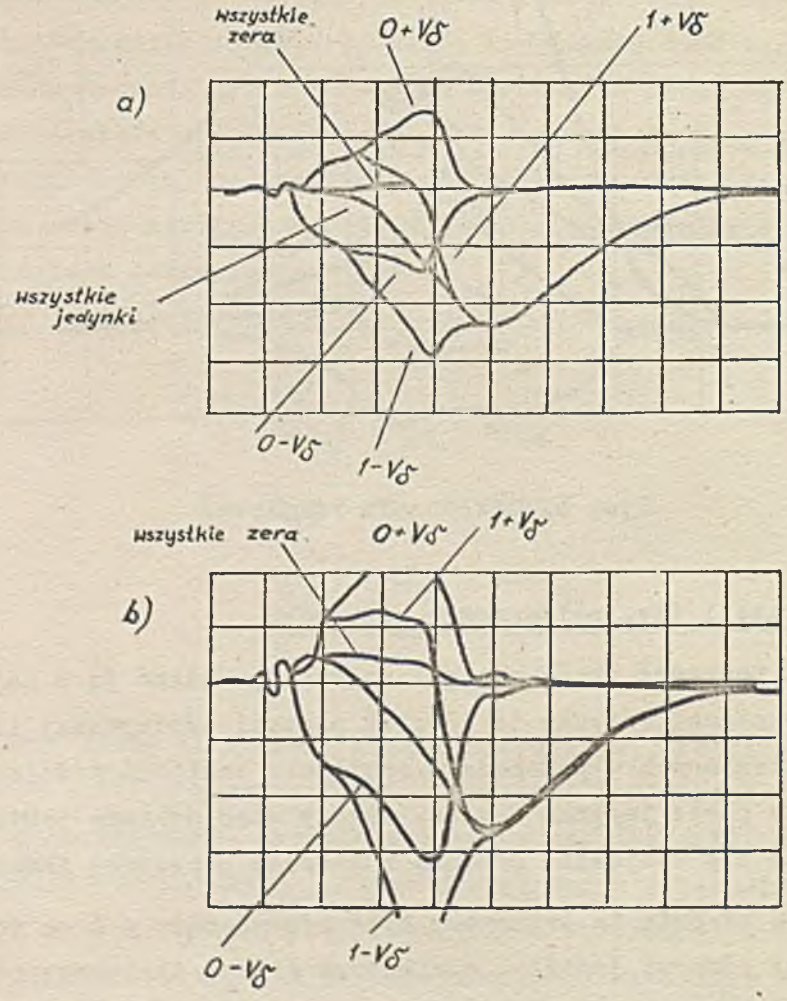
Aby zapewnić poprawną pracę pamięci należy sprawdzać ją w najbardziej krytycznych warunkach. Dotyczy to również postaci zapisywanej informacji. Jak widać z wymienionych w poprzednim rozdziale zakłóceń różnicowych dotyczą one zawsze pary: jedynka - zero. Należy więc dokonać takiego zapisu, aby kompensujące się wzajemnie rdzenie zawierały przeciwną informację.

Na rys. 5 i 6 rdzenie te oznaczone były odpowiednio + i -, toteż jeśli przyporządkujemy plusowi jedynkę, a minusowi zero - otrzymamy postać informacji dla najgorszego przypadku. Dla pamięci koincydencyjnej /rys. 5/ jest to podwójna szachownica, którą to postać informacji często spotykamy przy kontroli płatów tego systemu pamięci.

Zwykle kontrola taka obejmuje również zapis samych jedynek i samych zer, aczkolwiek zakłócenie różnicowe przy jednorodnych rdzeniach wówczas nie występuje. Aby zaobserwować niekorzystny wpływ zakłócenia różnicowego na sygnał wyjściowy należy zapisać w jednym z miejsc pamięciowych informację odwrotną do tej jaka wynika z położenia tego miejsca w szachow-

nicy. Wówczas sygnał różnicowy będzie odejmował się od sygnału jedynki i dodawał do sygnału zera.

Różne kombinacje dodawania się i odejmowania sygnału różnicowego w stosunku do przebiegów z wybranego rdzenia, odpowiednio dla płatu 50x50 rdzeni i 100x100 rdzeni, pokazane są na rys. 7. Widzimy tu możliwość wystąpienia przekłamań przy większych pojemnościach pamięci.



Rys. 7. Sygnały z symulacji płatów rdzeni 0,8 mm; 50 ns/cm, 25 mV/cm
a - uzwojenie odczytu obejmujące 50x50 rdzeni,
b - uzwojenie odczytu - 100x100 rdzeni

Wpisanie szachownicy zwiększa również zakłócenie wywołane impulsem zakazu. Zakłócenie może dochodzić wówczas do 10-krotnej wartości sygnału indukowanego i jakkolwiek bezpośrednio nie wpływa na sygnał odczytu może poważnie wydłużyć cykl.

Dla poszczególnych konfiguracji uzwojeń prócz szachownicy takiej, jaka wynika z rys. 5 stosuje się różne zbliżone kombinacje: dopełnianie podanej szachownicy, przesunięcie jej o 1 wiersz lub kolumnę itp. jak to pokazano w pracy [5].

6. Prawdopodobieństwo wystąpienia "najgorszego przypadku"

Oparcie sprawdzania ramek i doboru rdzeni na zasadzie tzw. "najgorszego przypadku" skłania się do określenia prawdopodobieństwa wystąpienia tego przypadku. Prawdopodobieństwo wystąpienia jedynki lub zera w danym miejscu pamięciowym wynosi $\frac{1}{2}$ [6], a dla określonej kombinacji tych cyfr w wierszu płatu $\left(\frac{1}{2}\right)^{\sqrt{n}}$. Daje to dla całego płatu $\left(\frac{1}{2}\right)^{2\sqrt{n}-1}$, a ponieważ możliwe są 4 kombinacje /0 lub 1 w rozpatrywanym miejscu oraz szachownica i jej dopełnienie dla każdego przypadku/, z których jedna może być nie brana pod uwagę, gdyż zakłócenia różnicowe dodają się tutaj do sygnału jedynki, ostateczne prawdopodobieństwo najgorszego przypadku wynosi:

$$P = \frac{3}{2^{2\sqrt{n}-1}} . \qquad /8/$$

Oznacza to, iż dla płatu 64 x 64 rdzenie, przy przypadkowym wybieraniu adresów najgorszy przypadek może średnio zdarzyć się raz na $5{,}62 \cdot 10^{37}$ adresów, co oznacza przy cyklu 1 μs $1{,}79 \cdot 10^{24}$ lat. Oznacza to praktycznie, że ewentualności wystąpienia najgorszego przypadku można nie brać pod uwagę.

Aby zbliżyć się do bardziej realnych przedziałów czasu, rozpatrywano przypadki, gdy szachownica nie obejmuje całego płatu, lecz pewną ilość par [6] i zawiera taką samą informację, nie dając sygnału różnicowego. Znaleziono odpowiednie zależności matematyczne i uzyskano wyniki przedstawione w Tabeli 1, gdzie r jest ilością par o niezróżnicowanej informacji.

Tabela 1. Prawdopodobieństwo wystąpienia najgorszego przypadku w płacie pamięciowym 64x64

r	odwrotność prawdopodobieństwa	średni okres	znormalizowany sygnał różnicowy
0	$5{,}62 \cdot 10^{37}$	$1{,}79 \cdot 10^{24}$ lat	1,0
5	$2{,}51 \cdot 10^{29}$	$8 \cdot 10^{15}$ "	0,92
10	$2{,}92 \cdot 10^{23}$	$9{,}32 \cdot 10^{9}$ "	0,84
15	$5{,}48 \cdot 10^{18}$	$1{,}74 \cdot 10^{5}$ "	0,77
20	$6{,}62 \cdot 10^{14}$	21 "	0,68
21	$1{,}3 \cdot 10^{14}$	4,1 "	0,67
22	$2{,}7 \cdot 10^{13}$	10,3 mies.	0,66
23	$5{,}89 \cdot 10^{12}$	2,25 "	0,64
24	$1{,}4 \cdot 10^{12}$	15,3 dni	0,62
25	$3{,}39 \cdot 10^{11}$	4 "	0,61
26	$8{,}78 \cdot 10^{10}$	1 dzień	0,59
27	$2{,}35 \cdot 10^{10}$	6,5 godz.	0,58
28	$6{,}7 \cdot 10^{9}$	1,9 "	0,56
29	$2 \cdot 10^{9}$	33 min.	0,55

Z tabeli wynika, że uzyskane w sposób "niekompletny" tzw. "najgorsze przypadki" gwałtownie zwiększają częstotliwość swego pojawienia się ze wzrostem ilości par skompensowanych. Ponadto maleje zakłócenie płatu, wyrażone stosunkiem do pełnego zakłócenia /przy kompletnej szachownicy/. Dla r = 22 pojawia się około 2/3 pełnego zakłócenia, średnio co 10 miesięcy.

Ilość skompensowanych par przy tego rzędu średnim okresie występowania najgorszego przypadku jest znacznie mniejsza w przypadku płatu o 32 x 32 rdzeniach. Cztery skompensowane pary powodują tutaj skrócenie średniego okresu z $9{,}8 \cdot 10^{4}$ lat do 2,1 miesięcy /zredukowana wartość zakłóceń 0,88/. Przy 8 parach skompensowanych średni okres wynosi już tylko 15 minut. Rozważania powyższe dotyczyły uproszczonego przypadku informacji zakłócanej w dowolny sposób.

Jeżeli rozpatrzymy taki sposób zakłócenia poszczególnych rdzeni, że będą one znajdować się w najbardziej niekorzystnych spośród wszystkich możliwych stanów, uzyskamy tzw. absolutnie najgorszy przypadek, który zachodzi niesłychanie rzadko - dla płatu 64 x 64 średni okres wystąpienia takiego stanu wynosi $9{,}3 \cdot 10^{111}$ lat, a nawet dla małego płatu 16 x 16 - $1{,}88 \cdot 10^{7}$ lat.

Wprowadzenie par skompensowanych daje następujące wyniki:

- w płacie 64 x 64 50 par skraca okres do 115 dni i zmniejsza zakłócenie 4-krotnie,
- w płacie 16 x 16 4 pary dają w rezultacie okres 3 lat i zmniejszenie zakłócenia o 25%. W tym najmniejszym płacie postać najgorszego /nie absolutnie najgorszego/ przypadku pojawia się średnio co 12 minut.

Określane tu średnie okresy występowania najgorszego przypadku dotyczą jednego płatu i cyklu 1 µsek. W przypadku słowa o długości n bitów, okres ten będzie n razy krótszy. Również zmiana długości cyklu spowoduje zmianę średniego okresu. Jednakże uwzględnienie tych czynników nie zmienia faktu, iż przy określaniu zakłócenia dla najniekorzystniejszego przypadku przyjmuje się pewien margines bezpieczeństwa, którego wielkość została powyżej określona.

7. Parametry dodatkowe

Oprócz istotnych parametrów, omówionych poprzednio, ważną rolę odgrywają również inne parametry, które określają podatność rdzeni na wpływ czynników zewnętrznych. Zaliczamy do nich współczynniki temperaturowe oraz wpływ naprężeń mechanicznych na własności rdzeni.

7.1. W p ł y w t e m p e r a t u r y

Znaczny wpływ temperatury na charakterystyki rdzeni znany był od dawna. Konsekwencją tego były wąskie temperaturowe zakresy pracy pierwszych pamięci ferrytowych. Najsilniej ujawnia się wpływ temperatury na siłę koercji materiału magnetycznego i to bywa zwykle przedmiotem specyfikacji. Najczęściej [2] używa się współczynnika określającego zmianę amplitudy prądu wzbudzającego dla utrzymania stałej wartości uV_1 przy zmianie temperatury o $1^{\circ}C$.

$$C_m = \frac{I_m/T_1/ - I_m/T_2/}{T_2 - T_1} \quad [mA/^oC] . \qquad /9/$$

Parametr ten mówi projektantowi o ile musi się zmniejszać prąd wzbudzający, gdy chodzi o utrzymanie tego samego punktu pracy. W praktyce podaje się zwykle rodzinę charakterystyk $uV_1 = f/I_m/$ dla różnych temperatur z czego może być otrzymana rodzina krzywych $I_m = f\ /T/$ dla różnych wartości uV_1.

Innym parametrem tego typu jest współczynnik temperaturowy sygnału:

$$C_1 = \frac{uV_1\ /T_2/ - uV_1/T_1/}{T_2 - T_1} \quad [mV/^oC] . \qquad /10/$$

dla ustalonej wartości I_m.

Trzeci współczynnik określa zmianę tzw. prądu łamiącego odpowiadającego punktowi zagięcia na charakterystyce $uV_1 = f/I_m/$.

$$C_b = \frac{I_b/T_1/ - I_b/T_2/}{T_2 - T_1} \quad [mA/^oC] . \qquad /11/$$

Współczynnik ten, w porównaniu z C_m daje miarę pogorszenia się prostokątności ze wzrostem temperatury. Ze względu jednak na małą dokładność w określaniu prądu I_b /zaokrąglone przebiegi charakterystyk dla rdzeni mało prostokątnych/ współczynnik ten jest trudny do określenia.

Rozróżniamy dwie grupy materiałów do rdzeni pamięciowych, jeśli chodzi o wartości wspomnianych wyżej współczynników. Pierwsze to tzw. materiały standardowe, które zapewniały zakres pracy w temperaturach $25 \div 40^oC$, oraz materiały o rozszerzonym zakresie temperaturowym, pozwalające na poprawną pracę pamięci od 0 do 70^oC.

Rdzenie dla poszerzonego zakresu uzyskuje się bądź wygrzewając je w polu magnetycznym, bądź prasując je z materiału zawierającego domieszki poprawiające współczynniki temperaturowe np. lit.

7.2. W p ł y w n a p r ę ż e ń m e c h a n i c z n y c h

Wrażliwość na naprężenia mechaniczne jest o tyle istotna dla rdzeni, iż przy pewnych konstrukcjach płatów mogą występować naprężenia od przewodów uzwojenia. Pomiarów dokonuje się tu zwykle w ten sposób, iż rdzeń jest rozciągany prostopadle do swej osi symetrii z określoną siłą a jednocześnie dokonywane są pomiary jego właściwości. Pomiary te wykazują silną zależność siły koercji od siły rozciągającej, przy czym zależność ta występuje w różnym stopniu dla rdzeni o różnym składzie chemicznym.

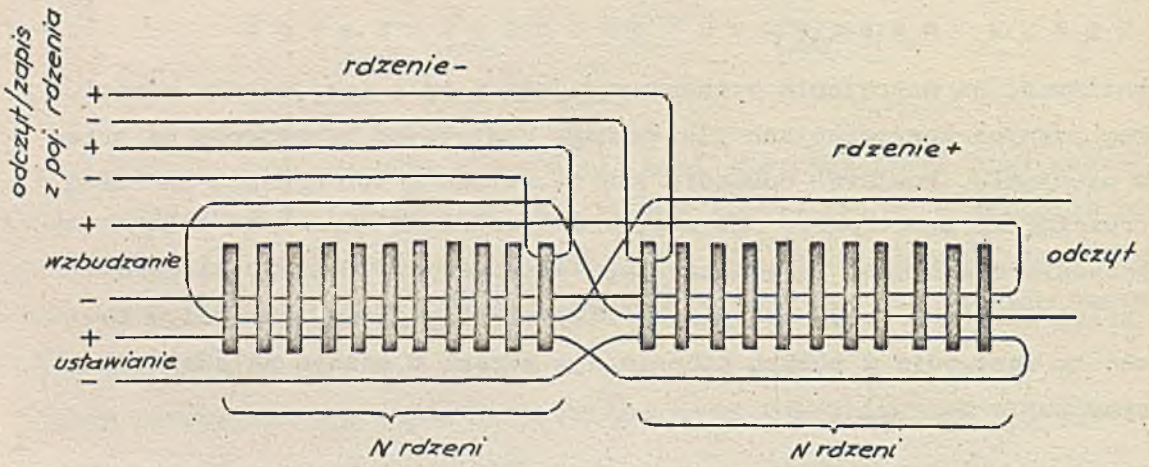
Najlepsze pod tym względem są rdzenie z ferrytu manganowo-magnezowego. Można je rozciągać niemal do rozerwania przy niewielkich zmianach właściwości. Natomiast rdzenie o wysokiej zawartości niklu wykazują dużą wrażliwość na działanie siły mechanicznej. Rdzenie miedziano-manganowe wykazują pośrednie właściwości, dodatek niklu zwiększa wrażliwość, lit zaś nie wpływa na ten parametr.

Dla ilościowego określenia wrażliwości na rozciąganie sporządza się charakterystyki procentowej zmiany prądu wzbudzającego jaka musi być dokonana, aby utrzymać stałą wartość uV_1, w funkcji siły rozciągającej.

8. Badanie rdzeni

Jak pokazano poprzednio, istotną rolę w ocenie przydatności rdzeni do pracy w określonym systemie pamięci odgrywają parametry wtórne, które nie są na ogół podawane przez wytwórców rdzeni. Określanie tych parametrów napotyka na pewne trudności techniczne, ponieważ są to napięcia rzędu 0,1 mV. Ponadto określanie tych parametrów dla każdego rdzenia wydłużałoby znacznie okres sprawdzania, a sprawdzenie wyrywkowe nie dałoby obrazu całości. Dlatego zaproponowano tutaj, zgodnie z [2] metodę określania charakterystyk II rzędu całego zespołu rdzeni.

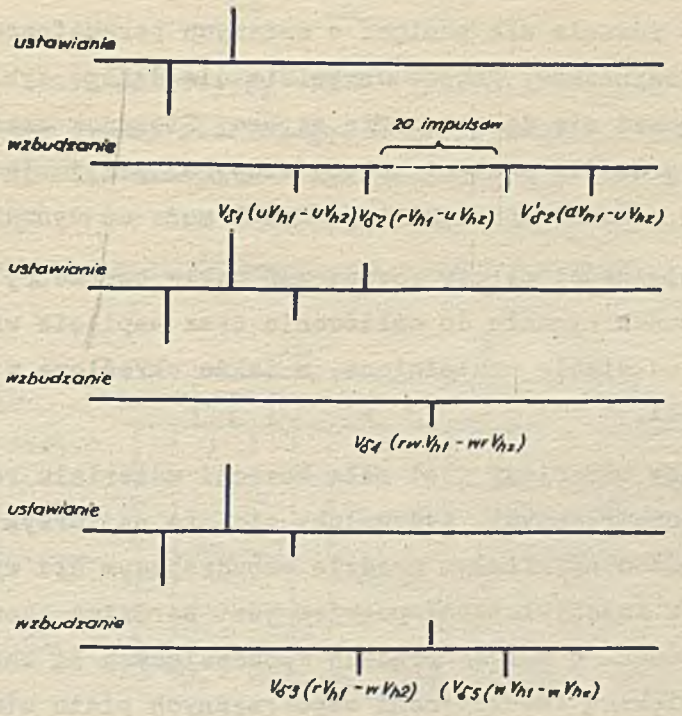
Jest to z wielu względów bardzo korzystne. Po pierwsze, omija się wspomniane trudności techniczne, gdyż pomiaru dokonuje się na znacznej liczbie rdzeni i ma się do czynienia z napięciami porównywalnymi z sygnałami z przełączanych rdzeni. Po drugie, wyjściowy sygnał jest tutaj gotowym sygnałem różnicowym, który ponadto można oglądać łącznie z sygnałem jedynki czy zera, tak jak to ukazano na rys. 8. Po trzecie wreszcie, dokonując pomiaru na próbce dobrze wymieszanej partii rdzeni, nie ma potrzeby sprawdzania całej partii.



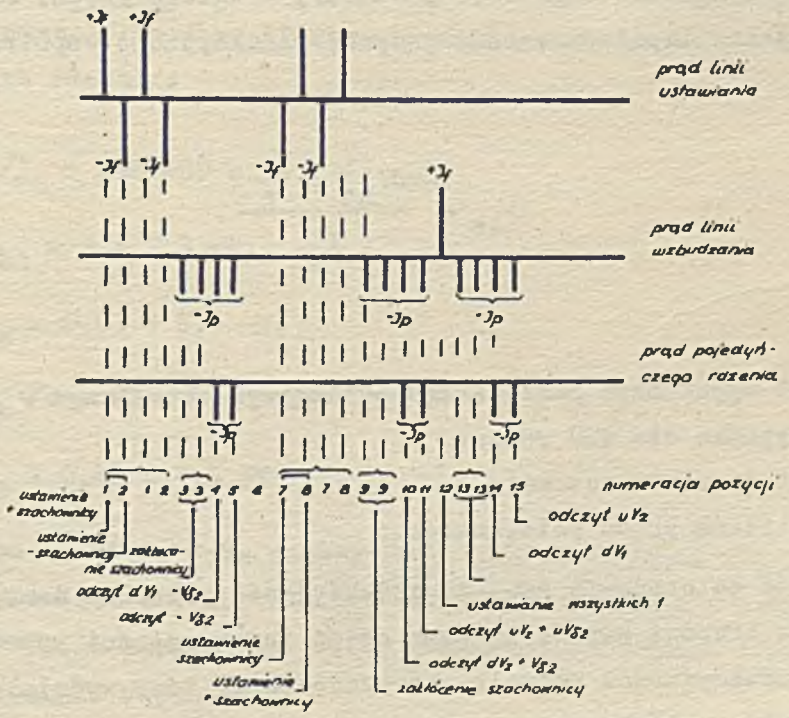
Rys. 8. Układ do badania parametrów wtórnych

Metoda ta polega na tym, że w zależności od pojemności płatu, w której badane rdzenie mają być zastosowane, wybiera się losowo ilość rdzeni równą sumie obu współrzędnych płatu /np. dla ramki 64 x 64 - 128 rdzeni/ i uzwaja się tak jak to podano na rys. 8. Posyłając pełny prąd przełączający w uzwojenie ustawiające, zapisujemy w badanych rdzeniach informację dla najbardziej niekorzystnego przypadku. Odpowiednie impulsy zakłócające posyła się następnie do uzwojenia wzbudzającego i ustawiającego, a sygnały wyjściowe obserwuje się na uzwojeniu odczytu. Jeśli jednocześnie poślemy odpowiedni impuls połówkowy do dodatkowego uzwojenia pojedynczego rdzenia w koincydencji z impulsem wzbudzania, to na uzwojeniu odczytu otrzymamy sumę zakłócenia różnicowego i sygnału jedynki lub zera, co przy odpowiednim dobraniu polarności sygnałów może odtwarzać bezpośrednio najniekorzystniejszy przypadek w ramce.

Aby uzyskać żądane zakłócenia różnicowe należy wzbudzić poszczególne uzwojenia odpowiednimi ciągami impulsów /rys. 9/. Jeśli chcemy określić również stosunek sygnału do zakłócenia, możemy zastosować bardziej rozbudowany zespół ciągów np. taki jak pokazano na rys. 10. Otrzymujemy wówczas zarówno sygnały i zakłócenia z pojedynczych rdzeni jak i ich kombinacje z zakłóceniami różnicowymi. W tym przypadku potrzebny jest programowany generator impulsów prądowych posiadający 6 wzmacniaczy - po 3 dla impulsów dodatnich i ujemnych i mogący wytwarzać ciąg 16-pozycyjny z powtarzanymi parami i poszczególnymi impulsami.



Rys. 9. Ciągi impulsów prądowych przy określaniu zakłócenia różnicowego rdzenia



Rys. 10. Program badania złożonych sygnałów

9. Procedura postępowania przy wyborze rdzenia

Aby wybrać typ rdzenia dla pamięci o zadanych parametrach należy wziąć pod uwagę szereg czynników. Przede wszystkim dla danego cyklu pamięci rdzeń musi przełączać się dostatecznie szybko. Stosunek czasu przełączania do długości cyklu dla pamięci koincydencyjnej przyjmuje się w zakresie od 1 : 4 do 1 : 6. Dla pamięci typu 2,5 D może on wynosić 1 : 3.

W następnej kolejności należy rozpatrzeć takie parametry jak prąd wzbudzający, stosunek sygnału do zakłócenia oraz napięcie wzbudzające. Są one nawzajem od siebie uzależnione, a także określone w dużej mierze pojemnością pamięci.

Prąd wzbudzający określany jest siłą koercji materiału rdzenia oraz jego wymiarami geometrycznymi. Wydawałoby się, że najkorzystniej jest wybrać rodzaj rdzenia o najniższym prądzie wzbudzającym dla wymaganego czasu przełączania. W rzeczywistości problem jest bardziej skomplikowany. Pętle histerezy rdzeni o małych prądach wzbudzających są mniej prostokątne. Powoduje to większą indukcyjność współrzędnych płatu utworzonego z takich rdzeni, przy pobudzaniu ich impulsami połówkowymi.

Indukcyjność ta jest silnie nieliniowa, zależy bardzo od stanów rdzeni. Można wykorzystać do tego celu parametry drugiego rzędu. Przyjmując liniowe narastanie impulsów wzbudzających, indukcyjność współrzędnej można określać:

$$L_{hs} = \frac{dV_{h1} \cdot t_r}{I_p} \qquad /12/$$

gdzie:

dV_{h1} – jest wypadkowym zakłóceniem połówkowym określanym w naszym przypadku dla 128 rdzeni,

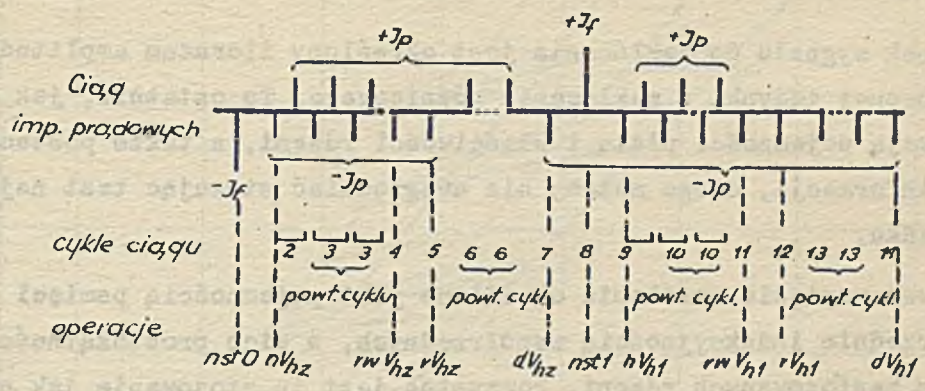
t_r – jest czasem narastania,

I_p – amplitudą prądu połówkowego.

Indukcyjność ta obejmuje również indukcyjność przewodu danej współrzędnej, która stanowi zwykle znaczną część indukcyjności wypadkowej. Określenie indukcyjności pozwala na oszacowanie mocy wydzielanej przy posyłaniu impulsu połówkowego w przewód adresowy jako:

$$P_{hs} = dV_{h1} \cdot I_p . \qquad /13/$$

Parametry te dają pełniejszy obraz właściwości rdzenia aniżeli dotychczas stosowane parametry pierwszego, a nawet drugiego rzędu. Moc, określona powyżej, charakteryzuje zarówno prostokątność rdzenia /dV_{h1}/ jak i jego siłę koercji /I_p/. Dla określenia tych parametrów posłużono się w pracy [2] ciągiem impulsów prądowych takich jak podano na rys. 11.



Rys. 11. Program testu dla półwybranych sygnałów napięciowych

Dla jednego rdzenia o średnicy zewnętrznej 0,8 mm uzyskano następujące wartości parametrów /podane liczby określają skrajne wartości dla różnych typów badanych rdzeni/:

$I_p/I_m = 240/480 \div 360/720$ mA,

$dV_{h1} = 3 \div 7{,}3$ mV,

$I_{hs} = 0{,}83 \div 2{,}9$ nH,

P_{hs} /dla $t_r = 0{,}1$ µsek/ $= 0{,}98 \div 1{,}8$ mW i

$V_{\delta 2} = 0{,}48 \div 1{,}4$ mV

Widzimy, że istnieje duża rozbieżność tych parametrów mimo, iż są to rdzenie nie różniące się zbytnio parametrami pierwotnymi. Wskazuje to na potrzebę starannego określania parametrów wtórnych rdzeni przed wybraniem ich do zastosowania w pamięci.

Okazuje się na przykład, że dzięki dobrej prostokątności, rdzenie o większym prądzie wzbudzającym mogą potrzebować mniejszej mocy. Wybór

rdzeni ze względu na minimalną moc jest istotny przy dużych pamięciach, gdzie mogą być przekroczone dopuszczalne napięcia i prądy tranzystorów. Natomiast w mniejszych pamięciach decydującym czynnikiem jest prąd. Podobnie jeśli wybieramy rdzeń do szybkich i dużych pamięci, gdzie poszczególne uzwojenia mogą być traktowane jako linie długie, należy brać pod uwagę prąd wzbudzający, gdyż oporność charakterystyczna linii nie zależy od własności poszczególnych rdzeni i moc wzbudzania jest tylko funkcją prądu.

Stosunek sygnału do zakłócenia jest określony ilorazem amplitudy napięcia zakłóconej jedynki i zakłócenia różnicowego. To ostatnie, jak wiemy, jest funkcją pojemności płatu i właściwości rdzeni, a także postaci zapisywanej informacji, czego możemy nie uwzględniać stosując test najgorszego przypadku.

Ponieważ napięcie zasilania określone jest pojemnością pamięci i wspomnianą uprzednio indukcyjnością współrzędnych, a więc prostokątnością pętli histerezy zastosowanych rdzeni, korzystne jest tu stosowanie jak najmniejszych rdzeni nawet gdy pociąga to za sobą obniżenie amplitudy sygnału odczytu oraz oczywiście materiałów na rdzenie o wysokiej prostokątności.

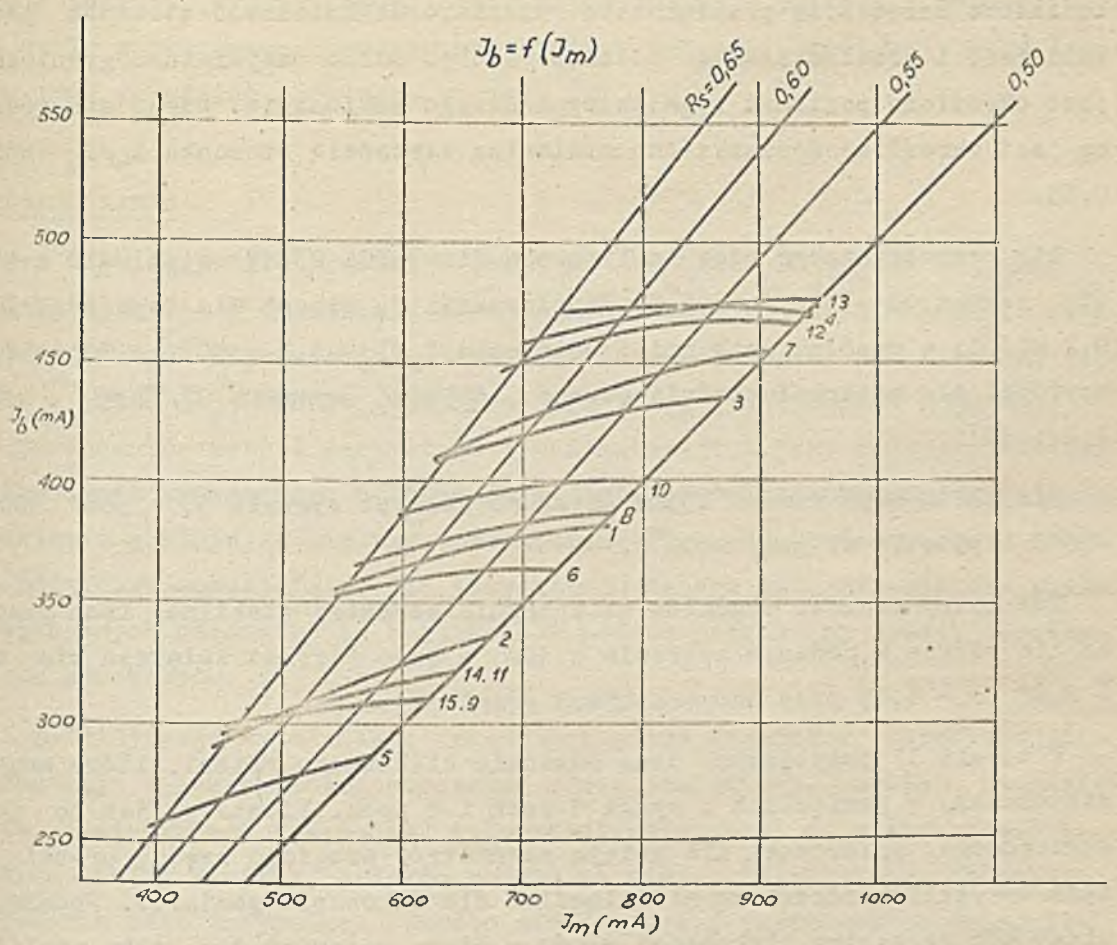
Po dokonaniu wyboru należy przeprowadzić porównanie punktu pracy zalecanego przez wytwórcę z wynikami dokonanych pomiarów. Można tego dokonać na charakterystykach pokazanych na rys. 12.

Krzywe na tym rysunku przedstawiają zależność prądu łamiącego w funkcji amplitudy pełnego prądu przełączającego dla różnych typów rdzeni [2]. Jednocześnie mamy tu wrysowane proste dla kilku wartości stosunku tych prądów, przy czym są to liczby wykorzystywane w pomiarowych ciągach prądowych, jako stosunek impulsu zakłócającego do przełączającego. Stosunek ten oznacza się zwykle symbolem R_s.

Zalecany nominalny punkt pracy powinien znajdować się w pobliżu przecięcia charakterystyki danego rdzenia z prostą dla $R_s = 0,5$. Odpowiednio prądy sprawdzania można określić biorąc najczęściej stosowaną wartość $R_s = 0,61$. Wzajemne położenie tych punktów na charakterystyce stanowi również kryterium oceny rdzenia.

Najkorzystniejsze są rdzenie takie jak 4 i 6, gdzie prąd I_b mało zmienia się w funkcji I_m, które są mniej od innych wrażliwe na zakłócenia. Często postępowanie takie prowadzi do skorygowania punktu pracy, co w re-

zultacie może poszerzyć obszar pracy pamięci /np. marginesy napięć zasilających.



Rys. 12. $I_b = f/I_m/$ dla różnych typów rdzeni

Pozostałe parametry rdzenia określamy z jego danych katalogowych, uwzględniając je następnie przy projektowaniu. Jeżeli któryś z nich jest szczególnie istotny dla danego zastosowania - uwzględniamy ten fakt przy dokonywaniu wyboru rdzenia, stosując pewien kompromis w stosunku do parametrów wyżej wymienionych. I tak np. minimalna amplituda indukowanej jedynki może być albo określona z krzywej $dV_1 = f/I_m/$ jako podstawowy parametr dla projektu wzmacniacza odczytu przy ustalonym typie rdzenia, albo też wybór rdzenia może być dokonywany dla założonej wartości tego parametru, co zwykle pociąga za sobą zastosowanie materiału o niższej sile koercji.

Określenia temperaturowego zakresu pracy pamięci można dokonać metodą graficzną przedstawioną w pracy [7]. Wykorzystuje się tu zależność sygnału indukowanego przy przełączeniu rdzenia oraz zależność stosunku prądów łamiącego i przełączającego od temperatury. Dolna temperatura graniczna jest określona poziomem sygnału wypadkowego zakłócenia. Górna zaś granica jest określona dopuszczalną minimalną wartością stosunku I_b/I_m np. 0,55.

Dla rozpatrywanego rdzenia litowego firmy RCA 233M1 uzyskiwali autorzy [7] zakres od -33°C do +95°C. Współczynnik C_1 wynosi dla tego rdzenia 0,2 mV/°C, a współczynnik zmiany stosunku I_o/I_m -1,2 . 10^{-3}. Odpowiednie wartości dla materiału standardowego /254M1/ wynoszą 0,75 mV/°C i 3,2 . 10^{-3}.

Dla płatu 4096 rdzeni 233M1 uzyskano rozrzut sygnału 38 ÷ 56mV przy -50°C i 56 ÷ 76 mV przy +100°C.

Parametry czasowe sygnałów są znacznie bardziej stabilne. Czas przełączania rośnie w podanym zakresie o 12%, a jego rozrzut zwiększa się od ± 2,8% do ± 4,4% przy temperaturach granicznych.

W tabeli II przytoczono dane odnośnie kilkunastu rdzeni, które mogą być zastosowane w pamięciach o cyklu 1 µsek i 2 µsek. Niestety, jak to już stwierdzono, producenci nie podają parametrów drugiego rzędu; próbki zaś tych wszystkich rdzeni są nieosiągalne dla dokonania pomiarów. Podane powinny być parametry pierwszego rzędu w miarę możności dla kilku amplitud prądu wzbudzającego.

Pozycje 1 ÷ 3 odnoszą się do cyklu 1 µsek, a 4 ÷ 11 – 2 µsek. Wymiary obejmują kolejno średnicę zewnętrzną, wewnętrzną i wysokość rdzenia. Widzimy, iż regułą jest stosowanie rdzeni o średnicy ok. 0,5 mm dla pamięci 1 µsek i rdzeni 0,8 mm dla cyklu 2 µsek.

Amplitudy prądu wzbudzającego wahają się w zakresie 500 ÷ 900 mA, przy czym określają one wartość czasu połączenia /ok. 0,2 µsek dla pamięci 1 µsek i 0,4 ÷ 0,5 µsek dla pamięci 2 µsek/.

Temperaturowy zakres pracy przesuwa się w górę i na ogół maleje wraz z obniżaniem się amplitudy prądu wzbudzającego. Szerokość zakresu waha się znacznie /skrajne przypadki: -36 i +122°C/ i może służyć jako kryterium oceny rdzenia, gdy są porównywalne inne parametry.

Definicje poszczególnych parametrów, warunki zdejmowania charakterystyk wraz z zalecanymi typami rdzeni dla różnych rodzajów pamięci i różnych długości cyklu pomiarowego znajdzie czytelnik w projekcie standartu RWPG dotyczącym tych zagadnień omówionym w pracy [9].

10. Podsumowanie

Celem tej pracy było przedstawienie, na podstawie dostępnej literatury, aktualnej sytuacji w dziedzinie oceny przydatności rdzeni dla pamięci ferrytowych o dużych pojemnościach i krótkich czasach cyklu. Jak wykazały rozważania z pktów 3-5, oparte głównie na pracy [2], dotychczas podawany przez producentów zespół parametrów i charakterystyk jest niewystarczający dla określenia wypadkowego zakłócenia z płatu. Można natomiast zagadnienie to rozwiązać posługując się tzw. parametrami II rzędu, które poprzez zakłócenia różnicowe pozwalają ocenić przydatność danego typu rdzenia dla pamięci o wymaganych parametrach. W punkcie 8 podano praktyczny sposób określania tych parametrów.

Dla pełniejszego wyjaśnienia związanych z tym zagadnień, określono stany remanencji w jakich może pozostawać rdzeń pamięciowy, omówiono zagadnienie tzw. "najgorszego przypadku" informacji wpisywanej do płatów pamięci o różnych konfiguracjach, a także podano za pracą [6] prawdopodobieństwo występowania tego przypadku. Ponadto nieco szerzej potraktowano zagadnienie temperaturowych zakresów pracy rdzeni.

Tabela 2. Temperaturowe zakresy pracy różnych rdzeni dla pamięci ferrytowych

Lp	Producent	Typ	Wymiary	I_m	t_r	t_d	uV_1	dV_z	t_s	t_p	zakres temp.	szerokość zakresu
			mm	mA	µs		mV		µs		°C	
1	Plessey	PC 202	0,6x0,36x0,14	710 650	0,05		52	7	0,19 0,24	0,095	-14 ÷ +32 + 5 ÷ +46	46 41
2	Ampex	204-06	0,56x0,34x0,14	800 750	0,05	0,3	59	6	0,233 0,25	0,107	-27 ÷ +61 - 7 ÷ +75	88 82
3	Philips	GH1	0,55x0,34x0,1	880 850 800	0,05	0,2	55	6	0,17 0,18 0,19	0,09	-22 ÷ +41 -20 ÷ +45 - 4 ÷ +52	63 65 56
4	Plessey	PC 305	0,81x0,51x0,19	700 650 600	0,1		64	6	0,38 0,46 0,58	0,19	-47 ÷ +35 -24 ÷ +46 - 5 ÷ +57	82 70
5	Plessey	PC 309	0,81x0,51x0,19	700 650 600	0,1		48	5	0,60 0,64 0,71	0,3	-82 ÷ +20 -35 ÷ +51 +20 ÷ +82	102 86 62
6	Plessey	PC 315	0,81x0,51x0,19	590 570 550	0,1		50	6	0,5 0,52 0,53	0,23	-22 ÷ +45 -13 ÷ +48 - 6 ÷ +53	67 61 59
7	Ampex	304-06	0,76x0,51x0,19	720 700 680	0,1	0,8	54	5	0,44 0,45 0,47	0,215	-24 ÷ +82 -15 ÷ +87 - 3 ÷ +88	106 102 91
8	Ampex	304-07	0,76x0,51x0,19	540 520	0,1	0,8	46	5,5	0,46 0,54	0,24	- 9 ÷ +71 + 6 ÷ +78	80 72
9	Ampex	303-03	0,76x0,51x0,17	720 700	0,1	0,8	44	4,5	0,36 0,375	0,2	- 4 ÷ +41 + 4 ÷ +47	45 43
10	Philips	GP2	0,82x0,5x0,165	710 680	0,1	0,5	55	5	0,42 0,43	0,22	- 9 ÷ +42 +10 ÷ +46	51 36
11	Philips	GP3	0,82x0,5x0,165	740 700	0,15	0,6	50	5	0,5 0,53	0,28	-60 ÷ +62 -16 ÷ +73	122 94

Literatura

[1] J.R. FREEMAN: Pulse Response of Ferrite Memory Cores. IRE Wescon Conv. Rec., p. 50-61, August 1954.

[2] J. REESE BROWN: First and Second-Ferrite Memory Core Characteristics and Their Relationship to System Performance. IEEE Transaction on Electronic Computers, August 1966, p. 485.

[3] J.E. KNOWLES, K. TWEEDALE: The Origin of Delta Noise in Square-Loop Ferrites. IEEE Transactions on Magnetics, vol. MAG-2, No 3, September 1966, p. 593.

[4] J. RYŹKO: System 2,5 D na tle dotychczasowego rozwoju pamięci ferrytowych. Biul. Inf. IMM Nowości Techniczne, Nr 3, 1967, str. 51-70.

[5] L. TRZASKOWSKI: Zakłócenia w płacie ferrytowej pamięci koincydencyjnej i sposoby ich zmniejszania. Prace IV Krajowej Konferencji Automatyki t. 4, Kraków, 1967, str. 194.

[6] B.R. HEARN: Statistical Probability of Worst-Case Pattern in Coincident-Current Ferrite-Core Stores. Proc. IEEE, vol. 114, No 2, February 1967, p. 187-194.

[7] H.P. LEMAIRE, H. LESSOFF, E. FORTIN: Wide-Temperature-Range Ferrite Cores for Computer Memories. RCA Review 1964, 25, Nr 2, p. 308-318.

[8] Z. WRZESZCZ, J. RYŻKO, J. DAŃDA: Projekt standardu dotyczącego materiałów, rdzeni i ramek pamięci operacyjnych EMC. Elektroniczna Technika Obliczeniowa. Nowości Nr 1/1968, str. 45-66.

Dr inż. Jacek KULIKOWSKI
Dr inż. Zygmunt SAWICKI
Mgr inż. Jan RYŻKO
Zakład Technologii Specjalnych IMM

681.327.66:621.318.134

NIESTABILNOŚĆ CZASOWA NIEKTÓRYCH WŁAŚCIWOŚCI CIENKICH CYLINDRYCZNYCH WARSTW MAGNETYCZNYCH

1. Wstęp

Ciągły postęp, jaki obserwujemy w dziedzinie rozwoju pamięci o dużych pojemnościach, i umacniająca się pozycja pamięci na drutach magnetycznych wśród perspektywicznych typów układów pamięciowych powodują intensyfikację badań podstawowych właściwości cienkich warstw magnetycznych. Zasadę pracy elementu pamięciowego w postaci cienkiej cylindrycznej warstwy magnetycznej, a także technologię wytwarzania drutu magnetycznego, konstrukcję i technologię płatów i bloku pamięci tego typu opisano w obszernej już obecnie literaturze tematu [1 - 3].

Druty magnetyczne zostały zastosowane w pamięciach operacyjnych maszyn matematycznych firmy UNIVAC /seria 9000/ i producentów japońskich /MARK-6/. Ze względu na korzystne właściwości wytrzymałościowe i małą moc potrzebną do wzbudzania znajdują one zastosowanie w urządzeniach kosmicznych, lotniczych i wojskowych. Opracowaniem i wytwarzaniem pamięci tego typu zajmuje się firma General Precision Systems, opierając się na licencji japońskiej, dotyczącej tzw. "tkanej" odmiany konstrukcji płatu. Ponadto prace nad drutami magnetycznymi podjęło kilka firm europejskich, jak Plessey, Cofelec, Bull i inne.

Podstawową zaletą cienkowarstwowego nośnika jest krótki czas przełączania, określony praktycznie czasem narastania impulsu wzbudzającego. Osiągane są czasy rzędu kilku nanosekund, co pozwala na realizację układów pamięci o małej pojemności przy cyklu kilkudziesięciu nanosekund oraz dużych pamięci o pojemności rzędu 10^6 bitów i cyklu ok. 200 ns.

Nie mniej istotną, a może nawet bardziej decydującą o kierunkach przyszłego rozwoju układów pamięciowych, jest kwestia kosztów. Szacuje się, iż cena najpowszechniej dziś stosowanej pamięci rdzeniowej nie spadnie poniżej 3 centów/bit. Przyczyną tego jest konieczność indywidualnego prasowania, a następnie sprawdzania i montowania każdego rdzenia. Natomiast opracowane technologie drutu magnetycznego pozwalają na wytwarzanie i sprawdzanie go w procesie ciągłym.

Możliwość eliminacji odcinków nie spełniających wymagań daje ponadto przewagę drutowi nad rozwiązaniami na warstwach płaskich, w których przy jednoczesnym wytwarzaniu całego płatu wszystkie elementy muszą spełniać stawiane wymagania. Cytowane źródło szacuje docelowy koszt elementu pamięciowego na drucie magnetycznym na 0,05 centa/bit.

Sprawa kosztów nośnika informacji jest szczególnie istotna w pamięciach masowych o pojemności rzędu 10^8 bitów, które coraz częściej występują w dużych maszynach.

Przy takich dużych pojemnościach niezmiernie istotny staje się problem niezawodności każdego z elementów pamięciowych, a więc ich stabilność w funkcji czasu i wszelkich parametrów zewnętrznych /temperatury, oddziaływań mechanicznych i in./. Wpływ czynników zewnętrznych na metaliczne warstwy magnetyczne jest mniejszy aniżeli w rdzeniach ferrytowych, co m.in. spowodowało zastosowanie drutów magnetycznych w urządzeniach specjalnych. Stabilnością czasową drutów magnetycznych zajmowano się dotychczas niewiele, a wydaje się, że ten właśnie problem powinien być rozpatrzony bardzo dokładnie.

Dotychczasowe prace badawcze w zakresie cienkich warstw magnetycznych koncentrowały się w następujących głównych kierunkach:

- poznania związków pomiędzy namagnesowaniem nasycenia a innymi cechami fizycznymi elementu,
- ustalenia natury anizotropii magnetycznej, a w związku z tym i źródeł jej dyspersji,
- poznania i opisania procesów namagnesowania, których charakter związany jest ściśle ze strukturą domenową warstwy.

Wydaje się, że procesy stabilizacji-destabilizacji struktury magnetycznej cienkich warstw magnetycznych wymagają dokładnych studiów, gdyż

nieznajomość tej problematyki może stanowić jedną z głównych przeszkód w opracowaniu i rozwoju pamięci z cienkowarstwowym nośnikiem informacji. Potwierdzeniem tego są sygnalizowane nieoficjalnie tego właśnie rodzaju trudności, na jakie natrafiły firmy produkujące pamięci na drutach magnetycznych. Nie było to niespodzianką, gdyż zmian czasowych spodziewać się było można jako następstwa zarówno technologicznego procesu wytwarzania, który nie zapewnia pełnej stabilizacji struktury magnetycznej, jak i wpływu impulsów wzbudzających, które, jak pokazują m.in. niektóre z przytoczonych z literatury wyników doświadczalnych, mogą stać się źródłem procesu destabilizacji istniejącej struktury.

Artykuł niniejszy zawiera określenia podstawowych pojęć z zakresu niestabilności czasowej, klasyfikację występujących tu procesów, pewne podstawy teoretyczne i wyniki eksperymentów /wraz z ich interpretacją/, uzyskanych przez różnych autorów w tej dziedzinie.

2. Opóźnienie magnetyczne a tzw. zjawisko starzenia

Obserwacja ferromagnetyków wykazuje, iż ich właściwości mogą zmieniać się w czasie w stopniu zależnym od składu chemicznego, struktury krystalicznej i magnetycznej, rodzaju i ilości domieszek, temperatury otoczenia oraz innych czynników. Najczęściej zauważalne zmiany, to spadek indukcji magnetycznej, wzrost współczynnika strat oraz wzrost przesunięcia fazowego między natężeniem pola a wywołaną nim indukcją.

Zmiany te mogą być obserwowane w krótkich /sekundy - godziny/ lub długich i bardzo długich /miesiące - lata/ przedziałach czasu. Te ostatnie, bez względu na ich charakter i pochodzenie, przyjęto nazywać efektem starzenia, co zresztą nie jest ścisłe. W rzeczywistości bowiem procesami starzenia nazywamy procesy nieodwracalne, podczas gdy w większości omawianych zmian pierwotny stan próbki można uzyskać przez jej rozmagnesowanie. Zmiany odwracalne, zwane opóźnieniem magnetycznym, są najczęściej następstwem procesów dyfuzyjnych: jonowych lub elektronowych. Natomiast zmiany nieodwracalne powstają pod wpływem zmian składu chemicznego, deformacji plastycznych itp.

Opóźnienie magnetyczne dzielimy na opóźnienie typu jordanowskiego /niezależne od temperatury zmiany namagnesowania nasycenia/ oraz opóźnienie typu richtarowskiego, które jest określone procesem stabilizacji

struktury domenowej. Intensywność tego drugiego rodzaju opóźnienia zależna jest od wielkości i rodzaju wymuszeń, temperatury oraz stężenia defektów /zanieczyszczeń, wtrąceń, wakansów/. Również prądy wirowe mogą być źródłem zmian czasowych w przypadku elementów metalicznych, nie ma to jednak większego znaczenia w odniesieniu do warstw cienkich.

Biorąc pod uwagę sposób otrzymywania elementów cienkowarstwowych oraz ich właściwości fizyko-chemiczne, opóźnienie typu richterowskiego, czyli dyfuzyjnego, odgrywa istotną rolę w procesie zmian czasowych parametrów elementów magnetycznych.

3. Dyfuzyjne opóźnienie magnetyczne

Istotą dyfuzyjnego opóźnienia [5] jest to, iż zmiany namagnesowania lub przenikalności dążą do określonej granicy, gdy czas dąży do nieskończoności. Występuje przy tym wyraźna zależność procesu od temperatury. Ponadto opóźnienie to występuje nie we wszystkich ferromagnetykach, a jego efekty podlegają zasadzie superpozycji.

Źródłem jego jest kierunkowe uporządkowanie defektów. Położenia, w których mogą umiejscowić się migrujące defekty, posiadają określoną symetrię wobec sieci krystalicznej. W większości przypadków położenia defektów o równoważnej symetrii są równoważne także pod względem energetycznym. Powodem migracji jest anizotropowe oddziaływanie między defektami a spontanicznym namagnesowaniem. Według Néela [6] energię tego oddziaływania można wyrazić zależnością:

$$E = w \cos^2 \varphi, \qquad /1/$$

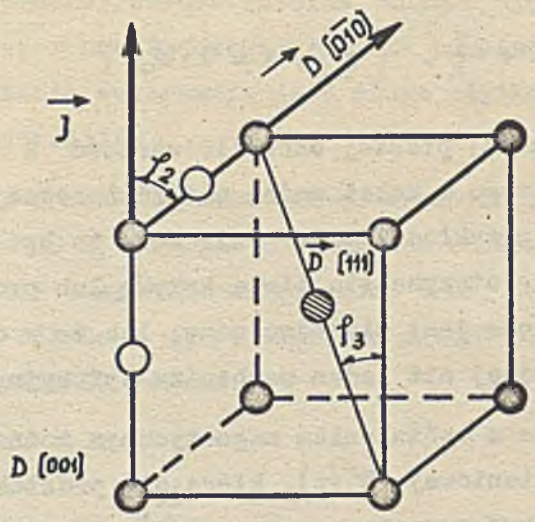
w której

- w - jest stałą, odpowiadającą elementarnemu oddziaływaniu, charakterystycznemu dla danego rodzaju defektów,
- φ - jest kątem między kierunkiem spontanicznego namagnesowania $\vec{J}$ w krysztale a osią symetrii położenia defektu $\vec{D}$.

Na rys. 1 defekty o różnych osiach symetrii tworzą różne kąty z przyjętym kierunkiem namagnesowania $\vec{J}$ [001]:

$$\varphi_1 = \sphericalangle\left(\vec{J}, \vec{D}_{[001]}\right) = 0^\circ,$$
$$\varphi_2 = \sphericalangle\left(\vec{J}, \vec{D}_{[010]}\right) = 90^\circ, \qquad /2/$$

$$\varphi_3 = \sphericalangle\left(\vec{J}, \vec{D}_{[111]}\right) = 54^{\circ}40'.$$



Rys. 1. Schematyczny przykład położenia defektów o osiach symetrii tworzących różne kąty z kierunkiem $\vec{J}$ /przyjętym tu zgodnie z osią [100] /

W przypadku żelaza α, zawierającego atomy węgla, oddziaływanie to charakteryzuje się, jak wykazał Néel [5], energią o rząd wielkości większą od tej, jaką można by przypisać wpływom zjawisk magnetostrykcyjnych.

Przejście od stanu izotropowego /statystycznego/ do stanu uporządkowania wymaga pewnego czasu, zwanego czasem relaksacji, Θ. Zależy on od temperatury materiału oraz wysokości barier potencjału, jakie muszą być pokonane przez dyfundujące defekty. Zależność między tymi wielkościami opisuje się równaniem, charakteryzującym prędkość reakcji chemicznej w funkcji temperatury /tzw. równanie Arrheniusa/:

$$\Theta = \Theta_{\infty} \cdot \exp \frac{E}{kT}, \qquad /3/$$

w którym

Θ_{∞} - współczynnik proporcjonalności /$\Theta \to \Theta_{\infty}$, gdy $T \to \infty$/,

k - stała Boltzmana,

E - energia aktywacji, wyrażająca tu wysokość bariery potencjału migrującego defektu,

T - temperatura w stopniach Kelvina.

Wyznaczając wartości Θ dla kilku niezbyt odległych od siebie temperatur i przedstawiając otrzymane wyniki w postaci

$$\ln \Theta = A + \frac{E}{k} \cdot \left(\frac{1}{T}\right), \quad A = \ln \Theta_{\infty}, \qquad /4/$$

można z nachylenia otrzymanej prostej określić wartość E dla danego przedziału temperatur. Z tego z kolei można sądzić o rodzaju elementów dyfundujących. Jeżeli na przykład $E \approx 1eV$, nie może to być dyfuzja elektronów. Jeżeli na wykresie otrzyma się linię krzywą lub prostą łamaną, świadczy to o tym, że proces jest niejednorodny, lub że w danym przedziale temperatur istnieje więcej niż jeden mechanizm dyfuzyjny.

Zmiany czasowe związane z opóźnieniem magnetycznym można opisać przy pomocy tzw. funkcji opóźnieniowej $\Psi(t)$, która dla prostokątnego rozkładu energii aktywacji bywa oznaczana przez $G(t)$ i przybiera postać

$$\Psi(t) \longrightarrow G(t) =$$

$$= 1 + \frac{1}{\ln \frac{\Theta_2}{\Theta_1}} \left[E_1 \left(-\frac{t}{\Theta_2}\right) - E_1 \left(-\frac{t}{\Theta_1}\right) \right], \qquad /5/$$

gdzie Θ_1 i Θ_2 - skrajne wartości widma czasu relaksacji.

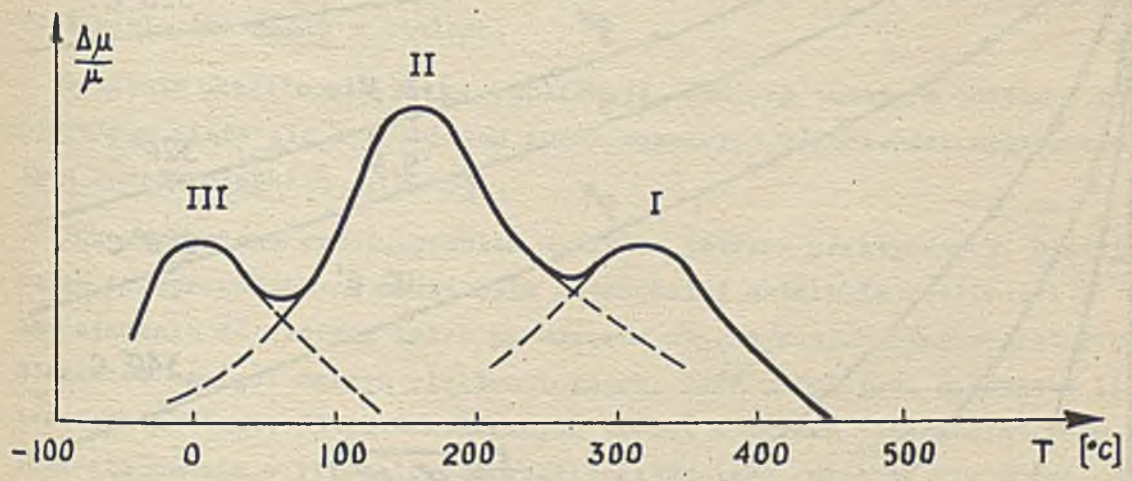
$$E_i \left(-\frac{t}{\Theta}\right) = -\int_{\frac{t}{\Theta}}^{\infty} \frac{e^x}{x}\, dx, \qquad \left(x = \frac{t}{\Theta}\right) \qquad /6/$$

jest całkową funkcją wykładniczą, której wartości można znaleźć w tablicach matematycznych.

Dość szczegółowo mechanizm opóźnienia magnetycznego został zbadany w ferrytach bogatych w żelazo, a więc charakteryzujących się z reguły znacznym stężeniem luk kationowych. Wyniki tych badań będą w dużym skrócie streszczone poniżej. W zakresie temperatur dodatnich stwierdza się na ogół istnienie trzech odrębnych mechanizmów opóźnienia, różniących się przede wszystkim energią aktywacji oraz zbiorem czasów relaksacji.

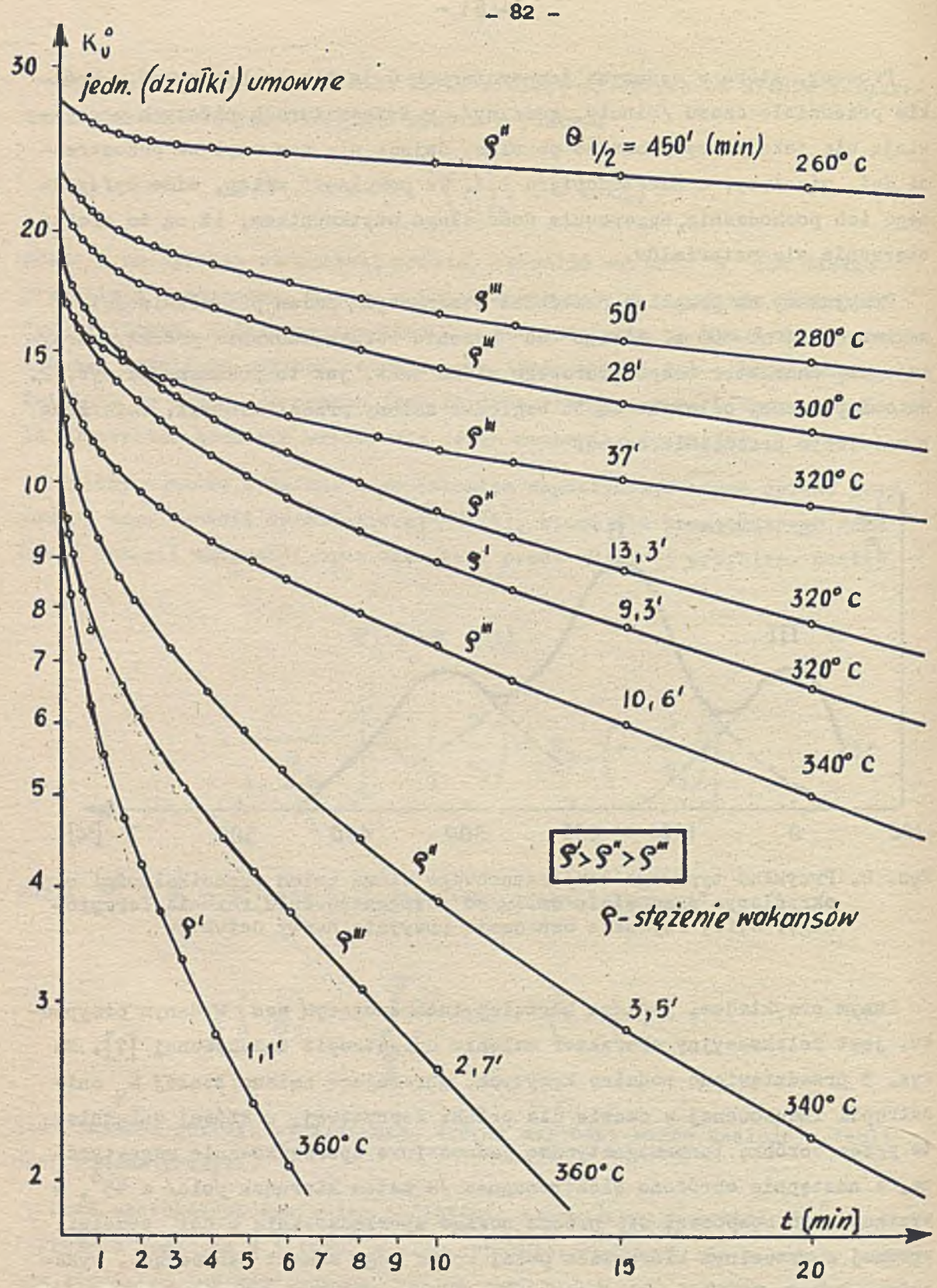
Procesy, które w wyższych temperaturach dają się zaobserwować w krótkim przedziale czasu /minuty, godziny/, w temperaturach niższych przejawiają się jako procesy bardzo powolne, dające się zauważyć na przestrzeni dni, miesięcy, a nawet dopiero lat. Ta powolność zmian, mimo dyfuzyjnego ich pochodzenia, sugerowała dość długo użytkownikom, iż są to efekty starzenia się materiałów.

Przyjąwszy na przykład przedział obserwacji zmian przenikalności magnetycznej 10-100 s, licząc od momentu rozmagnesowania próbki, otrzymuje się charakter temperaturowego widma taki, jak to pokazano na rys. 2. Na osi pionowej odłożone są tu względne zmiany przenikalności, zmierzone w ustalonym przedziale czasu.



Rys. 2. Przykład typowego temperaturowego widma zmian przenikalności o określonym przedziale czasu po rozmagnesowaniu rdzenia ferrytowego. Cyfry rzymskie oznaczają przyjęte nazwy defektów

Innym przykładem, jeszcze bardziej interesującym nas w danym przypadku, jest relaksacyjny charakter malenia anizotropii indukowanej [7]. Na rys. 3 przedstawiono rodzinę krzywych, obrazującą zmianę stałej K_u anizotropii indukowanej w czasie dla próbki ferrytowej, w której osiągnięto przez obróbkę termomagnetyczną jednoosiowe uporządkowanie magnetyczne, a następnie obrócono elektromagnes /a zatem kierunek pola/ o 45^o, w wyniku czego rozpoczął się proces nowego uporządkowania o osi symetrii zgodnej z aktualnym kierunkiem pola; wobec tego moment skręcający, wykazujący dotąd przy tym położeniu wartość maksymalną, zdąża do zera.



Rys. 3. Przykład zmian w czasie stałej K_u anizotropii indukowanej ferrytu po wygrzaniu próbki w polu magnetycznym, a następnie obróceniu kierunku pola o 45°. Krzywe odnoszą się do rdzeni o różnym stężeniu wakansów oraz do różnych temperatur pomiaru [7].

Szybkość zmian jest tym większa, im wyższa jest temperatura badanej próbki i im większe jest w niej stężenie wakansów. Podobnych zjawisk należy oczekiwać również w elementach permalojowych, z tym, że tu w skład materiału nie wchodzi tlen, którego zawartość decyduje w przypadku ferrytów o stężeniu luk kationowych.

W związku z tym źródła defektów w materiałach metalicznych należy szukać również w zdefektowaniu struktury krystalicznej i obecności wtrąceń obcych atomów /m.in. i tlenu/. Brak było jednak do niedawna w dostępnej literaturze fachowej danych na temat czasowych zmian właściwości magnetycznych w odniesieniu do materiałów metalicznych. Istniejące dane odnoszą się przeważnie do zmian współczynnika strat lub indukcji magnetycznej, przy czym w większości przypadków omawiane zależności dotyczą roli węgla lub azotu w stalach.

Ostatnio ukazało się kilka publikacji, których tematyka ściśle lub pośrednio wiąże się z problemem zmian czasowych właściwości magnetycznych warstw cienkich [8-13].

Jak wspomniano wyżej, problem wynikł z potrzeb praktycznych. Dlatego celem przeprowadzonych badań było najczęściej ustalenie możliwości zmniejszenia do minimum zmian parametrów magnetycznych cienkowarstwowych elementów pamięci maszyn elektronicznych. Dość uboga jest natomiast literatura na temat fizyko-chemicznych źródeł zjawiska "starzenia". Sam fakt stosowania w literaturze określenia "aging", mimo że nie można tu wykluczyć istnienia procesów odwracalnych, świadczy o braku pełnego rozeznania co do natury mechanizmu czasowych zmian właściwości magnetycznych warstw cienkich.

Zadaniem dalszych naszych rozważań będzie przeprowadzenie próby wstępnej analizy podstawowych zależności i zjawisk fizycznych, które mogą mieć związek z obserwowanymi w praktyce objawami niestabilności czasowej elementów cienkowarstwowych.

4. Analiza przyczyn niestabilności czasowej permalojowych warstw cienkich

4.1. Niektóre dane doświadczalne

Badania Flakera i Kopsera [8], przeprowadzone m.in. na kształtkach cylindrycznych, których podłożem było szkło pokryte cienką warstewką złota i których magnetyczna warstwa cienka była wykonana z permaloju o

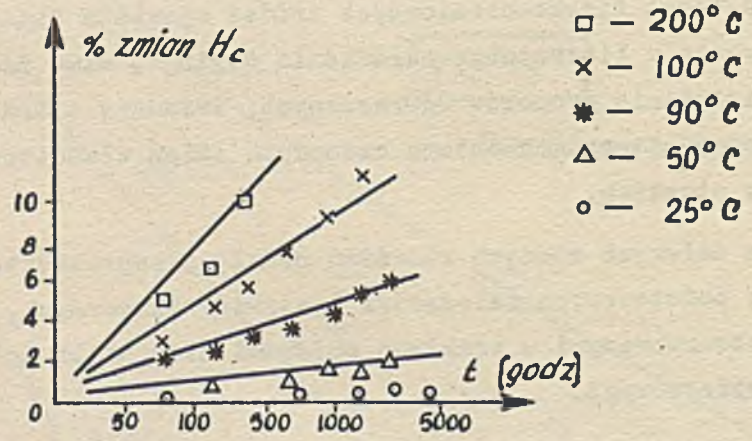
zaw. 81% Ni, wykazały, że z biegiem czasu zmienia się kształt pętli histerezy. Wiązało się z tym wzrastanie wartości H_c i zanikanie anizotropowego charakteru elementu. Zmiany H_c były proporcjonalne do czasu składowania wyrażonego w skali logarytmicznej, przy czym zależność $\Delta H_c = f(t)$ była tym wyraźniejsza, im wyższa była temperatura składowania, a mianowicie

$$\Delta H_c = k \cdot \log at, \qquad (t > 1), \qquad /7/$$

k - współczynnik proporcjonalności, zależny m.in. od temperatury,

a - stała.

Wyniki badań w okresie 4000 godzin w zakresie temperatur 25°C - 200°C zostały przedstawione na rys. 4. Sprawdzono również wpływ wilgotności na wielkość zmian H_c. Doświadczenia wykazały, iż jest on nieznaczny i w porównaniu z wpływem wahań temperatury jest prawie do pominięcia /zmiany H_c są zaledwie o ok. 5% większe w porównaniu ze zmianami w ośrodku suchym/. Po 900-godzinnym przebywaniu warstwy cienkiej /płaskiej/ w 200°C kształt pętli histerezy ma prawie jednakowy charakter bez względu na zastosowany kierunek pola magnesującego. Stwierdzono również, że większe zmiany wykazują warstwy o mniejszej grubości.



Rys. 4. Zmiany czasowe natężenia powściągającego permalojowego elementu cylindrycznego, mierzonego przy różnych temperaturach /wg [8]/. H_c określano metodą impulsową, jako natężenie pola, przy którym uzyskuje się połowę wartości strumienia osiąganego przy pełnym przemagnesowaniu.

Chang i inni [9] badali zmiany czasowe H_k, H_c oraz wypadkowego kierunku magnetyzacji i jej dyspersji w elementach cylindrycznych o grubości warstwy 1 μ, naniesionej elektrolitycznie na drut Be-Cu o średnicy 125 μ. Badania przeprowadzono w okresie 100 godzin w temperaturze pokojowej i +55°C - przy stosowaniu różnego sposobu magnesowania mierzonych elementów. Elementy te charakteryzowały się $H_k \approx 3$ Oe, $H_c = 1{,}2 - 2{,}0$ Oe, kątem dyspersji równym ok. 1,5°, a odchyleniem $\vec{J}_s$ od kierunku teoretycznego mniejszym niż 0,6° - a więc parametrami, które pozwalają uznać badane elementy za typowe.

Pomiary wykonano bezpośrednio po wyprodukowaniu badanych elementów lub po 20-godzinnym ich wygrzaniu w 120°C w polu 6 Oe, o kierunku zgodnym z kierunkiem łatwego magnesowania.

Otrzymane wyniki wykazały, że:

1. Proces "starzenia" w polu o kierunku trudnego magnesowania przy natężeniu $H \leqslant H_k$ powoduje znaczny wzrost dyspersji wektora namagnesowania oraz malenie natężenia powściągającego H_c i pola anizotropii H_k.

2. Działanie przez dłuższy okres pola magnesującego zgodnego z kierunkiem łatwego magnesowania może spowodować zwiększenie się odchylenia wypadkowego wektora magnetyzacji od kierunku wynikającego z geometrii elementu.

3. Pod wpływem pola zewnętrznego - zmiennego lub stałego - działającego w kierunku zgodnym z osią trudnego magnesowania zmniejsza się pole anizotropii w sposób pozwalający na określenie czasu procesu.

4. Zmiany większości parametrów pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego /dla temp. 55°C/ zachodzą przede wszystkim w przedziale pierwszych 48 godzin; dalsze "starzenie" nie wpływa istotnie na stabilność czasową właściwości magnetycznych badanych elementów.

Najważniejszym chyba jednak wnioskiem autorów jest możliwość zmniejszenia zmian czasowych przez zastosowanie, po wyprodukowaniu elementów cienkowarstwowych, obróbki termomagnetycznej. Polega ona na wygrzewaniu elementów w temperaturze +120°C w polu magnetycznym o kierunku zgodnym z kierunkiem pola stosowanego podczas procesu wytwarzania.

Podobne próby zostały wykonane również przez Rabinovici i współpracowników [10] w temperaturze 250°C, przy czym wygrzewanie przeprowadzono w

atmosferze azotu. Wyniki mówią, że te elementy, które charakteryzowały się małym kątem odchylenia wypadkowego wektora magnetyzacji od kierunku teoretycznego oraz mniejszą jego dyspersją, wykazywały później mniejsze zmiany tych parametrów w czasie.

Inni autorzy [8] wykazali, że niekorzystne skutki działania impulsów pola zewnętrznego o kierunku prostopadłym do osi łatwego magnesowania mogą być usunięte w wyniku zastosowania analogicznych impulsów o kierunku zgodnym z kierunkiem łatwego magnesowania, działających przez ten sam okres i przy tej samej temperaturze elementu.

Również rezultaty badań Girarda [11] potwierdziły duży wpływ temperatury i kierunku zastosowanego pola na intensywność zmian czasowych magnetycznych warstw cienkich. I tak na przykład zmiany dyspersji po 100 minutach w następstwie działania przez ten okres pola o kierunku prostopadłym do osi łatwego namagnesowania są w temperaturze 120°C przynajmniej o rząd większe niż dla 60°C i kilkakrotnie większe niż przy 90°C.

Jeżeli jednak w tej najkorzystniejszej temperaturze działa pole o kierunku równoległym do osi łatwego namagnesowania, to zmian czasowych w ogóle nie dostrzega się. Co ważniejsze, o ile obecność tego rodzaju oddziaływania utrzymać przez dłuższy okres /na przykład rzędu 1000 minut/, a następnie ponownie zastosować pole o kierunku wzdłuż osi trudnego magnesowania, zmiany dyspersji będą wielokrotnie mniejsze niż wówczas, gdy doświadczenie to przeprowadzano bez uprzedniego "wygrzewania" elementu w polu o kierunku zgodnym z kierunkiem łatwego magnesowania.

4.2. Źródła niestabilności magnetycznych warstw cienkich

Przyczyn powodujących zmiany czasowe parametrów magnetycznych warstw cienkich może być wiele. Które z nich odgrywają największą rolę, trudno w tej chwili przesądzić, choćby dlatego, że nie wiadomo, czy obserwowane dotąd zmiany są w pełni czy tylko częściowo odwracalne.

Źródłem niestabilności czasowej mogą być przede wszystkim procesy dyfuzyjne zachodzące w materiale. Anizotropia indukowana w elementach cienkowarstwowych jest, przynajmniej w głównej mierze, następstwem uporządkowania magnetycznego. Według Takahashi [12] jest to uporządkowanie raczej pojedynczych wtrąceń, dyslokacji, wakansów, a nie par atomowych, za czym przemawia fakt, że energia aktywacji procesu ma wielkość rzędu 1 eV, podczas gdy dla par atomowych wynosi ona około 2 eV.

Jednym z elementów dyfundujących lub ułatwiających dyfuzję jest tlen. Świadczy o tym fakt, że w przypadku wygrzewania elementu cienkowarstwowego w atmosferze obojętnej, stabilność czasowa jego właściwości magnetycznych w czasie wzrasta [10] /tlen dostaje się do materiału w czasie elektrolizy/.

Przemieszczanie się /migracja/ poszczególnych atomów lub wakansów może wynikać również z niejednorodności warstwy. Jak wiadomo, z powiększaniem się grubości warstwy zmniejsza się w niej stosunek zawartości Fe do Ni [11]. Samoistny proces homogenizacji pociąga za sobą nie tylko zmiany w strukturze magnetycznej materiału, ale jest również powodem zmian magnetostrykcji, co pośrednio wpływa m.in. na dyspersję wektora magnetyzacji.

Należy przypuszczać, że obróbka termomagnetyczna elementów cienkowarstwowych przyśpiesza proces homogenizacji, a jednocześnie, przy dostatecznie wysokiej temperaturze, może doprowadzić do uporządkowania typu par atomowych. Stan ten, po zamrożeniu w niższych temperaturach, może okazać się trwały. Ma to wpływ na stałość czasową właściwości związanych z anizotropią indukowaną /jednoosiową lub "kołową"/. Przemawiają za tym oba przytoczone uprzednio fakty, to znaczy, że:

1. Zmiany czasowe dyspersji magnetyzacji pod wpływem pola działającego w kierunku "trudnym" rosną wyraźnie ze wzrostem temperatury.

2. Zmiany te są znacznie mniejsze, gdy próbka znajdowała się uprzednio w polu o kierunku łatwego namagnesowania.

Z niejednorodnością warstwy związane jest również natężenie pola powściągającego oraz pola anizotropii. Stąd obie te wielkości zmieniają się w wyniku malenia gradientu zawartości Fe i Ni wzdłuż osi prostopadłej do powierzchni warstwy.

Jak wspomniano na wstępie, sam proces wytwarzania elementów cienkowarstwowych nie zapewnia otrzymania warstw o trwałych właściwościach fizyko-chemicznych. Wynika to nie tylko z niejednorodności materiału, istnienia nieuporządkowanych defektów, ale również i z obecności składników występujących w elektrolizie lub wydzielających się w czasie elektrolizy. Odnosi się to m.in. do wodoru, który może być absorbowany przez katodę, jak i związków organicznych inkludujących się w permaloju, a następnie rozkładających się powoli już podczas pracy gotowego elementu.

Osobne zagadnienie stanowi obecność związków siarki [13], wynikająca stąd, że zarówno nikiel jak i żelazo wprowadzane są do elektrolitu w postaci siarczanów $FeSO_4$ i $NiSO_4$.

Nie można również pominąć możliwości wpływu dyfuzji atomów miedzi z podłoża /drutu/ do warstwy permalojowej. Według Neidy i Hagedorna [14] w warstwach otrzymanych przez napylanie zjawisko to w pewnych warunkach może mieć istotne znaczenie.

4.3. Proponowane kierunki badań

Jednym z głównych celów prac doświadczalnych powinno być w danym wypadku wyjaśnienie, w jakim stopniu opisane dotąd zjawiska są odwracalne. Sprawdzić to można przez pomiar trzech identycznych grup drutów magnetycznych po pewnym czasie, z tym, że przed pomiarem elementy jednej grupy przez cały okres zostają składowane /w stałych warunkach klimatycznych/, podczas gdy próbki drugiej grupy magnesowane są /w ustalony ściśle sposób/ impulsami pola o kierunku zgodnym z kierunkiem łatwego magnesowania. Natomiast próbki trzeciej grupy magnesowane są impulsami pola o kierunku zgodnym z osią trudnego magnesowania, przy czym część z nich po każdej serii tego rodzaju przemagnesowania zostaje przemagnesowana w analogiczny sposób, lecz polem o kierunku zgodnym z kierunkiem łatwego namagnesowania.

Porównanie ze sobą wyników pomiaru pozwoli ustalić w jakim stopniu pole zewnętrzne przyśpiesza /lub opóźnia/ zmiany czasowe i czy zmiany te są odwracalne. Pomiary powinny obejmować takie wielkości jak H_c, H_p i dyspersję wektora magnetyzacji.

Problem ustalenia wpływu zanieczyszczeń, wtrąceń, wakansów, wpływu przenikania atomów miedzi do warstwy permalojowej oraz grubości i niejednorodności warstwy wymaga przeprowadzenia następujących wstępnych badań:

1. Pomiaru zmian czasowych właściwości próbek:
   a. utlenionych,
   b. nie zawierających tlenu,
   c. poddanych uprzednio procesowi częściowej redukcji.
2. Wykonania dokładnej analizy chemicznej próbek:
   a. o różnej grubości,

b. różniących się warunkami procesu chemicznego przy ich otrzymywaniu; na próbkach tych należy przeprowadzić uprzednio pomiary stabilności czasowej ich parametrów magnetycznych.

3. Porównania ze sobą stabilności próbek o podłożu miedzianym ze stabilnością próbek o podłożu ze szkła, platyny, aluminium itp.

5. Podsumowanie

Zmiany czasowe parametrów magnetycznych elementów cienkowarstwowych mogą stanowić jedno z ograniczeń w zastosowaniu ich do stabilnych pamięci. Przeprowadzone dotąd doświadczenia przez różnych autorów nie wyjaśniają od podstaw przyczyn zjawisk niestabilności czasowej, wykazują jednak, że możliwe jest wydatne jej zmniejszenie. W związku z tym należy liczyć się z koniecznością przeprowadzenia w tej dziedzinie szeregu prac podstawowych według ściśle opracowanych przy tym programów badań. Warunkiem nie podlegającym tu dyskusji jest zabezpieczenie w jak najkrótszym okresie możliwości otrzymywania żądanych elementów oraz posiadania odpowiedniej aparatury pomiarowej [1)].

Literatura

[1] R.T. LONG: Electrodeposited Memory Elements for Nondestructive Memory. Journal of Appl. Phys., suppl. to vol. 30,5 /1960/, 120.

[2] Z. SAWICKI, J. RYŻKO: Podstawowe właściwości cienkich warstw magnetycznych stosowanych w pamięciach EMC. Biuletyn Informacyjny IMM, Nowości Techniczne nr 4/16, listopad 1967, 3.

[3] Z. SAWICKI: Bloki nośnika informacji na drutach magnetycznych pamięci EMC. Biuletyn Informacyjny IMM, Nowości Techniczne nr 3/45 /1967/, 3.

[4] O. MAYNE: What is Next in Memories. Datamation 2 /1968/, 30.

[5] L. NÉEL: Le trainage magnétique. Journ. Phys. Rad. 12, 3 /1951/, 339.

[6] L. NÉEL: Théorie du trainage magnétique de diffusion ibid. 13, 5 /1952/, 249.

---

1) Program badań oraz związane z tym potrzeby szczegółowe /niezależnie od dokonywanych już ustaleń wstępnych/ będą przedmiotem następnego opracowania.

[7] J. KULIKOWSKI: Uporządkowanie magnetyczne w ferrytach o strukturze spinelu. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 1966.

[8] R.C.FLAKER, F.J. KOPSER: Long-Term Aging of Thin Films of Nickel-iron. 1963. Intermag Conference 12-6-1.

[9] J.T.CHANG, U.F. GIANOLA, M.W. SAGAL: Aging and Stabilisation of Electrodeposited Cylindrical Thin Films. Journal of Appl. Phys. Jap. 35, 3 /1964/, 830.

[10] B. RABINOVICI, C.A. RENTON: Some Aging Properties of Cylindrical Electrodeposited Permalloy Memory Wires. IEE Trans. on Magnetics Mag-2, 3 /1966/, 205.

[11] GIRARD: The Electrodeposition of Thin Magnetic Permalloy Films. Journ. Appl. Phys. 38, 3 /1967/, 1423.

[12] MINORA TAKAHASHI: Induced Magnetic Anisotropy of Evaporated Films Formed in a Magnetic Field. Journ. Appl. Phys. 33 /1962/, 1101.

[13] F.E. LUBORSKY: Magnetic Properties and Annealing Behaviour of Electrodeposited Ni Fe S Thin Films. Journ. Appl. Phys. 38, 3 /1968/, 1445.

[14] A.R. NEIDA, F.B. HAGEDORN: Cu Diffusion in Electrodeposited Permalloy Films. Journ. Appl. Phys. 33 /1962/, 1436.

Dr Antoni KWIATKOWSKI
Pracownia Magnetochemii IMM

621.318.134:539.23

METALICZNE WARSTWY MAGNETYCZNE WYTWARZANE W PROCESIE CHEMICZNEGO OSADZANIA BEZPRĄDOWEGO

Zwiększanie gęstości rejestracji w pamięciach bębnowych i dyskowych to jeden z zasadniczych czynników podnoszących walory użytkowe tych urządzeń. Ze względu na naturę fizyczną procesu rejestracji konieczne jest stosowanie warstw magnetycznych o grubości pojedynczych mikronów i charakteryzujących się odpowiednimi wartościami parametrów magnetycznych. Opracowanie warstw tego rodzaju wymaga pokonania trudności nie tylko teoretycznych, wynikających z małej znajomości procesów fizycznych, towarzyszących rejestracji, ale również trudności w dziedzinie technologii wytwarzania takich warstw oraz miernictwa ich właściwości fizycznych /w tym magnetycznych/.

Właściwości magnetyczne γ- Fe_2O_3 oraz znane i stosowane technologie wytwarzania warstw magnetycznych dla pamięci bębnowych i dyskowych nie dają w chwili obecnej możliwości zmniejszenia grubości warstwy poniżej 3 µm bez istotnego obniżenia tych parametrów magnetycznych, które decydują o jej przydatności w wymienionych pamięciach. Jeżeli przyjąć, że pojedyncze ziarna γ- Fe_2O_3 mają wymiary rzędu dziesiątych części mikrona i wykazują skłonność do tworzenia skupisk /aglomeratów/, to uzyskanie warstw posiadających w przekroju zaledwie kilka ziarn i to bardzo równomiernie rozmieszczonych stwarza dla technologii pokrywania bębnów i dysków problemy praktycznie bardzo trudne do rozwiązania.

Magnetyczne warstwy metaliczne, w porównaniu z warstwami zawierającymi tlenki magnetyczne, wykazują szereg korzystnych cech, do których można zaliczyć:

- możliwość uzyskiwania warstw o grubości pojedynczych mikronów, a nawet poniżej 1 µm,

- znacznie wyższe liczbowo /przy takich samych grubościach/ wartości takich parametrów pętli histerezy magnetycznej, jak: siła koercji /H_c/, pozostałość magnetyczna /B_r/ i współczynnik prostokątności pętli /B_r/B_m/,
- znacznie większą twardość, a zatem odporność na uszkodzenia mechaniczne.

Pewne zagadnienia z tej dziedziny omówione zostały w pracy [1].

Poniżej przedstawiona zostanie metoda wytwarzania magnetycznych warstw metalicznych w procesie chemicznego osadzania bezprądowego z roztworów wodnych soli odpowiednich metali.

Zarys metody jest następujący: Do wodnego roztworu o złożonym składzie chemicznym, który zawiera między innymi jony metali ferromagnetycznych, mających utworzyć warstwę, wprowadzany jest przedmiot podlegający metalizowaniu, wykonany z metalu, np. aluminium lub tworzywa sztucznego, np. żywicy epoksydowej lub mylaru. Powierzchnia tego przedmiotu musi posiadać zdolność katalitycznej redukcji, to znaczy powinna umożliwiać przekształcanie obecnych w roztworze jonów metali w postać atomową. Uzyskana w ten sposób cienka warstwa metaliczna posiada właściwości autokatalityczne, to znaczy umożliwia dalsze przekształcanie na swojej powierzchni jonów metali w atomy, które pogrubiają warstwę. Autokatalityczne właściwości metalicznego kobaltu, niklu i żelaza są spowodowane tym, że występująca w ich atomach niekompletna podpowłoka 3d wykazuje tendencje do odbierania elektronów z otaczającego środowiska [3].

Podlegające pokryciu warstwą metalu powierzchnie z reguły nie wykazują odpowiednich właściwości katalitycznych i muszą być we wstępnej fazie procesu odpowiednio przygotowane. Pierwszą czynnością jest nadanie im zdolności dobrego zwilżania przez roztwory wodne, to znaczy właściwości hydrofilowych. Sposób hydrofilacji powierzchni zależny jest od natury chemicznej popokrywanego warstwą magnetyczną przedmiotu. Tak np. powierzchnie metali trawi się w odpowiednich kwaśnych lub alkalicznych kąpielach. Tworzywa sztuczne, np. mylar, zanurza się do gorącego roztworu kwasu siarkowego, zawierającego bezwodnik kwasu chromowego, a następnie po dokładnym opłukaniu wodą w gorącym roztworze ługu sodowego. Przygotowaną tym sposobem powierzchnię zmywa się dokładnie wodą destylowaną.

Uaktywnianie powierzchni składa się z dwóch procesów: uczulającego i aktywującego /4/. W celu uczulenia zanurza się metalizowany przedmiot do roztworu chlorku cynawego, a następnie dla uaktywnienia jego powierzchni do roztworu chlorku palladu. Celem tych zabiegów jest wytworzenie na pokrywanej powierzchni warstwy metalicznego palladu, który spełnia rolę katalizatora, inicjującego proces odkładania warstwy magnetycznej.

Skład kąpieli metalizującej według Fisher'a i Chilton'a /5/ dla wytworzenia warstwy kobaltowo-fosforowej jest następujący:

- siarczan kobaltawy sześciowodny 0,031 mol/l,
- podfosforyn sodowy jednozasadowy, jednowodny 0,033 " ,
- chlorek amonowy 0,23 " ,
- kwas cytrynowy 0,093 " ,
- sól sodowa siarczanu laurylu 0,0145 g/l ,
- ług sodowy w ilości niezbędnej dla uzyskania pH = 8,2 w temperaturze 50°C. Temperatura osadzania warstwy wynosi 80°C.

Według Brenner'a i Riddell'a /2/ skład kąpieli metalizującej dla wytworzenia warstwy kobaltowo-fosforowej jest nieco inny:

- siarczan kobaltawy 0,11 mol/l,
- podfosforyn sodowy jednozasadowy 0,19 " ,
- siarczan amonowy 0,50 " ,
- cytrynian sodowy /Na_3/ 0,12 " ,
- ług sodowy w ilości niezbędnej dla uzyskania pH = 8,7 w temperaturze 50°C. Temperatura osadzania warstwy metalicznej wynosi 80°C.

Grubość osadzanej warstwy jest funkcją czasu jej osadzania: warstwa do grubości 700 Å narasta w ciągu 3 minut trwania procesu, przy czym w miarę wzrostu grubości warstwy zmienia się struktura oraz wzrasta chropowatość jej powierzchni. Zmniejsza to jednorodność warstwy, a co za tym idzie i jej walory użytkowe.

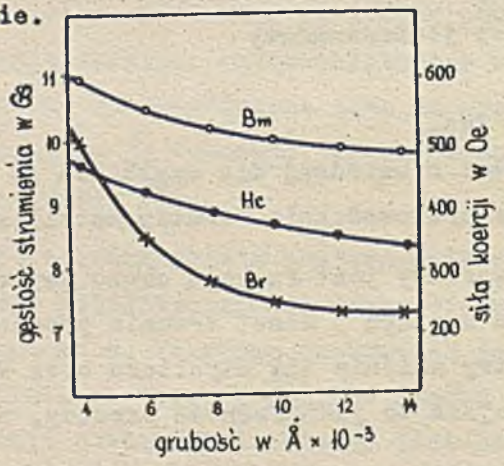
Wpływ grubości warstwy i wielkości ziarna na wartość siły koercji przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wielkość ziarna i siła koercji cienkich warstw kobaltu, uzyskiwanych w procesie chemicznego osadzania bezprądowego

Grubość warstwy /Å/	Wielkość ziarna /μm/	Siła koercji /Oe/
700	0,1	650
1200	0,2	600
2300	0,45	500

Na rys. 1 przedstawiono zależność siły koercji, pozostałości magnetycznej i indukcji maksymalnej warstwy kobaltu od jej grubości.

Warstwy kobalt-fosfor wytwarzane w opisanych wyżej procesach zawierają fosfor w ilości 6 do 20% /wagowo/, w zależności od składu chemicznego kąpieli i od warunków prowadzenia procesu. Przy stosunku $Co^{+2}/H_2PO_2^{-1}$ = = 0,86 uzyskuje się warstwy kobalt-fosfor, zawierające około 6% fosforu wagowo. Wielkość krystalitów kobalt-fosfor odkładanych katalitycznie jest znacznie większa niż w odpowiadających im składem chemicznym warstwach nakładanych elektrolitycznie.



Rys. 1. Siła koercji, pozostałość magnetyczna i indukcja maksymalna warstwy kobaltu jako funkcje grubości warstwy magnetycznej

Warstwy o sile koercji około 1000 Oe posiadają krystality o wielkości około 1000 Å. Warstwy kobaltowe i kobaltowo-fosforowe wykazują właściwości magnetyczne niezależnie od grubości, przy czym ich siła koercji wzrasta szybko ze wzrostem grubości do 800 - 1000 Å, a następnie wolno spada. Stosunek B_r/B_m dla warstw o grubości 1000 Å jest zwykle większy od 0,8.

Jak wykazały badania Bate'a /6/ warstwy o sile koercji mniejszej niż 300 Oe wykazują dla osi "c" kryształów kobaltu orientację prostopadłą do płaszczyzny warstwy, co powoduje anizotropię właściwości fizycznych /w tym magnetycznych/ tych warstw.

Natomiast warstwy niklowe, wytwarzane zarówno z roztworów chlorku jak i siarczanu niklu, wykazują właściwości ferromagnetyczne dopiero od grubości 1000 Å.

Judge i współpracownicy /7/ badali zależność właściwości magnetycznych warstw kobalt-nikiel-fosfor od zawartości kobaltu i grubości warstwy. Ustalili oni, że siła koercji warstw zawierających kobalt i nikiel była znacznie wyższa niż u warstw kobalt-fosfor i nikiel-fosfor. Największą wartość siły koercji, dochodzącą do 1500 Oe, posiadają warstwy zawierające 20 do 24% niklu. Tworzące się przy tym krystality posiadają wielkość około 1000 Å.

Jak wykazały badania Judge'a i współpracowników /7/ oraz Bonn'a i Wendell'a /8/ fosfor występuje w warstwie metalicznej prawdopodobnie w formie bezpostaciowej pomiędzy granicami ziarn metalu. Struktura krystaliczna ziarn odpowiada heksagonalnemu ścisłemu upakowaniu, ale ze wzrostem zawartości niklu wzrasta proporcjonalnie sieć regularna, centrowana na ścianach.

Warstwy magnetyczne wytwarzane z roztworów rozcieńczonych wykazują wzrost pozostałości magnetycznej i indukcji maksymalnej. Przy dużych koncentracjach jonów Co^{+2} i $H_2PO_2^{-1}$, np. od 7,3 do 14,5 gramów w litrze, przy stosunku $Co^{+2}/H_2PO_2^{-1}$ = 0,86 wartość siły koercji maleje do 47 Oe.

Wartość pH kąpieli odgrywa bardzo istotną rolę przy osadzaniu warstw. Wpływa ona zarówno na strukturę warstwy, jak i jej właściwości magnetyczne. Optymalny odczyn kąpieli zawarty jest w granicach pH 8,2 do 8,6. Warstwa osadzana w tych warunkach posiada siłę koercji od 390 do 410 Oe, ale już przy wartości pH 9,0 spada ona do wartości 50 Oe. Kobalt w formie metalicznej przestaje się w ogóle wydzielać przy wartościach pH poniżej 7.4.

Wpływ temperatury kąpieli na właściwości magnetyczne osadzanej warstwy przejawia się w różny sposób - wartość siły koercji spada ze wzrostem temperatury, pozostałość magnetyczna i indukcja maksymalna osiągają ekstremalnie wysokie wartości przy temperaturze 75°C, a wartość stosunku B_r/B_m maleje ze wzrostem temperatury.

Charakterystyki zapisu impulsowego na omawianych warstwach według badań Fisher'a i Chilton'a /5/ przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Charakterystyki zapisu metalicznych warstw magnetycznych, otrzymywanych w procesie chemicznego osadzania bezprądowego, oraz warstw tlenkowych

Materiał warstwy magnetycznej lub symbol taśmy z γ- Fe_2O_3	Grubość warstwy /µm/	Siła koercji /Oe/	Szerokość impulsu /µm/	Gęstość zapisu /$\frac{bit}{cal}$/	Amplituda sygnału /mV/	Prąd nasycenia /mA/
kobalt	0,7	400	25	800	700	60
kobalt	1,4	330	37	550	925	70
3M##189	7,5	278	32	665	1200	80
	7,5	282	30	770	1100	80
Ampex 832	7,5	278	30	770	1100	65

Jak wynika z przedstawionych danych metoda katalitycznego odkładania metalicznych warstw ferromagnetycznych posiada szereg cech korzystnych, do których zaliczyć można:

1. bezprądowe nakładanie warstwy,
2. wysoką siłę koercji,
3. możliwość uzyskiwania warstw o dużej wartości pozostałości magnetycznej przy małej grubości, nawet poniżej 1 µm,
4. stosunkowo prostą technologię wytwarzania warstw na różnych podłożach,
5. możliwość regulacji parametrów magnetycznych warstwy w stosunkowo szerokich granicach przez dobór: koncentracji składników, temperatury, odczynu kąpieli /pH/ oraz czasu trwania procesu.

Tym niemniej należy spodziewać się szeregu trudności, zwłaszcza przy uzyskiwaniu powtarzalności parametrów magnetycznych warstw wytwarzanych w skali technicznej. Przyczyn tego dopatrywać się można w wyczerpywaniu się składników kąpieli w czasie nakładania warstwy, a co za tym idzie zmian koncentracji, zwłaszcza jonów metali, wpływających na strukturę magneto-krystaliczną warstwy. Stosowanie kąpieli jednostkowych dla po-

krycia warstwą magnetyczną jednego tylko obiektu jest mało opłacalne lub wymaga skomplikowanych zabiegów analitycznych i technologicznych, zmierzających do regeneracji kąpieli.

Literatura

[1] A. KWIATKOWSKI: Biuletyn Informacyjny IMM. Nowości Techniczne Nr 4/16/, 53 /1967/.

[2] A. BRENNER, G. RIDDELL: Proc. Amer. Electroplaters Soc. 34, 156 /1947/

[3] D.J. LEVY: Techn. Proc. Amer. Electroplaters Soc. 50, 20 /1963/.

[4] E.A. BERGSTROM: Patent USA Nr 2702253.

[5] R.D. FISHER, W.H. CHILTON: Journ. of the Electrochem. Soc. 109 /6/, 485 /1962/.

[6] G. BATE: J. Appl. Phys. 37 /3/, 1164 /1966/.

[7] J.S. JUDGE, J.R. MORRISON, D.E. SPELIOTIS: J. Appl. Phys. 36, 948 /1965/.

[8] T.H. BONN, D. WENDELL: Patent USA Nr 2.644787.

Inż. Wacław KALINOWSKI
Mgr inż. Mirosław ROTH
Zakład Pamięci Bębnowych
i Dyskowych IMM

681.327.63

WYBRANE ZAGADNIENIA MECHANIKI PAMIĘCI DYSKOWYCH

1. Wstęp

Niezbędnym wyposażeniem współczesnych maszyn cyfrowych, szczególnie systemów do przetwarzania danych, stały się pamięci zewnętrzne o dużej pojemności. Dla takich pamięci o pojemności większej od 10 milionów bitów przyjęto nazwę "pamięci masowe". Są to z reguły urządzenia elektromechaniczne o ciągłym nośniku magnetycznym, nałożonym na powierzchnię ruchomą. Obecnie jest to najbardziej pojemny i tani nośnik informacji, pozwalający na zapisanie, zależnie od doboru parametrów zespołu nośnik-głowica, od 100 do 400 bitów/mm^2.

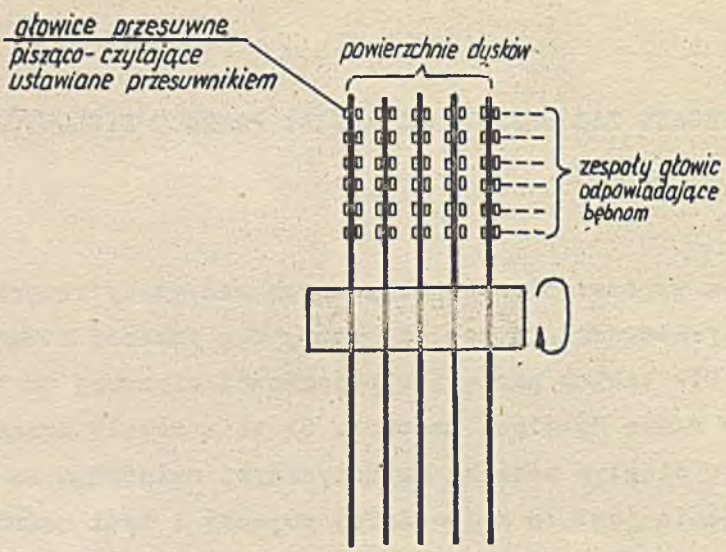
Koszt pamięci z takim nośnikiem w przeliczeniu na 1 bit waha się od 0,1 do 0,001 centa.

Stosowane są takie rozwiązania mechaniczne, jak: bębny, dyski oraz karty i taśmy magnetyczne o dużej różnorodności typów konstrukcyjnych. Wspólną ich cechą jest wysoka precyzja mechanizmów.

2. Ogólna charakterystyka pamięci dyskowych

Wśród pamięci masowych pamięć dyskowa wyróżnia się wieloma zaletami. Konstrukcja mechaniczna jest tu względnie prosta i niezawodna. Trwałość zespołu dysków, dzięki bezstykowej pracy głowic, jest bardzo duża. W porównaniu z pamięciami bębnowymi zespół dysków ma większą pojemność w stosunku do swojej objętości. Czas dostępu jest stosunkowo krótki. Możliwe jest budowanie układów z wymiennym nośnikiem informacji, co zapewnia operowanie w jednej maszynie cyfrowej zbiorem wymiennych pakietów dysków o praktycznie nieograniczonej pojemności.

Schemat konstrukcyjny pamięci dyskowej pokazany jest na rys. 1. Oś dysków może być usytuowana pionowo lub poziomo. Dyski pokryte są obustronnie nośnikiem magnetycznym, z którym współpracują głowice pisząco-czytające, najczęściej z podparciem aerodynamicznym. Średnica dysków, zależnie od konstrukcji, wynosi od 300 do 1200 milimetrów. Dyski montowane są w większe zespoły, w pamięciach wymiennych najczęściej po 6 sztuk, a w stałych po 25 i więcej, np. w pamięci Control Data 808, po 72 sztuki.



Rys. 1. Schemat mechanizmu pamięci dyskowej

Istnieją też rozwiązania z głowicami ślizgającymi się po powierzchni dysku, oraz dyski elastyczne, unoszące się na warstewce powietrza nad płytą z głowicami. Jak dotychczas rozwiązania te nie znalazły szerszego zastosowania, głównie z powodu trudności budowy większych pamięci tego typu.

Zapis informacji na koncentrycznych ścieżkach z maksymalną gęstością prowadziłby do różnych pojemności i częstotliwości na poszczególnych ścieżkach dysku, co poważnie komplikowałoby organizację pamięci i układy elektroniczne. Dlatego też powierzchnie dysków dzielone są na pierścieniowe strefy, liczące od 100 do 256 ścieżek, przy czym w jednej strefie wszystkie ścieżki mają taką samą pojemność i częstotliwość. Największa, zwykle graniczna, gęstość zapisu występuje wtedy na wewnętrznej ścieżce strefy. Małe dyski w pamięciach wymiennych mają tylko 1 strefę, w dużych liczba ta wynosi do 6.

Każda strefa obsługiwana jest przez jedną głowicę, co dla kompletu dysków daje w jednym położeniu zespołu głowic równoczesny dostęp do ścieżek o tym samym numerze w każdej strefie na powierzchniach wszystkich dysków. Głowice pracują wtedy tak, jak gdyby były rozmieszczone wzdłuż tworzących bębnów, koncentrycznych z osią dysków /rys. 1/. Dla każdej pozycji głowic, bez ich przesuwania, pamięć dyskowa upodabnia się w działaniu do pamięci bębnowej o liczbie ścieżek odpowiadającej ilości głowic, a więc do urządzenia wyróżniającego się wśród pamięci zewnętrznych najkrótszym czasem dostępu.

Powszechnie stosowany w pamięciach dyskowych system jednej głowicy na strefę wymaga stosunkowo małej liczby głowic, co daje znaczne oszczędności, jeśli zważyć, że masowa produkcja głowic jest trudna do zautomatyzowania, a co za tym idzie kosztowna. Jak dotąd tylko firmy Burroughs i Librascope wytwarzają pamięci zaopatrzone w głowicę na każdej ścieżce. Pamięci te odznaczają się krótkim czasem dostępu, co jest ich cenną zaletą, jednak duże skomplikowanie konstrukcji nie przyczyniło się do ich rozpowszechnienia.

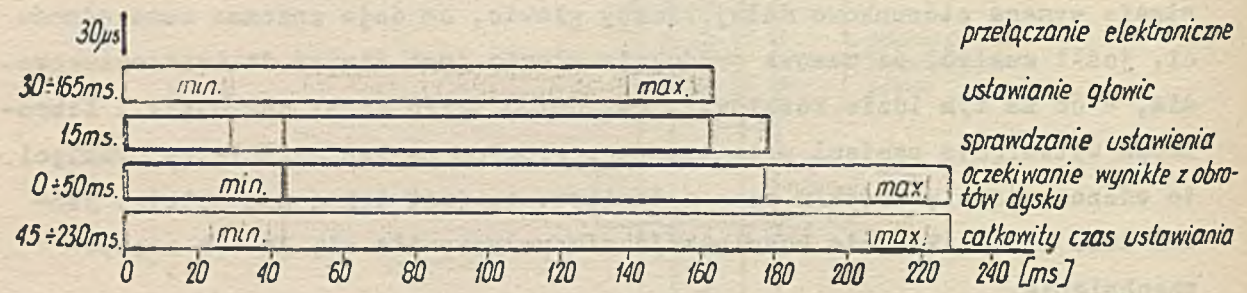
3. Właściwości eksploatacyjne pamięci dyskowych

Podstawowymi wielkościami charakteryzującymi pamięć są: pojemność, czas dostępu i prędkość przekazywania informacji. Z innych cech, dających pogląd o rozwiązaniu konstrukcyjnym pamięci, wymienimy gęstość powierzchniową zapisu informacji, wynikającą z gęstości zapisu wzdłuż ścieżki i gęstości ścieżek, liczbę ścieżek obsługiwanych przez jedną głowicę, liczbę stref, parametry zapisu i odczytu, stosowanie dysków stałych lub wymiennych itp.

Czas dostępu do informacji zapisanej na dysku zależy od rozwiązania konstrukcyjnego pamięci. Najłatwiej określić go w pamięciach z głowicami nieprzesuwnymi, gdy na każdą ścieżkę przypada oddzielna głowica. Wtedy czas oczekiwania na dojście informacji pod głowicę może wahać się od zera do czasu pełnego obrotu, a średni czas dostępu przy całkowitej przypadkowości serii adresów wynosi połowę czasu obrotu dysków.

W pamięciach z przesuwnymi głowicami czas dostępu składa się z czasu potrzebnego na ustawienie głowicy na właściwej ścieżce i sprawdzenie prawidłowości jej położenia oraz czasu oczekiwania na informację, związanego z obrotem dysku.

Minimalny czas dostępu może wynosić zero, gdy głowica ustawiona została uprzednio na właściwej ścieżce i gdy początek informacji przebiega pod głowicą w chwili rozpoczęcia czytania lub pisania. Maksymalny czas wybierania jest sumą najdłuższego czasu przesuwu głowic na największą odległość, czasu sprawdzenia położenia głowicy i czasu pełnego obrotu dysku. Tak określony maksymalny czas dostępu jest dokładną wielkością, która może być wykorzystana do porównywania poszczególnych rozwiązań pamięci. Przykładowo składniki czasu dostępu dla pamięci Bryant 4000 C-2A przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Składniki czasu dostępu w pamięci Bryant 4000 C-2A

Średni czas dostępu w pamięciach z przesuwnymi głowicami mieści się między opisanymi wyżej granicami ekstremalnymi, ale sposób określenia jego wartości nie jest dokładnie zdefiniowany i może być różnie rozumiany. Składa się on z połowy czasu obrotu dysku, czasu sprawdzania poprawności ustawienia głowic oraz ze średniego czasu przesuwu głowic, którym może być np.: połowa maksymalnego czasu ustawienia głowic, rzeczywisty czas przesunięcia o połowę liczby ścieżek itp. Nie są to jedyne sposoby określania średniego czasu ustawiania głowic. Wobec różnych ujęć średniego czasu dostępu w pamięciach z przesuwnymi głowicami, jego wielkości podawane w literaturze mogą być traktowane tylko jako orientacyjne.

Prędkość przesyłania informacji jest iloczynem gęstości zapisu wzdłuż ścieżki, prędkości przesuwu nośnika względem głowicy i liczby głowic, biorących udział w równoczesnym zapisie lub odczycie.

Przegląd współczesnych maszyn cyfrowych wykazuje powszechne stosowanie pamięci dyskowych jako pamięci zewnętrznych w systemach przetwarzania danych. Dotyczy to zarówno dużych pamięci stałych z przesuwnymi głowicami

jak i pamięci wymiennych. Te ostatnie, dzięki dużo niższym kosztom, umożliwiają przystosowanie nawet małych maszyn do przetwarzania danych. Czas wymiany pakietu powoduje jednak, że efektywność pracy tych pamięci jest mniejsza niż dużych pamięci dyskowych.

Parametry eksploatacyjne wybranych pamięci dyskowych podano w tabeli 1.

4. Podstawowe zespoły pamięci dyskowych

Duża pamięć dyskowa może zawierać szereg współdziałających ze sobą, niezależnych systemów, pracujących przy wykorzystaniu różnych rozwiązań technicznych. Są to:

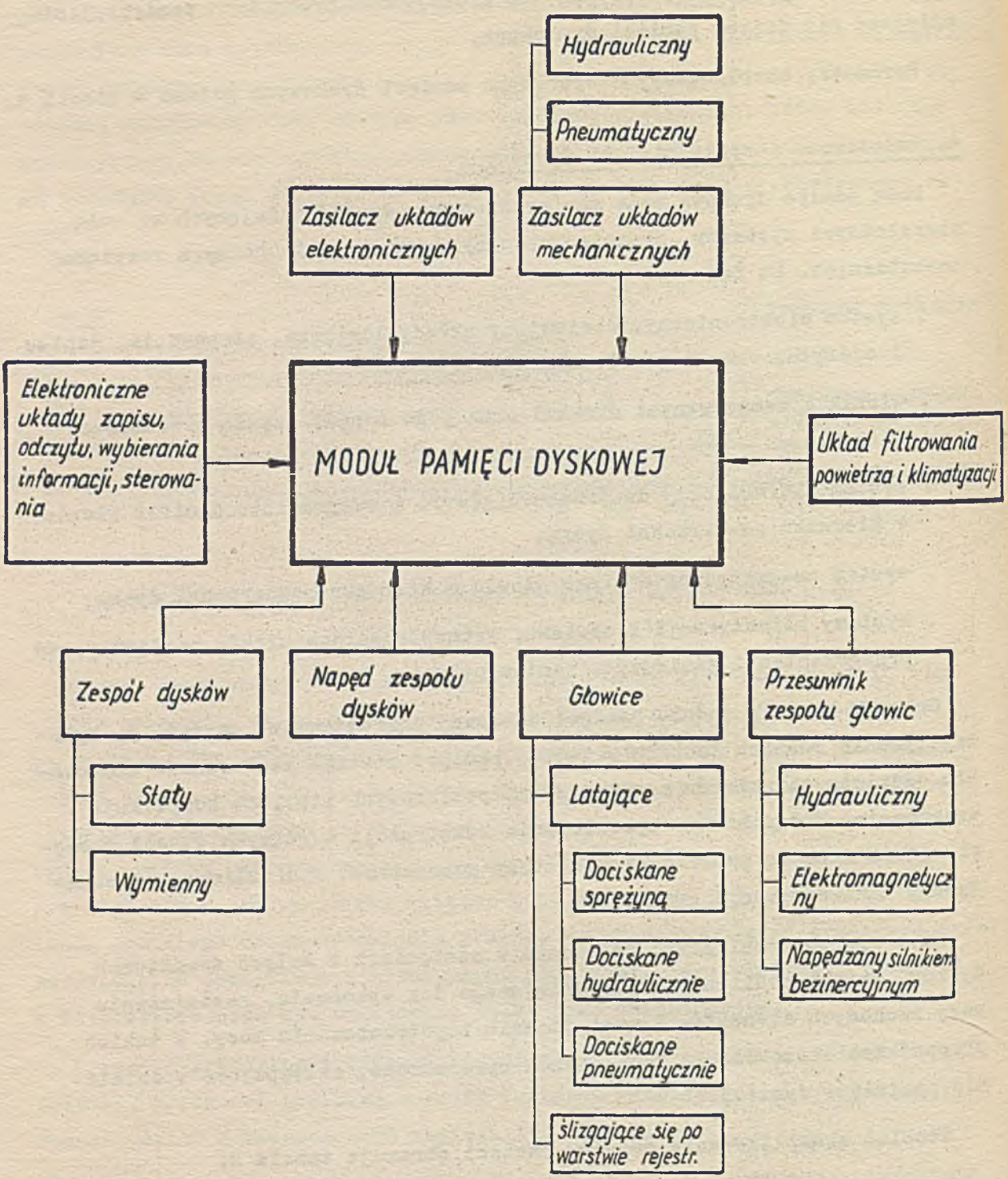
- system elektroniczny, obejmujący układy logiczne, sterowania, zapisu i odczytu, wraz z głowicami,
- wirnik z zamocowanymi dyskami oraz jego napęd, często przenoszący dużą moc,
- system hydrauliczny do przesuwu głowic i ewentualnie docisku głowic w kierunku powierzchni dysku,
- system pneumatyczny docisku głowic w kierunku powierzchni dysku,
- systemy klimatyzacji i nawiewu, zabezpieczające układy pamięci przed przegrzaniem i zanieczyszczeniem pyłami.

Schemat blokowy modułu pamięci dyskowej przedstawiono na rys. 3. Wykorzystywanie różnych technik w jednej pamięci stwarza konieczność stosowania oddzielnych układów zasilających, pomiarowych itp., co komplikuje urządzenie. W dążeniu do uproszczenia konstrukcji w różnych typach pamięci eliminowane są poszczególne systemy pomocnicze: hydrauliczny, pneumatyczny i klimatyzacji z nawiewem.

Daje się to zrealizować zwłaszcza w pamięciach o małych średnicach dysków, dzięki możliwości dokładniejszego ich wykonania, zmniejszeniu masy ruchomych elementów i zmniejszeniu zapotrzebowania mocy. W takich przypadkach stosowane są rozwiązania uproszczone, zastępujące w działaniu pominięte systemy.

Stopień skomplikowania modułów pamięci obrazuje tabela 2.

Zespoły dysków w dużych pamięciach dzielone są na sekcje, posiadające oddzielne układy wybierania. Mogą one wykonywać równocześnie różne



Rys. 3. Rodzaje zespołów wchodzących w skład modułów pamięci dyskowych

Tabela 1. Zestawienie parametrów eksploatacyjnych wybranych pamięci dyskowych

	Wytwórnia, typ	Pojemność max.	Czas dostępu /ustawienie, obrót dysku/			Częstotliwość pracy	Warunki otoczenia	Uwagi
			min.	śr.	max.			
		10^6 bitów	ms	ms	ms	kc/s		
Niewymienne dyski, ruchome głowice	Bryant 4000-2B 4000-2C 4000C-2A	854 1643 3800	50 50 70	- - 145	205 205 235 1/	458 ÷ 1460 zależnie od strefy	przechowywanie: -35 ÷ +55°C praca: +15 ÷ +38°C wilgotność wzgl.: 10 ÷ 80% urządzenie filtruje powietrze z dokł. do 95% pyłów o śr. 1 µm	1/ ozas dostępu dla wybierania głowic przez jeden przesuwnik
	Control Data 807 808	500 1000	30 30	- -	152,5 152,5	840 840		
	IBM 2302-3 2302-4	896 1794	50 50	182 182	214 214			
Wymienne pakiety dysków	IBM 1311 3/ 2311 4/ 2314	20,3 dla 1 pakietu 58,4 dla 1 pakietu 207	94 25 25	294 72,5 72,5	440 2/ 160 160	1250 2500	praca: +16 ÷ +32°C 10 ÷ 80% wilg. wzgl.	2/ czas dla układu z powrotem do pozycji wyjściowej 3, 4/ pakiet IBM 1316
	Control Data 852 5/ 853 854	20,8 dla 1 pakietu 24,0 49,2	30 30 30	- - -	205 190 190	700 1250 1250	przechowywanie: -35 ÷ +65°C przy wilgotności: 5% ÷ 98% praca: +15 ÷ +32°C przy wilgotności: 10% ÷ 80%	5/ możliwość odczytu informacji z pakietu IBM 1316

funkcje, np. jeden układ może wybierać ścieżki kolejno, a drugi na zasadzie przypadkowego dostępu. Każda z sekcji może współpracować z inną maszyną cyfrową.

Tabela 2. Rodzaje zespołów wchodzących do modułów pamięci dyskowych omawianych w tabeli 1

	Bryant 4000	Control Data 807/808	IBM 2302	IBM 1311 2311	Control 852/853/ 854
Układy elektroniczne	x	x	x	x	x
Mechanizmy	x	x	x	x	x
Układy hydrauliczne	x	x	x	x	
Układy pneumatyczne		x			
Układy filtrowania powietrza i nawiewu	x	x	x		
Układy klimatyzacji	x	x			

Warunki współpracy podstawowej pary funkcjonalnej pamięci, a mianowicie warstwy magnetycznej z głowicą pisząco-czytającą, decydujące o takich parametrach pamięci jak gęstość zapisu i wielkość odczytywanego sygnału, narzucają szereg wymagań, jakie muszą spełniać niżej opisane, najważniejsze elementy pamięci.

4.1. D y s k i

Przy stosowanych prędkościach obrotowych naprężenia występujące w materiale dysku podczas jego wirowania są niewielkie i nie stanowią problemu konstrukcyjnego. Poważnym natomiast zagadnieniem są drgania cienkich wirujących dysków, wymagające szczegółowej analizy. Dyski wykonywane są z różnych materiałów niemagnetycznych, takich jak stopy aluminium, magnezu oraz miedzi.

Właściwości materiałów reprezentujących te grupy stopów podane są w tabeli 3. Najczęściej używanymi materiałami są stopy aluminium i magnezu.

Stopy magnezu mają cenną właściwość - dużą histerezę odkształceń sprężystych i zdolność tłumienia drgań. Pozwala to na budowę dysków o większych średnicach i mniejszych grubościach niż przy stosowaniu innych materiałów. Zmniejszony ciężar dysków zmniejsza ugięcie wału i jego drgania.

Tabela 3. Właściwości krajowych odpowiedników materiałów używanych na dyski

Gatunek materiału	Ciężar właściwy γ	Wytrzymałość doraźna na rozciąganie R_r	Moduł sprężystości E	Współczynnik rozszerzalności liniowej $\alpha \cdot 10^6$
	$\frac{G}{cm^3}$	$\frac{kG}{mm^2}$	$\frac{kG}{mm^2}$	
Dural PA4 Mn-0,8, Mg-1 Si-1	2,80	26	7 200	22,0
Stop magnezu MA8 Al-0,3, Mn-2,0 Ca-0,2	1,77	23	4 100	26,0
Miedź Cu 99,8	8,89	20	11 000	17,5

Miedź bywa stosowana ze względów technologicznych na dyski pokrywane galwanicznie metalicznymi warstwami rejestrującymi. Jej ciężar jest jednak znacznie większy niż poprzednich materiałów.

Dyski montowane są w większe zespoły osadzone na wspólnym wale, dokładnie wyrównoważone i precyzyjnie łożyskowane. Jako warstwy rejestrujące stosowane są powszechnie pokrycia tlenkowe z γ-Fe_2O_3 oraz warstwy metaliczne na bazie kobaltu i niklu. Spoiwem warstw tlenkowych są żywice epoksydowe lub tworzywa termoutwardzalne. Od warstwy wymaga się odporności mechanicznej na ścieranie w przypadku zetknięcia z głowicą.

Szczególnie wysoką odporność na ścieranie można nadać warstwom metalicznym, co pozwala, przy pokryciu odpowiednim smarem, na osiadanie głowicy na dysku przy jego zatrzymywaniu. Warstwy metaliczne pokryte na po-

wierzchni rodem umożliwiają stałe ślizganie się podczas pracy głowicy ze stopką z syntetycznego szafiru. Zespół taki pozwala uzyskać dużą gęstość zapisu /do 260 bitów/mm/ i odznacza się dużą trwałością: po 20 tys. godzin pracy nie zauważa się śladów zużycia współpracujących powierzchni.

Ze względu na stabilność pracy głowicy wymagane jest staranne usuwanie bicia czołowego dysków. Uzyskanie jednak dokładnej płaskości swobodnego dysku i prostopadłości jego powierzchni czołowej do osi obrotu jest poważnym problemem technologicznym. Dlatego też "bicie" dysku pozostaje zwykle dość duże, a ewentualne jego skutki są kompensowane na innej drodze.

Praca głowic latających w małej odległości od nośnika /ok. 2,5 μm/ wymaga odpowiednio małej chropowatości powierzchni. Mieści się ona w granicach 12 ÷ 14 klasy ISO /gładkość szkieł optycznych/.

W tabeli 4 zebrane są charakterystyczne dane dysków wybranych typów pamięci.

4.2. G ł o w i c e

Zapis o dużej gęstości jest możliwy przede wszystkim dzięki zbliżeniu głowic do powierzchni dysku na odległość kilku mikrometrów. W pamięciach dyskowych powszechnie stosowane są głowice latające, unoszące się w odległości od 2,5 do 5 mikrometrów nad powierzchnią nośnika.

Podczas ruchu dysku tworzy się klin powietrza między dyskiem a stopką głowicy. Działa on na stopkę siłą aerodynamiczną, którą dla małych przesunięć można porównać do nacisku sprężyny o dużej sztywności. Siła ta jest równoważona przez sprężynowy lub ciśnieniowy układ, dociskający głowicę w kierunku dysku. Mała masa stopki głowicy w połączeniu ze sztywnym podparciem warstwą powietrza daje bardzo dużą częstość drgań własnych, znacznie wyższą od częstości zakłócających, wywoływanych przez zespoły wirujące, co z kolei zapewnia nadążanie głowicy za drgającą powierzchnią dysku.

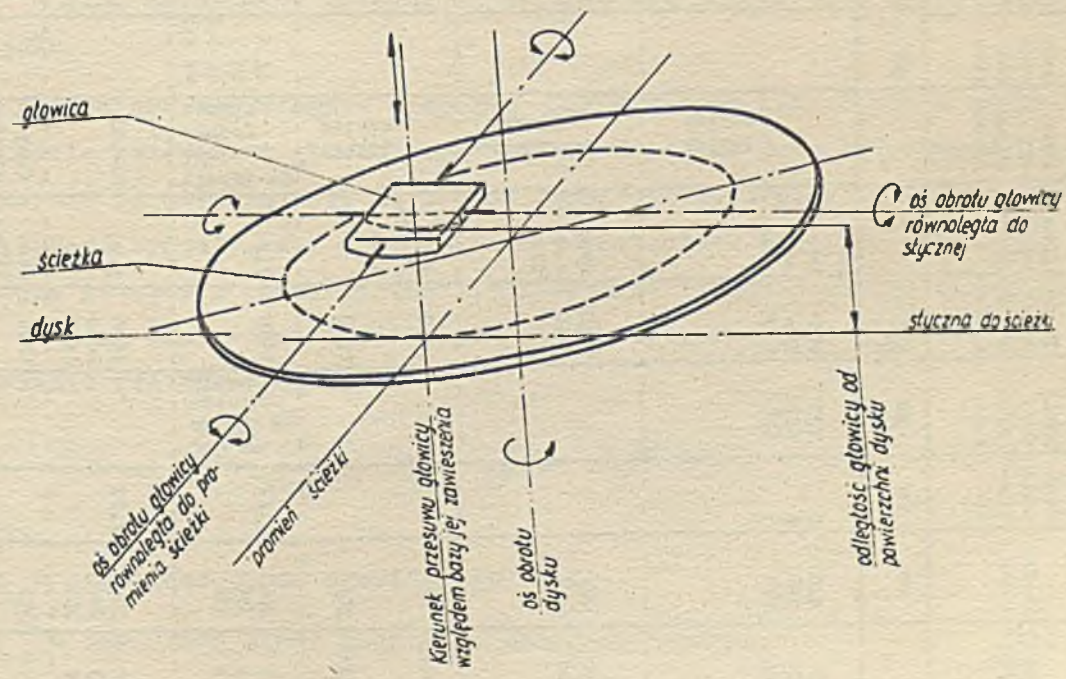
Powietrze w szczelinie między stopką a dyskiem oddziela od siebie współpracujące powierzchnie, chroniąc je przed zatarciem i działa jako smar. Ma ono mały współczynnik tarcia i utrzymuje stałą grubość szczeliny przy zmianach temperatury. Podczas pracy stopka unosi się na wysokości proporcjonalnej do prędkości powietrza krążącego wraz z dyskiem. Tak

więc nad ścieżką zewnętrzną strefy unosi się ona na większej odległości niż nad ścieżką wewnętrzną.

Ponieważ prędkość nośnika jest większa na zewnętrznej ścieżce, to i napięcie odczytywanego z tej ścieżki sygnału jest większe, zatem wpływ prędkości nośnika i odległości głowicy do powierzchni nośnika znoszą się i w rezultacie sygnały na ścieżce zewnętrznej i wewnętrznej mają zbliżone wielkości.

Wycinek powierzchni dysku, leżący pod stopką głowicy i ograniczony jej rzutem na powierzchnię dysku, na skutek nieprostopadłości dysku do osi obrotu zmienia w czasie obrotu dysku swoją odległość od bazy zawieszenia głowic i kąt, który tworzy z osią obrotu dysków.

Zachowanie stałej odległości stopki od powierzchni nośnika wymaga od niej 3 stopni swobody - dopasowania się do pochylenia wycinka powierzchni dysku, będącej w dużym przybliżeniu płaszczyzną, i zmiany odległości od bazy zawieszenia /patrz schemat na rys. 4/. Takie zamocowanie stopki umożliwia najpewniejszą pracę w małej jej odległości od dysku. W myśl tej zasady rozwiązywane są zawieszenia głowic wszystkich nowoczesnych pamięci dyskowych.



Rys. 4. Schemat zawieszenia głowicy o 3 stopniach swobody

Tabela 4. Zestawienie parametrów zespołu dysk - głowica dla wybranych pamięci

	Wytwórnia, typ pamięci	Średn. dysku	Grubość dysku	Bicie pow. czoł. max.	Prędkość obrot. dysku	Materiał dysku	Nośnik magnetyczny	Grubość nośnika	Liczba stref	Liczba ścieżek w strefie	Gęstość zapisu	Gęstość ścieżek	Gęstość pow. max.	Typ głowicy	Odległość głowicy od nośnika	Liczba śladów głowicy	Szerokość pisania	Szerokość kasowania	Uwagi
		mm	mm	µm	obr/min			µm			bitów/mm	ść/mm	bitów/mm²		µm		mm	mm	
Niewymienne dyski, ruchome głowice	Bryant 4000-2B	990	6	127	900	stop magnezu	tlenki żelaza		6	128	max24	2,5	60	podparta aerodynamicznie, dociskana hydraulicznie, 3 stopnie swobody		1			max 2x13 dysków
	4000-2C	990	6	127	lub				6	128	max24	2,5	60			1			
	4000C-2A	990	6	127	1200				6	256	max31,5	5	158			1			
	Control Data 807	660			1140	stop aluminium	tlenki żelaza		1	192	max33,5	2	67	podparta aerodynamicznie, dociskana pneumat., 3 stopnie swobody	3,2	6	0,3	0,46	36 dysków
	808	660			1140				1	192	max33,5	2	67		3,2	6	0,3	0,46	72 dyski
	IBM 2302-3	356			1760	stop aluminium	tlenki żelaza		2	250	max42	4	168	podparta aerodyn., dociskana sprężyną, 3 stopnie swobody		1			25 dysków /50 powierzchni/
	2303-4	356			1760				2	250	max42	4	168			1			2x25 dysków /100 pow./
Wymienne pakiety dysków	IBM 1311	356	1,27	300 µm na 100 mm obwodu dysku	1500	j.w.	tlenki i/lub laste w żywicy epoks.	od 6	1	100	max40	2	80	j.w.	od 3,2 do 4,2	1	0,25	0,46	
	2311	356						do 7	1	200+3	max43,5	4	174			1			
	2314	356						od 3,2 do 4,5		zapas	max43,5	4	174			1			
	Control Data 852	356	1,27		1500	j.w.	tlenki		1	100	27÷39	2	78	j.w.	od 2,5 do 3,2	1	0,25	0,46	
	853	356			2400				1	100	30÷43,5	2	87			1	0,25	0,46	
	854	356			2400				1	200+3	30÷43,5	4	174			1	0,165	0,33	
	Data Disc	305			1200	stop alum. pokr. Cu	Ni-Co+ warstwa rodu				max260				styk				

Wymagana od zawieszenia głowicy kompensacja bicia powierzchni czołowej dysku jest poważnym problemem konstrukcyjnym. W głowicy latającej, dociskanej w kierunku powierzchni dysku sprężyną, siła sprężyny zmienia się w zależności od powodowanej biciem zmiany odległości powierzchni dysku od bazy zawieszenia głowicy. Poza tym z powodu starzenia się sprężyn z biegiem czasu ulega zmianie ich charakterystyka.

Mimo tych wad głowice są z reguły dociskane do dysku sprężynami. Ich zaletą jest prostota konstrukcji. Stosowane są zwłaszcza do pamięci z dyskami o mniejszych średnicach.

Najefektywniejszym rozwiązaniem jest docisk głowic w kierunku powierzchni dysku za pomocą tłoczka, na który działa ciśnienie płynu lub powietrza. Delikatne sprężyny cofają głowicę po wyłączeniu ciśnienia lub w razie jego spadku na skutek awarii. Układ dociskany tłoczkiem pozwala na zmiany położenia powierzchni dysku względem bazy zawieszenia głowic o ok. $\pm$ 0,5 mm, bez zmiany wielkości szczeliny między dyskiem a stopką głowicy.

Najczęściej w czasie rozruchu i zatrzymywania dysków głowice latające unoszone są specjalnymi układami, aby nie stykały się z powierzchnią nośnika przy zaniku siły aerodynamicznej.

Niektóre pamięci z warstwami metalicznymi mają głowice opierające się o dysk przy rozruchu i zatrzymywaniu dysków. Jednodyskowa pamięć wymienna DATA DISC ma głowice ślizgające się podczas pracy stale po powierzchni dysku.

W pamięciach z wymiennym zespołem dysków trzeba liczyć się z niepowtarzalnością ustawienia głowic względem osi ścieżek. Może to powodować pozostawanie na obrzeżu ścieżki części poprzedniego zapisu, zakłócającego odczytywane sygnały. Aby tego uniknąć w pamięciach tego typu stosowane są podwójne głowice o szerokim śladzie kasującym i wąskim piszącо-czytającym. Różnica szerokości śladów tych głowic związana jest z tolerancją ich ustawienia nad ścieżką:

$$G_k - G_{pc} \geqslant 2\,/T+b/,$$

gdzie:

G_k - szerokość śladu głowicy kasującej,

G_{pc} - szerokość śladu głowicy piszącо-czytającej,

T - tolerancja położenia osi głowic względem osi ścieżki,

b - margines bezpieczeństwa między ścieżkami.

Wartość różnicy $G_k - G_{pc}$ wynosi dla głowic pamięci dyskowych wymiennych od 0,16 mm do 0,2 mm, przy gęstościach ścieżek od 4 do 2 ścieżek na milimetr.

4.3. Przesuwniki głowic

Przesuwnik ustawia ruchomy blok głowic na wybranym cylindrze ścieżek według zadanego adresu. Zgodność położenia głowic z tym adresem jest sprawdzana po ustawieniu przesuwnika za pomocą specjalnego układu. Liczba dyskretnych pozycji przesuwnika odpowiada liczbie ścieżek w strefie powierzchni dysku, powiększonej o liczbę ścieżek zapasowych i pozycji pomocniczych, jak np. pozycja wyjściowa, pozycja wysunięcia głowic spomiędzy dysków, skrajna pozycja wewnętrzna itp.

Dokładność ustawienia głowic nad wybranymi ścieżkami musi zapewniać powtarzalność /w założonym przedziale tolerancji/ poziomu odczytywanego sygnału. Ma ona specjalne znaczenie w pamięciach z dyskami wymiennymi, przy odczytywaniu informacji zapisanych na innych jednostkach pamięci.

Wielkości charakteryzujące pracę przesuwnika podane są w tabeli 5. Do ustawiania bloku głowic używane są przesuwniki hydrauliczne, elektromagnetyczne i silniki bezinercyjne.

Z uwagi na liczbę pozycji i sposób ich realizacji można wyróżnić przesuwniki pracujące w układzie dwójkowym i dziesiętnym.

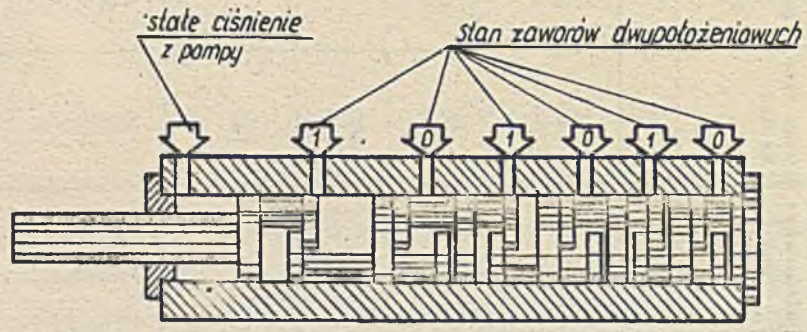
Przesuwnik hydrauliczny pamięci Bryant 4000 zamienia adres ścieżki podany w układzie dwójkowym na liniowe przesunięcie tłoczyska sterującego działaniem wzmacniacza hydraulicznego. Przesuwnik składa się z tłoczków, odpowiadających poszczególnym bitom, umieszczonych we wspólnym cylindrze. Każdy tłoczek posiada odpowiednie zderzaki i realizuje inne co do wartości przesunięcie liniowe. Wartość tego przesunięcia dla poszczególnych tłoczków jest kolejną potęgą dwójki pomnożoną przez przesunięcie elementarne. Schemat zazębiania się tłoczków takiego przesuwnika pokazano na rys. 5.

Tłoczki sterowane są własnymi, elektromagnetycznymi zaworami dwupołożeniowymi. Położenie zaworu odpowiadające "1" w adresie ścieżki powoduje podanie oleju pod ciśnieniem do przestrzeni cylindra za danym tłoczkiem,

Tabela 5. Charakterystyka przesuwników wybranych pamięci dyskowych

	Wytwórnia, typ pamięci	Napęd przesuwnika	Liczba niezależnych przesuwników	Liczba poruszanych głowic	Liczba pozycji	Skok elementarny	Skok max od 1 do ostatniej ścieżki	Czas skoku elementarnego	Czas skoku max	Błąd ustawienia nie większy od	Stosunek błędu ustawienia do szerokości ścieżki
						mm	mm	ms	ms	µm	%
Niewymienne dyski, ruchome głowice	Bryant 4000-2B 4000-2C 4000C-2A	Hydrauliczny /przesuwnik steruje wzmacniaczem hydraulicznym/	2 2 2	2x150 2x150 2x150	128 128 256	0,4 0,4 0,2	50,8 50,8 51	35 35 30	140 140 165	25,4 25,4	
	Control Data 807 808	Hydrauliczny	1 2	64 2x64	32 32			34 34	100 100	10 10	3,3
	IBM 2302-3 2302-4		2	2x50 2x100	250 250	0,25 0,25		50 50	180 180		
Wymienne pakiety dysków	IBM 1311 2311 2314	Hydrauliczny, dokładne ustawienie na pozycji zapadką	1 1	10 10	100 200+3	0,5 0,25	49,5 50,5	25	135		
	Control Data 852 853 854	Silnik elektr. o drukowanym bezinercyjnym wirniku i stojanie ze stałego magnesu. Dokładne ustawienie na pozycji zapadką	1 1 1	10 10 10	100 100 200+3	0,5 0,5 0,25	49,5 49,5 50,5	30 30 30	165 165 165	50,8	20 20 30

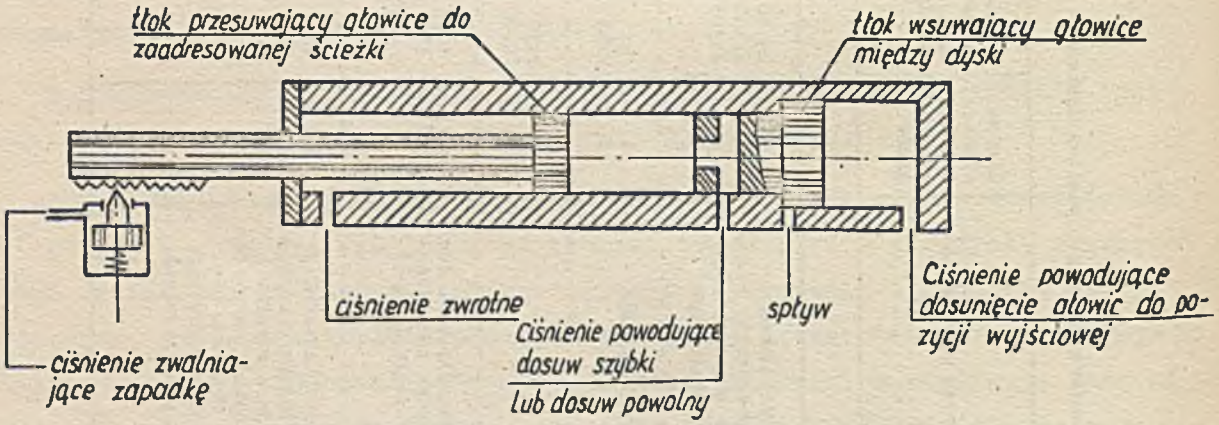
położenie odpowiadające "0" powoduje połączenie przestrzeni za tłoczkiem ze zbiornikiem oleju. Sumowanie przesunięć tłoczków w każdym cyklu pracy daje żądany skok głowic.



Rys. 5. Schemat zazębienia tłoczków przesuwnika pracującego w układzie dwójkowym

Przesuwnik hydrauliczny pamięci IBM 1311 realizuje przesunięcia w układzie dziesiętnym /schemat na rys. 6/. Ruch tłoka ustawiającego głowice sterowany jest trzema zaworami elektromagnetycznymi powodującymi:

- przesuw szybki,
- przesuw wolny,
- zwolnienie zapadki ustalającej ostateczne położenie głowicy.



Rys. 6. Schemat kinematyczny przesuwnika pracującego w układzie dziesiętnym

Czwarty zawór otwiera drogę odpływu oleju przy wycofywaniu głowic spomiędzy dysków.

Ustawienie głowic na wybranej ścieżce odbywa się w następujących fazach:

. szybki ruch do pozycji adresowanej,
. powolny ruch do pozycji adresowanej,
. ustalenie położenia zapadką.

5. Tendencje rozwojowe pamięci dyskowych

Budowane obecnie pamięci dyskowe z magnetycznym nośnikiem informacji są konstrukcjami o wysokich parametrach technicznych, w których wykorzystano wiele najnowszych zdobyczy z dziedziny konstrukcji i technologii. Na podstawie literatury można sądzić, że rozwiązania pamięci dyskowych osiągnęły stan, w którym dalszy ich postęp zależy głównie od stosowania nowych technologii i materiałów, a w mniejszym stopniu od zmian ustalonego już schematu konstrukcyjnego. Dalszy postęp ma na celu podniesienie podstawowych właściwości eksploatacyjnych pamięci: powiększenie pojemności, zwiększenie prędkości przesyłania informacji, zwiększenie niezawodności i obniżenie kosztów w odniesieniu do 1 bitu.

Polepszenie parametrów eksploatacyjnych oznacza przede wszystkim powiększenie gęstości zapisu na jednostkę powierzchni nośnika magnetycznego. Jest to związane ze zmniejszeniem odległości głowic latających od nośnika do granicznej wartości ok. 0,6 μm, stosowaniem cienkiej warstwy nośnika /o grubości poniżej 1 μm/ o dużej rozdzielczości, gwarantującej przy tym duży poziom sygnału, oraz z dalszym doskonaleniem konstrukcji głowicy. Od powierzchni warstwy będą nadal wymagane wysokie klasy chropowatości /od 12 do 14 klasy ISO/, niski współczynnik tarcia i duża odporność na ścieranie. Być może zostaną udoskonalone stosowane już układy, zapewniające obecnie największą gęstość zapisu, tzn. dysk pokryty warstwą niklowo-kobaltową, rodowaną na powierzchni, i głowica, pokryta syntetycznym szafirem, pracująca w ciągłym styku z powierzchnią dysku.

Powiększenie gęstości ścieżek, przy stosowaniu głowic przesuwnych, będzie wymagało przesuwników o większej liczbie bardziej zagęszczonych pozycji i powiększonej bezwzględnej dokładności ustawienia, oraz stosowania zespołu głowic kompensującego błędy ich położenia względem ścieżki. Zwiększenie prędkości przesyłania informacji nastąpi proporcjonalnie do wzrostu gęstości zapisu i prędkości przesuwu nośnika pod głowicą.

Literatura

[1] E. NOWAK, J. SZMYD: Pamięci zewnętrzne maszyn matematycznych. Biuletyn Informacyjny IMM, Nowości Techniczne, 2/1967.

[2] J.S. CRAVER: A Review of Electromechanical Mass Storage. Datamation, July 1966.

[3] Digital Signals Drive Actuator Directly. Control Engineering, 5/63.

[4] Huge Magnetic Memory Disk Uses Magnesium Plate. Electrical Engineering, Sept. 1962.

[5] HOAGLAND: Digital Magnetic Recording. John Wiley Inc. New York, 1963.

[6] Modular Mass Memory. Bryant Computer Products - Prospekt.

[7] Bryant Model 2A Series 4000. Bryant Computer Products - Prospekt.

[8] Control Data 807/808 Disk File. Control Data Corporation - Prospekt.

[9] Control Data 852/853/854 Disk Storage Drives. Control Data Corp. - Prospekt.

[10] Data Disk Elliott Automation Accessories Ltd. - Prospekt.

Warunki prenumeraty:

Cena prenumeraty krajowej:

rocznie - zł 100,-

Prenumeraty przyjmowane są do dnia 10 grudnia na rok następny.

Prenumeratę na kraj dla ozytelników indywidualnyoh przyjmują urzędy pocztowe oraz listonosze.

Czytelnioy indywidualni mogą dokonywać wpłat również na konto PKO Nr 1-6-100020 - Centrala Kolportażu Prasy i Wydawniotw "Ruoh" Warszawa, ul. Wronia 23.

Wszystkie instytucje państwowe i społeczne mogą zamawiać prenumeratę wyłącznie za pośredniotwem Oddziałów i Delegatur "Ruoh".

Prenumeratę ze zleceniem wysyłki za granioę, która jest o 40% droższa od krajowej, przyjmuje Biuro Kolportażu Wydawniotw Zagranioznyoh "Ruoh" Warszawa, ul. Wronia 23 konto PKO Nr 1-6-100024 tel.20-46-88.

Egzemplarze zdezaktualizowane można nabyć w Punkoie Wysyłkowym Prasy Archiwalnej "Ruoh" - Warszawa, ul. Nowomiejska 15/17, konto PKO Nr 114-6-700041 VII O/M Warszawa.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P 3057/68

DRUK. ZNAK ZAM. 381/68 NAKŁ. 600