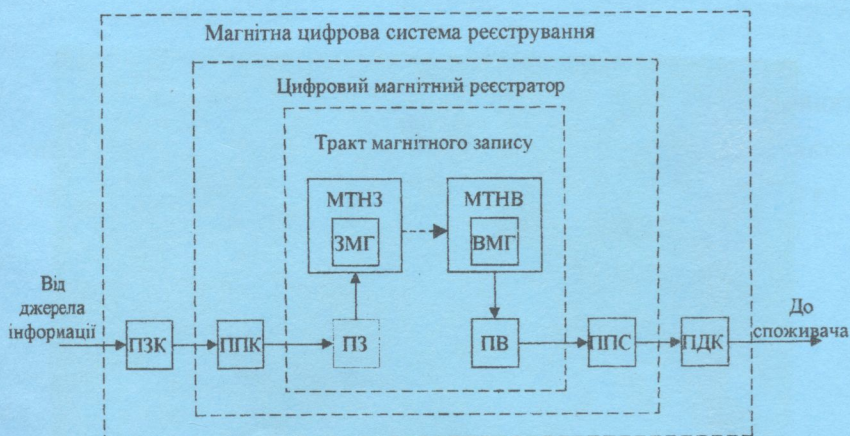


## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ І АВТОМАТИКИ

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕЛЕМЕНТИ ЦИФРОВОЇ ТЕХНІКИ



3157-31

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

А.С. ВАСЮРА

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ  
СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ І АВТОМАТИКИ

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕЛЕМЕНТИ ЦИФРОВОЇ ТЕХНІКИ

ЗАТВЕРДЖЕНО УЧЕНОЮ РАДОЮ ВІННИЦЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЯК НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ  
“СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ І АВТОМАТИКИ” ПРОТОКОЛ №5 ВІД 28 СІЧНЯ 2000 Р.

НТБ ВДТУ



3157-31

681.51(075)

В 20

2001

Васюра А.С. Електромагнітні елементи та при

Випиця ВДТУ 2001

АБОНЕМЕНТ-3

Рецензенти:

*Лисогор В.М.*, доктор технічних наук, професор

*Ротштейн О.П.*, доктор технічних наук, професор

*Хаймзон І.І.*, доктор технічних наук, професор

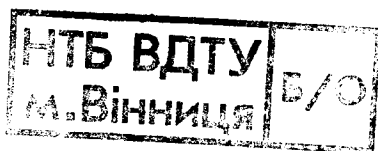
Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Васюра А.С.**

**В 20** “Електромагнітні елементи та пристрої систем управління і автоматики”. ч. II. “Електромагнітні елементи цифрової техніки”. Навчальний посібник. – Вінниця:, ВДТУ, 2001. – 162 с. укр. мовою.

В посібнику розглянуті питання теорії імпульсного перемагнічування феромагнетиків, магнітно-напівпровідникові елементи та логічні пристрої на них, магнітні елементи запам'ятовувальних пристроїв цифрової техніки, електромеханічні та електромагнітні пристрої управління.

Для студентів вузів, які навчаються за спеціальністю “Системи управління і автоматики”. Може бути корисним для студентів споріднених спеціальностей та для інженерно-технічного персоналу відповідного профілю.



УДК 681.5

© А.С. Васюра, 2001

## ЗМІСТ

Вступ	5
<b>Розділ 1. Принципи використання феромагнетиків в цифрових пристроях</b>	<b>6</b>
1.1. Імпульсне перемагнічування феромагнетиків. Магніто-напівпровідникові елементи (МНЕ)	6
1.2. Логічні пристрої на МНЕ	21
1.3. Імпульсні трансформатори на кільцевих осердях	32
Контрольні запитання та завдання	45
<b>Розділ 2. Магнітні елементи запам'ятовувальних пристроїв</b>	<b>46</b>
2.1. Цифровий магнітний запис (ЦМЗ) на рухомий носій	46
2.1.1. Структура системи цифрового магнітного запису	48
2.1.2. Основні характеристики систем ЦМЗ	56
2.1.3. Магнітні носії в системах ЦМЗ	61
2.1.4. Магнітні головки запису і відтворення	67
2.2. Способи цифрового магнітного запису на рухомий носій	75
2.2.1. Класифікація способів ЦМЗ	75
2.2.2. Імпульсні способи запису	80
2.2.3. Потенціальні способи запису	84
2.2.4. Імпульсно-потенціальні способи запису	88
2.2.5. Способи ЦМЗ з використанням групової модуляції	91
2.2.6. Основні характеристики способів ЦМЗ	96
2.3. Інтегральні магнітні елементи запам'ятовувальних пристроїв	98
2.3.1. Магнітні логічні елементи з розгалуженим магнітопроводом	100
2.3.2. Тонкі магнітні плівки	111

2.3.3. Магнітні інтегральні схеми на циліндричних магнітних доменах	118
2.3.4. Елементи пристроїв пам'яті на ЦМД	133
2.3.5. Перспективи розвитку елементної бази доменних пристроїв	140
2.3.6. Принципи реалізації пристроїв пам'яті на вертикальних блоківських лініях	147
Контрольні запитання та завдання	153
Література	154

## ВСТУП

Поряд з широко розповсюдженими електромагнітними пристроями, які напевно будуть використовуватися ще досить довго (електромеханічні реле, силові електромагніти, електромагнітні муфти і т. ін.), активно застосовуються логічні та пам'ятовувальні пристрої на циліндричних магнітних доменах, тонкоплівкові елементи, інтегральні магнітні головки запису та ін. Найбільш перспективним є використання таких елементів в пристроях збереження та переробки цифрової інформації.

Сучасна магнітна мікротехніка займається мікромініатюризацією електромагнітних пристроїв, використовуючи конструктивні заходи, схемні методи, нові принципи дії і фізичні явища, покращення якості магнітних матеріалів, інтегральну технологію і т. ін.

Основою вдосконалення систем управління і автоматики на сучасному етапі розвитку технічного прогресу є широке застосування цифрових методів представлення та перетворення інформації практично в усіх ланках інформаційно-вимірювальних систем, обчислювальної техніки, автоматики.

Найбільшого поширення отримали методи магнітного запису цифрової інформації. Переваги магнітних регістраторів інформації поставили їх практично поза конкуренцією по відношенню до інших засобів.

В наш час пристрої магнітного запису інформації як проміжкові та вихідні ланки вимірювальних обчислювальних систем управління і автоматики знайшли застосування практично в усіх сферах діяльності людства. Фактично магнітний запис застосовується всюди, де проводяться досліді, вимірювання, збереження і обробка інформації та її використання в системах управління і виконання.

Розгляду електромагнітних елементів дискретної дії, пристроїв цифрової техніки присвячена друга частина навчального посібника "Електромагнітні елементи та пристрої систем управління і автоматики" — "Електромагнітні елементи цифрової техніки".

# 1. Принципи використання феромагнетиків в цифрових пристроях

## 1.1. Імпульсне перемагнічування феромагнетиків.

### Магніто-напівпровідникові елементи (МНЕ)

Поряд з напівпровідниковими приладами в цифрових пристроях знайшли широке використання магнітні матеріали з прямокутною петлею гістерезису. З цих матеріалів виготовляють магнітні осердя, які мають два стійкі магнітні стани.

Для цифрових пристроїв, що перемикаються, використовуються магнітні осердя двох видів: стрічкові пермалоєві і феритові.

Такі осердя, зовнішній вигляд яких показаний на рис.1.1.1, мають петлю гістерезису майже прямокутної форми (рис.1.1.2.а), малу величину коерцитивної сили  $H_c$  і, як наслідок, велику швидкість переходу від магнітного стану одного знаку до магнітного стану іншого знаку.



Рис 1.1.1 Зовнішній вигляд стрічкових і феритових осердь тороїдальної форми

Стрічкові осердя мають кращі магнітні характеристики у порівнянні з феритовими. Однак останні мають велику швидкодію, оскільки у них майже відсутні втрати на вихрові струми, які сповільнюють перемагнічування осердя. До того ж вони більш прості у виготовленні і мають більшу величину коефіцієнта прямокутності, ніж стрічкові осердя, але час пере-

магнічування і коерцитивна сила у феритових осердях значно сильніше залежить від температури.

Розглянемо роботу магнітного елемента, який складається з осердя з обмотками. Припустимо, що при пропусканні імпульсу струму  $I_1$  через обмотку осердя (рис.1.1.2,б) воно намагнічується до насичення в одному з напрямків, скажімо, до позитивного значення індукції  $+B_m$  (див.рис.1.1.2.а, де з віссю  $B$  суміщені вісі часу з зображенням імпульсів, які надходять в обмотки, і імпульсів, які видаються на виході). Якщо струм намагнічування вимкнати, то намагнічування осердя зміниться досить мало – до величини, що відповідає залишковій магнітній індукції  $B_r$ . Осердя залишається намагніченим. Позначимо цей стан намагнічування одиницею «1».

Якщо тепер пропустити струм  $I_3$  через третю обмотку, то спочатку намагнічування осердя буде зменшуватись досить повільно до тих пір, поки не досягне верхнього лівого коліна петлі гістерезису, після чого воно швидко досягне нижнього лівого коліна, а потім повільно дійде до величини  $-B_m$ . При вимкненні струму намагнічування осердя, як і раніше, зміниться досить мало і буде відповідати значенню  $-B_r$ . Позначимо цей стан нулем («0»).

Таким чином, магнітний елемент, подібно спусковій схемі (тригера), перемикається з одного стійкого стану в інший і залишається в ньому після завершення дії імпульсу перемикаання.

На рис.1.1.2,б і наступних рисунках крапкою позначені початки обмоток. У відповідності з правилом «гвинта» будемо вважати, що, якщо струм входить в початок обмотки, осердя намагнічується у від'ємному напрямку, якщо ж струм виходить з початку обмотки, осердя намагнічується в додатному напрямку.

При виконанні повторного намагнічування осердя в тому ж самому напрямку, що і в останній раз, внаслідок прямокутної петлі гістерезису



матеріалу осердя зміна магнітного потоку в осерді, а разом з тим і напруга, що індукується у вихідній обмотці, будуть досить малими.

Таким чином, перемагнічуючи осердя вхідним сигналом в один стан (звичайно в стан «1») а потім «перевіряючи» цей стан шляхом перемагнічування осердя в інший стан («0»), ми можемо за величиною зміни магнітної індукції чи за величиною ЕРС, яка індукується у вихідній обмотці, розрізнати стан намагніченості осердя. Наприклад, якщо осердя знаходилося в стані «1», то при його перевірці струмом  $I_3$  (рис.1.1.2,б) отримаємо відносно велику зміну магнітної індукції; якщо ж осердя до перевірки знаходилося в стані «0», то в результаті перевірки буде отримана досить мала зміна магнітної індукції.

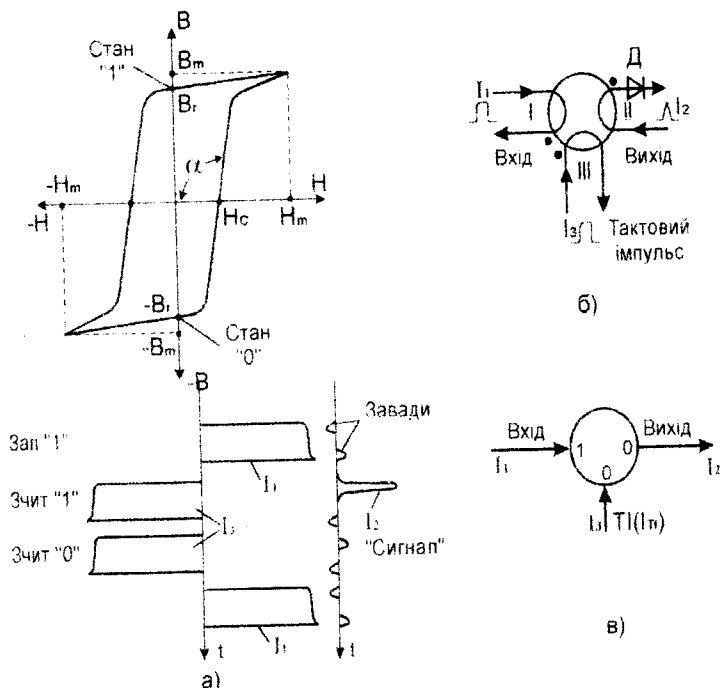


Рис. 1.1.2 Двійковий магнітний елемент з осердям, який має прямокутну форму петлі гістерезису. а - петля перемагнічування осердя і часове співвідношення імпульсів, які надходять на вхід і видаються на виході, б - схема включення обмоток;

в - умовне позначення

Таким чином, в обмотках осердя у відповідності з формою петлі гістерезису (рис.1.1.2) при зміні магнітної індукції від  $B_m$  до  $B_r$  (чи від  $B_m$  до  $-B_r$ ) індукується ЕРС завади, а при зміні магнітної індукції від  $-B_r$  до  $B_m$  (чи від  $B_r$  до  $-B_m$ ) індукується ЕРС корисного сигналу.

Схеми на магнітних осердях, як правило, будуються таким чином, що стан намагніченості осердь неперервно повторюється спеціальними імпульсами, які називаються тактовими і позначаються  $I_{m.i.}$ .

Щоб на виході осердя сигнал з'являвся тільки при «перевірці» його стану намагніченості, тобто при дії тактового імпульсу, і не з'являвся при надходженні вхідного сигналу, послідовно з вихідною обмоткою включається діод  $D$ . Завдяки цьому енергія вхідного імпульсу витрачається тільки на власне перемагнічування осердя в стан «1», оскільки зовнішнє навантаження від'єднане при цьому від обмотки осердя діодом  $D$  і, як наслідок, вихідний струм  $I_2$  відсутній і не створює розмагнічувальної дії, як це має місце у звичайних трансформаторах.

Якщо в транзисторах підсилення за потужністю імпульсу, який надходить на вхід, здійснюється за рахунок енергії колекторного джерела живлення  $U$ , то в магнітному перемикачеві, який також має підсилювальні властивості, підсилення вхідного сигналу за потужністю здійснюється за рахунок енергії, яка підводиться від джерела тактових імпульсів.

Величина струмів в обмотках 1 і 3, необхідна для перемагнічування осердя із стану «0» в стан «1» і навпаки, визначається на основі закону повного струму, згідно з яким магніторушійна сила (МРС)  $F$ , яка діє вздовж замкненого контуру, рівна сумі всіх струмів, що пронизують цей контур. Магніторушійна сила, яка діє в осерді (рис.1.1.2):

$$F = wI \quad (1.1.1)$$

де  $wI$  являє собою суму ампер-витків, які проходять через вікно осердя.

Магніторухійна сила, яка припадає на одиницю довжини кола осердя, дорівнює напруженості поля. Якщо МРС розподілена рівномірно по всій довжині кола осердя, тоді маємо формулу для середнього значення напруженості поля:

$$H = \frac{F}{l} = \frac{wI}{l}, \quad (1.1.2)$$

де  $w$  – число витків обмотки;  $l$  – середня довжина магнітних силових ліній ( $l = 2\pi r_{cp}$ );  $r_{cp}$  – середній радіус осердя, см.

Згідно закону повного струму, напруженість в замкненому однорідному осерді однозначно визначається струмами в його обмотках. Якщо ж відома величина напруженості поля, то у відповідності з формулою (1.1.2) можна вважати відомим і струм в обмотці осердя. Якщо на осерді знаходиться декілька обмоток  $w_1, w_2, w_3 \dots w_n$ , по яким протікають відповідно струми  $I_1, I_2, I_3 \dots I_n$ , тоді підсумкова напруженість поля складає:

$$H = \frac{1}{l} (w_1 I_1 + w_2 I_2 + w_3 I_3 + \dots + w_n I_n). \quad (1.1.3)$$

Таким чином, струм, який підводять до тактової обмотки, повинен створити не тільки поле, необхідне для перемагнічування власного осердя з стану «1» в стан «0», а також і додаткове поле, необхідне для подолання дії зустрічного розмагнічувального поля, яке створюється струмом навантаження. Таким чином тактовий імпульс забезпечує зусилля за потужністю вхідного сигналу.

Тому струм вхідного сигналу визначається як

$$I_1 \geq \frac{H_m l}{w_1}; \quad (1.1.4)$$

де  $w_1$  – кількість витків вхідної обмотки, а струм тактового імпульсу (при  $w_1 = w_2 = w_3$ ) повинен бути рівним :

$$I_T = I_1 + I_2, \quad (1.1.5)$$

де  $I_2$  – струм в вихідній обмотці  $w_2$ .

Звичайно на блок-схемах застосовують спрощені позначення магнітних елементів. Одне з таких позначень приведене на рис.1.1.2,в, де коло відповідає осердю. Стрілка, яка направлена всередину осердя, відповідає входу магнітного елемента або вхідному колу управління; стрілка, що виходить з кола, відповідає виходу.

Цифри, які вказані в середині кола і відносяться до вхідних кіл, визначають положення, в яке перемагнічується осердя вхідним сигналом. Цифри, що відносяться до вихідних кіл, показують, в яке положення необхідно перемагнітити осердя щоб отримати на виході управляючий сигнал. Наприклад, якщо в магнітний елемент (рис.1.1.2,в) струмом  $I_1$  записати «1», то при надходженні тактового імпульсу  $I_3$  осердя перемагнітиться в стан «0» і на виході з'явиться керуювальний імпульс.

Якщо ж осердя знаходиться в стані «0», то тактовий імпульс, що надійде, не змінить намагнічування осердя і імпульс на виході не з'явиться.

Треба відзначити, що запис і зчитування інформації повинні проходити в різні моменти часу, інакше запис інформації не відбудеться, тому що поле, яке утворене тактовим імпульсом, знищить поле, що утворюється вхідним імпульсом струму. Ця умова, а також закон повного струму, з якого випливає рівняння (1.1.5), покладені в основу побудови пристроїв перемикання на магнітних елементах.

Частота передачі інформації в таких пристроях може досягти декількох сотень кілогерц і вище. При цій частоті перемагнічування під дію імпульсів струму виникає магнітна в'язкість.

Фізична природа магнітної в'язкості поля ще не зрозуміла остаточно, але зовнішньо її прояв ілюструє рис.1.1.3,а.

Припустимо, що в елементі зберігається "1" (тобто його індукція дорівнює  $\cdot Br$ ) і в обмотку  $w_n$  подається імпульс струму  $i_n$ , за формою близький до прямокутного (рис.1.1.3,а), що створює напруженість  $Hn$ ,

спрямовану проти годинникової стрілки (негативну на рис.1.1.) і достатню для повного перемагнічування (тобто до точки  $-B_m$ ) матеріалу. У процесі перемагнічування в обмотці  $w_{вих}$  наводиться ЕРС, яка за законом електромагнітної індукції дорівнює

$$e_{вих}(t) = -w_{вих}s \frac{dB}{dt}, \quad (1.1.6)$$

де  $s$  - перетин магнітопроводу.

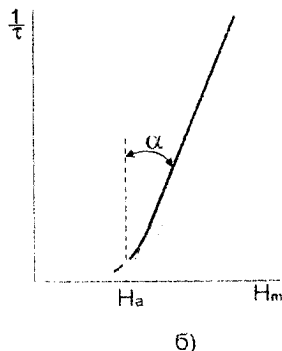
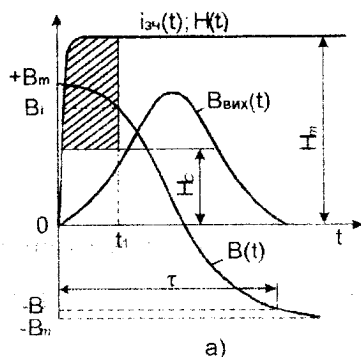


Рис. 1.1.3 Процес імпульсного перемагнічування (а) та його інтегральна характеристика (б)

Графічно інтегруючи криву (1.1.6), отриману у вигляді осцилограми (рис. 1.1.3, а), можна знайти залежність зміни магнітної індукції елемента в часі:

$$B(t) = -\frac{1}{w_{вих}s} \int e_{вих}(t) dt. \quad (1.1.7)$$

Залежність  $i_m(t)$ , також отриману у вигляді осцилограми, можна перетворити в залежність напруженості в часі:

$$H(t) = i_m(t) / l_{сер}, \quad (1.1.8)$$

де  $l_{сер}$  - довжина середньої лінії кільцевого магнітопроводу (див. рис. 1.1., б).

Порівняння кривих (1.1.8) і (1.1.7) на рис. 1.1.3,а переконує, що магнітна індукція досягає значення  $B_m$  із значним відставанням у часі після

того моменту, коли напруженість магнітного поля вже досягла значення  $H_m$ . У цьому відставанні, яке складає в магнітопроводах із фериту частки й одиниці мікросекунди, і виявляється магнітна в'язкість.

Для багатьох розрахунків достатньо знати усереднені за час повного перемагнічення (інтегральні) значення величин, які характеризують процес перемагнічування від  $-Br$  до  $-Br$  або в зворотному напрямку. Цей час позначають через  $\tau$  (рис.1.1.3,а). Типова для феритів залежність величини  $1/\tau$  (оберненої часу повного перемагнічення) від напруженості  $H_m$ , прийнятої за прямокутний імпульс, приведена на рис. 1.1.3, б.

Величина  $H_0$  називається пороговою напруженістю, тому що при напруженостях, менших  $H_0$ , які утворюються коротким імпульсом струму  $i_{\text{пч}}$ , матеріал, можна вважати, ще не починає перемагнічуватися.

Гранична напруженість  $H_0$  визначається відрізком, що відтинається продовженням лінійної ділянки кривої на осі абсцис. Для лінійної ділянки

$$\operatorname{tg} \alpha = (H_m - H_0) (1/\tau) = \tau (H_m - H_0) = \text{const},$$

$\operatorname{tg} \alpha$  є постійною величиною (константою), тому процес імпульсного перемагнічення можна характеризувати формулою

$$S_w = \tau(H_m - H_0), \quad (1.1.9)$$

в якій константа, позначена  $S_w$ , називається коефіцієнтом переключення.

З (1.1.9) випливає висновок, що чим більша намагнічувальна сила  $H_m$  і менша  $H_0$ , тим швидше перемагнітиться матеріал. Зауважимо, що розрахунок часу повного перемагнічування, використовуючи (1.1.9),

$$\tau = S_w / (H_m - H_0)$$

дає результати, близькі до експериментальних лише при умові  $H_m \gg H_0$ .

Коефіцієнт перемикання  $S_w$  є величиною постійною в широких межах зміни намагнічувального поля, але залежить від матеріалу і геометричних розмірів осердя. В окремому випадку, він залежить від величини нахилу бокових сторін петлі гістерезису (див. кут  $\alpha$  на рис.1.1.2). Цей нахил пояс-

нюються різною довжиною магнітних шляхів зовнішніх і внутрішніх ділянок магнітного матеріалу, тобто залежить від товщини стінок осердя.

Дійсно, якщо б кут нахилу  $\alpha$  був рівний  $90^\circ$ , стан намагніченості осердя змінювався б миттєво, однак наявність нахилу у петлі гістерезису бокової стінки, який перевищує  $90^\circ$ , а також наявність кінцевої довжини фронту імпульсу струму перемикаання призводить до деякого сповільнення перемагнічування осердя.

Звідси випливає, що чим товстіші стінки тороїдального осердя, тим повільніше він перемагнітиться чи тим більшої тривалості буде отриманий вихідний сигнал.

Для більшості феритових осердь коефіцієнт перемикаання має значення від 0.2 до 0.5 мкКл/см.

Використовуючи характеристику  $1/\tau = f(H_m)$ , легко визначити середнє значення ЕРС, що наведеться, наприклад, у вихідній шині (проводі), пропущеній через кільцевий магнітопровід перетином  $s$ , із матеріалу з залишковою індукцією  $B_r$ , при деякому значенні прямокутного імпульсу напруженості  $H_m$  в перемагнічувальній обмотці:

$$E_{вих\,сер} = 2sBr(1/\tau), \quad (1.1.10)$$

де  $1/\tau$  взяте з характеристики  $1/\tau = f(H_m)$ .

Можна оцінити й амплітудне значення цієї ЕРС:

$$E_{вих\,m} = E_{вих\,сер} / k_f$$

де  $k_f$  - коефіцієнт форми, рівний для феритових кільцевих магнітопроводів 0,55-0,65.

Прямокутність петлі гістерезису магнітних матеріалів оцінюється відношенням залишкової магнітної індукції  $B_r$  до максимальної індукції  $B_m$ , при якій відбувається магнітне насичення матеріалу, і позначається буквою  $p = B_r/B_m$ . Величина  $p$  для більшості тороїдальних осердь в полі напру-

женістю  $H_m = 5H_c$  коливається від 0,85 до 0,95, а час перемикавання складає від 0,4 до 1 мкс для феритових і від 0,2 до 2 мкс для стрічкових осердь.

Слід мати на увазі, що час перемагнічування осердя залежить від підсумкової напруженості магнітного поля, яка створюється в осерді, і може бути визначений з рівняння (1.1.6) чи орієнтовно з графіка, приведеного на рис. 1.1.4. При цьому необхідно прикладати таке поле, при якому осердя буде перемагнічуватись по наперед відомому граничному циклу чи по граничній петлі гістерезису. При роботі з полями меншої напруженості, ніж  $H_m$  для граничного циклу, перемикавання осердя може відбуватися по так званим частинним циклам. В цьому випадку при незначних зменшеннях струмів живлення робота схеми буде порушуватися. Тому слід вибирати:

$$H_m \geq (5 \div 10)H_c \quad (1.1.11)$$

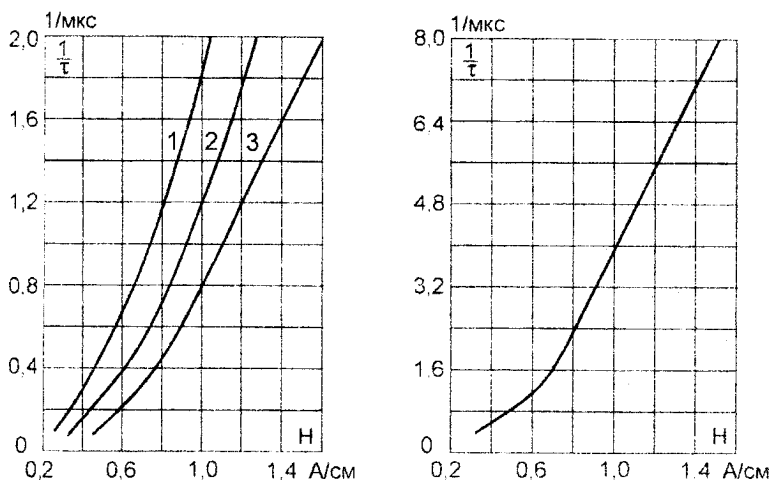


Рис. 1.1.4. Залежність часу перемагнічування ( $1/\tau$ ) осердь від напруженості магнітного поля

- a* - для феритових осердь типів: 0,12 ВТ, розміром 2х1,4х1,45 мм (крива 1); 0,16 ВТ, розміром 3х2х1,3 мм (крива 2); 0,3 ВТ, розміром 3х2х1,4 мм (крива 3);
- б* - для осердя з пермолоевої стрічки 79 НМ товщиною прокату 3 мк.



Нами було розглянуто магніто-напівпровідниковий елемент (МНЕ), в якому зв'язок з наступним елементом здійснюється через пасивний прилад – діод. Через це такі елементи отримали назву магніто-діодних елементів (МДЕ).

Основним недоліком приведених елементів є те, що для підсилення вхідного сигналу необхідна значна потужність від джерела тактових імпульсів. Споживча потужність особливо зростає при одночасному зчитуванні "1" з декількох осердь, і тим більше, чим більше осердь включено до перемагнічувальних осердь. Зростання потужності пояснюється тим, що при перемагнічуванні осердя магнітного елемента в його тактовій обмотці виникає ЕРС зворотної полярності. В результаті сумарний вхідний опір обмоток осердь, які перемагнічуються, збільшується в десятки разів. При цьому амплітуда імпульсів тактового генератора може зменшитися і, в зв'язку з цим, порушиться нормальна робота схеми.

Практично встановлено, що застосування в якості тактового генератора блокінг-генераторів на транзисторах типу МП41-МП42, які працюють при напрузі живлення 12-15 В ( $I_{m,i}=0,3A$ ), допускається одночасне зчитування «1» не більше ніж з трьох-чотирьох осердь, які мають зовнішній діаметр 3 мм, а цього в багатьох випадках недостатньо.

Розрахунки показують, що для того, щоб магніто-діодний елемент при перемагнічуванні міг одночасно перемагнітити друге осердя, число ампер-витків в його тактовій обмотці повинно бути в 4-5 разів більше, ніж у вхідній обмотці. При цьому споживання струму від джерела тактових імпульсів зростає в 4-5 разів порівняно з струмом у вхідній обмотці. Отже, щоб збільшити кількість «1», що одночасно зчитуються при даному джерелі тактових імпульсів, необхідно пасивний діод в елементі замінити активним транзистором. Останній, в свою чергу, дозволить збільшити навантажувальну здатність елемента без збільшення споживаної потужності від

джерела тактових імпульсів. Під навантажувальною здатністю потрібно розуміти яку кількість наступних елементів може перемагнітити кожен попередній елемент. Магнітний елемент з транзистором називають магніто-транзисторним елементом (МТЕ).

До теперішнього часу розроблена велика кількість різних схем МТЕ. Їх можна поділити на МТЕ без позитивного зворотного зв'язку і МТЕ з позитивним зворотним зв'язком.

**МТЕ без зворотного зв'язку** (рис.1.1.5,а і рис.1.1.5,б). Тут осердя зв'язане з транзистором через обмотку 2. Якщо осердя знаходиться в стані «1», то при надходженні зчитувального імпульсу  $I_{зч}$  в обмотку 3 відбувається зміна його стану. В той же час швидко зміна магнітного

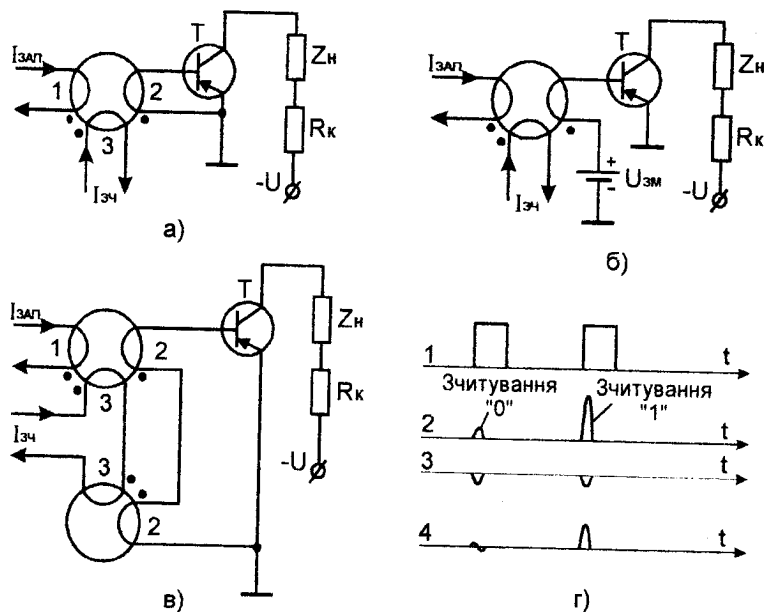
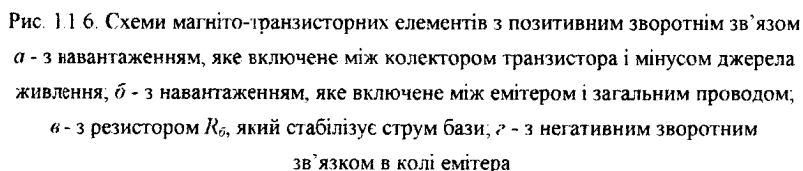


Рис. 1.1.5. Схеми магніто-транзисторних елементів без позитивного зворотного зв'язку  
 а - без зміщення; б - зі зміщенням; в - з додатковим осердям, яке компенсує завади при зчитуванні «0»; г - часова відповідність в схемі з додатковим осердям; 1 - зчитувальні імпульси; 2 - імпульси на виході обмотки 2 осердя А; 3 - теж осердя Б; 4 - підсумкові імпульси на виході транзистора Т

Якщо використовуються осердя, в яких  $B_r/B_m < 0,85$ , то в обмотці 2 при зчитуванні «0», а також при запису «1» можуть виникнути завади з амплітудою, яка достатня для помилкового відкривання транзистора. Щоб запобігти цьому явищу, в коло бази вводять невелике додатне зміщення (рис.1.1.5,6) порядку 0,2-0,4 В.



У відповідальних випадках знешкодження завад, які виникають при зчитуванні «0», здійснюється додатковим осердям, яке компенсує завади, і обмотки якого ввімкнені так, як показано на рис. 1.1.5, в. Кількість витків на додатковому осерді береться те ж, що і на відповідних обмотках основного осердя. В результаті при такому співвідношенні витків і відбувається компенсація завад (рис. 1.1.5, г). За такою ж аналогією за рахунок введення другого додаткового осердя можна усунути вплив завад, які виникають при записі «1».

Основною перевагою МТЕ без позитивного зворотного зв'язку є простота і мала чутливість до завад, особливо при підвищеній температурі. Однак вона має порівняно велике споживання енергії від тактового генератора і сильну залежність параметрів вихідного імпульсу від індивідуальних властивостей транзистора і осердя.

МТЕ з позитивним зворотнім зв'язком (рис. 1.1.6). За принципом дії він нагадує роботу схеми блокінг-генератора. Припустимо, що в схемі, зображеній на рис. 1.1.6, а, в осерді записана «1», тоді при надходженні зчитування  $I_{\text{зч}}$  між базою і емітером виникає напруга, яка приводить транзистор у напіввідкритий стан. Внаслідок існування зворотного зв'язку між базою і колектором транзистора виникає процес лавиноподібного наростання колекторного струму. Відбувається повне відкривання транзистора, і відповідно перемагнічування осердя відбувається по колу зворотного зв'язку колекторним струмом транзистора.

Оскільки від  $I_{\text{зч}}$  вимагається початкове відкривання транзистора, то внаслідок цього зчитувальною обмоткою необхідно створити напруженість поля, що дорівнює або трохи більше, ніж величина коерцитивної сили  $H_c$ , тоді як в МТЕ без зворотного зв'язку необхідно прикласти поле величиною  $H_m$ . Звідси випливає, що потужність зчитувальних (тактових) імпульсів в МТЕ з зворотним зв'язком може бути знижена в 5-10 разів. Це і є основною

перевагою МТЕ з позитивним зворотним зв'язком порівняно з МТЕ без зворотного зв'язку.

Наявність зворотного зв'язку особливо проявляється при роботі МТЕ в умовах значних від'ємних температур, тому що при від'ємній температурі  $30-50^{\circ}\text{C}$  не тільки різко підвищується енергія, необхідна для переміщення феритового осердя, але і значно зменшується коефіцієнт підсилення транзистора. Саме тому в цих умовах зворотний зв'язок здійснює великий вплив на підвищення працездатності елемента. Тому такі МТЕ, не дивлячись навіть на те, що вони, в принципі, мають меншу надійність, особливо при додатних температурах, знаходять виключно широке застосування.

Схема, приведена на рис.1.1.6,б, відрізняється від попередньої місцем включення колекторного і навантажувального резисторів, а також полярністю вихідного імпульсу напруги.

Для того, щоб виключити вплив відмінностей у значеннях вхідного опору транзисторів, тобто для стабілізації струму бази і відповідно тривалості колекторного імпульсу при масовому виготовленні елементів звичайно в базове коло транзистора включають стабілізувальний резистор  $R_6$  номіналом  $50\ \Omega$  (рис.1.1.6,в).

Стабілізація параметрів транзисторів, а також зменшення тривалості імпульсу з метою підвищення граничної частоти роботи елементів досягається за рахунок введення слабкого негативного зворотного зв'язку, який здійснюється шляхом введення в коло емітера резистора  $R_6$  з опором порядку  $5-10\ \Omega$  (рис.1.1.6,г).

Усунення впливу заводів здійснюється тими ж засобами, що й в МТЕ без прикладеного зворотного зв'язку. Відповідно засоби стабілізації струму бази, параметрів транзисторів і тривалості колекторного струму, наведені

на рис.1.1.6, можуть застосовуватись і для МТЕ без позитивного зворотнього зв'язку.

Слід відмітити, що пристрої, виконані з застосуванням магнітних елементів, володіють виключно високою надійністю і малим споживанням енергії від джерела живлення, ніж аналогічні пристрої, виконані на транзисторах і діодах. Однак перші пристрої мало технологічні у виготовленні, тому основне застосування магнітні осердя знаходять в запам'ятовувальних пристроях, де застосування інших приладів викликає великі труднощі, і там, де до пристроїв ставляться високі вимоги з надійності та економічності живлення.

## 1.2. Логічні пристрої на МНЕ

Перед тим, як розглянути принципи побудови схем, що виконують логічні операції, розглянемо способи розгалуження інформації в схемах на магнітних елементах.

**Схеми розгалуження** використовуються для передачі інформації з виходу одного магнітного елемента одночасно на ряд інших елементів.

Розгалуження інформації можна здійснювати як паралельним, так і послідовним ввімкненням входів тих пристроїв, на які надходить інформація що розгалужується. На рис.1.2.1,*а* показано паралельне розгалуження вихідного сигналу МДЕ на два канали, на рис.1.2.1,*б* те ж для МТЕ. Слід відразу ж відмітити, що паралельне розгалуження є небажаним, особливо для ферит-діодних схем, так як із-за розбросу параметрів осердь і діодів один з приймаючих осердь може перемагнітись раніше за інших, опір вхідної обмотки цього осердя різко зменшиться і в результаті інші приймаючі осердя будуть перемагнічені неповністю. В магніто-транзисторних елементах паралельне розгалуження призводить до усклад-

нення схем, а саме: необхідно намотувати додаткові обмотки, що ускладнюється введенням зворотного зв'язку.

Цих недоліків позбавлені схеми з послідовним розгалуженням, які приведені на рис.1.2.1,в для МДЕ і на рис.1.2.1,г для МТЕ.

Як при паралельному, так і при послідовному з'єднанні розгалужений елемент повинен мати достатню вихідну потужність, яка необхідна для приведення в дію декількох інших елементів. Звичайно з одного елемента інформацію розгалужують на два-три інші подібні елементи. При розгалуженнях на більшу кількість каналів необхідно значно підвищувати потужність розгалужувального елемента. Так, для магніто-діодних елементів це досягається за рахунок збільшення кількості витків вхідної і вихідної обмоток і числа витків тактової обмотки, а для магніто-транзисторних елементів - за рахунок збільшення колекторного струму чи напруги.

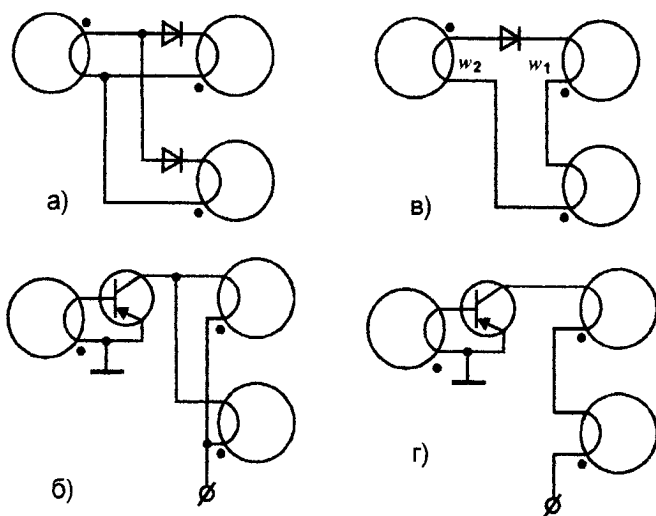


Рис. 1.2.1. Схеми розгалуження інформації в магнітних елементах  
 а - паралельне розгалуження для МДЕ; б - те ж саме для МТЕ;  
 в - послідовне розгалуження для МДЕ; г - те ж саме для МТЕ

В табл. 1.2.1 приведені дані для МДЕ, ввімкнених за схемою, зображеною на рис.1.2.1,в, розрахованих на частоту повторення тактових імпульсів біля  $200\text{кГц}$  і які допускають розгалуження на  $x$  приймальних осердь. Матеріал осердь - ферит марки 0,16ВТ, розмірами  $3\times 2\times 1,3\text{ мм}$ .

Таблиця 1.2.1

**Дані для МДЕ, включених за схемою, зображеною на рис.1.2.1, в**

$x$	$w_1$	$w_2$	$I_{mi} w_{mi}, \text{ ab}$
1	4	27	4
2	3	37	7
3	2	52	14

Для МТЕ, виконаних на тих же осердях, можуть бути рекомендовані дані:

1. Для елементів без зворотного зв'язку (див. рис. 1.1.5, а) вихідна обмотка - 5 витків, тактова - 8 витків і базова - 12 витків,  $R_k = 120\text{ Ом}$  і  $U = 15\text{ В}$ , транзистори типу МП41.

2. Для схеми зі зворотним зв'язком (рис. 1.2.1, а) обмотки вхідна, тактова і зворотного зв'язку по 8 витків, а базова 15 витків,  $R_k = 82\text{ Ом}$  і  $U = 15\text{ В}$ , транзистори типу МП41.

Обидва МТЕ розраховані на частоту повторення тактових імпульсів порядку  $100\text{ кГц}$  і допускають розгалуження інформації на 3–4 аналогічних інших елементи.

Наведені дані отримані з розрахунків, які поки що базуються на цілому ряді припущень. Отже вони є лише першим наближенням для виготовлення дослідних зразків, за допомогою яких виконується остаточне уточнення наведених даних.



**Давачі «1».** В багатьох пристроях на магнітних елементах потрібно отримувати неперервну послідовність імпульсів, зазвичай, з частотою тактових імпульсів ( $TI$ ), за формою таких же як ті, що надходять з виходу елемента, що переключає. Для цієї мети найчастіше використовують звичайне осердя з постійним підмагнічуванням (рис.1.2.2,а). Цим підмагнічуванням осердя переводиться в стан «1», і тому при надходженні  $TI$  у вихідній обмотці індукується напруга.

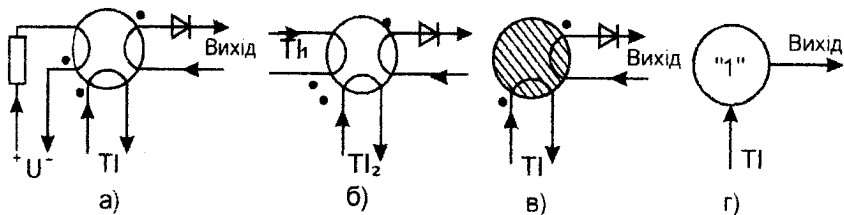


Рис.1.2.2. Давачі «1»

а - схема з підмагнічуванням; б - схема, що живиться від двох джерел  $TI$ ;

в - схема з оксиферитовим осердям; г - умовне позначення

Дана схема є неекономічною, оскільки для підмагнічування неперервно витрачається енергія від джерела живлення. Крім цього,  $TI$  не тільки перемагнічує осердя в стан «0», але при цьому також повинен подолати ампер-витки підмагнічування. Від цих недоліків вільна схема, яка живиться від двох  $TI$  (рис. 1.2.2,б). Для однотактних схем в якості давача «1» використовують оксиферитове осердя (рис.1.2.2,в), яке має непрямокутну петлю гістерезису. Умовне позначення давача «1» показано на рис.1.2.2,г.

**Схеми «ЗАБОРОНА».** Вони можуть бути побудовані на різних принципах, наприклад, на принципі компенсації магнітних потоків, компенсації вихідної напруги за допомогою додаткового осердя з обмотками, на принципі закривання транзистора в МТЕ та на інших.

Розглянемо роботу схеми, засновану на першому принципі (рис.1.2.3,а). Припустимо, що осердя вхідним сигналом  $I_1$  переведено в

стан «1», тоді при надходженні тактового імпульсу  $I_3$  осердя перемагнітяться в стан «0» і на вихідній обмотці з'явиться сигнал  $I_2$ . Якщо необхідно не допустити проходження вхідного сигналу на вихід схеми, то одночасно з вхідним сигналом на спеціальний вхід подається сигнал заборони  $I_1$ . Магнітний потік від сигналу заборони має напрямок, протилежний напрямку магнітного потоку, який створюється вхідним сигналом. В результаті осердя під дією вхідного сигналу не перемагнітяться, і, відповідно, керувальний сигнал на виході відсутній.

Слід мати на увазі, що в цій схемі через коло заборони може проходити зворотний струм потоку інформації на попередні пристрої управління. Умовне позначення схеми «ЗАБОРОНА», яка основана на компенсації магнітного потоку, показане на рис.1.2.3,б.

Схема «ЗАБОРОНА», основана на компенсації вихідної напруги, приведена на рис.1.2.3,в. В ній при подачі вхідного сигналу перемагнічується тільки основне осердя А. При одночасному надходженні вхідного і забороняючого сигналів перемагнічується основне і додаткове осердя. ЕРС, які виникають при цьому у вихідних обмотках, компенсують одна одну.

Недоліком цієї схеми є можливість виникнення напруги завади під час перемагнічування забороняючого осердя при відсутності вхідного сигналу. Для того, щоб ліквідувати цей недолік, необхідно послідовно з вхідною обмоткою забороняючого осердя ввімкнути таку ж обмотку на основному осерді, як показано на рис. 1.2.3, в. Тоді осердя також буде перемагнічуватися в стан «1», і в результаті цього буде виконуватись компенсація як при запису, так і при зчитуванні «1».

Перевагою схеми «ЗАБОРОНА», основаної на компенсації напруги, є те, що в ній забороняюче осердя є також осердям компенсації завад.

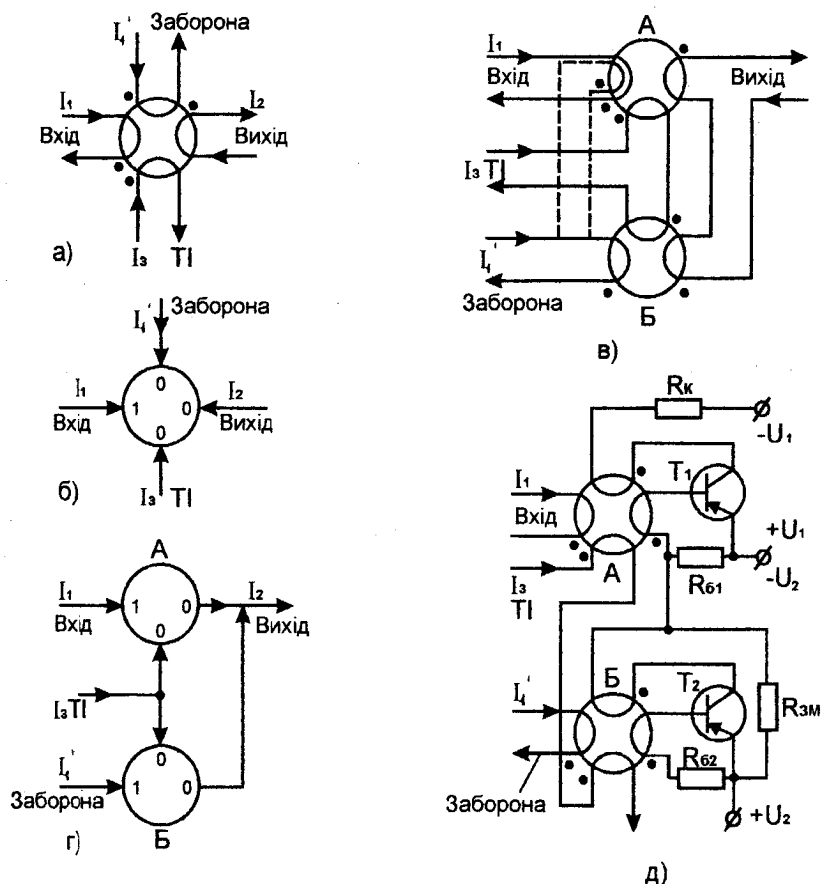


Рис 1.2.3. Схема «ЗАБОРОНА» на магнітних елементах

а - схема, що основана на компенсації магнітного потоку, б - її умовне позначення,

в - схема, яка основана на компенсації вихідної напруги, г - її умовне позначення,

д - схема, що основана на закриванні транзистора

Умовне позначення схеми «ЗАБОРОНА», основаної на компенсації вихідної напруги, наведено на рис. 1.2.3,г.

Схему «ЗАБОРОНА» можна виконати будь-яким з розглянутих способів. Однак найбільш зручно і досить надійно заборона здійснюється за методом закривання транзистора основного елемента А

(рис.1.2.3,д) струмом допоміжного елемента *Б*. Цей спосіб вимагає двох джерел колекторного живлення.

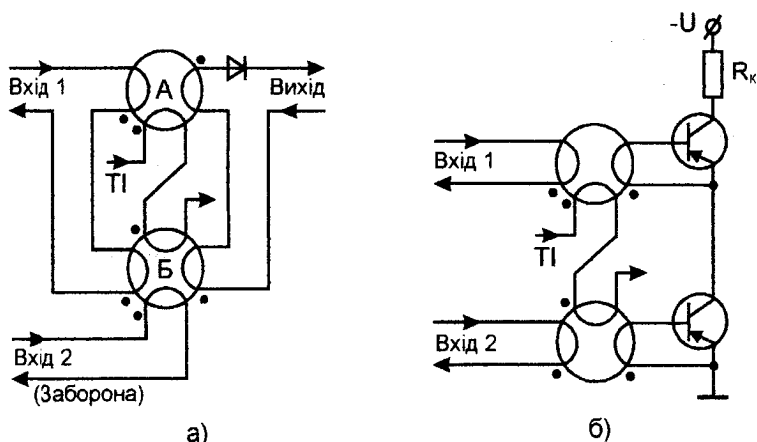


Рис1.2.4 Схеми збігання «І»

*а* - на магніто-діодних елементах; *б* - на магніто-транзисторних елементах

У початковому стані на  $T_1$  подано невелике, 0,1 - 0,2 В позитивне живлення, яке знімається з розподільника, що складається з резисторів  $R_{61}$  і  $R_{зм}$ . На елемент *Б* зміщення не подається, тому тривалість імпульсу, який генерується цим елементом, є більшою, ніж в елементі *А*, що досить бажане для роботи схеми «ЗАБОРОНА». Якщо одночасно зі струмом  $I_1$  надходить струм  $I_1'$ , то при зчитуванні струмом  $I_3$  транзистор  $T_1$  закривається і тим самим здійснюється заборона сигналу  $I_1$ .

У випадку, якщо маємо лише одне джерело живлення, замість  $R_{61}$  встановлюється резистор  $R_e$  послідовно з емітером  $T_1$ , який в свою чергу є колекторним опором для елемента *Б*. Падінням напруги на  $R_e$  і здійснюється закривання транзистора  $T_1$ .

**Схеми «НІ».** Схеми інверторів отримують шляхом добавки до основного входу схеми «ЗАБОРОНА» (рис. 1.2.3) давача «1». Тоді при наявності сигналу на забороняючому вході сигнал на виході буде відсутнім (і навпаки), тому, так же як і в схемі «НІ», буде відбуватися перевертання фа-

зи сигналу, який надходить на забороняючий вхід, котрий в цьому випадку стає входом керування.

**Схема збігання**, що реалізує логічну операцію «І» і виконана на МТЕ, приведена на рис.1.2.4,а. При надходженні сигналу тільки на *вхід 1* записуються «1» в обидва осердя, відповідно осердя *Б* здійснить «ЗАБОРОНУ», оснований на компенсації магнітних потоків, і тоді сигнал, зчитаний з осердя *А* пройде на вихід.

Схеми «І» на МТЕ здійснюється шляхом послідовного з'єднання елементів (рис. 1.2.4,б).

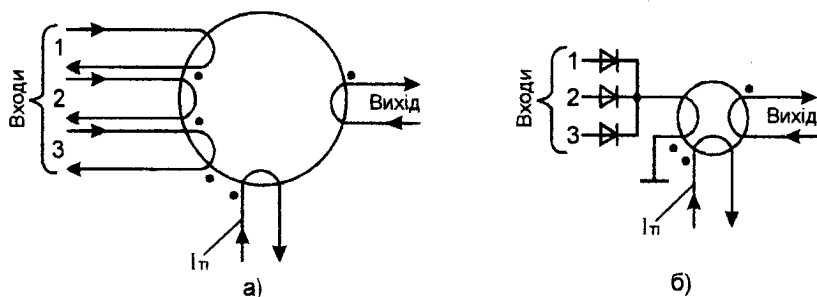


Рис 1.2.5. Збиральні схеми «АБО»

*а* - з розподіленими вихідними обмотками;

*б* - з розподіленням входів за допомогою діодів

**Збиральна схема.** Схема, яка реалізує логічну операцію «АБО», утвориться додаванням кількох входних обмоток до осердя (рис 1.2.5,а) чи шляхом паралельного присиднання входів до однієї обмотки через діоди (рис. 1.2.5,б), яке виключає взаємний вплив між входами.

Схема працює таким чином. Припустимо, що на один з входів чи на декілька входів одночасно надійшла інформація. Тоді в осерді записується «1» (вихідним станом є «0»). При надходженні тактового імпульсу  $I_{m.i}$  осердя повертається у вихідний стан. При цьому на виході схеми з'явиться сигнал позитивної полярності.

**Схема незбігання**, що реалізує логічну операцію «АБО-НІ» для двох незбігань, основана на компенсації магнітних потоків, приведена на рис.1.2.6,а. Припустимо, що інформація надійшла на *вхід 1*. Тоді в осерді *A* запишеться «1», в осерді *B* «0». При надходженні тактового імпульсу осердя *A* прийде у вихідний стан і видасть сигнал керування. Якщо ж сигнали надійдуть на обидва входи, тоді на кожен вхід осердь *A* і *B* надійдуть як основний, так і заборонюючий сигнали. Стан осердь не зміниться. Сигнал на виході буде відсутнім. Таким чином виконується логічна операція «НІ».

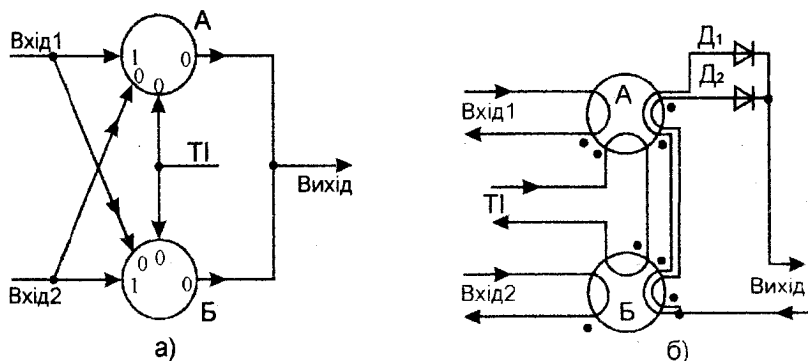


Рис 1.2.6. Схеми «АБО - НІ», що основані на компенсації магнітних потоків (а) і компенсації вихідної напруги (б)

Інший варіант схеми «АБО-НІ», заснований на компенсації вихідної напруги, наведений на рис.1.2.6,б. При надходженні інформації на *вхід 1* зчитана інформація проходить через діод  $D_2$ , а при надходженні інформації на *вхід 2* - через діод  $D_1$ . При надходженні інформації одночасно на обидва входи перемагнічуються обидва осердя.

Напруги, які індукуються у вихідних обмотках при надходженні тактового імпульсу, взаємно компенсуються, і сигнал на виході відсутній.

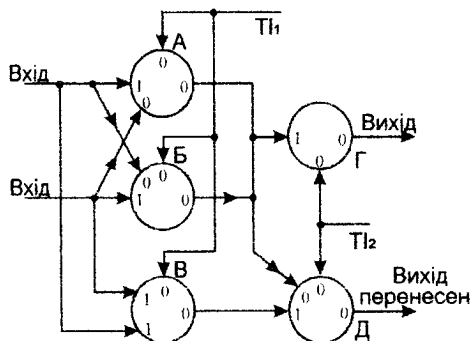
**Схема отримання зворотного коду.** Припустимо, що з виходу регістра зсуву знімається послідовність імпульсів, яка відповідає двійковому числу 1001 («1» - наявність вихідного сигналу, «0» - відсутність



Таким чином, за допомогою давача «1» і схеми «ЗАБОРОНА» отримано зворотний код двійкового числа, який в свою чергу дозволив спільно з тригером  $T_2$  перетворити імпульсні сигнали «0» і «1» в посилення тривалістю  $t = 1/f_{m.i.2}$ , де  $f_{m.i.2}$  - частота повторення імпульсів  $T_{I_2}$ .

**Однорозрядний суматор**, призначений для підсумовування чисел, може бути виконаний за схемою, зображеною на рис.1.2.8,а. Він складається з схеми «АБО-НІ», утвореної осередками А, Б і В і схеми «І», утвореної осередками Г і Д. Сумування чисел здійснюється за два періода тактових імпульсів.

Схема має два входи 1 і 2, по яким надходять числа (сигнали), з яких належить взяти суму, і два виходи, на одному з яких отримується «сума», а на іншому - «перенесення» в старший розряд. Робота схеми аналогічна роботі розглянутих схем «І» та «АБО-НІ», вихідний результат якої показано на рис. 1.2.8, б.



Вхід		Вихід	
1	1	Сума	Перенесення
1	1	0	0
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Рис. 1.2.8. Однорозрядний суматор

а - блок-схема, б - таблиця, яка роз'яснює роботу схеми



### 1.3. Імпульсні трансформатори на кільцевих осердях

Імпульсним трансформатором називають трансформатор, який виконаний на осерді з феро- чи феромагнітного матеріалу та призначений для передачі (трансформації) імпульсних сигналів.

Імпульсні трансформатори використовують для зміни амплітуди і полярності імпульсів, розгалуження імпульсів по незалежних колах, узгодження опорів, а також в якості фазозсувальний елемента в блокувальних генераторах.

Головна вимога до імпульсного трансформатора – це передача короткочасних імпульсів без спотворення форми (з найменшим спотворенням), що залежить від властивостей осердя, конструктивного виконання трансформатора та параметрів приладів, з якими працює трансформатор.

Важливими властивостями матеріалу осердь для імпульсних трансформаторів є значення імпульсної проникності  $\mu_i$  в залежності від тривалості імпульсу перепаду індукції, що має місце впродовж дії імпульсу.

Особливість осердя імпульсного трансформатора полягає в тому, що він працює в режимі однополярного намагнічування, коли його магнітний стан змінюється за часним несиметричним циклом  $B_r$  гістерезису (рис.1.3.1).

Імпульсна проникність і перепад індукції в більшій мірі залежать від амплітуди імпульсу напруженості та від передісторії, тобто від того, в якому магнітному стані знаходилося осердя до моменту появи імпульсу. Очевидно, що значення перепаду індукції при однаковій амплітуді імпульсу тим менше, чим вище початкове значення індукції в осерді, найбільшою величиною якої є остаточно індукція

граничного циклу. Це значення досягається при визначеній величині амплітуди імпульсу напруженості  $H_m$  (рис.1.3.1).

Враховуючи, що імпульсний трансформатор може працювати в будь-якому початковому стані осердя від повністю розмагніченого до  $B_r$ , режим роботи осердя потрібно вибирати в галузі полів, де вплив передісторії незначний. При інших рівних умовах виявляється, що різниця між перепадом індукції для повністю розмагніченого осердя і повністю намагніченого ( $B_0=B_r$ ) тим менша, чим менші величини  $B_r$  і  $H_c$  матеріалу.

Передача імпульсів з великою частотою обмежується втратами на вихрові струми. Тому осердя малопотужних імпульсних трансформаторів, що призначені для роботи на високих частотах, виконують з феритів.

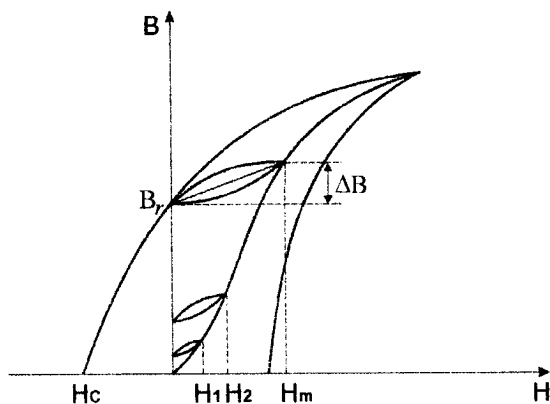


Рис.1.3.1. Зміна магнітного стану осердя імпульсного трансформатора при перемагнічуванні

Для більш низьких частот осердя можна виконувати також з пермалоїв. Пермалої, порівняно з феритами, мають вище значення імпульсної проникності  $\mu_i$  і термостабільність, але поступаються їм по

втратах на перемагнічування. Імпульсна проникність феритів практично залишається незмінною до частоти 1МГц, в той час як у стрічкових пермалоевих осердях вона зі збільшенням частоти різко падає та на частотах 5-50 кГц стає нижча, ніж у феритів.

**Еквівалентна схема трансформатора.** Так само, як будь-який трансформатор, імпульсний має два окремих кола: первинне ( $w_1$ ) та вторинне ( $w_2$ ), пов'язані між собою магнітним полем (рис.1.3.2,а).

Прикладена до первинного кола напруга  $u_1$  зрівноважується падінням напруги в активному опорі обмотки та проти-ЕРС, що індукується скріпленням з нею потоком  $\Phi_1$ :

$$u_1 = iR_{w1} + \frac{d\Phi_1}{dt} w_1.$$

В свою чергу, ЕРС  $e_2$ , що індукується у вторинній обмотці, зрівноважується падінням напруги на навантаженні  $u_2$  та у власному активному опорі  $R_{2a}$ :

$$-w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = i_2 R_{w2} + u_2.$$

При розрахунках параметрів трансформаторів користуються еквівалентною схемою, замінюючи магнітний зв'язок електричним, виходячи з умови незмінності режиму роботи.

Це досягається приведенням (переліком) параметрів одного з кіл до другого. Найчастіше приводять вторинне коло до первинного, позначивши приведені значення параметрів відповідним індексом чи штрихом.

Припустимо, що вхідний опір вторинного кола дорівнює  $R_2$ . Оскільки  $u_2 = ni_1$  та  $i_2 = i_1 n$  (де  $n = w_2/w_1$  - коефіцієнт трансформації), то  $R_2 = u_2/i_2$ , а приведений опір

$$R_2' = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_2}{ni_1} = \frac{1}{n^2} \frac{u_2}{i_2} = \frac{1}{n^2} R_2.$$

Аналогічно можна показати, що

$$X'_{l2} = \frac{1}{n^2} X_{l2} \text{ і } X'_{c2} = n^2 X_{c2}.$$

Заміна реального трансформатора еквівалентною схемою потребує врахування всіх параметрів, до яких відносять: струм намагнічування трансформатора  $i_\mu$ , потоки розсіювання  $\Phi_{s1}$  і  $\Phi_{s2}$ , паразитні ємності та активні опори обмоток.

Струм намагнічування трансформатора  $i_\mu = i_1 - ni_2$  може бути визначений в режимі холостого ходу, коли  $i_2 = 0$  і  $i_\mu = i_1$ . Враховуючи, що

$$\Phi = Bs = \mu Hs = \mu \frac{W_1 i_\mu}{l} s,$$

отримаємо

$$e_1 = \mu \frac{s}{l} w_1^2 \frac{di_\mu}{dt} = L_\mu \frac{di_\mu}{dt}.$$

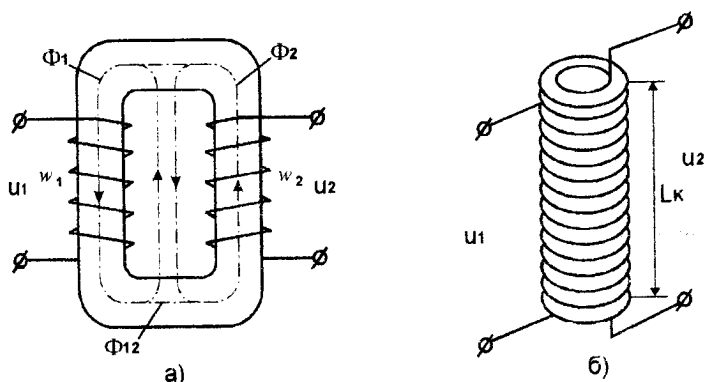


Рис. 1.3.2. Імпульсний трансформатор

В усталеному імпульсному режимі для визначення  $L_\mu$  беруть значення імпульсної магнітної проникності  $\mu_l$ , яке відповідає частковому

гістерезисному циклу при  $\Delta H_i = H_m$  (рис.1.3.2), і, отже,

$$L_\mu = \frac{Sw_1^2}{l} \frac{\Delta B}{H_m \mu_0}.$$

Очевидно, що індуктивність  $L_\mu$ , яка враховує струм намагнічування, повинна бути підключена паралельно до входу трансформатора.

Наявність потоку розсіювання зумовлює включення в еквівалентній схемі послідовно з входом індуктивності розсіювання  $L_S$ , яка в найпростішому випадку (обмотки  $w_1$  та  $w_2$  мають по одному шару та намотані одна поверх другої) залежить в основному від геометричних розмірів і може бути визначена за формулою

$$L_S = w_1^2 \frac{l_{сер} [\Delta_l + (d_1 + d_2)/3]}{l_K},$$

де  $l_{сер}$  - середня довжина витка;

$\Delta_l$  - товщина ізоляції між обмотками;

$d_1$  і  $d_2$  - діаметр дроту обмоток  $w_1$  і  $w_2$  відповідно;

$l_K$  - довжина когушки.

Паразитна ємність трансформатора, в загальному випадку, утворена міжвитковою та міжобмоточними ємностями та ємністю між обмотками та корпусом, є розподіленим параметром, і суворий її облік привів би до складного, послідовно-паралельного з'єднання ємностей.

Однак для спрощення розрахунків, зазвичай, відмовляються від точного розглядання, замінюючи розподілену ємність однією зосередженою еквівалентною. Цю заміну проводять, нехтуючи всіма складовими паразитної ємності, крім міжобмоточної, яка є основною складовою, дотримуючись при цьому умови рівності енергії, що

запасасться еквівалентною зосередженою ємністю, та енергії, що запасасться розподіленою міжобмоточною ємністю:

$$C = \varepsilon \frac{S_{обм}}{\Delta_l},$$

де  $\varepsilon$  - діелектрична проникність ізоляції між обмотками;

$s_{обм} = l_{сер} l_k$  - поверхня обмоток.

Накопичена в конденсаторі енергія:

$$A = 0.5 C \frac{U_{\max}^2 (n-1)^2}{3}.$$

Виходячи з рівності накопиченої енергії та приймаючи до уваги малість  $L_s$ , отримаємо для еквівалентної ємності:

$$C_e = C \frac{(n-1)^2}{3}.$$

Втратами в активних опорах обмоток, з огляду їх малості з причини невеликої кількості витків обмоток імпульсного трансформатора, зазвичай, нехтують.

Таким чином, еквівалентна схема імпульсного трансформатора з врахуванням всіх параметрів набуває вигляду, приведену на рис.1.3.3.

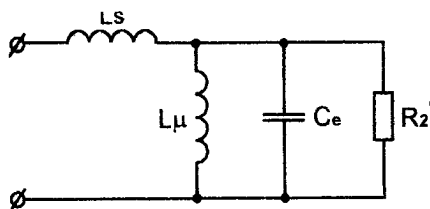


Рис. 1.3.3. Еквівалентна схема імпульсного трансформатора

**Робота трансформатора при передачі імпульсу прямокутної форми та активному навантаженні.** Використовуючи еквівалентну схему (рис.1.3.3), розглянемо роботу імпульсного трансформатора при подачі на його вхід імпульсу прямокутної форми.

Еквівалентна схема імпульсного трансформатора містить три реактивних елемента  $L_s$ ,  $L_\mu$  та  $C_e$ , тому процеси, що виникають в ній, описуються диференціальним рівнянням третього порядку, розв'язок якого в загальному випадку не дозволяє отримати достатньо прості аналітичні залежності. Для спрощення задачі процес розглядають поетапно: етапи переднього фронту імпульса, вершини імпульсу та заднього фронту (зрізу) імпульсу. Перший та третій етапи є короткочасними, порівняно з якими другий етап має значну тривалість.

Перш ніж переходити до фізики процесу, доповнимо еквівалентну схему параметрами, що визначають реальні умови роботи трансформатора.

Як вже відзначалося, на характеристики імпульсного трансформатора суттєвий вплив виявляють параметри джерела і, перш за все, його внутрішній опір. Врахуємо внутрішній опір джерела, вводячи в еквівалентну схему послідовно підключений з входом активний опір  $R_1$ .

Крім того, слід врахувати паразитну ємність  $C_2$ , яка виникає на виході трансформатора, відповідним чином замінюючи  $C_e$  на  $C_{en}$ :

$$C_{en} = C_e + C_2',$$

де  $C_2' = n^2 C_2$ .

Таким чином, схема набуває вигляду, приведеному на рис.1.3.4.

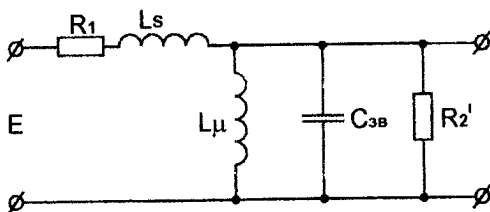


Рис.1.3.4. Еквівалентна схема імпульсного трансформатора з врахуванням внутрішнього опору джерела та паразитної ємності виходу

Оскільки за дуже короткий час проходження фронту імпульсу струм через індуктивність  $L_{\mu}$  практично не може змінитися, то на першому етапі, коли при  $t=0$  струм  $i_{\mu}=0$ , можна вважати  $L_{\mu}=\infty$  та розглядати схему, приведену на рис.1.3.5.

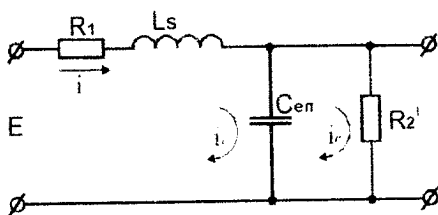


Рис.1.3.5. Еквівалентна схема імпульсного трансформатора в період швидкоплинних процесів при проходженні фронту імпульсу

Згідно з першим і другим законами Кірхгофа, для схеми (рис.1.3.5) будемо мати:

$$i = i_C + i_R; \quad e = u_{r1}(t) + u_l(t) + u_{cr}(t),$$

або, враховуючи, що

$$i_R = \frac{u_{cr}(t)}{R_2'} \quad i_C = C_{en} \frac{du_{cr}(t)}{dt},$$



$$i = \frac{u_{cr}(t)}{R_2} + C_{en} \frac{du_{cr}(t)}{dt}.$$

Оскільки  $u_{r1}(t) = iR_1$ , то

$$u_{r1}(t) = \frac{R_1}{R_2} u_{cr}(t) + R_2 C_{en} \frac{du_{cr}(t)}{dt}.$$

Аналогічно,

$$u_L(t) = L_s \frac{di}{dt} = \frac{L_s}{R_2} \frac{du_{cr}(t)}{dt} + L_s C_{en} \frac{d^2 u_{cr}(t)}{dt^2}.$$

Остаточно

$$e = L_s C_{en} \frac{d^2 u_{cr}(t)}{dt^2} + \left( \frac{L_s}{R_2} + R_1 C_{en} \right) \frac{du_{cr}(t)}{dt} + \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) u_{cr}(t),$$

чи в операторній формі

$$\frac{e}{p L_s C_{en}} = p^2 u(p) + 2 A p u(p) + B^2 u(p),$$

де

$$A = \frac{L_s + R_1 R_2 C_{en}}{2 R_2 C_{en} L_s}; \quad B = \sqrt{\frac{R_2 + R_1}{R_2 C_{en} L_s}};$$

звідси

$$u(p) = \frac{e / (L_s C_{en})}{p(p^2 + 2 A p + B^2)} = \frac{a(p)}{b(p)}.$$

Розв'язок останнього рівняння, яке визначає форму вихідної напруги, залежить від значення

$$Z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_2}{R_2 + R_1}} \left( \sqrt{\frac{L_s C_{en}}{R_2}} + \frac{R_1}{\sqrt{L_s C_{en}}} \right).$$

При  $Z < 1$  зміна напруги буде коливальною, при  $Z = 1$  – критичною і при  $Z > 1$  – аперіодичним, як показано на рис.1.3.6.

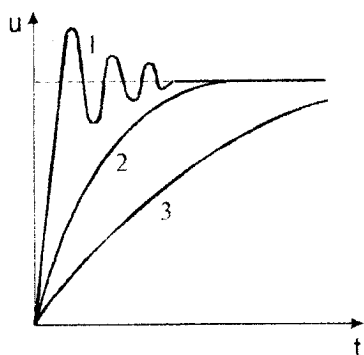


Рис.1.3.6. Зміна вихідної напруги при проходженні фронту імпульсу:

1 - коливальна; 2 - критична; 3 - аперіодична

На практиці прагнуть забезпечити величину  $Z$  в межах  $0.5 < Z < 1$ , що дозволяє отримати близький до критичного слабкоколивальний режим з тривалістю фронту імпульсу, яка не перевищує

$$t_{cep} = 2 \sqrt{\frac{R_2' L_s C_{en}}{R_2 + R_1}}$$

Після проходження фронту вхідного імпульсу в інтервалі часу  $0 < t < t_i$  (де  $t_i$  - тривалість імпульсу) настає другий етап, де ЕРС, при умові прямокутності імпульсу, залишається постійною ( $E = \text{const}$ ). Тому, припускаючи, що  $\frac{di(t)}{dt} \rightarrow 0$  і  $\frac{du_{cr}(t)}{dt} \rightarrow 0$ , можна знехтувати

$$u_s(t) = L_s \frac{di}{dt} \cong 0 \quad \text{та} \quad i_C = C_{en} \frac{du_{cr}(t)}{dt}$$

і розглядати еквівалентну схему (рис.1.3.7), яка містить один реактивний елемент, у зв'язку з чим справедливе рівняння першого порядку.

Використовуючи теорему про еквівалентний генератор, отримаємо послідовне з'єднання індуктивного та активного опорів, як показано на рис.1.3.8. В схемі (рис.1.3.8) еквівалентний опір  $R_e = R_1 R_2' / R_1 + R_2'$  та еквівалентна ЕРС

$$E_e = ER_2' / (R_1 + R_2').$$

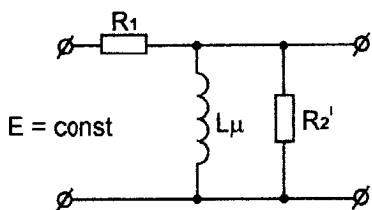


Рис.1.3.7. Еквівалентна схема  
імпульсного трансформатора  
в період проходження  
вершини імпульсу

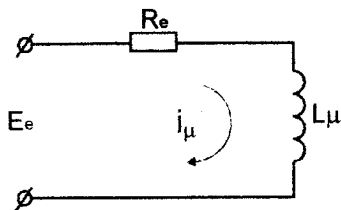


Рис.1.3.8. Схема трансформатора  
з еквівалентним джерелом  
імпульсної напруги для аналізу  
повільних процесів

Струм в колі RL, починаючи з моменту  $t=0$ , збільшується за експоненціальним законом  $i_\mu = (E/R_1)(1 - e^{-t/\tau})$ .

Відповідно, напруга на індуктивності  $L_\mu$  (а отже, на виході) буде змінюватися за законом  $u(t) = E e^{-t/\tau}$  та до моменту закінчення імпульсу  $t = t_i$  зменшиться до значення  $U = E e^{-t_i/\tau}$  (струм збільшиться до значення  $i_{\mu m} = (E/R_1)(1 - e^{-t_i/\tau})$ ).

Спад вершини імпульсу  $\Delta E$  відносно  $E_e$ , що називається коефіцієнтом спаду, дорівнює різниці початкових і кінцевих значень,

поділений на  $E_e$ :

$$k_c = \frac{\Delta E}{E_e} = \frac{E_e - E_e e^{-t_i/\tau}}{E_e} = 1 - e^{-t_i/\tau}$$

Оскільки для кола (рис.1.3.8)  $\tau = L_\mu / R_e$  та при  $\tau \gg t_i$  коефіцієнт  $k_c \cong t_i / \tau$ , то для забезпечення коефіцієнта спаду в межах припустимих значень  $k_{сД}$  необхідне виконання умови

$$L_\mu \geq \frac{t_i}{k_{сД}}$$

Після закінчення проходження вершини імпульсу в момент часу  $t = t_i$  ЕРС на вході дорівнює нулю ( $E_e = 0$ ), що відповідає короткому замиканню входу (рис.1.3.9), і на виході з'являється ЕРС самоіндукції протилежної полярності, яка буде поступово зменшуватись (у відповідності з затуханням струму намагнічування) з сталою часу  $\tau$ .

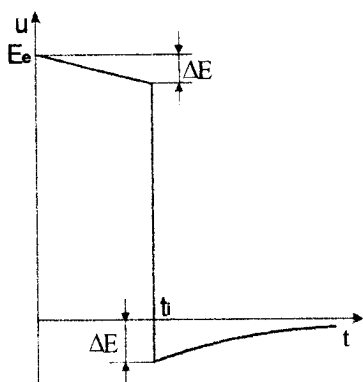


Рис.1.3.9. Зміна вихідної напруги при проходженні вершини та заднього фронту імпульсу

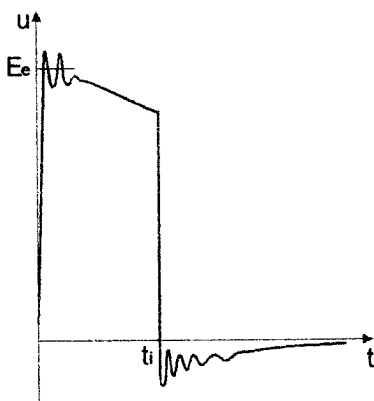


Рис.1.3.10. Повна зміна вихідної напруги при прямокутному імпульсі на вході та активному опорі на виході

Максимальне значення проти-ЕРС можна отримати з виразу

$$i_{\mu} R_e = \frac{R_e E}{R_1} (1 - e^{-t_1 / \tau}) = E_e (1 - e^{-t_1 / \tau})$$

і час загукання  $t_3 = 3\tau = 3L_{\mu} / R_e$ .

Таким чином, зміна вихідної напруги при проходженні вершини імпульсу буде мати вигляд, приведений на рис.1.3.9.

В околі заднього фронту імпульсу, так само як і в околі переднього фронту, тобто в період швидкоплинних процесів, картина, показана на рис.1.3.9, буде спотворена під впливом факторів, якими нехтували, розглядаючи процес як достатньо повільний. З врахуванням впливу цих факторів, що відображає в картині зміни напруги в швидкоплинних процесах (відповідно до рис.1.3.6.), при накладанні процесів один на другий отримаємо остаточну картину зміни вихідного імпульсу, що показана на рис.1.3.10.

## Контрольні запитання та завдання

1. Які режими роботи можливі при запису імпульсами напруги?
2. Поясніть принцип роботи трансфлюксора.
3. Поясніть принцип роботи біакса.
4. Чому в трансфлюксорах можна здійснювати неруйнівне зчитування?
5. Чим відрізняються магнітододні схеми заборони по напрузі і заборони по струму? МДЕ, МТЕ.
6. Які основні переваги магніто-транзисторних елементів?
7. Яким способом запобігають утворенню прямого і зворотного потоків логічної інформації в МТЕ?
8. Які логічні схеми на МТЕ Вам відомі? Нарисуйте їх. Поясніть.
9. Дайте визначення імпульсного трансформатора і розкажіть про вимоги до нього і застосування.
10. У чому особливість магнітного режиму роботи осердь імпульсних трансформаторів і які вимоги ставлять до матеріалу осердь?
11. Які матеріали використовують для малопотужних імпульсних трансформаторів? Яка область їх застосування?
12. Як визначити імпульсну проникливість по основній кривій намагнічування і гістерезисній петлі?
13. Намалюйте еквівалентну схему імпульсного трансформатора і розкажіть, як визначити їх параметри.
14. Намалюйте графік зміни вихідної напруги при передачі прямокутного імпульсу у випадку активного навантаження і поясніть причини його створення на виході.

## **Розділ 2. Магнітні елементи запам'ятовувальних пристроїв**

### **2.1. Цифровий магнітний запис на рухомий носій**

Магнітний запис як спосіб реєстрації (запам'ятовування) отримав визнання і широке практичне застосування в 40-ві роки нашого сторіччя, насамперед, в області звукозапису. В цей самий час почалися інтенсивні роботи з використання магнітного запису у вимірювальній та обчислювальній техніці. В наш час апаратура магнітного запису в якості проміжних і кінцевих комірок вимірювальних пристроїв, систем і комплексів знаходить застосування в авіації, ракетобудуванні і космонавтиці, кораблебудуванні й океанології, у медицині і біології, геології, енергетиці та в інших областях науки і техніки, де проводяться експериментальні дослідження й обробка технічних виробів різноманітного призначення. Широке розповсюдження магнітний запис знаходить в автоматизованих системах керування, радіомовленні, телебаченні і техніці зв'язку. Загальновідоме також його поширення в побутовій звуко- і відеозаписувальній апаратурі. По суті, необхідність у магнітних реєстраторах виникає скрізь, де проводяться дослідження і вимірювання.

Найважливішою сферою використання цифрового магнітного запису (ЦМЗ) є обчислювальна техніка, де магнітні реєструвальні пристрої використовуються, в основному, в якості зовнішніх накопичувачів ЕОМ. Таке широке застосування магнітний запис одержав завдяки своїм високим техніко-економічним показникам і, зокрема, таким властивостям, як відносна простота здійснення процесу запису і відтворення електричних сигналів, практично необмежений термін зберігання магнітограм, можливість процесів запису-відтворення і збереження при впливі високих і

низьких температур, підвищеній вологості, вібрації й інших чинників зовнішнього середовища, що значно відрізняються від нормальних лабораторних умов. Однією з суттєвих переваг магнітного запису є можливість перезапису записаної інформації та багатократного використання носія.

Апаратура, яка використовує принцип магнітного запису, надійна в роботі, зручна в експлуатації, має добрі габаритно-масові показники, відносно невелике споживання енергії і відносно невисоку вартість. У перших зразках магнітної реєструвальної апаратури використовувалися принципи прямого запису й аналогового перетворення сигналів, які реєструються. Наприкінці 50-х і на початку 60-х рр. почалося використання цифрових методів. Переваги ЦМЗ: відсутність впливу тракту запису-відтворення на точність при достовірному відтворенні записаних сигналів, заміна процедури неперервного визначення параметрів сигналів на процедуру їх дискретного виявлення в процесі відтворення, зручність введення відтворюваних цифрових сигналів в ЕОМ.

Ці переваги, а також можливість побудови більшості електронних пристроїв, магнітних цифрових реєстраторів на надійних і економічних інтегральних мікросхемах обумовили широке використання ЦМЗ. Цифрові методи магнітного запису в інформаційно-вимірjuвальній техніці спочатку знайшли застосування при реєстрації відносно вузькосмужних сигналів.

В наш час вони все ширше використовуються при реєстрації широкосмужних сигналів, зокрема, при записі звукових сигналів і відеосигналів промислового і побутового телебачення. Використання ЦМЗ для реєстрації телевізійних відеосигналів - реальний шлях підвищення якості, надійності і терміну служби відеомагнітофонів.

Можна з великою впевненістю говорити про те, що найближчим часом процес впровадження й удосконалення ЦМЗ буде продовжуватися. Основними напрямками вдосконалення є розробка ефективних методів і



засобів обробки та перетворення електричних сигналів, які відповідають специфіці магнітного запису; розробка високоякісних магнітних носіїв і головок, що забезпечують запис і відтворення сигналів із підвищеними щільністю і вірогідністю; розробка високостабільних і надійних механізмів транспортування магнітних носіїв.

У інформаційно-вимірювальній техніці найбільше застосування ЦМЗ одержав в області телевимірювань, де магнітні цифрові реєстратори широко використовуються при стендових і натурних випробовуваннях об'єктів машинобудування різноманітного роду.

Переваги магнітних реєстраторів інформації ставлять їх у наш час практично поза конкуренцією відносно інших типів реєстраторів при експлуатації в реальних умовах.

Найближчим часом монопольне становище магнітних реєстраторів можуть змінити, мабуть, лише так звані голографічні запам'ятовувальні пристрої і оптичні пристрої на основі використання променя лазера (неголографічні), експлуатаційні і вартісні характеристики яких у наш час поступаються відповідним характеристикам магнітних реєстраторів.

### **2.1.1. Структура системи цифрового магнітного запису**

Збільшена структурна схема магнітної цифрової системи реєстрування приведена на рис. 2.1.1. Записувальні і відтворювальні магнітні головки (ЗМГ і ВМГ), підсилювачі запису і відтворення (ПЗ, ПВ), механізми транспортування магнітного носія при запису і відтворенні (МТНЗ і МТНВ) виконують загальні функції, забезпечуючи процес запису-відтворення, і, як правило, об'єднуються конструктивно в один вузол, який називається трактом магнітного запису. У деяких випадках, якщо апаратура магнітного запису використовується, наприклад, у складі передавальної частини РТС (ЗП РТС), блоки ЗМГ і ВМГ об'єднуються в блок універсальних магнітних головок запису і відтворення, а механізми

МТНЗ і МТНВ – в універсальний механізм транспортування магнітного носія.

У пристрої збору і кодування (ПЗК) виконується комутація сигналів аналогових і цифрових джерел інформації, що надходять в пристрій кодування, який здійснює операцію перетворення “аналог-код” і формування загального цифрового інформаційного потоку. У пристрої перетворення коду (ППК) можуть виконуватися операції: модуляція, тобто перетворення вихідних сигналів ПЗК і ППК у сигнали, що відповідають вибраному способу ЦМЗ; завадостійке кодування, якщо висуваються підвищені вимоги до вірогідності відтворюваних сигналів; розбиття потоку цифрових сигналів на блоки з формуванням службових сигналів маркерів початку і кінця блока; перетворення частоти проходження і складу синхросигналів і інші, наприклад, операція усунення збитковості (стискання) цифрового інформаційного потоку. У кожному окремому випадку сполучення операцій, які виконує ППК, визначається конструктором у залежності від конкретних вимог, які висуваються до апаратури цифрового магнітного запису.

У пристрої перетворення сигналів (ППС) виконуються операції: корекція амплітудно-частотної і фазової характеристик (АЧХ і ФЧХ) тракту магнітного запису; відновлення записаних на носій сигналів, демодуляція, тимчасове вирівнювання сигналів різноманітних каналів запису-відтворення (усунення “перекосу”), формування сигналів синхронізації, завадостійке декодування і деякі інші, наприклад, трансформація частоти проходження інформаційних і синхронізувальних сигналів, пов'язаних з виключенням із інформаційного потоку службової інформації, необхідної для запису-відтворення сигналів з носія.

У пристрої демодуляції і комутації (ПДК) виконуються операції демодуляції (перетворення “код-аналог”) і тимчасового розподілу (комутації) інформації окремих джерел у процесі її виділення з загального

інформаційного потоку.

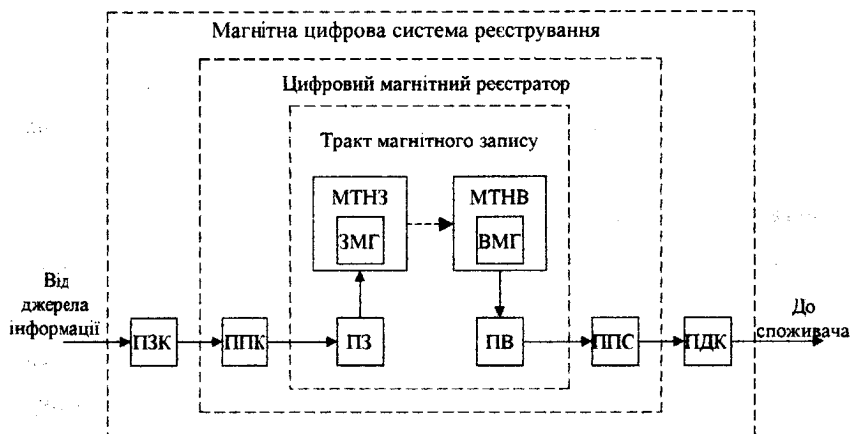


Рис.2.1.1. Структурна схема цифрової магнітної системи реєстрування

В інформаційно-вимірювальній техніці апаратуру магнітного запису зазвичай називають автономною магнітною цифровою системою реєстрування (АМЦСР), якщо до неї входять пристрої ПЗК і ПДК. У тому випадку, якщо на вхід апаратури магнітного запису надходить інформаційний потік у цифровій формі, її часто називають магнітним цифровим реєстратором (МЦР). Як правило, АМЦСР і МЦР є багатоканальною апаратурою, у якій здійснюється запис паралельного двійкового коду, що обумовлюється поліпшенням конструктивного компонування механізмів переміщення носія з одночасним покращенням їх основних технічних характеристик, наприклад, сталої швидкості переміщення носія і зменшення споживання енергії від джерел живлення і деяких інших.

Записувальні і відтворювальні пристрої АМЦСР являють собою складні комплекси електронної й електромеханічної апаратури. Окремі функціональні елементи цих пристроїв у конкретній апаратурі в залежності від її призначення, необхідних характеристик і особливостей

роботи можуть використовуватися в тому або іншому сполученні, при цьому може змінюватися і характер структурних зв'язків. Наприклад, у найпростішому варіанті можуть бути відсутні пристрої стиснення, завадостійкого кодування, перекодування та ін.

Вхідні пристрої (рис.2.1.2) забезпечують узгодження вхідного імпедансу системи з вихідними імпедансами джерел інформації, а також послідовне підключення аналогових сигналів цих джерел за допомогою електронного розподільника до входу загального аналого-цифрового перетворювача (АЦП). У деяких випадках на виході або вході АЦП можуть використовуватися пристрої стиснення відповідно аналогової або цифрової інформації. У сучасних АМЦСР усе частіше використовуються пристрої кодування інформації з захистом від завад, необхідність у яких особливо зростає у випадку використання пристроїв стиснення і перекодування. Для підвищення щільності запису, у тому числі і за рахунок поліпшення умов часового узгодження синхронізувального і інформаційного каналів АМЦСР, до складу пристрою, який записує, може бути включений пристрій перекодування.

Доцільність використання пристрою завадостійкого кодування зростає зі збільшенням щільності запису, тому що при цьому, з одного боку, погіршується вірогідність відтворюваних сигналів і, отже, зростає необхідність її поліпшити, а з іншого боку, технічна реалізація завадостійкого кодування спрощується внаслідок того, що перший її крок – розбиття цифрової послідовності на блоки – проводиться в апаратурі ЦМЗ для усунення так званого явища “перекосу”, властивого паралельному запису двійкового коду з високою щільністю. Це означає, що при відносно високій щільності запису порядку  $200 \text{ bit/мм}$  і більше операцію розбиття цифрової інформації на блоки, необхідну для усунення явища “перекосу”, доцільно використовувати в якості першого кроку операції завадостійкого кодування. При цьому схемна реалізація завадостійкого кодування може

бути спрощена.

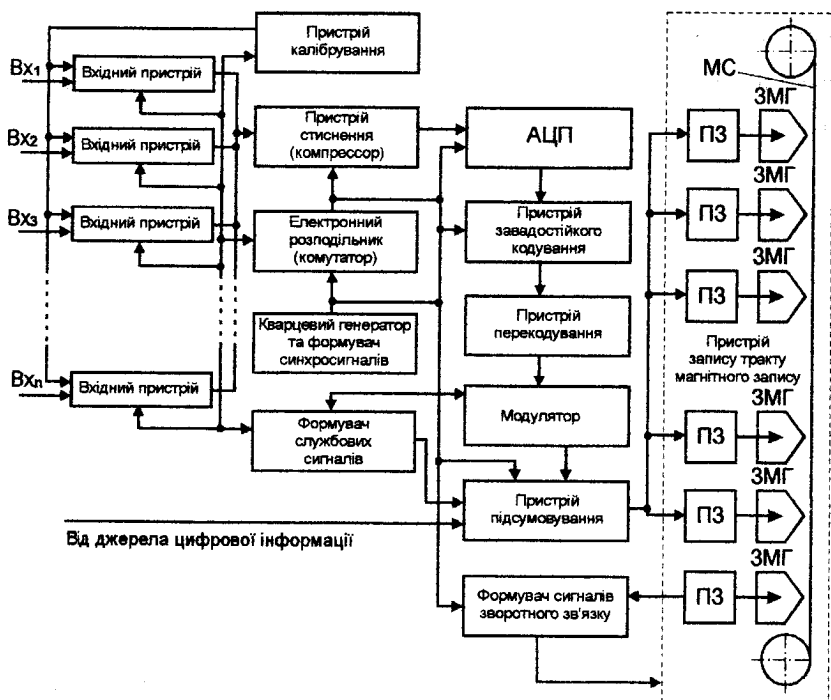


Рис 2.1.2. Структурна схема багатоканального пристрою запису АМЦР

Модулятор перетворює цифрові сигнали на вході в сигнали, які забезпечують найкращі умови запису цифрової інформації на носій при заданих характеристиках системи і тракту магнітного запису.

У підсилювачах запису (ПЗ) виконується підсилення за струмом й узгодження з реактивними опорами записувальних магнітних головок (ЗМГ).

Відзначимо, що склад пристроїв запису і відтворення АМЦР залежить також і від того, чи передбачалися наступні перетворення, наприклад, операції завадостійкого кодування і перекодування при проектуванні пристроїв комутації і формування синхросигналів. Якщо

наступні перетворення враховувалися, то це може істотно спростити перетворення в пристроях завадостійкого кодування і перекодування за рахунок попереднього формування відповідного набору синхросигналів, а також “вікон” в інформаційних потоках для розміщення в них службових сигналів.

Одержання високих технічних характеристик АМЦСР вимагає стабільності середньої швидкості переміщення магнітного носія при записі та відтворенні. Стабільність середньої швидкості в записувальній і відтворювальній частині тракту магнітного запису досягається при використанні пристроїв авторегулювання швидкості протягування і натягу носія.

На структурних схемах на рис. 2.1.2 і 2.1.3 сигнали управління швидкістю переміщення носія виробляються в формувачах сигналів зворотного зв'язку при порівнянні опорної частоти сигналів кварцового генератора, наприклад, з частотою сигналів того ж кварцового генератора, які відтворюються з магнітного носія.

В багатоканальному пристрої відтворення МЦР виконується підсилення сигналів, що відтворюються з носія; корекція амплітудно-частотної і фазової характеристик тракту магнітного запису в області високих (у деяких випадках і низьких) частот; усунення спотворень сигналів, які відтворюються, за допомогою граничних або екстремальних формувачів; формування синхросигналів для синхронізації роботи усіх пристроїв відтворювальної частини системи. Інші перетворення, крім операції часового вирівнювання (усунення “перекосу”) різноманітних затримок, що виникають у паралельних каналах (доріжках) тракту магнітного запису, носять зворотний характер по відношенню до перетворень, які проводяться в пристрої запису. Тому склад структурної схеми багатоканального пристрою відтворення АМЦСР залежить від складу структурної схеми пристрою запису.

Якщо в складі пристрою запису АМЦСР використовуються пристрої завадостійкого кодування і перекодування, то в складі пристрою відтворення відповідно використовуються пристрої підвищення вірогідності й зворотного перекодування.

Демодулятор відтворювального пристрою перетворює цифрові сигнали (після їхнього відтворення) у сигнали, зручні для наступних перетворень в пристроях підвищення вірогідності й зворотного перекодування. Перетворювач “код-аналог” виконує операцію, зворотну перетворенню “аналог-код”, яка здійснюється в записувальному пристрої. Комутуючі елементи забезпечують виділення каналних аналогових сигналів із загального потоку сигналів, що утворюються на виході перетворювача “код-аналог”. З виходу каналних елементів сигнали звичайно надходять на графічний пристрій реєстрації. Пристрій узгодження з інтерфейсом ЕОМ забезпечує введення вихідних цифрових сигналів АМЦСР в ЕОМ для наступної їхньої обробки.

Останнім часом в інформаційно-вимірювальній техніці крім багатодоріжкового запису паралельного двійкового коду знаходять застосування методи поперечно-рядкового і похило-рядкового запису, які здійснюються за допомогою обертових магнітних головок (методи запису, що використовуються у відеомагнітофонах). При використанні цих методів інформація записується послідовно, як правило, за допомогою двох або чотирьох обертових магнітних головок. Основною перевагою методів поперечно-рядкового і похило-рядкового запису є істотно більша (приблизно на порядок), ніж при паралельному записі, поверхнева щільність. Це призводить до поліпшення габаритно-масових характеристик апаратури ЦМЗ або дозволяє, при тій же витраті носія, збільшити об'єм запису цифрової інформації.

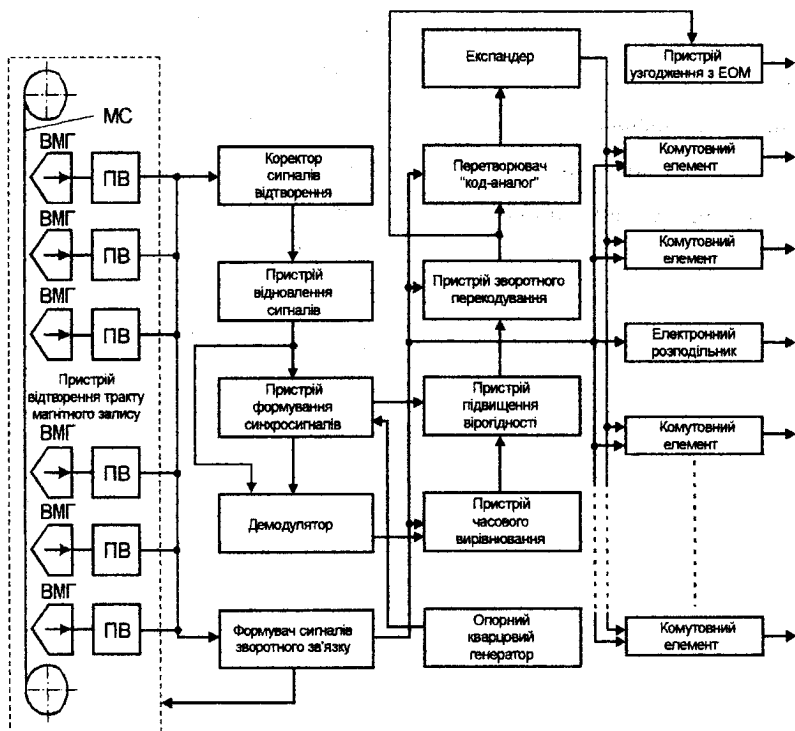


Рис. 2.1.3. Структурна схема багатоканального пристрою відтворення АМЦСР

Широкому використанню поперечно-рядкового і похило-рядкового запису перешкоджає основний недолік цих методів – висока швидкість переміщення головки відносно носія, що за інших рівних умов призводить до суттєвого зменшення ресурсу роботи тракту магнітного запису (в основному магнітних головок і стрічок) у порівнянні з трактом рівнобіжного магнітного запису.

Якщо, наприклад, на магнітний носій методами поперечно-рядкового або похило-рядкового запису потрібно записати цифровий потік інформації, який надходить зі швидкістю  $10 \text{ Мбіт/с}$ , то при щільності запису  $500$  і  $1000 \text{ біт/мм}$  швидкість переміщення головки відносно носія відповідно дорівнює  $20$  і  $10 \text{ м/с}$ . Якщо той самий цифровий потік записати



з використанням рівнобіжного принципу запису за допомогою, наприклад, 20 магнітних головок з тією ж щільністю, то швидкість запису зменшиться в 20 разів і буде відповідно дорівнювати 1 і 0,5 м/с. Відносним недоліком цих методів є також необхідність використання в стрічкопротяжних механізмах систем авторегулювання, що забезпечують синхронний і синфазний режим роботи магнітних головок при запису і відтворенні.

### **2.1.2. Основні характеристики систем ЦМЗ**

Для оцінки ефективності магнітних цифрових систем і пристроїв реєстрування використовується цілий ряд технічних характеристик, які зручніше всього розділити на групи, як це показано на рис. 2.1.4. Першу групу складають інформаційні характеристики, другу – конструктивно-експлуатаційні. З технічних характеристик АМЦСР і МЦР доцільно виділити в окрему групу вартісні характеристики.

До основних інформаційних характеристик АМЦСР, насамперед, відносяться похибка, швидкодія (частота проходження символів коду при записі), щільність запису, вірогідність відтворюваних цифрових сигналів і інформаційна ємність реєстратора.

*Похибка* характеризує АМЦСР, до складу яких входять аналого-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі. Сумарна (загальна) похибка системи залежить від складових її систематичних і випадкових похибок аналогових і цифрових пристроїв. Систематичні похибки зменшуються або усуваються цілком попереднім наскрізним градуванням системи і її періодичним калібруванням у процесі реєстрації.

Основною перевагою цифрових інформаційно-вимірювальних систем є те, що канал реєстрації не вносить додаткової похибки, якщо цифрові сигнали, які приймаються (відтворюються) – достовірні. Тому МЦР, що не містять аналого-цифрових перетворювачів, на вхід яких

надходять сигнали від зовнішніх джерел цифрової інформації, доцільно характеризувати не похибкою, а вірогідністю відтворюваних сигналів.

**Число каналів.** Одним із параметрів, які характеризують технічну ефективність системи реєстрації, є її багатоканальність, що оцінюється числом каналів, тобто числом джерел інформації, які підключаються до входів системи. У сучасних АМЦСР число каналів досягає декількох десятків, а в окремих випадках – сотень.

**Вхідні параметри каналів.** Кожний із каналів системи реєстрації характеризується допустимою зміною (діапазоном) напруги і діапазоном реєстрованих частот вхідного сигналу. Важливою характеристикою АМЦСР є вхідні опори каналів, які повинні бути якомога більшими і досягають значень порядку декількох мегаом.

**Швидкодія.** Для АМЦСР швидкодія характеризується частотою дискретизації вхідних каналних сигналів (опитуванністю) і частотою перетворення “аналог-код” у загальному інформаційному тракті системи. Для  $N$ -канальної системи з циклічною дискретизацією й однаковою частотою  $f_0$  опитування по кожному каналу частота перетворення “аналог-код”  $F_{Ak} = Nf_0$ .

**Параметри тракту магнітного запису.** Тракт магнітного запису містить у собі магнітний носій, записувальні і відтворювальні головки, механізм транспортування стрічки й пристрої лінійної обробки сигналів: підсилювачі запису і відтворення, кола лінійної корекції, АЧХ і ФЧХ, кола фільтрації. Кожний із пристроїв, що входить у тракт магнітного запису описується визначеними сполученнями технічних параметрів. Відзначимо лише ті з них, які характеризують тракт магнітного запису в цілому. До таких характеристик насамперед відносяться амплітудно-частотна і перехідна (ПХ) характеристики тракту.



Рис. 2.1.4. Технічні характеристики АМЦСР

Перехідною характеристикою тракту магнітного запису називається вихідна реакція цього тракту на одиничний ізольований стрибок струму запису. Перехідна характеристика може бути розрахована за основними параметрами тракту магнітного запису або визначена експериментально. Перехідна характеристика є основним параметром, який визначає роздільну (пропускну) здатність тракту. Для тракту магнітного запису вона має форму, близьку до форми дзвіноподібного імпульсу. Найчастіше  $PX$  характеризується тривалістю цього імпульсу на рівні 0,5 його амплітуди ( $\Delta t_{B0,5}$ ).

Важливими параметрами тракту магнітного запису є рівні сигналу і шуму на його виході. Відношення сигнал-шум на виході тракту істотно впливає на значення основних параметрів системи ЦМЗ - щільності і вірогідності. Відомо, що перевищення сигналу над шумом може бути використане для збільшення пропускну здатності тракту (у випадку застосування багатопозиційних сигналів). За Шенноном, збільшення відношення потужностей сигналу і шуму в  $n$  разів при достатньо великих відношеннях сигнал-шум дозволяє гранично збільшити питому пропускну здатність тракту на  $\log_2 n$ . Тому однією з важливих задач проектування і розробки тракту магнітного запису є забезпечення як можна більшого співвідношення сигнал-шум.

Найважливішими характеристиками тракту магнітного запису також є параметри механізму транспортування стрічки, до яких висуваються жорсткі вимоги. Основними параметрами МТС є швидкості протягування носія при записі  $\mathcal{Q}_1$  і при відтворенні  $\mathcal{Q}_2$ .

**Швидкість запису даних.** Швидкість запису даних (двійкового коду) виражається числом біт інформації, які записуються на носій в одиницю часу. Одиницею виміру швидкості запису даних є частота проходження символів коду, що надходять для запису на магнітний носій.

За аналогією з каналом передачі даних, в якості характеристики

ефективності яких широко використовується питома швидкість передачі, у системах ЦМЗ для оцінки ступеня використання смуги пропускання тракту магнітного запису доцільно використовувати питому швидкість запису даних.

Питома швидкість запису  $v_{з,у}$  – це відношення швидкості запису символів коду до верхньої частоти смуги пропускання тракту магнітного запису  $\Delta F_B$ :

$$v_{з,у} = F_{к,з} / \Delta F_B.$$

**Щільність запису.** Щільність запису  $P$  є найважливішою характеристикою МЦР і АМЦР, тому що при заданій витраті магнітного носія щільність запису визначає ємність реєстратора і при  $F_{з,к} = const$  - час неперервної роботи (час реєстрації), а при заданому часі реєстрації - витрату магнітного носія і габаритні розміри, масу і споживання енергії. Щільність запису визначається числом двійкових одиниць (біт), що припадають на одиницю довжини (повздовжня), площі (поверхнева) і об'єму (об'ємна).

**Вірогідність.** Розрізняють символну, послівну і блокову (кадрову) вірогідність. Крім цього, можна спеціально вказувати вірогідність службових сигналів у цифровому каналі, наприклад, вірогідність маркерних сигналів у блоці.

**Час неперервного запису і ємність системи ЦМЗ.** Час неперервного запису відтворення (ТВ) і ємність запам'ятовувального пристрою  $Q$  - основні інформаційні характеристики АМЦРС і МЦР. Ці параметри пов'язані зі значенням  $F_{к,з}$ , що характеризує швидкодію пристрою запису. Час неперервної реєстрації  $T_p = L / v_{з,у}$ , де  $L$  - довжина магнітного носія.  $Q = F_{к,з} T_p = PL$ .

Час неперервного запису-відтворення в сучасних АМЦРС і МЦР може досягати декількох годин, а їхня ємність порядку  $10^9$ - $10^{12}$  біт.

**Способи магнітного запису і способи ЦМЗ.** У основу класифікації способів магнітного запису може бути покладений спосіб формування сигналів на носії. Відомі такі способи магнітного запису:

а) одноріжковий запис, коли на носії формується одна магнітна доріжка, що має прямолинійну (стрічка), спіральну (диск) і циліндричну (барабан) форму;

б) багатдоріжковий запис, коли на носії формуються  $n$  доріжок запису, при цьому, як правило, запис здійснюється  $n$  головками, конструктивно об'єднаними в один блок;

в) рядковий запис (поперечний, похилий і повздовжний), загальною ознакою якого є використання обертових магнітних головок.

**Конструктивно-експлуатаційні і вартісні характеристики систем ЦМЗ.** Основні з цих характеристик наведені у схемі на рис. 2.1.4, які не вимагають додаткових пояснень. Відзначимо лише, що усі три категорії технічних характеристик взаємозалежні між собою і зміна однієї із них, як правило, спричиняє за собою відповідні зміни інших.

Однією з важливих переваг систем ЦМЗ є їх технологічність, висока надійність і відносно невисока вартість.

### 2.1.3. Магнітні носії в системах ЦМЗ

Широке розповсюдження систем ЦМЗ в інформаційно-вимірювальній і обчислювальній техніці, в першу чергу, пояснюється високими (а по деяким параметрам унікальними) властивостями магнітних носіїв, які використовуються в якості запам'ятовувального (реєструвального) середовища.

Високі характеристики магнітних носіїв проявляються в можливості багатократного використання в режимах запису і відтворення без помітного погіршення основних магнітоелектричних і механічних властивостей; у відносній технічній і технологічній простоті здійснення прямого (струм запису – залишкова індукція) і зворотного (залишкова індукція – ЕРС магнітної голівки відтворення) перетворень; у відносно високій стійкості носія до впливу різноманітних факторів зовнішнього середовища; в достатньо високому відношенні «відтворюваний сигнал – шум» і в ряді інших.

На даний час в якості магнітних носіїв систем і пристроїв ЦМЗ використовуються магнітні стрічки і диски. В системах ЦМЗ, що застосовуються в інформаційно-вимірювальній техніці, в основному використовуються магнітні стрічки. Прогрес розвитку систем ЦМЗ, досягнутий протягом останніх десятиріч, став можливим, перш за все, в результаті вдосконалення магнітних стрічок з робочим шаром із  $\gamma$ -оксиду заліза ( $\gamma - Fe_2O_2$ ) і розробки нових типів більш досконалих магнітних носіїв. Перспективні напрямки вдосконалення магнітних стрічок полягають в покращенні їх електромагнітних і механічних властивостей.

Для цифрового запису основними електромагнітними параметрами носіїв є коерцитивна сила  $H_c$ , залишкова індукція  $B_r$  і коефіцієнт прямокутності  $k_u$  кінцевої петлі намагнічування робочого шару носія. Всі ці параметри залежать від хімічного складу, структури, розмірів і орієнтації феромагнітного покриття носія.

Підвищення  $H_c$  зменшує вплив поля саморозмагнічування, яке зростає зі скороченням довжини намагнічених однорідних ділянок носія, зменшуючи тим самим завал АЧХ тракту магнітного запису в області верхніх частот, а також забезпечує більший захист носія від впливу зовнішніх магнітних дій. Негативним наслідком збільшення  $H_c$  магнітного покриття носія є необхідність струму запису, що може виявитись

небажаним або неможливим через введення в насичення магнітного матеріалу головки запису в зоні робочого зазору (РЗ). Використання в апаратурі ЦМЗ висококоерцитивних носіїв потребує відповідних змін в матеріалах і розмірах зони РЗ записувальних магнітних головок.

Коерцитивна сила сучасних магнітних стрічок, наприклад металічних, може досягати значень порядку  $100 \text{ кА/м}$  і вище.

Рівень вихідних сигналів відтворювальної головки прямо пропорційний залишковій індукції магнітного носія. Підвищення  $B_r$  покращує один із найважливіших параметрів системи ЦМЗ – відношення сигнал-шум на виході лінійного тракту магнітного запису.

З іншого боку, збільшення  $B_r$  призводить до росту поля розмагнічення і перехідної зони між сусідніми різнополярно намагніченими ділянками носія, що призводить до збільшення завалу АЧХ тракту магнітного запису в області верхніх частот.

Для покращення АЧХ тракту в області верхніх частот і одночасно підвищення відношення сигнал-шум, вибирають матеріал магнітного покриття стрічок з як найбільшими значеннями  $B_r$  і  $H_c$ .

Підвищення щільності запису цифрової інформації може бути досягнуте також шляхом збільшення  $k_n$  робочого шару носія, оскільки збільшення  $k_n$  призводить до зменшення перехідної зони між протилежно намагніченими ділянками носія.

Коефіцієнт прямокутності  $k_n$  петлі гістерезису може бути підвищений в результаті застосування матеріалів з високим ступенем голкоподібності часток магнітного порошку (близько  $0,1 \dots 2 \text{ мкм}$  в довжину і  $0,03 \dots 0,3 \text{ мкм}$  в ширину) та їх високої однорідності.

Важливими параметрами, які визначають якість магнітних носіїв, також є однорідність магнітних властивостей; відсутність немагнітних включень по всій поверхні носія; ступінь електризації, тобто здатність



поверхні носія до утворення електричних зарядів, які призводять до утворення імпульсних завад в головках відтворення; копір-ефект.

Істотно впливає на електромагнітні властивості носія товщина  $d$  феромагнітного покриття. Практично з самого початку застосування і вдосконалення магнітного запису стало ясно, що зменшення товщини магнітного покриття носія призводить до розширення АЧХ тракту і, отже, підвищення щільності запису. Це відбувається в результаті зменшення впливу ефекту саморозмагнічування і збільшення частини магнітного покриття носія, що знаходиться в зоні дії поля з більшим градієнтом зміни напруженості  $dH/dx$  над низхідною гранню записувальної головки.

Постійні зусилля, які направлені на зменшення товщини робочого шару порядку 2-8 мкм для порошкових покриттів і 0.1 - 0.5 мкм для металічних покриттів. Технологічний процес нанесення робочого шару на основу повинен забезпечити рівномірність товщини робочого шару по всій поверхні стрічки. Рівномірність товщини робочого шару необхідна для зменшення глибини ПАМ при відтворенні записаних на стрічці сигналів. Крім того, на глибину ПАМ також здійснюють вплив дефекти основи. При товщині робочого шару 2...5 мкм дефекти основи проявляються на робочій поверхні носія.

Основними вимогами до фізико-механічних властивостей магнітних стрічок є: точність і стабільність розмірів; висока стійкість зношування, що проявляється в малому стиранні робочого шару стрічок і збереженні міцнісних і інших експлуатаційних параметрів при тривалій експлуатації і зберіганні; низька абразивність; висока гнучкість і стійкість до багатократного згинання; висока адгезійна міцність; мала чутливість до змін умов експлуатації (температури, вологості та ін.). Механічні властивості магнітних стрічок в значній мірі визначаються матеріалом основи, в якості якої використовується поліетилентерефталат. Цей матеріал має високі механічні властивості і, перш за все, високу міцність,

стійкість до дії температури, вологості і деяких видів агресивних середовищ; він зберігає свої властивості в умовах тривалого зберігання і експлуатації.

В наш час найбільше розповсюдження отримали магнітні стрічки на полімерній основі з застосуванням магнітних матеріалів робочих шарів на базі порошків оксидів заліза, двооксиду хрому, різноманітних металів і їх оксидів. Також проводяться роботи з розробки металізованих і металічних магнітних стрічок.

В якості основного матеріалу для магнітного порошку широко використовується  $\gamma$  -  $Fe_2O_3$ . Цей порошок має такі магнітні властивості:  $H_c = 24 \dots 38 \text{ кА/м}$ ;  $B_r \approx 0,12 \text{ Тл}$ ;  $k_n = 0,7 \dots 0,8$ .

Для покращення магнітних властивостей порошку  $\gamma$  -  $Fe_2O_3$  проводяться роботи по введенню в якості додаткового елементу - модифікатора кобальту  $Co$ . В залежності від різноманітних масових співвідношень  $Co$  можна змінити  $H_c$  порошку в широких межах ( $30 \dots 120 \text{ кА/м}$ ). Однак одним із недоліків такого порошку є температурна нестабільність, яка обумовлена магнітно-кристалографічною структурою кобальту. Крім цього, важко досягається достатньо висока відтворюваність магнітних властивостей окремих партій порошків.

Одним із висококоерцетивних магнітних порошків є двооксид хрому ( $CrO_2$ ), коерцетивна сила якого порядку  $38 \text{ кА/м}$ . Для підвищення  $H_c$  до  $85 \text{ кА/м}$  використовують присадки телура, рубідія і т.д. Недоліки, які обмежують широке застосування  $CrO_2$  для виготовлення магнітних стрічок, такі: низька точка Кюрі ( $126^\circ \text{C}$ ), більш висока абразивність частинок.

На базі таких матеріалів, як залізо, кобальт, нікель і сплавів на їх основі, отриманий цілий ряд металічних магнітних порошків, які мають широкий діапазон значень  $H_c = 56 \dots 120 \text{ кА/м}$  і здатні забезпечити високі електромагнітні властивості. Металічні порошки все більше

використовуються, не дивлячись на труднощі їх промислового виготовлення (необхідно дуже точно регулювати режими утворення металічного порошку, частинки якого легко піддаються окисленню).

Застосування магнітних стрічок з робочими шарами, що використовують металічні порошки з високими магнітними властивостями, призводить до застосування магнітних стрічок, створення нових магнітних головок з субмікронними робочими зазорами і високою індукцією насичення. Одним з напрямків по створенню нових магнітних стрічок є розробка багатошарових стрічок (з двома і більше робочими шарами). Для нижчих шарів застосовується магнітний матеріал з  $H_c = 24 \dots 28 \text{ кА/м}$  ( $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), для верхніх з  $H_c = 36 \dots 48 \text{ кА/м}$  ( $\text{CoFeO}$ ,  $\text{CrO}_2$ ). Товщина шарів може бути однаковою або у верхніх шарів менша, ніж у нижніх; загальна товщина знаходиться в межах  $3 \dots 10 \text{ мкм}$ .

Зменшення товщини робочого шару магнітних стрічок на базі порошків - технологічно складний процес і призводить до підвищення нерівномірності електромагнітних характеристик, а також до зменшення амплітуди відтворюваного сигналу.

Тому з'явилися розробки металізованих і металічних магнітних стрічок, які мають високу залишкову індукцію і майже прямокутну петлю гістерезису. Металізовані магнітні стрічки можна отримати нанесенням *Co-Mo* або *Co-Mo-Ni* електролітичним способом, хімічним відновленням *Co*, *Ni*, *Fe* або їх сплавів, хімічним осадженням *CoP*, напиленням в вакуумі магнітних сплавів *CoSi*, *CoNiSi* і т.д. Найкращі результати дають гальванічний спосіб і напилення в вакуумі.

В металізованих стрічках в якості основи використовується поліетилентерефталат.

Для виготовлення металічних стрічок часто застосовується електролітична мідь.

Широкому практичному застосуванню металізованих і металічних

магнітних стрічок заважає недостатня адгезійна міцність металічних покриттів і недостатня стійкість робочого шару. Металізовані і металічні магнітні стрічки в наш час знаходяться в стадії розробки, ведуться подальші дослідження по вдосконаленню їх технічних характеристик.

Завдяки досягнутому в останній час суттєвому покращенню параметрів магнітних носіїв і головок промисловістю засвоєний раніше недосяжний діапазон густини ЦМЗ  $1000...2000 \text{ bit/mm}$  і вище. У випадку освоєння методів запису і відтворення вертикальним до площини носія полем цей діапазон може бути значно перевищений.

#### **2.1.4. Магнітні головки запису і відтворення**

Магнітні головки запису і відтворення так само, як і магнітні носії, здійснюють певний вплив на найважливіші характеристики тракту магнітного запису. Від вибраного типу магнітного носія і магнітних головок, ефективності узгодження їх параметрів в основному залежать роздільна здатність тракту (ширина АЧХ), відношення – сигнал-шум, рівень паразитної амплітудної модуляції (ПАМ) і, отже, щільність запису і достовірність цифрових сигналів відтворення. Тому постійно направляються значні зусилля на вдосконалення магнітних головок запису і відтворення.

Можна виділити декілька основних напрямків вдосконалення магнітних головок: електромагнітних і механічних параметрів, покращення конструкції і технологічності виготовлення. Більшість параметрів, що характеризують електромагнітні, механічні, конструктивні і технологічні характеристики магнітних головок – взаємозв'язані.

Магнітні головки, які використовуються в ЦМЗ, поділяються на три типи: запису, відтворення і універсальні. На відміну від побутової апаратури магнітного запису, в якому найчастіше використовуються

універсальні головки запису-відтворення, в апаратурі ЦМЗ, що використовується в інформаційно-вимірювальній техніці, функції запису і відтворення, як правило, розділені, і тому універсальні головки використовуються в ній значно рідше, ніж в побутовій.

В накопичувачах на магнітних дисках використовуються в основному універсальні головки.

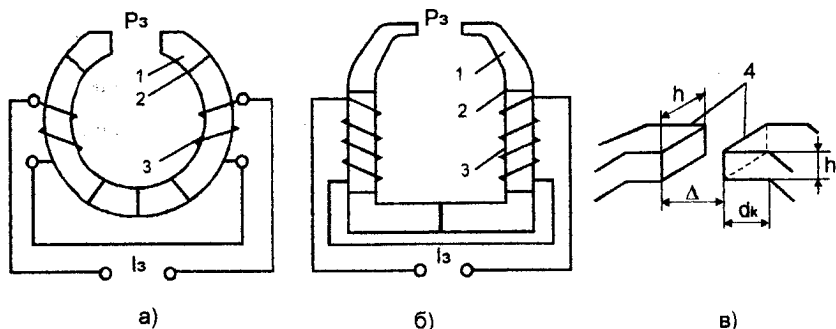


Рис. 2.1.6. Конструкція класичної торіодальної кільцевої магнітної головки:

а і б – основні різновиди торіодальних головок;

в – зона робочого зазору (РЗ) головки

В залежності від феромагнітного матеріалу, застосованого для виготовлення осердь, можуть бути виділені такі їх основні різновиди: головки зі сплавів феромагнітних матеріалів на основі  $Ni$  і  $Fe$  і цілого ряду інших як магнітних, так і немагнітних матеріалів ( $Si$ ,  $Al$ ,  $Ni$ ,  $Cr$ ,  $V$ ,  $Mn$ ,  $P$ ), наприклад, головки із пермалюю, сендасту, альфенолу та ін; головки із феритових матеріалів (монокристалічних і полікристалічних феритів); головки із аморфних металічних сплавів.

Особливе місце займають так звані тонкоплівочні магнітні головки, при виготовленні яких використовується технологія напilenня, осадження та витравлення.

З початку промислового використання (кінець 40-х років) основний принцип магнітного запису на носії, що виконані у вигляді стрічок, не

змінився: запис проводиться горизонтальною складовою магнітного поля головки, яка конструктивно представляє собою один із різновидів класичної тороїдальної кільцевої магнітної головки (рис. 2.1.5).

Виконання запису полем, яке вертикальне до площини руху стрічкового носія, дозволяє значно (приблизно на порядок) збільшити повздовжню щільність запису за рахунок зменшення обмежувального впливу саморозмагнічування. Однак ці спроби поки не привели до практично реалізованих результатів. Запис вертикальним полем для дискових носіїв (в НМД) знайшов практичне застосування.

Розглянемо деякі основні особливості роботи магнітних головок запису, які необхідно враховувати при їх проектуванні (розрахунку), виготовленні і експлуатації.

Схематично основні варіанти конструкції магнітної головки запису і відтворення приведені на рис.2.1.6. Основним елементом головки є осердя, яке складається з двох напівосердь 1 з намотаними на них обмотками 3 з обмежувачами 2. Напівосердя в області РЗ розділені прошарком з немагнітного матеріалу: скла, фольги мідної, бронзової або латунної.

Магнітні головки, які використовуються в ЦМЗ при паралельному записі конструктивно об'єднуються в багатоголовочний блок. Це визначає їхні конструктивні особливості. В тому числі, напівосердя головок мають плоскі поверхні, що полегшує збирання багатоголовочного блоку, а конфігурація осердь в області робочого зазору може бути виконана у вигляді дзьобиків, форма яких приведена на рис.2.1.5,в. Прямокутна форма дзьобиків напівосердь головки покращує ідентичність амплітудних і амплітудно-частотних головок запису і відтворення (ідентичність каналів тракту магнітного запису). Довжина дзьобика  $d_k$  не повинна бути більшою порядку 0,2...0,5мм, що визначається допуском на механічну обробку напівблоків багатоголовочного блоку.

Області дзьобиків магнітних головок повинні оброблятися з максимальною точністю. Найважливішими геометричними параметрами робочого зазору і дзьобика є ширина робочого зазору  $\Delta$ ; радіус заокруглення робочих граней  $R$  дзьобика і їх прямолінійність; глибина дзьобика  $h_k$ , його ширина  $h$  і паралельність торців. Для досягнення високих градієнтів магнітного поля в області граней записувальних головок радіус заокруглення робочих граней дзьобика повинен бути якомога меншим. Для зменшення втрат на вихрові струми напівосердя головок (якщо вони виготовляються з металевих сплавів) набираються з тонких ( $0,01 \dots 0,05$  мм) пластин.

Частотні втрати виникають не тільки в осердях магнітних головок, а також в металевому корпусі багатоканального блоку. Вплив втрат такого роду зростає в міру збільшення густини розміщення головок в багатоканальному блоці (тобто при збільшенні поперечної густини запису).

Прагнення збільшити ефективність магнітних головок за рахунок зменшення їх розмірів і автоматизації процесу виготовлення призвело до створення тонкострічкових магнітних головок (ТМГ), які мають хороші частотні властивості.

Існують спроби конструктивно поєднати ТМГ з електронними пристроями підсилювачів відтворення (ПВ). У цьому випадку ТМГ і ПВ можуть мати загальну кремнієву основу, а їх виготовлення об'єднуються у єдиному технологічному процесі з застосуванням напilenня металів у вакуумі, електролітичних осаджень і травлення.

Не дивлячись на привабливі перспективи розвитку і використання ТМГ, технологічні і конструктивні труднощі їх виготовлення, невисокі відношення сигнал-шум на виході тракту магнітного запису, порівняно невеликі надійність і терміни експлуатації, які вони забезпечують, до нинішнього часу суттєво стримують їх промислове використання.

Незалежно від призначення та конструктивних і технологічних особливостей виготовлення магнітних головок запису і відтворення найважливішим фактором, який визначає їх електромагнітні і механічні характеристики, є властивості магнітних матеріалів, що використовуються.

У зв'язку з розробкою і використанням висококоерцитивних магнітних носіїв, які мають підвищену роздільну здатність, а також у зв'язку з розвитком похилострічкового запису і його впровадженням в системи ЦМЗ різко підвищились інтенсивність і результативність дослідницьких робіт, направлених на розробку і використання високоефективних магнітних матеріалів осердь головок, які мають підвищені електромагнітні і механічні властивості.

Магнітні матеріали для осердь магнітних головок повинні відповідати широкій сукупності вимог, основними з яких є: високі магнітна проникність  $\mu$ , індукція насичення  $B_s$ , питомий електричний опір  $\rho$ , відносно низьке значення коерцитивної сили  $H_c$ , висока механічна твердість  $HV$  і малий коефіцієнт зносостійкості  $v_f$ . Всі ці параметри повинні бути стабільними в часі і при дії дестабілізуювальних факторів зовнішнього середовища, наприклад, температури. Стабільність, розкид і значення електромагнітних параметрів матеріалів осердь головок залежать від магнітострикційних властивостей, які оцінюються коефіцієнтом магнітострикції  $\lambda_s$ , і властивостей анізотропії, які оцінюються сталою анізотропії  $K_a$ . Кращі параметри, як правило, мають матеріали, для яких  $\lambda_s$  і  $K_a$  малі або рівні нулю. Крім цього, доцільно враховувати, що зменшення коерцитивної сили  $H_c$  матеріалів осердь і коефіцієнта  $\lambda_s$  призводить до зменшення шуму головок відтворення.

Магнітні матеріали, які використовуються для осердь магнітних головок, можна розділити на п'ять груп:

1. Матеріали на основі пермалоя. Пермалой є різновидністю залізонікелевих магнітом'яких сплавів з дуже високою магнітною



проникністю. Основними компонентами пермалоя є  $Ni$  і  $Fe$ ; в деяких випадках до цих компонентів можуть додаватися  $Cu$  і  $Mo$ .

Основними перевагами пермалоя, які визначили його тривале використання в якості матеріалу для магнітних головок, є високі магнітні проникності  $\mu_n$  і  $\mu_{max}$  і індукція насичення  $B_s$ . Найбільш суттєвими недоліками пермалоя є мале значення питомого електричного опору  $\rho$ , який зумовлює великі частотні втрати і відносно невисокі зносостійкість і твердість. Ці недоліки виключають можливість використання пермалоя в головках для широкомаштабних систем ЦМЗ.

2. Матеріали на основі пермалоя, які мають більш високе значення  $\rho$  і підвищені зносостійкість і твердість. До цієї групи матеріалів відноситься так званий гвердий пермалой, який має склад  $Ni, Nb, Ti, Fe$ . У ньому в якості додаткових використовуються  $Nb$  і  $Ti$ . Діапазон додатків може бути розширено. Покращення механічних властивостей і деяке збільшення  $\rho$  в них супроводжується, як правило, зменшенням  $\mu_n$  і  $B_s$ .
3. Феритні матеріали на основі монокристалічних і полікристалічних феритів. Головна перевага феритних магнітних головок – високе значення  $\rho$  і добра зносостійкість. Це визначило основну область їх застосування – відеозапис і запис широкомаштабних сигналів. Однак ферити мають низькі значення  $B_s$  і  $\mu_n$ . Низька індукція насичення не дозволяє ефективно використовувати ферити спільно з висококоерцитивними носіями.
4. Матеріали групи «сендаст». За своїм хімічним складом сендаст відноситься до сімейства альсіферів. Класичний сендаст має хімічний склад в процентах: 15,4  $Al$ , 9,6  $Si$ , 85  $Fe$ . На даний час до сендастів звичайно відносять систему сплавів, які мають крім вказаних основних компонентів широку гаму додатків, наприклад, таких елементів, як  $Cu$ ,

*W, Ni, Nb, V, Mn, Co* і інші. Основна перевага таких сплавів міститься у високих значеннях  $B_s$  і  $\mu_n$  при малих або нульових значеннях коефіцієнта магнітострикції  $\lambda_s$  і постійної анізотропії  $\kappa_a$ . Ці сплави також мають добрі механічні властивості. Сукупність перерахованих переваг визначили широке застосування сендастів у якості матеріалів для головок запису і відтворення, універсальних магнітних головок і полюсних наконечників феритних відеоголовок. Недоліком сендастів є відносно низьке значення питомого електричного опору.

5. За останнє десятиріччя розроблена група матеріалів, яку називають аморфними металевими сплавами (АМС). АМС мають ряд високих електромагнітних і механічних властивостей, що роблять перспективними їх використання у якості матеріалів для осердь магнітних головок широкого застосування. АМС містять так звані перехідні метали і аморфізатори (склоутворювачі). В якості перехідних металів використовуються феромагнітні метали *Fe, Co* і *Ni*, а в якості аморфізаторів – елементи *B, C, Si, P* і *Ge*.

Основні переваги АМС: високі значення параметрів  $\mu_n$  і  $B_s$ , за якими вони не поступаються пермалою; наприклад, відомі матеріали з  $B_s \approx 1,7 \text{ Тл}$  і  $\mu_n - 120 \cdot 10^3$ ; відносно високе значення  $\rho$ , яке обумовлює низькі втрати на вихрові струми, однак АМС поступаються за цим показником феритам: низький коефіцієнт магнітострикції  $\lambda_s$ , низькі коерцитивна сила і стала анізотропія і, як наслідок, низький рівень шуму головок; мала чутливість до механічних напруг для більшості АМС, які виникають при штампуванні пластин і монтажі осердь у багатоканальні блоки головок. Перераховані переваги АМС обумовлюють все більш широке їх використання у апаратурі магнітного запису.

В табл. 2.1 наведені основні параметри деяких магнітних матеріалів, які використовуються на даний час у якості осердь магнітних головок.

Таблиця 2.1

**Основні параметри магнітних матеріалів для магнітних головок**

Тип матеріалу	Склад	$\mu_n \cdot 10^3$	$B_s$ , Тл	$\rho \cdot 10^{-3}$ , Ом·м	$H_c$ , °C	$T_c$ , °C	HV	$\dot{v}_F$
Пермалой	Ni, Fe	70	0,8-1,2	50	0,5-2	400	120	10
Премалой	Ni, Fe(Cu, Cr)	40	0,8	70	2	300	160	3
Твердий пермалой	Ni, Fe, (Nb, Ti)	20-40	0,5-0,9	90	2	280	230	1-5
Сендаст	5,4 Al, 9,6 Si, 85 Fe	35	1,1	80	2	500	500	0,1-0,5
Суперсендаст	4 Al, 6 Si, 3 Ni, 87Fe	10	1,6	100	4	150	600	0,1
Гарячепресований ферит	Mn, Zn	5	0,4	$10^4$	7	150	650	0,1-0,2
Те ж	Ni, Zn	6	0,4	$10^{10}$	7	150	750	0,1-0,2
AMC	4Fe, 66Co, 2V, 8 Si, 20 B	126	0,7	126	0,3	315	960	—

$\dot{v}_F$  — коефіцієнт зносостійкості за Грундіком, який відображає знос матеріалів за часом.

Успіхи у розробці нових магнітних матеріалів для магнітних носіїв і головок запису-відтворення, покращення конструкції і технології їх виготовлення роблять реальним вже в найближчий час освоєння діапазону щільності цифрового запису порядку  $1000...3000$  біт/мм. У значній мірі цьому сприяє також прогрес в області розробки і промислового освоєння досконалих видів механізмів транспортування магнітних стрічок.

## **2.2. Способи цифрового магнітного запису на рухомий носій**

### **2.2.1. Класифікація способів ЦМЗ**

В основу класифікації способів ЦМЗ раціонально покласти сукупність ознак, вибір яких повинен проводитись з урахуванням вже створених понять і термінології. Доцільно також використовувати поняття і термінологію теорії сигналів, що дозволяє частково використовувати її висновки при порівняльній оцінці способів ЦМЗ.

На рис. 2.2.1. надана класифікаційна схема способів ЦМЗ. За ознакою використання перекодування всі способи ЦМЗ можуть бути поділені на дві великі групи: без додаткового перекодування вихідної двійкової послідовності і з перекодуванням вихідної двійкової послідовності. Попереднє перекодування перед записом на носій інколи називають проблемно-орієнтованим.

В свою чергу перекодування може вестись з урахуванням властивостей способу БПНМ або з урахуванням властивостей способу ІПМ, кожен з яких має свою специфіку.

По типу сигналів запису способи можуть бути розділені на імпульсні, потенціальні, імпульсно-потенціальні, а також поділені на дворівневі та багаторівневі (багатопозиційні). Під імпульсними способами ЦМЗ розуміють способи запису, при використанні яких в тактовому інтервалі проходження символів коду носій перемагнічується не менше двох разів. Потенціальними способами запису є способи, для яких характерна не більше, ніж одноразова зміна потенціалу (рівня) намагніченості протягом одного тактового інтервалу. У випадку, якщо під час запису цифрової послідовності використовуються імпульсні сигнали і зміна потенціалів (рівнів) намагніченості, способи запису зручно називати імпульсно-

потенціальними.

Під багаторівневими мають на увазі сигнали, які використовують для реєстрації символів коду, що відрізняються один від одного за амплітудою (рівню), в тому випадку, коли їх число більше двох. Сигнали можуть відрізнятися один від одного не тільки за амплітудою, але і за іншими параметрами, наприклад, фазою, часовим положенням, довжиною і т.д. В цьому випадку різницю між ними можна представити числом різних позицій, а самі сигнали зручно називати багатопозиційними. Якщо  $N$  – число різних позицій цифрових сигналів, то при  $N > 2$  в одноканальному інтервалі проходження символів коду замість одного біта можливо розмістити  $M$  біт, де

$$M = \lfloor \log_2 N \rfloor. \quad (2.2.1)$$

Це може дозволити при використанні багатопозиційних сигналів збільшити щільність запису цифрової інформації.

У виразі 2.2.1 квадратні дужки вказують на ціле число.

За типом несучих сигналів способи ЦМЗ можуть бути поділені на способи з постійним гармонійним і імпульсним несучими сигналами (носіями). Способи запису двійкової інформації, основані на використанні гармонійного носія, у теперішній час практично не використовуються, оскільки вони не забезпечують високої достовірності цифрових сигналів при відтворенні, не забезпечують також і достатньо високу щільність запису. Проте, слід відмітити, що використання модуляції гармонійного несучого сигналу по частоті багаторівневими сигналами досліджено в наш час мало. Найбільше застосування в ЦМЗ отримали способи з постійним носієм, наприклад, без повернення в нуль (БПН) та без повернення в нуль модифікований (БПНМ). Достатньо широко використовують способи з імпульсними носіями, наприклад, з подвоєнням частоти і деякі інші. Відзначимо, що постійний носій у процесі запису-відтворення

відфільтровується трактом магнітного запису, не пропускаючи постійний струм.

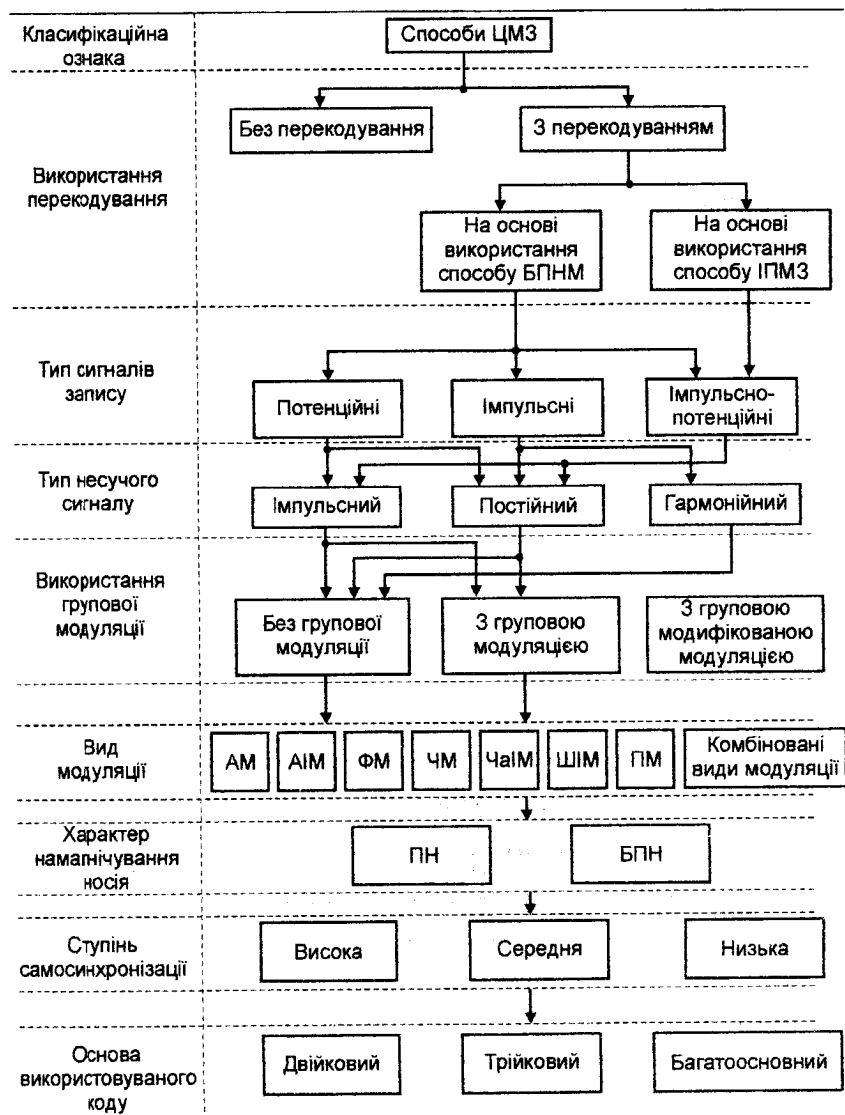


Рис. 2.2.1. Класифікація способів ЦМЗ

За ознакою використання групової модуляції способи ЦМЗ можуть бути поділені на дві групи: без використання групової модуляції і з груповою модуляцією. У наш час з'являються повідомлення про застосування групової модуляції (кодування), при використанні якої об'єднують декілька розрядів двійкового коду в групу і кожній комбінації символів в групі ставлять у відповідність певну позицію сигналу. Корисний ефект групової модуляції – збільшення щільності запису – аналогічний корисному ефекту від використання багатопозиційних сигналів. Іншою позитивною властивістю групової модуляції є збільшення вікна детектування.

Так звана модифікована групова модуляція, описання якої буде приведено нижче, може збільшити щільність запису.

За видом модуляції несучого сигналу способи ЦМЗ можуть розділятися на способи з амплітудною (АМ), частотною (ЧМ) та фазовою (ФМ) модуляцією, а також з імпульсною амплітудною (АІМ), часовою (ЧІМ), широтно-імпульсною (ШІМ) і періодною (ПІМ) модуляцією. Можливо також використання двох і більше видів модуляції одночасно.

Перераховані види модуляції, які використовують в ЦМЗ, мають визначену специфіку, оскільки модуляції піддається в основному постійний носій, а не гармонійний чи імпульсний, як це має місце в системах передачі даних і інших системах зв'язку. Найчастіше використовується амплітудна модуляція постійного носія (БПН, БПНМ), яка проявляється в зміні рівня струму запису. В результаті фільтрації постійної складової і обмеження спектру записуваних (ресстрованих) частот зверху, які мають місце в тракті магнітного запису, сигнали відтворення мають дзвіноподібну форму і виникають в моменти часу, відповідні змінам (перепадам) струму запису. Крім амплітудної модуляції, постійний носій може модулюватись імпульсно, причому параметри імпульсу, наприклад, тривалість чи положення за часом можуть додатково

змінюватись (модулюватись). Зміну часового положення імпульсу чи перепаду струму в ЦМЗ часто називають "модуляція затримкою".

За характером намагнічування способи ЦМЗ можуть поділятися на способи з перемагнічуванням носія із однієї полярності у протилежну (БПН) і на способи з намагнічуванням носія від розмагніченого стану в стан намагнічення будь-якої полярності (ПН). Перші з цих способів часто називають дворівневими, другі – трирівневими з намагнічуванням від нульового рівня намагніченості. У наш час практично не використовуються багаторівневі способи запису чотирма і більше рівнями намагніченості в системах ЦМЗ.

При дворівневому запису (найбільш розповсюдженому) залишкова індукція в залежності від значень символів коду може приймати два значення:  $+B_r$  або  $-B_r$ . Часто використовується симетричний режим запису, коли  $|+B_r| = |-B_r|$ , в процесі якого носій може перемагнічуватись до рівня максимальної залишкової індукції  $\pm B_{r \max}$ . Відмітимо, що робота в режимі повного перемагнічування не завжди виявляється найбільш вигідною, оскільки через нелінійність тракту запису цей режим може призвести до розширення характеристичного імпульсу тракту; зменшенню його роздільної здатності і, відповідно, до зменшення граничної щільності запису.

За ступенем самосинхронізації сигналів відтворення способи ЦМЗ можуть умовно поділятися на способи з високим, середнім і низьким ступенем самосинхронізації. Від ступеня самосинхронізації сигналів відтворення залежить точність погодження часових шкал інформаційного синхронізувального каналу, який в більшості визначає величину ефективного вікна детектування і отже граничну щільність запису.

Ступінь самосинхронізації зручно оцінювати коефіцієнтом  $k_{cc}$ . Для способів з високим ступенем самосинхронізації  $k_{cc}$  наближається до 0,5. Найбільший ступінь самосинхронізації мають ЧМ і ФМ способи ЦМЗ, для



яких  $k_{cc\ max}=k_{cc}=0,5$ . До способів, які мають високий ступінь самосинхронізації, можуть бути віднесені способи зі значенням коефіцієнту  $k_{cc}=0,25\ldots 0,5$ . До таких способів відносять, наприклад, спосіб МФМ (код Міллера) ( $k_{cc}=0,25$ ), способи (4/5) БПНМ ( $k_{cc}=0,33$ ), (9/10) БПНМ ( $k_{cc}=0,25$ ) і деякі інші.

До способів із середнім ступенем самосинхронізації можуть бути віднесені способи зі значенням коефіцієнта  $k_{cc}=0,1\ldots 0,25$ .

Способи, для яких  $k_{cc}\leq 0,1$ , можуть бути віднесені до способів зі слабким ступенем самосинхронізації, наприклад, способи БПН і БПНМ.

За основою коду способи можуть бути розділені на двійкові, трійкові і багатоосновні, для яких основа коду більша 3. Найчастіше запису на магнітний носій підлягають символи двійкового коду. Відомі випадки представлення і запису цифрової інформації трійковим кодом.

### 2.2.2. Імпульсні способи запису

При використанні імпульсних способів ЦМЗ носій протягом тактового інтервалу чи в межах вікна детектування перемагнічується, як мінімум, двічі. Найбільш відомим із способів ЦМЗ є спосіб повернення в нуль. В початковій стадії розвитку ЦМЗ цей спосіб знайшов застосування в накопичувачах, які використовуються в обчислювальній техніці, наприклад, в накопичувачах НБ-9, НБ-10 і НБ-11. Спосіб ПН знайшов також застосування в цифрових автономних регістраторах, які застосовуються в якості ланок інформаційно-вимірjuвальних систем.

Спосіб ПН має два основних різновиди. При використанні першої з них (рис.2.2.2, а) в головку запису при записуванні "1" подають імпульс струму тривалістю  $\tau < T_k$  будь-якої полярності, а при запису "0" сигнали струму запису не формують. В результаті при запису "1" на магнітному

носії утворюються імпульси залишкової намагніченості (рис.2.2, б), тривалість яких

$$\Delta S_n = v_s t_i + \Delta_{e,z},$$

де  $\Delta_{e,z}$  – ефективна ширина РЗ головки запису.

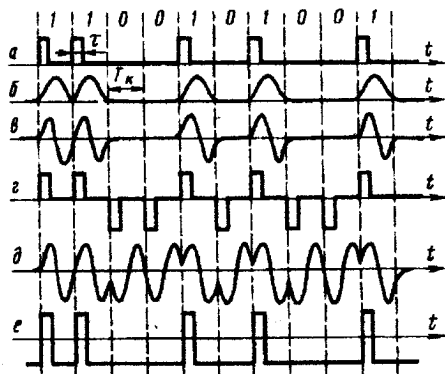


Рис. 2.2.2. Сигнали струму для імпульсних способів цифрового запису

В результаті диференціувальної дії відтворювальної головки на її виході виникають двополярні імпульси, симетричні відносно осі абсцис, форма яких приведена на рис. 2.2.2, в.

Розглянута різновидність способу ПН має очевидний недолік – властивість самосинхронізації сигналів відтворення у неї виражена недостатньо ( $k_{cc} = 0$ ), оскільки при приходженні на запис серії “0” в сигналах відтворення утворюється пауза.

Використання другої різновидності способу ПН дозволяє позбавитись цього суттєвого недоліку. Цю різновидність іноді називають ППН. В цьому випадку, так само як і в попередньому, запис проводять на розмагнічений носій; при цьому символу “1” відповідає імпульс струму позитивної полярності, а символу “0” – негативної.

Сигнали струму запису і сигнали відтворення для способу ПНІ приведені відповідно на рис. 2.2.2, *г* і *д*.

Основним, загальним для способів ПН і ПНІ недоліком є двократне перемагнічення носія запису, що припадає на один символний (тактовий) інтервал коду. Це призводить до обмеження в щільності запису, яка для цих способів ЦМЗ відносно невелика. Другим недоліком способів ПН є неповне (приблизно 50%) використання амплітудної характеристики каналу запису-відтворення, що знижує відношення сигнал-шум на вході пристрою відновлення сигналів відтворення, зменшуючи надійність його роботи.

Для способу ПНІ цей недолік може бути усунено використанням режиму запису не від нуля намагніченості, а від деякого початкового рівня, що задається постійним зміщенням; тому цей спосіб інколи називають способом повернення до зміщення (ПЗ). Крім можливості запису імпульсних сигналів на попередньо нерозмагнічений носій, спосіб ПЗ дозволяє повністю використати амплітудну характеристику каналу і за рахунок цього приблизно вдвоє (для великих  $\tau$ ), порівняно зі способом ПНІ, збільшити амплітуду відтворюваних сигналів. Епюри струму запису для способу ПЗ наведено на рис.2.2.2, *е*.

Для способу ПНІ може бути знижено вплив зменшення амплітуди відтворюваних сигналів, які виникають за рахунок неповного використання амплітудної характеристики каналу запису-відтворення, якщо відновлення сигналів відтворення проводити по їх нуль-перетинах. Таке відновлення для ПНІ можна здійснити при високій щільності запису. Дійсно, при високій щільності запису структура сигналів відтворення для ПНІ та для способу подвосня частоти (ЧМ) аналогічні, що дозволяє використовувати однаковий спосіб їх нелінійності обробки (відновлення) по нуль-перетинах відтворених сигналів і, отже, отримати при використанні ПНІ вірогідність сигналів, що незначно відрізняється від

вірогідності, яка отримана при використанні способів ЧМ.

Перевагами способу ПНІ є: високий ступінь самосинхронізації сигналів відтворення, економічність і простота пристрою запису, що реалізує цей спосіб, відносно висока вірогідність (при обробці сигналів відтворення по нуль-перетинах). Незважаючи на ці переваги, спосіб ПНІ в наш час практично не використовується через відносно невисоку щільність запису.

До імпульсних способів запису відноситься також спосіб запису з використанням широтної модуляції (ШІМ). При його використанні "1" коду відповідає, наприклад, максимальна тривалість імпульсу, що записується на носій, а "0" – мінімальна. В результаті утворюються двопозиційні сигнали, які при відтворенні забезпечують високий ступінь самосинхронізації. Гранична щільність, яка може бути досягнута при використанні двопозиційних ШІМ сигналів, менша, ніж гранична щільність, яку при одній і тій же роздільній здатності тракту магнітного запису може забезпечити спосіб ПНІ. Для підвищення щільності запису використовують багатопозиційні, наприклад, чотирьопозиційні сигнали, тобто використовується принцип групової модуляції. При збереженні високого ступеня самосинхронізації це може зменшити частоту проходження імпульсних сигналів запису в два рази, порівняно з тактовою частотою символів коду і, отже, вдвоє збільшити вікно детектування.

Використання чотирьопозиційних ШІМ сигналів викликає помітне збільшення складності пристрою нелінійної обробки цих сигналів в цифровому каналі відтворення, не викликаючи помітного збільшення щільності в порівнянні з двопозиційними ШІМ сигналами; тому чотирьопозиційні цифрові ШІМ сигнали також не знайшли широкого використання в ЦМЗ.

### 2.2.3. Потенціальні способи запису

На відміну від імпульсних способів запису цифрової інформації потенціальні способи характеризуються однократним перемагнічуванням носія протягом символного (тактового) інтервалу двійкового коду. Ці способи найчастіше застосовуються в практиці ЦМЗ, оскільки одноразове перемагнічування забезпечує більш високу щільність запису двійкової послідовності на магнітний носій, ніж у імпульсних способів.

Добре відомі два основні потенціальні способи: спосіб БПН (рис. 2.2.3, а) та спосіб БПНМ (рис. 2.2.3, б). Зміна стану намагніченості носія і відтворюванні сигнали при використанні БПНМ приведені відповідно на рис. 2.2.3, в і г. При запису з використанням способу БПН носій перемагнічується в двох протилежних напрямках при надходженні “1” і “0”, наприклад, позитивна полярність перемагнічування може відповідати “1”, негативна – “0”. При відтворенні пристрій відновлення повинен розрізняти відтворювані сигнали за полярністю, що здійснюється достатньо надійно і просто, наприклад, за допомогою діодних обмежувачів. Недоліком способу БПН є можливість розмноження поодиноких і групових помилок, які виникають в каналі запису-відтворення. Дійсно, помилка на початку серії “1” або “0” призводить до помилкового “впізнання” символів аж до кінця цієї серії, що суттєво погіршує захист від перешкод сигналів відтворення, записаних на носій способом БПН.

Позбавитись явища розмноження помилок дозволяє застосування способу БПНМ, при якому полярність намагніченості (рівень струму запису) змінюється на протилежну кожен раз з приходом на запис чергової “1” коду. Цим досягається ефект відносної модуляції, загальною властивістю якої є підвищення захисту сигналів від перешкод. Аналогічний ефект виникає, наприклад, при заміні абсолютної фазової

модуляції (ФМ) на відносну (ВФМ). Висока щільність запису, яка забезпечується способами БПН і БПНМ, обумовлена тим, що сигнали струму запису, які відповідають цим способам, дозволяють досягнути межі Найквіста для питомої швидкості передачі цифрової інформації в ідеальному двійковому каналі, який дорівнює двом бітам на 1 Гц смуги, і, виходячи з цього, забезпечує максимальну (граничну) щільність запису в ідеальному двійковому каналі магнітного запису. Перевищити цю межу можливо тільки шляхом використання багатопозиційних сигналів (групової модуляції).

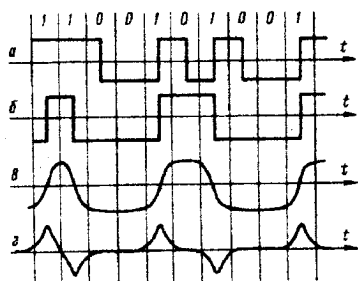


Рис. 2.2.3. Сигнали струму для потенціальних способів цифрового запису

В реальному цифровому каналі магнітного запису гранична щільність і вірогідність залежать від способів лінійної і нелінійної обробки сигналів відтворення. Для підвищення щільності використовується частотна і фазова корекція сигналів відтворення, а також спосіб відновлення цих сигналів за екстремальними точками зі стробуванням.

Однією з причин високої достовірності і щільності, які досягаються в цифровому каналі з БПНМ і БПН, є використання протилежних сигналів відтворення (два сусідніх відтворюваних імпульси завжди мають протилежну полярність), яка властива цим способам, що збільшує ступінь різноманітності сусідніх сигналів, підвищує відношення сигнал-шум і, в наслідок, покращує умови їх нелінійної обробки.

Недоліком способу БПНМ є малий ступінь самосинхронізації сигналів відтворення ( $k_{cc}=0$ ). В результаті сигнали відтворення носять нерегулярний характер, що ускладнює узгодження часових масштабів інформаційного і синхронізувального каналу системи ЦМЗ, обмежуючи підвищення щільності запису. Одним із способів усунення цього недоліку є використання прийому перекодування вихідної двійкової послідовності таким чином, щоб виключити в перекодованій послідовності серії "0", довжина яких перевищує задану (допустиму).

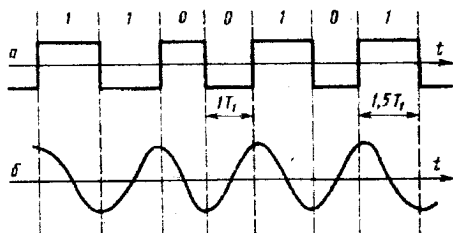


Рис. 2.2.4. Сигнали струму запису і відтворення для способу запису з використанням ПМ

До недоліків способу БПНМ можна віднести також відносно великі часові і амплітудні спотворення відтворюваних сигналів, які виникають при високих щільностях запису. Вплив цього недоліку також може бути зменшений шляхом перекодування. Відмітимо, що більшість відомих в ЦМЗ кодів будуються з урахуванням властивостей способу БПНМ і спрямовані на зменшення ступеня впливу відмічених недоліків цього способу.

Дещо відокремлене положення в ЦМЗ займають способи, основані на застосуванні періодної модуляції (ПМ), які можуть бути віднесені до потенціальних способів запису, тому що, як в кожному символьному інтервалі, при їх використанні виробляється одноразове перемагнічування носія. Відомо декілька різновидів способів з ПМ. Наприклад, в найпростішому випадку встановлюють таку відповідність між символами

коду і символними інтервалами сигналів, які записуються на носій: “1” –  $1.5T_1$ , “0” –  $T_1$  або “1” –  $2T_1$ , “0” –  $T_1$ . В деяких випадках правила модуляції змінюють таким чином, щоб мінімальний інтервал запису  $T_1$  відповідав символам коду (0 або 1), які складають більшість символів, що надходять на запис блоку. Відомий також спосіб з ПМ, при використанні якого серії “1” або “0” записують з інтервалом мінімальної тривалості  $T_1$ ; якщо в двійковій послідовності, яка надходить, виникає заміна “1” на “0” (або навпаки), то запис виконується через інтервали часу  $kT_1$ , де  $k = 1, 2, \div 2$ . В цьому випадку декодування при відтворенні може бути здійснено тоді, коли попередньо відоме значення одного або кількох символів на початку блоку символів, відтворюваних з носія. Форма сигналів струму запису і відтворення для способу ЦМЗ з ПМ, приведена відповідно на рис. 2.2.4, а і б.

Основною перевагою способу ПМ є регулярність сигналів відтворення, яка дозволяє проводити відновлення сигналів по нуль-перетинам. Основний недолік – нерівномірність сигналів, яка проявляється в тому, що однакове число символів блоку, які надходять на запис, записуються на носій в різні, не рівні один одному інтервали часу. Оскільки в більшості випадків, наприклад при передачі даних каналом зв’язку, використовуються рівномірні коди, то виникає необхідність застосовувати буферні ЗП з відносно великим об’ємом пам’яті. Суттєво те, що буферні ЗП повинні використовуватись як в пристроях запису, так і в пристроях відтворення системи ЦМЗ.

Таке ускладнення пристроїв запису та відтворення, що реалізують способи з ПМ, не завжди виправдовується певним збільшенням щільності запису (порівняно зі способами ФМ і ЧМ), яке ці способи може забезпечити.



## 2.2.4. Імпульсно-потенціальні способи запису

До імпульсно-потенціальних (ІП) способів запису можуть бути віднесені такі широко відомі способи, як способи фазової (ФМП) або відносно фазової (ВФМП) модуляції з прямокутною несучою та спосіб частотної модуляції (ЧМ). Для цих способів і всіх їх різновидів характерне використання як однократного перемагнічування (зміна магнітного потенціалу) в тактовому інтервалі, так і двократного (імпульсного) перемагнічування, тому всі ці способи можуть бути віднесені до підкласу імпульсно-потенціальних способів. Найчастіше практично використовується ЧМ спосіб запису.

Не так давно були розроблені нові імпульсно-потенціальні способи ЦМЗ, які забезпечують підвищену щільність запису двійкового коду. Відомо два основних різновиди способів запису: імпульсно-потенціальний (ІП) і модифікований імпульсно-потенціальний (ІПМ) способи запису. При використанні ІП способу чергову "1" на носій, який знаходиться, наприклад, в стані негативної намагніченості, записують перепадом струму позитивного напрямку, якщо в наступному символному інтервалі розміщена "1", та позитивним імпульсом струму, якщо в цьому інтервалі розташований "0". Чергову "1" на носій, який знаходиться в стані позитивної намагніченості, записують перепадом струму негативного напрямку, якщо в наступному символному інтервалі розташований "0", та негативним імпульсом струму, якщо в цьому інтервалі розташована "1"; при цьому запис одиниць роблять через мінімальний інтервал часу, рівний двом періодам символної частоти двійкового коду.

Епюри сигналів струму запису  $I_m(t)$  приведено на рис. 2.2.5, а, епюри сигналів відтворення - на рис. 2.2.5, б.

В порівнянні з БПН (БПНМ) сигнали відтворення ІП мають більш складний характер, оскільки до імпульсних сигналів, властивих сигналам

складний характер, оскільки до імпульсних сигналів, властивих сигналам відтворення при використанні способу БПН, у випадку ІП способу додаються ще дипульси, тобто два імпульсних, розташованих поряд різнополярних сигнала, які при обробці необхідно розглядати як одне ціле. Пристрій відтворення у випадку використання ІП способу запису повинний надійно розрізняти імпульси, дипульси та полярність і відсутність імпульсів та дипульсів. Таким чином, кількість розпізнавальних позицій сигналів відтворення для ІП дорівнює п'яти.

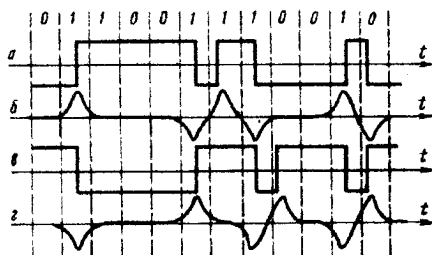


Рис. 2.2.5. Сигнали струму запису та сигнали відтворення для ІП та ІПМ способів запису

Недоліком способу ІП є складність обробки сигналів, пов'язана з необхідністю обліку полярності сигналів відтворення. Від цього недоліку вільна модифікація способу ІП – спосіб ІПМ.

При використанні ІПМ способу запису чергова "1" коду записується на магнітний носій перепадом струму, якщо в наступному за нею символічному інтервалі розташована "1", і двома перепадами струму (імпульсом, наступним в межах тактового інтервалу), якщо в наступному за нею символічному інтервалі розташований "0". Тобто записують групу символів коду "11" перепадом струму, а групу символів "10" – імпульсом. При надходженні на запис "0" коду сигнали струму запису не формуються так само, як це робиться при використанні способу БПНМ. Відмітимо, що так само як і для ІП способу, використання ІПМ способу дозволяє

збільшити мінімальний період проходження сигналів запису імпульсів і перепади струму за рахунок використання операції групування з одного символного інтервалу до двох.

Способи ІПМ і БПНМ мають деякі загальні властивості, наприклад, при записі нулів коду в сигналі утворюється пауза, а при відтворенні не використовується операція селекції за полярністю.

Основною перевагою способів ІП і ІПМ є те, що вони порівняно зі способом БПНМ забезпечують менші часові спотворення, які виникають в сигналах відтворення в результаті інтерференції. Часові спотворення відтворюваних сигналів проявляються в зміщенні моментів відновлення (ЗМВ) відтворюваних сигналів.

Для зменшення ЗМВ відтворюваних сигналів їх відновлення доцільно проводити по екстремальних точках імпульсів і по нуль-перетинах для дипульсів. При такій обробці відтворюваних сигналів часові ЗМВ значно менші при використанні способу ІПМ, ніж при використанні способу БПНМ. Зауважимо, що зменшення ЗМВ для ІПМ способу в порівнянні зі способом БПНМ має місце і в випадку обробки дипульсів по екстремальних точках. Зменшення ЗМВ відтворюваних сигналів для ІПМ способу в порівнянні з БПНМ може стати достатньо очевидним, якщо врахувати, що екстремальні точки імпульсів зміщуються в результаті впливу сусідніх сигналів, віддалених від розглянутого на мінімальний інтервал часу  $2T_k$  (замість  $T_k$  для способу БПНМ), а зміщення екстремальних точок дипульсів має на відміну від БПНМ односторонній характер. Відмітимо, що зміщення нуль-перетинів дипульсів, яке виникає в результаті інтерференції (ЗМВ дипульсів), значно менше від зміщення екстремальних точок цих дипульсів.

В цифрових каналах з ІПМ (ІП) доцільно для зменшення впливу ЗМВ відтворюваних сигналів при записі проводити зміщення моментів виникнення імпульсних сигналів відносно моментів виникнення перепадів

струму. Ця операція і звичайні методи попередньої корекції сигналів запису, розроблені для способу БПНМ, дозволяють значно зменшити ЗМВ відтворюваних сигналів.

Так само як і у способі БПНМ, недоліком ІПМ способу запису є малий ступінь самосинхронізації сигналів відтворення ( $k_{cc} = 0$ ). Методи боротьби з цим недоліком аналогічні методам, які використовують для покращення властивостей самосинхронізації способу БПНМ. В порівнянні зі способом БПНМ реалізація способу ІПМ більш складніша, що пов'язано з використанням трипозиційних сигналів замість двопозиційних. Відносно ускладнення реалізації для ІПМ способу проявляється практично тільки в пристроях відтворення і пов'язане з наявністю додаткового селектору дипульсних сигналів. Таке ускладнення виявляється практично невеликим недоліком в порівнянні зі збільшенням щільності запису, яке може забезпечити спосіб ІПМ.

В якості однієї з переваг ІПМ способу відмітимо, що в силу менших, ніж у способу БПНМ ЗМВ, відтворюваних сигналів, використання прийому перекодування для ІПМ може виявитись достатньо ефективним.

#### 2.2.5. Способи ЦМЗ з використанням групової модуляції

Принциповий шлях підвищення пропускної здатності в каналах передачі даних і, отже, щільності запису в системах ЦМЗ вказано Шенноном в його широко відомій формулі для визначення крайньої пропускної здатності каналу передачі даних [біт/с]

$$B_{max} = \Delta F \log_2(1 + P_c/P_{ш}), \quad (2.2.2)$$

де  $\Delta F$  – смуга пропускання;  $P_c/P_{ш}$  – відношення потужності сигналу до потужності шуму на вході вирішувального пристрою приймача системи

З (2.2.2) видно, що збільшення  $P_c/P_w$  дозволяє при незмінній смузі пропускання каналу передачі даних збільшити пропускну здатність (щільність запису) в  $\log_2(1+P_c/P_w)$  раз, де  $1+P_c/P_w$  – кількість розпізнавальних градацій (позицій) сигналу носія, а  $\log_2(1+P_c/P_w)$  – кількість двійкових розрядів, які відповідають кількості розпізнавальних позицій цього сигналу.

Якщо співвідношення Найквіста  $B_{max} = 2\Delta F$  [біт/с] встановлює крайню пропускну здатність для двійкового каналу передачі даних, тобто каналу в якому використовуються двопозиційні сигнали, то співвідношення (2.2.2) Шеннона встановлює крайню пропускну здатність для каналу, який використовує систему числення з основою  $\log_2(1+P_c/P_w)$ , тобто для каналу, в якому використовуються багатопозиційні сигнали.

Таким чином з (2.2.2) безпосередньо випливає, що для збільшення щільності запису (пропускної здатності каналу передачі даних) необхідно при фіксованій смузі пропускання  $\Delta F$  збільшувати число використовуваних (розпізнавальних) позицій сигналу носія, тобто використовувати багатопозиційні сигнали чи групову модуляцію. Під груповою модуляцією тут розуміється розбиття двійкової послідовності на групи із  $n$  символів і встановлення однозначної відповідності між будь-якою із  $2^n$  комбінацій символів двійкового і розрядного коду з  $2^n$  позиціями сигналу носія.

Принцип групової модуляції (використання багатопозиційних сигналів) знаходить практичне застосування в техніці зв'язку, так, наприклад, багатопозиційні сигнали в формі багатократної фазової модуляції використовуються в системах передачі даних для збільшення їх пропускної здатності. В ЦМЗ також намагаються використовувати багатопозиційні сигнали для підвищення щільності запису. Як вже відмічалось раніше, відомі випадки використання багатопозиційних ШІМ сигналів, описаний спосіб ЦМЗ з використанням групової модуляції, який

сигналів, описаний спосіб ЦМЗ з використанням групової модуляції, який згадується під скороченою назвою ПНГ (спосіб повернення в нуль з груповою модуляцією). Цей спосіб має відносно складний алгоритм утворення сигналів струму запису і характеризується тим, що інформаційними ознаками є амплітуда і полярність сигналів відтворення, а також інтервали часу між ними. При цьому в процесі модуляції двійкова послідовність поділяється на групи по два символи ( $n=2$ ).

Перевагами способу запису з груповою модуляцією є деякі збільшення щільності запису в порівнянні зі способом ПН, високий ступінь самосинхронізації сигналів відтворення і збільшене до значення  $2T_k$  (в порівнянні з  $T_k$  для способу ПН) вікно детектування.

В той же час спосіб ПНГ має суттєві недоліки, основним з яких є використання в якості інформаційної ознаки значення амплітуд відтворюваних сигналів, що знижує вірогідність відтворюваних цифрових сигналів і суттєво ускладнює нелінійну обробку сигналів відтворення в каналі відтворення.

Підвищення щільності запису двійкового коду в ЦМЗ можна також досягти при використанні модифікованої групової модуляції (МГМ). На відміну від способів з груповою модуляцією для способів, основаних на використанні МГМ, кількість позицій сигналу носія

$$m_{МГМ} = 2^{n-1} + 1. \quad (2.2.3)$$

Це досягається завдяки тому, що для МГМ об'єднання символів коду в групи із  $n$  символів утворюється кожен раз, коли приходить на запис чергова "1", яка не входить у попередню групу. Якщо, наприклад,  $n=3$  можливі тільки чотири комбінації символів: 100, 110, 101, 111, для запису яких необхідно чотири ненульових позиції сигналу носія.

Період проходження сигналів при груповій модуляції  $T_{gm}$  і мінімальний період проходження при модифікованій  $T_{МГМ\min}$  збільшуються порівняно з періодом проходження сигналів коду  $T_k$  в  $n$  раз, тобто

$$T_{\text{сМ}} = T_{\text{сММmin}} - n T_k$$

Підвищення щільності запису завдяки застосуванню МГМ добре проявляється при порівнянні зі способом запису з поверненням у нуль модифікованим (ПНМ), заснованим на застосуванні МГМ і розглянутим раніше способом ПН. Епюри струму запису способу ПНМ та для порівняння способу ПН приведено відповідно на рис.2.2.6, а і б.

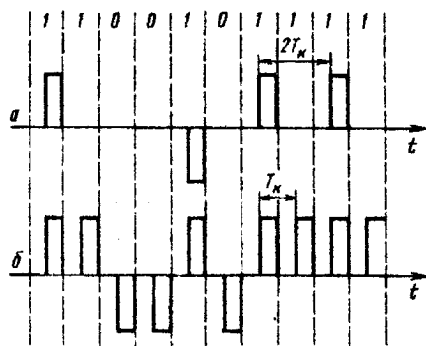


Рис. 2.2.6. Сигнали струму запису для способів ПНМ (а) та ПН (б)

При використанні способу ПНМ позитивним імпульсом струму на носій записують групу символів 11 ( $n=2$ ), а групу символів 10 записують негативним імпульсом струму.

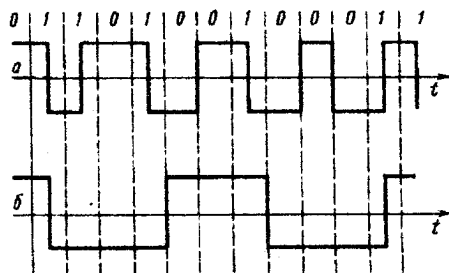


Рис. 2.2.7. Сигнали струму запису для способів МФМ (а) та ВМФМ (б)

Мінімальний інтервал часу  $T_{\min}$  між сусідніми імпульсами збільшується порівняно зі способом ПН в 2 рази ( $T_{\min} = 2T_k$ ). Це дозволяє приблизно в 2 рази збільшити щільність запису при використанні способу ПНМ порівняно з щільністю способу ПН.

Використання принципу групування символів двійкової послідовності, властивого МГМ, може бути також застосовано в поєднанні з методом модуляції затримкою. В цьому випадку правило утворення струму запису може бути, наприклад, таким: група символів 10 записується на носій на межі тактового інтервалу, а група символів 11 в середині. При надходженні на запис нулів коду сигнали струму запису не формуються. Сигнали струму запису, що відповідають цьому модифікованому способу фазової модуляції (ВМФМ) з вузькою смугою, приведено на рис.2.2.7, а. На рис.2.2.7, б для порівняння приведено сигнали струму запису, які часто називають способом модифікованої фазової модуляції (МФМ код Міллера).

Спосіб ІПМ (ІП) дозволяє збільшити щільність запису порівняно зі способом ЧМ (ФМ) в 1,7...1,9 рази. Якщо порівняти ІПМ (ІП) спосіб зі способом БІПМ (БПН), то збільшення щільності для ІПМ може досягати 20% і більше.

Загальним недоліком способів, основаних на МГМ, є недостатня ступінь самосинхронізації сигналів відтворення. Цей недолік може бути усунено тими ж прийомами, які використовуються для покращення властивостей самосинхронізації способу БІПМ, наприклад, шляхом перекодування, включенням службових сигналів синхронізації в склад інформаційних сигналів та інше.

Як правило, у випадку використання трипозиційних сигналів (ІПМ, ВМФМ, ВНМ) ускладнення, пов'язане з багатопозиційністю, не призводить до помітного збільшення об'єму і складності пристроїв запису-відтворення системи ЦМЗ в цілому.



## 2.2.6. Основні характеристики способів ЦМЗ

Способи ЦМЗ можуть бути описані рядом характеристик, які дозволяють провести орієнтовну оцінку технічних параметрів системи цифрового запису, основанийого на використанні відповідного способу.

Основні характеристики способів ЦМЗ: характер перемагнічування носія (ПН, БПН, ПН-БПН); тип сигналів струму запису, які використовуються [потенціальні (П), імпульсні (І), імпульсно-потенціальні (ІП)]; тип носія сигналу, що використовується [постійний (ПН), імпульсний (ІН), гармонічний (ГН)]; вид модуляції несучого сигналу [амплітудна і амплітудно-імпульсна (АМ і АІМ), частотна (ЧМ), фазова (ФМ), фазово-імпульсна (ФІМ), широтно-імпульсна (ШІМ) і періодна (ПМ)]. Можуть використовуватись також і деякі інші види модуляції, наприклад, часові (ЧаМ), часово-імпульсна (ЧаІМ) і частотно-імпульсна (ЧІМ) модуляції. Останній вид модуляції в цифровому запису практично не використовується. Характеристикою способу ЦМЗ за видом модуляції, яка використовується, є також застосування простої двійкової (ДМ), групової (ГМ) або модифікованої групової (МГМ) модуляції. Крім цього, в якості характеристик способу ЦМЗ можна використовувати: кількість позицій сигналу, яку повинен розрізняти пристрій відтворення системи ЦМЗ і ступінь самосинхронізації, якій оцінюється коефіцієнтом самосинхронізації

$$k_{cc} = T_{\min} T_{\max} - f_{\min} f_{\max}; \quad (2.2.4)$$

де  $T_{\min}$  і  $T_{\max}$  – відповідно мінімальний і максимальний інтервал проходження сигналів, які використовуються в відтворювальному пристрої для управління синхроканалом;  $f_{\min}$  і  $f_{\max}$  – відповідно мінімальна і максимальна основні (перші) частотні складові в спектрі “випрямлених” сигналів відтворення, тобто сигналів, які можуть бути застосовані для управління каналом синхронізації.

Найважливішою характеристикою способів ЦМЗ є вікно детектування  $T_d$ , що визначає в ідеальному каналі ЦМЗ допуск на зміщення моментів відновлення відтворюваних сигналів, які виникають в результаті взаємодії сусідніх сигналів, записаних на носій.

Може виявитись корисним також введення характеристики, яка дозволяє порівнювати інформаційне завантаження (інформативність) цифрових сигналів. Інформативність сигналу краще оцінювати кількістю біт, які приходяться на елементарний цифровий сигнал, тобто на 2 перепади струму запису або на мінімальний період проходження цифрових сигналів струму. Із двійкових сигналів максимальну інформативність мають сигнали БПНМ (БПН). Для цих сигналів інформативність дорівнює 2 біт/період. Для сигналів, які відповідають способу ЧМ (ФМ), інформативність сигналів дорівнює 1 біт/період. Основні характеристики описаних в даному розділі способів приведено в таблиці 2.2.1.

Таблиця 2.2.1

### Основні характеристики способів ЦМЗ

Спосіб ЦМЗ	Характеристика						
	Характер переміщення носія	Тип використовуваних сигналів струму запису	Тип використовуваного несучого сигналу	Вид модуляції	Число позицій сигналу	Ступінь самосинхронізації	Вікно детектування, частки $T_k$
1	2	3	4	5	6	7	8
1. ПН	ПН	I	ІН	АІМ	2	0	1
2. ПНІ	ПН	I	ІН	АІМ	2	1	1
3. ІПНМ	ПН	I	ІН	АІМ, МГМ	3	0	1
4. ШМ	ПН, БПН	I	ІН	ШМ	2, 3, 4	-	-
5. БПН	БПН	П	ПН	АМ	3	0	1
6. БПНМ	БПН	П	ПН	АМ	2	0	1

1	2	3	4	5	6	7	8
7. ПМ	БПН	П	ПН	ПМ	2	-	-
8. ФМ (ОФМ)	БПН	П	ПН	ЧаМ	2	0,5	0,5
9. ЧМ	БПН	П	ПН	ЧМ	2	0,5	0,5
10. ПП	БПН	П	ПН	АМ, АІМ	5	0	1
11. ППМ	БПН	П	ПН	АМ, АІМ	3	0	1
12. МФМ	БПН	П	ПН	ЧаМ	3	0,5	0,5
13. ВМФМ	БПН	П	ПН	ЧаМ	3	0	0,5

### 2.3. Інтегральні магнітні елементи запам'ятовувальних пристроїв

Мікромініатюризація – це напрямок технічного прогресу, який має на меті зменшення розмірів, маси апаратури, одночасного зниження її енергоспоживання, збільшення надійності і технологічності, зокрема полегшення автоматизації її виробництва. Необхідність мікромініатюризації викликана тим, що досить складні функції, які реалізує сучасна апаратура, при звичайному виконанні її елементів і вузлів з них або не можуть бути практично реалізовані, або реалізуються при досить низьких значеннях перерахованих показників. Поставлені задачі досягаються зменшенням розмірів елементів (деталей), збільшенням щільності їх монтажу, зменшенням числа і розмірів міжвузлових з'єднань, прийняттям нових конструктивно-технологічних рішень, які дозволяють зменшити кількість елементів, необхідних для побудови апаратури, зробити їх багатофункціональними в тих самих або менших фізичних об'ємах або отримати пристрої, еквівалентні звичайним тільки за функціями, які вони виконують. В електроніці рішення цих задач вимагало пошуків нових принципів і призвело до виникнення нової її області –

мікроелектроніки, яка успішно розвиває мікромініатюризацію за такими основними напрямками: мікромодульне конструювання, плівочні мікросхеми та інтегральні схеми (тверді схеми та молекулярна електроніка).

Електромагнітна техніка також розвивається в цьому напрямку, і вже можна говорити про виникнення мікромагнетоники, яка займається мікромініатюризацією електромагнітних пристроїв за допомогою конструктивних методів (наприклад, більш раціонального компонування елементів менших розмірів); схемних методів (наприклад, оптимізації схем і багатофункціональних елементів, зокрема, за рахунок використання серць більш складних форм); нових принципів дії (наприклад, обробки інформації на доменному і молекулярному рівнях); нових фізичних явищ; покращення якості магнітних матеріалів; інтегральної (групової) технології (наприклад, методу напилення через трафарет тонких магнітних плівок, лазерної обробки феритових пластин з метою отримання отворів малих діаметрів, групового травлення для використання кільцевих пермалоевих осердь) і ін.

З багатьох магнітних інтегральних елементів і пристроїв (трансфлюксорів, біаксів, запам'ятовувальних пристроїв на багатоотвірних шарових феритових пластинах, пристроїв на тонких плоских і циліндричних магнітних плівках, бездіодних магнітних пристроїв на розгалужених осердях, тонкоплівкових елементів з плоскими магнітними доменами у вузьких каналах, елементів на циліндричних магнітних доменах і інших) розглянемо елементи на розгалужених магнітопроводах та елементи на циліндричних магнітних доменах як приклади елементів, в яких реалізовані оригінальні магнітні явища.

### 2.3.1. Магнітні логічні елементи з розгалуженим магнітопроводом

Прилади з розгалуженим магнітопроводом відомі давно, однак сучасний розвиток вони отримали лише з появою матеріалів, що мають прямокутну петлю гістерезису (ППП).

Розглянемо два типи логічних елементів, основним вузлом яких є розгалужений магнітопровід.

**Логічні елементи на трансфлюксорах.** Як відомо, робота трансфлюксора – перерозподільювача потоку – заснована на автономії окремих магнітних контурів у складному магнітопроводі з матеріалу з ППП; згідно з законом Кірхгофа і Ома у застосуванні до магнітних кіл при подачі до відповідних обмоток сигналів, що детермінувалися за величиною і в часі, відбувається зміна напрямку намагніченості (перерозподіл магнітного потоку) різноманітних ділянок розгалуженого магнітопроводу, що являє собою феритове осердя (матеріал з ППП) з двома або більше отворами. При певному напрямку намагніченості кожної з ділянок сигнал опитування призводить до реверсування магнітного потоку, що пронизує вихідну обмотку, і на затискачах останньої з'являється "1".

На рис. 2.3.1,а наведена схема двоотвірного трансфлюксора. В осерді з фериту з ППП є два отвори різних діаметрів, причому площа поперечного перерізу перемички 1 більша або рівна сумі площ, рівних за площею поперечного перерізу перемичок 2 і 3 (рис. 2.3.1, в). Припустимо, що будь-який контур осердя має ідеально прямокутну петлю перемагнічування.

До обмотки *Скидання* і *Вхід* подаються однополярні, а до обмотки *Опитування* – різнополярні імпульси струму синусоїдальної або прямокутної форми. Якщо вважати, що до будь-якої обмотки подаються імпульси прямокутної форми, то їхні амплітуди повинні задовольняти умовам (рис. 2.3.1, б).

$$I_{скид} \geq \frac{H_c \pi D_{нар}}{w_{скид}}, \quad I = \frac{H_c \pi D}{w_{вх}}, \quad I_{опит} = \frac{H_c \pi d}{w_{опит}}.$$

При такому виборі величин імпульсів та ідеально прямокутній петлі сигнал *Скидання* достатньої тривалості перемагнічує на  $2B_s$  все осердя, сигнал *Вхід* – тільки зону  $D$  і сигнал *Опитування* – тільки зону  $d$ .

Припустимо, що під дією сигналу *Скидання* осердя намагнічується до насичення так, як показано на рис. 2.3.1,г. Завдяки ідеальній прямокутності петлі цей стан намагніченості зберігається і по закінченні імпульсу *Скидання* (осердя "запам'ятовує" досягнуту намагніченість).

Якщо за сигналом *Скидання* не надходить імпульс сигналу *Вхід*, тобто останній рівний нулю, то подача сигналу *Опитування* не може викликати зміни магнітного потоку в кільцевій зоні  $d$  навколо малого отвору: в один півперіод сигналу *Опитування* в зоні створюється напруженість  $H_c$ , що діє у напрямку намагніченості насичення перемички 3, внаслідок чого останній потік змінитися не може, а значить, згідно з принципом неперервності магнітних силових ліній, він не зможе змінитися і у перемичці 2; у наступному півперіоді сигналу *Опитування* в зоні  $d$  створюється напруженість  $H_c$  у напрямку проти годинникової стрілки, що не може викликати зміни потоку через насичення в цьому напрямку перемички 2. Тобто, ЕРС у вихідній обмотці відсутня. Розглянутий стан трансфлюксора (рис. 2.3.1,е) називається заблокованим (замкнутим, станом "0").

Оскільки петля перемагнічування реального осердя відрізняється від ідеально прямокутної, то в обмотці *Виходу* замкненого трансфлюксора сигнал *Опитування* наводить невелику ЕРС завади, що ототожнюється з "0".

Якщо після сигналу *Скидання* подати на вхід імпульс  $I_{вх}$  вказаної вище величини, певної тривалості і полярності (рис. 2.3.1,а), то зона  $D$

намагнітяться до насичення проти годинникової стрілки навколо великого отвору (рис. 2.3.1, д). Завдяки ППГ цей стан залишається, запам'ятовується і після закінчення вхідного сигналу. Тепер трансфлюксор відімкнутий (розблокований, знаходиться в стані 1), оскільки перемички 2 і 3 зони  $d$  насичені в одному напрямку – за годинниковою стрілкою – навколо малого отвору, і подача різнополярних імпульсів *Опитування* призводить до

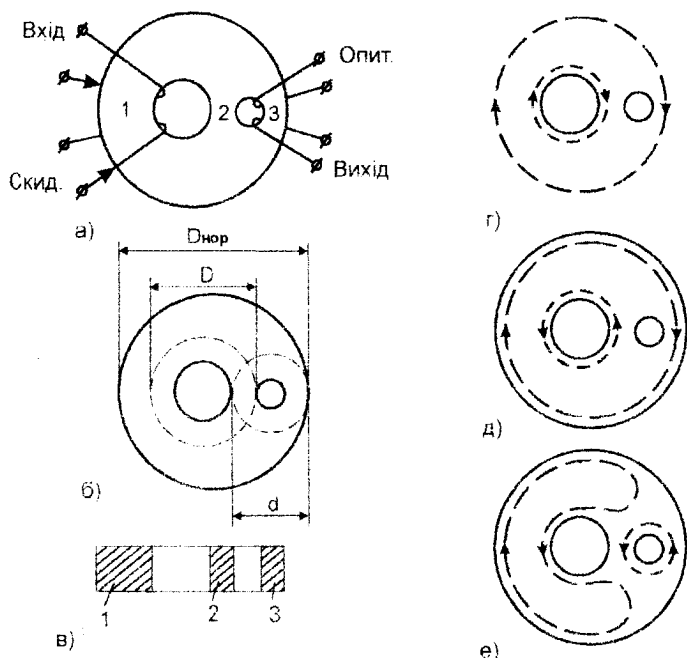


Рис 2.3.1. Двоотвірний трансфлюксор

перемикання потоку в зоні  $d$ , а отже, до появи високого рівня ЕРС, "одиниці" на виході. (Справді, якщо у відімкнутому трансфлюксорі напруженість сигналу  $I_{опит}$  діє в напрямку проти годинникової стрілки навколо малого отвору, тоді одержуємо картину рис. 2.3.1,е; у наступному півперіоді, коли знак імпульсу *Опитування* зміниться на протилежний, – картину рис. 2.3.1,д і т.д., тобто індукція в зоні  $d$  в одному півперіоді

сигналу *Опитування* змінюється від  $-B_r$  до  $+B_r$ , у другому – від  $+B_r$  до  $-B_r$  і т.д.).

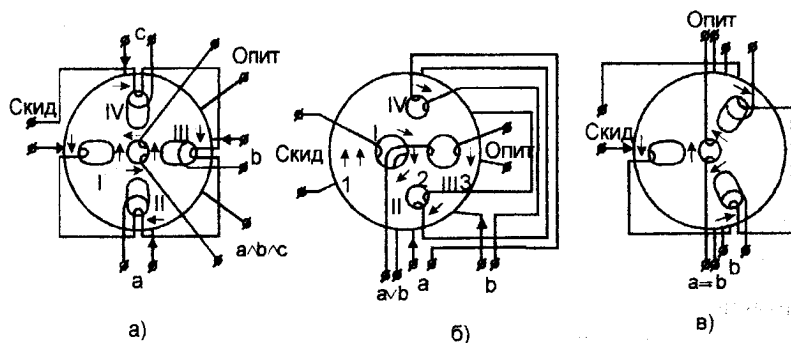


Рис. 2.3.2. Реалізація логічних функцій на трансфлюксорах

Таким чином, в трансфлюксорі зчитування інформації відбувається без її руйнування (вона руйнується тільки після впливу сигналу *Скидання*).

Схема, приведена рис. 2.3.1,а, є "повторювачем" або "динамічним тригером".

Розглянемо приклади елементів на трансфлюксорах, які реалізують різноманітні елементарні логічні функції. Зазначимо, що на всіх наведених нижче рисунках напрямок насичення окремих ділянок магнітопроводу після впливу сигналу *Скидання* вказано стрілками, а зона дії будь-якого іншого сигналу обмежена лише тими перемичками, що примикають до вікна відповідної обмотки.

На рис.2.3.2,а приведена схема тривхідного кон'юнктора, яка виконана на осерді з п'ятьма отворами і рівними по площі поперечного перерізу перемичками. Вхідні сигнали  $a$ ,  $b$  і  $c$  певної полярності намагнічують зони навколо отворів II, III і IV у напрямку проти годинникової стрілки, після чого зона навколо центрального отвору виявляється намагніченою за годинниковою стрілкою, і подача сигналів в обмотку опитування призводить до появи "1" на виході. Вплив на осердя



будь-якого вхідного сигналу не порушує орієнтації потоків насичення навколо інших подовжених отворів, тому для отримання "1" вхідні сигнали можуть подаватися як одночасно, так і в будь-якій послідовності.

На рис. 2.3.2,б зображена схема двовхідного диз'юнктора, виконана на осерді з чотирма отворами. Площі поперечного перерізу перемичок 2 і 3 рівні, а площа перемички 1, принаймні, у два рази більша їхньої суми. Подача сигналу на вхід  $a$  або  $b$  або на обидва входи викликає намагнічування в напрямку проти годинникової стрілки зони, що прилягає до периметра осердя, і зона навколо отвору III виявляється намагніченою в напрямку проти годинникової стрілки.

На рис. 2.3.2,в приведений інгібітор на чотиривіконному трансфлюксорі з рівними по площі поперечного перерізу перемичками. Тільки після  $a=1$  і  $b=0$  зона навколо центрального отвору виявляється намагніченою в одному напрямку (за годинниковою стрілкою) – трансфлюксор відмикається.

**Логічні елементи східчастого типу – леддіки.** Іншою конструктивною формою розгалуженого магнітопроводу є багатоотвірне осердя у вигляді "сходів". За допомогою таких осердь фірма Bell (США) створила ряд логічних і лічильних схем, використовуючи при цьому принципи підсумовування потоків і заборони потоків.

Нижче розглянуті засоби реалізації деяких елементарних логічних функцій на леддіках. На рис. 2.3.3,а,б показані схеми елементів, що працюють за принципом підсумовування потоків в шестисхідчастих сходах і реалізують тримісні кон'юнкцію і диз'юнкцію, заборону, інверсію і повторення. Площі поперечного перерізу  $S_r$  і  $S_b$  горизонтальних і вертикальних гілок магнітопроводу пов'язані співвідношенням  $S_r \geq 3S_b$ . МРС будь-якої вхідної обмотки повинна бути достатньою для створення напруженості насичення в крайній правій вертикальній гілці осердя. Три

вертикальні гілки, розташовані ліворуч від центрального отвору магнітопроводу, назвемо входними гілками, а ті, що знаходяться праворуч, – вихідними, причому нумерацію тих та інших будемо вести зліва направо.

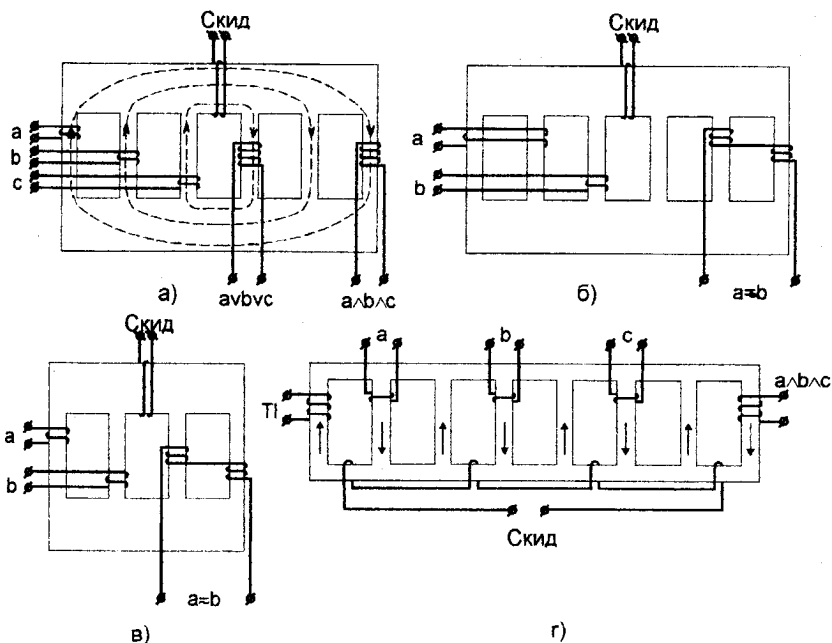


Рис. 2.3.3. Логічні елементи східчастого типу

Картина намагніченості магнітопроводу після впливу однополярного імпульсу *Скидання* показана на рис. 2.3.3,а пунктирними лініями. Кожний з однополярних входніх сигналів *a*, *b*, *c* створює напруженість, що намагається перемкнути "донизу" потік у відповідній входній гілці, тобто змінити його від  $+\Phi_r$  до  $-\Phi_r$ . Згідно з принципом неперервності магнітних силових ліній, дане перемикання повинно супроводжуватися перемиканням "доверху" потоку в якійсь іншій вертикальній гілці

магнітопроводу. Оскільки після скидання всі вхідні гілки вже насичені "доверху", то перемикаання потоку у будь-якій вхідній гілці під дією відповідного вхідного сигналу можливе тільки через одну з вихідних гілок по найкоротшому шляху: подача будь-якого одного вхідного сигналу викликає перемикаання потоку першої вихідної гілки, двох синхронних вхідних сигналів – першої і другої вихідних гілок, трьох синхронних вхідних сигналів – трьох вихідних гілок. Отже, одиничний сигнал на затискачах обмотки першої вихідної гілки з'являється або при подачі будь-якого одного з трьох можливих вхідних сигналів, або при впливі на осердя двох або трьох вхідних сигналів, а на зажимах обмотки третьої вихідної гілки – лише при синхронному впливі всіх трьох вхідних сигналів. Якщо диз'юнктор може працювати і при почерговому надходженні вхідних сигналів в інтервалі між двома черговими імпульсами *Скидання*, то синхронність надходження сигналів на входи кон'юктора обов'язкова, тому що вплив першого за часом вступного сигналу призвів би до перемикаання потоку в одній вхідній і першій вихідній гілках, після чого перемикаання потоку у будь-якій іншій вхідній гілці стало б можливим через щойно перемагнічену на  $2\Phi$  вхідну гілку.

На рис. 2.3.3,б наведена схема інгібітора: при відсутності обох вхідних сигналів виходу немає; напруженість, створювана сигналом  $b$ , при відсутності сигналу  $a$  перемагнічує тільки першу вихідну гілку, на якій немає обмотки виходу; подача сигналу  $a$  при відсутності  $b$  призводить до перемагнічування першої і другої вихідних гілок – на виході з'являється "1", при синхронному надходженні сигналів  $a$  і  $b$  перемагнічуються всі вихідні гілки, але завдяки зустрічному включенню обох половин вихідної обмотки на виході "0". Ця ж схема є повторювачем, якщо  $b \text{--const}=0$ , оскільки  $a \rightarrow 0 = a \wedge \bar{0} = a$ , і інвертором, якщо  $a \text{--const}=1$ , оскільки  $1 \rightarrow b = 1 \wedge \bar{b} = \bar{b}$ . Отже, будь-яка логічна схема може бути побудована

тільки з елементів рис. 2.3.3,б, бо системи  $(\rightarrow, -)$  і  $(\rightarrow, 1)$  є функціонально повними.

На рис. 2.3.3,в показана схема антиеквівалентора, що працює за принципом підсумовування потоків в чотириступеневих сходах: при відсутності обох вхідних сигналів на виході "0", оскільки немає перемикання потоків в жодній з вихідних гілок; подача будь-якого вхідного сигналу призводить до перемикання потоку тільки у першій вихідній гілці, а отже, і до появи "1" на виході; синхронне надходження обох вхідних сигналів перемикає потоки в обох вихідних гілках, але на виході "0", оскільки половини вихідних обмоток включені зустрічно.

Дію тривхідного кон'юнктора, що працює за принципом заборони потоку, може пояснити рис. 2.3.3,г. У даному випадку площі поперечного перерізу  $S_r$  і  $S_b$  горизонтальних і вертикальних перемичок пов'язані співвідношенням  $S_r = S_b$  (а для збільшення вихідного сигналу рекомендується  $S_r = 2S_b$ ). Після дії сигналу Скидання вертикальні гілки насичуються у напрямку стрілок.

Вхідні сигнали  $a, b, c$  підтверджують цю намагніченість в 2, 4 і 6-й вертикальних гілках, а тактовий імпульс  $TI$  намагається перемкнути потік в першій вертикальній гілці через одну з парних гілок по найкоротшому шляху. Тільки при синхронному впливі на осердя тактового і трьох вхідних імпульсів 1 і 8-а гілки перемагнічуються на  $2\Phi$ , і, отже, на виході з'являється "1". (На рис. 2.3.3,а вказано  $a \wedge b \wedge c$ , хоча більш точною була б формула  $a \wedge b \wedge c \wedge TI$ ).

В схемах рис. 2.3.3 вихідний імпульс наявний як протягом тривалості вхідних імпульсів, так і під час дії імпульсу Скидання, тобто "одиничний" інформації відповідає послідовність двох різнополярних імпульсів на затискачах вихідної обмотки.

Для побудови логічних схем леддіки, що реалізують елементарні функції, можна з'єднувати згідно з суперпозицією функцій в законі

функціонування. Якщо використати для зчитування імпульси скидання, то схеми будуть двотактними, причому для розв'язки елементів сусідніх рядів потрібні діоди, а також деяке перекриття за часом вхідних сигналів імпульсами скидання. При зчитуванні вхідними сигналами отримаємо одноктактні схеми, що містять діоди для запобігання зворотній передачі інформації і підсилювально-формувальні ланки для запобігання затуханню сигналу запису від ряду до ряду елементів і зміни часу його переднього фронту. Крім того, при використанні леддіків – особливо тих, що працюють за принципом заборони потоку, – інверсію бажано реалізувати на феритовому осерді з трьома обмотками і діодом у вихідному ланцюзі.

З метою спрощення ланцюгів зв'язку між леддіками сусідніх рядів, зменшення кількості східців, діодів і підвищення надійності і технологічності логічних схем з леддіків доцільніше намагатися реалізувати на кожному сході не елементарні, а більш складні логічні функції, і вже шляхом певного з'єднання останніх досягати реалізації необхідного закону функціонування. З одним з можливих формалізованих методів синтезу логічних схем на леддіках згідно з таким підходом можна ознайомитися в працях О.А.Неживова.

Перспективність елементів з розгалуженою формою магнітопроводу визначається такими їхніми принциповими якостями, як можливість побудови бездіодних або малодіодних логічних схем, компактність, економічність, висока межа за частотою (до сотень кГц), довговічність, можливість реалізації на одному магнітопроводі складної логічної функції або декількох елементарних, відносно висока вихідна потужність (від сотень міліват до одного вата), можливість зчитування інформації без її руйнування та ін. Однак широке використання цих елементів для побудови логічних схем стримується в наш час такими факторами: відсутністю достатніх точних методів розрахунку магнітопроводів складної конфігурації, нечіткою роботою в широкому діапазоні температур,

необхідністю в спеціальному джерелі живлення, досить складною технологією виготовлення, відсутністю набору логічних елементів, що серійно випускаються промисловістю та ін. Тому, незважаючи на перспективність приладів з розгалуженим магнітопроводом, їхнє застосування обмежене найпростішими конструкціями, які не дозволяють у повній мірі реалізувати потенційні можливості елементів даного типу.

**Біакси.** Елемент біакс (в прикладі означає “двоосьовий”) є магнітопроводом складної форми з двома настрізними отворами, осі яких розміщені взаємно перпендикулярно (рис. 2.3.4, а). Через отвори пропущені обмотки (провідники): запису  $w_{\text{зап}}$ , вихідна  $w_{\text{вих}}$  та квадратурного поля  $w_k$ , яка використовується як при запису, так і при зчитуванні інформації.

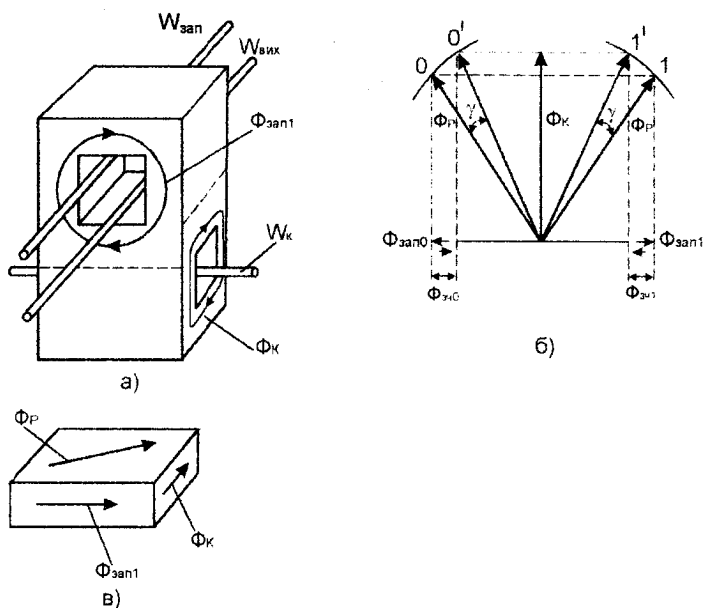


Рис. 2.3.4. Елемент біакс

а) конструкція, б) напрямки магнітних потоків у перемичці,

в) векторна діаграма магнітних потоків

Робота елемента визначається магнітним станом перемички між

отворами (рис. 2.3.4, б). Процеси запису та зчитування в біаксі можна подати таким чином. Для запису “1” або “0” в обмотки ( $w_{\text{зат}}$  та  $w_{\text{вих}}$ ) подаються імпульси струму величиною, яка достатня для намагнічування матеріалу до насичення. При цьому, в обмотку  $w_k$  подається завжди імпульс одного знаку, а в обмотку  $w_{\text{зат}}$  – різних знаків в залежності від “0” чи “1”.

На рис. 2.3.4, а напрямки магнітосилових ліній поля показані відповідними колами, а на рис. 2.3.4, б напрямки магнітних потоків  $\Phi_{\text{зат}}$  та  $\Phi_k$  на ділянці перемички – стрілками. В результаті додавання потоків  $\Phi_{\text{зат}}$  та  $\Phi_k$  створюється потік  $\Phi_p$ . Направки потоків, які показані на рис. 2.3.4, відповідають запису “1”.

У випадку запису “0” напрямком потоку, який створюється імпульсом струму в обмотці  $\Phi_{\text{зат}}$ , зміниться на зворотний ( $\Phi_{\text{зат}} = -\Phi_{\text{зат}}$ ), що викличе зміну у напрямку  $\Phi_p$ . Ці процеси ілюструються векторною діаграмою на рис. 2.3.4, в. Для зчитування інформації в обмотку  $w_k$  подають зчитувальний імпульс того ж напрямку, що і при запису. Під дією цього імпульсу потік в нижній частині біакса збільшується на  $\Delta\Phi_{\text{нч}}$ . В результаті цього повинен змінитися і сумарний потік  $\Phi_p$ . Але він не може зрости за своїм значенням, тому що матеріал доведений до насичення. Тому відбувається поворот потоку  $\Phi_p$  на кут  $\gamma$  та його зміна у верхній частині біакса на  $\Delta\Phi_{\text{вч}}$ , за рахунок чого в обмотці  $w_{\text{вих}}$  виникає ЕРС. При зчитуванні “1” або “0” ця ЕРС буде різною за напрямком. Після закінчення дії імпульсу зчитування магнітний стан осердя повертається до вихідного, тобто зчитування відбувається без руйнування інформації. Біакс може бути використаний не тільки в ЗП, але також в логічних схемах. Основними перевагами біаксів є висока швидкодія, малі розміри (наприклад, габаритні розміри біакса БН-8, що випускається серійно, складають 2,1x1,4x1,2 мм), можливість використання матеріалів з невисокою прямокутністю петлі гістерезису, невелика вартість.

### 2.3.2. Тонкі магнітні плівки

Тонкі магнітні плівки (ТМП) можуть бути використані як в ЗП, так і в логічних елементах ЕОМ.

Запис та зчитування дискретної інформації на елементах з ТМП засновані на тому, що вісь легкого намагнічування в ТМП розміщена в площині плівки і зорієнтована в певному напрямку. Отже, магнітоплівковий запам'ятовувальний елемент можна розглядати як однодоменну область, вектор намагніченості якої при запису «1» ( $+Br$ ) або «0» ( $-Br$ ) має один з двох антипаралельних напрямків вісі легкого намагнічення (ВЛН). Якщо створити поле, під дією якого вектор намагніченості повернеться в напрямку ВЛН, який перпендикулярний ВЛН, тоді при наявності шини зчитування в ній при цьому виникне ЕРС, знак якої буде різним при зчитуванні «1» або «0».

Конструктивне оформлення плівкового ЗП може бути різним. Схематичне зображення плівкової матриці однієї з перших конструкцій показано на рис. 2.3.5 (робота пристрою зрозуміла із раніше розглянутих схем).

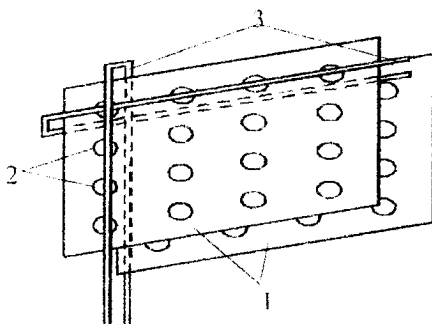


Рис. 2.3.5. Схема конструкції плівкової матриці для ЗП

1 - скляна підкладка; 2 - кружечки пермалоевої плівки;

3 - шини запису та зчитування



Окрім плоских плівок в якості елементів ЗП використовують циліндричні плівки. На рис. 2.3.6, а показаний елемент ЗП на циліндричній плівці, яка нанесена на провідник, що служить розрядним проводом ЗП. Адресні імпульси запису-зчитування проходять по обмотці, що охоплює циліндричну плівку.

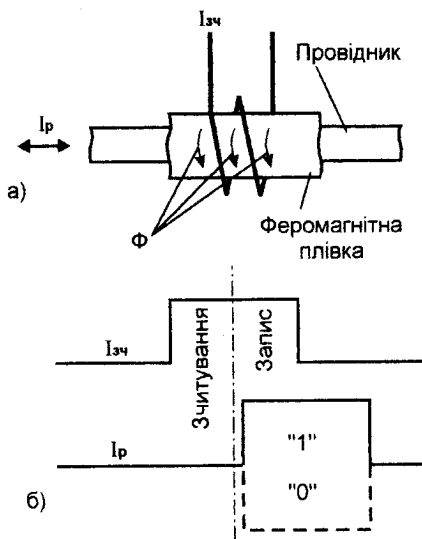


Рис. 2.3.6. Елемент ЗП на циліндричній пермалоевій плівці

(а) зчитування та запис (б)

Вісь легкого намагнічування плівки спрямована по колу циліндра.

Величина розрядного струму запису  $I_p$  вибирається такою, щоб напруженість магнітного поля, що створюється цією величиною, була менша коерцетивної сили в напрямку ВЛН. Таким чином, тільки струм  $I_p$  не може змінити напрямок магнітного потоку в плівковому елементі.

При подачі струму зчитування  $I_{зч}$  на ділянках плівки, які розташовані під обмотками зчитування, відбувається поворот вектора намагніченості в напрямку осі провідника, що призводить до індукування сигналу на

вихідний розрядний обмотці, полярність якого визначається напрямком намагніченості плівки, який був до зчитування інформації.

В залежності від амплітуди струму зчитування  $I_{зч}$  поворот вектора намагніченості може бути як необоротним, так і оборотним. В другому випадку зчитування інформації може здійснюватися без її руйнування. Запис інформації відбувається при одночасному впливі адресного струму запису та розрядного струму  $I_p$  з тим або іншим знаком. Причому в якості адресного струму запису та зчитування може бути використаний один і той же імпульс струму  $I_{зч}$ , одна частина якого використовується для зчитування інформації, а інша – для запису (рис. 2.3.6, а, б).

Основною перевагою і плоских, і циліндричних феромагнітних плівок є велика швидкодія (до наносекундного діапазону), обумовлена тим, що процеси перемагнічування в них протікають за рахунок обертання вектора намагнічуваності, а також можливість автоматизації процесу виготовлення матриць ЗП: тканини матриці з циліндричних плівкових елементів та багаторівневі друкарські плати на основі плоских плівок.

Однак, незважаючи на вказані переваги, плівкові ЗП не витіснили ЗП на кільцевих та розгалужених осердях, що пояснюється рядом причин: малою величиною корисного сигналу в плівкових ЗП, труднощами технологічного характеру в їхньому виробництві та ін.

**Кріотрони.** Кріотрон є двопозиційним елементом, який можна використовувати в запам'ятовувальних пристроях та для рішення логічних задач.

Робота кріотрона заснована на явищі надпровідності. Відома велика кількість матеріалів, для яких при температурах нижче критичних електричний опір стає рівним нулю. Значення критичної температури змінюється при впливі на зразок магнітного поля (рис. 2.3.7). Кріотрон є

елементом, який можна переводити з нормального стану з кінцевим значенням електричного опору в стан надпровідності з опором, який дорівнює нулю. Очевидно, можливий і зворотний перехід.

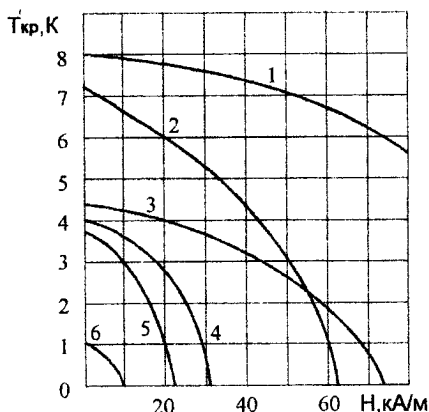


Рис. 2.3.7. Залежність критичної температури від напруженості магнітного поля для деяких металів

1 - ніобій, 2 - свинець, 3 - тантал, 4 - ртуть, 5 - олово, 6 - алюміній

Відомі кріотрони різного конструктивного виконання. Найпростіша конструкція складатиметься з танталового стержня довжиною біля 25 мм та діаметром біля 0,25 мм та намотаною на нього обмоткою з ніобієвого проводу. Схеми з такими кріотронами розміщують в кріостат, в якому за допомогою рідкого гелію підтримується температура 4,2 К, причому як тантал, так і ніобій знаходяться в надпровідному стані. Якщо після цього, пропускаючи по обмотці струм, створити магнітне поле напруженістю біля 3 кА/м, то танталовий стержень перейде з стану надпровідності в стан нормальної провідності, а ніобієва обмотка залишиться в стані надпровідності.

Найбільш перспективними вважаються конструкції кріотронів у вигляді тонкоплівкових структур. Плата (матриця) такого кріотрона

складається інколи з 20-30 металевих та діелектричних шарів з декількома тисячами окремих елементів на платі.

Для розуміння основних принципів побудови ЗП на кріотронах розглянемо схему, наведену на рис. 2.3.8, де С – означають осердя, а О – обмотки на осердях кріотронів.

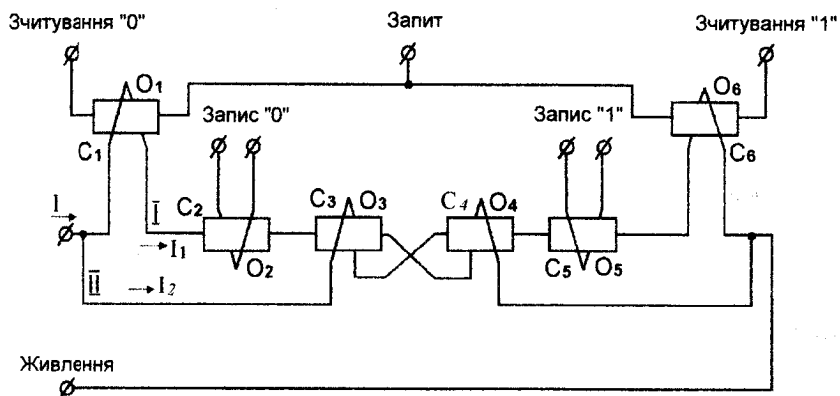


Рис. 2.3.8. Схема запам'ятовувального елемента на шести кріотронах

Робота схеми. При подачі живлення струм  $I$  розділяється на два:  $I_1$  та  $I_2$ . Струм  $I_1$  проходить по колу  $O_1, C_2, C_3, O_4$  (коло I), струм  $I_2$  – по колу  $O_3, C_4, C_5, O_6$  (коло II). У вихідному положенні вся система знаходиться в стані надпровідності. Для запису «0» подається імпульс струму в обмотку  $O_2$ , достатній для переведення стержня С з стану надпровідності в нормальний стан, з кінцевим значенням опору. Тоді опір кола I стрибком збільшується, струм  $I_1$  зменшується, а струм  $I_2$  відповідно збільшується. Це призводить до того, що стержні  $C_3$  та  $C_6$  переходять в нормальний стан, а стержень  $C_1$  залишається як і раніше в стані надпровідності, тому що в колі струм обмежується нормальним опором стержня  $C_3$ . Якщо в такому стані схеми послати імпульс в шину «Запит», то він пройде на вихід зчитування «0». Аналогічно, при подачі імпульсу запису «1» схема перейде в інший стійкий

стан, при якому опір стержня  $C_1$  буде мати кінцеве значення, а опір стержня  $C_2$  буде дорівнювати нулю.

Кріотрони вважаються одними з найбільш перспективних елементів для побудови ЗП дуже великого об'єму і досить високої швидкодії (з часом циклу порядку 3-10 мкс). В кріотронних ЗП один формувач може збуджувати приблизно в 10 000 раз більше запам'ятовувальних елементів, ніж в магнітних або напівпровідникових ЗП. До переваг кріотронних ЗП треба віднести також малу потужність, що споживається, низький рівень завад, підвищену надійність.

Однак внаслідок складності проблеми, пов'язаної зі створенням та підтриманням температур, близьких до абсолютного нуля, кріотронні ЗП знаходяться на стадії лабораторних розробок.

**Параметрони.** Робота параметрона заснована на параметричних коливаннях, які виникають в коливальному контурі з нелінійною реактивністю при вимушеній зміні параметра контура; в магнітному параметроні – індуктивності. Характерна особливість параметричних коливань полягає в усталеному стані фаз (0 або  $\pi$ ), що залежать від фази вхідного сигналу. На параметронах реалізують як запам'ятовувальні, так і логічні пристрої.

Фізично процес збудження параметричних коливань можна показати таким чином. Нехай в коливальному контурі з параметрами  $R$ ,  $L$ ,  $C$  в момент часу  $t_0$  протікає струм  $I$  (рис. 2.3.9). Якщо в цей момент збільшити індуктивність на  $\Delta L$ , то енергія електромагнітного поля, накопиченого в котушці, зросте на

$$\Delta W = (L_0 + \Delta L) \cdot I^2 / 2 - L_0 \cdot I^2 / 2 = \Delta L \cdot I^2 / 2.$$

Струм в контурі почне зменшуватися, а енергія магнітного поля котушки стане переходити в енергію електричного поля конденсатора. В

момент часу  $t_1$ , тобто через чверть періоду, повернемо індуктивності її колишнє значення  $L_0$ .

Тоді накопичена в контурі додаткова енергія  $\Delta W$  повинна викликати збільшення струму  $I$  в контурі; ще через чверть періоду, тобто в момент часу  $t_2$ , знову збільшимо індуктивність на  $\Delta L$ , а в момент часу  $t_3$  – повернемо їй початкове значення, струм ще зросте і т.д. Цей процес буде тривати до тих пір, поки втрати, що зростають в контурі не стануть рівними додатковій енергії, після чого амплітуда коливань стабілізується. Подібний ефект буде мати місце не тільки при стрибкоподібній зміні індуктивності, але й при її плавній (наприклад, синусоїдальній) зміні з частотою  $2f$ . Істотно важливим є те, що усталені коливання, які виникли в результаті

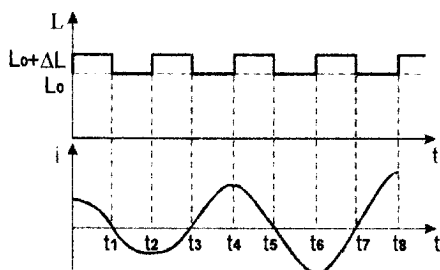


Рис. 2.3.9. Залежності, що пояснюють процес параметричного збудження контура шляхом зміни його індуктивності

параметричного збудження, можуть мати дві можливі фази, що відрізняються між собою на  $\pi$  рад. Фазу коливань можна визначати по відношенню до деяких опорних параметронів, які постійно зберігають значення «0» або «1».

Конструктивно магнітні параметрони можуть бути виконані на кільцевих осердях, на осердях з магнітопроводом складної форми, а також в тонкоплівковому виконанні.

### 2.3.3. Магнітні інтегральні схеми на циліндричних магнітних доменах

*Умови існування і статистичні властивості циліндричних магнітних доменів.* В пластинках, які вирізані перпендикулярно до осі легкого намагнічування (ВЛН) монокристалів ортофериту, ферит-гранату, магнетоплюмбіту і інших матеріалів, що мають сильну одновісну магнітну анізотропію, або вирощені епітаксіальним способом монокристалічними плівками з цих матеріалів товщиною від одиниць до сотень мікрометрів, енергетично вигідною є перпендикулярна до поверхні пластинки або плівки спрямованість вектору  $\pm I_s$  спонтанної намагніченості до насичення. Іншими словами, єдина ВЛН збігається з нормаллю до шару, а всі перпендикулярні до неї напрямки в площині шару будуть осями важкого намагнічування (ВВН), які утворюють площину важкого намагнічування. Якщо зовнішнього поля нема ( $H=0$ ), в шарі утворюються смугові (лабіринти, стрічкові) антипаралельні домени (див. рис. 2.3.10), зорієнтовані за двома протилежними напрямками легкого намагнічення. Їх сумарні об'єми при  $H=0$  рівні і зразок розмагнічений. Смугові домени можливо спостерігати візуально, використовуючи ефекти Фарадея або Керра.

Якщо на шар з смуговими доменами діяти магнітним полем, яке називається зовнішнім полем зсуву і спрямованим, наприклад, "від нас" перпендикулярно до поверхні шару, то із збільшенням його напруженості  $H$  об'єм доменів  $\otimes$ , орієнтованих за напрямком дії  $H$ , буде збільшуватись за рахунок несприятливо розташованих з антипаралельним полем напрямком намагніченості доменів  $\odot$ , які будуть звужуватись і скорочуватись. Після цього найменший смуговий фільтр перетворюється у циліндричний магнітний домен (ЦМД).

Доки напруженість поля зсуву не досягла визначеного значення, будуть існувати смугові і циліндричні домени. З подальшим збільшенням  $H$  діаметри ЦМД зменшаться до колапсу, тобто миттєвого зникнення, а смугові домени, які залишилися, продовжать зменшуватись до перетворення в ЦМД. Коли напруженість поля зсуву досягне деякого першого критичного значення  $H \cdot H_{min} \approx 0,3J_s$  смугові домени, які залишилися, перетворюються в практично ізольовані стійкі ЦМД. (Про ізольовані стійкі ЦМД говорять, коли вони практично не взаємодіють, що зазвичай спостерігається при відстанях між ними порядку  $8r$ , де  $r$  - радіус ЦМД.)

На рис. 2.3.10 схематично зображені можливі доменні структури ЦМД-матеріалу при трьох значеннях напруженості зовнішнього магнітного поля зсуву ( $H_1 < H_2 < H_3$ ). Однак ЦМД стійкі в обмеженому інтервалі значень напруженості поля зсуву  $H \cdot H_{max}$  ЦМД миттєво зникають, колапсують і шар стає однодоменим з намагніченістю в напрямку поля зсуву.

Повну енергію ізольованого ЦМД, якщо прийняти, що його стінка має малу товщину, якою можна знехтувати, і форму прямого циліндра, можна представити в вигляді алгебраїчної суми

$$W_0 = 2\pi rh\sigma + 2\pi r^2 h \mu_0 H J_s - W_{мст} \quad (2.3.1)$$

де  $2\pi rh\sigma = W_p$  - енергія границі;  $r$  - радіус ЦМД;  $h$  - товщина пластини;  $\sigma$  - поверхнева енергія стінки Блоха ЦМД;  $2\pi r^2 h \mu_0 H J_s = W_m$  - магнітна енергія, яка пов'язана з зовнішнім полем зсуву;  $J_s$  - намагніченість насичення матеріалу;  $\mu_0$  - абсолютна магнітна проникливість вакууму;  $W_{мст} = 0,5\mu_0 J_s N J_s^2$  - магнітостатична енергія;  $N$  - коефіцієнт пропорційності, який називають розмагнічувальним фактором.

Областю стійкості ЦМД, називають діапазон напруженостей зсуву  $H_{min} \dots H_{max}$ , що складають приблизно  $0,1J_s$ : при  $H < H_{min}$  спостерігаються тільки смугові домени або їх співіснування з ЦМД, а при  $H > H_{max}$  настане



колапс. В межах області стійкості радіуси ЦМД приймають значення  $r_{max} \dots r_{min}$ , причому  $r_{max}/r_{min} \approx 3$ .

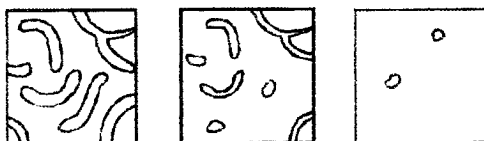


Рис. 2.3.10. Доменні структури ЦМД

Описані вище статичні властивості ЦМД, що існують в монокристалічному шарі нескінченно малих лінійних розмірів і товщиною  $h$ , розташованому в однорідному магнітному полі зсуву, а також властивості матеріалів, які використовуються при утворенні ЦМД, оцінюються параметрами:  $B_s, J_s, r_{min}, h, \sigma, l$  і ін. Характеристична довжина

$$l = \sigma (\mu_0 J_s^2); \quad (2.3.2)$$

залежить від властивостей матеріалу і використовується для їх оцінки оптимізації характеристик пристроїв на ЦМД. Мінімальний діаметр ЦМД  $d_{min} = 3,9l$  можливо отримати при  $H = H_{max}$  в шарі товщиною  $h = 3,3l$ , а максимальний  $d_{max} \approx 3d_{min} = 11,7l$  – в ньому ж при  $H = H_{min}$  причому  $H_{max}/H_{min} = 1,63$ .

Із збільшенням товщини шару  $h$  для отримання стійких ЦМД потрібні великі поля. Необхідно оцінювати і спроможність доменів відновлюватись після флуктуації розмірів та форм. З врахуванням ряду факторів в технічних пристроях рекомендують вибирати  $h = 4l$  і поле зсуву  $H = 0,3J_s$ , яке відповідає середині області стійкості. При цьому  $H_{max}/H_{min} = 1,4$  і  $d = 8l$ .

Кожному феромагнетику властива своя константа  $K_a$ , магнітної анізотропії, яка залежить від температури, має в СІ розмірність джоуль на кубічний метр ( $\text{Дж}/\text{м}^3$ ) або джоуль на кілограм ( $\text{Дж}/\text{кг}$ ) і характеризує силу

внутрішньокристалічної орієнтації. Можна сказати, що  $K_a$ , пропорційна питомій енергії, яка необхідна для повороту вектора  $J_s$ , з напрямку ВЛН в напрямок ВВН. Сили внутрішньокристалічної орієнтації характеризує і напруженість поля анізотропії

$$H_r = 2K_a/(\mu_0 J_s), \quad (2.3.3)$$

рівної тій мінімальній напруженості зовнішнього поля, яка при дії по ВВН однодоменного зразка викликає намагніченість насичення  $J_s$ . Із збільшенням поля анізотропії  $H_r$  в магнітоодновісному монокристалічному шарі зменшується відхилення напрямку намагніченості ЦМД від нормалі до площини шару, відмінність форми ЦМД від циліндричної і можливість спонтанного зародження ЦМД під дією поля, яке розмагнічує.

Фактор якості:

$$q = H_r J_s = 2K_a/(\mu_0 J_s^2) \quad (2.3.4)$$

в достатній мірі забезпечує необхідні властивості, які будуть потрібні, якщо він дорівнює 3–5 і більше. Однак збільшення  $q$  погіршує динамічні властивості ЦМД, знижуючи рухливість доменних стінок.

Динамічні властивості та способи управління рухом циліндричних магнітних доменів. Силу, яка виникає в магнітному полі, можна визначити як похідну від його енергії за координатою, яку намагається змінити ця сила:  $QT = dW/dx$ . Продиференціювавши вираз (2.3.1) з радіус-вектором  $r$  в площині шару, знайдемо силу, яка виникає при наявності однорідного градієнта напруженості поля зсуву  $H$  і діє на стінку домена. Під дією цієї сили ЦМД пересувається в площині шару в напрямку від'ємного градієнта  $dH/dr$  тобто в область більш слабких полів зсуву.

Приймаючи ряд спрощень, можна показати, що при постійності форми і діаметру ЦМД його швидкість пересування

$$v = 0,5G (\Delta H - 8H_c/\pi), \quad (2.3.5)$$

де  $G$  – рухливість доменної стінки, тобто швидкість пересування вільної доменної стінки при напруженості діючого поля, яка дорівнює одиниці;  $\Delta H$  – перепад поля зсуву на довжину, яка дорівнює діаметру  $d$  ЦМД;  $H_c$  – коерцитивна сила для стінок ЦМД (порогова напруженість руху стінки ЦМД).

При  $\Delta H \leq 8 H_c r$  швидкість пересування  $v = 0$ . Збільшувати її за допомогою збільшення  $\Delta H$  можна лише до деякої критичної швидкості  $v_{kr}$  при досягненні якої відбуваються складні динамічні зміни структури стінки і, як наслідок, фізичних властивостей ЦМД. Значить,  $v_{kr}$  обмежує максимальну швидкодію ЦМД-пристроїв.

Рухливість доменних границь  $G$  залежить від матеріалу шару, що характеризує його динамічні властивості. Вона обернено пропорційна фактору якості  $q$  (2.3.3). Значить, як наслідок, з виразу (2.3.5), застосування матеріалів з високими  $q$  і  $H_c$  приводить до зниження швидкодії пристроїв на ЦМД.

Одночасно з зсувом в зону меншої напруженості поля зсуву збільшується діаметр ЦМД (рис. 2.3.11). Границя пересування ЦМД  $x_{max}$  обмежена областю його стійкості  $H_{max} \dots H_{min}$  (див. вище). Із збільшенням градієнта  $\Delta H$  максимально можливе пересування  $x_{max}$  ЦМД зменшується (див. штрихову лінію на рис. 2.3.11, в у відповідності з якими градієнт  $\Delta H$  більший  $\Delta H'$ , а  $x'_{max} < x_{max}$ . Оскільки пересування ЦМД можливе лише при виконанні нерівності  $\Delta H \geq 8 H_c \pi$ , то більша  $H_c$  може викликати зменшення  $x_{max}$  внаслідок порушення цієї нерівності у визначеній точці при русі домену.

З виразу

$$\Delta H = (H_{max} - H_{min}) d x_{max} \quad (2.3.6)$$

випливає, що необхідно зменшити  $x_{max}$ , щоб збільшити  $\Delta H$  при  $d = const$ . Зв'язок між  $x_{max}$  і  $H_c$  менш помітний, але його можливо встановити таким чином. Для  $v \rightarrow 0$  і при  $d = d_{min}$  з формул (2.3.5) і (2.3.6) отримаємо

$$x_{max} = 0,039 J_s d_{min} H_c \quad (2.3.7)$$

бо  $H_{max} - H_{min} \approx 0,1 J_s$  (див. вище).

Наприклад, для пластини тулієвого ортофериту оптимальної товщини 58 мкм при десятикратному зменшенні  $H_c$  в десять разів збільшується  $x_{max}$ . Такого зменшення  $H_c$  можливо досягти випалюванням ортоферитових пластин в кисні при 1500°C після їх механічного полірування.

Дослідження показали наявність у рухомій ЦМД визначеної ефективної маси, яка обумовлює його інерційні властивості, що проявляються, наприклад, в тому, що потрібен скінченний час для зупинки або зміни напрямку руху ЦМД.

Для того щоб побудувати логічні і запам'ятовувальні пристрої на ЦМД, необхідно забезпечити можливість не тільки спрямованого пересування доменів, але й здійснення його з найбільш високою точністю і чіткою фіксацією положення ЦМД. Без використання схем фіксації градієнтний метод не дозволяє в повній мірі реалізовувати ці вимоги. Хоча спрямоване дискретне пересування ЦМД з чіткою фіксацією їх координат можна здійснити за допомогою різних технічних прийомів, всі вони базуються на створенні в площині пересування локальних областей з пониженою напруженістю зсуву внаслідок зустрічно направлених магнітних полів. Такі області мають назву магнітостатичних пасток (МСП), оскільки взаємодія стінок ЦМД і локалізованих градієнтних магнітних полів, що створюють пастки, має магнітостатичний характер. В результаті того що ЦМД опиняється в МСП знижується складова енергії домена, яка пов'язана із зовнішнім полем зсуву, і відповідно повна енергія ЦМД відповідає формулі (2.3.1). Як наслідок, МСП є локалізованими зонами

мінімуму повної енергії ЦМД, в яких сила, яка діє на стінку домена, дорівнює нулю.

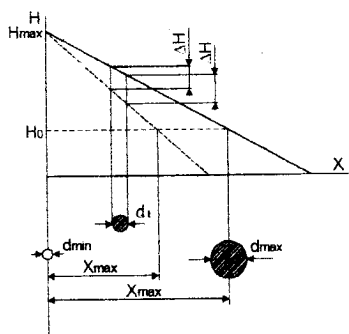


Рис. 2.3.11. Залежність діаметра ЦМД від напруженості

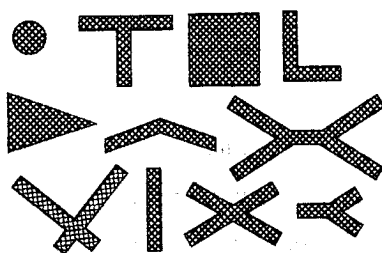


Рис. 2.3.12. Феромагнітні аплікації різних конфігурацій

В сучасних пристроях на ЦМД для створення зустрічних полів в МСП використовують розташовані на поверхні шару струмові контури, а також магнітні полюси, які виникають в розімкнутих осердях, розташованих біля поверхні шару, при їх намагнічуванні зовнішнім полем або полями розсіювання ЦМД. При цьому під “розімкнутими осердями” мають на увазі феромагнітні аплікації різних конфігурацій (рис. 2.3.12), які виготовлені методами осадження тонких магнітних (найчастіше пермалоевих) плівок на плоскій діелектричній основі через маску або з наступною фотоліграфічною обробкою.

Між аплікаціями і ЦМД-матеріалом наповнення діелектрика ( $\text{SiO}_2$ ) утворюють визначений зазор, необхідний для нормальної роботи пристрою. Для підвищення смності ЗП на ЦМД важливі оптимальні форми та розміри феромагнітних аплікацій.

У відповідності з трьома типами МСП розрізняють три основних способи управління рухом ЦМД: за допомогою струмових контурів (струмових аплікацій); за допомогою зовнішнього магнітного поля в

площині руху ЦМД; за допомогою модульованного поля зсуву. Зупинимось на першому способі.

Для управління за допомогою струмових контурів використовують плоскі двопровідні просувні обмотки-шини.

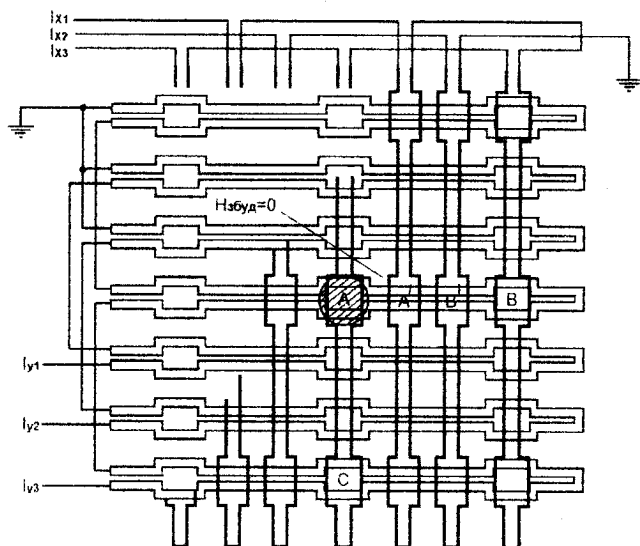


Рис. 2.3.13. Схема управління ЦМД

Вони накладаються безпосередньо на поверхню ЦМД-шару чи на окрему скляну або пластмасову підкладинку методами тонкоплівочної технології.

Так, схема, зображена на рис. 2.3.13, дозволяє пересувати ЦМД в будь-яку з тридцяти трьох точок  $A$ ,  $A'$ ,  $B$ ,  $C$ , ... подаванням визначеної послідовності імпульсів струму  $I_{x1}$ ,  $I_{x2}$ ,  $I_{x3}$ ,  $I_{y1}$ ,  $I_{y2}$ ,  $I_{y3}$ . Якщо ЦМД знаходиться в точці  $A$ , і подати такий імпульс струму збудження  $I_{x1}$ , щоб поле, яке ним створюється  $H_{збуд} \neq 0$ , охоплювало край домена (див. штрихову лінію  $H_{збуд} = 0$ ), то ЦМД перейде в точку  $A'$  тому що, як зазначалося вище, тут виникає МСП. Послідовне подавання імпульсів струму  $I_{x1}$ ,  $I_{x2}$  і  $I_{x3}$ , призводить до пересування ЦМД в точку  $B$ , а імпульсів  $I_{y1}$ ,  $I_{y2}$ ,  $I_{y3}$ , в точку

С. Час пересування  $\tau$  ЦМД в сусідню точку обернено пропорційний напруженості  $H_{збд}$ , яка створюється струмом збудження.

Тонкоплівочні провідникові аплікації забезпечують просування ЦМД з діаметрами 20-200 мкм, характерними для ортоферитів. В бар'євих феритах, ферит-гранатах і інших матеріалах виникають ЦМД з діаметрами декількох мікрметрів. В цьому випадку практично неможливо виготовити провідникові аплікації, розміри яких забезпечували б пересування ЦМД на малі відстані, які відповідають їх діаметрам, з достатньою швидкістю, для чого вони повинні, не випаровуючись від надмірного перегрівання витримувати значні струми збудження. Ці труднощі разом з низькою технологічністю струмових аплікацій (внаслідок необхідності виконувати багаточисельні струмопідводи до схеми) і порівняно високою споживаною ними потужністю примушують в діапазоні діаметрів ЦМД від часток мікрметра до декількох мікрметрів використовувати інші два способи управління рухом ЦМД.

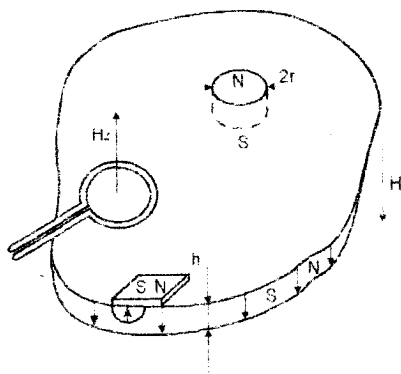


Рис. 2.3.14. Генератор спітаксіальної гранатової плівки

Способи генерування і аннігіляції циліндричних магнітних доменів і зчитування наданої інформації. Розрізняють ЦМД-генератори двох типів: з

безпосереднім зародженням доменів і наступним їх введенням в просувний канал; з використанням первинного домену для утворення нових ЦМД.

Для утворення генераторів першого типу застосовують ЦМД-матеріали з низьким значенням фактору якості  $q = H_r / J_s$  де  $H_r$  – поле анізотропії [див. вираз (2.3.3)];  $J_s$  – намагніченість насичення. При невеликих  $q$  полегшується зародження домена. Тому в генераторах даного типу використовують не ортоферити з  $H_r \approx 10^7$  А/м, а, наприклад, епітаксialьні гранатові плівки з  $H_r$  порядку  $10^5$  А/м. Зародження ЦМД виникає внаслідок перемагнічення кристала в локальній області поля, яке утворюється або струмовим контуром, або за допомогою пермалоевих аплікацій, чи комбінацією обох способів.

В одному із запропонованих генераторів епітаксialьна гранатова плівка мала товщину 6 мкм при  $H_r = 112$  кА/м,  $J_s = 16$  кА/м і  $q = 7$ , а в струмову петлю радіусом 6 мкм, розташовану безпосередньо на поверхні плівки (рис. 2.3.14), подавався імпульс струму 320 мА протягом 5 нс. При цьому утворювалась достатня для зародження ЦМД вертикальна складова напруженості  $H_z$ , яка спрямована проти поля зсуву  $H$ , після чого струм в петлі зменшувався до 80 мА і діяв протягом 100 нс, щоб створити умови для розширення домена до стійкого стану.

Замість струмового контура можна використовувати пермалоеву аплікацію, яка намагнічується полем управління в площині плівки (для намагнічування плівки, як показано на рис. 2.3.14, поле управління повинне діяти зліва направо). Поле управління вибирають з умови такої намагніченості аплікації, щоб під межею  $s$  утворювалась достатня для зародження ЦМД напруженість  $H_z$ . Так, пермалоева плівка шириною 12 мкм і товщиною 0,4 мкм при насиченні утворює поле напруженістю 300 кА/м (при віддаленні торця аплікації воно різко зменшується, наприклад, до 10 кА/м при відстані 12 мкм).



Досить ефективним при утворенні ЦМД-генераторів є об'єднання струмових і пермалоєвих аплікацій.

Локальне нагрівання, яке викликане, наприклад, променем лазера, полегшує генерування ЦМД, а при нагріванні вище точки Кюрі відпадає необхідність в зовнішньому локальному магнітному полі: ЦМД формується під дією магнітних полів сусідніх ділянок, які замикаються через зону нагріву. Нагрівання променем лазера може викликати і термомагнітострикційне формування домена за такою схемою: промінь лазера – локальні градієнти температури – локальні механічні напруги – магнітострикція – перемикання вектора намагніченості.

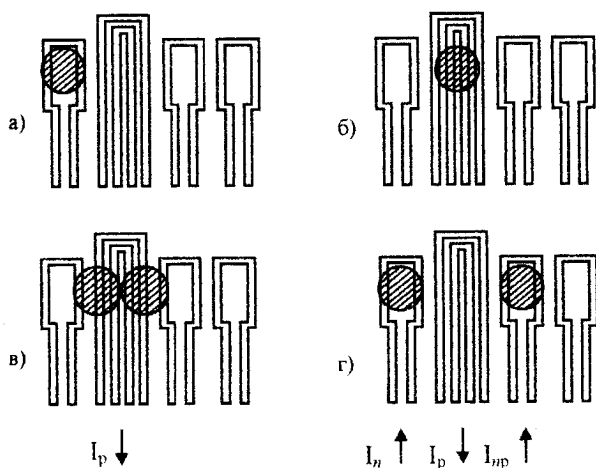


Рис. 2.3.15. ЦМД-генератор з використанням первинного домена

В генераторах, що розглядаються, та інших ЦМД-генераторах цього типу локальну область зародження домена суміщують з аплікаціями, які пересуваються.

Прикладом ЦМД-генератора з використанням первинного домена для утворення нових ЦМД може бути так звана провідникова схема (рис. 2.3.15).

Первинний домен, що виникає на стадії технологічного процесу виготовлення генератора і знаходиться в початковому стані в лівому контурі (рис. 2.3.15, *а*), пересувається в контур поділу (рис. 2.3.15, *б*) під дією струму  $I_\phi$ , що утворює МСП і, як наслідок, фіксує домен. Потім у внутрішню петлю подається струм реплікації (поділу)  $I_p$ , а струм  $I_\phi$  зупиняється. Напрямок  $I_p$  такий, що магнітне поле в межах внутрішньої петлі діє згідно з полем зміщення, а зовні петлі – назустріч. Тому вузька частина домена по обидві сторони від його вертикального діаметра під дією поля, що різко збільшується, намагається звузитись, а інші частини, які з'явилися в ослабленому полі, – розширитись, що призводить до поділу, реплікації ЦМД на дві частини (рис. 2.3.15, *в*). Якщо тепер подати в лівий контур струм повернення  $I_n$ , а в правий – струм просування  $I_{np}$ , то завдяки утворенню ними МСП і магнітостатичному відштовхуванню первинний домен повернеться в первинний стан, а вторинний надійде в канал просування (рис. 2.3.15, *г*). В одному з генераторів для ортофериту струм поділу  $I_p$  складає 500 мА.

Щоб знищити (аннігілювати, колапсувати) ЦМД, можна використати провідникові аплікації, подаючи в них імпульси струму достатніх амплітуд і тривалості, протилежні за полярністю пересувальним імпульсам. З цією ж метою застосовують аннігілятори ЦМД на феромагнітних аплікаціях. В ЦМД-схемах з постійним числом доменів генератори та аннігілятори не потрібні.

Для зчитування інформації, запропонованої ЦМД, успішно використовують індукційний, гальваноманітні і магнітооптичні методи. Одним з найбільш ефективних гальваноманітних методів є магніторезистивний, або магніторезисторний, який полягає в тому, що якщо по чутливому феромагнітному елементу (наприклад, пермалоевій

плівці) пропустити струм вздовж ВЛН, то при намагнічуванні по ВВН питомий електричний опір елемента зміниться на

$$\Delta\rho = \rho_o \mu_n^2 J_s^2 \sin^2 \theta, \quad (2.3.8)$$

де  $\rho_o$  – питомий електричний опір при  $\theta = 0$ ;  $\mu_n$  – рухливість електронів;  $J_s$  – намагніченість насичення;  $\theta$  – кут між напрямком струму і вектором  $J_s$ . Цій зміні питомого електричного опору феромагнітного елемента довжиною  $a$ , шириною  $b$  і товщиною (висотою)  $c$  відповідає приріст падіння напруги на ньому

$$\Delta U = I \Delta R = I \Delta \rho l s = [I \rho_o \mu_n^2 J_s^2 a (bc)] \sin^2 \theta, \quad (2.3.9)$$

де  $\Delta R$  – приріст опору давача;  $I$  – струм, що протікає скрізь нього.

Найпростіший магніторезистивний давач зображений на рис. 2.3.16. Смужка пермалоевої плівки 2 має два струмопідвода 3. Коли в зоні давача розташовується ЦМД 1, радіальна складова його поля розсіювання діє на феромагнітний елемент в напрямку його ВВН.

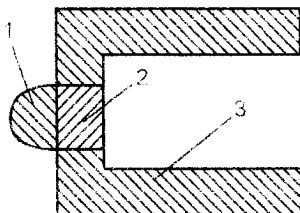


Рис. 2.3.16. Найпростіший магніторезистивний давач

Побудова логічних та запам'ятовувальних пристроїв на циліндричних магнітних доменах. Для побудови запам'ятовувальних та логічних ЦМД-пристроїв, зазвичай, використовують типові функціональні і логічні елементи з'єднанням яких і вирішують поставлену задачу. Робота цих елементів заснована на описаних вище властивостях ЦМД, способах їх генерування, пересування, зчитування та аннігіляції. Наведемо декілька прикладів функціональних і логічних елементів.

На рис. 2.3.17, *а* зображений елемент затримки на ціле число циклів поля управління  $H_y$ , тобто ціле число його обертів на  $360^\circ$ . При обертанні вектора  $H_y$  проти годинникової стрілки домен буде пересуватися по замкненій траєкторії  $1 - 2 - 3 - 4 - 1 - 2 - 3 - 4 \dots$ , доки яка-небудь керівна дія не зупинить рух по цьому шляху.

Такий елемент затримки використовували при побудові більш складного елемента – тригера з рахунковим входом (рис. 2.3.17, *б*). Нехай в межах тригера доменів нема. ЦМД, що надходить на вхід ( $x = 1$ ), який обертається за годинниковою стрілкою, полем управління пересувається по шляху  $1 - 2 - 3 - 4$  в елемент затримки, де і циркулює за траєкторією  $6 - 7' - 4 - 5$  (шлях  $2 - 3$  коротший за  $2 - 11$ , а  $6 - 7'$  коротший за  $6 - 7$ ) до появи нового ЦМД на вході. Такому стану пристрою відповідає нульовий вихід  $y = 0$ .

При поданні нового ЦМД на вхід тригера використовується явище взаємного відштовхування двох ЦМД, тобто однакових магнітних диполів. З позицій 2 та 6 ЦМД мали б пересунутися відповідно в 3 та 7', однак внаслідок взаємного відштовхування один домен буде рухатись по шляху  $6 - 7 - 8 - 9 - 10$ , внаслідок чого виникає одиничний вихід  $y = 1$ , а другий по шляху  $1 - 2 - 11 - 13 - 14 - 15$ . При цьому тригер звільняється від доменів. Поява в наступному циклі поля нового ЦМД викликає  $y = 0$ , а після подачі ще одного домена вихід приймає значення  $y = 1$  і т.д. Значить, пристрій, що дійсно виконує функцію тригера з рахунковим входом. Виходи  $y$  і  $z$  однакові ( $y = z$ ), і один з них може стати зайвим. В такому випадку його об'єднують з аннігілятором.

В якості наступного прикладу розглянемо двовходовий логічний елемент, виконаний на Y-подібній феромагнітній аплікації і який дозволяє реалізувати дві логічні функції: двомісна кон'юнкція (двомісна функція І) на виході *Вих. 1* і двомісна функція заборони на виході *Вих. 2*. Схема цього

елемента і таблиці співпадання функцій наведені на рис. 2.3.17, в. При відсутності доменів на обох входах  $Vx.1$  і  $Vx.2$ . ЦМД не може з'явитися на  $Vix.1$  або  $Vix.2$ , що відповідає першому рядку таблиці. Якщо домен є тільки на  $Vx.1$ , то під дією поля управління  $H_y$  він зсунеться на  $Vix.2$  (поряд з другим рядком таблиці). Поле  $H_y$  не може змінити положення домену на  $Vx.2$ , який утримується петлею струму (див. третій рядок таблиці). Наприкінці, при наявності ЦМД на обох входах завдяки взаємодії “домен – домен” ЦМД з  $Vx.1$  потрапляє на  $Vix.1$  (четвертий рядок таблиці).

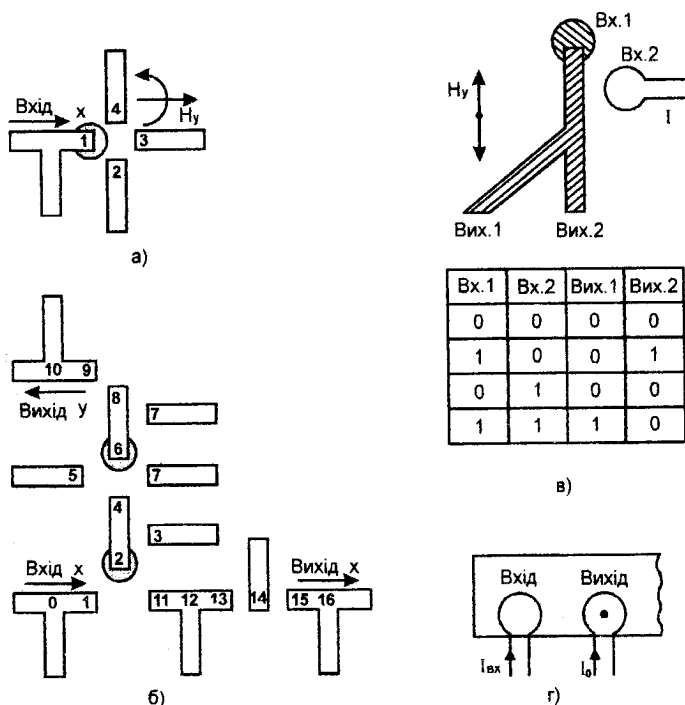


Рис 2.3.17. Елемент затримки для тригера з рахунковим входом

Роботу інвертора (логічного елемента НЕ) пояснює рис. 2.3.17, г. Постійний струм  $I_o$  утворює МСП, протікаючи по петлі  $Вихід$ , в якій знаходиться пристрій зчитування. Біля першого розташована друга

аплікація струму, в яку потрапляє такий вхідний струм  $I_{ax}$ , щоб ЦМД з петлі *Вихід* пересунувся на *Вхід*. Тоді при  $I_{ax} = 0$  ЦМД знаходиться на виході, де виникає одиниця. При поданні вхідного струму ЦМД пересувається до вхідної петлі і на виході інвертора з'явиться нуль.

Ці та інші багаточисельні елементи дозволяють створювати різні логічні і запам'ятовувальні ЦМД-пристрої, які відзначаються високою щільністю розміщення інформації (до  $10^7$ - $10^8$  *біт/см<sup>2</sup>*), яка відкриває можливості мікромініатюризації, недосяжні для напівпровідникової мікроелектроніки; малим енергоспоживанням (до 0,5 - 2 *мкВт/біт*, що в 50-200 разів менше, ніж для напівпровідникових ЗП), практично виконуючи функції тепловідводу; великою швидкістю переробки інформації (до  $10^7$  *біт/с*); високою надійністю, яка забезпечується відсутністю необхідності перетворення і підсилення сигналів, що передаються від одних елементів до інших; низькою вартістю використовуваних матеріалів; застосуванням методів інтегральної технології; автоматизацією виробництва і контролю; функціональною гнучкістю, оскільки операції логіки і запам'ятовування можна виконувати в одному магнітному середовищі та ін. Конструктивно, технологічно і функціонально закінченим складальним компонентом для доменних інтегральних мікросхем є *chip* (від англ. *chip* – кристал), який являє собою прямокутну пластину з одновісного магнітного матеріалу (наприклад, ортофериту або ферит-гранату) на немагнітній основі. Все це дає підстави розглядати ЗП на ЦМД в якості вірогідної елементної бази ЕОМ.

#### 2.3.4. Елементи пристроїв пам'яті на ЦМД

Завдяки високій стійкості розміру, форми і положення в пластині при відсутності полів управління (вважаючи незмінною напруженість зсуву, яка утворюється постійними магнітами), а також можливості

тривалого збереження інформації без споживання енергії, пристрої на ЦМД можна використовувати для створення пристроїв пам'яті (ПП).

Перевагами доменних ПП є:

- 1) *висока щільність розміщення інформації*, що дозволяє в об'ємі біля  $5 \text{ см}^3$  зберігати приблизно 100 млн. біт;
- 2) *мала потужність споживання*, що складає біля 1-2 мкВт/біт, що значно менша в порівнянні з напівпровідниковими ПП, для яких вона складає 50-100 мкВт/біт, так що проблема тепловідводу в доменних ПП практично не виникає;
- 3) *низька вартість* використовуваних матеріалів і відносна *простота технологічних операцій*, що дозволяють здійснити автоматизацію процесів виготовлення і контролю ПП на ЦМД.

Ці переваги визначають у якості основної області застосування ПП на ЦМД зовнішні пристрої пам'яті з обсягами пам'яті порядку  $10^6$ - $10^9$  біт і часом обертання 5-500 мкс. Причому, подібно пристроям пам'яті із змінними пакетами магнітних дисків, доменні пристрої зі змінними модулями придатні для формування різного роду архівів (банків інформації). Основні параметри доменних ПП, в порівнянні з аналогічними параметрами накопичувачів ПП з рухливим магнітним носієм, показують перспективність ПП на ЦМД. Вони приведені в табл.2.3.1. Перспективним вважається застосування доменної пам'яті в якості буферної між оперативною, з одного боку, і зовнішньою пам'яттю, а також периферійними пристроями - з іншого, зокрема пристроями вводу цифрових і аналогових сигналів в ЕОМ.

Основою пристроїв пам'яті на ЦМД є пластина - чін (від англ. *chip* - кришталік) - одноосьового магнітного матеріалу (ортофериту або ферит-гранату).

Особливості доменних пристроїв пам'яті визначаються малими розмірами чіпа, що складають частки квадратного сантиметра, тому в ПП

доводиться використовувати декілька чіпів. Звідси виникають завдання розподілу інформації як між чіпами, так і всередині них, з однієї сторони, й обмеження зовнішніх підводів до чіпа – з іншої (практично до чіпа вдасться підвести не більше 30 виводів).

Існують три види розподілу інформації всередині чіпа (його організації). Розглянемо їх.

### **Автономне розміщення накопичувальних регістрів у кристалі**

Цей вид характеризується тим, що кожний накопичувальний регістр у чіпі забезпечений своїм набором елементів (давач зчитування, генератор і анігілятор доменів). Між собою в рамках чіпа регістри не пов'язані (автономні). Якщо в чіпі знаходиться тільки один регістр, то така організація чіпа забезпечує найменшу кількість виводів і високу технологічність.

Таблиця 2.3.1

### **Основні параметри доменних пристроїв пам'яті**

Параметри	Типи ГПІ		
	доменні	на змінних магнітних пакетах	на магнітних стрічках
Інформаційна ємність накопичувача, <i>біт</i>	$10^6 - 10^8$	$10^7 - 10^9$	$10^7 - 10^9$
Середній час пошуку, <i>с</i>	$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$	1 – 100
Швидкість передачі інформації, <i>Мбіт/с</i>	5 – 50	1 – 5	0,1 – 1
Щільність запису інформації, <i>біт/см<sup>2</sup></i>	$10^5 - 10^6$	$10^4 - 10^5$	$10^3 - 10^4$
Вартість зберігання інформації, <i>цент/біт</i>	0,005 – 0,05	0,01 – 0,05	0,02 – 0,002
Енергоспоживання, <i>Вт</i>	10 – 50	$10^3 - 2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2 - 10^3$
Маса накопичувача, <i>кг</i>	0,5 – 5,0	150 – 250	100 – 150
Діапазон робочих температур, <i>°C</i>	-50 ÷ +60	16 – 32	16 – 32



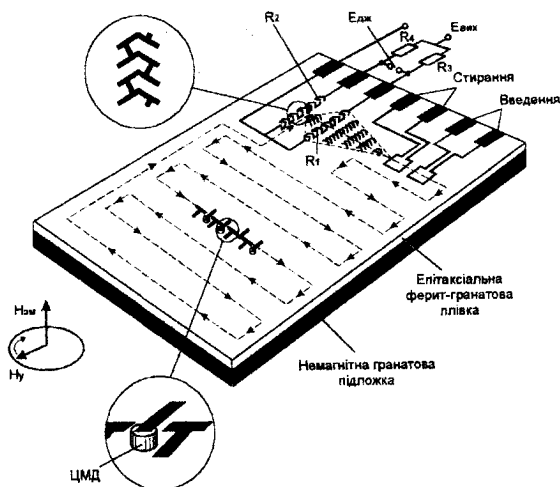


Рис. 2.3.18. ППІ “Домен-3” з одним автономним накопичувальним регістром

Саме так організований чіп доменного накопичувача марки “Домен-3”, спроектованого в Інституті електронних управляючих машин. Чіп являє собою епітаксціальну ферит-гранатову плівку, вирощену на немагнітній основі з гадоліній-галієвого гранату розміром  $3 \times 3$  мм і з діаметром ЦМД, який дорівнює 5 мкм (рис. 2.3.18). Безупинне просування інформації, представленої наявністю (1) або відсутністю (0) ЦМД, вздовж єдиного регістра забезпечується полем керування, яке обертається з тактовою частотою від 0,1 до 0,3 МГц, що забезпечує швидкість передачі даних від 0,1 до 0,3 Мбіт/с. Ємність чіпа складає 4096 біт. Просування доменів забезпечується за допомогою пермалоевих аплікацій Т-структури, а введення інформації та її знищення – за допомогою контурів зі струмом. Зчитування інформації проводиться магніторезисторним давачем із попереднім «розтягуванням» ЦМД у смуговий домен за допомогою шевронних пермалоевих аплікацій. На чіпі розташовано два однакових магніторезисторних давача: основний  $R_1$  і компенсаційний  $R_2$ , що разом із зовнішніми резисторами  $R_3$  і  $R_4$  утворюють мостову схему.

При зчитуванні *нуля* (домен під давачем  $R_1$  відсутній) міст урівноважений і сигнал на його виході дорівнює нулю; при цьому зміни опору давача  $R_1$ , що виникають під дією обертового поля керування, компенсуються такими ж змінами опору давача  $R_2$ .

При зчитуванні *одиниці* домен під давачем  $R_1$  вносить додаткові зміни в його опір у порівнянні зі змінами  $R_1$  і  $R_2$ , що відбуваються під дією поля керування, міст виходить із рівноваги і на його виході з'являється напруга, що свідчить про зчитування *одиниці* в даний момент часу.

Доменний ПП з автономними регістрами по своїй організації подібний до ПП на магнітних дисках, кожній доріжці якого зі своєю головкою запису-зчитування відповідає автономний регістр у доменному ПП. У такому ПП зчитування щойно записаної інформації стає можливим лише після того, як домени після генерації «оббіжать» під дією обертового поля керування весь регістр і перед тим, як вони виявляться під давачем зчитування, подібно обертанню магнітного диска. Тому ПП з таким видом організації зручні при побудові пам'яті невеликого обсягу, якою є буферна пам'ять; при великих же обсягах час пошуку потрібної інформації в регістрі може виявитися неприпустимо великим.

**Об'єднання накопичувальних регістрів за допомогою дешифраторів на ЦМД.** Це інший вид організації доменних ПП, що дозволяє зменшити час пошуку інформації при одночасному скороченні числа виводів із чіпа.

Так, ПП на ЦМД ємністю  $10^8$  біт організовано в такий спосіб. На чіпі з ферит-гранатової плівки розташовано  $2^n = 2^7 = 128$  замкнутих накопичувальних регістрів ємністю 800 біт кожний, для звертання до яких на цьому ж чіпі розташований дешифратор із  $2n=2 \cdot 7=14$  струмовими шинами. На кожному чіпі є вивід для шини запису, вивід для шини знищення і три виводи для мостового давача зчитування. Із загальною

шиною корпусу перераховані виводи складають 20 виводів на чіп, що має ємність  $128 \cdot 800 = 102400$  біт (приблизно  $10^5$  біт).

На рис. 2.3.19 показана типова конструктивна схема модуля ПП на ЦМД.

Для створення обертового поля керування  $H_k$ , як відомо з курсу теоретичних основ електротехніки, використовують ортогональну систему з двох плоских котушок, по яких пропускають синусоїдальні струми  $I_{k1}$  і  $I_{k2}$ , зсунуті по фазі на  $90^\circ$ .

Плата з 16 чіпами укладена всередині таких плоских котушок. Незмінне поле зсуву  $H_z$  створюється чотирма циліндричними постійними магнітами, розташованими у кутках модуля. Для створення рівномірного, однорідного поля зсуву в зоні розташування чіпів використані дві пермалоеві пластини – кіпери (від англ. *keeper* - тримач, утримувач поля в потрібній зоні), між якими укладена плата з котушками.

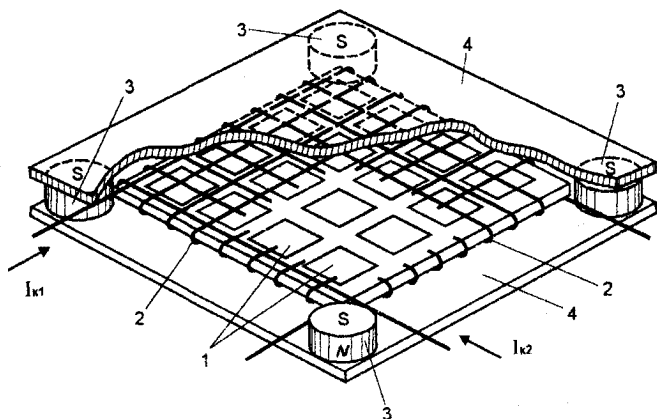


Рис. 2.3.19. Конструктивна схема з 16 чіпами:

- 1 – чіпи, 2 – катушки керування, 3 – циліндричні постійні магніти зсуву,  
4 – пермалоеві пластини – кіпери

**Об'єднання накопичувальних регістрів за допомогою регістра зв'язку.** Це найбільш перспективний вид організації ПП на ЦМД, особливо для побудови пам'яті середнього і великого обсягу (рис. 2.3.20).

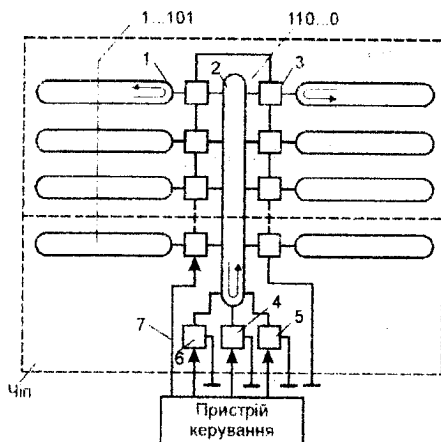


Рис. 2.3.20. Двостороння організація доменного ІП з регістром зв'язку.

1 – накопичувальні регістри, 2 – регістр зв'язку, 3 – перемикачі, 4 – пристрій знищення інформації (анігілятор доменів), 5 – пристрій запису інформації (генератор доменів), 6 – давач зчитування, 7 – шина струму керування.

Розглянемо послідовність роботи такого ІП. Припустимо, що регістр зв'язку порожній. Під час запису генератор 5 під дією імпульсів струму, що надходять з пристрою керування, послідовно розряд за розрядом, здійснює запис числа в регістр зв'язку. Потім по сигналу, поданому в шину 7, перемикачі переводять одночасно всі розряди записаного числа в накопичувальні регістри, де це число буде циркулювати під дією обертового поля. На рисунку пристрій зображений у момент, що передуює передачі з регістра зв'язку в розташовані праворуч від нього накопичувальні регістри числа 100 ... 0, а в накопичувальних регістрах, розташованих ліворуч від регістра зв'язку, циркулює число 1 ... 101, записане незадовго до того.

Для зчитування числа в такт, коли його домени займають у накопичувальних регістрах положення біля перемикачів, по сигналу, що подається по шині 7, перемикачі передадуть ці домени в регістр зв'язку, де число, що підлягає зчитуванню буде просуватися, а досягнувши давача 6,

зчитуватися розряд за розрядом. При зчитуванні без руйнації це число, здійснивши повний оберт по регістру зв'язку, може бути знову за допомогою перемикачів передане на збереження в накопичувальні регістри. При необхідності стерти число, що зчитується, його домени колапсують, коли проходять під анігілятором 4, по сигналах, що надходять з пристрою керування, після чого в регістр зв'язку за допомогою генератора 5 може бути записана нова інформація. Для забезпечення правильної роботи такого ПП необхідне визначене співвідношення між розрядностями накопичувальних регістрів і регістра зв'язку, щоб після зчитування попереднє (без знищення) або нове число передавалося б у ті ж комірки накопичувальних регістрів, де воно знаходилося раніше. Для передачі доменів з регістра зв'язку у накопичувальні регістри та назад потрібні реверсивні перемикачі, побудовані на ЦМД.

Вітчизняною промисловістю випускаються ІМС з організацією, подібною до зображеної на рис. 2.3.19: К1602РЦ2А ємністю 256 Кбіт і К1602РЦ23А ємністю 1 Мбіт. На цих ІМС в Інституті електронних керуючих машин спроектовано пристрій пам'яті "Домен-5" із такими параметрами: інформаційна ємність мінімального складу 64 Кбайт; максимальна ємність 64 Мбайт; середня швидкість передачі даних 12,5 Кбайт/с; середній час доступу до інформаційного блоку 6,0 мс; розрядність слова 8 біт; потужність споживання 40 ВА; наробок на відмову не менше 50000 год.

### **2.3.5. Перспективи розвитку елементної бази доменних пристроїв**

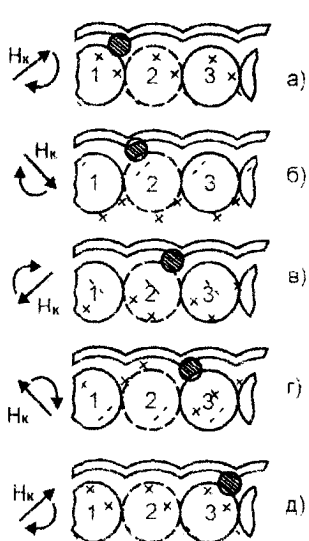
Використання доменної пам'яті в ПП великої ємності замість магнітних дисків залежить від подальшого технічного прогресу в цій області. Основною перешкодою є відносно висока вартість зберігання біта інформації в ПП на ЦМД у порівнянні з дисковою пам'яттю. Це

пояснюється тим, що в дискових ПП дешевий магнітний матеріал використовується тільки для виготовлення накопичувачів, що зберігають інформацію, а функції запису і зчитування виконуються окремим пристроєм, що використовується зі змінними пакетами дисків. У доменних же ПП всі ці функції повинні здійснюватися на кожному чіпі, подібно дискам типу «Вінчестер». Тому для успішної конкуренції з ПП на магнітних дисках по вартості на 1 біт інформації необхідно істотно підвищити інформаційну щільність ПП на ЦМД проти досягнутого в даний час значення приблизно  $10^6 \text{ біт/см}^2$ .

Щільність запису інформації в доменних ПП визначається не тільки діаметром ЦМД і технологією виготовлення пермалоевих і провідникових аплікацій, але й сукупністю схемотехнічних і конструкторських рішень, а також фізичних ефектів, які використовуються для створення пристроїв на ЦМД, що можна назвати елементною базою доменних ПП.

Можна виділити два напрямки в розвитку елементної бази ПП на ЦМД:

- 1) пермалоевих аплікацій;
  - 2) іонно-імплантованих схем.
- Розглянемо ці напрямки.



### Напрямок пермалоевих аплікацій.

Пермалоеві аплікації в сполученні із шинами, що проводять струм, лежать в основі створення ПП першого покоління й утворюють накопичувальний масив за принципом «одна аплікація на один домен». Саме до цього напрямку відноситься ПП на ЦМД (див. рис. 2.3.18). Аналіз існуючих розробок чіпів для накопичувачів доменних

Рис. 2.3.21. «Безпроміжкова схема» просування доменів

ПП, виконаних на пермалоевих аплікаціях, показує, що практичною межею ємності чіпів при використанні традиційних методів просування доменів за цим принципом є ємність порядку 16-64 Мбіт. Причому ця межа визначається не технологією виготовлення аплікацій (існуюче літографічне устаткування дозволяє виготовляти їх з розмірами 0,2 мкм), а, головним чином, ненадійністю елементів чіпу, що проводять струм, при діаметрах домена менше 1 мкм.

З елементної бази цього напрямку найбільш перспективні для створення накопичувачів ПП на ЦМД так звані «безпроміжкові схеми» у вигляді пермалоевих дисків (рис. 2.3.21), що можуть дозволити збільшити ємність чіпів до  $10^8 - 10^9$  біт і швидкодію до 1 – 2 МГц. У безпроміжковій схемі ряд пермалоевих дисків, що перемагнічуються обертовим полем керування  $H_k$ , розташований по черзі по обидва боки ЦМД-пластини. Таке розміщення дисків призводить до того, що домен притягується до позитивного полюсу непарних і негативного полюсу парних дисків. На рис. 2.3.21, *а-д* відображені стадії намагнічування дисків і положення домену для п'ятих послідовних напрямків обертового поля. Пермалоева смужка, що розташована над дисками на відстані, що приблизно дорівнює радіусу домена, стабілізує просування ЦМД.

**Іонно-імплантовані схеми.** Напрямок іонно-імплантованих схем базується на ефекті імплантації (порушення структури) кристалічної ґратки.

При іонному бомбардуванні поверхні магнітно-одноосової плівки в прошарку  $\Delta h$ , що примикає до цієї поверхні (рис. 2.3.22, *а*), виникають імплантації кристалічної ґратки у вигляді зсувів атомів, що намагаються викликати локальне розширення ґратки в області іонно-імплантованого (II) прошарку. Оскільки непорушений прошарок кристалічної плівки утримує значно тонший поверхневий прошарок від розширення в паралельних їй

напрямах, II-прошарок знаходиться в стані площинного стискування, що у ферит-гранатах із негативною магнітострікцією викликає появу площинної магнітної анізотропії. При цьому напрямок намагніченості  $M_s$ , II-прошарку відхиляється від осі  $z$ , на кут  $\theta$ , створюючи складову  $M$ , що лежить у площині цього прошарку, яка і визначає його властивості. Кут  $\varphi$  визначається вектором  $\bar{H}_k$  і змінюється при його обертанні, причому в загальному випадку між векторами  $\bar{M}$  і  $\bar{H}_k$  існує зсув  $\Delta\varphi$ .

Якщо на поверхню плівки нанести аплікації з золота (найчастіше у вигляді дисків), то вони захистять покриті місця плівки від впливу іонів, і під дисками збережеться непорушена кристалічна структура.

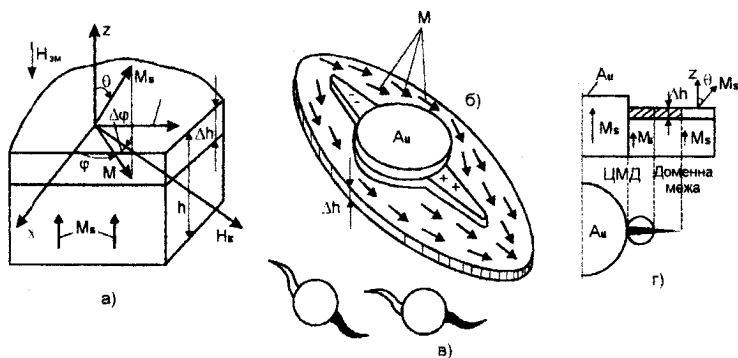


Рис. 2.3.22. Розподіл намагніченості й утворення доменних меж у магнітно-одноосьовій плівці, що піддана іонній імплантації

Під впливом поля  $\bar{H}_k$  площинна намагніченість  $M$  в II-прошарку упорядковується і «обтікає» диск (рис. 2.3.21, б), відтворюючи доменні межі, що мають вигляд клинчастих областей, розташованих вгорі і внизу за «течією». Верхня область, від бічних стінок якої розходяться вектори  $\bar{M}$  (і, отже, усередину якої повинні входити силові лінії), уподібнюється південному полюсу магніта, а нижня, з протилежним напрямком полів, — північному. Ці області-межі можна спостерігати під мікроскопом. Для цього феромагнітний колоїд наносять тонким прошарком на поверхню



плівки і намагнічені полем зсуву частки колоїду взаємодіють із полями розсіювання цих областей, створюючи контрастну картину. На фотографії плюсові області виглядають чорними, а мінусові – світлими змієподібними смужками (рис. 2.3.22, в), що обертаються навколо диска та захоплюються обертанням поля керування  $H_k$ . Плюсова межа сходження є магнітостатичною пасткою, до якої притягується циліндричний домен (рис. 2.3.22, г).

Просування ЦМД в іонно-імплантованій структурі можна здійснити так, як показано на рис. 2.3.23. Під дією обертового поля керування межі сходження (товсті рисочки) утворюються не тільки на зовнішньому

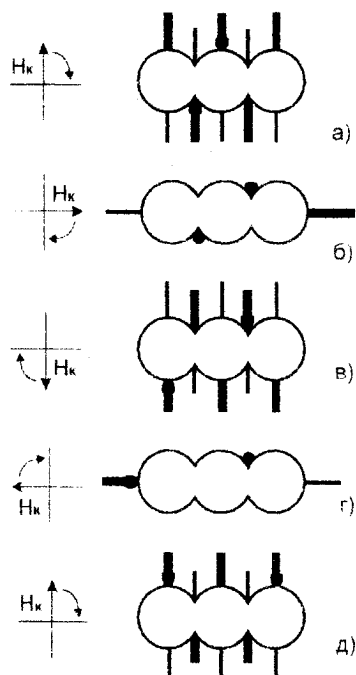


Рис. 2.3.23. Механізм переміщення доменів в іонно-імплантованій структурі

відносно поля  $H_k$ , коли золотих аплікацій-дисків, але й у місцях їх дотику (рис. 2.3.23, а). При обертанні  $H_k$  межа сходження переміщується, як показано на рис. 2.3.23, б-д. За повний оберт поля  $H_k$  домен переміщується на один крок, що дорівнює діаметру диска (причому велику частину періоду обертання домен проводить у «западині» між дисками), а якщо диск крайній, то обходить його майже по всьому колу, переходячи з нижньої сторони структури на верхню (лівий домен) або навпаки.

З рис. 2.3.24 випливає, що розімкнутий ряд дисків являє собою замкнутий кільцевий регістр зсуву, тому що ЦМД обігає такий ряд дисків по його периферії, змінюючи на крайніх дисках напрям проходження. Тому на основі такого регістра можуть

бути створені доменні ПП з такими ж видами організації, що і ПП з  $\tau$  пермалоєвими структурами.

На рис. 2.3.24, а зображена схема ПП з регістром зв'язку, що об'єднує накопичувальні регістри. Розглянемо функціональні елементи такого ПП на плівці з ферит-гранату з діаметром 5 мкм і діаметром просовувальних дисків 25 мкм.

Генерація ЦМД відбувається за допомогою імпульсу струму 450 мА тривалістю 5 мкс, що подається в провідну шину-аплікацію шириною 25 мкм. Для полегшення утворення домену шина охоплює пермалоєвий диск (заштрихований) товщиною 0,03 мкм, що примикає до першого диска регістра зв'язку.

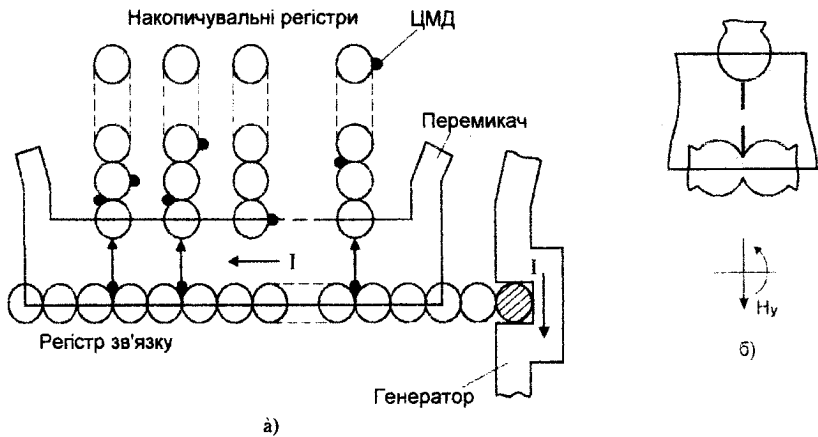


Рис. 2.3.24. Організація пристрою пам'яті на ЦМД із іонно-імплантованою структурою

Накопичувальні регістри виконані у вигляді стовпчиків із дисків. Осі стовпчиків проходять через западини між дисками регістра зв'язку, тому відстань між всіма сусідніх стовпчиків дорівнює двом періодам схеми.

Перемикач діє таким чином. Коли вектор поля  $\vec{H}_k$  спрямований вниз, на найближчому до регістра зв'язку диска накопичувального регістра і в западині регістра зв'язку утворюються межі сходження, спрямовані

назустріч одна одній (рис. 2.3.24, б). Імпульс струму, поданий у цей момент у шини-аплікацію перемикача, переносить домен з-під однієї межі пастки в іншу.

Напрямок переносу визначається напрямком струму. При зазначеному стрілкою на малюнку напрямку струму домен перейде з регістра зв'язку в накопичувальний, тому що напруженість, створювана цим струмом, буде послаблювати поле  $H_{zc}$  на верхній межі шини і посилювати  $H_{zc}$  на нижній, а домен переміщується у бік меншого  $H$ . У пристрої, що розглядається, шина шириною 50 мкм забезпечує перенос ЦМД із регістра зв'язку в накопичувальний струмом 160 мА та у протилежному напрямку – струмом 90 мА при тривалості переносу, в обох випадках, 5 мкс. Розходження в значеннях струму пояснюється більшою інтенсивністю поля межі сходження в западині між дисками, ніж на колі диска.

Давач зчитування (на малюнку не показаний) магніторезисторного типу розміром 500x25 мкмх200 А надавав сигнал 7 мВ при розтягу ЦМД у смуговий, 5x500 мкм – за допомогою петлі зі струмом 4 мА.

Анігілятор (також не показаний на малюнку) являє собою шини шириною 50 мкм з імпульсом струму 200 мА тривалістю 1 мкс. У порівнянні з пермалоевими структурами просування, іонно-імплантовані дозволяють на порядок збільшити інформаційну ємність чіпів при однакових можливостях технологічного устаткування для їхнього виготовлення, а також значно знизити необхідне значення поля керування, що у 3-4 рази менше, ніж поле, необхідне для структур на пермалоевих аплікаціях при ЦМД того ж розміру.

### 2.3.6. Принципи реалізації пристроїв пам'яті на вертикальних блохівських лініях

Пристрої пам'яті на ЦМД, розглянуті в 2.3.3-2.3.4, є представниками магнітоселекtronних інтегральних ПП з довільним доступом, побудованими за принципом «один домен – один біт».

Якісно новим ступенем розвитку таких ПП, що дозволяє різко підвищити щільність запису, можуть стати ПП на вертикальних блохівських лініях (ВБЛ). У цьому випадку домен (на відміну від ЦМД-ПП, де він зберігає один біт інформації) є самостійним регістром, що зберігає вздовж своєї межі якусь кількість біт інформації. Такий витягнутий у лінію домен називають страйп-доменом (від англ. stripe – смуга). Припускають, що ПП на ВБЛ можуть забезпечити щільність запису порядку  $10^9$  біт/см<sup>2</sup> при загальній інформаційній ємності до 100 Гбайт. Водночас вони зберігають основні переваги ПП на ЦМД – інтегральне

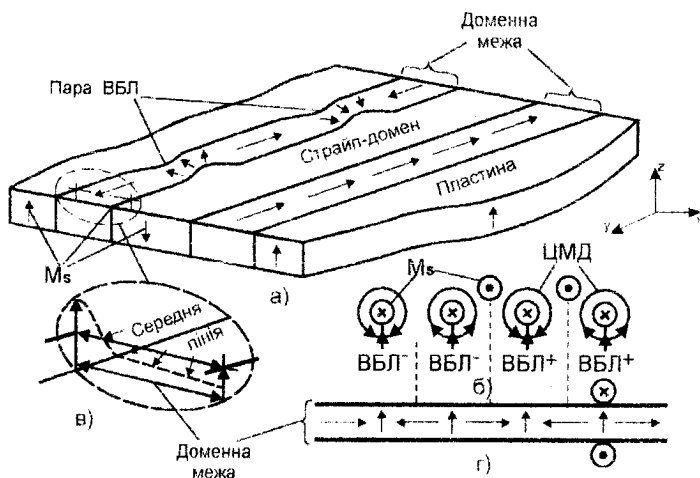


Рис. 2.3.25. Вертикальні блохівські лінії (ВБЛ)

виконання, енергонезалежність, надійність. У доменній межі між страйп-доменом та іншою пластиною. (рис. 2.3.25, а) вектор намагніченості  $\vec{M}$

плавно повертається на  $180^\circ$  так, що його кінець описує гвинтову лінію (рис. 2.3.25, б). Напрямок обертання може бути правим і лівим (подібно правій і лівій нарізці гвинтів). На зіткненні ділянок доменної межі з протилежним обертанням вектора намагніченості утворюються вузькі перехідні області (межа в межі), що називаються вертикальними блохівськими лініями. На рис. 2.3.25, а, де стрілки вказують напрямки вектора намагніченості для середньої лінії доменної межі, зображені дві ВБЛ. Блохівські лінії призводять до звуження доменної межі, що показано на рис. 2.3.25, б.

Оскільки обертання вектора  $\vec{M}$  в ВБЛ теж може відбуватися в одному або іншому напрямку, ВБЛ розрізняють за знаком: ВБЛ– і ВБЛ+. На рис. 2.3.25, в зображені чотири варіанти сполучень повороту векторів  $\vec{M}$  в доменній межі й у вертикальних блохівських лініях із зазначенням їхніх знаків, а на рис. 2.3.25, г приведені їхні умовні позначення.

Дослідження показали, що більш стійкі й зручні для кодування інформації не одиничні ВБЛ, а їхні пари, причому з негативним знаком. Саме така пара і зображена на рис. 2.3.25, д. Рівноважна відстань між ВБЛ у парі, а також мінімальна відстань між сусідніми парами складає приблизно  $0,1d$ , де  $d$  – діаметр ЦМД, що й обумовлює зазначену більш високу щільність запису.

Переміщення ВБЛ уздовж межі відбувається при розширенні страйпу під дією імпульсу поля, спрямованого по осі  $z$  (рис. 2.3.26). При цьому пара ВБЛ переміщується в нову позицію. По закінченні дії імпульсу страйп повертається до вихідних розмірів. Для стабілізації ВБЛ у дискретних, розташованих уздовж межі страйпу позиціях, використовуються стабілізатори ВБЛ, наприклад, намагнічені аплікації 1, розташовані періодично перпендикулярно до страйпу 2.

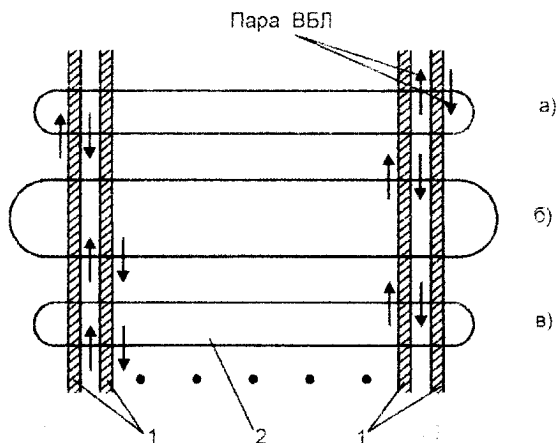


Рис. 2.3.26. Просування і фіксація пар ВБЛ:  
 а - вихідний стан страйпу; б - розширений страйп;  
 в - новий вихідний стан страйпу з переміщеними  
 парами ВБЛ

Зчитування ВБЛ можливе декількома способами, основанийми на реєстрації неоднорідностей магнітної структури межі і поля від них. Найбільш прийнятний, вочевидь, спосіб «транспортних» ЦМД, оснований на можливості переписувати без руйнації інформаційну ВБЛ у транспортний ЦМД, що потім реєструється звичайними для ЦМД засобами. У цьому засобі від страйпа (рис. 2.3.27, а, б) за допомогою імпульсу струму в провідниковій петлі / пристрою, що називається реплікатором, відокремлюється верхівка страйпа з ВБЛ (рис. 2.3.27, а). При цьому утвориться ЦМД із двома ВБЛ, а у страйпі, що залишився, ВБЛ залишається (рис. 2.3.27, б).

Виділений ЦМД з інформацією, що зберігається в ньому, потім переміщується (транспортуються) в пристрій зчитування.

Запис (інжекція) ВБЛ проводиться шляхом виконання послідовності операцій, показаних на рис. 2.3.28. Під впливом імпульсу поля вздовж осі  $x$  (наприклад, за допомогою провідника зі струмом) верхівка страйпа

(рис. 2.3.28, а) дещо витягується для відведення з неї ВБЛ (рис. 2.3.28, б). Потім за рахунок стрибкоподібного зростання амплітуди поля верхівка швидко витягується й у ній генерується пара блохівських ліній ВБЛ- і ВБЛ+ (рис. 2.3.28, в). Подальшим, відносно повільним витягуванням страйпа ВБЛ+ підводиться до верхівки страйпа (рис. 2.3.28, г). Потім верхівка відокремлюється провідниковою петлею з утворенням ЦМД (рис. 2.3.28, д) і одної ВБЛ- у верхівці страйпа, в результаті чого стає записаною пара ВБЛ-, що закодована лог. 1.

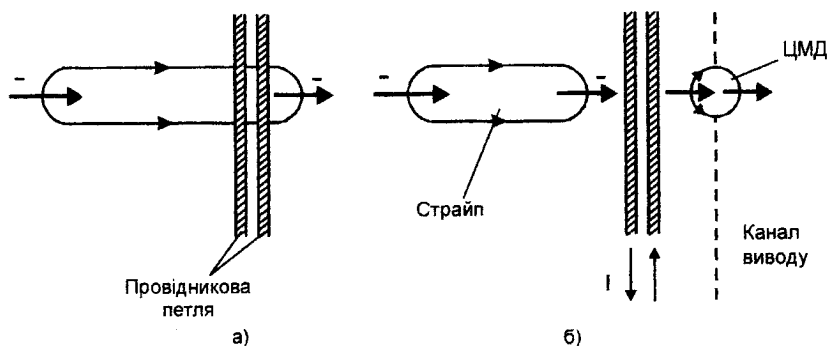


Рис. 2.3.27. Неруйнівне зчитування ВБЛ із реплікацією

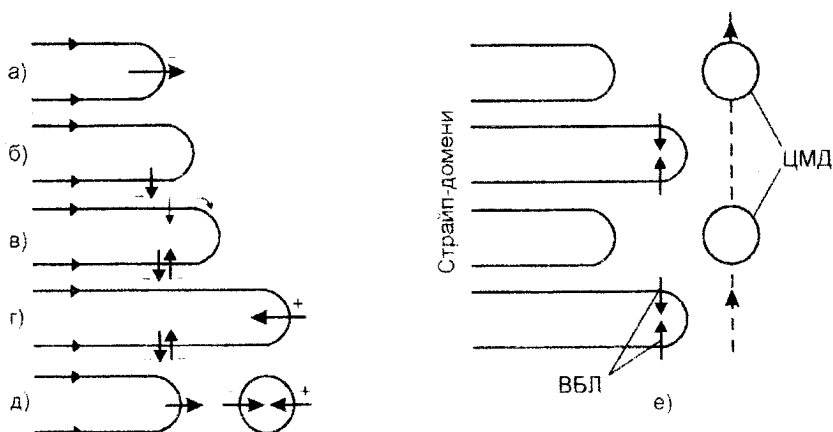


Рис. 2.3.28. Запис (інжекція) ВБЛ у страйп-домен

Витягуванню страйпа (в) і, отже, зародженню нової пари ВБЛ перешкоджає ЦМД (якщо він розташований проти верхівки страйпа). Цю властивість використовують при записуванні коду у ВБЛ-ПП. Для цього в канал введення (рис. 2.3.28, е) поміщають код, що складається з одиниць (відсутність ЦМД) і нулів (наявність ЦМД). Під час операції, показаної на рис. 2.3.28, б, витягнуться й утворять нову пару ВБЛ тільки ті страйпи, перед якими ЦМД відсутні. Таким чином, кодова послідовність ЦМД перетвориться в послідовність пар ВБЛ у страйпах припускаючи, що парою ВБЛ кодується лог. "1", а її відсутністю - лог. "0".

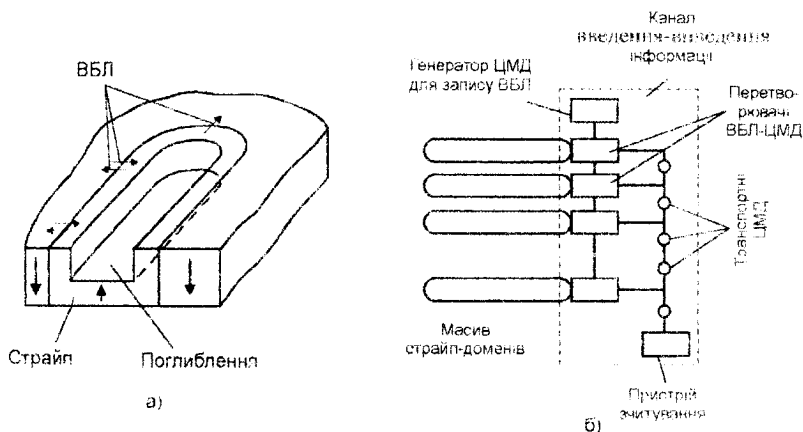


Рис 2.3.29. Стабілізатор страйпів (а) і структура пристрою пам'яті на ВБЛ (2)

Використовуючи розглянуті прийоми запису, переміщення і зчитування ВБЛ, можна зобразити передбачувану структуру ВБЛ-ПП (рис. 2.3.29, б). Спочатку формується масив страйп-доменів, що є регістрами збереження інформації. Для фіксації і стабілізації страйпів використовують заглиблення в магнітній плівці (рис. 2.3.29, а). В утворений масив страйпів можна записати інформацію, якщо подати у канал вводу кодову послідовність ЦМД і перетворити її за допомогою перемикача в послідовність ВБЛ у страйпах, де вона буде зберігатися в



позиціях, що задаються періодично розташованими стабілізаторами ВБЛ. Для зчитування інформації пари ВБЛ перетворюються в транспортні ЦМД, що дозволяють вивести збережену інформацію до пристрою, що розпізнає нулі і одиниці.

Як вважають спеціалісти при успішній технічній реалізації ПП на ВБЛ вони можуть цілком замінити дискову пам'ять, особливо там, де потрібна висока надійність.

## Контрольні запитання та завдання

1. Опишіть структуру системи цифрового магнітного запису.
2. Основні операції перетворення сигналів.
3. Структурна схема багатоканального пристрою запису цифрових сигналів.
4. Структурна схема багатоканального пристрою відтворення.
5. Основні характеристики систем цифрового магнітного запису.
6. Параметри тракту магнітного запису.
7. Магнітні носії в системах цифрового магнітного запису.
8. Магнітні матеріали, що використовуються в носіях інформації.
9. Конструкція кільцевої магнітної головки. Магнітні матеріали осердь головок.
10. Способи цифрового магнітного запису.
11. Сутність імпульсних способів запису.
12. Сутність потенціальних способів запису.
13. Імпульсно-потенціальні способи запису.
14. Способи ЦМЗ з використанням групової модуляції.
15. Порівняльні характеристики способів ЦМЗ.
16. Інтегральні магнітні елементи запам'ятовувальних пристроїв.
17. Магнітні логічні елементи з розгалуженими магнітопроводами.
18. Особливість перемагнічування тонких феромагнітних плівок.
19. Особливості роботи магнітних ЗП на тонких плівках.
20. Умови стабільного існування ЦМД.
21. Сили (поля), що діють на стінку ЦМД в магнітоодноосьовому кристалі.
22. Основні способи керування ЦМД.
23. Способи зчитування ЦМД.
24. Магнітні інтегральні схеми на ЦМД.
25. Елементи пристроїв пам'яті на ЦМД.
26. Перспективи розвитку елементної бази домених пристроїв.

1. Аксенов В.А., Вичес А.И., Гитлиц М.В. Точная магнитная запись. — М.: Энергия, 1973. — 280 с.
2. Атабеков Г.И., Купалин С.Д., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Электротехнические основы электротехники. Ч.2 и 3. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. — М.: Энергия, 1979.
3. Бабиков М.А., Косинский А.В. Элементы и устройства автоматики. — М.: Высшая школа, 1975. — 464 с.
4. Балашов Е.П. и др. Идентификация магнитных элементов автоматики и вычислительной техники. — Л.: Энергия, 1980. — 128 с.
5. Балашов Е.П. Проектирование магнитных элементов и устройств электронных вычислительных машин. — М.: Высш. шк., 1966. — 344 с.
6. Балашов Е.П., Атанасов Д.Х. Накопители информации с подвижным магнитным носителем. — Л.: Энергоатомиздат, 1982. — 206 с.
7. Баранов В.Я., Безновская Т.Х. и др. Промышленные приборы и средства автоматизации. — Л.: Машиностроение, 1987. — 847 с.
8. Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А. В мире магнитных доменов. — К.: Наукова думка, 1986. — 159 с.
9. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электрические материалы. — Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 304 с.
10. Боярченко М.А. и др. Магнитные доменные логические и запоминающие устройства. — М.: Энергия, 1974. — 175 с.
11. Боярченко М.А., Черкашина А.Г. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. — М.: Высшая школа, 1976. — 383 с.
12. Васюра А.С. Электромагнітні елементи та пристрої систем управління і автоматики. Ч.1. Электромагнітні елементи аналогових пристроїв / Навч. посібник. — Вінниця: ВДТУ, 2000.

13. *Васюра А.С.* Елементи та пристрої систем управління і автоматики / Навч. посібник. – Вінниця: ВДТУ, 1999. – 157 с.
14. *Васюра А.С., Кривоғубченко С.Г., Кулик А.Я., Компанець М.М.* Елементи локальних систем автоматики / Навчальний посібник. – Вінниця: ІЗМН – ВДТУ, 1998. – 103 с.
15. *Васюра А.С., Селезньова Р.В.* Парадигми комп'ютерних новацій. – Вінниця: Універсум – Вінниця, 1998. – 135 с.
16. *Вашкевич Н.П., Сергеев И.П., Чижухин Г.Н.* Электромагнитная техника. – М.: Высш. шк., 1975. – 248 с.
17. *Визлеб Г.* Датчики: Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
18. *Вонсовский С.В.* Магнетизм. – М.: Наука, 1984. – 207 с.
19. *Вышков Ю.Д., Иванов В.И.* Магнитные опоры в автоматике. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.
20. *Ганзбург Л.Б., Федотов А.И.* Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1980. – 364 с.
21. *Гитлиц М.В.* Магнитная запись в системах передачи информации. – М.: Связь, 1978. – 304 с.
22. *Гитлиц М.В.* Магнитная запись сигналов. – М.: Радио и связь, 1981. – 161 с.
23. *Глебов В.А.* Магнитно-транзисторные преобразователи напряжения для питания радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1981.
24. *Глузман П.Л., Миловзоров В.П., Юдин В.В.* Устройства на основе управляемых магнитных элементов. – М.: Радио и связь, 1986. – 159 с.
25. *Головка Д.Б., Рего К.Г., Скрипник Ю.О.* Автоматика і автоматизація технологічних процесів. – К.: Либідь, 1997. – 232 с.
26. *Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П.* Справочник по физике. – Киев: Наукова думка, 1986. – 557 с.

27. Еремеев И.С., Подлипенский В.С. Магнитная техника автоматики и кибернетики. – К.: Наук. думка, 1970. – 408 с.
28. Ешазарян Г.А., Стафеев В.И. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1987. – 89 с.
29. Жеребцов И.П. Электрические и магнитные цепи. – М.: Высш. шк., 1987.
30. Задерей Г.П. Многофункциональные магнитные радиокомпоненты. – М.: Сов. радио, 1980. – 136 с.
31. Замазанов Л.А. Беседы об автоматике и кибернетике. – М.: Наука, 1985. – 416 с.
32. Злобин В.А. и др. Изделия из ферритов и магнитодиэлектриков / Справочник. – М.: Сов. радио, 1972. – 240 с.
33. Иванов Е.Л., Степанов И.М. и др. Периферийные устройства ЭВМ и систем. – М.: Высшая школа, 1987. – 319 с.
34. Измерение электрических и неэлектрических величин / Под ред. Н.Н. Евтихеева. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
35. Казаков Л.А. Электромагнитные устройства радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1978. – 168 с.
36. Казаков Л.А. Электромагнитные устройства РЭА: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 352 с.
37. Карпенков С.Х. Тонкопленочные магнитные преобразователи. – М.: Радио и связь, 1985. – 208 с.
38. Кетим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. – М.: Высшая школа, 1991. – 304 с.
39. Коваленков Л.Л. Цифровая магнитная запись в информационно-измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
40. Козлов Г.Д. Коммутация магнитного потока. – М.: Энергия, 1974. – 247 с.

41. Козлов Г.Д. Новые бесконтактные магнитные элементы. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 80 с.
42. Колосов В.Г. Импульсные магнитные элементы и устройства. Основы расчета и проектирования. – Л.: Энергия, 1976.
43. Коновалов Л.И., Петелин Д.П. Элементы и системы электроавтоматики. – М.: Высшая школа, 1985. – 216 с.
44. Котов Е.П., Руденко М.И. Ленты и диски в устройствах магнитной записи. – М.: Радио и связь, 1986. – 224 с.
45. Котов Е.П., Руденко М.И. Носители магнитной записи: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990. – 384 с.
46. Кочергин В.В. Следящие системы с гистерезисными муфтами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 128 с.
47. Кривошеин М.И. Датчики-преобразователи на тороидальных ферритовых сердечниках. – К.: Техніка, 1972. – 104 с.
48. Кротов А.А., Максимов М.К. Магнитные элементы в судовых системах автоматики. – Л.: Судостроение, 1970. – 312 с.
49. Лаврова А.Т. Элементы автоматических приборных устройств. – М.: Машиностроение, 1975. – 456 с.
50. Львов Е.Л. Магнитные усилители в технике автоматического регулирования. – М.: Энергия, 1972. – 552 с.
51. Мартынов Е.П. Бесконтактные переключающие устройства. – М.: Энергия, 1970. – 176 с.
52. Масленников И.М., Содиева Ю.Н. и др. Практикум по автоматике и системам управления производственными процессами. – М.: Химия, 1986. – 336 с.
53. Механизмы с магнитной записью. /Л.Б. Ганзбург, Н.П. Глуханов и др. – Л.: Машиностроение, 1973. – 272 с.
54. Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматики. – М.: Высш. шк., 1983. – 408 с.

55. *Миловзоров В.П.* Элементы информационных систем. – М.: Высш. шк., 1989. – 440 с.
56. *Миловзорова З.И.* Электромагнитная техника в задачах, упражнениях и расчетах. – М.: Высш. шк., 1975.
57. *Митюшкин К.Г.* Расчет и анализ магнитных гистерезисных элементов телемеханических устройств. – М.: Энергия, 1972. – 207 с.
58. *Михайлов В.С.* АСУ та САПР /Введення в спеціальність. – Вінниця: МНВП ІТІ, 1994. – 149 с.
59. *Мочалов В.Д.* Магнитная микροэлектроника. – М.: Сов. радио, 1977. – 366 с.
60. *Негневицкий И.Б.* Операционные магнитные усилители. – М.: Энергия, 1971. – 328 с.
61. *Никитенко А.Г.* Автоматизированное проектирование электрических аппаратов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1983.
62. *Пирогов А.И., Шамаев Ю.М.* Магнитные сердечники для устройств автоматики и вычислительной техники. – М.: Энергия, 1973. – 263 с.
63. *Подлипенский В.С.* Бесконтактные логические схемы автоматики (основы построения). – К.: Наук. думка, 1965. – 216 с.
64. *Подлипенский В.С. и др.* Электромагнитная техника: Лабораторные работы. – К.: Вища шк., Головное изд-во, 1974. – 223 с.
65. *Подлипенский В.С., Петренко В.Н.* Электромагнитные и электромашинные устройства автоматики. – К.: Высш. шк., 1987. – 592 с.
66. *Подлипенский В.С., Сабинин Ю.А., Юрчук Л.Ю.* Элементы и устройства автоматики. – Санкт-Петербург: Политехника, 1995. – 472 с.
67. *Поляков В.С., Бардаш И.Д. и др.* Справочник по муфтам. – Л.: Машиностроение, 1974. – 352 с.
68. Постоянные магниты: Справочник /А.Б. Альтман, А.Н. Герберг и др.; Под ред. Ю.М. Мятиня. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

69. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. - М.: Высш. шк., 1986. - 335 с.
70. Преображенский А.А., Шамрай Б.В. Электромагнитные устройства информационно-измерительной техники - М.: Высш. шк., 1982. - 264 с.
71. Раев В.К., Ходенков Г.Е. Цилиндрические магнитные домены в элементах вычислительной техники. - М.: Энергоиздат, 1981. - 215 с.
72. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А.Н. Горский и др. - М.: Радио и связь, 1988.
73. Розенблат М.А. Гальваномангнитные датчики - состояние и тенденция развития // Автоматика и телемеханика. - 1997. - №1. - с. 3-46.
74. Розенблат М.А. Магнитные датчики - состояние и тенденция развития // Автоматика и телемеханика. - 1995. - №6. - с. 3-55.
75. Розенблат М.А. Магнитные датчики электрических и неэлектрических величин. Современное состояние и тенденция развития // Измерение, контроль, автоматизация. - 1980. - №9. - с. 10-17.
76. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. - М.: Наука, 1974. - 768 с.
77. Розенблат М.А. Микротроника - новое направление развития датчиков и исполнительных устройств // Приборы и системы управления. - 1996. - №12. - с. 49-56.
78. Ройзен С.С., Стефанович Т.Х. Магнитные усилители в электроприводе и автоматике. - М.: Энергия, 1970. - 531 с.
79. Русин Ю.С. Расчет электромагнитных систем. - Л.: Энергия, 1968. - 132 с.
80. Рыжков В.А., Сергеев Н.П., Раков Б.М. Внешние запоминающие устройства на магнитном носителе. - М.: Энергия, 1978. - 224 с.
81. Савета Н.Н. Периферийные устройства ЭВМ. - М.: Машиностроение, 1987. - 304 с.



82. Селезнев Ю.М., Бабилов М.А. и др. Автоматический контроль магнитных параметров. – М.: Высш. шк., 1971. – 288 с.
83. Сиакоу М. Физические основы записи информации. – М.: Связь, 1980. – 192 с.
84. Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 567 с.
85. Справочник по средствам автоматики / Под ред. В.Э. Низз и И.В. Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
86. Справочник по технике магнитной записи /Под ред. О.В. Порицкого, Е.Н. Травникова. – Киев: Техника, 1981. – 319 с.
87. Справочник по электротехническим материалам /Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова и др. Т.3. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – Т. 3. – 728 с.
88. Тагатай А.И. Элементы промышленной автоматики и их динамические свойства. – Киев: Техника, 1975. – 232 с.
89. Теоретические основы электротехники. Т.2. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля / Под ред. П.А. Ионкина. – М.: Высш. шк., 1976.
90. Техническая кибернетика. Кн. 2. Усилительные устройства, корректирующие элементы и устройства. – М.: Машиностроение, 1975. – 687 с.
91. Технические средства автоматики / В.В. Кишнев, В.А. Иванов и др. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
92. Тищенко Н.М. Проектирование магнитных и полупроводниковых элементов автоматики. – М.: Энергия, 1979. – 471 с.
93. Харазов К.И. Электромагнитные устройства авиационной электроавтоматики. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с.
94. Харазов К.И. Реле с магнитоуправляемыми контактами. – М.: Энергия, 1971. – 89 с.

95. *Харазов К.И., Трофимов В.И., Нецветаев Г.Ф.* Ферриды в устройствах автоматики. – М.: Энергоиздат, 1982. – 89 с.
96. *Хасаев О.И.* Транзисторные преобразователи напряжения и частоты. – М.: Наука, 1966. – 176 с.
97. *Шопен Л.В.* Бесконтактные электрические аппараты автоматики. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
98. *Щетинин Т.А.* Электромагнитные муфты скольжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
99. *Щучинский С.Х.* Электромагнитные приводы исполнительных механизмов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
100. Электромеханические аппараты автоматики /Б.К. Буль, О.Б. Буль и др. - М.: Высшая школа, 1988. – 303 с.
101. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах. Справочник / Под ред. Н.Н. Евтихьева, Б.Н. Наумова. – М.: Радио и связь, 1987. – 488 с.

*Навчальне видання*

ВАСЮРА А.С.

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕЛЕМЕНТИ  
ТА ПРИСТРОЇ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ І АВТОМАТИКИ**

# **ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕЛЕМЕНТИ ЦИФРОВОЇ ТЕХНІКИ**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

Оригінал-макет підготовлено автором

Редактор С.А. Малішевська

Підписано до друку	5.04.2001р.
Формат 29.7х42 1/4	Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний	Ум. друк. арк. 9.29
Тираж 60 прим.	
Зам. № 2001-049	

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького державного технічного університету  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ, ГНК, 9-й поверх  
Тел. (0432) 44-01-59