

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



Гоков О.М., Жидко Є.А.

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

ПІДСИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОБЛАДНАННЯМ
І ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Навчальний посібник



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Гоков О. М.
Жидко Є. А.

**КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПОЛІГРАФІЧНОГО
ОБЛАДНАННЯ
ПІДСИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОБЛАДНАННЯМ І
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Навчальний посібник

Харків, Вид. ХНЕУ, 2011

УДК 655.2(075)

ББК 37.8я7

Г59

Рецензенти: д-р-т, техн. наук, професор кафедри експериментальної фізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна *Пойда В. П.*; канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України *Катрунов К. О.*

Рекомендовано до видання рішенням вченої ради Харківського національного економічного університету.

Протокол № 4 від 23.12.2010 р.

Гоков О. М.

Г59 Комп'ютеризовані системи поліграфічного обладнання. Підсистеми управління обладнанням і технологічними процесами; навчальний посібник / О. М. Гоков, Є. А. Жидко. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2011. – 256 с. (Укр. мов.)

Викладено питання, що пов'язані з технічним забезпеченням комп'ютеризованих систем поліграфічного обладнання і видавничих систем. Розглянуто загальні принципи побудови і функціонування комп'ютеризованих систем і вузлів обладнання; засоби обміну інформацією в системах управління обладнанням; мікроконтролерні системи вимірювання і перетворення інформації; основні підсистеми управління обладнанням і технологічними процесами; засоби відображення стану та режимів роботи обладнання; компоненти управлінських систем і інтерфейсу обладнання.

Рекомендовано для студентів напрямку підготовки "Видавничо-поліграфічна справа", а також для тих, хто вивчає однойменну навчальну дисципліну за іншими напрямами підготовки.

ISBN 978-966-676-444-0

УДК 655.2 (075)

ББК 37.8я7

© Харківський національний економічний університет, 2011
© Гоков О. М.
Жидко Є. А.
2011

Вступ

Визначальними тенденціями в розвитку сучасного поліграфічного устаткування і систем управління технологічними процесами є широке впровадження мікропроцесорних систем управління. У даний час друкарня, що використовує автоматизовані системи і цифрові інформаційні технології, об'єднує все сучасне технологічне устаткування в рамках єдиного автоматизованого інформаційно-апаратного комплексу, що включає всі етапи виробництва.

Відомості про аспекти розвитку комп'ютеризованого обладнання публікуються в літературі, розрахованій на фахівців. Але для окремої людини важко постійно знаходитися в курсі новацій і грамотно виробити позицію у змінах технологій у поліграфії. У зв'язку з цим виникає необхідність створення навчального посібника, орієнтованого на магістрів у галузі поліграфії і разом з тим максимально доступного користувачам різної кваліфікації.

Такий навчальний посібник дозволить читачу одержати початкову інформацію з основ побудови комп'ютеризованого обладнання, основних принципів його роботи, структурної побудови різних вузлів комп'ютеризованих систем, про створення доступних для вивчення, простих і зрозумілих текстів програм, які дають можливість реалізувати різні алгоритми функціонування окремих елементів промислового об'єкта.

Ураховуючи діалектику процесів третього тисячоліття, автори в посібнику ставили перед собою завдання, слідуючи за напрямом науково-технічного прогресу, та відображаючи тенденції розвитку теоретичного арсеналу й елементної бази комп'ютеризованого поліграфічного устаткування, систематизувати найбільш важливі змістовні аспекти та принципи у сфері устаткування, викласти ключові ідеї, покладені в основу комп'ютеризованих систем у найбільш загальному вигляді.

Навчальний посібник призначений для використання магістрами, тому він присвячений загальним принципам побудови, архітектурі, найбільш важливим технічним і програмним рішенням, що застосовуються при створенні поліграфічного устаткування, яке бурхливо розвивається. У зв'язку з цим навчальний посібник не претендує на роль керівництва, що роз'яснює деталі побудови конкретних поліграфічних систем.

Методичною настановою авторів було прагнення до балансу між фундаментальною строгістю і фізичною наочністю при обговоренні тих

або інших питань. Фундаментальні ідеї в роботі викладені без використання громіздких і строгих процедур.

Автори прагнули акцентувати увагу на питаннях, що дозволяють розуміти, яке необхідне в тому або іншому випадку апаратне та програмне рішення і чому слід віддавати перевагу одному рішенню, а не іншим.

Аналіз відомостей про сучасне поліграфічне устаткування і наявні в цій галузі тенденції дозволив авторам сформулювати базові відмітні ознаки вибору змісту, які були покладені в основу концепції даного навчального посібника.

Основою навчального посібника став курс лекцій з навчальної дисципліни «Комп'ютеризовані системи поліграфічного обладнання», що викладається в Харківському національному економічному університеті студентам магістерської підготовки, що навчаються за напрямом підготовки «Видавничо-поліграфічна справа».

Структура навчального посібника включає питання, що вивчаються в третьому і четвертому модулях, а саме: «Реалізація функцій збору, обробки і перетворення інформації у комп'ютеризованому поліграфічному обладнанні» та «Компоненти управлінських систем і інтерфейсу комп'ютеризованого поліграфічного обладнання», які об'єднані загальною назвою «Підсистеми управління обладнанням і технологічними процесами».

Питання, що вивчаються у перших двох модулях: «Основи комп'ютеризованого поліграфічного обладнання» і «Програмне забезпечення мікропроцесорної техніки, вживаної в поліграфічному обладнанні», які можна об'єднати під загальною назвою «Архітектура і організація управління цифровими процесами», розглянуті в першій частині [7], яка вже надрукована й використовується в навчальному процесі. У посібнику розглянуті п'ять тем: 1. Загальні відомості про сучасні комп'ютеризовані системи випуску друкарської продукції. 2. Управління обладнанням друку в комп'ютеризованих системах. 3. Архітектура цифрового пристрою керування й виконання мікроконтролера AVR. 4. Початкові відомості про програмне забезпечення мікроконтролерів. 5. Програмне забезпечення взаємодії людини з комп'ютеризованим обладнанням. Кожна з тем крім теоретичної частини, має практикум, підкріплений практичними пристроями, виконаними на основі мікроконтролера.

Даний навчальний посібник складається з чотирьох тем: тема 6. Засоби відображення стану і режимів роботи обладнання в

комп'ютеризованих системах. Тема 7. Мікроконтролерні системи вимірювання і перетворення інформації у поліграфічному обладнанні. Тема 8. Застосування мікроконтролерів для управління електричними двигунами поліграфічного обладнання. Тема 9. Застосування послідовного інтерфейсу в комп'ютеризованому поліграфічному обладнанні. Кожна з тем, як і в першій частині [7], крім теоретичної частини, має практикум, підкріплений практичними пристроями, виконаними на основі мікроконтролера. Стисло пояснимо їх зміст.

Перша тема навчального посібника присвячена вивченню таких питань.

Автоматизація поліграфічного устаткування потребувала не тільки відображення стану об'єкта управління в досяжній і зрозумілій формі, але й використання «людино-машинного» інтерфейсу, щоб персонал, що здійснює управління, був здатний приймати й реалізовувати такі рішення з управління устаткуванням, які б могли забезпечити досягнення поставленої мети. При великих інформаційних потоках, що існують у даний час, необхідно створити операторові комфортні умови для проведення візуальних спостережень. Треба, щоб надання операторові даних, що отримуються від устаткування, ступінь участі оператора в управлінні підсистемами були такими, щоб при виникненні нестандартних ситуацій не виникала нездатність до мобілізації інтелектуальних та фізичних ресурсів і, як наслідок цього, не з'являлися помилки в оцінці ситуації й ухваленні рішень.

Саме такі умови дозволяють створити сучасні комп'ютеризовані підсистеми вимірювання і відображення інформації.

Останнім часом одним з основних видів засобів виведення інформації для сучасних цифрових систем стали рідкокристалічні дисплеї (LCD, або РКД). Вони широко використовуються в різному промисловому устаткуванні, у вимірювальних приладах, в інформаційних системах, у переносній апаратурі з автономним живленням.

Опису основ управління і використовуваних при цьому способів перетворення інформації присвячена друга тема навчального посібника.

Сучасне поліграфічне виробництво розвивається в напрямі якомога повнішої автоматизації процесів друку. Необхідність у високому ступені автоматизації всіх процедур управління і вимога застосування комплексу апаратних та програмних засобів, які автоматично управляють режимами роботи і станом об'єкта, обумовлені зростанням склад-

ності поліграфічних об'єктів. У таких системах управління здійснюється прийом, обробка сигналів, що поступають, і вироблення відповідних команд управління. Сигнали, що поступають від устаткування, обробляються або шляхом використання аналогових методів (аналогової обробки сигналів, або ASP), або цифрових методів (цифрової обробки сигналів, або DSP), або за рахунок застосування комбінації аналогових і цифрових методів (комбінованої обробки сигналів, або MSP).

Матеріальним втіленням керуючої інформації є фізична величина. Зокрема, в поліграфічному устаткуванні поширеними є вимірювання кутових величин і лінійних переміщень, зусиль, крутильних моментів, визначення тиску, параметрів рухів, напруги, температури. При цьому потрібні для керуючих дій параметри, кінець кінцем, подаються значеннями електричних величин.

Широке впровадження досягнень мікроелектроніки і мікроконтролерної техніки привело до того, що багато різних за своєю фізичною суттю завдань, вирішуються на основі використання автоматизованих систем збору та обробки даних, які базуються на застосуванні в якості елементної бази мікроелектроніки і мікроконтролерів. Отримані дані використовуються як для отримання первинної інформації про стан і режими роботи окремих вузлів устаткування, так і для організації управління всім процесом виробництва друкованої продукції.

Опису основ застосування різних комп'ютеризованих електроприводів у поліграфічному устаткуванні присвячена третя тема навчального посібника.

У сучасному автоматизованому поліграфічному виробництві широко застосування знаходять мехатронні системи, які використовують різні приводи, що приводять у рух велику частину виконавчих органів робочих машин і допоміжних механізмів.

Пріоритетом останніх років є підвищення ефективності використання енергії та ресурсозберігання. Тому одним з найбільш ефективних і вживаних для енергозбереження рішень є зниження втрат потужності, що споживається численними силовими і допоміжними приводами, підвищення їх ККД.

Розвиток мікроконтролерів і поява могутніх та недорогих напівпровідникових імпульсних ключів і IGBT-транзисторів привели до появи сучасних перетворювачів, що дозволяють легко управляти швидкістю обертання двигуна й відстежувати його стан шляхом вимірювання векторів

струму, напруги. Застосування цифрових, програмованих приводів дає можливість розширити функціональність технологічного устаткування. Електроприводи, що живляться від перетворювачів, є повністю програмованим пристроєм, який дозволяє істотно скоротити терміни модернізації приводів устаткування.

Сучасні комп'ютеризовані електроприводи оснащуються великою бібліотекою програмних засобів, за допомогою яких можна вирішувати багато функціональних завдань управління технологічним устаткуванням. У зв'язку з цим у поліграфічному устаткуванні все ширше застосовуються у вигляді гнучких програмованих систем регульовані електроприводи з широкими функціональними і структурними можливостями.

У четвертому розділі навчального посібника розглядаються такі питання.

При роботі комп'ютеризованого устаткування йде постійний обмін потоками інформації. З одного боку, в устаткуванні проводиться збір даних про стан і режими роботи основних вузлів устаткування, а з іншого – за допомогою керуючої інформації постійно задаються параметри, що визначають необхідні режими роботи цих вузлів, наприклад, швидкості переміщення паперу в транспортному модулі, температури здійснення сушки та ін.

Для організації інформаційних зв'язків із засобами управління нижнього рівня і локальними контролерами служать різні дротові і бездротові обчислювальні мережі, що використовують різні протоколи обміну, та інтерфейси зв'язку. За допомогою подібних засобів вирішуються завдання послідовного або паралельного управління декількома електроприводами, позиціонування, синхронізації швидкостей і положень, управління технологічними змінними отримання інформації від датчиків, спеціалізованих контролерів і програмних засобів для автоматизації технологічного устаткування і технологічних процесів.

Як і в першій частині, присвяченій даній навчальній дисципліні, кожна з тем, крім теоретичної частини, має практикум, що підкріплений практичними пристроями, виконаними на основі мікроконтролерів.

Теоретичний виклад матеріалу супроводжується лабораторними роботами, які служать базою для розвитку понять, введених у посібнику, несуть не тільки навчальне навантаження, але й виявляються зручними для вивчення роботи обладнання. У них невід'ємною частиною поданий

матеріал, який містить проекти всіх модулів і повні тексти програмного забезпечення, описаного у навчальному посібнику.

У практичній частині застосовані моделі, які адекватні найбільш типовим вузлам реального поліграфічного обладнання. У них використані алгоритми, які дозволяють перетворити формули на працюючі програми і здійснити модельний експеримент.

Відповідно до уявлень авторів процес розробки програм як наукоємного виробу виконаний таким чином, що проходить усі етапи – від строгого теоретичного обґрунтування до практично готового програмного продукту. При цьому користувачу рекомендується самому досліджувати модельований пристрій згідно з описом. Практичну частину навчального посібника автори будуть розглядати в іншій книзі.

Навчальний матеріал у посібнику побудований відповідно до основних положень Болонського процесу навчання і сучасних стандартів вищої освіти в Україні. У його основі лежать такі принципи, як компетентність, фундаментальність, іноваційність і діяльнісний підхід.

Фахівці поліграфічної галузі повинні уявляти архітектуру устаткування, роботу окремих його «цифрових» вузлів з програмованим керуючим мікроконтролером, розуміти програму його роботи, розбиратися в інструкціях і операціях, які він виконує, а також у тому, як взаємодіють вузли комп'ютеризованої системи на різних рівнях.

Робота з поліграфічним устаткуванням, вирішення багатьох завдань, характерних для сучасних високоавтоматизованих виробничих процесів, неможливі без знання фундаментальних положень теорії їх побудови й функціонування. Разом з тим, виконувати операції з їх обслуговування, ремонту поліграфічного устаткування неможливо без професійних компетенцій, без засвоєння дій з їх модернізації і ремонту.

При роботі над змістом посібника був зроблений наголос на фундаментальні знання, що, як відомо, є основною перевагою університетської освіти. Разом з тим ураховуючи той факт, що сучасна комп'ютерна техніка та електроніка є галузями знань, які надзвичайно бурхливо розвиваються, автори при відборі матеріалу, що викладається, прагнули й до того, щоб він відповідав сучасним вимогам і практичним завданням, які вирішуються в даний час.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен набути таких компетенцій:

1. Розуміти суть і вміти кваліфіковано характеризувати основні категорії, поняття поліграфічного устаткування, процедур управління устаткуванням, необхідність їх застосування.

2. Формулювати і пояснювати науковий апарат, що дозволяє здійснювати управління об'єктами, давати характеристику використовуваним у поліграфічному устаткуванні типових об'єктів управління, комплексу апаратурних і програмних засобів, за допомогою яких здійснюють автоматичне управління станом та режимами роботи об'єкта, давати характеристику використовуваним у поліграфічному устаткуванні і в сучасних цифрових системах управління електричним сигналам.

3. Розуміти, що становить організація автоматизованого управління процесом виробництва друкованої продукції, оцінювати можливості, переваги і недоліки способів управління, давати характеристику автоматизованим системам збору й обробки даних, типовим компонентам введення-виведення інформації, сенсорам, датчикам, що використовуються в цифровому поліграфічному устаткуванні, засобам виведення сигналів управління і відображення інформації.

4. Давати характеристику сигналів, призначених для отримання первинної інформації про стан, режими роботи окремих вузлів устаткування і виконавчих органів, а також відповідних команд управління, що формуються мікроконтролером.

5. Використовувати приблизні методи оцінки перетворень електричних сигналів при проходженні їх через типові ланки поліграфічного устаткування і науковими методами оцінювати достовірність отримуваних оцінок.

6. Давати характеристику використовуваним у сучасному поліграфічному устаткуванні комп'ютеризованим електроприводам, що оснащені програмними засобами, за допомогою яких можна вирішувати багато функціональних завдань управління технологічним устаткуванням різного призначення.

7. Вміти оцінювати необхідні енергетичні витрати й особливості роботи програмованого електроприводу при різних способах здійснення друку і у процесі післядрукової обробки поліграфічної продукції.

8. Давати характеристику дротовим і бездротовим обчислювальним мережам організації зв'язку, що використовуються у поліграфічному устаткуванні для автоматизації технологічного устаткування і технологічних процесів, різним протоколам обміну та інтерфейсам зв'язку, оцінюва-

ти можливості і недоліки використовуваних при цьому апаратних та програмних засобів.

9. Користуватися керуваннями з експлуатації обладнання, довідниками і науково-технічною літературою, документацією на мікроконтролер, матеріалами, отриманими в мережі Internet і самостійно освоювати нові питання теорії і практики комп'ютеризованих систем поліграфічного обладнання.

Використовувати приблизні методи оцінки перетворень електричних сигналів при проходженні їх через типові ланки поліграфічного устаткування.

10. Оцінювати логіку засобів забезпечення безпечної роботи, розуміти дії операторів під час надходження сигналів про виникнення несправностей, візуальної і звукової сигналізації. Моделювати, використовуючи типові програмні продукти емуляції, базові логічні елементи, цифрові пристрої, вироби аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворення.

11. Оцінювати вплив умов експлуатації на параметри і характеристики комп'ютеризованих систем.

Навчальний посібник, крім магістрів, для кого він призначається, буде корисним усім тим, хто хотів би мати уявлення про сучасний стан і перспективи розвитку устаткування поліграфічного виробництва.

Як відзначалося, в останній час у розвитку і створенні нового високопродуктивного обладнання і технологій друку стали визначальними автоматизація, комп'ютерні технології, інновації, тісно пов'язані з «високими технологіями», тобто сучасній електроніці притаманний стрімкий, прискорений характер розвитку і змін. Відповідно навчальна література зараз швидко застаріває, особливо в навчально-методичному аспекті, тому існує настійна потреба в нових навчальних посібниках з цих розділів. Вона обумовлена також завданнями, що постали зараз перед системою освіти України у зв'язку з проведенням її реформування на основі компетентнісного підходу для її інтеграції у світову освіту.

Можна сподіватися, що даний навчальний посібник буде сприяти розв'язку цих завдань і буде корисним для студентів у їх навчанні.

Модуль 3. Реалізація функцій збору, обробки і перетворення інформації в комп'ютеризованому поліграфічному облад- нанні

Тема 6. Засоби відображення стану і режимів роботи обладнання в комп'ютеризованих системах

6.1. Загальні відомості про засоби відображення стану і режимів роботи обладнання

Для сучасних виробництв і технологій характерне використання складних систем управління, що отримали назву систем «людина – машина» («людина – техніка»). Єдина діяльність обох ланок системи – технічної і людської – забезпечує виконання функцій, що покладаються на систему в цілому.

Серед основних функцій, що виконуються системами «людина – машина», можна назвати такі:

1) вимірювання окремих параметрів вузлів і станів технологічного циклу. Крім безпосереднього вимірювання величин, дана функція припускає й виконання ряду обчислювальних операцій: лінеаризацію вимірюваних свідчень, екстра- та інтерполяцію значень величин у часі, фільтрацію значень вхідних величин;

2) технічна діагностика, або виявлення подій, пов'язаних з порушенням технологічного процесу, несправністю устаткування й виявленям причин їх виникнення. Виконання цієї функції базується на вимірюванні параметрів (фізичних величин) технологічного процесу і встановленні їх відповідності технологічним допускам.

Крім того, у багатьох випадках діагностика вимагає складного аналізу подій, що відбуваються, включаючи в цей процес і багато неконтрольованих параметрів;

3) управління при виконанні заданої програми роботи виробництва: пуск і зупинення технологічних ліній, машин, механізмів; відключення і підключення потоків сировини та енергії; регулювання технологічних параметрів і режимів тощо;

4) обчислення показників роботи виробничої діяльності: витрати енергії і матеріалів у певний інтервал часу; обчислення техніко-економічних показників;

5) контроль правильності ухвалених рішень і їх реалізації, правильності виявлення порушень і їх причин.

Ефективність роботи автоматизованої системи «людина – машина» залежить від багатьох чинників: технічних характеристик устаткування, принципів можливостей техніки, психофізіологічних якостей особи оператора, ступеня розподілу функцій між людськими і технічними ланками та ін. Разом з тим центральною ланкою системи виступає людина-оператор, на долю якої відводяться найбільш складні і відповідальні завдання з аналізу стану зовнішнього середовища і технічних засобів, з вироблення рішень на проведення операцій і на їх реалізацію.

Вивченням різноманітних аспектів виробничої діяльності людини, проблемами «узгодження» людини з технікою, дослідженням ефективності системи «людина – техніка», що розглядається як єдине ціле, і проектуванням діяльності оператора займаються наукові дисципліни, а саме: інженерна психологія і ергономіка. Вони мають на меті гарантувати, щоб оператор виконував свою роботу ефективно, в комфортних умовах і з мінімумом помилок.

Висока якість праці досягається при ретельному обліку психофізіологічних і інтелектуальних можливостей людини-оператора зі сприйняття й переробки інформації, здібностей до її аналізу, до оцінювання ситуації, швидкості і точності виконання моторних функцій.

До найважливіших умов, які забезпечують високу ефективність діяльності оператора, відносяться повнота, темп і зручність сприйняття інформації за допомогою органів відображення інформації, а також визначення кола операторських функцій. Надання операторові даних, що отримуються від устаткування, ступінь участі оператора в управлінні підсистемами повинні бути такими, щоб при виникненні нестандартних ситуацій не було нездатності до мобілізації інтелектуальних та фізичних ресурсів і, як наслідок цього, помилок в оцінці ситуації й ухваленні рішень.

Звичайно, важливі також питання обладнання безпосереднього робочого місця оператора. На здатність оператора зосередитися роблять вплив і такі чинники, як температура (або її зміни), рівні освітленості, стрес і ступінь необхідної концентрації уваги. Але, в першу чергу, від

зручності сприйняття інформації залежить якість ухвалення рішень, швидкість його виконання.

Засоби відображення інформації, а з ними й органи управління у ході свого розвитку зазнали значної еволюції.

На перших порах в устаткуванні використовувалися прості пристрої, на які покладалося завдання – інформувати людину-оператора про стан того або іншого функціонального модуля. Кількість інформації, що засвоюється оператором протягом одиничного акту сприйняття, в припущенні, що тривалість цього акту достатньо велика, була невеликою. Такі пристрої візуального відображення потрібної інформації вимагали невеликого об'єму уваги. В устаткуванні такого типу зазвичай використовувалися вузли відображення інформації, побудовані на різних (за призначенням, за принципом світловидатності, за фізичними явищами, що лежать в основі) одиничних типах індикаторів.

Автоматизація поліграфічного устаткування зажадала від пристроїв, що управляють, використання складнішого, новішого виду «зв'язку», коли для людини-оператора стан об'єкта управління відображається в досяжній і зрозумілій формі. Такий «зв'язок» відомий під назвою «людина-машинний інтерфейс».

Для забезпечення виконання функцій «людина-машинного інтерфейсу» в устаткуванні передбачені елементи спостереження за його функціонуванням і вузли управління. При цьому перемикачі, кнопки та індикаторні лампи повинні розташовуватися так, щоб їх було добре видно операторові і щоб вони були досяжними. Функції органів управління мають бути, наскільки це можливо, інтуїтивно зрозумілими.

Розташування елементів повинне підкорятися певній логіці, особливо якщо оператор з регулярним інтервалом часу змінює характер роботи. Кольори кнопок і одиничних індикаторів мають допомагати зрозуміти їх призначення.

Слід мати на увазі, що зазвичай для вирішення завдань управління людині-операторові необхідно надати великий об'єм інформації в зручному для нього вигляді із заданою точністю в реальному масштабі часу. Тому характерною особливістю третього етапу розвитку засобів відображення й управління стало використання спеціалізованих режимних пультів – пристроїв, що забезпечують, окрім завдання індикації, можливість втручання людини-оператора в роботу технологічного комплексу за наслідками аналізу отриманої від нього (за допомогою індикаторів) ін-

формації. Такі вузли отримали назву пультів управління та індикації (ПУІ). ПУІ зазвичай виконується в єдиному конструктивно закінченому вузлі, який називається конструктивно-функціональним модулем.

Використання конструктивно-функціональних модулів з мікроконтролерами (МК) дозволяє скоротити час, що витрачається на розробку, уніфікувати ряд конструкторських рішень, понизити загальну вартість розробки.

У складних комплексах поліграфічного устаткування кожен з режимів роботи обслуговується своїм спеціалізованим (режимним) пультом управління та індикації. На кожному з комутаційних елементів пульта (перемикачі, кнопки-табло, тумблери) існує напис (гравіювання, бирка) з назвою параметра або зображенням інтуїтивно зрозумілої дії органу управління. При дії оператора на будь-який комутаційний елемент набір-ного поля параметрів пульта за допомогою напису оператор знає найменування параметра, що висвічується на індикаторі.

Кількість режимних пультів зростає із збільшенням складності поліграфічного устаткування, із зростанням кількості режимів. Оскільки оператор працює в кожному режимі з одним пультом, обслуговуючим цей режим, решта пультів залишається поза полем його уваги, хоча вони завантажують увагу оператора зміною інформації на них. При цьому велику кількість пультів неможливо розмістити в зонах зручної роботи з ними. Тому поява інформації на пульті, що не обслуговується зараз, може бути не відразу локалізована, не відразу може послідувати реакція оператора. Це змушувало оператора значну частину часу швидко переводити погляд з одного приладу на інший і трансформувати свідчення різноманітних приладів, що характеризують окремі сторони явищ, що вивчаються, і процесів у цілісний образ, що дає повне уявлення про процес друку й необхідні дії.

Використання комп'ютерних систем для цілей індикації буквено-цифрових індикаторів дозволило запропонувати ряд нових нетрадиційних рішень для систем управління з обмеженими площами приладових дощок і обмеженим часом реагування на інформацію, що поступає.

Типовою є ситуація, коли на пульті оператора повинні відображатися різні дані в цифровому вигляді – час, положення, температура тощо. Якщо параметрів, що відображаються, багато, то стає дуже дорого і марнотратно мати на кожен параметр свій індикатор. Крім того, важливо обмежити кількість інформації, що виводиться для оператора. За наяв-

ності багатьох індикаторів операторові буде складно виділяти корисну інформацію. У цьому випадку найбільш економічним рішенням є використання способу послідовного читання даних для індикаторів. Цей спосіб застосовується в багаторежимних ПУІ.

Робота такого пульта протікає таким чином. Оператор шляхом натиснення кнопок з відповідними підписами вибирає аналізований параметр і визначає режим роботи вузла устаткування.

Можуть бути використані також цифрові індикатори, в яких у кнопки вбудовані табло з індикаторами. За допомогою кнопки вибору режиму можна змінювати найменування кнопки-табло. У цьому випадку оператор перемикачем режиму включає вибраний режим роботи вузла устаткування. При цьому на кнопках-табло з розміщеними всередині них буквено-цифровими індикаторами висвітляться назви параметрів (замість гравіювань на звичайних кнопках), відповідні вибраному режиму. Впливаючи на ці кнопки-табло, оператор викликає на індикацію значення параметрів, відповідних найменуванням кнопок-табло. При переході на інший режим роботи, який вибирається оператором перемикачем режиму, на кнопках-табло підсвічуватимуться нові найменування (написи), відповідні вибраному параметру.

Наступний етап у вдосконаленні засобів відображення інформації та органів управління пов'язаний з передачею ряду функцій автоматичним пристроям, основними елементами яких є сучасні контролери. Такі пристрої повинні не тільки відображати необхідні символи на дисплеї, синтезувати картинні зображення, відбирати склад даних, що відображаються, але й змінювати склад символів і загальну конфігурацію засобів відображення залежно від етапу роботи устаткування та умов, у яких процес друку протікає.

Останніми роками у складі засобів відображення буквено-цифрової і графічної інформації широко застосовуються плоскі дисплеї, реалізовані на матричних елементах індикації. Порівняно із засобами відображення, що виконані на електронно-променевих трубках, плоскі індикатори, за оцінками, дозволяють зменшити об'єм на 60 %, масу на 70 % і споживану потужність на 80 %. Застосування матричних екранів дає можливість раціонально вибирати символіку для відображення даних, а також організувати елементи індикації з великою кількістю знакомісць.

При цьому зображення можна відносно просто синтезувати за допомогою цифрових електронних засобів. Крім того, при цьому для засо-

бів відображення інформації можна використовувати схеми управління, у яких відсутні високовольтні джерела живлення.

Об'єднання в конструкції плоского екрана елементів індикації з вбудованою електронною системою управління дозволяє гідно конкурувати із засобами відображення інформації на електронно-променевих трубках, що використовували раніше.

Стандартні механічні кнопки і перемикачі в пультах управління та індикації в умовах реального виробництва слабо захищені від дії навколишнього середовища, швидко зношуються. Крім того, вони фактично визначають зовнішній вигляд (дизайн) ПУІ. З цієї причини в даний час йде процес удосконалення пристроїв введення інформації, а саме кнопок і перемикачів.

Для успішного продажу нових поліграфічних виробів дизайнерам необхідна проста і надійна технологія, яка б забезпечувала як сучасний дизайн, так і досконалий інтерфейс «людина – машина». Корисним засобом на цьому шляху є сенсорні програмовані кнопки. Вони є рядом розташованих на сенсорному екрані віртуальних кнопок, призначення і місцеположення яких може бути змінене при зміні зображення на екрані. Поєднуючи в собі область зображення й органи управління, якими користується оператор, сенсорні програмовані кнопки є компактним інтерфейсом. Сучасні так звані сенсорні технології дозволяють створювати панелі управління різноманітної форми і сенсорні дисплеї, які позбавлені таких традиційних проблем минулого, як низька надійність, нестабільність у роботі, грубий дизайн. Сьогодні сенсорні є іноді дешевшими, ніж їх електромеханічні конкуренти.

Однією з перспективних конструкцій ПУІ є сенсорний матричний екран, що працює спільно з рідкокристалічною панеллю. Він становить, за однією з технологій виготовлення, прозору плівкову конструкцію, що розміщується на поверхні рідкокристалічного дисплея. Накладна сенсорна клавіатура використовує систему з пересічних шин, аналогічну тій, що була описана для матричної клавіатури.

У першому наближенні плівкову конструкцію на скляній поверхні екрану можна розглядати як багат шарову комірчасту структуру, що складається з двох прозорих провідних поверхонь, розділених спеціальним ізолюючим складом, розподіленим за всією площею екрану.

Приклад виконання сенсорного пульта управління та індикації показаний на рис. 6.1.

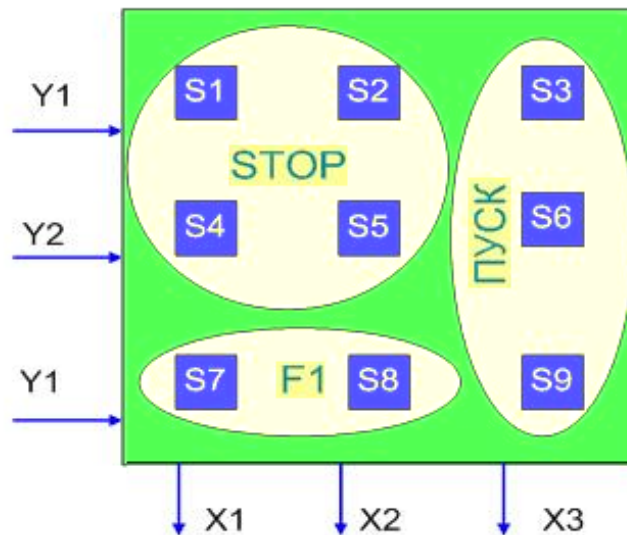


Рис. 6.1. Дев'ятикнопкова сенсорна панель з розміщеним на екрані меню із зображенням трьох кнопок. Сенсорних ключів S1, ... , S9 на екрані дисплея не видно

При натисненні на зовнішній шар конструкції, виконаний з тонкого прозорого оксиду металу, цей шар деформується, внутрішня провідна поверхня його ділянки стосується провідного шару нижньої провідної пластини, що відіграє роль каркаса конструкції, внаслідок чого опір даної ділянки ланцюга істотно зменшується. Наявність замикання фіксує мікроконтролер. Якщо осередки одного шару сполучені із стовпцями провідників, а іншого – з рядками, то можна вважати, що така конструкція є полем сполучених у X-Y матрицю прозорих ділянок, що контактують при натисненні, тобто полем прозорих ключів S1, ..., S9. За принципом дії вона аналогічна матриці механічних ключів, розташованих на відповідній ділянці екрану.

Виводи рядків і стовпців сенсорів з'єднуються із шістьма контактами порту мікроконтролера. Виводи порту для рядків Y1,...,Y3 конфігуруються як виходи, а входи стовпців X1,...,X3 – як входи мікроконтролера. При дотику до ділянки екрану здійснюється програмне сканування з метою визначення місцеположення координат X_{SN} - Y_{SN} «прозорого ключа» SN, під яким знаходиться відповідне зображення запрограмованої кнопки, наприклад, кнопка з написом «Стоп». Мікроконтролер сенсорного екрану виробляє координати точки дотику, і тим самим визначає запрограмовану «кнопку» (softkeys), що відображається на екрані. Залежно від типу сенсорного екрану торкання може здійснюватися пальцем, рукою в

рукавичці, спеціальним пером (стілусом) введення або будь-яким відповідним для цього предметом.

У меню сенсорного пульта управління та індикації, показаному на рис. 6.1, використовується зображення трьох запрограмованих кнопок: «STOP», «ПУСК», «F1». Зображення кнопок на рідкокристалічному індикаторі розташовуються під прозорими ключами сенсорів. Причому зображення кнопки на дисплеї може розташовуватися під декількома сенсорами. При здійсненні сканування визначаються адреси сенсорів, відповідні зображенням натиснутих кнопок. Для зорового підтвердження факту натиснення кнопки оператором її колір може змінюватися.

Зрозуміло, що сенсорний пульт управління та індикації є «гнучким» і універсальним. По-перше, він може бути програмно змінений графічно за бажанням замовника або адаптований під виконання різних функцій. По-друге, програмовані кнопки дозволяють при невеликому об'ємі клавіатури забезпечити наочність і зручність управління з боку оператора у багатьох режимах. У ПУІ з віртуальними кнопками можна користуватися декількома «шарами» меню, великою кількістю «ікон» як програмованими кнопками. Дотиком до зображення програмованої кнопки на дисплеї оператор може легко вибрати відповідний параметр, що відображається, здійснити інтерактивний режим взаємодії з устаткуванням. Усе це дозволяє дизайнерові простою зміною програм змінювати вигляд і призначення кнопок, що відображаються. До того ж це дешевше, ніж застосування безлічі механічних кнопок.

Головна перевага розглянутого матричного пристрою управління та індикації – найнижча серед усіх сенсорних екранів вартість. Крім того, у такого ПУІ відносно висока надійність: навіть при порушенні ізолюючого шару мікроконтролер здатний програмно визначити наявність замикання між електродами конструкції і точно обчислити координати точки дотику. Основний недолік подібних ПУІ – дуже низька роздільна здатність. З цієї причини такі пристрої абсолютно не підходять для роботи зі складними зображеннями мнемосхем. Також слід мати на увазі, що використання крихкого напівпрозорого сенсорного напилення знижує яскравість дисплея, погіршує умови перенесення кольорів.

Матричні сенсорні ПУІ застосовуються в тих випадках, коли потрібний дешевий екран, а програма-додаток допускає низьку точність вказівки положення віртуальних кнопок.

Разом з матричними сенсорними екранами використовують й інші сенсорні технології, що відрізняються одна від одної за принципом прочитування інформації: резистивні, ємнісні, поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) та інфрачервоні.

Резистивна технологія, що набула широкого поширення завдяки своїй простоті, ґрунтується на вимірюванні електричного опору в момент дотику до елемента багатошарової структури, що складається з двох провідних поверхонь.

При *ємнісній технології* координати точки дотику на екрані визначаються завдяки зміні електричної ємності в системі. Висока роздільна здатність, малий час відгуку і висока надійність роблять ємнісну технологію привабливою як для багатьох промислових застосувань, так і для пристроїв масового споживання (ігрові консолі, цифрові камери, MP3-плеєри). На базі ємнісних сенсорів можна будувати ПУІ, що здатні тривалий час працювати в агресивних середовищах.

Сенсорні екрани, що використовують *поверхневі акустичні хвилі* (ПАХ, surface acoustic wave, SAW), є скляною міцною панеллю з п'єзоелектричними перетворювачами. По кутах скляної підстави, яка служить основою конструкції, знаходяться п'єзоелектричні випромінювачі, що генерують ультразвук. По периметру екрана розташовані масиви відбивачів, завдяки яким випромінювана акустична хвиля розповсюджується по всій поверхні екрану й фіксується п'єзоелектричними приймачами. При натисненні екрану пальцем частина енергії акустичних хвиль поглинається, внаслідок чого структура хвиль, що розповсюджуються, змінюється. Приймачі фіксують цю зміну, а мікроконтролер обчислює положення точки дотику.

Перевагою сенсорного ПАХ-екрана є те, що він має високу прозорість, оскільки оптичне випромінювання від дисплея проходить через скло, що не містить резистивних або провідних покриттів. Це найміцніші і «вандалостійкі» ПУІ. Основний недолік екрана на ПАХ полягає в низькій роздільній здатності, через що екрани на ПАХ можна використовувати для роботи з невеликим числом прозорих кнопок, що управляють.

Сенсорні екрани, що використовують *інфрачервону технологію*, для визначення точки дотику застосовують дві лінійки випромінюючих напівпровідникових діодів, розташованих по вертикалі і горизонталі, і дві лінійки фотоприймачів, розташованих на протилежних сторонах екрану. Кожному випромінюючому діоду відповідає свій приймаючий фотодіод.

Інфрачервоні сенсорні екрани мають відносно високу роздільну здатність і можуть управлятися будь-яким непрозорим предметом – олівцем, рукою в рукавичці та ін. На відміну від резистивної та ємнісної технології, інфрачервоні сенсорні дисплеї не використовують крихкі напівпрозорі струмопровідні напилення, тому подряпини, забруднення і навіть тріщини не впливають на працездатність сенсорного екрану. Довговічність інфрачервоних сенсорних екранів, на відміну від екранів інших типів, не залежить від кількості торкань. Крім того, будучи чисто оптичними системами, інфрачервоні сенсорні панелі пропускають від екрану 100 % світла і не вносять ніяких спотворень до «картинки» на екрані дисплея. Зміна яскравості, контрасту і перенесення кольорів зображення, а також поява додаткових відблисків виключена, що також є перевагою екрана.

Інфрачервона технологія – найдорожчий різновид сенсорних екранів. Крім того, інфрачервоний екран може мати недовгий термін служби, що обумовлене деградацією випромінюючих діодів і забрудненням фотоприймачів. Дана технологія має відносно великий час відгуку сенсорної системи на дотик.

Щодо пультів управління та індикації слід відзначити таке.

Незалежно від смислового навантаження, яке несуть ПУІ в устаткуванні, кожен з них виконує такі операції:

- 1) прийом і обробку інформації, тобто її дешифрування, класифікацію відповідно до адресної системи, розсилку за споживаними всередині пульта;
- 2) зберігання отриманої інформації протягом циклу оновлення;
- 3) перетворення, тобто приведення до вигляду, що сприймається приймачами інформації в пульті;
- 4) індикацію інформації;
- 5) шифрування дії оператора на органи комутації пульта управління в електричні сигнали, кодування інформації;
- 6) видачу інформації в мережу.

6.2. Основи і принципи роботи засобів відображення буквено-цифрової інформації на рідкокристалічному модулі

Останнім часом одним з основних видів засобів виведення інформації для сучасних цифрових систем стали рідкокристалічні дисплеї (LCD – liquid crystal display, PKI – рідкокристалічні індикатори). Вони є

відносно недорогими пристроями, забезпечують при хорошій розрізнюваності і низькому енергоспоживанні відображення великого об'єму інформації. Завдяки цьому РКІ широко використовуються в різному промисловому устаткуванні, у вимірювальних приладах, в інформаційних системах, у переносній апаратурі з автономним живленням.

Основу РКІ, LCD складають рідкі кристали (РК). РК за своїми показниками займають проміжне положення між твердим і рідким тілом. З погляду фізики РК – це органічні матеріали, які є проміжною фазою (мезофазою) між твердим станом речовини і рідкою (ізотропною) фазою. Тобто, з одного боку, РК-речовини володіють текучістю і подібно до рідин приймають форму посудини, куди їх поміщають, а також молекули РК рухаються подібно до молекул рідини, вони володіють звичайними властивостями рідини: текучістю, поверхневим натягненням і в'язкістю. Щільність РК близька до щільності води.

З іншого боку, рідкі кристали є анізотропними речовинами, тобто їх електричні та оптичні властивості залежать від напрямку їх спостереження. Молекули РК, на відміну від ізотропної рідини, взаємодіють між собою, створюючи впорядковані стани різних типів. У результаті незвичайної для рідини властивості – впорядкованої орієнтації – такі макроскопічні параметри РК, як діелектрична проникність ϵ і показник заломлення n_{PK} , залежать від орієнтації. Ці властивості властиві зазвичай кристалам.

Рідкокристалічні молекули мають подовжену (витягнуту) паличкоподібну (ниткоподібну) або плоску форму, яка геометрично сприяє паралельності їх взаємного укладання. Упорядкованість структури створюється відносно слабкими силами взаємозв'язку між молекулами або між молекулами та граничними поверхнями. Оскільки ці сили малі, то при підвищенні температури і при перевищенні певного порогу РК перетворюється на звичайну ізотропну рідину. При пониженні температури РК-речовина переходить у твердий стан і втрачає властивості рідини. Поки РК-рідина перебуває в рідкій фазі, структура РК легко перебудовується під дією механічних, електричних або магнітних полів (РК – діамагнітний матеріал, що виштовхується з магнітного поля).

Як рідкі кристали можуть виступати дуже багато органічних сполук, а це близько тисячі різних речовин, але якнайкращі для технічних застосувань результати дають їх суміші. «Класичними» сумішами є МББА (N-(n-метоксибензиліден) – n-(n-бутиланілін)) і ЕББА (N-(n-метоксибензиліден) – n-(п - бутиланілін)), що забезпечують отримання РК властивостей

в інтервалі температур 15 – 70°C. Формула молекули МБА, що має подовжену паличкоподібну форму завдовжки декілька десятків ангстрем і шириною декілька ангстремів, має вигляд (рис. 6.2).

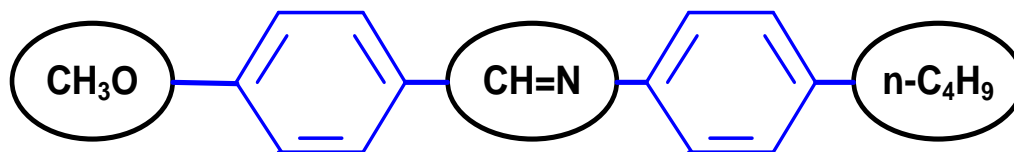


Рис. 6.2. Формула молекули МБА

Орієнтація окремої молекули РК-речовини піддається безперервним тепловим флуктуаціям. Але в будь-якій точці рідини існує середня орієнтація, що характеризується одиничним вектором, що називається директором \vec{D} . Залежно від напрямку директора і взаємного положення центрів тяжіння молекул, тобто способу укладання молекул, розрізняють три різні типи впорядкованого стану, або три основні фази: смектичну, нематичну, холестеричну.

Розташування молекул у цих фазах в спрощеному вигляді показано на рис. 6.3.

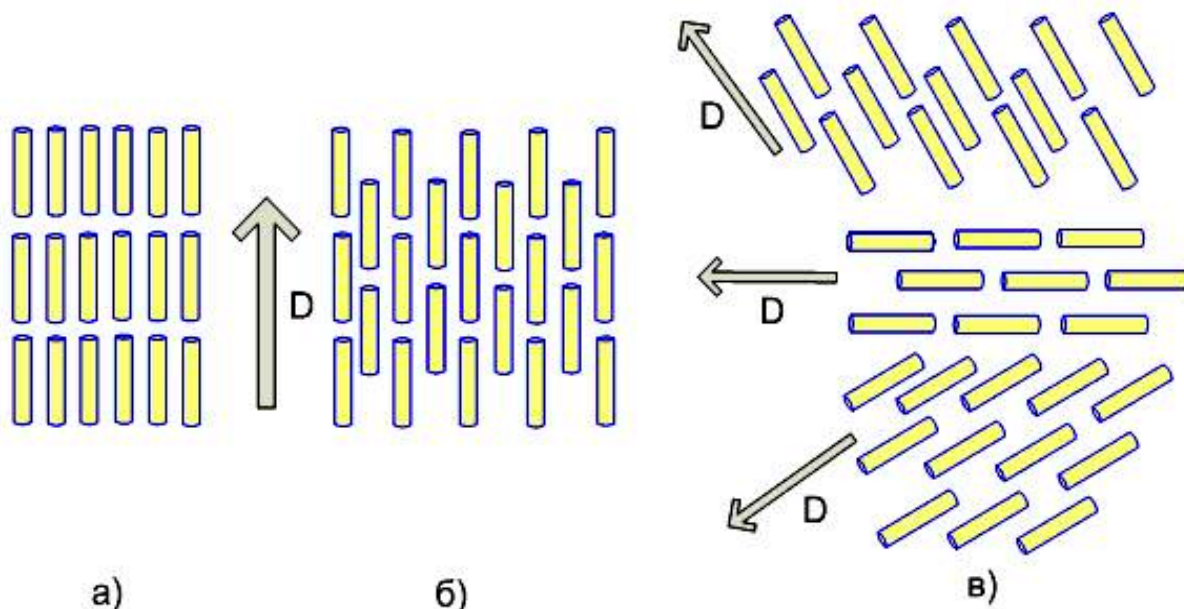


Рис. 6.3. Типи рідких кристалів: а) смектичний; б) нематичний; в) холестеричний

У найбільш впорядкованій смектичній фазі утворюється шарувата структура, причому всередині кожного шару молекули орієнтовані паралельно, а центри їх тяжіння лежать в одній площині. Якщо паралельна орієнтація зберігається, тобто молекули прагнуть орієнтуватися так, щоб їх головні осі були паралельні, але центри тяжіння молекул розташовуються довільно, то виникає нематична фаза. У холестеричній фазі має місце шарувато-спірально-структура впорядкування молекул і закручування директора, так що кінець директора описує гвинтову лінію.

Серед названих структурних різновидів рідких кристалів нематичні (від гр. «німа» – нитка) РК відрізняються найменшою в'язкістю, що забезпечує їх найбільшу швидкодію, що визначається часом переорієнтації молекул $\sim 10^{-1}$ с (10^{-2} – 10^{-3} с у спеціальних робочих режимах). Питомий опір нематичних РК дуже великий (приблизно 10^{17} Ом/см) і для його деякого зменшення, що деколи необхідне, в рідину вводяться органічні домішки, при дисоціації яких виникають вільні іони.

Для практичного використання РК додавання шару РК певних електрооптичних властивостей необхідно, щоб його молекулярна структура вже в початковому стані була впорядкована. Для цієї мети застосовують орієнтуючу дію підкладки.

Є декілька способів створення орієнтуючої поверхні. Кращим орієнтуванням РК виділяються способи, в яких використовуються проміжні шари речовин, що наносяться на внутрішню поверхню контейнера. Орієнтуюча дія досягається натиранням поверхонь підкладок або вакуумним напиленням «під кутом» до поверхні тонких плівок SiO_2 .

У нематичній фазі орієнтуюча дія підкладок може приводити до виникнення: а) планарної (гомогенної); б) нормальної (гомеотропної); в) закрученої (твісторної) орієнтації.

Термін «гомогенна орієнтація» описує випадок, коли в початковому стані директор паралельний поверхням контейнера. Термін «гомеотропна орієнтація» відноситься до директора, перпендикулярного до поверхні підніжки. У цих випадках орієнтація молекул відносно одна одної однакова, проте вони або паралельні, або перпендикулярні підкладці контейнера залежно від її обробки. Для створення закрученої орієнтації підкладки обробляються таким же чином, як і для створення планарної, але при збірці індикатора верхня і нижня частини повертаються щодо одна одної на кут, близький до 90° . У результаті директор РК-шару, ув'язнений між підкладками, плавно повертається.

У РК має місце анізотропія електропровідності, у зв'язку з чим розрізняють компоненти провідності σ_{\perp} та σ_{\parallel} у напрямі, перпендикулярному і паралельному одиничному вектору, що називається директором \vec{D} . Важливим параметром РК, що дозволяє управляти його оптичними властивостями за допомогою електричного поля, є діелектрична анізотропія $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$, де ε_{\parallel} і ε_{\perp} – паралельна і перпендикулярна директорові \vec{D} складові відносної діелектричної проникності.

Оптичні характеристики РК-речовин визначаються різними показниками заломлення для світла з різними відносно до директора напрямками поляризації. Оптична анізотропія приводить до того, що падаючий на РК промінь розділяється на два: звичайний і незвичайний. Звичайний промінь відхиляється порівняно слабо, а незвичайний – сильно. Якщо врахувати, що напрям директора може істотно змінюватися при прикладенні до РК-рідини електричного поля, то звідси витікають широкі можливості електрооптичного управління проходженням світла.

Основою простого індикаторного елемента, що використовує РК для відображення бінарної оптичної інформації (світлий, темний), служить герметизований контейнер у вигляді двох паралельних скляних пластин, що обмазали по периметру клеєм – герметиком. Тонкий внутрішній простір між пластинами заповнений нематичним РК. На внутрішню поверхню скляних пластин-підкладок нанесені електропровідні плівки, використувані для прикладення до шару РК електричного поля, відповідно до інформації, яка повинна бути візуально відображена.

Наприклад, на семисегментному індикаторі можуть бути відображені цифри від 0 до 9 і деякі букви. Відображення різних символів досягається виборчим травленням провідної поверхні, заздалегідь створеної на склі. Невитравлені області стають символами, а витравлені – фоном дисплея. Символи створюються з декількох сегментів, які працюють як заслінки, включаючись і вимикаючись для формування зображень. Сегменти створюються прозорими електродами з оксидів індію та олова, нанесеними на скло РКІ.

У разі відображення інформації великої ємкості, наприклад, для відображення букв і цифр, шрифт яких наближається до друкованих символів, з великим числом елементів і високою однорідністю яскравості, на внутрішню поверхню РК індикаторної панелі наноситься система електропровідних електродів. Звичайно це двовимірний ХУ-матриця електродів,

що управляють. Просторові елементарні комірки, утворені електродами, що знаходяться один під одним і «перетинаються», формують елементарні індикаторні елементи РК, які збуджуються при прикладенні напруги до відповідної пари електродів, відтворюючи, таким чином, один елемент зображення.

Незалежно від використовуваного електрооптичного ефекту, індикаторна комірка може працювати або на просвіт, або на віддзеркалення. У першому випадку обидві пластини прозорі; електродами служать прозорі електропровідні плівки (що володіють високою твердістю та адгезією до скла, прозорістю у видимій області спектру і високою електропровідністю двоокис олова SnO_2 , окисел індію In_2O_3), між якими поміщена РК-речовина. За індикатором розташоване джерело світла. Колір і яскравість індикатора визначаються кольором і яскравістю джерела світла.

У разі роботи індикатора на віддзеркалення «задній» щодо джерела світла електрод виготовлений у вигляді дзеркала. На відповідну пластину наноситься провідна, така, що відображає світло, плівка, наприклад, плівка алюмінію, нікелю, золота. У такого індикатора спеціальне підсвічування відсутнє, оскільки він використовує зовнішнє освітлення, що відображає. В даному випадку конфігурація електродів індикатора визначається або формою початкових пластин, або технологією металізації. Як правило, пластини та електроди плоскі, але в ряді випадків внутрішня поверхня задньої пластини має складну форму, яка створює ряд оптичних елементів, що забезпечують віддзеркалення випромінювання в напрямі джерела світла.

У даний час у пристроях відображення інформації застосовують різні типи індикаторів, які використовують різні електрооптичні ефекти, що утворюються подачею напруги на управляючі електроди: динамічне розсіювання світла, «твіст-ефект» та ін. РК-індикатор був створений на основі ефекту динамічного розсіювання світла.

Суть цього ефекту полягає в такому. Якщо через шар нематичного РК з негативною діелектричною анізотропією пропускати змінний струм низької частоти, то прозорий шар РК «каламутніє». Це відбувається через те, що при прикладенні до осередку напруги, що перевищує порогове значення, протікаючий малий струм породжує якийсь гідродинамічний некогерентний турбулентний рух молекул РК. У результаті виникнення «вихорів» РК повністю втрачає оптичну однорідність і розсіює світло на всіх напрямках. Це явище відоме як «динамічне розсіювання світла».

Тобто матеріал, прозорий у відсутності поля, стає непрозорим. У РК-індикаторі, що працює на віддзеркалення, заднім електродом є дзеркало, на якому при подачі напруги з'являються ділянки молочно-білого світла, форма яких відповідає конфігурації електродів. Якщо задню скляну пластинку індикатора чорнять, то тоді на чорному фоні виникає біле зображення. Якщо конструкція РК-індикатора є системою, що містить анод у вигляді золотого покриття, активне РК-середовище і прозорий окисно-індієвий катод, то при освітленні приладу на одноколірному золотисто-жовтому фоні з'явиться білий малюнок, яскравість якого в 20 – 40 разів перевищує яскравість фону.

У даний час широко розповсюджені індикатори, що використовують твіст-ефект (від англ. *twist* – поворот) у нематичних РК. У конструкції, що працює *на провіт* РК-комірки (рис. 6.4-а), використовуються скляні пластини з нанесеними на них із зовнішнього боку контейнера поляризаційними плівками (поляризатором і аналізатором). При цьому поляризатор і аналізатор орієнтовані перпендикулярно один до одного.

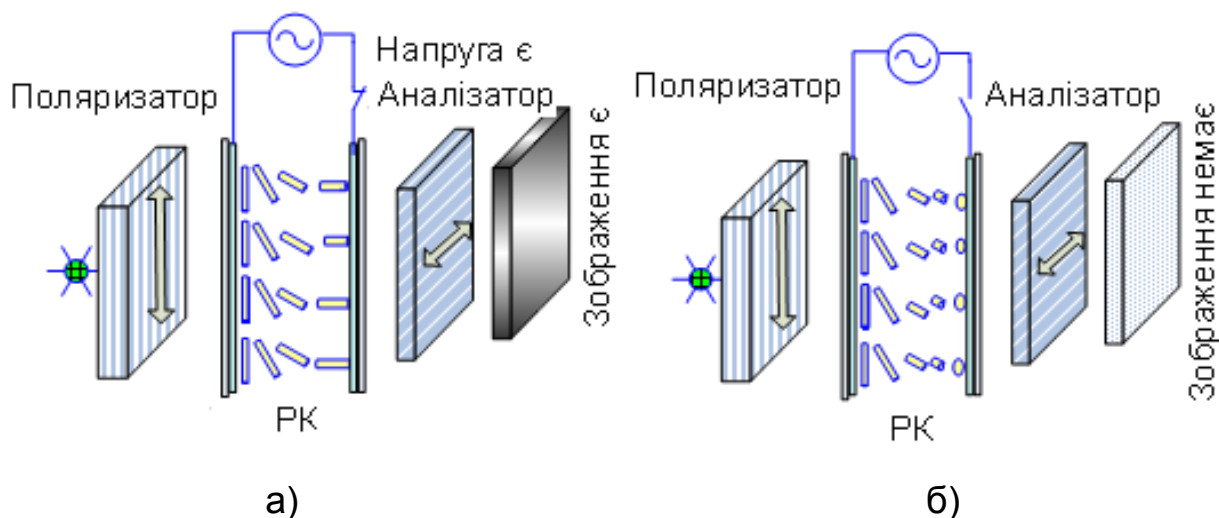


Рис. 6.4. Просвітлений (а) і «темний» (б) стани РК-індикатора на твіст-ефекті при нульовій напрузі і при тій, що перевищує порогове значення на управляючих електродах

У місцях формування зображення з внутрішнього боку контейнера скляні пластинки містять провідні і прозорі до видимого світла шари окислу індію – олова, що створюють електроди. Простір між пластинами заповнюється нематичним середовищем РК з позитивною діелектричною анізотропією.

Для створення закрученої орієнтації молекул у середовищі (щоб директор РК-шару, розташований між підкладками, плавно повертався на кут, близький до 90^0) підкладки обробляються за допомогою однонаправленого натирання поверхонь пластин у взаємно перпендикулярних напрямках. Оскільки завдяки орієнтуючій дії підкладки молекули РК виявляються скрученими на 90^0 ; то, за відсутності зовнішньої напруги, відбувається поворот площини поляризації лінійно поляризованого світла, що пройшло через РК-комірку. Світло, падаюче на РК-комірку зліва, поляризоване таким чином, що його вектор поляризації співпадає з напрямом директора \vec{D} у лівій підкладці.

При проходженні крізь шар РК-речовини площина поляризації світла обертається і при попаданні на праву підкладку виявляється перпендикулярною площині креслення. У результаті світло вільно виходить через аналізатор і потрапляє до спостерігача. Інакше кажучи, за відсутності напруги світло, проходячи через РК-середовище, яке змінює його поляризацію на 90^0 , безперешкодно виходить через аналізатор. На фоні всього простору індикатора рисунок, сформований електродами, непомітний і формування зображення немає.

При прикладенні до электродів комірки напруги, що створює поле значно вище порогового, молекули речовини з позитивною діелектричною анізотропією переорієнтовуються (рис. 6.4-б). Вони прагнуть повернутися по електричному полю і директор придбає горизонтальний напрям. Укладання молекул у РК стане гомеотропним і орієнтованим перпендикулярно пластинам. У цьому випадку РК-комірка не обертає площину поляризації, й тому поляризація світла, що пройшло через РК-комірку, зберігатиметься. Оскільки площини поляризатора та аналізатора, що встановлені по обидва боки РК-комірки, перпендикулярні, то прикладення напруги приведе до відсікання світла на виході аналізатора. Це сприяє формуванню зображення, утвореного світлим фоном і затемненою областю під включеним електродом.

У РК-індикаторах з використанням твіст-ефекту, що працює *на віддзеркалення*, скляні пластини розташовані між поляризатором і аналізатором із схрещеними площинами поляризації. За аналізатором, «заднім» відносно джерела світла, поміщений електрод, який виконує роль дифузного відбивача (рефлектора). Поверхні підкладок, звернені до РК, обробляються, щоб молекули РК у шарах, прилеглих до них, орієнтувалися у взаємно перпендикулярних напрямках. Зовнішнє неполяризоване світло

після проходження поляризатора становить лінійно-поляризовану хвилю, яка впливає на РК. За відсутності електричного поля на управляючих електродах падаюче світло в РК-середовищі «слідuje» за обертанням молекул і після повороту вектора поляризації на 90° проходить через аналізатор та відбивається дифузним відбивачем. При зворотному проході від аналізатора до поляризатора світло знову повертається на 90° у шарі РК-речовини і вільно виходить через поляризатор назовні. За наявності електричного поля орієнтація молекул змінюється, площина поляризації, проходячи через РК-речовину, не обертається й падаюче світло назад не виходить з індикатора. Біля тих ділянок індикатора, на які подана напруга, РК-речовина не здатна обертати вектор поляризації, внаслідок чого промені світла затримуються, тобто не проходять через аналізатор і не відбиваються від рефлектора. Оскільки відбивач дифузний, то на світло-сірому фоні відображаються темні знаки.

Отже, слід пам'ятати, що за виглядом використовуваних фізичних ефектів РК-дисплеї можна розділити на прилади на принципі пропускання, віддзеркалення і перевіддзеркалення світла.

РК-дисплеї на принципі пропускання (Transflective) обов'язково повинні містити тильний модуль підсвічування. У РКІ можна застосовувати світлодіодне (LED) і люмінесцентне (EL) підсвічування. LED-підсвічування відрізняється довговічністю (20 000 – 100 000 годин), не вимагає додаткового джерела живлення, проте в нього достатньо високий струм живлення (від 10 до 100 мА) і великі габаритні розміри (висота індикатора збільшується в середньому на 3 – 5 мм). EL- підсвічування відрізняється вельми низьким струмом живлення при підвищеній світловидатності і малими габаритами, але цей тип підсвічування вимагає додаткового джерела живлення підвищеної напруги (100 В), а термін його служби складає 2 000 – 5 000 годин.

Використання тильних модулів підсвічування РКІ має свої переваги і недоліки. До переваг слід віднести високу якість зображення, а до недоліків – саме необхідність мати модуль підсвічування, що приводить до збільшення товщини конструкції і збільшення енергоспоживання. Крім того, РК-дисплеї Transflective дорожчі, оскільки в них застосовується додатковий елемент підсвічування. Їх рекомендується використовувати в конструкціях, які експлуатуються за будь-яких умов освітлення.

РК-дисплеї Transflective бувають двох типів: Positive і Negative. РК-дисплеї Positive мають прозорий фон, на якому при подачі відповідних

сигналів стають непрозорими певні ділянки. Negative є непрозорим фоном, на якому стають прозорими відповідні ділянки.

РК-дисплеї, що працюють на принципі віддзеркалення (Reflective) і використовують тильний рефлексор, забезпечують хорошу контрастність зображення при великому рівні зовнішньої освітленості. У той же час при застосуванні таких пристроїв у затемнених приміщеннях (освітленість менше 35 кд/м²) необхідне зовнішнє підсвічування. Підсвічування може бути створене на основі світлодіодів.

РК-пристрої відображення інформації, що працюють на принципі перевіддзеркалення, містять прозоро-відбиваючий шар і тильне джерело підсвічування. Це забезпечує можливість прочитування інформації як при яскравому, так і при слабкому рівні зовнішнього засвічення.

Особливості конструктивного виконання РК-дисплеїв відображає система їх позначень. У табл. 6.1 показана система позначень рідкокристалічних індикаторів фірми Powertip.

Таблиця 6.1

Система позначень РК-індикаторів фірми Powertip

Позначення дисплея	<u>P</u>	<u>C</u>	<u>16</u>	<u>02</u>	<u>L</u>	<u>R</u>	<u>S</u>	-	<u>F</u>	<u>SH</u>	-	<u>B</u>	-	<u>X</u>
Номер позиції в позначенні	1	2	3	4	5	6	7		8	9		10		11

Приклад: PC1602 LRS-FSH-B – алфавітно-цифровий модуль серії F з жовто-зеленим світлодіодним підсвічуванням, з контактними отворами, STN позитивний сірий, з англо-російським знакогенератором, на стандартний діапазон температур.

Рідкі кристали є достатньо зручною основою для створення інформаційних табло підвищеної інформаційної ємкості. Принциповою перевагою РК-індикаторів, що визначають їх конкурентоспроможність порівняно з іншими типами індикаторів, наприклад, порівняно зі світлодіодами LED – Light-Emitting Diodes, є: дуже мале енергоспоживання якщо не використовується додаткове підсвічування або підігрів, то питома споживана потужність складає не більше 20 мкВт/см², близько 100 мкА на символ; збільшення яскравості і збереження контрастності при посиленні зовнішнього засвічення; сумісність з мало споживаючими енергію КМОП-

мікросхемами; мала товщина, що робить можливим створення плоских дисплеїв; висока довговічність – термін життя РК-індикаторів, що працюють на змінному струмі, становить від 50 000 до 200 000 годин. Разом з перевагами РКІ властиві недоліки. Найбільш принциповим є істотна температурна залежність параметрів РК-індикаторів, унаслідок чого має місце ефект помилкового прочитування інформації. Це викликає необхідність обмеження температурного діапазону функціонування РК-дисплеїв, особливо в області низьких температур.

До недоліків РК-індикаторів на твіст-ефекті відноситься відносно невеликий кут огляду, що пов'язане з вузькою діаграмою спрямованості світла при твіст-ефекті і впливом поляризаторів. До недоліків РКІ відноситься також порівняно велика інерційність – низьку швидкодію РКІ утрудняє використання мультиплексних режимів, що приводить до створення РК-матриць з великою кількістю зовнішніх виводів.

6.3. Апаратні і програмні рішення для відображення інформації. Загальні відомості про управління рідкокристалічними індикаторними дисплеями

При відображенні інформації на РК-дисплеях важливі не тільки електрофізичні властивості РК, але і схеми управління ними, тобто інтерфейси управління РКІ. Це обумовлено специфікою збудження елементарної РК-комірки, інерційністю РК, а також необхідністю електричної комутації великого числа елементарних комірок, що входять до складу індикаторного поля LCD-дисплея.

Усі РКІ працюють на змінному струмі; при спробах використовувати постійну управляючу напругу (роботу на постійному струмі) істотно знижується довговічність РКІ і час експлуатації дисплея стає неприпустимо малим. Оскільки переважним виявляється збудження РКІ змінним струмом, то зазвичай на електроди передньої і задньої пластин, що управляють, подаються імпульси напруги прямокутної форми (з частотою, зазвичай, 2 кГц) однакової полярності, але зрушені за часом так, що напругою, що управляє, є біполярний сигнал, який не має постійної складової.

Оскільки в РК використовується переорієнтація молекул органічної речовини певної в'язкості, то потрібний певний час для здійснення цього. У зв'язку з цим для РК характерна помітна інерційність (відставання отриманого відгуку від дії) при прикладенні і знятті напруги. Елемен-

тарна комірка РК включається із запізнюванням (час відгуку – $t_{\text{ОТК}}$) на 10 – 20 мс відносно до фронту збудливого імпульсу. Крім того, час виключення і спаду (час релаксації – $t_{\text{РЕЛАК}}$) приблизно на порядок перевищує час включення. Якщо прийняти певні заходи, то час релаксації можна скоротити до 5 – 10 мс. Часи $t_{\text{ОТК}}$, $t_{\text{РЕЛАК}}$ пропорційні в'язкості РК - речовини, яка залежить від температури. При зниженні температури, навіть якщо робоча речовина залишається рідкою, індикаторний прилад може виявитися непрацездатним через погані динамічні властивості РК.

Управління індикатором може здійснюватися у *статичному і динамічному режимах*. При зазвичай вживаному динамічному управлінні просторово розділені розряди працюють послідовно в часі. При цьому, наприклад для сегментних індикаторів, можливі два типи управління – з *послідовною вибіркою знакомісць* і з *послідовною вибіркою цифри*.

Для звернення до елементарної комірки індикатора застосовується метод двокоординатної матричної організації, при якому схема, що управляє, сполучена із стовпцями і рядками. Така схема забезпечує значне зменшення числа каналів управління й виводів індикатора за умови під'єднування до загальних електропровідних шин. Управління РК-матричним екраном здійснюється подачею біполярних імпульсів сканування рядків U_c і інформаційних сигналів $U_{\text{ИНФ}}(t)$, тривалість, амплітуда і форма яких залежить від типу РК-індикатора.

Поліпшити якість зображення можна, якщо при матричній організації в кожен індикаторний елемент ввести електронний ключ, який виключить можливість прикладення напруги до неадресованих елементів матриці. Як показала практика, кращим ключем для РК-дисплея виявляється МОП-транзистор. Зазвичай такі ключі наносяться на підкладку типу скла у вигляді тонкої плівки.

Для генерування необхідних імпульсів управління та адресації, необхідних для ефективного відображення різної інформації, створюється спеціальний електронний пристрій – контролер РК-дисплея. З цієї причини сучасний РК-дисплей – це комплект (модуль), який складається з контейнера з рідким кристалом з виводами, тобто з індикатора, який відображає інформацію, і драйвера, який забезпечує роботу того, що власне показує інформацію.

Якщо в електронну схему входить пристрій пам'яті, який містить таблицю символів, які відображає дисплей, то пристрій називається ко-

нтролером. Контролер управляє драйвером. Інформація від зовнішнього пристрою поступає згідно з певним для кожного контролера протоколом.

Конструктивне виконання РК-дисплея може мати декілька варіантів. Перший з них – це так звана конструкція «кристал на склі» (COG – Chip On Glass), коли драйверна електронна мікросхема розміщена безпосередньо на склі контейнера з РК. Інша технологія виробництва рідкокристалічних індикаторів розміщує кристали управляючих драйверів на платі. При технології COB (COB – Chip On Board – кристал на платі) використовують два варіанти установки мікросхем на плату. Перший — кристал контролера упаковується у пластмасовий корпус з гнучкими або жорсткими виводами, які припаюються до плати. Переваги цього способу: ремонтпридатність, простота установки, а істотний недолік — висока ціна. У цьому випадку при виході з ладу кристала плату просто замінюють новою. Збірка індикаторів за технологією COB гарантує отримання достатньо конкурентоспроможної продукції, повністю відповідної міжнародним вимогам якості. Ще один варіант конструкції припускає розміщення кристала на полімері (COF). У цьому випадку управляюча мікросхема, пасивні компоненти, елементи температурної компенсації і постійний запам'ятовуючий пристрій розташовуються на тонкій поліамідній плівці.

РК-дисплеї, що випускаються промисловістю, підрозділяються на наступні класи: цифрові семисегментні; буквено-цифрові; графічні. Перший клас дисплеїв містить один або декілька рядків, що складаються зі смужок (рис. 6.5).

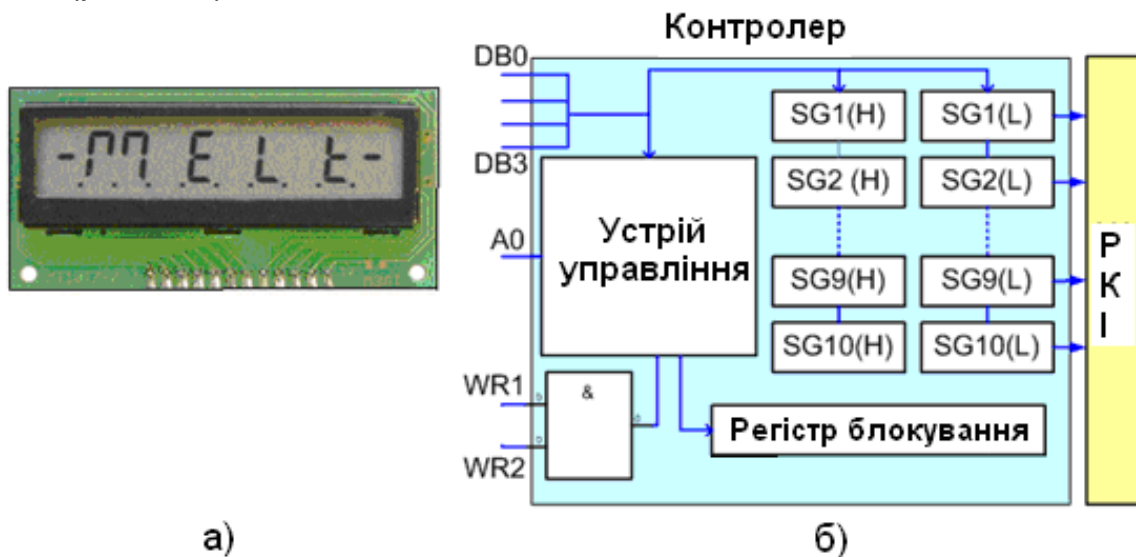


Рис. 6.5. Семисегментний однорядковий дисплей, здатний відобразити 10 знакомісць (а), і його функціональна схема (б)

За виконанням сегментів такі дисплеї схожі на напівпровідникові світлодіодні індикатори.

У знаковинтезуючих індикаторах кожен з розрядів є матрицею точок, за допомогою якої можуть відобразитися не тільки цифри, букви, а й інші символи.

Достатньо поширений індикатор, показаний на рис. 6.5-а, є платою зі склотекстоліту, на якій встановлена інтегральна схема контролера (у безкорпусного виконання) і контейнер з РК. Спрощена функціональна схема індикатора показана на рис. 6.5 б. Контролер містить 10 восьмирозрядних регістрів інформації (SG1 – SG10), кожен з яких управляє роботою одного знакомісця індикатора. Усі регістри SG1 – SG10 розділені на дві тетради, по чотири біти в кожній (на старшу – H і молодшу – L). Розділення управляючих регістрів на напіврегістри необхідне для зменшення кількості виводів, які використовуються для управління. Для зберігання ознаки тимчасового блокування роботи модуля застосовується 11 регістр – регістр блокування.

Модуль має всього чотири входи для запису даних (DB0 – DB3) і три входи управління. Входи DB0 – DB3 використовуються як для введення даних, так і для введення адреси. Для перемикання режимів «Адреса/дані» служить вхід A0. Якщо на цей вхід подати напругу низького логічного рівня, то логічні сигнали на входах DB0 – DB3 інтерпретуватимуться як адреса. Якщо на вході A0 високий рівень, то входи DB0 – DB3 несуть інформацію, необхідну для введення даних. Входи WR1 і $\overline{WR2}$ – це входи дозволу запису. Перший з них є прямим, другий – інверсним. Запис даних або адреси відбувається тільки в тому випадку, якщо рівень сигналу на вході WR1 рівний логічній одиниці, а на вході $\overline{WR2}$ при цьому рівний нулю.

Наявність двох входів дозволяє спростити схему в разі паралельного включення декількох модулів. Якщо модуль тільки один, то зручно вивід $\overline{WR2}$ з'єднати із загальним виводом, тобто точкою нульового потенціалу, а процесом запису управляти за допомогою входу WR1.

Розглянемо логіку роботи модуля РК. Роботу контролера демонструє діаграма сигналів на вході модуля (рис. 6.6).

Припустимо, що треба відобразити якийсь символ у найлівішому розряді індикатора. Для управління цим розрядом служить регістр SG1, тому для відображення символу потрібно буде в регістр SG1 записати

код, який відповідає висвічуваному символу. Але перед цим потрібно «повідомити» модуль, який регістр будемо використовувати, тобто слід спочатку передати в модуль адресу цього регістра.

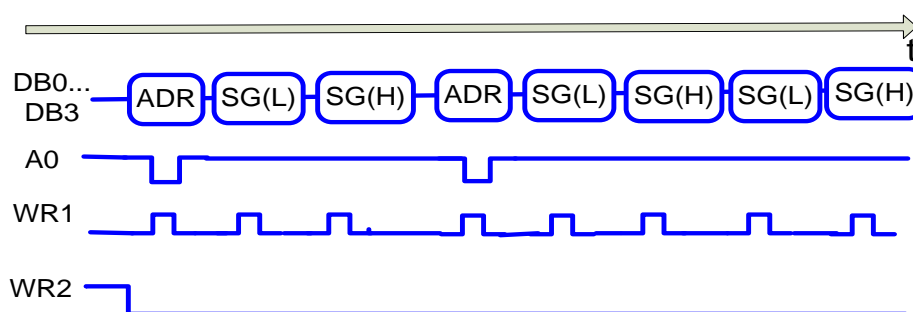


Рис. 6.6. Діаграма управляючих сигналів на вході контролера

Процес передачі адреси відбувається таким чином. Перш за все, на входи DB0 – DB3 подається значення адреси регістра. Згідно з табл. 6.2 ця адреса для регістра SG1 рівна 00H. Потім на вході A0 встановлюють низький логічний рівень сигналу й завершується процес запису адреси позитивним імпульсом на вході WR1 за умови, що на вході $\overline{WR2}$ нуль. За переднім фронтом цього імпульсу значення адреси записується у внутрішній регістр адреси модуля.

Таблиця 6.2

Таблиця адрес і регістрів

Номер знакомісця	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Назва регістра	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10	блок
Адреса (HEX)	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0F

Після прийому півбайта адреси починається запис у регістр SG1 коду, який відповідає висвічуваному символу. Код записується у два прийоми: спочатку – молодший півбайт, потім – старший. Півбайти записуються один за одним. При записі система управління контролером автоматично поміщає перший з отриманих півбайтів у молодшу частину ре-

гістра [SG1(L)], а другий півбайт – у старшу його частину [SG1(H)]. Запис даних відбувається так само, як і запис адреси, але при цьому на вході A0 вже присутній сигнал логічної одиниці (рис. 6.6).

У процесі запису першого висвічуваного символу, коли на вході DB0 – DB3 подається молодший півбайт, за допомогою позитивного імпульсу на вході WR1 записується інформація в модуль. Потім, коли на вході DB0 – DB3 подається старший півбайт, наступний одиничний імпульс на вході WR1 записує його в модуль. Після запису обох півбайтів значення адреси у внутрішньому регістрі автоматично збільшується на одиницю. Це дозволяє записати коди символів у декілька регістрів підряд. На діаграмі показано, що після одноразового запису першої адреси і байта даних здійснюється запис другої адреси, а потім йде запис двох символів підряд.

Розглянемо тепер, які коди записуються в регістр модуля, щоб висвітити на РК-екрані той або інший семисегментний символ.

Уже наголошувалося, що при використанні семи сегментів і точки можна шляхом подачі відповідних рівнів сигналу на відповідний сегмент сформувати відповідне зображення символу (рис. 6.7).

У табл. 6.3 і 6.4 показана відповідність розрядів регістра і сегментів індикатора, якщо на індикаторі відображати символи цифр (0 – 9), букви латинського алфавіту від «А» до «F», а також символи градуса, мінуса, букв «r» і «o», які використовуються для виводу на індикатор слова «Error» (Помилка).

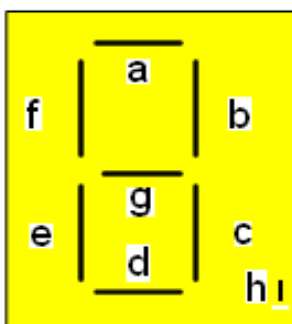


Рис. 6.7. Розташування сегментів індикатора

Досить подивитися на зображення індикатора і уявити собі, які із сегментів повинні бути відображені для того або іншого символу, тоді не

варто проставляти в рядку, відповідному кожному із сегментів, або 0, або 1: 0 – якщо сегмент повинен бути вимкнений, а 1 – якщо включений.

Таблиця 6.3

Відповідність розрядів регістра і сегментів індикатора

Розряд	Сегмент	Символи									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DB0(L)	g	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
DB1(L)	e	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
DB2(L)	d	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
DB3(L)	a	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
DB0(H)	h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DB1(H)	b	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
DB2(H)	c	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
DB3(H)	f	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Таблиця 6.4

Відповідність розрядів регістра і сегментів індикатора

Розряд	Сегмент	Символи									
		A	b	C	d	E	F	0	-	r	o
DB0(L)	g	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
DB1(L)	e	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
DB2(L)	d	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0
DB3(L)	a	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
DB0(H)	h	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
DB1(H)	b	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
DB2(H)	c	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1
DB3(H)	f	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1

Відмітимо, що регістр блокування – це всього 1 біт, який відповідає входу DB0. При записі нуля в цей регістр робота модуля блокується, а

запис в решту всіх регістрів модуля стає неможливим. Режим блокування діє 30 циклів запису.

Однорядковий модуль відображення інформації на 10 знакомісць відносно просто підключається до МК. Оскільки вхід $\overline{WR2}$ підключений до точки нульового потенціалу, то для управління модулем буде потрібно всього 6 ліній порту.

Для управління знаковисинтезуючими індикаторами, за допомогою яких можуть відображатися не тільки цифри, букви, але й інші символи, також використовують спеціальні контролери. Багато фірм випускають рідкокристалічні індикатори з вбудованими контролерами, що полегшують реалізацію інтерфейсу PKI і мікропроцесора.

У даний час найширше застосовується контролер HD44780, розроблений компанією Hitachi. Наявність у даного контролера багатьох режимів виводу, визначуваних користувачем символів дозволяє розробляти зручні інтерфейси управління і пристрої індикації. Чотирибітовий режим виводу дає можливість задіювати мінімум портів мікроконтролера.

Оскільки контролер HD44780 може управляти відображенням інформації, що складається з двох рядків по 40 матричних символів у кожній, то виводи мікросхеми, позначені SEG1-SEG40 і COM1-COM16, підключаються до електропровідних ділянок матричного індикатора, виконаного на рідких кристалах.

Обмін інформацією з управляючим МК зазвичай здійснюється за допомогою виведеного на плату стандартного 14-контактного роз'єму. Три виведення цього роз'єму призначено для подачі живильної напруги і напруги зсуву, яка управляє контрастністю дисплея. Виведення V0 призначене для регулювання контрастності зображення. Потрібну для цієї мети напругу можна отримати за допомогою дільника напруги, виконаного на змінному резисторі (зазвичай опором 10 кОм) і включеного між потенціалом джерела і «землею».

У модулі HD44780 використовуються два види пам'яті: а) пам'ять даних (DDRAM – Display Data RAM), що відображаються, або відеопам'ять; б) пам'ять знакогенератора (CGRAM – Character Generator RAM), призначена для зберігання бітових комбінацій, які відповідають матриці розміром 5 x 8 або 5 x 10, що визначає символ, який відображається. Доступ як до однієї, так і до іншої пам'яті здійснюється за поточною адресою, що зберігається в лічильнику адреси.

Відеопам'ять DDRAM (Display Data RAM), призначена для зберігання даних (код матричних символів, що відображаються на LCD), що відображаються, має загальний об'єм 80 х 8 бітів. Відеопам'ять дозволяє зберігати інформацію про 80 знаків, поданих у 8-розрядному кодуванні ASCII.

Адреси DDRAM у шістнадцятирічному уявленні залежно від позиції елемента пам'яті показані на рис. 6.8. Адресація до відеопам'яті завжди проводиться як до двох рядків по 40 символів незалежно від того, скільки реальних рядків відобразатиметься на реальному LCD-модулі, скажімо, 80 х 1, 20 х 4 (рис. 6.9). Пам'ять розбита на дві половини по 40 (28HEX) байтів кожна, причому між останньою адресою першого рядка і першою адресою другого рядка є розрив у 24 байти. Перший рядок починається з адреси 00HEX, а друга – з адреси 40HEX.

На табло з одним рядком можуть бути одночасно відображені 8 символів, а на дворядковому – 16.

За допомогою операції зрушення необхідні символи можуть опинитися в області, що відображається (рис. 6.10).

Display position (digit)	1	2	3	4	5	.....	79	80
DDRAM address (hexadecimal)	00	01	02	03	04	.....	4E	4F

Рис. 6.8. Адреси елементів пам'яті даних, що відображаються (DDRAM – Display Data RAM)

Display position	1	2	3	4	5	.....	39	40
DDRAM address (hexadecimal)	00	01	02	03	04	.....	26	27
	40	41	42	43	44	.....	66	67

Рис. 6.9. Адреси елементів пам'яті даних (DDRAM – Display Data RAM), що відображаються, при зверненні до відеопам'яті як до двох рядків по 40 символів

Display position	1	2	3	4	5	6	7	8
	00	01	02	03	04	05	06	07
DDRAM address	40	41	42	43	44	45	46	47
	01	02	03	04	05	06	07	08
For shift left	41	42	43	44	45	46	47	48
	27	00	01	02	03	04	05	06
For shift right	67	40	41	42	43	44	45	46

Рис. 6.10. Адреси елементів пам'яті даних (DDRAM – Display Data RAM), що відображаються, при відображенні символів у 2 рядки і зрушеннях вліво і вправо

Окрім DDRAM, контролер LCD містить ще один пристрій – пам'ять знакогенератора (CGROM – Character Generator ROM). Часто цю пам'ять називають знакогенератором, який «прошитий», тобто який має однозначну відповідність між «зображенням» і кодом символу. Знакогенератор – це пам'ять типу ROM, призначена для зберігання бітових комбінацій, відповідних матриці розмірами 5 x 8 або 5 x 10. У цій пам'яті можна зберегти інформацію про 208 (у разі матриці 5 x 8) або 32 (у разі матриці 5 x 10) символи. Набір символів, «прошитих» у знакогенераторі, та адресація знаків показані на рис. 6.11.

Для визначення в пам'яті CGROM адреси символу використовується двійковий код. Чотири старші розряди коди визначають позицію символу по горизонталі (в рядку таблиці на рис. 1.11), а чотири молодших – по вертикалі (у стовпці цієї ж таблиці). Наприклад, адреса букви «А» буде 01000001, що у шістнадцятиричному уявленні – 41HEX.

У користувача є можливість створити власні символи для відображення на табло. Для цього служить пам'ять CGRAM, у яку можна записати бітовий шаблон для восьми (в разі матриці 5 x 8) або чотирьох (у разі матриці 5 x 10) різних знаків. Перепрограмована частина знакогенератора містить 64 байти пам'яті.

Для кожного з восьми перепрограмованих символів у пам'яті CGRAM відводиться по 8 елементів пам'яті, кожен з яких відповідає од-

ному рядку зображення символу. Створення власних символів для матриці 5 x 8 показано на рис. 6.12.

Lower 4 Bits \ Upper 4 Bits	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
xxxx0000	CG RAM (1)		0	a	P	`	P				-	9	ε	α	ρ	
xxxx0001	(2)		!	1	A	Q	a	9			•	7	7	4	ä	q
xxxx0010	(3)		"	2	B	R	b	r			Г	И	У	×	Р	θ
xxxx0011	(4)		#	3	C	S	c	s			┘	ウ	テ	ε	ε	ω
xxxx0100	(5)		\$	4	D	T	d	t			、	工	ト	ト	μ	Ω
xxxx0101	(6)		%	5	E	U	e	u			•	オ	ナ	1	ε	Ü
xxxx0110	(7)		&	6	F	V	f	v			ヲ	カ	ニ	ヨ	ρ	Σ
xxxx0111	(8)		'	7	G	W	g	w			フ	キ	ヌ	ウ	g	π
xxxx1000	(1)		(	8	H	X	h	x			イ	ウ	ネ	リ	Γ	×
xxxx1001	(2)		)	9	I	Y	i	y			ウ	ケ	ル	ル	"	γ
xxxx1010	(3)		*	:	J	Z	j	z			エ	コ	ン	ル	j	≠
xxxx1011	(4)		+	;	K	C	k	c			オ	サ	ヒ	ロ	*	π
xxxx1100	(5)		,	<	L	≠	l	l			カ	シ	フ	ワ	φ	π
xxxx1101	(6)		-	=	M	J	m	j			ユ	ヌ	ハ	コ	ε	÷
xxxx1110	(7)		•	>	N	^	n	+			ヨ	セ	ホ	ハ	ñ	
xxxx1111	(8)		/	?	O	_	o	+			ウ	リ	マ	マ	ö	

Рис. 6.11. Набір символів знакогенератора (CGRAM – Character Generator RAM) і їх адресація

Character Codes (DDRAM data)								CGRAM Address				Character Patterns (CGRAM data)																																													
7	6	5	4	3	2	1	0	5	4	3	2	1	0	7	6	5	4	3	2	1	0																																				
High				Low				High				Low				High				Low																																					
0 0 0 0 * 0 0 0								0 0 0				0	0	0	*	*	*	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0 0 0 0 * 0 0 1								0 0 1				0	0	0	*	*	*	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0 0 0 0 * 1 1 1								1 1 1				1	0	0	*	*	*																																								

Рис. 6.12. Створення власного шаблону символу при використанні CGRAM

Для відображення власних символів користувача зарезервовані ASCII-коди з адресами \$00-\$07. У таблиці, показаній на рис. 6.12, лівий стовпець містить ASCII-код символів. Старший півбайт, за визначенням, для всіх знаків містить нуль. Розряди 0-2 ASCII-кодів відповідають розрядам 3-5 адрес пам'яті CGRAM, що показана в середньому стовпці. Розряди 0-2 адрес CGRAM задають адресу рядка в бітовій комбінації (пра-

вий стовпець). Сам символ задається порядково. Восьмому рядку відповідає позиція курсора. Тій позиції в матриці, в якій повинна відобразитися точка на табло, призначається 1.

Таким чином, інформація про символ зберігається в розрядах 0-4 восьми байтів даних. Наприклад, символу «R» відповідає вісім байтів, розташованих у CGRAM-пам'яті за адресами \$00–\$07, які містять значення \$1E, \$11, \$11, \$1E, \$14, \$12, \$11, \$00.

Багато інформації про ці індикатори можна знайти в Internet. Можна також зачати в Internet готову прошивку для контролера 16F84. Прошивка циклічно виводить весь знакогенератор PKI і може бути використана для тестування таких індикаторів.

Усі функції управління дисплеєм реалізуються за допомогою команд. У модулі також використовується вбудована схема скидання по включенню живлення.

Наявність 4-бітового режиму виводу дає можливість задіяти мінімум портів мікроконтролера.

Практичні завдання

1. Розгляньте особливості виводу на LCD-дисплей інформації про стан і режими роботи сучасного комп'ютеризованого поліграфічного устаткування, побудованого на основі сучасних МК, при використанні бібліотечних функцій на мові СІ.

2. Дослідіть додаткові можливості виведення інформації на екран дисплея. Розгляньте особливості виведення російського тексту, при цьому передбачається, що в генераторі символів повинні бути «зашиті» російські букви.

3. Виконайте моделювання пристрою відображення букв російського алфавіту, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2.

Виконайте моделювання пристрою формування (генерації) на виведенні МК послідовності імпульсних сигналів певної частоти, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2.

4. Поясніть особливості виводу на LCD-модуль (дисплей) перевизначуваних символів, графічне зображення яких може призначити сам користувач, помістивши відповідну інформацію в область CGRAM.

Розглянемо можливу реалізацію цього завдання.

Припустимо, що кодований символ має вигляд, який наведений у табл. 6.5. Для кодування матриці використовуються «горизонтально укладені» байти, п'ять молодших розрядів яких несуть інформацію про зображення. При цьому 1 означає, що точка буде включена, а 0 – ні. Старші біти не застосовуються.

Таблиця 6.5

Вигляд кодованого символу

Адреса рядка символу 2 (код символу 0 x 02)	Графічне зображення	Біти рядка символу 2 (код символу 0 x 02)
		Bt76543210
1-й рядок 0x10 (16)		0b00001110 = 0x0E
2-й рядок 0x11 (17)		0b00010001 = 0x11
3-й рядок 0x12 (18)		0b00011011 = 0x1B
4-й рядок 0x13 (19)		0b00010101 = 0x15
5-й рядок 0x14 (20)		0b00010001 = 0x11
6-й рядок 0x15 (21)		0b00010101 = 0x15
7-й рядок 0x16 (22)		0b00001110 = 0x1E
8-й рядок 0x17 (23)		0b00000000 = 0x00
	4 3 2 1 0 (біти)	

Тоді масив (таблиця) для визначення символу, якщо його помістити в пам'ять flash мікроконтролера, матиме вигляд:

```
flash byte char2[8]=
{0b00001110
0b00010001
0b00011011
0b00010101
0b00010001
0b00010001
0b00010001
0b00001110
0b00000000};
```

Як уже наголошувалося, код адреси комірки в пам'яті CGRAM, призначеній для відображення власного символу користувача, визначається

таким чином. Нехай символ, що підлягає кодуванню, буде другим символом (byte number_char=2) в пам'яті CG RAM. Як відомо, під кожен символ у пам'яті CGRAM відводиться 8 байтів. При цьому байти нульового символу мають адреси (CGRAM Address) 0x00-0x07, байти першого символу – 0x08-0xF, а n-го символу (nx8) – (nx8+7). Тобто щоб отримати адресу (назвемо її умовно command_addr) наймолодшого байта символу, треба номер символу (позначимо його як number_char) помножити на 8, тобто отримати number_char*8. У даному випадку для байтів 2-го символу адреси будуть (2x8) – (2x8+7), тобто від 16 до 23 в десятковій системі числення. Для реалізації функції установки адреси, як впливає з довідкової табл. 6.6, на шину DB0-DB7 у регістр команд (IR – Instruction Register) треба подати комбінації бітів управління.

Таблиця 6.6

Список комбінацій бітів управління, які посилаються МК по шині DB0-DB7 у регістр команд для реалізації функції установки адреси, та опис виконуваних при цьому дій

Команда	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0	Опис команди
Установка адреси пам'яті знакогенератора CGRAM	Адреса елемента пам'яті знакогенератора CGRAM-AGG								Установка лічильника адреси ОЗУ CGRAM у стан, що визначається значенням AGG. Після цієї команди дані записуватимуться і прочитуватимуться в/із CGRAM
Установка адреси пам'яті даних DRAM, що відображаються	Адреса елемента пам'яті даних DDRAM, що відображаються, Add								Установка лічильника адреси DDRAM у стан, що визначається значенням Add. Після цієї команди дані записуватимуться і прочитуватимуться в/із DDRAM

Щоб отримати необхідний код команди установки адреси в CGRAM, слід встановити в одиницю 6 біт, а 7 біт – у нуль (див. табл. 6.6). Це можна зробити, додавши до адреси наймолодшого байта символу число 0b01000000. Оскільки для вказівки адреси комірок CGRAM Address відводиться 6 молодших бітів, то адреса будь-якого байта символу `number_char` визначатиметься виразом:

```
command_addr = (number_char*8)+ 0b01000000.
```

Весь масив байтів `char2` для другого символу, визначеного користувачем, можна отримати, використовуючи цикл `for`. Наприклад:

```
for (i=0;i<8;i++)  
{  
  lcd_write_byte(command_addr++,char2[i]);  
};
```

5. Покажіть особливості виводу на LCD-модуль англійського і російського текстів.

Розглянемо можливу реалізацію цього завдання.

Рядок, що призначений для виводу на LCD-модуль і містить англійський текст і цифри, у програмі Cі можна записати декількома способами, оскільки коди адрес символів Windows і контролера LCD-дисплея (значення адрес DDRAM) з «прошитими» англійськими буквами співпадають:

```
/* Запис визначення рядка "Текст", що містить англійські літери*/  
char string[] = «Text»;  
char string[] = {'T', 'e', 'x', 't', '\0'};  
char string[] = {0x54, 0x65, 0x78, 0x74, 0x00};
```

Вивід на екран символу проводиться записом його кодів у регістр даних DR (Data Register) модуля HD44780. Після проміжного зберігання ці дані автоматично передаються в пам'ять даних, що відображаються (DDRAM – Display Data RAM). При цьому символ розміщується в DDRAM за поточною адресою, що вказується лічильником адреси СА-контролера, і значення СА збільшується на одиницю. Щоб провести передустановку курсора на потрібну позицію, необхідно привласнити СА спочатку відповідне значення.

При виведенні двох рядків треба мати на увазі одну тонкість. Якщо проводиться послідовний запис символів і їх число перевищує довжину рядка, то, коли заповнюється весь перший рядок (рис. 6.9), курсор авто-

матично переходить на другий рядок. Але якщо необхідно примусово, наприклад, після проходження неповного першого рядка, встановити курсор, скажімо на початок другого рядка (рис. 6.9), то треба перейти на адресу DDRAM 0x40 (десятковий 64).

Обчислення адрес комірок відеопам'яті DDRAM у загальному випадку проводиться таким чином. Нехай ставиться завдання вивести слово "Hello!" в середину першого рядка, тобто перша буква повинна бути виведена в 5 знакомісце, а в середину другого рядка – слово "Victory!", тобто перша буква повинна бути виведена в 4 знакомісце. Адреси елементів пам'яті першого рядка починаються з \$00. Отже, щоб отримати адресу (назвемо її умовно `command_addr`) нульового (\$00) елемента пам'яті першого рядка треба привласнити цьому осередку значення `command_addr=0b10000101`. Це значення є, згідно з табл. 6.6, кодом з одиницею в старшому розряді і записаною з решти розрядів адресою п'ятого елемента пам'яті даних DDRAM, що відображаються (`Add=0b0000101`). Адреси, що відводяться під решту букв, відрізнятимуться на одиницю. Щоб отримати адресу символу, треба до `command_addr` додати одиницю; для символу `l` треба до `command_addr` додати 2 і т. д. У цілому виведення рядка тексту англійською мовою у вигляді програми на мові Cі матиме вигляд:

```
lcd_clear();  
command_addr=0b10000101;  
lcd_write_byte(command_addr,'H');  
lcd_write_byte(command_addr+1,'e');  
lcd_write_byte(command_addr+2,'l');  
lcd_write_byte(command_addr+3,'l');  
lcd_write_byte(command_addr+4,'o');  
lcd_write_byte(command_addr+5,'!');
```

Контрольні запитання

1. Назвіть і поясніть основні функції, що виконуються системами «людина – машина».
2. Назвіть і поясніть особливості етапів розвитку засобів відображення й управління поліграфічного устаткування.
3. Наведіть і поясніть приклад виконання матричного сенсорного пульта управління та індикації.

4. Назвіть і поясніть особливості сенсорних технологій, що відрізняються одна від одної за принципом прочитування інформації.
5. Поясніть принцип роботи сенсорних екранів, що використовують ємкісну технологію.
6. Поясніть принцип роботи сенсорних екранів, що використовують поверхневі акустичні хвилі.
7. Назвіть, які операції виконує пульт управління та індикації.
8. Що таке рідкі кристали? Як вони використовуються в засобах відображення в поліграфічному устаткуванні?
9. Поясніть пристрій простого індикаторного елемента, в якому використовуються РК для відображення бінарної оптичної інформації.
10. Що таке РК-індикатор на основі ефекту динамічного розсіювання світла? У чому полягає суть ефекту і принцип роботи індикатора?
11. Поясніть особливості РК-дисплея на принципі пропускання.
12. Поясніть особливості роботи РК-дисплеїв, що працюють на принципах віддзеркалення (Reflective) і перевіддзеркалення.
13. Перерахуйте і поясніть основні переваги та недоліки рідкокристалічних індикаторів (РКІ).
14. Назвіть і поясніть на які класи підрозділяються РК-дисплеї, що випускаються промисловістю?
15. Що зазвичай використовують для управління знакосинтезуючими індикаторами? Поясніть їх.
16. Поясніть, як користувач може створити власні символи для відображення на табло.
17. Поясніть принцип роботи сенсорних екранів, що використовують технологію поверхневих акустичних хвиль.
18. Як рідкі кристали використовуються в засобах відображення в поліграфічному устаткуванні?
19. Поясніть приклад створення власного шаблону символу при використанні CGRAM.
20. Які коди записуються в регістр модуля, щоб висвітити на РК-екрані той або інший семисегментний символ?
21. Поясніть систему позначень РК-індикаторів фірми Powertip.
22. Назвіть перевагу сенсорного ПАХ-екрана.
23. Що застосовують сенсорні екрани, що використовують інфрачервону технологію, для визначення точки дотику?

Тема 7. Мікроконтролерні системи вимірювання й перетворення інформації у поліграфічному обладнанні

7.1. Забезпечення проведення вимірювань аналогових величин

7.1.1. Початкові відомості про аналогові сигнали і засоби введення даних комп'ютеризованих систем

І людина-оператор, і комп'ютеризована система поліграфічного устаткування потребують інформації про стан спостережуваних об'єктів та процесів, що в них відбуваються, чи то вузол поліграфічної машини, чи то компонентний склад фарби при кольоровому друці.

Метою проведення процедур збору й обробки даних є отримання достовірної інформації про стан об'єкта і раціональна організація процесів контролю, вимірювання з високими якісними характеристиками.

Зростання складності поліграфічних об'єктів управління, контролю, вимірювання, вдосконалення технологічних процесів друку зумовили необхідність високого ступеня автоматизації всіх процедур контролю, вимірювання параметрів технологічних процесів.

Широке впровадження досягнень мікроелектроніки і мікроконтролерної техніки привело до того, що багато різних за своєю фізичною суттю завдань вирішуються на основі використання автоматизованих систем збору й обробки даних (СЗОД), які базуються на застосуванні мікроконтролерів як елементної бази мікроелектроніки.

У більшості випадків технічні засоби для реалізації автоматизованих СЗОД повинні містити комплекс пристроїв, що реалізують завдання введення інформації в мікроконтролер (МК) без участі людини-оператора, а саме: завдання має вирішуватися на основі введення датчиків первинної інформації для перетворення вимірюваних неелектричних величин у пропорційні електричні.

Якщо інформація про стан спостережуваних об'єктів і процесів, що відбуваються в них, поступає від первинних вимірювальних пристроїв у

вигляді електричних сигналів, то, в загальному випадку, виходячи з вимог введення інформації, СЗОД повинна містити:

а) групу датчиків первинної інформації, розміщених у безпосередній близькості від об'єкта управління, контролю або вимірювання;

б) блок перетворювачів інформації датчика в сигнал, вид якого прийнятний для «ухвалення» його МК і подальшої обробки.

Раніше розглядалися датчики, які перебували у двох станах (увімкнено-вимкнено) і, відповідно, розглядалися сигнали, що за своєю природою є бінарними («0», «1») або цифровими.

Проте часто необхідно контролювати стан об'єктів, характеристики яких можуть приймати будь-які значення в деякому заздалегідь відомому діапазоні.

Типовими характеристиками подібного роду є температура, тиск, витрата речовини, швидкість і т. д. У цьому випадку сигнал, що видається датчиком, має аналогову форму, що описується безперервною в часі функцією з миттєвими значеннями, які знаходяться в деякому інтервалі.

Відповідно, при отриманні інформації про стан спостережуваних об'єктів і процесів, доводиться мати справу з так званими аналоговими сигналами. При цьому треба мати на увазі, що, взагалі кажучи, використання цифрової форми подання сигналів забезпечує стабільність при обробці інформації, тобто незалежність від часу і впливу змін у навколишньому середовищі, можливість побудови компактної, економічної апаратури.

Використання цифрової форми подання сигналів може також забезпечити високий захист від перешкод при передачі сигналів. У зв'язку з цим широкого поширення набувають СЗОД, у яких аналогові сигнали, що поступають на вхід, перетворюються в цифрову форму, отримані цифрові сигнали обробляються або передаються.

Перетворення сигналів з аналогової форми в цифрову здійснюється пристроями, що називаються *аналого-цифровими перетворювачами*.

Процес сприйняття від контрольованого об'єкта фізичної величини, яка характеризує його стан, отримання аналогового сигналу з датчика фізичної величини, його попередня обробка, перетворення в цифрові дані й передача інформації в цифровій формі в МК називається комп'ютеризованим збором даних (інформації).

Функціональна схема узагальненої системи збору інформації на основі МК показана на рис. 7.1.

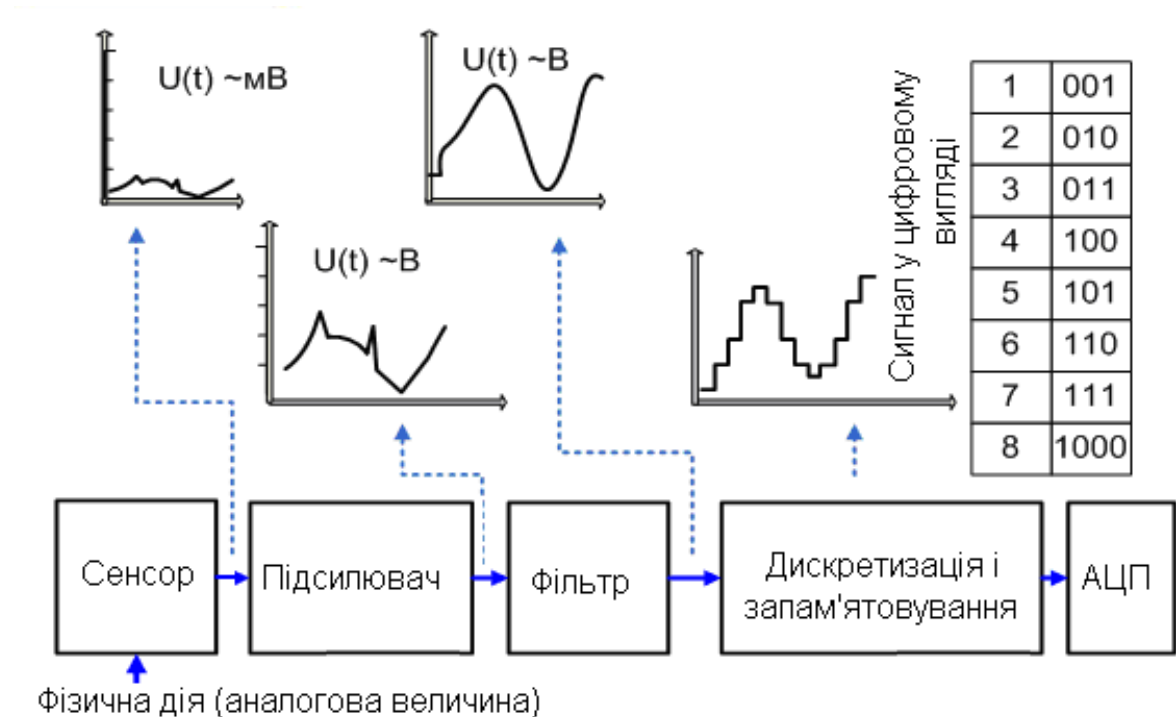


Рис. 7.1. Функціональна схема узагальненої системи збору інформації

Фізичні поля, або фізичні дії, як, наприклад, тепло (температура), тиск, оптичне випромінювання, радіація, магнітне поле, рідина, газ, у системах збору й обробки даних впливають на чутливі пристрої – сенсори. Сенсор (від лат. *sensus* – відчуття) знаходиться в безпосередньому контакті з вимірюваною величиною, яка може міняти його фізичні властивості, перетворює дію в електричний сигнал, який безперервно змінюється в часі. Останній є матеріальним втіленням інформації про фізичний процес, і вимірювальна інформація, що зазвичай міститься в сигналі, полягає в інтенсивності електричної напруги (струму), що змінюється в часі (рис. 7.1).

Вимірювана величина, яка є характеристикою напруги (струму) та оцінюється кількісно з гарантованою точністю і достовірністю, є аналоговою величиною, тобто вона володіє незліченною безліччю значень за розміром.

Відмітимо, що в термінології, яка стосується описаної частини СЗОД, поки немає однозначності.

У технічній літературі для опису процесу сприйняття фізичної дії від контрольованого об'єкта і формування електричного сигналу, що харак-

теризує стан об'єкта (вимірювання), використовують слово «перетворювач», маючи на увазі, що у процесі вимірювань бере участь пристрій, який перетворює енергію з однієї форми в іншу. Часто, уникаючи використання слова «перетворювач», для характеристики пристроїв введення інформації про фізичну величину застосовують термін «сенсор». Зазвичай при цьому маються на увазі елементи, робота яких базується на здатності напівпровідників бути чутливими до змін зовнішнього середовища, до перетворення дій в електропровідність напівпровідника.

Сучасні напівпровідникові сенсори мініатюрні, прості в обігу, на їх основі легко створювати інтегральні пристрої. У літературі можна легко знайти інформацію про напівпровідникові сенсори новітніх конструкцій, за допомогою яких можна вимірювати поточні координати, швидкість потоку, вологість, прискорення, рівень рідини, концентрацію іонів тощо. У літературі для опису процесу сприйняття й перетворення інформації про явище, що вивчається, в електричний сигнал використовується також термін «датчик».

У даний час терміном «датчик» користуються тоді, коли сенсор нерозривно пов'язаний зі схемами обробки і коли йде мова про складні електронні системи перетворення інформації про фізичні явища у форму електричного сигналу. Так, наприклад, промисловістю випускається безліч датчиків, у корпусі яких є вбудований мікроконтролер, що виконує обробку вимірювань безпосередньо в самому датчику. Такі датчики прийнято називати «розумними».

Оскільки частина СЗОД «фізична дія – сенсор» накладає помітний відбиток на всю систему, то відзначимо, що перетворення зовнішньої інформації, яка характеризує різні фізичні явища, в сигнал можливе на основі двох способів створення електричного сигналу. Тому сенсори можуть бути підрозділені на дві групи:

1) *активні сенсори*: – без сторонніх електричних джерел, у самому процесі перетворення енергії, сенсор сам генерує електричний сигнал. Наприклад, фотодіод у фотогоальванічному режимі перетворює енергію оптичного випромінювання в електричний сигнал або сонячний елемент перетворює енергію світла в електроенергію;

2) *пасивні сенсори*: – в таких перетворювачах інформації під дією зовнішнього збурення змінюються лише фізичні характеристики сенсора, тому для отримання вихідного електричного сигналу в них потрібно додатково створити електропостачання або, по-іншому, вони повинні мати

ланцюг живлення. Саме за рахунок ланцюга живлення при зміні характеристик сенсора виникає електричний сигнал, відповідний фізичній дії.

Прикладами сенсорів, що живляться від джерел фіксованої напруги, є:

а) термістори, де зміна температури приводить до зміни опору матеріалу;

б) тензодатчики, опір яких змінюється за рахунок деформації;

в) магніторезистивні елементи, опір яких змінюється під впливом магнітного поля;

г) фоторезистори, зміна опору яких викликається дією зовнішнього освітлення.

Зміна опору сенсора під дією фізичного поля викликає відповідну зміну струму в електричному ланцюзі, підключеному до ланцюга живлення, який можна реєструвати.

Кожного разу, коли проводиться реєстрація якогось параметра, обов'язково виникають погрішності у вимірюванні параметра, що визначається: випадкові і зовнішні. Такі показники, як температура навколишнього середовища, наявність могутніх магнітних полів, характер енергопостачання, вологість та інші зовнішні дії, а саме: сигнали від телевізійних станцій, передавачів, електромагнітні поля, викликані комутацією високовольтних мереж, здатні впливати на вихідний електричний сигнал. Випадкові і зовнішні погрішності роблять свій внесок до результату. На верхньому графіку рис. 7.1, як приклад, показано, що на «гладкий» вимірюваний сигнал «накладаються» імпульсні перешкоди, які мають вид коротких імпульсів –«голок».

З рис. 7.1 видно, що якщо вихідний електричний сигнал на виході сенсора недостатньо високий для подальшої обробки, то для збільшення його рівня застосовується підсилювач. Зазвичай після підсилювача забезпечується рівень сигналу в декілька вольт. Одночасно посилюються як корисний сигнал, так і перешкоди. Тому надалі за допомогою фільтру із сигналу віддаляються небажані перешкоди. Обробка сигналу в підсилювачі і фільтрі може супроводжуватися також «стисненням» інформації, лінеаризацією та ін.

Сенс операції аналого-цифрового перетворення напруги полягає в заміні електричного сигналу $u(t)$, що безперервно змінюється, його значеннями (вибірками) $u_i = u(t_i)$, відповідними дискретним моментам часу $t_i = i\Delta t (i = 0, 1, 2 \dots)$, що віддалені один від одного на інтервал дискре-

тизації Δt . Операція заміни безперервній функції $u(t)$ її вибірковими значеннями $u_i = u(t_i)$ у дискретні моменти часу t_i називається *дискретизацією за часом*. Очевидно, чим менше інтервал дискретизації Δt , тим точніше відобразатиметься вхідний сигнал $u(t)$ дискретами.

Операцію дискретизації аналогової величини можна виконати за допомогою аналогового ключа, який короткочасно замикається в моменти дискретизації t_i . Відфільтрований сигнал поступає (рис. 7.1) на пристрій дискретизації і запам'ятовування, що називається також пристроєм вибірки-зберігання (ПВЗ), або стеження-запам'ятовування. Це пристрій протягом заданого проміжку часу, необхідного для перетворення аналогової величини в дискретну, підтримує постійний рівень вихідного сигналу (рис. 7.2-а). Сигнал на виході пристрою стеження-запам'ятовування в режимі вибірки практично пропорційний сигналу на вході («стежить» за вхідною напругою). Як тільки послідує команда запам'ятовування, то сигнал на виході залишається незмінним протягом проміжку часу, необхідного для дискретизації сигналу.

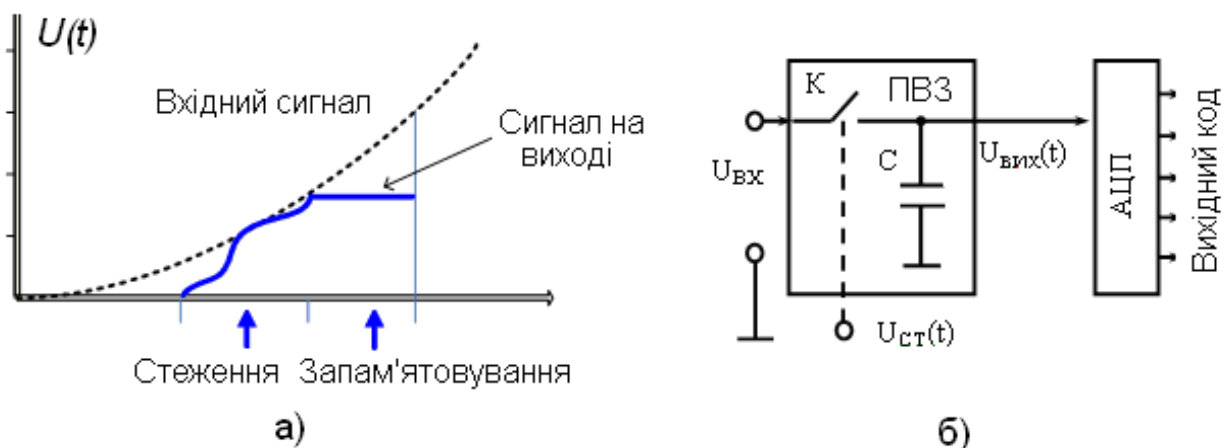


Рис. 7.2. Часова діаграма роботи пристрою стеження-запам'ятовування (а) і спрощена схема пристрою вибірки-зберігання (б)

Найбільш точними і компактними пристроями вибірки й короткочасного зберігання аналогових сигналів є схеми, засновані на принципі зберігання заряду на накопичувальному конденсаторі (рис. 7.2-б).

На цьому принципі побудована більшість ПВЗ дискретного та інтегрального виконання. Коли електронний ключ K , керований напругою стробування $U_{ст}$, замкнутий (режим вибірки), конденсатор C експоненці-

ально з постійною часу τ_3 заряджається (або розряджається) до значення $U_{\hat{a}\hat{o}}(t)$. Значення постійної часу ланцюга заряду накопичувального конденсатора $t_3 = \tilde{N} (R_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} + R_{r\hat{o}})$, де $R_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}$ – вихідний опір джерела сигналу, а $R_{r\hat{o}}$ – опір замкнутого ключа, що вибирається таким, щоб за час дії стробуючого імпульсу напруги на конденсаторі встановилася із заданою точністю. Це досягається відповідним підбором ємності конденсатора.

Щоб напруга на виході «співпадала» з вхідною, конденсатор і ключ не можуть бути підключені прямо до джерела аналогового сигналу, оскільки вони створюють для нього додаткове навантаження, що спотворює форму вхідного сигналу. Тому на вході ПВЗ ставлять вхідний буферний підсилювач з високим вхідним і малим вихідним опором, наприклад, повторювач напруги на операційному підсилювачі. При розмиканні ключа (режим зберігання) стеження припиняється і на конденсаторі фіксується миттєве значення напруги, рівне амплітуді вхідного сигналу в момент розмикання ключа.

У загальному випадку заряд на конденсаторі поволі змінюється через наявність струму витoku ключа і струму навантаження. Для зменшення впливу струму навантаження на спад напруги на конденсаторі в режимі зберігання сигнал на навантаження передається через буферний підсилювач, що має високий вхідний і низький вихідний опори. Як буферний підсилювач можна також використовувати повторювач напруги на операційному підсилювачі.

Якщо правильно вибрати параметри елементів ПВЗ і інтервал дискретизації Δt , то аналоговий сигнал на виході пристрою дискретизації запам'ятовування буде сигналом, що складається з кусково-постійних відрізків (див. рис. 7.1 і рис. 7.3-в).

Для повного перетворення сигналу з аналогової форми в цифрову треба також виконати операції квантування й кодування. Суть операції квантування сигналу по рівню, на відміну від дискретизації за часом (рис. 7.3б) полягає в такому. Інтервал зміни функції $u(t)$ розділяється на ряд дискретних рівнів, що розрізняються між собою на величину Δu , що називається інтервалом квантування. Аналоговій вибірці $u_i = u(t_i)$ привласнюється цілочисельне значення, або цифровий код, N , якщо u_i потрапляє в інтервал $[N\Delta u, (N+1)\Delta u]$. Тобто квантування – це процес розділення сигналу на ряд дискретних значень по рівню так, щоб поставити у відпо-

відність значенням вхідного сигналу в певний інтервал часу одне постійне за амплітудою значення вихідного квантованого рівня сигналу.

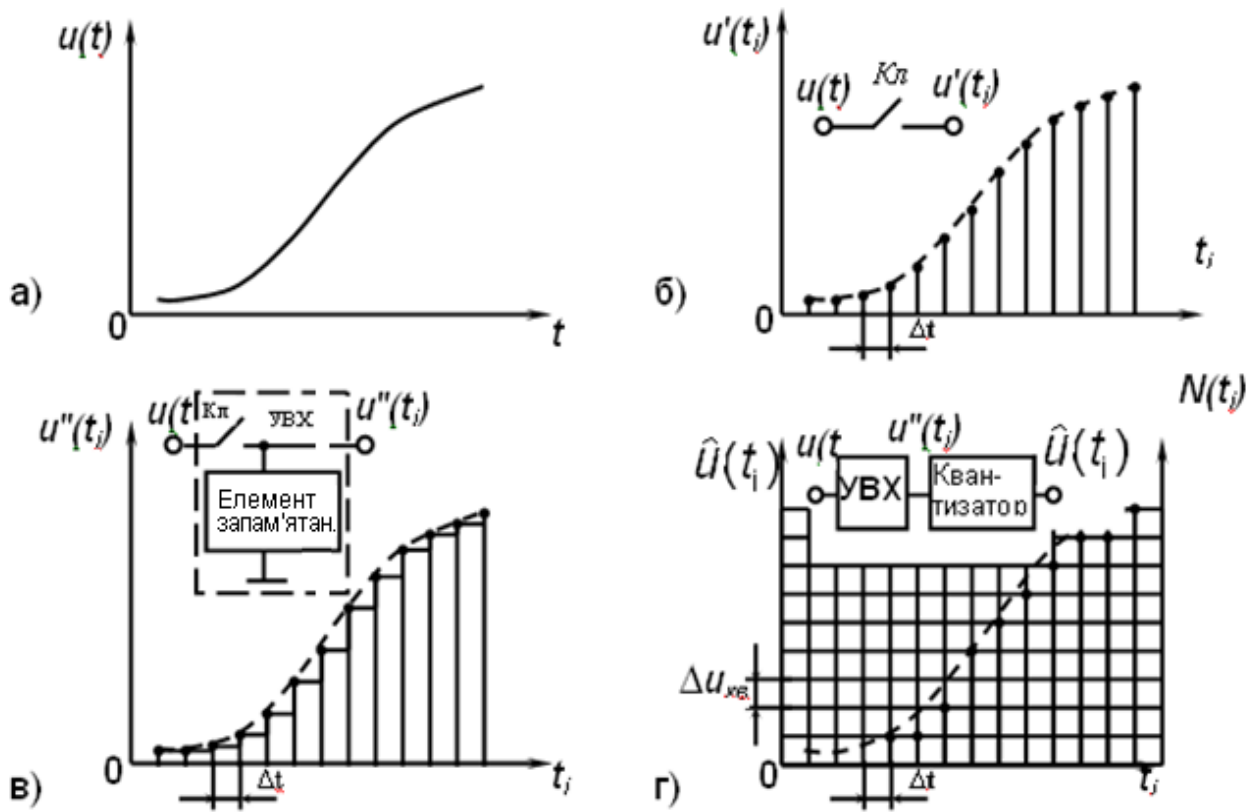


Рис. 7.3. Перетворення сигналу з аналогової форми у квантовану

Можна те ж саме пояснити й таким чином. Створюється сітка так званих рівнів квантування, зміщених один щодо одного на величину, що називається кроком квантування $\Delta u_{кв}$. Кожному рівню квантування приписується порядковий номер (0, 1, 2, 3 ...). Отримані в результаті дискретизації відліки $u''(t)$ замінюються найближчими до них рівнями квантування $\hat{u}(t)$ (рис. 7.3-г). У результаті операції кодування, тобто перетворення значень квантованого сигналу в цифрову форму, генерується двійковий код. Точність операції кодування визначається числом рівнів квантування, або розрядністю цифрового коду.

У результаті аналого-цифрового перетворення, що здійснюється кодуєчим перетворювачем, як видно зі схеми СЗОД на рис. 7.1, після надходження на вхід аналогового сигналу $u_{вх}$ з виходу знімається цифровий двійковий код (двійкові дані), представлений N символами і пов'язаний з

вхідним сигналом співвідношенням: $N = x_{BX} / \Delta u_{KB}$, де u_K – крок квантування перетворювача. Величина $\Delta u_{KB} = U_{BX.MAX} / 2^n$ є кроком квантування (квантом) n розрядного перетворювача.

Статична характеристика аналого-цифрового перетворювача (АЦП) $N = F(u_{BX})$ показана на рис. 7.4. На ній діапазон миттєвих значень сигналу u_{BX} розділений на інтервали, що називаються інтервалами квантування ΔU_{KB} . Кожному інтервалу квантування поставлений у відповідність цифровий код N_K . Основними параметрами АЦП (ADC – Analog-to-digital Converter) є: крок квантування, точність (погрішність перетворення) і швидкодія.

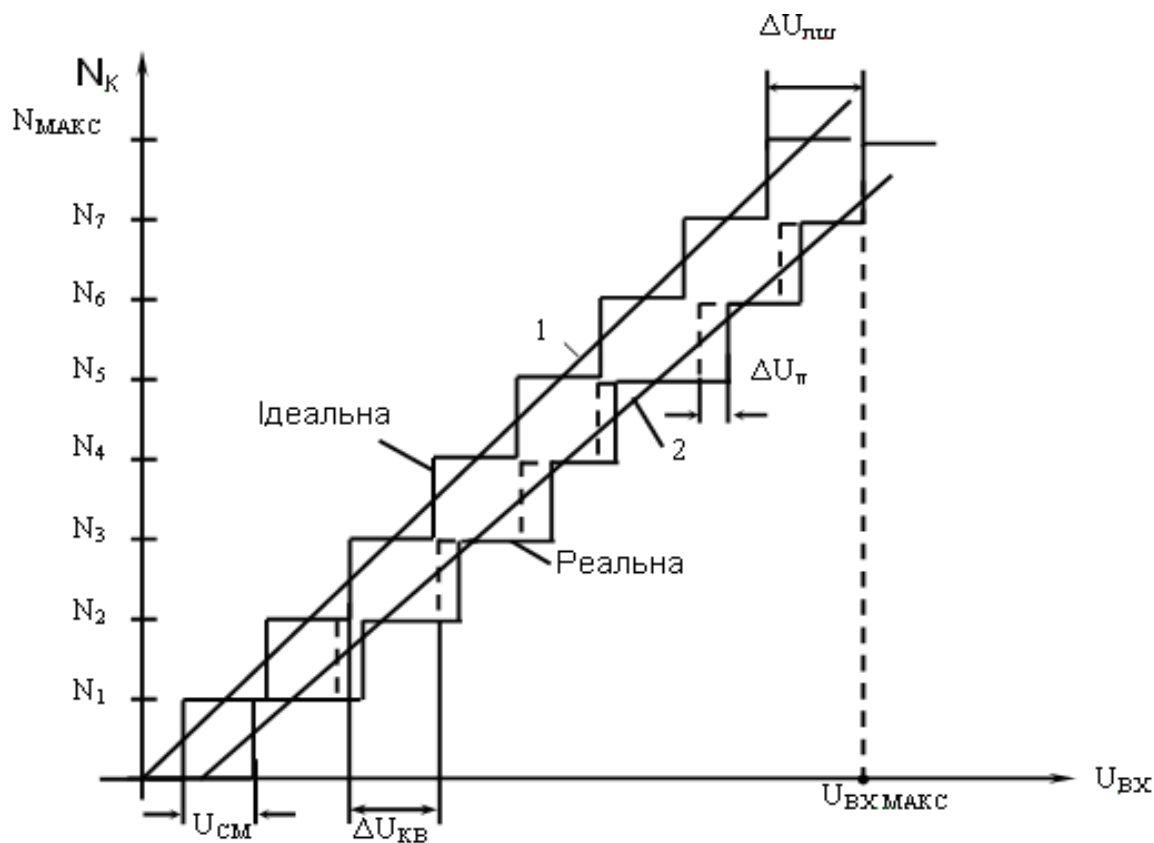


Рис. 7.4. Статичні характеристики квантування ідеального і реального АЦП

Крок квантування АЦП визначається різницею значень напруги заданої і наступної за нею напруги міжкодових переходів. Абсолютне значення кроку квантування пов'язане з діапазоном зміни вхідної напруги і числом розрядів n вихідного коду: $\Delta U_{KB} = (U_{BX.MAX} - U_{BX.MIN}) / 2^n$, де

$U_{BX.MAX}$ і $U_{BX.MIN}$ – максимальне і мінімальне значення вхідної напруги. Наприклад, якщо потрібно перетворити аналоговий сигнал, що змінюється в діапазоні $U_{BX.MAX} - U_{BX.MIN} = 2$ В, у 10 бітових слів ($2^n = 2^{10} = 1024$), то діапазон напруги 2 В необхідно розділити на 1024 ділянки. Якщо всі ділянки брати однаковими, то при переході від однієї ділянки до іншої напруга змінюється на $\Delta U_{KB} = 0,001935$ В і крок квантування рівний 1,935 мВ.

Крок квантування ΔU_{KB} характеризує потенційну роздільну здатність перетворювача по рівню, тобто найменший помітний приріст вхідної величини. Крок квантування також визначає *методичну погрішність* аналого-цифрового перетворювача, що виникає в результаті заміни безперервної аналогової величини квантованими значеннями, тобто найближчими рівнями квантування.

Швидкодія АЦП характеризується динамічними параметрами: часом перетворення $t_{ПР}$ і максимальною частотою перетворення F_i . *Час перетворення $t_{ПР}$* – інтервал часу від моменту заданої зміни сигналу на вході до появи на виході відповідного стійкого коду. Вибір часу перетворення пов'язаний із швидкістю зміни вхідного сигналу.

Якщо зажадати, щоб за час $t_{ПР}$ вхідна напруга змінювалася не більш ніж на крок квантування ΔU_{KB} , то: $t_{iD} \leq (\Delta U_{KB} / U'_{BX})$, де U'_{BX} – максимальна швидкість зміни вхідної напруги. Якщо ця вимога не виконується, то на вході АЦП необхідно включити пристрій вибірки і зберігання, який запам'ятовує вибірки вхідної напруги в моменти дискретизації на час перетворення.

Максимальна частота перетворення F_M – найбільша частота дискретизації, при якій параметри АЦП відповідають заданим значенням. Максимальна частота перетворення вибирається залежно від ширини спектру вхідної напруги і необхідних якісних показників системи, до складу якої входить АЦП. Разом з розглянутими характеристиками і параметрами існують параметри, що визначають зовнішні умови роботи перетворювача, такі, як параметри вихідного коду; динамічний діапазон вхідної напруги; параметри джерел еталонної і живильної напруги; граничні експлуатаційні параметри та ін.

В автоматизованих системах збору й обробки даних (СЗОД), які базуються на застосуванні мікроконтролерів, зазвичай використовується велика кількість датчиків. Зрозуміло, що буде дуже марнотратним і обій-

деться дорого, якщо для кожного датчика застосовувати свій АЦП і свій МК. Витрати використання незалежних вимірювальних каналів і окремої обробки сигналів можуть бути істотно зменшені, якщо застосовувати принцип мультиплексування. У такому варіанті структури СЗОД для групи аналогових вимірювальних каналів використовується тільки один АЦП і СЗОД ґрунтується на принципі послідовної обробки аналогових сигналів за рахунок мультиплексування аналогових каналів (рис. 7.5).

У промислових об'єктах, сенсори яких пов'язані з контрольованими об'єктами, що мають значну масу, не потрібно дуже часто проводити вимірювання їх параметрів. Наприклад, температуру таких об'єктів можна без внесення істотних помилок контролювати з періодичністю всього один раз у декілька хвилин. Те ж саме стосується рівнів рідини в резервуарах великих об'ємів. У більшості реальних випадків виявиться достатнім, якщо проводити миттєві «вибірки» електричних сигналів сенсорів з періодичністю в декілька десятків мілісекунд. У зв'язку з цим з'являється можливість послідовної роботи з сенсорами й перетворення кожного окремого отриманого аналогового сигналу в цифрову форму.

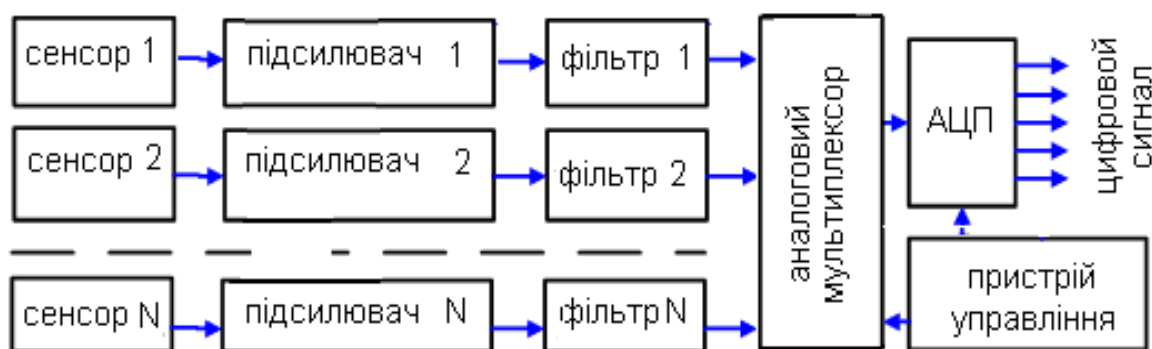


Рис. 7.5. Структура СЗОД, коли для групи аналогових вимірювальних каналів використовується один АЦП

Для комутації аналогових сигналів з декількох входів на один вихід призначені аналогові мультиплексори. Вони складаються з набору аналогових ключів, приєднаних до схеми управління, й повинні комутувати сигнали з високою точністю і надійністю при певній швидкості вибірки каналу вхідного сигналу. При цьому вплив відключених каналів на значення вихідного сигналу має бути мінімальним.

За допомогою пристрою управління вибирається номер каналу, який необхідно опитати. Процес перетворення аналогових сигналів у цифрові

в кожному каналі може виконуватися різними пристроями, що мають різні параметри.

Операції конкретної обробки сигналу кожного каналу визначаються як вимогами забезпечення заданої якості процедури проведення вимірювань, так і необхідністю проведення певних функціональних перетворень. У кожному каналі можуть бути свої вимоги за погодженням параметрів виходу сенсорів з параметрами вхідних ланцюгів підсилювача. При відмінності характеристик сенсорів від лінійних залежностей може виконуватися лінеаризація або здійснюватися введення в канал блоків відтворення певних математичних операцій і підвищення його точнісних параметрів.

Фільтри, призначені для придушення перешкод, можуть мати різне виконання і різні параметри, оскільки корисний сигнал сенсора і сигнал-перешкода в кожному конкретному каналі можуть мати різні діапазони частот.

7.1.2. Використання мікроконтролерів AVR у системах збору й обробки інформації про стан і режими роботи поліграфічного устаткування

Для створення систем збору й обробки аналогових і цифрових сигналів, що характеризують стан і режими роботи устаткування, промисловістю випускається все, що необхідне для цієї мети: велика номенклатура різних сенсорів, приладів, модулів, вузлів і мікросхем. Більшість цих функціональних вузлів сумісні електрично і конструктивно й дозволяють створювати СЗОД для конкретних цілей.

У даний час промисловістю випускається велика кількість спеціальних плат збору даних. У такій платі використовують декілька високошвидкісних АЦП (по одному на канал) або застосовують мультиплексування вхідних каналів. Плати збору інформації можуть мати власну пам'ять і засоби обробки вимірюваної інформації. Прийняту від сенсорів і оброблену інформацію такі плати передають, як правило, на персональний комп'ютер. Разом з тим відмітна особливість багатьох 8-розрядних МК полягає в тому, що вони мають інтегрований на напівпровідниковий кристал модуль багатоканальної системи збору даних. Такий модуль призначений для введення в МК аналогових сигналів із сенсорів фізичних величин і перетворення цих сигналів у двійковий код з метою пода-

льшої програмної обробки цифрової інформації. Модуль АЦП, наприклад, входить до складу МК AT90S8535, ATmega8x, ATmega16x, ATmega32x, ATmega64x, ATmega128x та ін.

Модулі МК, що здійснюють аналого-цифрове перетворення, характеризуються таким: 1) вони мають до 8 вхідних каналів, що дозволяє за допомогою багатоканального аналогового комутатора (мультиплексора) підключати до входу АЦП одне з 8 джерел вхідних аналогових сигналів. Вибране джерело сигналу задається програмно; 2) у модуль інтегрована схема вибірки-зберігання, що забезпечує постійність вихідної напруги під час циклу перетворення; 3) модуль може також мати систему калібрування, яка підвищує точність його роботи. Зазвичай АЦП мають у своєму складі вбудоване джерело опорної напруги, але, за бажання, можна використовувати зовнішню опорну напругу; 4) результат аналогово-цифрового перетворення вхідної напруги в АЦП подається у вигляді 10-розрядного двійкового числа в регістрі даних.

Структурна схема типового АЦП МК AVR показана на рис. 7.6.

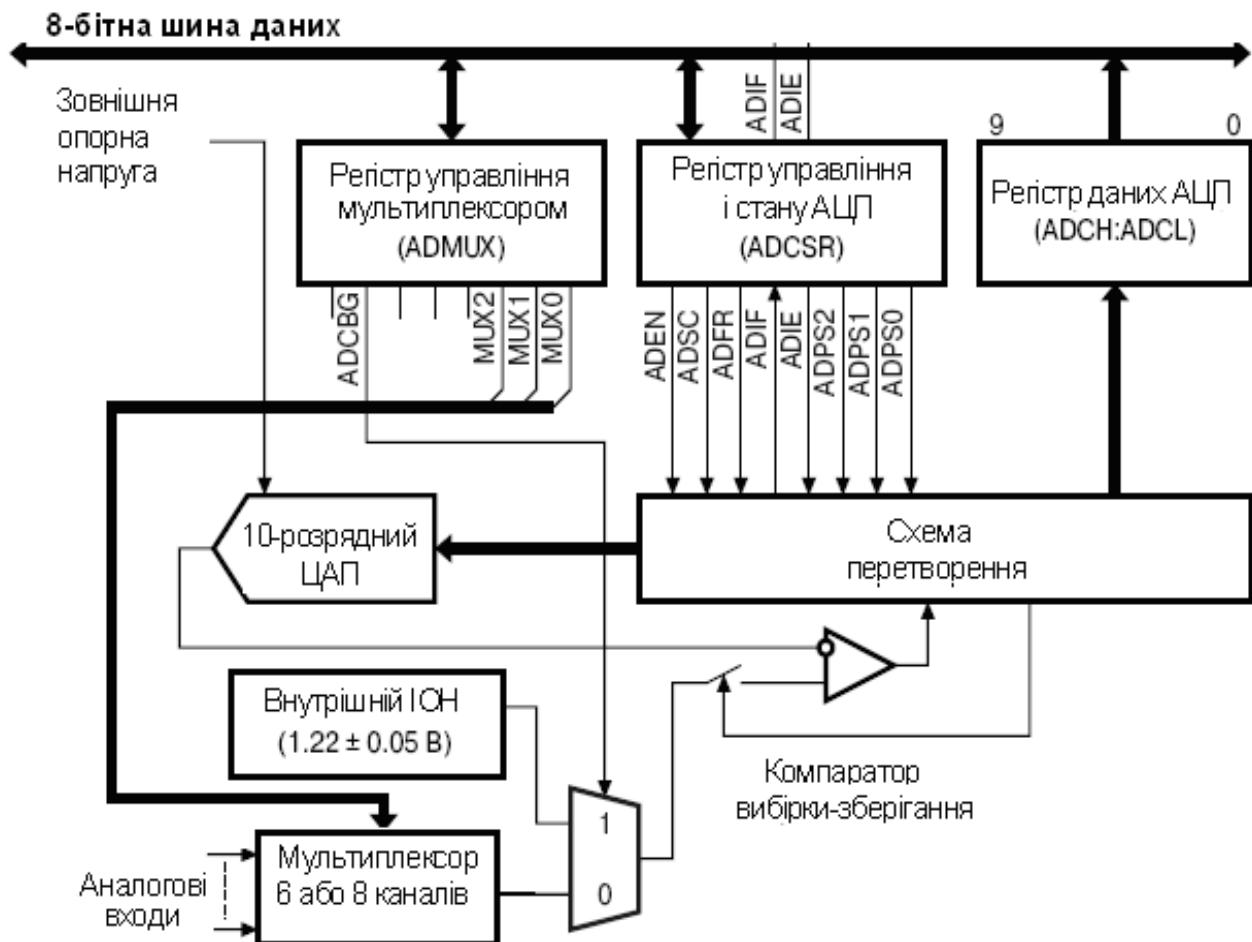


Рис. 7.6. Структурна схема типового модуля АЦП МК

Аналогові сигнали з датчиків фізичних величин подаються на вхід багатоканального аналогового комутатора (мультиплексора).

Мультиплексор (Multiplexer, або, скорочено, MUX) призначений для підключення одного з джерел аналогових сигналів, приєднаних до фізичних контактів ADCn. Залежно від типу вживаного МК входи ADCn можна використовувати або як однодротові (для підключення 8 джерел сигналів), або як диференціальні (для підключення 4 джерел сигналів).

Вибір джерела аналогового сигналу здійснюється за допомогою запису номера каналу у відповідні розряди спеціального регістра управління – регістра вибору мультиплексора ADMUX (ADMUX – ADC Multiplexer Selection Register). Біти регістра ADMUX дозволяють вибрати активний канал для підключення сигналу. Стан цих розрядів можна змінити у будь-який момент часу, проте якщо це буде зроблено під час проведення процесу вимірювання (циклу перетворення) зміна каналу відбудеться після завершення перетворення.

Для модуля АЦП, який входить до складу МК AT90S8535, формат регістра ADMUX показаний на рис. 7. 7.

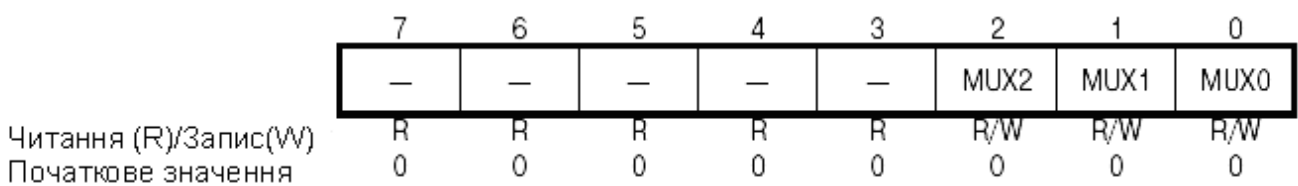


Рис. 7.7. Формат регістра ADMUX МК AT90S8535

Номер входу мультиплексора, з якого поступає сигнал для перетворення в АЦП, визначається трьома молодшими бітами MUX2, MUX1, MUX0 регістра управління ADMUX. Будь-який з восьми входів може бути вибраний через ADMUX записом у нього відповідного коду у будь-який момент часу, проте перемикання входів фактично проводиться тільки після завершення чергового циклу перетворення АЦП. Регістри ADMUX АЦП, що входять до складу МК сімейства MEGA (ATmega8x, ATmega16x), зазвичай мають формат, наведений нижче:

7	6	5	4	3	2	1	0
REFS1	REFS0	ADLAR		MUX3	MUX2	MUX1	MUX0

Біти 0-3 регістра ADMUX (MUX0-MUX3) дозволяють вибрати вхідний канал аналогового мультиплексора.

Результат аналого-цифрового перетворення вхідної напруги подається у вигляді 10-розрядного двійкового числа у двох 8-розрядних регістрах даних ADCH і ADCL.

Після закінчення аналого-цифрового перетворення 10-розрядний код записується у двобайтовий регістр ADCL (молодші 8 бітів результату) і ADCH (старші 2 біти результату). Оскільки регістрова пара має 16 розрядів, то результат перетворення, поміщений у ADCH. ADCL можна «вирівняти» або по правому краю, або по лівому. Характер вирівнювання результату визначається за допомогою розряду (біта) ADLAR регістра ADMUX. Розряд ADLAR (ADC Left Adjust Result) – біт «лівої» корекції результату.

Якщо ADLAR містить логічну одиницю, то результат подається вирівнюванням по лівому краю. У цьому випадку старші біти 10-розрядного результату переміщуються у старші біти регістрів результату. Інакше, при «0», вирівнювання здійснюється по правому краю. Зміна біта ADLAR миттєво позначається на вмісті ADCH: ADCL.

Для забезпечення роботи АЦП потрібні спеціальні джерела живлення, що забезпечують блокування перешкоди, вплив яких особливо сильно позначається при обробці слабких електричних сигналів. У більшості випадків МК AVR мають окремі виводи для підключення напруги живлення АЦП (ADC). У зв'язку з цим слід розрізняти вивід, по якому подається напруга живлення для цифрової частини АЦП V_{CC} , і вивід, по якому подається напруга для аналогової частини АЦП AV_{CC} .

Для визначення діапазону зміни рівня вхідного сигналу повинна використовуватися опорна напруга. V_{ref} – вивід, по якому подається опорна напруга для АЦП. Опорна напруга повинна бути в діапазоні від 2 В до напруги живлення AV_{CC} . Код АЦП \$000 відповідає нульовому вхідному сигналу, максимальний код \$3FF відповідає сигналу, рівному опорному, мінус вага одиниці молодшого значущого розряду.

Для подачі напруги живлення аналогової частини та опорної напруги використовуються окремі виводи AV_{CC} і A_{REF} . При цьому напруга на виведенні AV_{CC} не повинна відрізнятися від напруги живлення цифрової частини V_{CC} МК не більш ніж на $\pm 0,3$ В. Напруга на виведенні A_{REF} має знаходитися в межах, що визначаються різницею рівнів на виведенні AV_{CC} і $AGND$.

Щоб понизити перешкоди аналогова частина МК AVR разом з іншими аналоговими схемами повинна мати свою власну «землю» AGND (в ідеальному випадку – власну поверхню в багат шаровій платі), з'єднану із заземлюючою площиною (з «землею») цифрової частини GND (Ground – земля) тільки в одній точці.

Біти 6 і 7 регістра ADMUX REFS1 і REFS0 (REFS – Reference Selection Bits – біти вибору опорної напруги) визначають джерело опорної напруги, використовуване в АЦП (у внутрішньому ЦАП).

Для забезпечення управління АЦП і визначення його поточного стану в ADC застосовується регістр управління і стану (статусу) АЦП ADCSRA (ADC Control and Status Register). Біти цього регістра дозволяють управляти режимами роботи АЦП. Регістри ADCSRA для АЦП, які входять до складу МК сімейства MEGA, зазвичай мають формат, наведений нижче:

7	6	5	4	3	2	1	0
ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0

Використовувані біти виконують такі функції.

Біт 7 – ADEN (ADC Enable – біт дозволу роботи АЦП): 1 – АЦП включений; 0 – АЦП вимкнений. Якщо скидання біта в «0» відбулося під час перетворення, то перетворення завершується. Біт 6 – ADSC (ADC Start Conversion – біт запуску перетворення). Установка цього біта в «1» у режимі одноразового перетворення (коли скинутий у «0» біт ADATE) запускає чергове перетворення. Запис «0» у біт ADSC ефекту не надає. Біт 6 в деяких МК називають ADRF (ADC Free Running Mode – АЦП працює в циклічному режимі). Біт 5 – ADATE (ADC Auto Trigger Enable – біт дозволу режиму автозапуску). Установка біта дозволу в «1» вирішує роботу АЦП у режимі автозапуску (в циклічному режимі). У цьому режимі ADC проводить вибірки і звернення до регістрів безперервно (одне за одним) Очищення 5 біта приводить до припинення циклічного режиму і переходу в одноразовий режим. Біт 4 – ADIF (ADC Interrupt Flag – прапор переривання від АЦП, який сигналізує про те, що перетворення завершено, а результат записаний у регістрову пару ADCH: ADCL). Біт ADIF у деяких МК очищається (у «0») автоматично при виклику вектора переривання (прапор скидається після переходу на початок вектора переривання). Біт 3 – ADIE (ADC Interrupt Enable – біт дозволу переривання АЦП). Біти 0-2 ADPS2, ADPS1, ADPS0 (ADC Prescalers Select Bits – біти вибору

коефіцієнта попереднього ділення, тобто біти управління тактовою частотою АЦП – біти установки частоти перетворення АЦП).

Відмітимо, що необхідні для коректного виконання аналого-цифрового перетворення тактові частоти ADC лежать у діапазоні 50 – 200 Гц. З цієї причини схема управління АЦП використовує не самі такти системної синхронізації, а імпульси, що отримуються від внутрішнього попереднього дільника. Попередній дільник (Prescaler) не функціонує до тих пір, поки біт 7 – ADEN (ADC Enable – біт дозволу роботи АЦП) регістра управління і стану (статусу) АЦП ADCSRA (ADC Control and Status Register) скинутий у стан «0». Після установки розряду ADEN попередній дільник активізується. Необхідна тактова частота встановлюється за допомогою бітів ADPS2, ADPS1, ADPS0. Установка частоти роботи АЦП здійснюється комбінаціями бітів, які наводяться в довідниках.

Таким чином, АЦП спільно з вбудованим аналоговим мультиплексором забезпечує перетворення в 10-розрядний двійковий код сигналів в діапазоні напруги від 0 (AGND) до опорної (AREF).

АЦП може працювати в режимі одноразового перетворення або циклічно з автоматичним повторним запуском після кожного перетворення. Після закінчення перетворення формується прапор переривання ADIF із стандартною процедурою виклику вектора переривання ADC з адресою \$00 і записом 10-розрядного коду у двобайтові регістри ADCL (молодші 8 бітів результату) і ADCH (старші 2 біти результату).

Для забезпечення відповідності результуючих даних прочитуваному рівню напруги в МК використовується спеціальна логіка захисту. Читання даних з регістра результату ADC повинне починатися обов'язково з молодшого байта і першим повинен бути лічений регістр ADCL. При цьому блокується занесення нового результату в регістр результату і лічений потім старший байт належить тому ж результату, що і лічений раніше молодший байт. Звернення АЦП до регістрів ADCL (молодші 8 бітів результату) і ADCH (старші 2 біти результату) вирішується після закінчення прочитування регістра ADCH.

Точність АЦП залежить від тактової частоти перетворення: рекомендується діапазон тактових частот 50 – 200 кГц, при вищих частотах точність перетворення знижується. Стандартний цикл перетворення вимагає 13 тактів роботи і при значенні тактової частоти 100 кГц, що рекомендується, визначає час перетворення 130 мкс.

АЦП може працювати в режимі *одиначних перетворень* (Single Conversion Mode), при якому кожне нове аналого-цифрове перетворення виконується окремо або в автономному (циклічному) режимі автозапуску – Free Running Mode. У другому випадку перетворювач працює безперервно, а кожен новий цикл починається автоматично відразу ж після запису виміряного значення в регістрову пару ADCL:ADCH. Вибір режимів здійснюється за допомогою біта 6 – ADSC (ADS Start Conversion – біт запуску перетворення) або ADRF (ADC Free Running Mode – АЦП працює в циклічному режимі).

У режимі *одиначних перетворень* перед першим перетворенням, після активізації АЦП за допомогою розряду ADEN (ADC Enable – біт дозволу роботи АЦП), відбувається холостий прогін. Він необхідний для ініціалізації АЦП і для користувача непомітний, якщо не враховувати того, що перше перетворення триває 25 тактових циклів, що на 12 циклів довшо звичайного.

Коли АЦП працює *безперервно* і його кожен новий цикл починається автоматично, відразу ж після запису виміряного значення в регістрову пару ADCL:ADCH, біт ADSC постійно встановлений у логічну «1». Наступний за поточним цикл перетворення починається відразу ж після завершення тринадцятого такту поточного циклу.

Робота АЦП у режимі автозапуску визначається бітами регістра спеціальних функцій вводу-виводу. Для регістра спеціальних функцій вводу-виводу SFIOR (Special Function IO Register) визначені такі біти:

7	6	5	4	3	2	1	0
ADTS	ADTS	ADTS	-	ACME	PUD	PSR2	PSR1
2	1	0					0

Біти 7 – 5 – ADTS2 – ADTS0 (ADC Auto Trigger Source – біти вибору джерела автозапуску АЦП). Якщо в регістрі управління і статусу ADCSRA (ADC Control and Status Register) встановлений біт дозволу режиму автозапуску, то установка комбінацій бітів дозволяє визначити джерело автозапуску АЦП. Перетворення АЦП запускається при появі прапора переривання.

У циклічному режимі наступне перетворення АЦП запускається при появі прапора переривання від АЦП. Біт 3 – ACME (Analog Comparator Multiplexer Enable – дозвіл мультиплектора аналогового компаратора

АЦП). Цей біт використовується для управління входами аналогового компаратора. Біт 2 – PUD (Pull-up disable – відключення резисторів навантажень). Установка цього біта в «1» приводить до відключення резисторів навантажень. Біт 1 – PSR2 (Prescaler Reset Timer/Counter2 – скидання переддільника ТЛ № 2). Установка цього біта в стан логічної «1» приводить до скидання попереднього дільника ТЛ № 2. Біт скидається апаратно після операції скидання переддільника. Біт 0 – PSR10 (Prescaler Reset Timer/Counter1 and Timer/Counter0 – скидання переддільників ТЛ № 1 і ТЛ № 0). Установка цього біта в стан логічної «1» приводить до скидання попередніх дільників ТЛ № 1 і ТЛ № 0. Біт скидається апаратним чином після операції скидання переддільників.

АЦП МК можуть мати вбудовану систему придушення перешкод, основне завдання якої полягає в тому, щоб пригнітити перешкоди, що створюються центральним процесорним пристроєм (ЦПП). При роботі такої системи АЦП відбуваються у «сплячому» режимі ЦПП. Можливі варіанти використання системи придушення перешкод:

1) додаткове зниження рівня перешкод для підвищення точності перетворення можна отримати, якщо на час перетворення АЦП припинити роботу процесора в мікроконтролері переходом його у режим «IDLE» (холостий хід). У цьому випадку робота ЦПП припиняється, проте сторожовий таймер, таймери-лічильники, система переривань МК продовжують функціонувати;

2) для підвищення точності аналого-цифрового перетворення можна використовувати перехід у режим «ADC Noise Reduction» (шумозаглушення АЦП). У цьому випадку ЦПП припиняє свою роботу, проте АЦП, зовнішні переривання, сторожовий таймер, таймери-лічильники, система зовнішніх переривань МК залишаються активними.

АЦП у МК AVR працюють за принципом послідовного наближення. Напряга відповідного датчика, вибрана аналоговим мультиплексором, потрапляє на пристрій вибірки-зберігання (ПВЗ). На нього подаються стробуючі імпульси, необхідні для роботи електронного ключа, і напруга з сенсора $U_{изм}$. Він залишається незмінним усю тривалість перетворення. Початок перетворення задає сигнал «ПУСК». Схема управління (CONVERSION LOGIC) АЦП по цьому сигналу записує у свій внутрішній регістр число $10\ 0000\ 0000\ В$, яке подається на внутрішній ЦАП (10 bit DAC). ЦАП перетворить його в аналогову напругу U_{DAC} . Зазвичай при цьому на виході 10 bit DAC спочатку формується напруга, рівна половині

опорної. Компаратор (COMPARATOR) порівнює значення напруги з виходу 10 bit DAC U_{DAC} з аналоговою напругою, отриманою з ПВЗ $U_{ИЗМ}$.

Якщо $U_{DAC} < U_{ИЗМ}$, то схема управління формує наступний код, у якому зберігається старший розряд, а в передостанній розряд записується одиниця 11 0000 0000 В. Тим самим U_{DAC} збільшується і «наближається» до шуканого значення. Інакше, коли $U_{DAC} > U_{ИЗМ}$, схема управління формує код, у якому старший розряд скидається в логічний нуль, а в передостанній розряд записується одиниця 01 0000 0000 В. U_{DAC} зменшується і «наближається» до шуканого значення. Аналогічні дії виконуються в подальших тактах перетворення. Процедура наближення повторюється для розрядів десяткового двійкового числа U_{DAC} , що залишилися. У результаті область навколо визначуваного числа звужується і, врешті-решт, за 10 кроків такого «зважування» ЦАП міститиме значення аналогової величини $U_{ИЗМ}$ у двійковому 10-бітовому поданні. Відповідно, таке саме число буде у внутрішньому регістрі схеми управління (CONVERSION LOGIC) АЦП. В кінці циклу перетворення це число переписується в регістр даних АЦП (ADC Data register).

Слід мати на увазі, що функціонуючий АЦП можна отримати, якщо реалізувати метод перетворення вхідної напруги в часовий інтервал за допомогою використання таймера лічильника і аналогового компаратора. У мікроконтролерах за допомогою таймера/лічильника можна також реалізувати АЦП, що функціонують за *методом подвійної інтеграції*. Цей спосіб має багато переваг. Зокрема, він придатний для створення АЦП, що забезпечують дуже високе придушення перешкод на деяких частотах, пов'язаних з силовою живлячою мережею. Проте швидкість перетворення у них мала.

Слід також пам'ятати, що АЦП інтегрування мають і ряд інших недоліків: по-перше, нелінійність перехідної статичної характеристики операційного підсилювача, на якому виконують інтегратор, помітним чином позначається на інтегральній нелінійності характеристики перетворення АЦП високого дозволу; по-друге, недоліком цих АЦП є та обставина, що інтегрування вхідного сигналу займає в циклі перетворення тільки приблизно третю частину. Дві третини циклу перетворювач не приймає вхідний сигнал. Це погіршує перешкодоприборкувальні властивості інтегруючого АЦП; по-третє, АЦП багатоконтактного інтегрування повинен бути забезпечений досить великою кількістю зовнішніх резисторів і конденса-

торів з високоякісним діелектриком, що значно збільшує місце, яке займає перетворювач на платі, і, як наслідок, підсилює вплив перешкод.

Промисловістю випускається велика кількість дешевих, швидких і точних аналого-цифрових перетворювачів з вбудованою схемою вибірки і зберігання, з внутрішнім джерелом напруги, які виконані у вигляді окремої мікросхеми. Якщо використовувати такі АЦП, то МК застосовується для управління такою схемою.

Серед АЦП широкого розповсюдження набули *часо-імпульсні перетворювачі* (ЧІП), в основу яких покладений метод перетворення вхідної напруги в часовий інтервал. Під часовими інтервалами розуміють відрізки часу, що задаються положенням імпульсів початку U_H і кінця U_K , тривалістю імпульсів, періодом гармонійних коливань та іншими способами.

До складу простого перетворювача входять: *RS-тригер*; логічний елемент «І»; двійковий лічильник імпульсів. Вхідні імпульси U_H і U_K подаються на відповідні входи *RS-тригера*, який виробляє імпульс тривалістю T_X . Цей імпульс поступає на один з входів логічного елемента «І» і вирішує проходження імпульсів з періодом T_e на вхід лічильника, який підсумовує. Число N імпульсів, підраховане лічильником за час T_X , відповідає часовому інтервалу T_n , який пов'язаний з T_e рівністю $T_n = NT_e$. *Перетворюваний* інтервал T_X відрізняється від інтервалу T_n і визначається співвідношенням: $\dot{O}_o = N\dot{O}_e - \Delta t_1 + \Delta t_2$, де Δt_1 і Δt_2 – погрішність, обумовлена відсутністю синхронізації імпульсів U_H і U_K з еталонними імпульсами. Величини Δt_1 і Δt_2 характеризують погрішність квантування (методичну погрішність) одноканального ПВК: $\Delta t_{\text{еа}} = \Delta t_1 - \Delta t_2$.

Інструментальна погрішність ПВК послідовного рахунку обумовлена тільки нестабільністю періоду проходження імпульсів еталонної частоти T_E . При використанні генераторів з кварцевою стабілізацією (відносна нестабільність $10^{-6} - 10^{-8}$) інструментальну погрішність у більшості випадків можна не враховувати.

Розглянуті ПВК послідовного рахунку застосовні тільки для перетворення великих часових інтервалів $\dot{O}_o \gg \dot{O}_E$. Для перетворення малих часових інтервалів, менших або сумірних з T_E , вони непридатні.

Для перетворення малого часового інтервалу використовується зміна масштабу часу, при якому початковий часовий інтервал ніби помножується на заданий коефіцієнт перетворення масштабу часу K_n . Значення K_n вибирається таким, щоб отриманий часовий інтервал $\dot{O}_o = \hat{E}_i \times T_o$

можна було перетворити в цифровий код одноканальним ПК з необхідною точністю.

7.2. Основи управління процесами проведення перетворень цифрової інформації в аналогову

7.2.1. Початкові відомості про цифро-аналоговий інтерфейс комп'ютеризованих систем

Більшість технічних засобів потребують системи управління, або контролю (від англ. *control* – регулювання), того або іншого вигляду, щоб забезпечити їх безпечне та економічне функціонування.

Матеріальним втіленням управляючої інформації є фізична величина. У завданнях управління механічними пристроями зазвичай стикаємося із завданнями належного забезпечення таких параметрів, як крутильний момент, швидкість, координати простору, сила і т. д. При цьому потрібні для дій, що управляють, параметри, кінець кінцем, подаються значеннями електричних величин. Потрібна інформація про аналогову фізичну величину зазвичай поміщена в інтенсивності електричної напруги (струму), що змінюється в часі.

Якщо потрібне регулювання вихідних параметрів електромеханічної машини (силових, швидкісних, енергетичних), то механічні характеристики приводів повинні доцільно змінюватися в результаті зміни рівня живильної напруги. Так, наприклад, для того щоб отримати невеликі переміщення робочого штока з високою точністю, на п'єзокераміку як на матеріал, що володіє властивістю змінювати розміри під впливом прикладеної різниці потенціалів, необхідно подати напругу відносно невеликої амплітуди.

В електричних нагрівачах сушильних пристроїв для отримання заданої температури потрібно забезпечити протікання певного струму. Щоб електродвигун з виконавчим органом, що використовується для здійснення руху органів машини, міг створити певний крутильний момент і розвинути необхідну швидкість обертання вихідного валу, необхідний певний струм у його обмотці збудження.

Зростання складності поліграфічних об'єктів, удосконалення технологічних процесів друку зумовили необхідність високого ступеня автоматизації всіх процедур управління, застосування інформаційно-управ-

ляючих обчислювальних систем, тобто комплексу апаратурних і програмних засобів, який автоматично управляє режимами роботи і станом об'єкта. У сучасному устаткуванні завжди є керований об'єкт і пов'язана з ним система управління, функції якої полягають у прийомі, обробці сигналів, що поступають, і виробленні відповідних команд управління. Сигнали, що поступають від устаткування, можуть бути оброблені (рис. 7.8) або шляхом використання аналогових методів (аналогової обробки сигналів, або ASP), або цифрових методів (цифрової обробки сигналів, або DSP), або за рахунок застосування комбінації аналогових і цифрових методів (комбінованої обробки сигналів, або MSP).

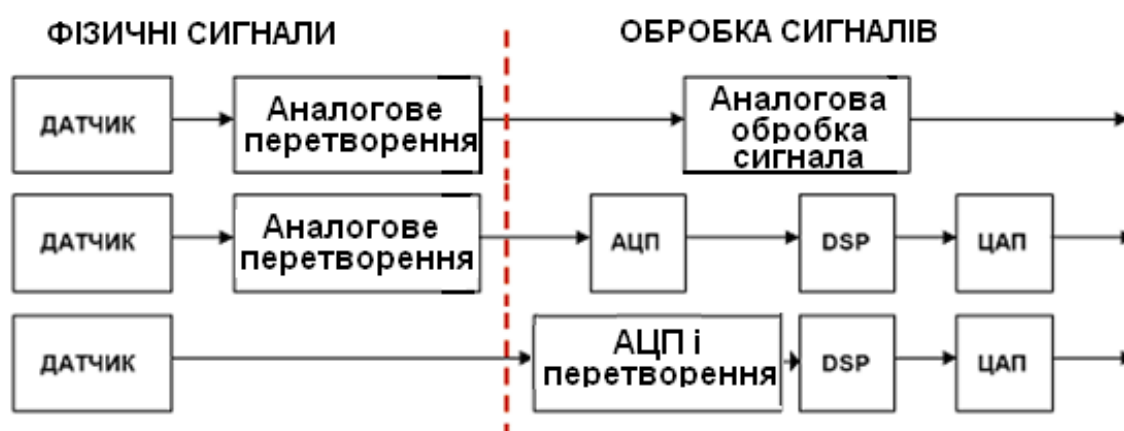


Рис. 7.8. Види обробки сигналів в інформаційно-управляючих системах

При вирішенні завдань управління завжди існує проблема вибору належного методу, заснованого на використанні або аналогових, або цифрових сигналів, або їх комбінації.

У сучасному комп'ютеризованому устаткуванні можуть застосовуватися так звані «цифрові технології» управління, які базуються на використанні МК. Застосування DSP обумовлює високу швидкість і ефективність виконання складних функцій цифрової обробки, таких, як: фільтрація, аналіз, стиснення даних у реальному масштабі часу).

Застосування цифрових способів управління об'єктом дає можливість забезпечити високу точність управління, оптимізацію режимів роботи технологічного устаткування і механізмів широкого призначення в режимі реального масштабу часу. Проте обробити фізичні аналогові сигнали, використовуючи тільки цифрові методи, неможливо. Це пов'язано,

по-перше, з тим, що всі сенсори фізичних величин, що «поставляють» інформацію про стан устаткування, є аналоговими пристроями (термопари, тензорезистори, п'єзоелектричні кристали і т. д.). Причому для подальшої своєї обробки багато аналогових сигналів вимагають наявності попередньої нормалізації. Здійснюють нормалізацію сигналу аналогові процесори, що виконують такі функції, як: посилення, виявлення сигналу на тлі шуму, динамічне стиснення діапазону і т. д. По-друге, в комп'ютеризованому устаткуванні, що виконує функції прийому, обробки й видачі управляючої інформації, ядром яких є мікроконтролер, технічні агрегати з великою тривалістю функціонування для свого управління вимагають, як правило, аналогового сигналу, який безперервно змінюється і володіє незліченною безліччю значень за розміром.

Очевидно, що в сучасних системах управління, збору й обробки інформації повинна здійснюватися «комбінована обробка сигналів», яка має на увазі використання як аналогових, так і цифрових сигналів. При цьому бажано, щоб комплексна (цифрова та аналогова) обробка виконувалася на одному кристалі мікросхемою з високим ступенем інтеграції. Така система може бути реалізована у вигляді друкарської плати, гібридної інтегральної схеми (IC) або окремого кристала з інтегрованими елементами, що здійснюють аналого-цифрове (АЦП) і цифро-аналогове перетворення (ЦАП) з високими частотами дискретизації та роздільними здатностями. АЦП і ЦАП можуть розглядатися як пристрої комбінованої обробки сигналів, оскільки в кожному з них реалізовані і аналогові, і цифрові функції. Плата комплексного управління в цьому випадку виконує функції різного перетворення інформації про бажаний і поточний стани об'єкта регулювання в регулюючі дії або на силові елементи систем сполучення з об'єктом управління (ОУ), або на силові виконавчі пристрої, що безпосередньо впливають на ОУ. При «комбінованих» технологіях збір даних про об'єкт (від сенсорів) здійснюється в аналоговій формі, введення завдання на управління проводиться по інформаційному каналу в цифровій формі, обробка сигналів, що реалізовує деяку систему алгоритмів управління, проводиться в цифровому вигляді, а саме управління виконується аналоговим сигналом в енергетичному каналі.

Істотною особливістю подібних технологій є наявність у контурах управління інформації аналогового і цифрового типів.

Для виведення результатів обробки у вигляді аналогових сигналів, що змінюються в часі за заданим законом, для подачі на керований об'єкт

сигналів управління (маніпуляції) станом об'єкта, в комп'ютеризованому устаткуванні необхідна *управляюча підсистема виведення інформації*.

МК за своєю природою є цифровими пристроями і працюють з цифровим поданням величин, тому управляючий МК у цифровому вигляді «розраховує» необхідні технологічні дії. Щоб отримані при вирішенні завдань кінематики, динаміки і інші результати розрахункових операцій придбали вид дій управління (аналогових сигналів управління) у вигляді заданих струмів і відповідної напруги, необхідною частиною сучасних систем управління є цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП, або, в англійській термінології, DAC – digit-to-analog converter).

ЦАП – це функціональний вузол, що однозначно перетворює кодові комбінації цифрового сигналу (ланцюжки бітів двійкового слова) у значення аналогового сигналу і є пристроєм, що зазвичай є інтегральною схемою, на вхід якої подається цифровий код, а на виході маємо аналогову величину заданого розміру (найчастіше напругу).

ЦАП використовуються для завдання аналогової величини з дуже високою точністю, для узгодження цифрових програмно-обчислювальних пристроїв з аналоговими пристроями, а також як внутрішні вузли в аналого-цифрових перетворювачах (АЦП) і цифрових вимірювальних приладах. ЦАП, по суті, є декодуючим пристроєм, на вхід якого поступає цифровий сигнал N_{DAC} , а з виходу знімається такий аналоговий сигнал $Y = F(N_{DAC})$, функціонально пов'язаний з вхідним наступним співвідношенням: $Y = q N_{DAC}$, де q – чутливість (коефіцієнт перетворення, ступінь квантування, ціна молодшого розряду) перетворювача.

В інтегральних ЦАП вхідним сигналом, як правило, є двійковий позиційний код. Вихідним сигналом зазвичай є постійна напруга. Такі ЦАП називаються перетворювачами кодів у напругу (ПКН). Вихідну напругу ПКН можна подати у вигляді рівняння перетворювача «код – аналог»: $U_{\text{âüö}} = U_o N_{DAC}$, де U_o – опорна напруга (ціна молодшого розряду ПКН). Число N_{DAC} у двійковій системі числення подається таким виразом:

$$N_{DAC} = a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12^1 + a_02^0 = \sum_{i=0}^{n-1} a_i2^i$$

(число-імпульсний код), де a_i – коефіцієнти відповідних двійкових розрядів вхідного коду, що приймає значення або 0, або 1; n – кількість розрядів вхідного коду (кількість бітів у цифровому слові).

Кількість бітів, що використовуються в цифровому слові, є однією з важливих характеристик ЦАП. Якщо ПНК прості, то використовуване число розрядів вихідного коду звичайно 8, 10, 12. Наприклад, у аудіосистемі, щоб забезпечити високу якість звуку, потрібні ЦАП більшої розрядності. Для того щоб перетворити весь цифровий код звукової інформації (музику), записаний на CD (DVD), у звуки, якраз необхідний ЦАП з числом розрядів 16 і 24.

В CD-Audio записаний 16-розрядний звук, а в DVD-Audio – 24-розрядний. Максимальне число розрядів, яке може бути подане на вхід ЦАП і перетворено в аналогову вихідну величину, пропорційну значенню коду, залежить від конструктивного і схемотехнічного виконання конкретної інтегральної схеми DAC. Для вихідної напруги ПНК має місце співвідношення:

$$U_{\hat{a}u\tilde{o}} = \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i \cdot U_o.$$

Таким чином, перетворення коду в напругу полягає в тому, що з опорного сигналу формуються еталонні величини, відповідні значенням розрядів вхідного коду, які підсумовуються й утворюють дискретні значення вихідної аналогової величини (у підсумовуванні еталонів напруги $2^i \cdot U_o$, пропорційних вагам розрядів вхідного коду). У підсумовуванні беруть участь тільки ті еталони, для яких $a_i = 1$.

Якщо на входи ЦАП подати паралельний двійковий код, значення кожного розряду якого на входи поступають одночасно, і при цьому вхідний код змінюватиметься на одну одиницю молодшого розряду, то вихідна аналогова величина змінюватиметься рівномірно – ступінчасто. При послідовному зростанні значень вхідної кількості імпульсного коду N_{DAC} від мінімального до максимального, а також за умови, що кожне значення вхідного коду при цьому перетвориться в дискретне значення вихідної аналогової величини, вихідний сигнал $U_{\hat{a}u\tilde{o}}$ утворює ступінчасту функцію (рис. 7.9-а). Така залежність називається статичною характеристикою перетворення $U_{\hat{a}u\tilde{o}} = f(N_{DAC})$. Вона визначає основні статичні параметри ПНК.

В ідеального ПНК усі сходинки характеристики перетворення мають однакові значення U_o і середні точки сходинок розташовані на ідеальній прямій 1 (рис. 7.9-а).

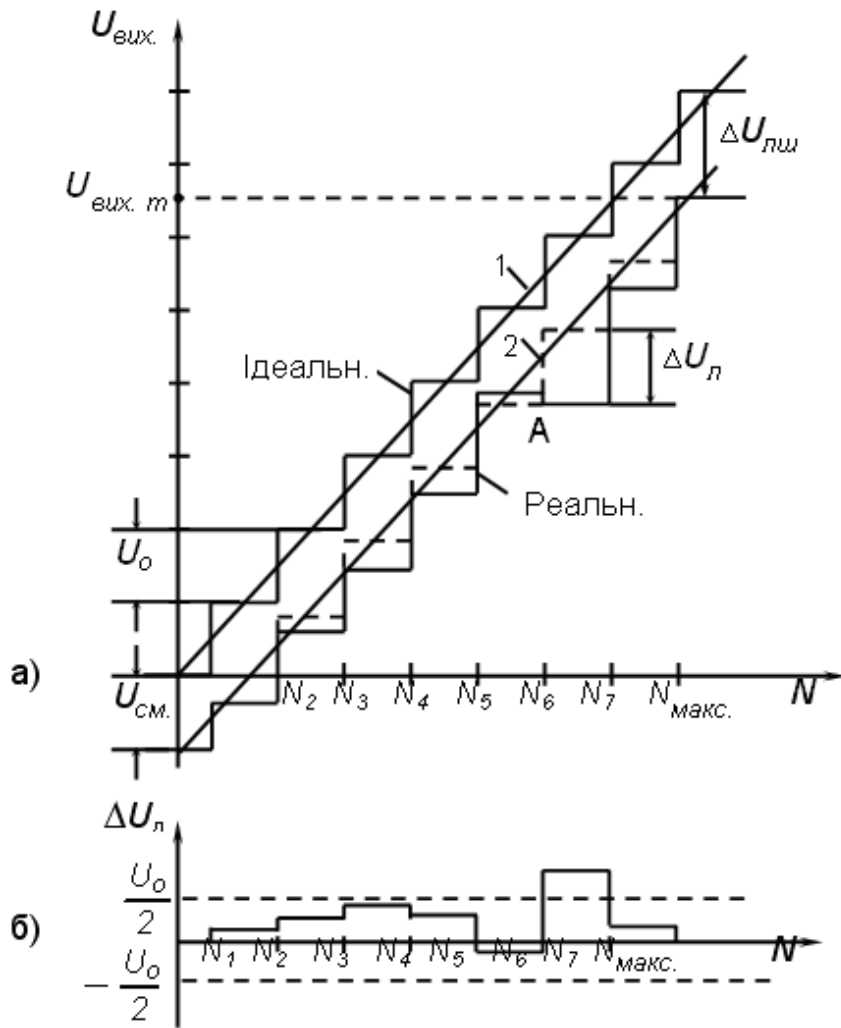


Рис. 7.9. Статична характеристика ЦАП $U_{\text{вих.}} = f(N)$

Вважають, що ЦАП має лінійну характеристику перетворення. У цьому випадку в системі координат «код – вихідна аналогова величина» характеристика зображається прямою, розташованою під деяким кутом до осі абсцис.

На характеристиці перетворення можна виділити характерні точки. Перш за все це початкова і кінцева точки характеристики перетворення, які визначаються початковими $N_{min.}$ і кінцевими значеннями $N_{max.}$ вхідного коду. Початковою точкою характеристики перетворення є точка перетину координатних осей, тобто точка, відповідна нульовому значенню вихідної аналогової величини при значенні вхідного коду, рівному нулю. Інтервал значень вихідної аналогової величини від початкової до кінцевої точки називається *діапазоном вихідної величини*, а різниця між максимальним і мінімальним значенням цієї величини – *амплітудою її зміни*.

Значення дискретної зміни вихідної аналогової величини при зміні вхідного коду на одиницю називають ступенем *квантування*. Важливим параметром ЦАП є роздільна *здатність* перетворювача, що становить найменшу зміну вихідної аналогової величини (номінальне значення ступеня квантування). Абсолютне значення роздільної здатності ЦАП рівне ціні молодшого розряду: $U_o = U_{\text{âëõ m}} / (2^n - 1)$, де $U_{\text{âëõ m}}$ – максимальна вихідна напруга перетворювача. Наприклад, перетворювач на 12 цифрових входів, що має вихідний сигнал у кінцевій точці характеристики перетворювача, рівний 10 В, має роздільну здатність $10 / (4096 - 1) = 2,45$ мВ. При використанні 24-розрядного ЦАП роздільна здатність за тих же умов рівна $10 / (16777216 - 1) = 0,596$ мкВ. Вказана роздільна здатність є потенційно можливою і характеризує тільки ідеальні ПКН.

Для дійсної характеристики перетворення ступеня квантування в різних точках можуть відрізнятися один від одного. У цьому випадку підраховують середнє значення ступеня квантування. Це значення може служити одиницею вимірювання вихідної аналогової величини, і його називають одиницею молодшого розряду (ОМР). ОМР наочно подає всі параметри вихідної аналогової величини.

Через наявність різних погрішностей вузлів реальних ЦАП, що з'являються внаслідок недосконалості технології їх виготовлення, характеристики перетворення реальних ЦАП відрізняються від ідеальних формою, значенням ступенів і розташуванням щодо осей координат (див. рис. 7.9-а).

Точність ЦАП характеризується рядом відхилень характеристики перетворення від ідеальної, кількісно виражається рядом погрішностей і визначається ступенем збігу реальної характеристики перетворення з ідеальною.

Для кількісного опису сумарної інструментальної погрішності вводиться ряд параметрів. *Абсолютна погрішність перетворення в кінцевій точці шкали (погрішність повної шкали)* $\Delta U_{i\phi}$ визначає відхилення значення вихідної напруги $U_{\text{âëõ m}}$ від номінального (розрахункового) при максимальному вхідному коді $N_{i\text{âëñ}}$ (рис. 7.9-а). Погрішність повної шкали наводиться в довідкових даних в одиницях молодшого розряду. *Погрішність зсуву нуля на виході* U_{ci} характеризує значення $U_{\text{âëõ}}$ при нульовому значенні вхідного коду (рис. 7.9-а).

Диференціальна нелінійність $\delta_{\text{лн}}$ характеризує відхилення різниці значень двох вихідних напруг, що відповідні двом сусіднім кодам, від ціни молодшого розряду. *Погрішність нелінійності* $\Delta U_{\text{н}}$ характеризує ідентичність приростів (сходинок) вихідного сигналу у всьому діапазоні перетворення. Вона визначається як максимальне відхилення реальної характеристики перетворення від лінії абсолютної точності 2. Лінія проводиться через точки на характеристиці, що відповідають мінімальному і максимальному значенням вхідного коду (див. рис. 7.9-а). Абсолютне значення погрішності нелінійності вимірюється в ОМР.

Погрішність нелінійності (див. рис. 7.9-б) є найбільш важливою характеристикою ПКН і, як правило, не повинна виходити за межі $\pm U_o/2$. Інакше характеристика перетворення може бути немонотонною. Це означає, що при подачі вхідного коду, що вимагає збільшення вихідної напруги, вона може зменшитися (ділянка А характеристики реального ПКН на рис. 7.9-а).

Відхилення реальної характеристики перетворення від номінальної можливо також у вигляді паралельного зрушення. Паралельне зрушення оцінюють відносно початку координат і називають напругою зсуву нуля $U_{\text{см}}$ вихідної аналогової величини. Це дійсне значення вихідної величини при значенні вхідного коду, при якій номінальна вихідна величина рівна нулю. Сумарна статична погрішність ПКН в основному визначається розглянутими вище складовими.

У системах управління, збору й обробки даних ЦАП працюють при значеннях кодів, що безперервно змінюються, на входах. Тому прочитування інформації з виходу ЦАП повинно проводитися після закінчення всіх перехідних процесів в ньому. Тільки в такому разі можна отримати точність, на яку розрахований ЦАП. Тому продуктивність обробки інформації, швидкодія ЦАП визначаються так званими *динамічними параметрами*. З динамічних параметрів ПКН найбільш істотними є час встановлення вихідної напруги і максимальна частота перетворення.

Час встановлення вихідної напруги $t_{\text{вст}}$ – інтервал часу від моменту надходження вхідного коду до моменту встановлення вихідної напруги із заданою точністю.

Максимальна частота перетворення $f_{\text{н, і}}$ – найбільша частота дискретизації (надходження вхідних кодів), при якій параметри ПКН від-

повідують заданим значенням. До динамічних характеристик ЦАП можна віднести й імпульсні перешкоди, що виникають на виході ЦАП при його роботі в режимі безперервної зміни значень вхідного коду.

Разом з розглянутими характеристиками ПКН у довідкових даних також наводяться параметри вхідного коду і граничні експлуатаційні параметри.

7.2.2. Цифро-аналогові перетворювачі паралельного типу інтегрального виконання

Виконання цифро-аналогових перетворювачів різноманітне. ЦАП інтегрального виконання можна класифікувати за такими ознаками: а) за виглядом вихідного сигналу: із струмовим виходом і виходом у вигляді напруги; б) за типом цифрового інтерфейсу: з послідовним введенням і з паралельним введенням вхідної коду; з) за числом ЦАП на кристалі: одноканальні і багатоканальні; д) за швидкодією: помірної і високої швидкодії. На рис. 7.10 подана класифікаційна схема ЦАП за ознаками схемотехніки.

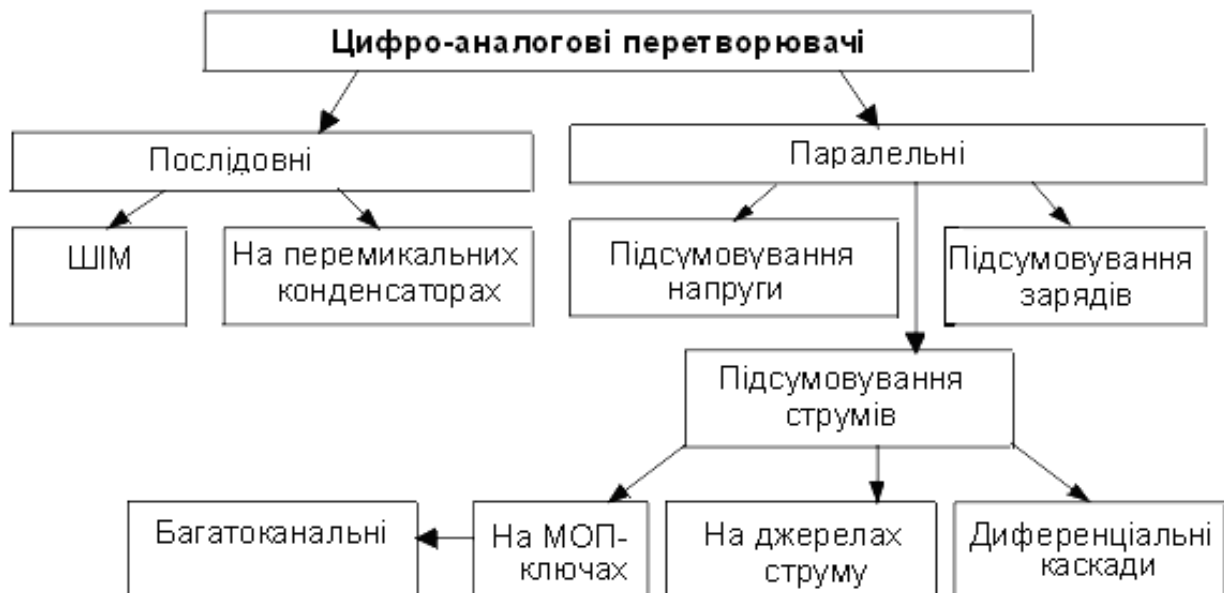


Рис. 7.10. Класифікація ЦАП за ознаками схемотехніки

Схема ЦАП AD7520, розроблена фірмою Analog Devices в 1973 році, є по суті промисловим стандартом, (за яким виконано багато серійних

моделей ЦАП). Ця схема на матриці резисторів R-2R в спрощеному вигляді подана на рис. 7.11-а.

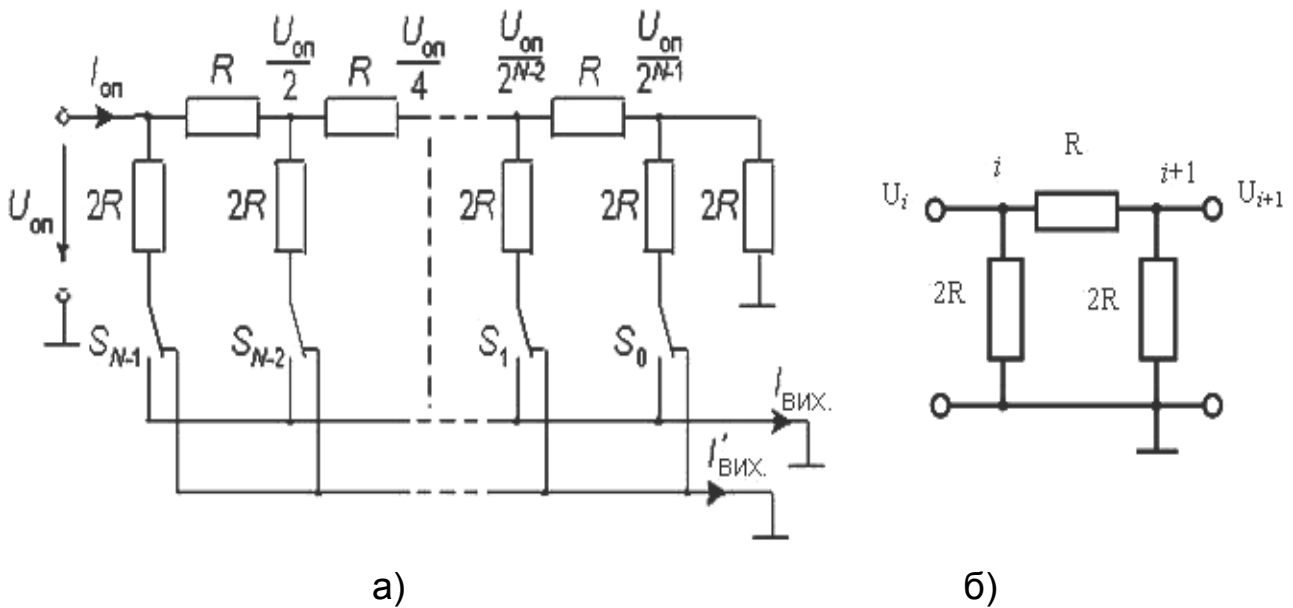


Рис. 7.11. Спрощена схема, що пояснює принцип роботи, (а) та еквівалентна схема матриці R-2R у i -й точці (б)

У схемі ЦАП AD7520 завдання вагових коефіцієнтів ступенів перетворювача здійснюють за допомогою послідовного ділення опорної напруги за допомогою резистивної матриці постійного імпедансу. Особливістю матриці резисторів є те, що загальний опір між будь-якою i -ю точкою матриці і загальною шиною рівний $2R/3$, а потенціал, прикладений до i -ї точки, в кожній подальшій справа (або зліва) точці за правилом дільника напруги зменшуватиметься у два рази (рис. 7.11-б).

Основним елементом такої матриці є дільник напруги, який повинен задовольняти таку умову: якщо він навантажений на опір R_n , то його вхідний опір R_{ex} також має приймати значення R_n . Коефіцієнт ділення напруги ланцюга $K_{ДЕЛ} = U_2/U_1$ при цьому навантаженні повинен мати задане значення. Оскільки в будь-якому положенні перемикачів S_k вони з'єднують нижні виводи резисторів із загальною шиною схеми (див. рис. 7.11-а), джерело опорної напруги навантажене на постійний вхідний опір $R_{ex} = R$. Це гарантує незмінність опорної напруги при будь-якому вхідному коді ЦАП. Оскільки нижні виводи резисторів $2R$ матриці при будь-якому стані перемикачів S_k з'єднані із загальною шиною схеми через низький опір замкнених ключів, напруга на ключах завжди невелика, в межах декількох мілівольт. Це спрощує побудову ключів і схем управлін-

ня ними й дозволяє використовувати опорну напругу з широкого діапазону, в тому числі і різної полярності.

Як джерела еталонного сигналу в перетворювачі «код – напруга» можуть застосовуватися n генераторів стабільного струму I_0 . Окрім них, у ПКН входять n перемикачів струму, матриця резисторів R-2R і буферний підсилювач (операційний підсилювач, охоплений негативним зворотним зв'язком), призначений для виключення впливу опору навантаження R_H на параметри перетворювача.

У загальному випадку, мікросхему паралельного ЦАП можна подати у вигляді блоку (рис. 7.12), що має декілька цифрових входів і один аналоговий вхід, а також аналоговий вихід.

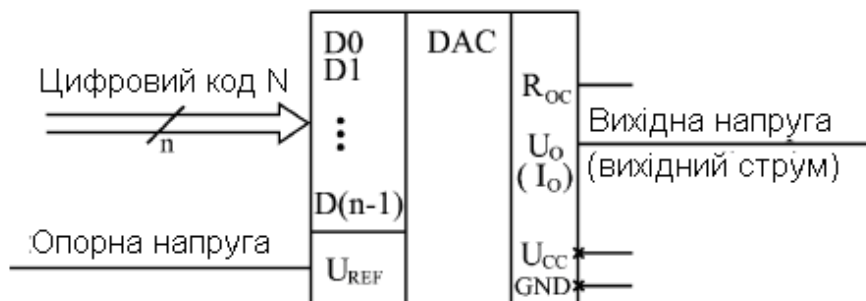


Рис. 7.12. Мікросхема паралельного ЦАП

Залежно від способу завантаження вхідного слова в ЦАП розрізняють перетворювачі з *паралельним і послідовним інтерфейсами вхідних даних*.

При *паралельному інтерфейсі* на цифрові входи ЦАП подається n -розрядний код N , на аналоговий вхід — *опорна напруга* $U_{оп}$ (інше поширене позначення – U_{REF}). Вихідним сигналом є напруга $U_{вих}$ (інше позначення – U_0) або струм $I_{вих}$ (інше позначення – I_0). При цьому вихідний струм або вихідна напруга пропорційні вхідному коду та опорній напрузі.

Для деяких мікросхем опорна напруга повинна мати строго заданий рівень, для інших допускається зміна його значення в широких межах, у тому числі і зміна його полярності. ЦАП з великим діапазоном зміни опорної напруги називається *помножуючим ЦАП*, оскільки його можна легко використовувати для множення вхідного коду на будь-яку опорну напругу. Окрім інформаційних сигналів, мікросхеми ЦАП вимагають також підключення одного або двох джерел живлення і загального дроту. Зазви-

чай цифрові входи ЦАП забезпечують сумісність із стандартними виходами мікросхем ТТЛ. Для ЦАП паралельного типу важливу частину складає цифровий інтерфейс, тобто схеми, що забезпечують зв'язок джерела цифрових сигналів з АЦП, тобто з входами ключів управління.

Структура цифрового інтерфейсу визначає спосіб підключення ЦАП до джерела вхідного коду, наприклад, мікропроцесору або мікроконтролеру. Властивості цифрового інтерфейсу безпосередньо впливають і на форму кривої сигналу на виході ЦАП. Як уже наголошувалося неодноразово, надходження бітів вхідного слова на управляючі входи ключів перетворювача приводить до появи вузьких викидів, «голок», у вихідному сигналі при зміні коду.

При управлінні ЦАП від цифрових пристроїв з жорсткою логікою управляючі входи ключів ЦАП можуть бути безпосередньо підключені до виходів цифрових пристроїв. Якщо ж ЦАП входить до складу комп'ютеризованої системи й отримує вхідний код від шини даних, то він повинен бути забезпечений пристроями, що дозволяють приймати вхідне слово від шини даних, комутувати відповідно до цього слова ключі ЦАП і зберігати його до отримання іншого слова.

Для управління процесом завантаження вхідного слова ЦАП повинен мати відповідні входи і схему управління. При цьому використовують два варіанти інтерфейсу. У першому прикладі інтерфейсу на N входів даних N -розрядного ЦАП подається все вхідне слово цілком. Інтерфейс такого ЦАП включає два регістри зберігання і схему управління. Два регістри зберігання потрібні, якщо пересилка вхідного коду в ЦАП і установка вихідного аналогового сигналу, що відповідає цьому коду, будуть розділені в часі. Подача на вхід асинхронного скидання CLR-сигналу низького рівня приводить до установлення на нульову позначку першого регістра і, відповідно, вихідної напруги ЦАП. У іншому прикладі при підключенні 12-розрядного ЦАП MAX507 до 16-розрядного входу МК він посилає вхідний код у ЦАП як в елемент пам'яті даних. Спочатку з шини адреси/дані поступає адреса ЦАП, яка фіксується регістром по команді з виходу ALE МК і після дешифрування активізує вхід CS ЦАП. Услід за цим МК подає на шину адреси/дані вхідний код ЦАП і потім сигнал запису на вхід WR.

Для підключення багаторозрядних ЦАП до восьмирозрядних мікроконтролерів використовується другий варіант паралельного інтерфейсу. Він передбачає наявність двох паралельних завантажувальних регістрів

для прийому молодшого байта вхідного слова МБ і старшого байта – СБ. Пересилка байтів вхідного слова в завантажувальні регістри може відбуватися в будь-якій послідовності.

Перетворювач з послідовним інтерфейсом містить на кристалі, крім власне ЦАП, також послідовний регістр завантаження, паралельний регістр зберігання і логіку управління (рис. 7.13-а). Найчастіше використовується тридротовий інтерфейс, який забезпечує управління цифро-аналоговим перетворювачем послідовних інтерфейсів процесорів.

Для того щоб мати можливість передавати по одній лінії даних вхідні коди декілька ЦАП, останній розряд регістра зрушення у багатьох моделях ЦАП з послідовним інтерфейсом з'єднується з виведенням ІМС *DO*. Цей вивід підключається до входу *DI* наступного ЦАП і т. д. Коди вхідних слів передаються, починаючи з коду найостаннішого перетворювача в цьому ланцюжку.

Як приклад на рис. 7.13-б подана часова діаграма, що відображає процес завантаження вхідного слова в ЦАП AD7233. Мінімально допустимі значення інтервалів часу (близько 50 нс), позначених на часових діаграмах, указуються в технічній документації на ІМС.

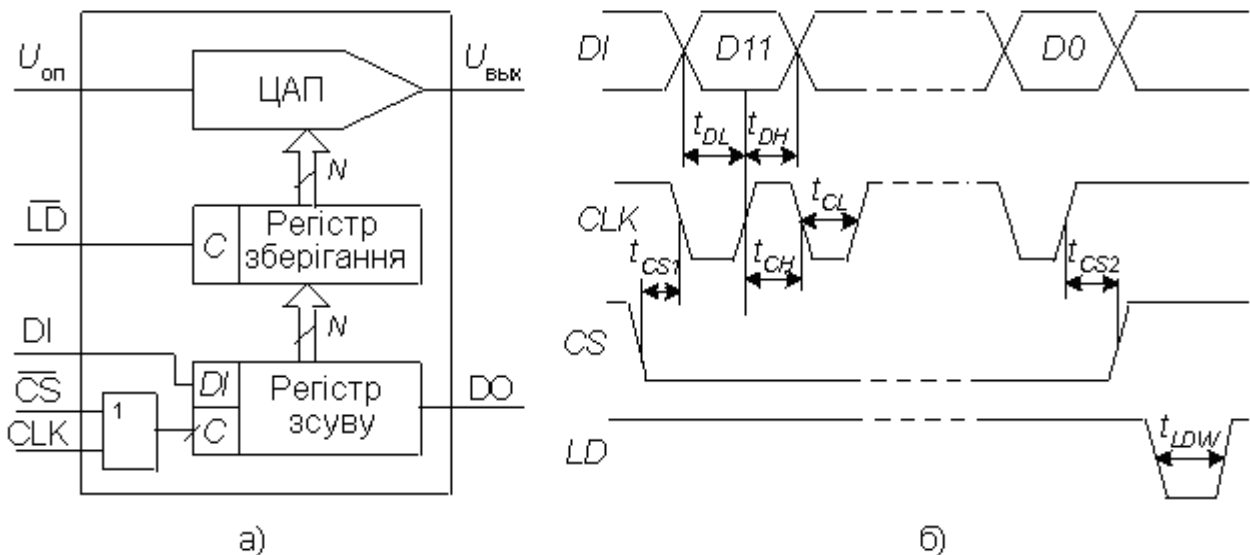


Рис. 7.13. Підключення ЦАП з послідовним інтерфейсом

На рис. 2.14 наведений варіант схеми підключення перетворювача з послідовним інтерфейсом до МК. На час завантаження вхідного слова в ЦАП через послідовний порт МК, до якого можуть бути також підключені

й інші приймачі, на вхід CS (вибір кристала) подається активний рівень з однією з ліній вводу-виводу МК.

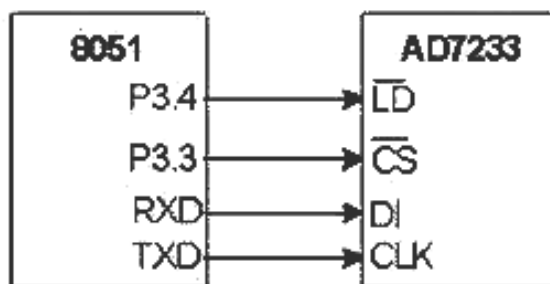


Рис. 7.14. Підключення ЦАП з послідовним інтерфейсом до мікроконтролера

Після закінчення завантаження МК змінює рівень на вході CS, як це показано на рис. 7.13-б, і, виставивши активний рівень на вході LD ЦАП, забезпечує пересилку вхідного коду з регістра зрушення ЦАП у регістр зберігання. Час завантаження залежить від тактової частоти МК і зазвичай складає одиниці мікросекунд.

У випадку, якщо коливання вихідного сигналу ЦАП під час завантаження допустимі, вхід LD можна з'єднати із загальною точкою схеми. Мінімальна кількість ліній зв'язку з ЦАП забезпечується двопровідним інтерфейсом I²C, яким оснащуються деякі моделі ЦАП, наприклад AD5301. Адресація конкретного пристрою здійснюється по лінії даних. Про послідовні інтерфейси мова піде в подальших розділах.

Найчастіше ЦАП має струмовий вихід (рис. 7.15-а).

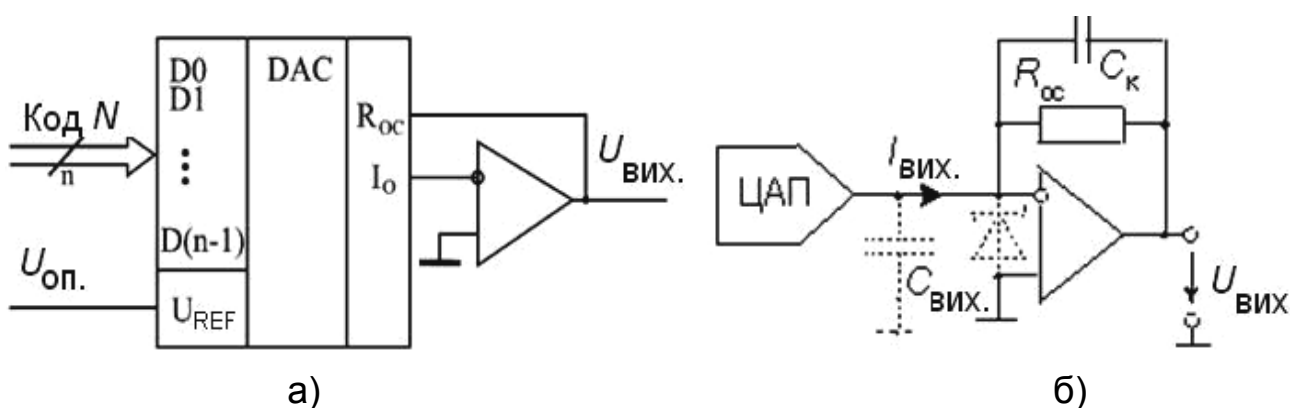


Рис. 7.15. Перетворення вихідного струму ЦАП у напругу

У цьому випадку вихідний струм перетвориться у вихідну напругу за допомогою зовнішнього операційного підсилювача і вбудованого в ЦАП резистора R_{oc} , один з виводів якого виведений на зовнішнє виведення мікросхеми.

Існують і інші способи формування вихідної напруги для ЦАП з підсумовуванням вагових струмів.

Перший з них – схема з перетворювачем струму в напругу на операційному підсилювачі – показаний на рис. 7.15-б.

Ця схема придатна для всіх ЦАП із струмовим виходом. Оскільки плівкові резистори, що визначають вагові струми ЦАП, мають значний температурний коефіцієнт опору, резистор зворотного зв'язку R_{oc} слід виготовляти на кристалі ЦАП і в тому ж технологічному процесі, що зазвичай і робиться. Це дозволяє понизити температурну нестабільність перетворювача в 300 – 400 разів.

Для цифро-аналогового перетворювача на джерелах струму перетворення вихідного струму в напругу може бути проведене за допомогою резистора (рис. 7.16).

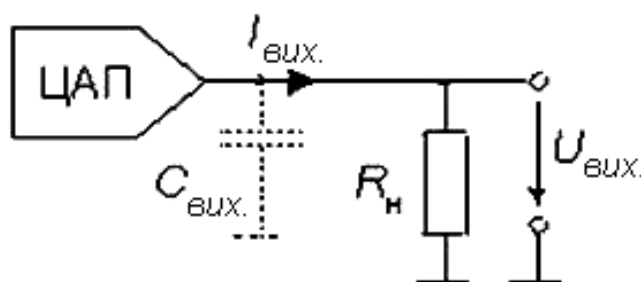


Рис. 2.16. Формування вихідної напруги по струмовому виходу ЦАП за допомогою резистора

У цій схемі неможливі самозбудження і збережена швидкодія, проте амплітуда вихідної напруги повинна бути невеликою, наприклад, для AD565A в біполярному режимі в межах ± 1 В.

Такий режим забезпечується при низьких значеннях опору навантаження: $R_n \sim 1$ кОм.

Для збільшення амплітуди вихідного сигналу ЦАП у цій схемі до її виходу можна підключити неінвертуючий підсилювач на ОП.

7.2.3. Цифро-аналогові перетворювачі послідовного типу на основі мікроконтролерів (ЦАП із широтно-імпульсною модуляцією)

ЦАП з паралельним входом мають високу точність, велику розрядність і високу швидкодію. Їх застосовують у системах управління високої швидкодії. Проте висока швидкодія – незавжди основний параметр ЦАП. Ще рідше в системах промислової автоматики зустрічаються поєднання вимог високої точності і великої швидкодії.

Якщо ЦАП використовується на виході цифрового пристрою управління, для дії на технологічний процес або об'єкт, що володіє істотними інерційними властивостями, то частота зміни цифрового коду на його вході рідко може перевищити декілька десятків герц. При управлінні промисловими агрегатами досить часто зустрічаються ситуації, коли цифровий код може взагалі не змінюватися протягом декількох десятків хвилин. У таких випадках у системах обробки інформації замість цифро-аналогового перетворювача паралельного типу доцільно використовувати набагато дешевші різновиди ЦАП, які б, хоч і при низькій швидкодії, могли забезпечити прийнятну точність при повній відсутності у своєму складі прецизійних елементів, тобто резисторів, що важко виготовляються за інтегральною технологією, ключів на МОП-транзисторах та ін.).

У мікроконтролерах, що випускаються різними компаніями, модулі паралельних ЦАП для формування аналогових вихідних сигналів у складі мікроконтролера або не передбачені, або є великою рідкістю. Передбачається, що в разі потреби буде застосований зовнішній ЦАП, для якого цифрові сигнали будуть передаватися через різні інтерфейси мікроконтролера.

У більшості промислових застосувань, що використовують МК, функція цифро-аналогового перетворювача реалізується засобами модуля програмованого таймера-лічильника (ТЛ). Необхідний аналоговий сигнал на одному з виводів МК формується за допомогою ТЛ мікроконтролера, що створює імпульсну послідовність з регульованою тривалістю імпульсів, або, по іншому, що працює в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Як виявилось, при використанні ШІМ можна обходитися простими ШІМ-засобами формування аналогового сигналу. При цьому, як буде показано, для отримання прийнятних рівнів пульсацій аналогових вихідних

сигналів необхідні тільки додаткові силові згладжуючі фільтри. Іншими словами, робота ЦАП, що використовуються в МК, заснована на попередньому перетворенні цифрового коду в ШІМ сигнал і подальшій фільтрації. Щоб прояснити суть роботи ЦАП такого типу, розглянемо спочатку докладніше, що таке ШІМ-сигнал.

Широтно-імпульсна модуляція, або скорочено ШІМ (в англійській літературі використовується термін PWM – Pulse Width Modulation) – це спосіб формування прямокутного імпульсного сигналу зміною ширини імпульсів при незмінній їх амплітуді. Можна сказати й інакше. При ШІМ-модуляції як носійне коливання використовується періодична послідовність прямокутних імпульсів, інформаційним параметром якої є тривалість цих імпульсів. ШІМ-сигнал – це практично цифровий сигнал, що приймає значення або логічного 0, або логічної 1.

PWM-сигнал $s(t)$ на виході пристрою, показаний на рис. 7.17, має вид послідовності прямокутних імпульсів з однаковою частотою проходження, у яких тривалість (ширина) пропорційна миттєвим значенням вхідного сигналу.

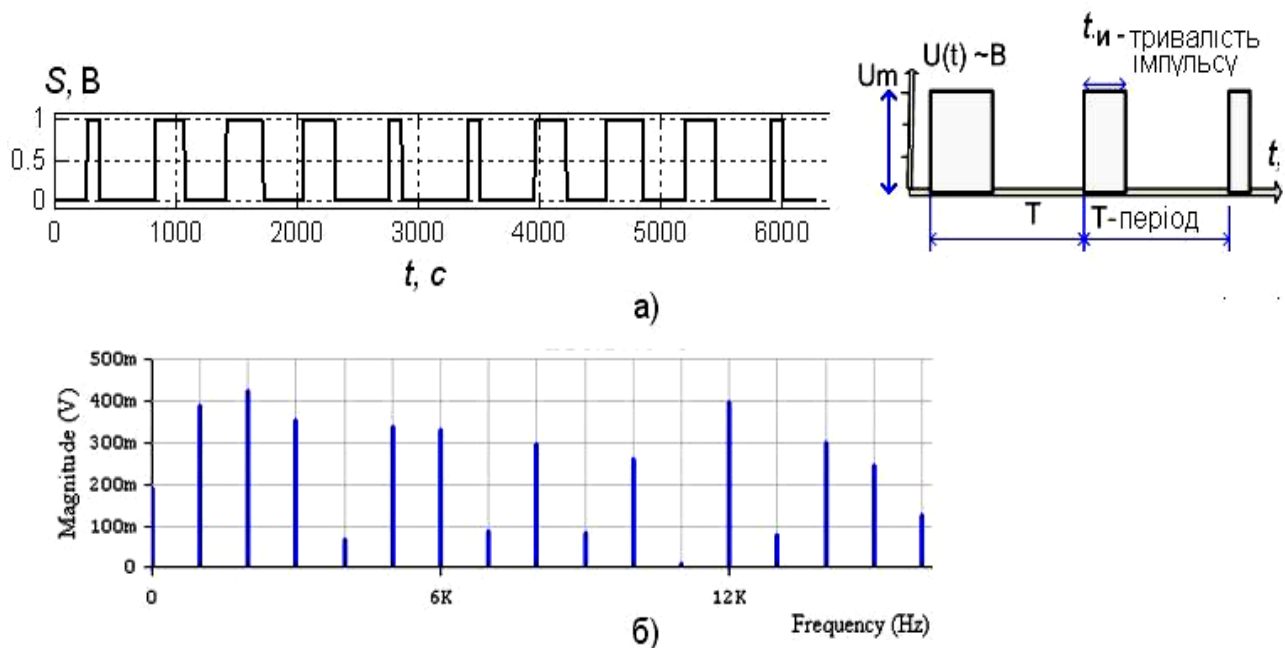


Рис. 7.17. ШІМ-сигнал (а) і діаграма його амплітудно-частотного спектру (б)

PWM-сигнал має такі основні параметри (див. рис. 7.17-а):

а) період ШІМ (позначається T) – це час між фронтами сусідніх імпульсів. Період постійний у часі. Величина, зворотна періоду, – це частота ШІМ рівна $1/T$ у Гц.;

б) тривалість імпульсу ШІМ (позначається t_i – це час між фронтом (початком) і спадом (кінцем) одного й того ж імпульсу. Тривалість імпульсів у ШІМ-послідовності змінюється в часі за законом;

в) величина заповнення імпульсом періоду ШІМ (англ. *duty cycle*), або коефіцієнт заповнення g – це відношення поточної тривалості наявності лог. 1 до періоду ШІМ.

На рис. 7.17-а коефіцієнт заповнення $D = t_i/T$. Duty cycle зазвичай подається у відсотках. Величина $q = 1/D$, зворотна duty cycle і рівна $q = T / t_i$, називається шпаруватістю. Шпаруватість подають в абсолютних одиницях;

г) розмах ШІМ U_m – різниця між значеннями логічної «1» і логічним «0» PWM-сигналу.

Амплітудно-частотний спектр ШІМ сигналу має вигляд, показаний на рис. 7.17-б. Спектр амплітуд, що має вид ряду вертикальних ліній («стеблинок»), які відповідають окремим гармонійним коливанням, дозволяє наочно судити не тільки про співвідношення між амплітудами різних гармонік, але і про смугу частот, у межах яких розташовані енергетично значущі частотні складові сигналу.

У ШІМ-сигналі, як видно з рис. 7.17, є постійна складова, розташована на нульовій частоті, і спектральні компоненти (складові) на частотах, що кратні частоті проходження імпульсів у періодичній послідовності. Характер розподілу спектральних складових у спектрі (висота «стеблинок») залежить від закону зміни тривалості імпульсів у ШІМ-сигналі.

Спектр сигналу свідчить про те, що якщо ми хочемо сконструювати сигнал (відтворити, реконструювати імпульсний сигнал якої-небудь форми), то потрібно скласти постійну складову і всі гармоніки (косинус-функції із заданими амплітудами та початковими фазами) розташовані вздовж частотної осі. Спектр також свідчить, що з ШІМ-сигналу можна виділити необхідну спектральну складову шляхом використання фільтру як пристрою, що пропускає або не пропускає ту або іншу субстанцію.

Слід пригадати, що електричний фільтр – це пристрій, призначений для виділення при обробці сигналу зі складу складного електричного коливання, підведеного до його входу, спектральних складових, розташованих у заданій смузі частот, і придушення тих компонент спектру, які розташовані в діапазоні частот, що вимагає істотного зменшення спектральних складових (висоти «стеблинок»).

Смуго частот фільтру, придушення спектральних складових у якій мале, називають смугою прозорості. Смуго частот, у якій ослаблення спектральних компонент велике, називають смугою затримання фільтру. Частота, що розділяє смуги прозорості та затримання, називається граничною частотою фільтру, або частотою зрізу. Залежно від взаємного розташування областей прозорості й затримання розрізняють фільтри нижніх частот, верхніх частот, смугові і режекторні фільтри.

Фільтри нижніх частот (ФНЧ) дають можливість проходити без ослаблення з входу на вихід постійній складовій і спектральним складовим нижніх частот. З підвищенням частоти зменшення спектральних компонент зростає, що утрудняє проходження через ФНЧ складових високих частот і вони, як то кажуть, «пригнічуються». За допомогою ідеального фільтру відносно просто виділити постійну складову сигналу і компоненти, що становлять суму постійної складової та першої гармоніки.

Якщо відфільтрувати всі гармоніки, подані косинус-функціями, то в ідеальному випадку залишиться складова постійної напруги. Відомо, що після проходження періодичної послідовності імпульсів через ідеальний фільтр нижніх частот сигнал постійної напруги на виході фільтру є постійним значенням, рівним площі під кривою сигналу протягом періоду, що ділиться на період. Це середнє арифметичне визначається наступним

рівнянням:
$$U_{CP} = \frac{Um \cdot t_{\dot{E}} + U_L \cdot (T - t_{\dot{E}})}{T} = \frac{(Um - U_L) \cdot t_{\dot{E}}}{T} + U_L = (Um - U_L) \cdot D + U_L,$$
 де

$D = t_{\dot{E}}/T$ – коефіцієнт заповнення.

Якщо припустити, що напруга насичення транзистора, що формує прямокутний імпульс, рівна нулю $U_L = 0$, то з наведеної вище формули нескладно відмітити, що при незмінному періоді величина напруги на виході фільтру прямо пропорційна тривалості (ширині) імпульсу. Отже, якщо міняти ширину імпульсу, або, по-іншому, здійснювати широтно-імпульсну модуляцію, то можна отримати пристрій, з лінійною залежністю між напругою і тривалістю імпульсу.

Слід мати на увазі, що ідеальний фільтр, який би з високою точністю відокремлював смугу прозорості від смуги затримання, не можна реалізувати практично, тому доводиться користуватися не ідеальними, а реальними фільтрами. У простому випадку це може бути пасивний RC-фільтр нижніх частот (рис. 7.18).

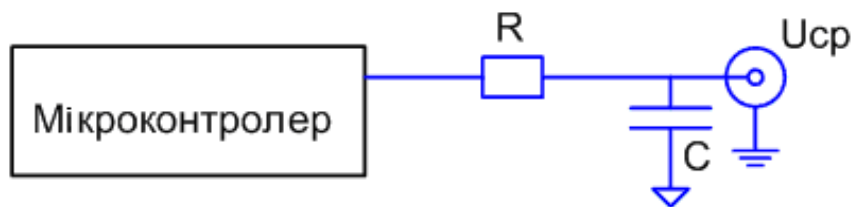


Рис. 7.18. RC-фільтр нижніх частот, підключений до МК, що формує періодичну послідовність прямокутних імпульсів

У цьому випадку, як свідчить рис. 7.19, через неідеальність (непрямокутність) амплітудно-частотної характеристики і повільний спад характеристики в міру збільшення частоти (при десятиразовому збільшенні частоти значення характеристики зменшуються в 10 разів), разом з постійною складовою, на вихід RC-фільтра «проникнуть» компоненти спектру, які є зменшеними по величині спектральними складовими першої, другої, третьої і четвертої гармонік.

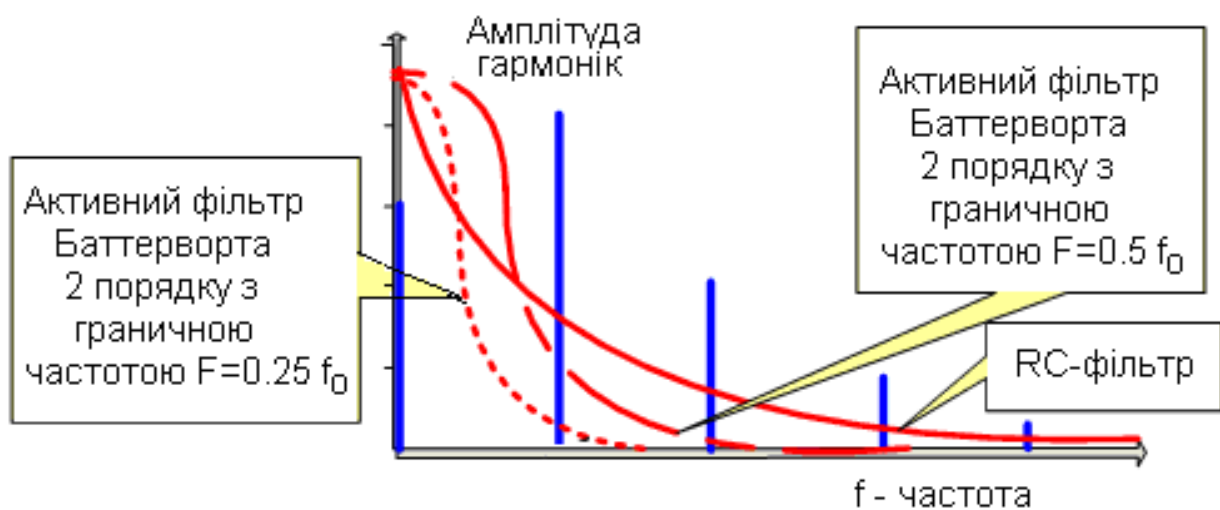


Рис. 7.19. Виділення із спектру постійної складової при використанні реальних фільтрів

Оскільки з кожною подальшою не повністю пригніченою гармонікою на постійну складову накладатимуться косинусоїдальні сигнали з різною початковою фазою, то сумарний сигнал на виході фільтру відрізнятиметься від ідеальної постійної складової (рис. 7.20).

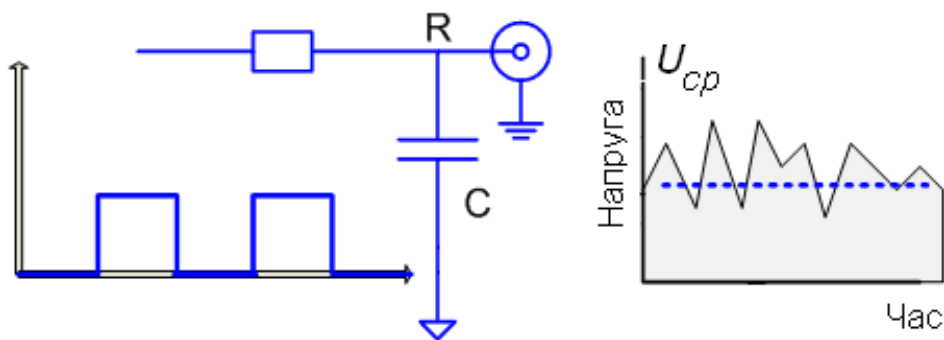


Рис. 7.20. Сигнал «постійної складової» на виході RC-фільтра нижніх частот

Використання простих RC-фільтрів нижніх частот дозволяє отримати на виході напругу, що нагадує постійну тільки в першому наближенні. Тому їх застосування прийнятне тільки в тих випадках, коли до вихідного сигналу фільтру пред'являються невисокі вимоги щодо залишкових пульсацій (відхилення від постійної складової). Збільшення прямокутності амплітудно-частотної характеристики фільтру і швидкості спаду дозволяє підвищити режекцію (видалення) шкідливих гармонік. У даний час відомі класи фізично здійснених фільтрів, у яких амплітудно-частотні характеристики із заданим ступенем точності апроксимують фільтри нижніх частот. До таких фільтрів належить, наприклад, клас фільтрів Баттерворта. На рис. 7.19 показана характеристика активного з використанням операційного підсилювача фільтру нижніх частот Баттерворта другого порядку з граничною частотою $F = 0,25f_0$, де f_0 – частота першої гармоніки. У цьому випадку спад характеристики при десятиразовому збільшенні частоти складає приблизно 100 разів. Проте, як видно з рис. 2.19, і в цьому випадку не вдається відфільтрувати всі гармонійні складові. «Залишки» першої гармоніки приводять до залишкових пульсацій, накладених на постійну напругу. Ще менш сприятливий випадок використання активного фільтру Баттерворта другого порядку з граничною частотою $F = 0,5f_0$. У цьому випадку залишкові складові гармонік і разом з ними накладення пульсацій на постійну складову ще вище. Добитися вищих показників в усуненні залишкових пульсацій дозволяє використання фільтру вищих порядків (четвертого і т. д).

Таким чином, періодична послідовність прямокутних імпульсів має постійну складову, пропорційну коефіцієнту заповнення, тобто прямо пропорційну їх тривалості. Пропустивши імпульси через ФНЧ з частотою

зрізу значно меншою, ніж частота проходження імпульсів, цю постійну складову можна виділити, отримавши постійну напругу. Якщо тривалість імпульсів буде різною, то ФНЧ виділить поволі змінну напругу, що відстежує закон зміни тривалості імпульсів.

Після того, як було розглянуто процес перетворення імпульсів заданої тривалості в постійну напругу і те, як з імпульсної послідовності формується сигнал, що плавно змінюється, повернемося до опису ЦАП, що використовує ШІМ. Для повного опису процесу перетворення цифрового коду в аналогову величину, слід пояснити, як за допомогою мікроконтролера формується ШІМ-сигнал, тобто те, як за допомогою «цифр» «кодують» тривалість імпульсу.

У мікроконтролері для формування ШІМ-сигналів використовуються таймери-лічильники (ТЛ). Звичайне формування ШІМ-сигналу організовано за допомогою шістнадцятирозрядного ТЛ № 1, що має порівняно з іншими лічильниками великі можливості. Як відомо, таймер/лічильник (ТЛ № 1) може бути запрограмований для створення імпульсів заданої тривалості з високою точністю. За допомогою ТЛ № 1 можна виробляти два вихідних сигнали, що модулюються по ширині імпульсу. При цьому можна міняти полярність імпульсної послідовності, тому ТЛ № 1 може використовуватися як інвертуючий, так і неінвертуючий широтно-імпульсний модулятор. Сформований сигнал ШІМ поступає на два виводи: на вивід, позначений на схемі МК як ОС1А, і на вивід ОС1В.

Основним функціональним вузлом ТЛ № 1 є 16-розрядний рахунковий регістр TCNT1. Структурна схема рахункового регістра TCNT1 із системою управління показана на рис. 7.21.

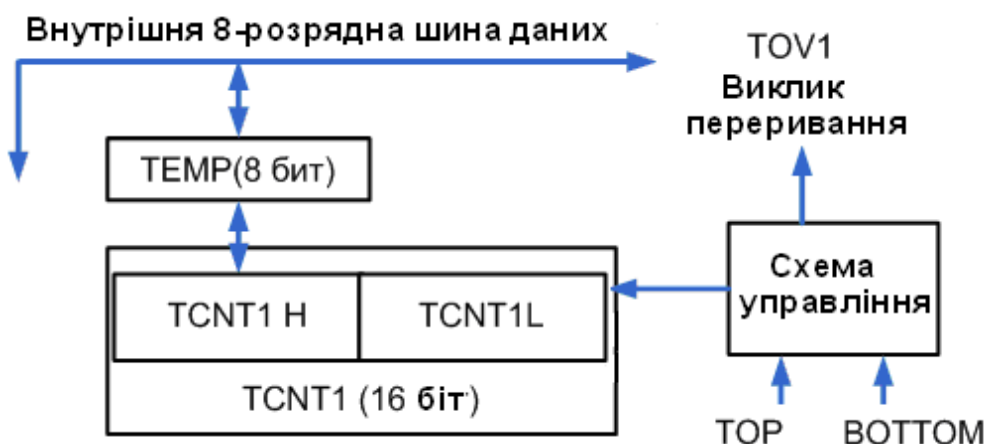


Рис. 7.21. Функціональна схема рахункового регістра TCNT1 із схемою управління

Він реалізований як 16-розрядний 1-реверсивний (що як підсумовує, так і віднімає) лічильник з переповнюванням і з можливістю читання й запису. Якщо лічильник підсумовує імпульси, тобто під час його роботи напрям рахунку в нього прямий, то під час вступу тактових імпульсів десятковий код лічильника змінюється у бік збільшення. При цьому послідовність зміни коду наступна – \$0000, \$0001, \$FFFF. Після переповнювання рахункового регістра TCNT1 його робота продовжується. У режимі віднімання під час вступу тактових імпульсів десятковий код лічильника змінюється у бік зменшення. Для управління його роботою використовуються такі сигнали: clear – установка всіх бітів TCNT1 у нуль (очищення лічильника); count – функціонування в режимі, коли вміст лічильника збільшується або зменшується на 1.

При досягненні рахунковим регістром TCNT1 максимального значення виникає внутрішній сигнал top і відповідно до режиму роботи встановлюється прапор переповнювання TOV1 (Timer/Counter0 Overflow Flag – прапор переривання по переповнюванню ТЛ). Коли TCNT1 досягає мінімального значення (нуля), активується сигнал Bottom.

Пуск і зупинка рахункового регістра TCNT1, установка старшого TCNT1H і молодшого байта TCNT1L у необхідний стан, прочитування поточного коду лічильника можуть бути виконані під управлінням програми.

У ТЛ № 1 є рахунковий регістр TCNT1, за допомогою якого робиться підрахунок імпульсів, що поступають на ТЛ № 1. При цьому ТЛ № 1 може тактуватися або імпульсним сигналом, отриманим із зовнішнього виводу, або сигналом внутрішнього тактового генератора безпосередньо або імпульсами, отриманими після дільника.

При застосуванні в якості широтно-імпульсного модулятора ТЛ № 1 працює як реверсивний лічильник, тобто як підсумовуючий, так і віднімаючий (зворотний) лічильник. Якщо ТЛ № 1 працює як неінвертуючий модулятор, то він циклічно виконує підрахунок імпульсів, що поступають на нього, від нуля (0x0000) до максимального значення TOP і потім знов повертається до нуля. Величина TOP залежить від дозволу N , що програмно задається, $N = 8, 9$ або 10 розрядів. Максимальне значення TOP ШІМ-лічильника розраховують за формулою $TOP = 2^N - 1$.

Розглянемо такі випадки заданого дозволу. Якщо перевести ТЛ № 1 у режим 8-бітового ШІМ, то його стан (вміст рахункового регістра TCNT1) змінюватиметься від 0x00 до $TOP = 0xFF$ ($2^8 - 1 = 255_{DEC} = 0xFF$), потім

знову від TOP до 0x00 і т. д. У режимі 10-бітового ШІМ вміст рахункового регістра TCNT1 змінюватиметься від 0x000 до TOP = 0x3FF (28 -1 = 1024DEC = 0x3FF), а потім знову – до 0x000 і т. д.

ТЛ № 1 може бути використаний як 8-, 9- або 10 – розрядний широтно-імпульсний модулятор. Для формування ШІМ-сигналу наперед заданої шпаруватості здійснюють порівняння по виходу, для чого задають так звані порогові рівні. Вони записуються в регістри збігу (порівняння) OCR1A, OCR1B (OCR1 – Output Compare Register 1). У цьому випадку рахунковий регістр і регістри OCR1A, OCR1B працюють як здвоєний самостійний широтно-імпульсний модулятор з центрованими імпульсами.

При формуванні широтно-імпульсних модульованих (ШІМ) сигналів у МК AVR (з підтримкою режиму ШІМ) використовують модуль збігу, який має два регістри збігу OCR1A і OCR1B (рис. 7.22).

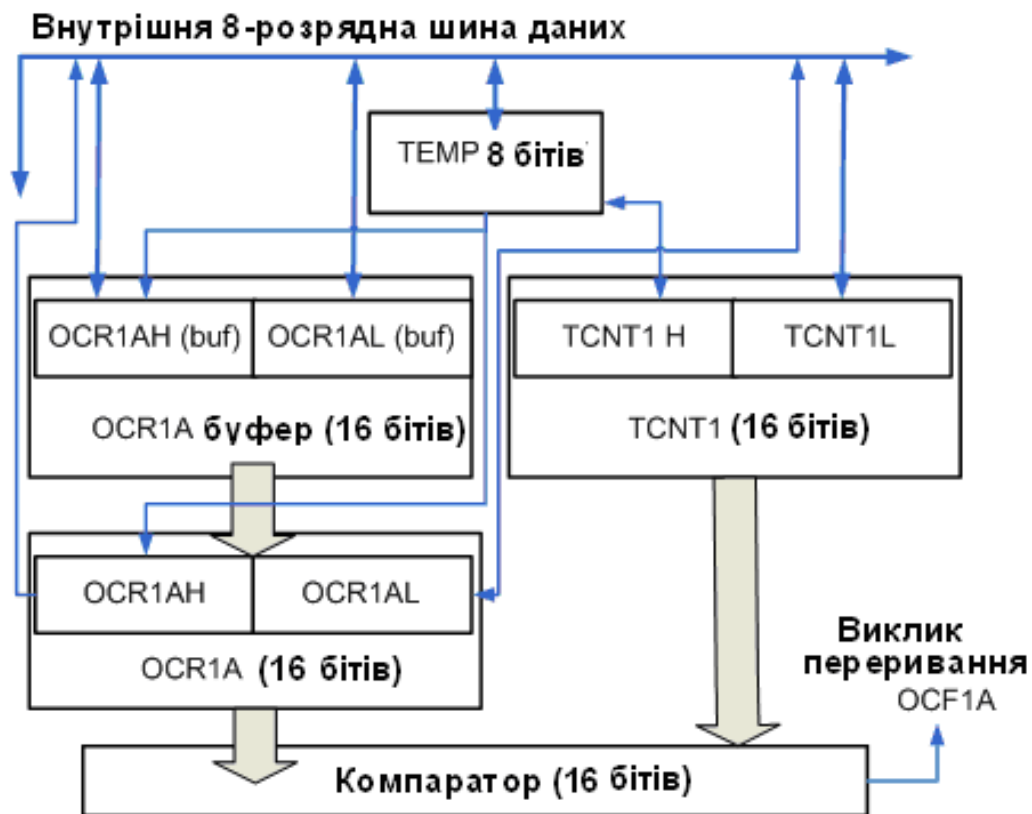


Рис. 7.22. Функціональна схема рахункового регістру TCNT1 зі схемою управління

Вміст рахункового регістра TCNT1 при формуванні ШІМ безперервно порівнюється з вмістом кожного з двох регістрів збігу (OCR1A і OCR1B). Кожного разу, коли вміст TCNT1 виявляється рівним вмісту

OCR1A або OCR1B, виробляється сигнал збігу. Цей сигнал встановлює в наступному тактовому циклі відповідний прапор збігу OCF1A або OCF1B, а також перемикає на виводах OC1A і OC1B рівень логічного сигналу на протилежний.

За допомогою даного модуля здійснюється функція порівняння по виходу (вміст рахункового шістнадцятиричного регістра TCNT1 безперервно порівнюється за допомогою числа, що записане в регістр збігу, наприклад, OCR1A).

Припустимо, для наочності і полегшення розуміння функціонування, що ТЛ працює як 4-розрядний широтно-імпульсний модулятор (це абстрактний випадок), і розглянемо, як здійснюється формування вихідних ШІМ-сигналів. На рис. 7.23 показано формування неінвертованого і інвертованого вихідних ШІМ-сигналів для виходу OC1.

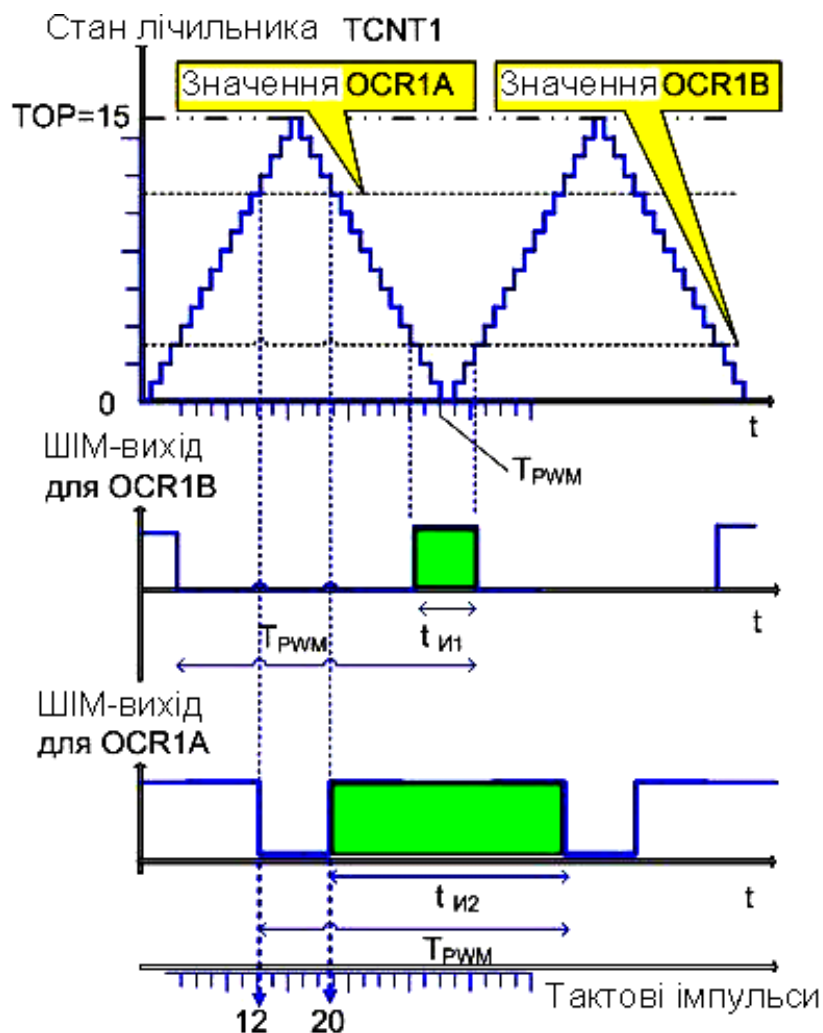


Рис. 7.23. Формування ШІМ-сигналу на виході OC1 за допомогою ТЛ № 1 для двох значень регістра порівняння OCR1

У верхній частині рис. 7.23 ступінчастий сигнал відповідає стану рахункового регістра TCNT1, за допомогою якого робиться підрахунок імпульсів, що поступають на ТЛ № 1. Рахунковий регістр циклічно (періодично) робить підрахунок імпульсів, що поступають на нього, спочатку за рахунок їх складання від нуля до максимального значення (в даному випадку TOP = 15), а потім знову повертається до нуля за рахунок їх віднімання.

Кусково-постійний графік свідчить про те, що в цифровому вигляді формується сигнал, який називають пилкоподібним.

Частота f_{PWM} , з якою повторюються цикли ШІМ (PWM), обчислюється за формулою: $f_{PWM} = \frac{f_{CLC}}{2^{N+1} - 2}$, де f_{CLC} – частота ТЛ, яка задається програмним шляхом. Тривалість періоду ШІМ обчислюється за формулою $T_{PWM} = T_{CLC}(2^{N+1} - 2)$. Для даного абстрактного 4-розрядного модулятора $T_{PWM} = T_{CLC}(2^{4+1} - 2) = 30T_{CLC}$, тому період ШІМ-сигналу складається з 30 тривалостей тактових сигналів. Після надходження на вхід рахункового регістра 31 тактового імпульсу почнеться новий цикл його роботи. Коли значення рахункового регістра TCNT1 порівнюється з вмістом регістра збігу OCR1A, то на виході OC1 МК встановиться сигнал логічного нуля, що завершує імпульс ШІМ-сигналу.

На рис. 7.23 розглянутий випадок, коли в регістр збігу OCR1A поміщено значення 11, тому під час вступу 12 тактового імпульсу на ШІМ-виході OC1A напруга зменшиться стрибком до нуля. Рахунковий регістр продовжує підсумовування тактових імпульсів, що поступають на нього, до тих пір, поки не буде досягнуте значення TOP. Після цього напрям рахунку змінюється на зворотний і регістр виконує віднімання.

На рис. 7.23 після 19 тактового імпульсу, починаючи від стартового значення 0, вміст рахункового регістра TCNT1 знову порівнюється з вмістом регістра збігу OCR1A. На наступному тактовому імпульсі на виході OC1A МК встановиться сигнал логічної одиниці, який почне новий імпульс ШІМ-сигналу на виході OC1A. Цей імпульс закінчиться тоді, коли значення рахункового регістра порівнюється з вмістом регістра збігу OCR1A на етапі підсумовування і напруга на виході OC1A зменшиться стрибком практично до нуля.

Аналогічно відбувається формування ШІМ-сигналу шляхом порівняння з вмістом. Коли вміст рахункового регістра TCNT1 на етапі відні-

мання («пили», що зменшується) співпаде із значенням, «записаним» у реєстр збігу OCR1B, то при наступному тактовому імпульсі на виході ОС1В МК встановиться сигнал логічної одиниці, який почне новий імпульс ШІМ-сигналу на виході ОС1В. Цей імпульс закінчиться тоді, коли значення рахункового реєстра порівнюється з вмістом реєстра збігу OCR1B на етапі підсумовування і напруга на виході ОС1А зменшиться стрибком практично до нуля.

Неважко відмітити, що якщо вміст реєстра порівняння OCR1 рівний N_{OCR1} , то тривалість імпульсу ШІМ-сигналу $t_{И}$ складає $2N_{OCR1}$ тактових імпульсів.

Отже, коефіцієнт заповнення ШІМ-сигналу $q = t_{И}/T$ для випадку програмно встановлюваного дозволу N буде рівний величині

$$q = \frac{t_{И}}{T_{PWM}} = \frac{2N_{OCR1}}{2^{N+1} - 1} = \frac{N_{OCR1}}{2^N - 1}. \text{ Ця формула свідчить про те, що коефіцієнт}$$

заповнення прямо пропорційний програмно встановлюваному вмісту N_{OCR1} реєстра порівняння OCR1. У розглянутому прикладі отримуємо:

$$q_1 = t_{\dot{E}1}/T_{PWM} = N_{OCR1A}/(2^N - 1) = 12/2^4 - 1 = 0,8 \text{ (80 \%)}, \quad q_2 = \frac{t_{\dot{E}2}}{T_{PWM}} = \frac{N_{OCR1B}}{2^N - 1} = \frac{3}{2^4 - 1} = 0,2.$$

Таким чином, на спеціальних виводах МК (ОС1А і ОС1В) формується періодична послідовність імпульсів з періодом, програмним дозволом, що задається, і встановленою частотою проходження тактових імпульсів, тривалість яких прямо пропорційна числовому коду в реєстрі порівняння (OCR1) МК.

Даний спосіб формування ШІМ зручний з погляду програмного обслуговування. Якщо зміни коефіцієнта заповнення не вимагається, то достатньо один раз у реєстр порівняння занести цифровий код і проініціалізувати режим ШІМ, і ШІМ-імпульсна послідовність відтворюватиметься з необхідними параметрами без подальшого втручання з боку програми.

Розглянутий спосіб формування ШІМ-сигналу називають режимом «ШІМ з точною фазою» (Phase Correct PWM). У процесі зміни шпаруватості фаза вихідних імпульсів не змінюється (центр імпульсу не змінює свого положення на осі часу). При Phase Correct PWM середина кожного імпульсу строго прив'язана до точки зміни напряму рахунку рахункового реєстра.

У МК можна використовувати і режим «швидкої ШІМ» (Fast PWM), у якому частота проходження імпульсів збільшується у два рази. Проте при цьому у процесі формування ШІМ-сигналу при зміні тривалості імпульсів змінюється фаза і центр кожного імпульсу зрушується в часі. У багатьох практичних застосуваннях така поведінка фази небажана.

Наведемо деякі «технічні подробиці», які необхідно враховувати при управлінні процесом формування ШІМ-сигналів і при складанні програм. *По-перше*, при формуванні ШІМ-сигналу слід дотримувати правил, які називають «правилами подвійної буферизації».

Для того щоб провести повний запис числа у 16-розрядний регістр, необхідно спочатку записати старший байт, а потім молодший. При читанні 16-розрядного регістра спочатку потрібно розрахувати молодший байт, а потім старший. Правила подвійної буферизації дозволяють центральному процесорному пристрою, використовуючи 8-розрядну шину даних, читати або записувати повне 16-розрядне число за один такт. Слід пригадати, що рахунковий регістр (TCNT1), регістри порівняння (OCR1A, OCR1B) і регістр захоплення (ICR1) – це 16-розрядні регістри з так званою подвійною буферизацією, які при доступі до них як до програмно-доступних елементів простору введення-виводу вимагають дотримання певної послідовності (процедури). Це пов'язано з тим, що центральний процесорний пристрій може звертатися до таких 16-розрядних регістрів тільки за допомогою 8-розрядної шини даних. Відповідно до послідовності, обумовленої подвійною буферизацією, якщо проводиться запис 16 розрядів даних, то в одному тактовому циклі з молодшим байтом записується і старший, значення якого заздалегідь повинне бути збережене в регістрі тимчасового зберігання.

Якщо проводиться читання молодшого байта, то одночасно в тому ж самому циклі читається і старший байт. Значення останнього спочатку поміщається в регістр тимчасового зберігання, а потім звідти прочитується наступною командою. При цьому обидва байти потрапляють у 16-розрядний регістр одночасно. Один і той же тимчасовий регістр використовується для доступу до всіх 16-розрядних регістрів.

По-друге, для формування необхідного сигналу ШІМ треба правильно задати параметри ШІМ або відповідні біти в регістрі управління TCCR1 (TCCR1 – Timer/Counter 1 Control Register).

Саме біти регістра управління TCCR1 TC 1 управляють поведінкою виходів сигналу збігу (OC1A і OC1B), визначають спосіб підрахунку ім-

пульсів рахунковим регістром (підсумовування або віднімання), максимальну межу рахунку (TOP) і спосіб генерації ШІМ-сигналу. Регістри управління (TCCR1A, TCCR1B) ТЛ № 1 8-розрядні і доступ до них проводиться через програмний простір введення виводу ОЗУ.

У ТЛ № 1 для забезпечення заданої точності і дозволу записом у регістр TCCR1B одній з комбінацій бітів управління CS (Clock Select – вибір біта установки коефіцієнта ділення переддільника), які подаються в довідниках, встановлюють коефіцієнт попереднього ділення.

Таким чином, при роботі в режимі ШІМ за допомогою ТЛ відносно просто можна реалізувати «генератор» імпульсів прямокутної форми із наявним співвідношенням тривалості імпульсу і паузи. При не дуже великих вимогах до швидкості роботи ТЛ можна застосовувати як простий цифро-аналоговий перетворювач.

Для створення ЦАП, у простому випадку, досить розмістити на виході широтно-імпульсного модулятора фільтр нижніх частот. Значення параметрів фільтру треба вибрати такими, щоб постійна часу фільтру була помітно більше тривалості періоду ШІМ. У цьому випадку стає можливим значною мірою подавити основну гармоніку у спектрі сигналу і подальші гармонійні складові, що мають місце у складі спектру прямокутного імпульсу.

Кращими властивостями для створення ЦАП на основі ШІМ володіють активні фільтри нижніх частот. Крім того, завдяки використанню операційного підсилювача схема ЦАП стає незалежною від опору навантаження.

7.3. Управління виробничими процесами за допомогою мікроконтролера

7.3.1. Початкові відомості про управління виробничими процесами та устаткуванням за допомогою мікроконтролера

Відомо, що сучасне поліграфічне виробництво розвивається в напрямі автоматизації процесів друку. Такий розвиток пов'язаний з переходом від автоматизації управління окремими параметрами технологічного процесу, агрегату або навіть зв'язаного управління рядом параметрів процесу в одному вузлі до управління всім виробничим комплексом устаткування випуску друкованої продукції. Це істотно збільшує продук-

тивність поліграфічного устаткування і якість друкованої продукції, що випускається. Якщо при цьому має місце велика серійність (тиражність) продукції, що випускається, висока надійність автоматизованих процесів, мінімальна тривалість переналадок, то ефективність автоматизації процесів випуску поліграфічної продукції дуже велика.

Будь-яка автоматизована система управління (АСУ) – це складна система, в якій для досягнення поставлених цілей спільно використовуються можливості персоналу управління і сучасних комп'ютеризованих систем.

На підставі раціонального розподілу вирішуваних завдань і різноманітних функцій з управління між операторами та інформаційно-обчислювальними засобами прагнуть найкращим чином використовувати можливості тих і інших, досягти кращого ефекту частини системи управління в цілому. Частина таких систем управління є сукупністю людей (операторів) і комп'ютеризованих пристроїв.

Створення умов, що забезпечують необхідне протікання технологічного процесу, підтримку потрібного режиму функціонування устаткування, тобто управління, може бути ручним і автоматизованим (автоматичним).

При ручному управлінні дію на орган управління здійснює персонал, що спостерігає за ходом процесу і роботою устаткування. Людина-оператор, якій відомий потрібний закон управління (наприклад, температура в сушильній камері при сушці паперу), спостерігає за показаннями приладів (на яких фіксується реальна температура) і залежно від того, в який бік контрольований параметр (температура) відхилився від необхідного значення, переміщає орган управління (наприклад, ручку реостата, регулюючого виділення тепла) так, щоб контрольований параметр (температура всередині сушильного пристрою) мало відрізнявся від необхідного значення. Найважливішим елементом такого процесу управління є людина-оператор, наявність якої робить систему ручною.

Комп'ютеризована частина АСУ (звичайно це мікроконтролер), що працює в ручному управлінні устаткуванням або технологічним процесом, може функціонувати в режимах збору даних і в режимі поради оператора.

У першому випадку комп'ютеризована частина АСУ призначена лише для збору, накопичення й первинної обробки інформації про стан і режими роботи устаткування або окремих його вузлів. Параметри вироб-

ничого процесу, що цікавлять, сприймаються підсистемою введення і переміщаються в МК, який проводить обробку й перетворення інформації, що поступила. Оброблена і подана в зручному для сприйняття вигляді інформація повідомляється персоналу (людині-операторові), який здійснює управління. Основне завдання фахівця з управління полягає в тому, щоб на основі цієї інформації прийняти і реалізувати такі рішення з управління устаткуванням, які б могли забезпечити досягнення поставленої мети.

Такий режим використання комп'ютеризованих систем управління називається *інформаційно-обчислювальним*.

Якщо комп'ютеризована частина АСУ працює в режимі порадника операторові, то виходи МК не пов'язані з органами управління технологічними агрегатами. Результати, як і раніше виводяться на пристрій відображення. Але в цьому випадку МК за закладеною в нього математичною моделлю обчислює рекомендовані управляючі дії, необхідні для наближення процесу функціонування устаткування до оптимального, які виводяться на пристрої відображення і друк. При цьому дії управління знову ж таки здійснюються оператором.

У даний час в АСУ використовується й інший режим, який характеризується в літературі терміном «автоматизація». У цьому випадку людина звільняється від безпосереднього виконання функцій управління, а ця діяльність «доручається» спеціальним пристроям.

При автоматичному управлінні дію на орган (регулюючий виділення тепла) управління здійснює спеціальний пристрій управління. У цьому випадку пріоритет у вирішенні завдань управління віддається не операторові, а технічній автоматичній системі (автоматичній системі управління), виконаній на основі мікроконтролера.

При такому управлінні сигнали, які використовуються для приведення в дію виконавчих органів, поступають безпосередньо з МК. Людина в цьому процесі участі не бере, хоча може епізодично здійснювати спостереження за роботою пристрою. Наприклад, якщо призначення оператора полягало в тому, щоб переміщати движок реостата залежно від відхилення температури, то цю операцію без участі людини можна реалізувати за допомогою електричного двигуна, керованого мікроконтролером. У цьому випадку під спеціальним пристроєм управління мається на увазі комп'ютеризований пристрій, що забезпечує процес автома-

тичного управління, тобто цілеспрямована дія, що приводить до цілеспрямованої зміни керованої змінної.

Як інформація, що використовується у спеціальних пристроях управління, виступають електричні сигнали, причому інформація міститься або в поточних значеннях напруги (аналогові сигнали), або в кодованих послідовностях імпульсів.

У більшості випадків автоматичне управління полягає в тому, щоб, впливаючи на об'єкт (наприклад, на насос, який створює вакуум у присосах, ультрафіолетову лампу, що здійснює сушку фарби, на електродвигун конвеєра та ін.) змінювати процеси, що протікають у ньому, так, щоб була досягнута мета управління.

Метою управління, наприклад, таким об'єктом, як пристрій сушки фарби, є підтримка розподілу температур, а також недопущення граничного рівня підведення теплової енергії. Мету управління формулюють фахівці в тій області, в якій необхідно застосувати управління, наприклад, технологи.

Система автоматичного управління (САУ) будь-якої складності, що працює без участі людини, є сукупністю об'єкта автоматичного управління та автоматичного пристрою управління (рис. 7.24), які взаємодіють між собою відповідно до закону (алгоритму) управління. Пристрій, що зазвичай управляє, впливає на керований об'єкт через орган управління.

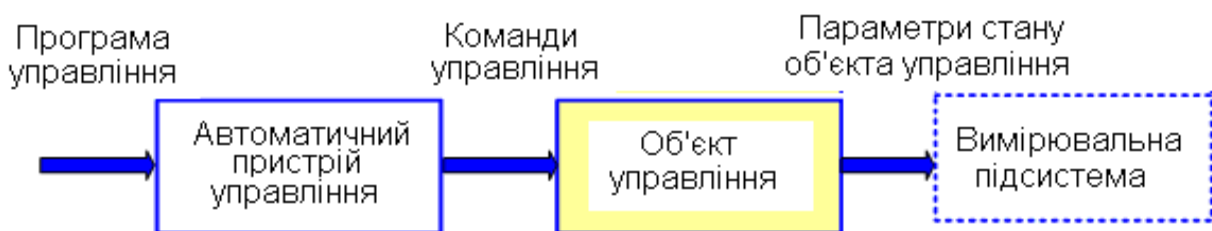


Рис. 7.24. Спрощена функціональна схема САУ

Система автоматичного управління включає в себе такі основні вузли: об'єкт управління, блок управління (він формує команди, які, поступаючи на об'єкт, змінюють процеси, що протікають у ньому, в напрямі досягнення поставленої мети), блок отримання інформації (вимірювальна підсистема) про поточні значення параметрів, що характеризують процеси в об'єкті.

Керований об'єкт – це сукупність технічних засобів (устаткування, машин, агрегатів, апаратів, пристроїв, вузлів), яка потребує надання спеціально організованої дії для досягнення поставленої мети управління. Якщо керований об'єкт характеризується однією регульованою величиною (однією координатою) та однією дією управління, то він називається *простим*.

Математичний опис такого об'єкта зводиться до отримання функціональної залежності, що зв'язує регульовану величину і дію управління. У загальному випадку керований об'єкт описується набором параметрів (параметричних координат), що характеризують його стан і режими роботи. На об'єкт здійснюються дії. Вони можуть бути такими, що управляють, і зовнішніми. Зовнішні дії визначають взаємодії між частинами САУ і зовнішнім середовищем. Під зовнішнім середовищем розуміється все те, що не входить у дану автоматичну систему.

Для здійснення управління на об'єкт повинні впливати орган управління або регулюючий орган, змінюючи стан (положення) якого у просторі управління можна впливати на об'єкт. Фізичні величини об'єкта (координати), які характеризують стан об'єкта і які навмисно змінюються або зберігаються незмінними у процесі управління, називаються регульованими, або керованими.

Відзначимо, що САУ є кібернетичною системою, оскільки вона оперує поняттями, складовими, які складають зміст кібернетики: управління, інформація, система. Кібернетика – наука про управління, передачу й переробку інформації. Елементи САУ зв'язані між собою інформаційними каналами, лініями управління, по яких передаються сигнали управління.

Відмінною рисою сучасних САУ є те, що потоки інформації, а також рішення і дії для досягнення мети управління структурно реалізуються у вигляді замкнутих контурів.

У САУ як системі, що складається з об'єкта управління і регулятора (системи управління, за допомогою якої добиваються потрібної якості управління), завжди є контур управління (рис. 7.25). У ньому реалізуються такі функції: вимірювання, порівняння і реагування, тобто вироблення команди управління на об'єкт.

При цьому має місце надходження на вхід системи по ланцюгу «зворотного зв'язку» так званої «вимірювальної (зворотної) інформації», яка необхідна для контролю і функціонування системи. Управління є замкнутим, тому що «зворотний» зв'язок «замикає» канал управління.

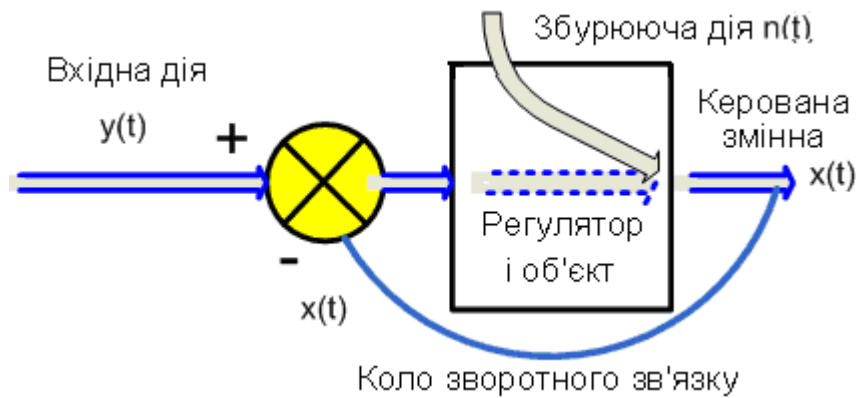


Рис. 7.25. Структурне подання САУ у вигляді контура управління (замкнутої «лінії», що складена з різнорідних елементів)

Можна стверджувати, що сучасні САУ – це системи із зворотним зв'язком (ЗЗ). У них завжди є не тільки прямий зв'язок між входом (вхідною дією управління, або управлінням $Y(t)$) і виходом (керованою змінною $X(t)$), але і зворотний зв'язок між виходом та входом, що служить для порівняння цих величин.

При управлінні із зворотним зв'язком значення керованої змінної $X(t)$ постійно зіставляється з її заданим (еталонним) значенням $Y(t)$, і мета управління в цьому випадку полягає в тому, щоб зробити ці величини близькими (у відомому сенсі), не зважаючи на різні перешкоди. У системах з негативною ЗЗ (НЗЗ) якість управління, тобто точність підтримки необхідного функціонального зв'язку між входом і виходом, в основному залежить від того, наскільки точно проводять вимірювання і порівняння необхідного та дійсного значень регульованої змінної.

Ураховуючи сказане, можна доповнити визначення САУ. Системою автоматичного управління називається активна, тобто та, що містить джерела енергії, динамічна система, що прагне зберігати в допустимих межах відхилення між необхідною і дійсною змінами керованої змінної за допомогою їх порівняння на основі принципу зворотного зв'язку (замкнутого циклу) й використання сигналу, що виходить при цьому, для управління джерелом енергії.

Дію $Y(t)$, прикладену до порівнюючого елементу системи управління, називають вхідним сигналом, тобто сигналом на вході, САУ. Нагадаємо, що сигнал – це відображення в певну систему координат фізичного процесу, параметри якого містять потрібну інформацію. Сигнал, який поступає з виходу системи $X(t)$ на її вхід, називають сигналом головного зво-

ротного зв'язку, а різниця між вхідним сигналом і сигналом головного зворотного зв'язку – сигналом помилки.

Зміни керованих величин викликають не тільки сигнали управління, але і збурення, прикладені у відповідних точках САУ. Збурення $n(t)$ – це небажаний вхідний сигнал, який робить вплив на вихідний сигнал об'єкта управління.

Багато систем управління схильні до впливу зовнішніх дій, що приводять до відхилення вихідного сигналу від бажаного значення. Так, завжди мають місце температурні зміни, шум, що виникає в напівпровідникових приладах і інтегральних схемах, а також спотворення, що з'являються через нелінійні властивості використовуваних елементів. При цьому якщо управління здійснює цілеспрямовану зміну керованих змінних, то збурення прагне порушити необхідний функціональний зв'язок між дією управління керованою змінною. У зв'язку з цим при створенні САУ прагнуть її виконати так, щоб вона поведилася відносною до збурюючої та управляючої дій різним чином.

У теорії автоматичного управління доведено, що при введенні негативного зворотного зв'язку (НЗЗ) САУ слабо реагує на збурюючі дії й підкоряється головним чином дії управління. Тобто замкнута система управління з НЗЗ по суті є фільтром, який достатньо точно відтворює дію управління і пригнічує те, що збурює.

Прикладом САУ зі ЗЗ може служити система управління швидкістю обертання диска, функціональна схема якої показана на рис. 7.26. САУ на рис. 7.26 – це замкнута активна динамічна система, що працює за принципом ЗЗ і перетворює задану дію управління на її вході (бажану швидкість обертання диска) в дію, що безпосередньо прикладається до об'єкта управління, тобто в електричний сигнал, що визначає швидкість обертання диска.

Для даної САУ характерне таке:

- а) вона є замкнутою системою, в якій замикання здійснюється через зворотний зв'язок, який, у свою чергу, реалізується за допомогою вимірювального пристрою. При цьому сенсор служить не просто для реєстрації інформаційного параметра, а для формування розузгодження (сигналу про помилки) і, таким чином, для забезпечення якісного управління;
- б) наявність негативного зворотного зв'язку;

в) помилка (між бажаною і заданою швидкістю обертання диска) є саме тим «рушійним» сигналом для системи, за допомогою якого САУ прагне поліпшити якість управління (зменшити помилку);

г) слабкі електричні сигнали управління, що йдуть від вимірювального пристрою (від сенсора кутової швидкості), перетворюються в могутні дії на об'єкт (електричний сигнал, що задає обертання двигуна).

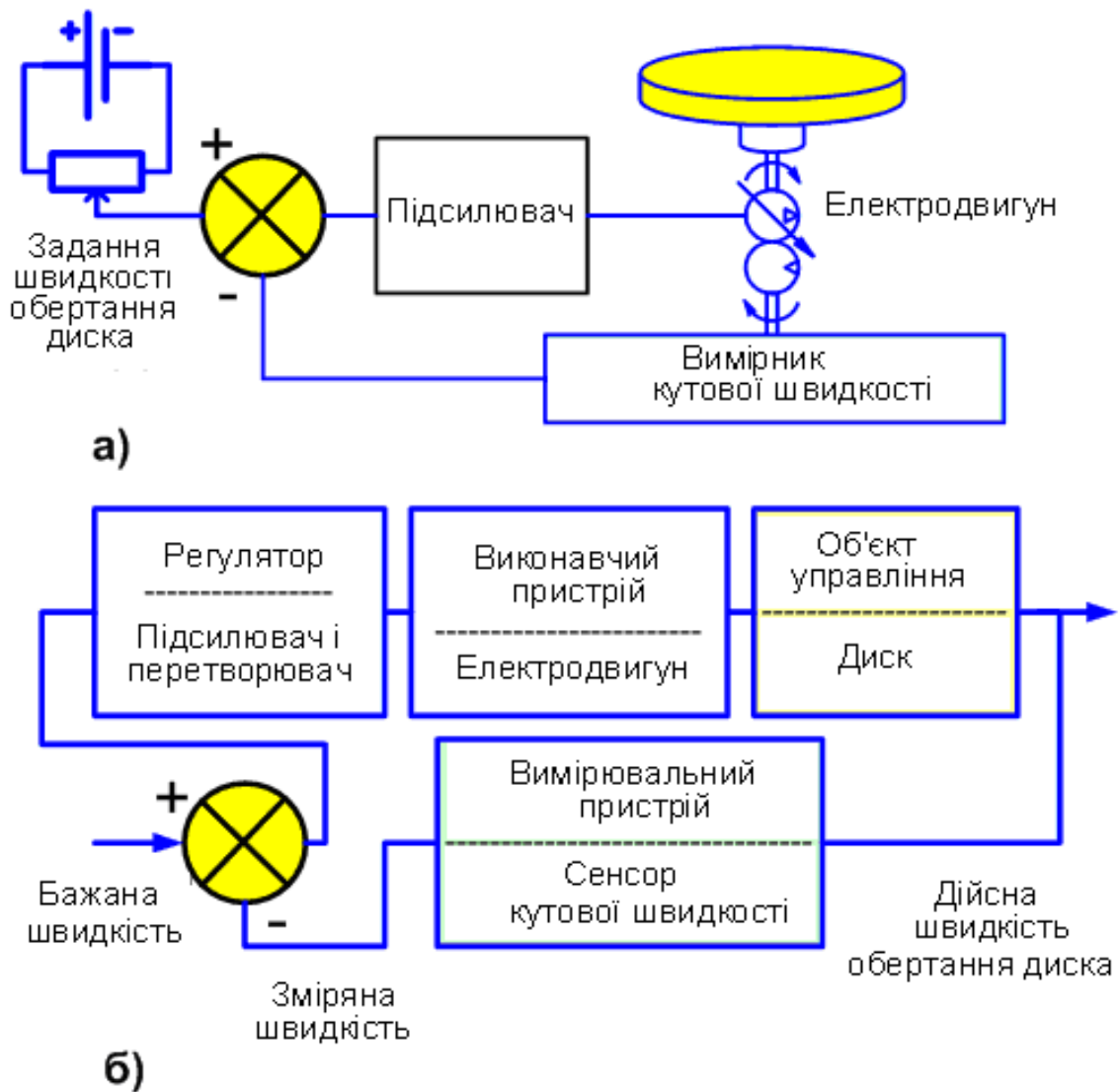


Рис. 2.26. Замкнута система управління швидкістю обертання диска (а) і функціональна схема такої системи (б)

Система управління, показана на рис. 7.26, включає обов'язкові функціонально необхідні елементи САУ: об'єкт управління, підсилювач, виконавчий елемент, вимірювальний пристрій. Об'єктом управління в даному випадку є диск.

Наступним важливим елементом САУ є виконавчий пристрій, призначений для дії на керований об'єкт. У системах управління зазвичай використовуються такі типи виконавчих пристроїв: пневматичні, гідрав-лічні та електричні. У даній САУ диск насаджений на вал електродвигуна, тому виконавчим елементом, що забезпечує управління (обертання диска), є електродвигун. Щоб диск обертася, на електричний двигун повинна поступати достатньо могутня електрична напруга. Проте в добре спроектованій системі помилка повинна бути малою і потужності сигналу помилки абсолютно недостатньо для дії на електродвигун. У зв'язку з цим важливим елементом САУ на рис. 7.26 є підсилювальний пристрій, призначений для посилення потужності сигналу помилки. Підсилювач працює за рахунок енергії, що поступає від стороннього джерела. Для перетворення керованої змінної (дійсної швидкості обертання диска) в сигнали управління (в напругу, що поступає на електродвигун) необхідний вимірювальний елемент, або сенсор кутової швидкості.

Залежно від характеру зміни бажаної вхідної управляючої (задаючої) дії САУ можуть бути підрозділені на три основні типи:

1) системи автоматичної стабілізації, або системи автоматичного регулювання. У таких САУ діями, що управляють, є задані постійні величини. Постійне значення, яке має вхідний сигнал, називається настановкою (уставкою) автоматичного регулятора. Уставці відповідає необхідне значення регульованої величини об'єкта%

2) системи програмного управління. У них дії управління є відомими функціями часу, тобто змінюються за певною програмою%

3) спостережливі системи. У них задаючі дії є заздалегідь невідомими функціями часу.

У сучасному комп'ютеризованому устаткуванні широке застосування знаходять так звані «цифрові» САУ, в яких управління забезпечується мікроконтролером, до складу якого входить два взаємозв'язані компоненти – електронна частина і програмне забезпечення. Використання САУ з МК дозволяє, зокрема, добитися високої точності управління, підвищеної надійності, забезпечити вимоги щодо оптимізації режимів роботи технологічних машин і механізмів широкого призначення.

Наявність у системі автоматичного управління МК, що виконує різні функції перетворення інформації про бажаний і поточний стани об'єкта управління, реалізовує якусь систему алгоритмів цифрового управління, подає дискретно діючий пристрій, приводить до необхідності квантуван-

ня безперервних сигналів за часом і рівнем. Це переводить початкову систему управління в клас безперервно-дискретних систем управління.

Комп'ютеризовані системи автоматичного управління на основі МК є особливим класом цифрових САУ. Щоб переконатися в цьому, розглянемо як приклад цифрову систему автоматичного управління об'єктом, виконану на базі мікроконтролера (рис. 7.27). У САУ такого роду має місце як цифрова, так і аналогова частини.

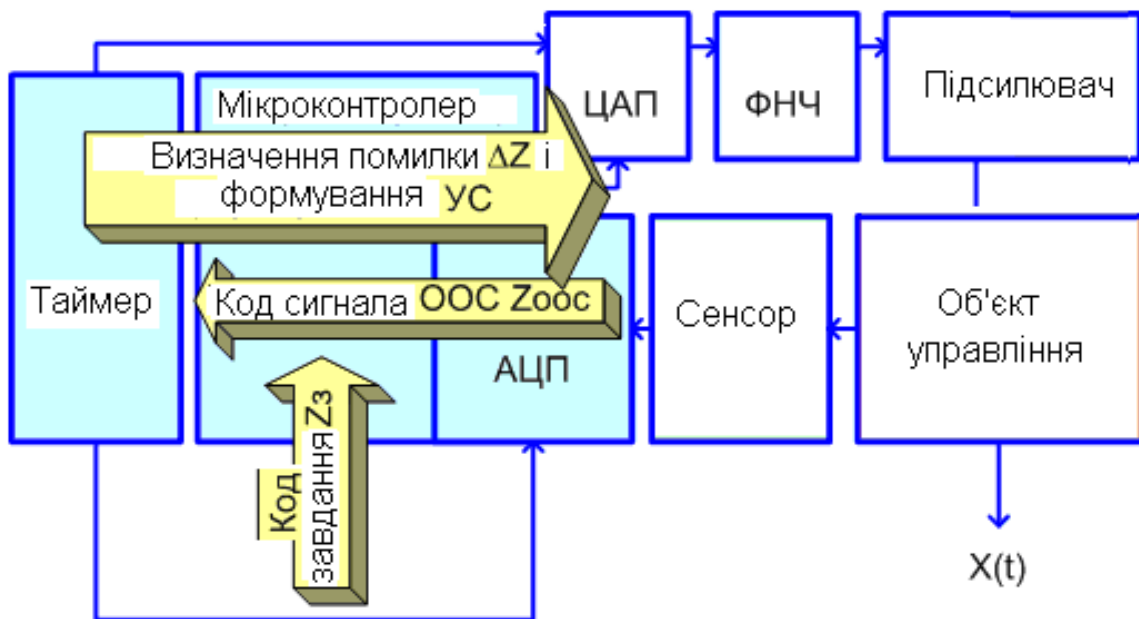


Рис. 7.27. Функціональна схема системи автоматичного управління об'єктом, побудована на основі мікроконтролера

Інформація про стан об'єкта управління фіксується за допомогою сенсора і після кодування за допомогою АЦП надходить у вигляді цифрового коду $Z_{00с}$ у МК. Безперервний вихідний сигнал $X(t)$ об'єкта управління за допомогою АЦП у моменти часу t_k дискретизується, квантується за рівнем і в разі потреби обробляється відповідно до певних алгоритмів, наприклад, піддається цифровій фільтрації.

Взаємодія мікроконтролера з об'єктом управління здійснюється через ЦАП. Управляюча цифрова послідовність перетвориться ЦАП в аналогову вихідну дію. Оскільки вихідний сигнал ЦАП – це процес, «багатий» високочастотними гармонійними складовими, то перед подачею на підсилювач потужності сигнал управління заздалегідь поступає на

фільтр низьких частот (ФНЧ). Посилення аналогового сигналу здійснює підсилювач потужності.

Введення завдання (програми управління) здійснюється по інформаційному каналу шляхом подачі в МК сигналів у цифровій формі (код Z_3). При цьому може використовуватися паралельна або послідовна передача даних. Програма управління може вводитися або оператором уручну, або за допомогою ЕОМ більш високого рівня.

Сигнал управління (СУ) формується на основі алгоритмів управління, записаних у програмну пам'ять («защитих») МК. Усі алгоритми МК універсальні і у функціональному відношенні еквівалентні типовим ланкам системи автоматичного управління.

Основою для формування цифрового сигналу управління в контурі управління служить сигнал розузгодження ΔZ , тобто сигнал помилки між бажаним і заданим параметрами об'єкта, який розраховується МК. Наявність у МК різних програмно-апаратних засобів дозволяє просто реалізувати різні алгоритми цифрового управління, а в разі потреби проводити модернізацію системи управління тільки шляхом заміни алгоритмів управління без зміни апаратної частини.

Формування сигналів управління, необхідних для здійснення управління в режимі реального часу, синхронізації роботи АЦП і ЦАП забезпечує таймер.

Відмітимо, що в сучасних цифрових САУ програмно можна задавати конфігурацію регулюючого контура, вибирати алгоритм управління, процедуру контролю технологічних змінних або оперативного втручання у процес управління.

Функціональна схема САУ, показана на рис. 7.27, дозволяє виявити ряд особливостей системи управління з МК.

По-перше, інформація про поведінку керованого об'єкта поступає в МК лише в дискретні моменти часу. Тому між моментами дискретизації САУ як би не «працює», вона виявляється «розімкненою». Замикання зворотним зв'язком відбувається лише в моменти часу t_k .

По-друге, для МК потрібний певний час для проведення розрахунків і виконання операцій обробки інформації, і, як наслідок, у цифровій САУ існує часове запізнення між моментом вибірки вхідної інформації про стан об'єкта $X_k(t_k)$ та формуванням управляючої послідовності.

По-третє, дія управління на об'єкт визначається не тільки алгоритмом управління, але й залежить від схеми функціонування ЦАП. Нареш-

ті, при вирішенні завдань управління через різну розрядність ЦАП і АЦП необхідно звернути увагу на питання їх з'єднання. Необхідно обмежувати число, що виводиться з МК з двійковим уявленням, так, щоб воно відповідало числу розрядів ЦАП.

Слід пам'ятати, що надходження лише одного додаткового (знакового) розряду на вхід ЦАП від МК супроводжується зміною полярності вихідної напруги ЦАП і, як наслідок, зміною вибраної напруги об'єкта.

7.3.2. Корекція даних при введенні із сенсорів і перетворенні електричного сигналу в цифрову форму

В основі введення вимірювальної інформації, необхідної для функціонування автоматичної системи управління, лежить застосування сенсорів з електричним виходом, що фіксують стан і режими роботи об'єкта управління. У поліграфічному устаткуванні це можуть бути сенсори вимірювання куткових величин і лінійних переміщень, зусиль, моментів крутіння, визначення тиску, параметрів рухів, напруги, температури. У більшості випадків первинна інформація, що поступає із сенсорів у вигляді електричних сигналів, абсолютно непридатна для безпосереднього введення в АЦП. Як правило, електричні сигнали сенсорів є дуже слабкими і, тому їх треба перш за все підсилити.

Вимірювання температури, мабуть, є найпоширенішою вимірювальною операцією, тому звернемо увагу перш за все на сенсори температури. У промислових умовах для перетворення температури в електричний сигнал використовують 3 способи.

Перший спосіб пов'язаний із застосуванням термопари, де два різнорідні метали з'єднано в точці, температуру якої потрібно виміряти. Для різних діапазонів температури використовується багато типів комбінацій металів (платина і сплав платина/родій, хромель і алюмель). Термопари генерують дуже маленькі електричні потенціали: близько 40 мкВ на кожен градус Цельсія.

В іншому типі термометра, що називається пірометром, вимірюють параметри інфрачервоного випромінювання, що випускається нагрітою поверхнею. Перевага пірометрів полягає в тому, що вони можуть бути розташовані на відстані від об'єкта, температура якого вимірюється. Їх використовують при температурах вище 500⁰ С. Нарешті, в останньому типі термометра застосовується залежність опору від температури.

Для вимірювання температури до 300°C використовують напівпровідникові терморезистори. Якщо їх опір зменшується із зростанням температури, то сенсори такого типу називаються термісторами. Ці сенсори виконані у вигляді бруска мідно-марганцевого, кобальто-марганцевого або мідно-кобальто-марганцевого оксидного напівпровідника резистора з фіксованою каліброваною залежністю опору від температури. У таких терморезисторах температурний коефіцієнт зміни опору при варіюванні температури на 1 градус – $\text{TKC} = \Delta R / (R \Delta T)$ – складає від 0,003 до $0,1\text{ K}^{-1}$.

Сенсори такого типу включають зазвичай за мостовою схемою вимірювань, що показана на рис. 7.28, на виході якої використовують диференціальний підсилювач з великим коефіцієнтом придушення синфазної напруги на входах.

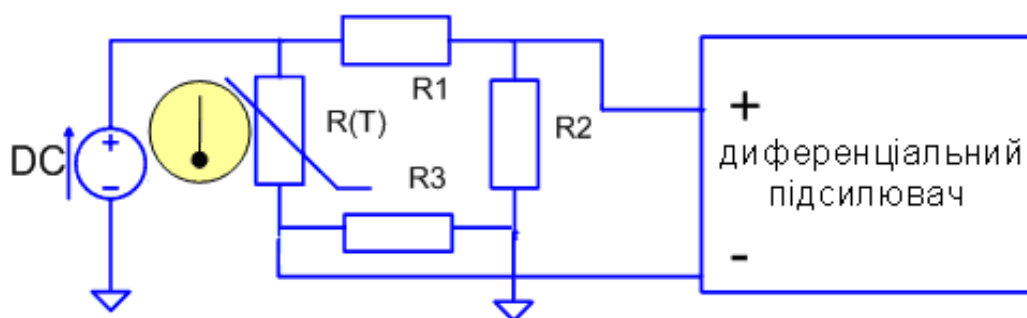


Рис. 7.28. Мостова схема включення сенсора, що пояснює принцип вимірювання температури за допомогою терморезистора

Аналогічно, за тією ж схемою включають тензометри опорів для вимірювання тиску і зусиль. Такими сенсорами є тонкі пластинки з напівпровідникового матеріалу, що змінюють свій опір під дією деформацій. Їх зазвичай наклеюють на пружний металевий носій, що змінює свою форму під дією зусиль або тиску.

На жаль, багато напівпровідникових сенсорів мають характеристики, що значно відрізняються від лінійних. Тому, крім посилення сигналу, для відтворення лінійних залежностей між вимірюваною величиною і вихідним сигналом сенсора отримані дані треба спеціальним чином обробити: провести корекцію характеристики сенсора, яка має нелінійний характер.

Результати, що отримуються за допомогою сенсорів, потрібно подати у вигляді зрозумілих інженерних одиниць вимірювань. Якщо обробка початкової інформації здійснюється за допомогою МК на програмному

рівні, то технічна реалізація завдань подання сигналів сенсорів у необхідних одиницях вимірювання і надання вимірюваним залежностям лінійності, у промисловій автоматичі називаються, відповідно, масштабуванням і лінеаризацією.

Розглянемо рішення задачі масштабування електричного сигналу, що поступає із сенсора температури на 10-розрядний АЦП і потім на МК, що працює для забезпечення пристрою відображення інформації – температури в градусах Цельсія (рис. 7.29).

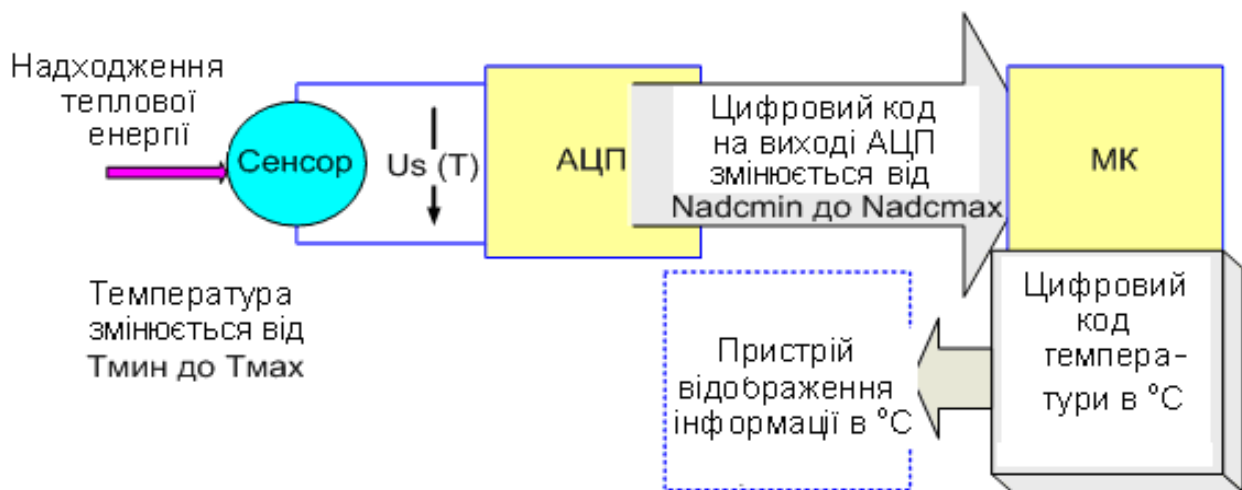


Рис. 7.29. Перетворення аналогового вхідного сигналу у величину, що виражена в інженерних одиницях і демонструється на цифровому пристрої відображення інформації

Припустимо, що аналоговий сигнал сенсора, який відповідає температурі (рис. 2.30), перетвориться в напругу відповідно до характеристики перетворення, показаної на рис. 2.30. Це означає, що при варіюванні температури від $T_{\min} = 0^{\circ}\text{C}$ до $T_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$ на виході сенсора створюватиметься напруга від $U_{s\min} = 0.5\text{В}$ до $U_{s\max} = 1,5\text{В}$. Припустимо, що характеристика (рис. 7.30) є лінійною. Отже, величини напруги, що генеруються сенсором, знаходяться на одній прямій, яка в математиці подається рівнянням загального вигляду: $y = kx + b$ ($U_s = kT + b$). Слід пам'ятати, що коефіцієнти k і b у рівнянні мають наочне геометричне тлумачення. Значення коефіцієнта b визначає відрізок, що відсікається графіком лінійної функції на осі ординат, а коефіцієнт k є тангенсом кута α , утвореного віссю абсцис і прямою.

Невідомі коефіцієнти k і b легко визначити, знаючи дві точки $\{X_1, Y_1\}$, $\{X_2, Y_2\}$ на характеристиці $k = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$ і $b = Y_1 - kX_1$.

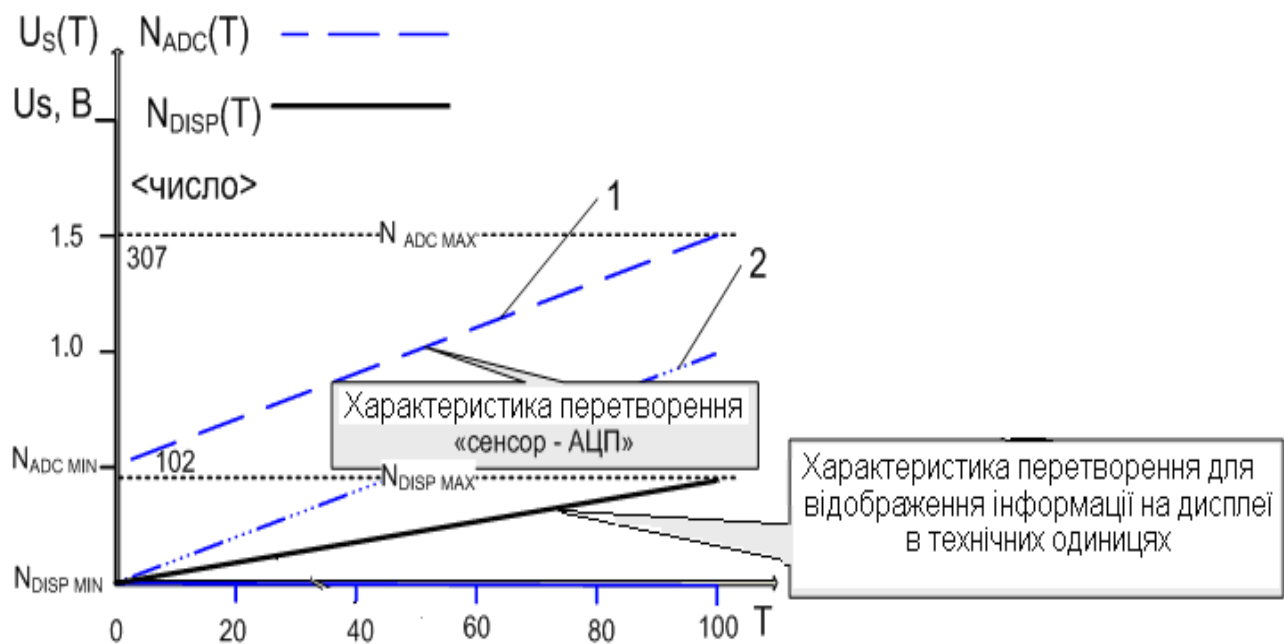


Рис. 7.30. Характеристика перетворення аналогового вхідного сигналу сенсора в цифровий код АЦП (крива 1) і технічні одиниці

Якщо напруга з сенсора подається на АЦП (див. рис. 7.30), то результат аналого-цифрового перетворення вхідної напруги буде поданий у вигляді 10-розрядного двійкового числа в регістрах даних ADCH ADCL. Визначуване у процесі перетворення число (у вигляді десяткового еквівалента) обчислюється з рівняння $N_{ADC} = 1023 \cdot U_s / U_{REF}$, де U_{REF} – напруга опорного джерела напруги. При $U_{REF} = 5$ В отримуємо, що на виході АЦП число змінюватиметься від $N_{ADC\ MIN} = 102$ до $N_{ADC\ MAX} = 307$. Діапазон зміни напруги (у числах) складає $3N = N_{ADC\ MAX} - N_{ADC\ MIN} = 307 - 102 = 205$ одиниць. Необхідна для відображення фізичних величин, що впливають на сенсор, характеристика перетворення даних на екран дисплея показана на рис. 7.30.

Очевидно, що чисельні значення на екрані дисплея, подані в технічних одиницях, повинні однозначно відповідати впливовим фізичним одиницям. Іншими словами, зміну температури від 0°C до 100°C повинне формувати на екрані дисплея числа від $N_{disp\ min} = 0$ до $N_{disp\ max} = 100$.

З рис. 7.30 видно, що для того, щоб добитися однозначної відповідності вимірюваної величини в інженерних одиницях (у градусах Цельсія), що відображається, і впливового фізичного чинника (температури) необхідно:

а) характеристику перетворення АЦП «змістити вниз», щоб вона також проходила через початок координат (лінію 1 перевести в положення лінії 2);

б) ввести поправний коефіцієнт, на який треба помножити виміряні величини, щоб отримати коректний результат вимірювання, оскільки обидві лінії (характеристики перетворення), що виходять з початку координат, мають різний коефіцієнт нахилу.

З математики відомо, що набуття нового значення ординати y_N (перенесення початку координат) пов'язано з операцією віднімання величини b від старої величини ординати (y). Отже, для нових ординат характеристики перетворення «сенсор – АЦП» маємо $y_N = y - b$. Число y вигляді напруги, що отримується, за наслідками перетворення АЦП визначається за формулою: $U_s = N_{ADC} \cdot U_{REF} / 1023$.

Напруга на виході АЦП змінюватиметься (див. рис. 7.30) від $US_{MIN} = 0,5$ В до $US_{MAX} = 1,5$ В. Діапазон зміни напруги складає $\Delta N_{us} = US_{MAX} - US_{MIN} = 1,5 - 1,0 = 1$ В. Якщо опорну напругу брати в мілівольтах, то $\Delta N_{us} = 1\ 000$ мВ.

Характеристика перетворення, необхідна для відображення інформації в технічних одиницях (у градусах Цельсія), показана на рис. 7.30. Діапазон чисел, що відображаються на дисплеї, буде $*N_{DISP} = N_{DISP_{MAX}} - N_{DISP_{MIN}} = 100 - 0 = 100$. Тоді поправний коефіцієнт, на який треба помножити зміряні величини, щоб отримати необхідний коректний результат вимірювання в технічних одиницях, буде $K_{KOR} = \Delta N_{DISP} / \Delta N_{US}$.

Шукане число, що відображається на дисплеї в технічних одиницях (цифровий код температури), визначатиметься за такою формулою: $N_{DISP} = \{y_N = K_{KOR}(y - b)\} = \Delta N_{DISP}(N_{ADC} \cdot U_{REF} - 1023 \cdot U_{ADC_{min}}) / \Delta N_{US} \cdot 1023$.

Наведені формули можуть бути використані не тільки для відображення температури, а й для будь-якого лінійного перетворення між двома змінними, що мають лінійну залежність.

Аналогові сигнали, що створюються сенсорами, часто мають нелінійну залежність між впливовою фізичною величиною і напругою на ви-

ході датчика. Прикладом сенсорів, які мають нелінійну характеристику, є терморезистори, виготовлені з оксидних напівпровідників.

Щоб отримувати точні дані про вимірювану величину, потрібно характеристику, яка має нелінійний характер, розбити на ділянки малої величини (на декілька частин), на яких характеристика може розглядатися як лінійна.

На рис. 7.31 наведено типовий приклад нелінійної залежності між входом x і виходом y . Наприклад, вхідною величиною може бути температура, а вихідною – напруга, що отримується від терморезистора.

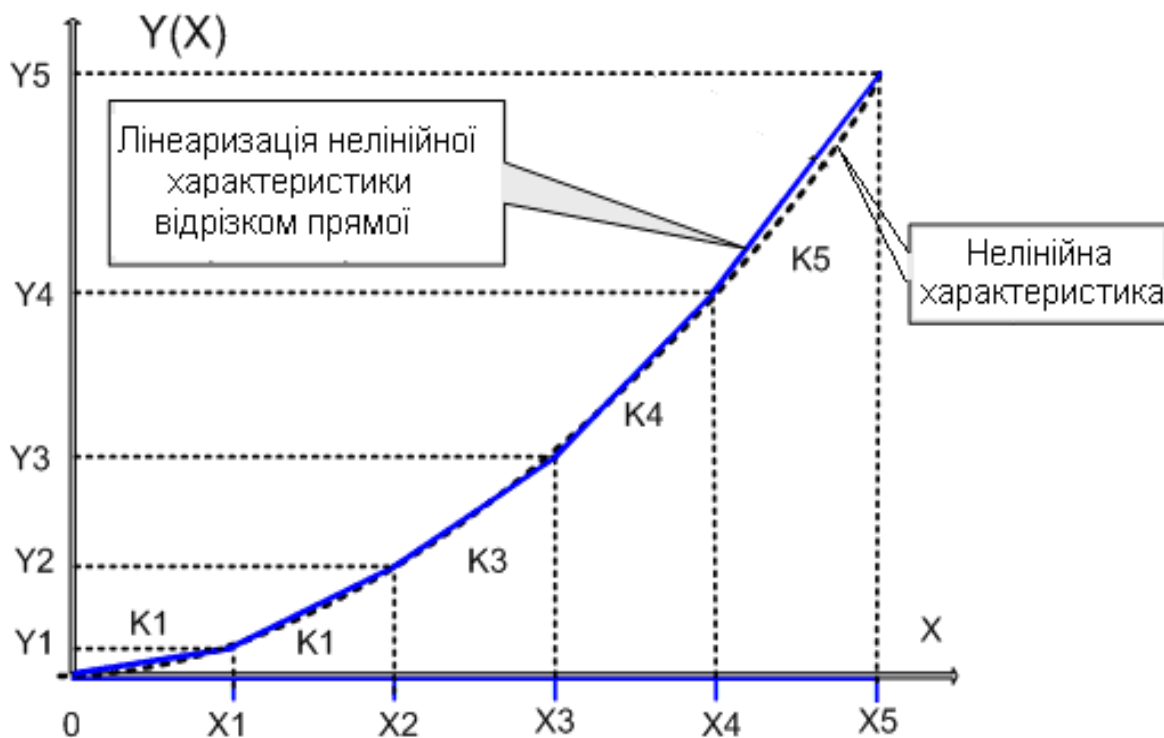


Рис. 7.31. Лінеаризація нелінійної характеристики прямокутними відрізками

Для надання характеристиці лінійності на графіці вибирається декілька точок, наприклад, 5 відомих значень X ($X1, \dots, X5$) для вхідної величини і відповідні їм значення вихідної величини Y ($Y1, \dots, Y5$).

При цьому передбачається, що між кожною парою точок з координатами $\{Xn, \dots, Yn\}$ характеристика має вигляд прямої лінії.

Далі за правилами геометрії визначаються коефіцієнти нахилу цих 5 відрізків: $K1 - K5$. Після цього перевіряється, в якому діапазоні знахо-

диться вхідна величина x і обчислюється значення y відповідно до таких виразів:

$$\begin{aligned} \text{ї } \delta\text{è} \quad (x \geq 0) \& (x < X1), & y = K_1 x; \\ \text{ї } \delta\text{è} \quad (x \geq X1) \& (x < X2), & y = K_2(x - X1) + Y1; \\ \text{ї } \delta\text{è} \quad (x \geq X2) \& (x < X3), & y = K_3(x - X2) + Y2; \\ \text{ї } \delta\text{è} \quad (x \geq X3) \& (x < X4), & y = K_4(x - X3) + Y3; \\ \text{ї } \delta\text{è} \quad (x \geq X4) \& (x < X5) & y = K_5(x - X4) + Y4. \end{aligned}$$

Якщо на сигнал, що поступає від сенсора, накладається «шум» або перешкоди, то їх усунення можна провести як апаратним, так і програмним шляхами.

При апаратному способі використовується у простому випадку пасивний RC-фільтр нижніх частот, який підключається після підсилювача сигналу сенсора.

У другому випадку програміст повинен створити програму цифрової фільтрації сигналу.

RC-фільтром нижніх частот є фільтр першого порядку, який описується простим диференціальним рівнянням $T \frac{dy}{dt} + y = x$, де x – вхідний сигнал (необроблений сигнал $u_{ВХ}$), y – відфільтрований сигнал ($u_{ВИХ}$), T – постійна часу.

У разі використання АЦП на МК з безперервного сигналу сенсора поступають наступні цифрові сигнали $\{x_n\}$ з інтервалом Δt , які є вибірками. Після цифрової фільтрації вхідного дискретного сигналу (вхідної послідовності $X_n, X_{n-1}, X_{n-2}, \dots$) потрібно отримати необхідну послідовність $Y_n, Y_{n-1}, Y_{n-2}, \dots$, у якій символом n позначений останній відлік.

Для оператора диференціювання можна використовувати апроксимацію $\frac{dy}{dt} \approx \frac{\Delta y}{\Delta t} \approx \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t}$ і тоді маємо: $T y_n - T y_{n-1} + y_n \Delta t = x_n \Delta t$, звідси

отримуємо відфільтрованого значення $y_n = \frac{y_{n-1} + (\Delta t / T) x_n}{1 + (\Delta t / T)}$. Ця формула

свідчить про те, що для проведення цифрової фільтрації потрібно в пам'яті МК мати один елемент пам'яті для зберігання останнього значення (позначеного y_{n-1}) і виконати операції, показані на рис. 7.32.

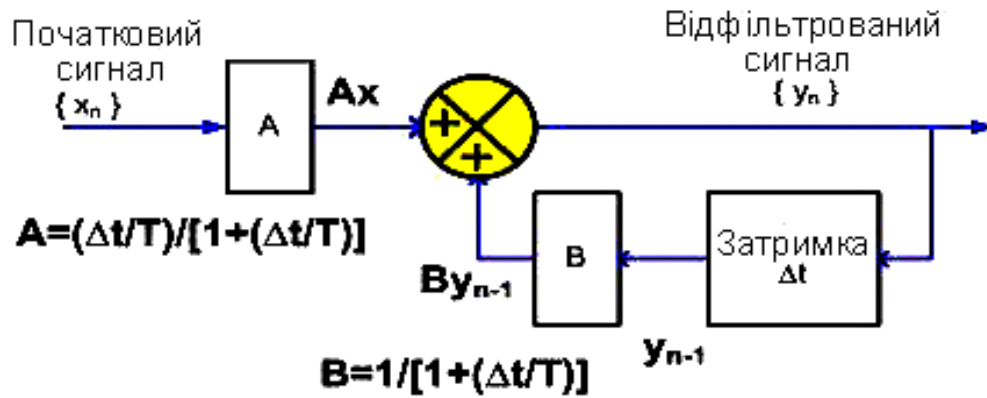


Рис. 7.32. Операції, що виконуються при цифровій фільтрації простим фільтром першого порядку (при $T \gg \Delta t$ $B = 1$, $A = \Delta t/T$)

7.3.3. Вступ до теорії управління замкнутими системами

У багатьох виробничих процесах вихідну змінну об'єкта управління (наприклад, температуру, тиск, витрату та ін.) потрібно підтримувати постійною або змінювати за заданим законом. У подібних випадках зазвичай система управління будується за принципом, що отримав у літературі назву ПІД-управління. Така система є замкнутою системою з негативним зворотним зв'язком, у якій дійсне значення параметра об'єкта за допомогою зворотного зв'язку порівнюється з її бажаним (заданим) значенням. У простому випадку замкнута система управління може функціонувати за принципом пропорційного управління. Функціональна схема такої системи управління показана на рис. 7.33.

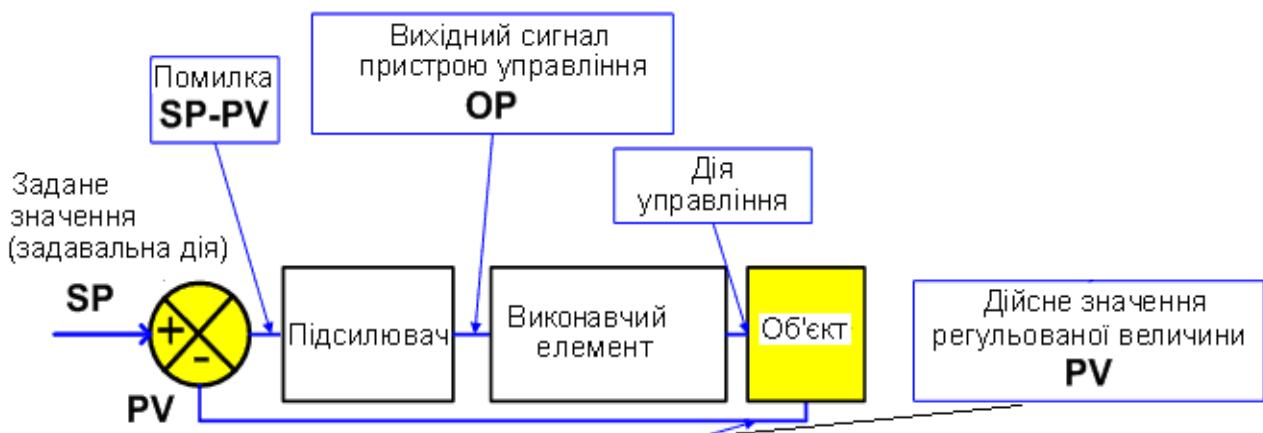


Рис. 7.33. Функціональна схема замкритої системи з пропорційним (П) управлінням

При порівнянні заданого значення змінної, позначеної як SP (від англ. *setpoint* – уставка), з її дійсним значенням PV (від англ. *process variable*) утворюється помилка E (*Error*), тобто $E = SP - PV$. Множення помилки на коефіцієнт посилення підсилувача K дає вихідний сигнал пристрою управління: $OP = KE = K(SP - PV)$. Дія цього сигналу на виконавчий орган є причиною зміни параметра об'єкта, яким управляють. У разі безінерційної роботи виконавчого пристрою сигнал PV буде прямо пропорційний OP , тобто можна записати так: $PV = A \cdot OP$. де A – коефіцієнт пропорційності.

Вирази OP дозволяють отримати залежність вихідного сигналу об'єкта PV (параметра, яким управляють і який характеризує якийсь заданий стан об'єкта управління) від елементів, що входять у контур управління $PV = AK \cdot SP / (1 + AK) = G \cdot SP / (1 + G)$.

Тобто при пропорційному законі управління, коли дія управління пов'язана з помилкою пропорційною залежністю, дійсне значення керованої величини (вихідний сигнал об'єкта управління) буде рівне уставці (бажаному значенню), помноженій на масштабуючий коефіцієнт $AK / (1 + AK)$.

Вираз $AK = G$ називають коефіцієнтом посилення розімкненої системи. Відмітимо, що при великих G вихідний сигнал об'єкта буде практично рівний уставці.

Забезпечувати великі значення G , наприклад, за рахунок коефіцієнта посилення, вдається не завжди. Крім того, важливо враховувати, що виконавчий орган має обмежену швидкодію, тому дія на об'єкт завжди буде трохи відставати за часом. Запізнювання дії, яка управляє, може викликати таку зміну сигналу управління і дійсного значення PV , що воно може надати абсолютно протилежну дію, внаслідок чого помилка збільшуватиметься. Тобто якщо просто забезпечувати великі значення G , то система управління може при певних реальних обставинах перестати нормально функціонувати, або, по-іншому, стати нестійкою.

Щоб уникнути негативних наслідків, властивих системам управління, в яких сигнал помилки пов'язаний з дією управління пропорційною залежністю, використовують інтегральний закон управління. Дія, що в цьому випадку управляє, формується пропорційною інтегралу помилки. Таке управління, підвищуючи точність управління у сталому режимі, знижує швидкодію регулятора.

Зазвичай застосовують модифікований спосіб управління, коли сигнал пристрою управління OP утворюється як сума пропорційної помилки та інтеграла за часом від помилки, тобто $OP = K(E + M \int E dt)$. Такий закон управління називають пропорційно-інтегральним. Його застосовують тоді, коли бажано поєднувати високу точність інтегрального регулятора у сталому режимі з великою швидкодією пропорційного регулятора в перехідному режимі. Функціональна схема такої системи управління показана на рис. 7.34.

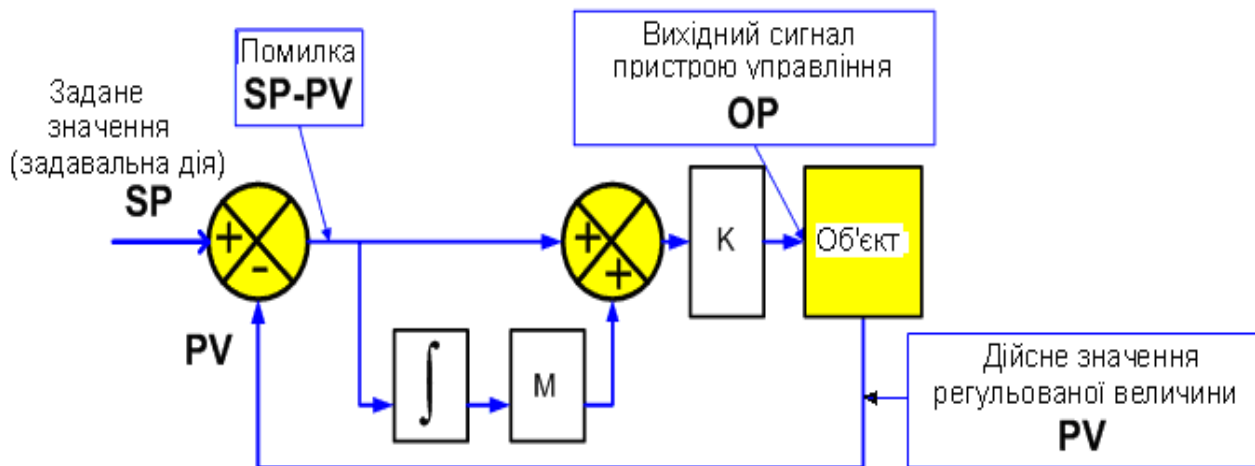


Рис. 7.34. Функціональна схема замкнутої системи з пропорційно-інтегральним (ПІ) управлінням

Інтегральний член в $OP = K(E + M \int E dt)$ примушуватиме OP змінюватися до тих пір, поки існує помилка, а коли помилка стане рівною нулю (при $SP = PV$), OP прийме постійне значення.

Таким чином, пропорційно-інтегральний закон управління у сталому режимі забезпечуватиме нульову помилку без необхідності збільшення коефіцієнта посилення. У регуляторах, що використовуються на практиці, коефіцієнт M у виразі для OP зазвичай замінюється на $1/T$: $OP = K(E + \frac{1}{T} \int E dt)$, де T – час (постійна) інтегрування. Необхідність такої заміни обумовлена математичними і фізичними міркуваннями.

Подальша модифікація структури замкнутої системи управління пов'язана з додатковим введенням компоненти похідної за часом, що про-

порційна швидкості зміни помилки. Функціональна схема такої системи управління показана на рис. 7.35.

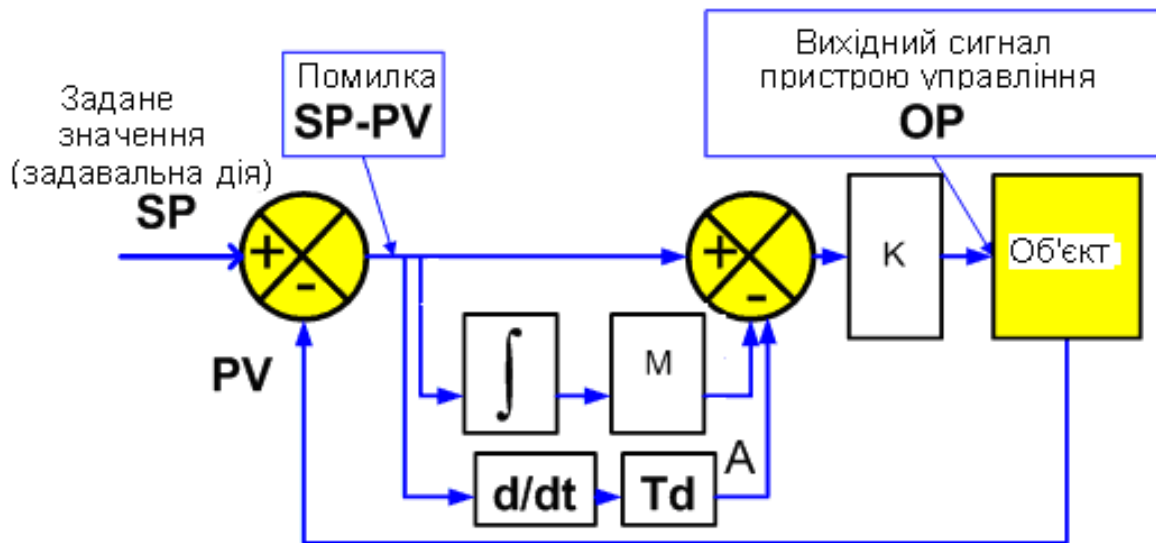


Рис. 7.35. Функціональна схема замкнутої системи з пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) управлінням

Сигнал пристрою управління OP утворюється як сума пропорційної помилки, інтеграла за часом від помилки і похідної від помилки $OP = K(E + \frac{1}{T} \int E dt + \frac{1}{T_D} \frac{dE}{dt})$, де Td – час (постійна) диференціювання.

Управління по похідній не має самостійного значення, оскільки у сталому стані похідна помилки рівна нулю й регулювання припиняється. Проте введення до складу системи каналу диференціювання, що реагує на швидкість зміни помилки, відіграє істотну роль у динамічних режимах, оскільки дозволяє враховувати не тільки наявність помилки, а й тенденцію в її зміні. На початку перехідного процесу ПІ-регулятор поводить себе як П-регулятор, тому введення похідної для цього періоду покращує якість перехідного процесу. Надалі, в міру загасання перехідного процесу, вплив похідної падає й основну роль починає відігравати інтегральна складова як в ПІ-регуляторі.

Таким чином, введення в закон регулювання похідної дозволяє сформулювати дію управління навіть за відсутності помилки на вході регулятора, що збільшує швидкодію системи. Крім того, введення похідної пригнічує коливання в системі, покращуючи її стійкість, і прискорює протікання перехідних процесів.

У ідеальному випадку необхідно, щоб дійсне значення сигналу PV (від англ. *process variable*) було рівне заданому значенню змінної SP (від англ. *setpoint* – уставка) в усі моменти часу. Проте реальні об'єкти володіють кінцевим часом реакції і нелінійностями, тому ідеальну реакцію отримати неможливо.

Якщо сигналом SP є ступінчаста зміна (збурення), то система управління може відреагувати на нього (дати відгук) у вигляді значень сигналу PV , показаних на рис. 7.36.

На практиці зазвичай задовільним вважається відгук, який певною мірою, подібний до недодемпфованого процесу (рис. 7.36-г).

Впливати на вигляд відгуку САУ можна шляхом настройки коефіцієнта посилення K , постійної інтегрування T і постійної диференціювання TD . Ці параметри розраховуються спеціальними методами теорії управління, проте їх можна підібрати й методом спроб і помилок.

Хорошою відправною точкою при цьому є значення $K = 0,5$, $T = 20$ с, $TD = 5$ с. Збільшення K або зменшення T робить відгук системи управління більш швидким, але разом з тим це додає системі коливальний характер і тим самим погіршує стійкість.

Якщо використовується канал диференціювання, то, як показала практика, якнайкращим є співвідношення $TD = 0,25 T$.

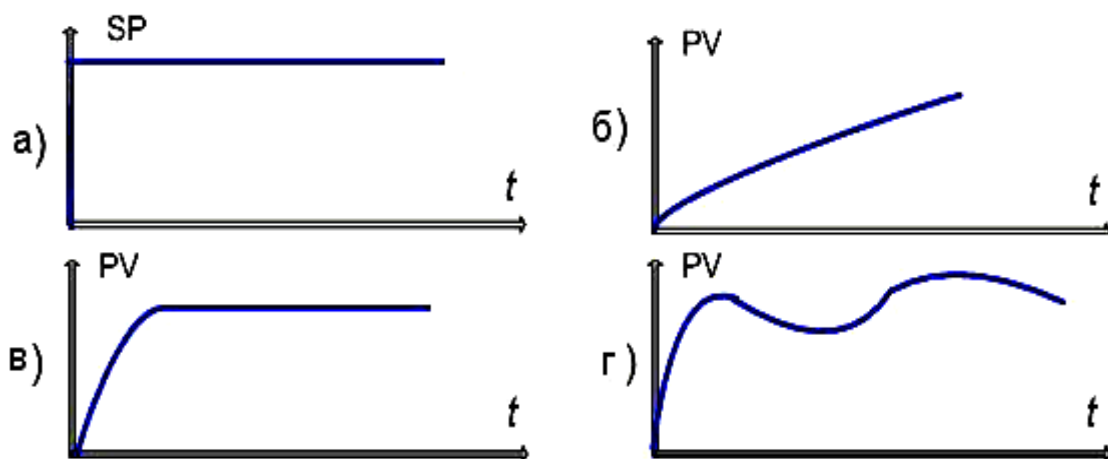


Рис. 7.36. Види відгуків реальних САУ на ступінчастий вхідний сигнал: а) сигнал SP ; б) передемпфування; в) критичне демпфування; г) недодемпфування (амплітуда коливання має величину, меншу однієї четвертої сталого значення)

Настроювання системи можна виконати таким чином.

Спочатку регулятор настраюється як пропорційний ($T = 0$, $TD = 0$). При збільшенні коефіцієнта K від перехідної характеристики змінюватиметься від недодемпфованої до такої, коли амплітуда коливань постійно збільшується, тобто перехід відбувається у нестійкий стан. Знайдеться таке критичне значення коефіцієнта K , при якому виникнуть коливання з постійною амплітудою. Необхідно виміряти період цих коливань T_c . Необхідні настроювання регулятора визначаються таким чином: $K = 0,6 K_c$; $T = 0,5 T_c$; $TD = 0,12 T_c$.

Практичні завдання

1. Поясніть сенс і процедуру аналого-цифрового перетворення напруги.

2. Задано умову, що МК після проведення аналого-цифрового перетворення виводитиме отриманий двійковий цифровий код у 8-розрядний порт МК. Складіть алгоритм (процедуру) рішення задачі в середовищах CodeVisionAVR і AVR Studio.

3. Виконайте моделювання пристрою формування (генерації) на виведенні МК послідовності імпульсних сигналів певної частоти, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2. Поясніть роботу пристрою щодо перетворення аналогової величини в цифрову, в якого виведення інформації про результат здійснюється за допомогою світлодіодів.

4. Виконайте моделювання пристрою вимірювання напруги на базі МК з АЦП, використовуючи Proteus Professional 7.2.

5. Розробіть алгоритм роботи АЦП МК у режимі придушення шуму. В експерименті задано умову, що після проведення аналого-цифрового перетворення отриманий двійковий цифровий код МК виводитиме на LCD-модуль.

6. Розробіть алгоритм роботи АЦП МК, що здійснює послідовне читання вхідних сигналів сенсорів, тобто мультиплексування вхідних аналогових сигналів.

Початкові відомості: в автоматизованих системах збору й обробки даних, у яких перевага віддається аналого-цифровій структурі побудови і що базуються на принципі програмного управління процесом обробки,

зазвичай використовується велика кількість датчиків, що фіксують стан і режими роботи устаткування.

7. Дослідіть роботу АЦП на МК і вивчіть можливості виведення вимірних даних на екран чотирирозрядного сегментного індикатора на світлодіодах, використовуючи Proteus Professional 7.2.

8. Поясніть сенс і процедуру перетворення цифрового коду в аналогову величину за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) паралельного типу і визначте статичні параметри ЦАП.

9. Виконайте, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2, моделювання 8-розрядного цифро-аналогового перетворювача двійкової паралельної цифрової коди в постійну напругу і визначте статичні параметри ЦАП.

10. Виконайте, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2, моделювання роботи 8-розрядного цифро-аналогового перетворювача при значеннях кодів, що безперервно змінюються, на входах ЦАП.

11. Поясніть і покажіть можливості управління об'єктом у цифровій мікроконтролерній системі управління, що використовує пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) спосіб управління.

12. Виконайте моделювання пристрою вимірювання напруги на базі МК з АЦП, використовуючи Proteus Professional 7.2. Застосуйте схему пристрою відображення інформації про роботу системи ПІД управління рівнем постійної напруги.

13. Поясніть і покажіть можливості формування ЦАП, що створює поволі змінний аналоговий сигнал пилкоподібної форми із заданими параметрами на базі МК, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2.

14. Поясніть і покажіть можливості формування повільних вихідних аналогових сигналів шляхом перетворення цифрового коду, з яким оперує мікроконтролер, у середнє значення напруги.

Приклад рішення

Початкові відомості. ЦАП, що здійснюють перетворення типу «код–середнє значення напруги», працюють таким чином. МК генерує послідовність імпульсів з постійною амплітудою і тривалістю, заданою числом N_{DAC} , яка потім усереднюється за допомогою фільтру нижніх частот. Разом з тим ЦАП подібного типу широко використовуються не тільки

для отримання постійної напруги, але і для формування динамічних (миттєві значення яких змінюються в часі) сигналів управління для об'єктів (механічних, термічних, електромеханічних та ін.), що володіють великою інерційністю. Зокрема, такі ЦАП можуть застосовуватися для формування поволі змінних (частота зміни 0 – 100 Гц) аналогових сигналів складної форми (пилкоподібних, синусоїдальних, двотональних і т. д.). Шляхом усереднювання ШІМ-сигналу за допомогою простого низькочастотного фільтру можна, наприклад, отримати синусоїдальний гармонійний сигнал. Потрібно, щоб фільтр виділяв не тільки постійну складову, а й компоненту модулюючої частоти. Відповідно, його гранична частота повинна розташовуватися посередині смуги частот між компонентою, що відповідає модулюючій частоті F_M , і першою гармонікою $1F_1$ частоти повторення nF_n широтно-модульованої імпульсної послідовності. У загальному ж випадку, при складному законі модуляції тривалості імпульсів, для здійснення ЦАП необхідно, щоб частота повторення широтно-модульованої імпульсної послідовності $nF_n (F_{PWM})$ була набагато більше максимальної частоти спектру модулюючого сигналу (F_{BW}). Формулу, що визначає співвідношення між максимальною частотою спектру модулюючого сигналу (F_{BW}) і першою гармонікою частоти F_{PWM} повторення широтно-модульованої імпульсної послідовності, можна записати так: $F_{PWM} = kF_{BW}$, де $k > 1$ – коефіцієнт, що визначає ступінь розділення частот. Причому, чим більше значення k , тим більш точно у фільтрі відтворюватиметься необхідний вихідний сигнал ЦАП. Частота F_{PWM} , з якою повторюються цикли ШІМ (PWM), обчислюється за формулою: $F_{PWM} = \frac{f_{CLC}}{2^{N+1} - 2}$. Максимальна частота спектру модулюючого сигналу (FBW) визначається законом зміни тривалості імпульсів у ШІМ-сигналі. Її значення можна знайти в довідниках з обробки сигналів.

При зміні тривалості імпульсів за пилкоподібним законом, коли ширина імпульсів спочатку плавно збільшується, а потім, досягнувши максимального значення, плавно зменшується, формулу для максимальної частоти спектру модулюючого сигналу (FBW) можна записати таким чином:

ном: $F_{BW} = \frac{6}{t_{VAR}}$, де t_{VAR} – період повторення «пили». Припустимо, що

не будуть змінюватися програми формування ШІМ-сигналу. Тоді частота проходження ШІМ-імпульсів, яка залежить від тактової частоти МК і ви-

значається вибраною розрядністю ШІМ, при заданих установках таймера

$$\text{буде рівна } F_1 = f_{PWM} = \frac{f_{CLC}}{(2^{N+1} - 2)} = \frac{7.37 \cdot 10^6}{2^{11} - 2} = 3602,15 \text{ } \tilde{\text{А}}\ddot{\text{o}}.$$

Домовимося вважати, що пилоподібний сигнал повторюється через 0,8 секунд. Тоді максимальна частота спектру модулюючого сигналу FBW відповідно до наведеної раніше формули буде рівна 7,5 Гц. Відповідно, коефіцієнт, що визначає ступінь розділення частот, буде рівний $k = 480$. Припустимо, що в тому ЦАП, що вивчається, аналоговий ФНЧ виконаний за допомогою простого пасивного RC-фільтра, який видаляє непотрібні гармоніки й формує аналоговий сигнал у вигляді пилоподібної напруги. У цьому випадку гранична частота повинна розташовуватися у смузі частот між компонентою, що відповідає максимальній модулюючій частоті FWM, і першою гармонікою частоти повторення широтно-модульованої імпульсної послідовності FPWM.

Припустимо, що $F_{ГР} = 10$ Гц. Для розрахунку елементів фільтру застосовується така формула: $RC = \frac{1}{2\pi F_{ГР}}$. Тому твір величин опору та ємності,

що використовуються у фільтрі, рівний $RC = 0,32$ с. Вибравши значення ємності C , обчислюють значення резистора R . Задаючи величину ємності рівною, наприклад, 200 нФ, отримуємо величину опору резистора фільтру $R = 800$ кОм.

15. Поясніть і покажіть можливості масштабування даних, що поступають із сенсора, для відображення в технічних одиницях на рідкокристалічному індикаторі.

Приклад рішення

В основі введення вимірювальної інформації, необхідної для функціонування системи управління, лежить застосування сенсорів з електричним виходом, що фіксують стан і режими роботи об'єкта управління. Результати, що отримуються за допомогою сенсорів, у сучасному устаткуванні потрібно подавати у вигляді значень, виражених у зрозумілих для оператора інженерних (технічних) одиницях вимірювання. Якщо обробка початкової інформації здійснюється за допомогою МК на програмному рівні, то технічна реалізація завдань подання сигналів сенсорів у необхідних одиницях вимірювання у промисловій автоматичній називається масштабуванням.

Розглянемо рішення задачі масштабування електричного сигналу, що поступає із сенсора температури на 10-розрядний АЦП і потім на мікроконтролер, що працює для забезпечення пристрою відображення інформації – температури в градусах Цельсія.

Припустимо, що аналоговий сигнал сенсора, що відповідає температурі $T = 0 - 100^{\circ} \text{C}$, перетвориться в напругу відповідно до лінійної характеристики перетворення в діапазоні $0,5 - 1,5 \text{ В}$.

Отже, величини напруги, що генеруються сенсором, знаходяться на одній прямій, яка в математиці подається рівнянням загального вигляду $y = kx + b$ ($U_s = kT + b$). Коефіцієнти k і b у рівнянні мають наочне геометричне тлумачення. Значення коефіцієнта b визначає відрізок, що відсікається графіком лінійної функції на осі ординат, а коефіцієнт k є тангенсом кута α , утвореного віссю абсцис і прямою. Невідомі коефіцієнти k і b легко визначити, знаючи дві точки $\{X_1, Y_1\}$, $\{X_2, Y_2\}$ на характеристиці $k = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$ і $b = Y_1 - kX_1$.

Вважатимемо, що необхідна інформація виводиться на рідкокристалічний індикатор у градусах Цельсія.

Для виконання завдання необхідно:

1) запустити CodeVisionAVR і дочекатися появи основного вікна з файлами, що відкривалися раніше, або проектами;

2) відкрити в робочому просторі завдання і провести компіляцію проекту;

3) після компіляції проекту за допомогою відладчика Atmel AVR Studio провести відладку розробленої програми. Для використання відладчика AVR Studio необхідно встановити на комп'ютер відповідну версію AVR Studio, а потім визначити місцеположення та ім'я відладчика (див. команди Setting > Debugtr);

4) вивчити на програмному рівні те, як функціонує АЦП і як здійснюється виведення цифрового коду;

5) виконати моделювання пристрою вимірювання напруги на базі МК з АЦП, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2. Для цього потрібно: а) виділити мікроконтролер, клацнувши по ньому правою кнопкою миші; б) клацнувши по виділеному МК лівою кнопкою миші, відкрити панель редагування властивостей компонента і, якщо необхідно, виконати редагування; в) у полі «Program File» знайти і вказати

файл «прошивки» з розширенням «.hex». Натиснути «ОК», щоб закрити панель правки компонента; г) запустити на виконання модель, натиснувши внизу кнопку у вигляді трикутника; д) вивчити роботу виконаного на мікроконтролері пристрою вимірювання температури і відображення результатів у градусах Цельсія, виміряних за допомогою сенсорів.

Установлюючи значення температури на сенсорах, слід занести в таблицю результати, отримані на індикаторах, і проаналізувати їх.

За наслідками вимірювань потрібно побудувати графіки характеристики перетворення сенсора і характеристики перетворення аналогового вхідного сигналу сенсора в технічні одиниці.

Необхідно визначити, чи має місце нелінійність характеристик.

Контрольні запитання

1. Які електронні пристрої називають аналого-цифровими перетворювачами?

2. Що називають комп'ютеризованим збором даних (інформації)? Поясніть.

3. Поясніть функціональну схему узагальненої системи збору інформації на основі МК.

4. Охарактеризуйте такі поняття: активні та пасивні сенсори. Наведіть приклади.

5. Поясніть, як здійснюється перетворення сигналу з аналогової форми у квантовану.

6. Охарактеризуйте поняття «автоматизовані системи збору й обробки даних».

7. Що таке часово-імпульсні перетворювачі (ЧІП) і де вони застосовуються в поліграфічному устаткуванні?

8. Охарактеризуйте поняття «цифро-аналоговий інтерфейс комп'ютеризованих систем».

9. Назвіть і стисло охарактеризуйте види обробки сигналів в інформаційно-управляючих системах.

10. Поясніть суть застосування так званих «цифрових управляючих технологій» у сучасному комп'ютеризованому устаткуванні.

11. Поясніть, чим визначається точність ЦАП, що широко використовуються в поліграфічному устаткуванні.

12. Назвіть основні особливості цифро-аналогових перетворювачів паралельного типу інтегрального виконання.

13. Наведіть і поясніть класифікацію цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) за ознаками схемотехніки.

14. Назвіть основні особливості цифро-аналогових перетворювачів послідовного типу на основі мікроконтролерів (ЦАП з широтно-імпульсною модуляцією).

15. Поясніть основні особливості управління виробничими процесами та устаткуванням за допомогою мікроконтролера.

16. Наведіть і поясніть спрощену функціональну схему системи автоматичного управління (САУ).

17. Наведіть і поясніть функціональну схему системи автоматичного управління об'єктом, побудовану на основі мікроконтролера.

18. Наведіть і поясніть функціональну схему замкнутої системи з пропорційним (П) управлінням.

19. Назвіть особливості замкнутої системи з пропорційно-інтегральним (ПІ) управлінням.

20. Назвіть особливості замкнутої системи з пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) управлінням.

21. Надайте і поясніть функціональну схему замкнутої системи з пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) управлінням.

22. Нарисуйте і поясніть ШІМ-сигнал і діаграму його амплітудно-частотного спектру.

23. Нарисуйте і поясніть лінеаризацію нелінійної характеристики прямокутними відрізками.

24. Нарисуйте і поясніть статичну характеристику ЦАП $U_{\text{вих}} = f(N)$.

25. Назвіть види обробки сигналів в інформаційно-управляючих системах поліграфічного обладнання.

26. Назвіть можливі варіанти використання системи придушення перешкод при використанні АЦП.

27. Наведіть і стисло охарактеризуйте часову діаграму роботи пристрою стеження-запам'ятовування і спрощену схему пристрою вибірки-збереження.

28. Накресліть і стисло охарактеризуйте функціональну схему узагальненої системи збору інформації.

Модуль 4. Компоненти управлінських систем та інтерфейсу комп'ютеризованого поліграфічного обладнання

Тема 8. Застосування мікроконтролерів для управління електричними двигунами поліграфічного обладнання

8.1. Основні поняття та особливості застосування мікроконтролерів для управління виконавчими механізмами

8.1.1. Початкові відомості про управління приводами поліграфічного устаткування і мехатронними системами

Найважливішою складовою будь-якого поліграфічного устаткування, що здійснює друк, є привід, який, перетворюючи який-небудь вид енергії в механічну роботу, здійснює рух одних елементів поліграфічної системи щодо інших. Відомо, наприклад, що в засобах оперативної поліграфії існує привід, який називають паперопровідною системою. Він виконаний у вигляді спеціального механізму захоплення, подачі і транспортування паперу. Якщо передбачено отримання двосторонніх копій, то привід доповнюють дуплексним пристроєм, який здійснює поворот аркуша на іншу сторону й подає його у друкуючий пристрій.

У друкарських машинах, що працюють за принципом взаємодії контактованих поверхонь «циліндр до циліндра» і що здійснюють офсетний, глибокий або флексографічний друку, приводи застосовуються в підйомниках і транспортних конвеєрах, дозволяючи переміщати папір як по горизонталі, так і із зміною площини руху.

В аркушевих друкарських машинах за допомогою самонакладу, механізмів друкарських секцій і листовивідного пристрою аркуші паперу беруться зі стопи, вирівнюються, передаються в першу друкарську секцію, проводяться через інші друкарські секції і, у вивідному пристрої, запечатані аркуші укладаються в стапель.

Рулонні друкарські машини сконструйовані таким чином, що папір, змотаний у рулон, подається в одну або декілька друкарських секцій, пе-

ресувається для подальшої обробки і знову намотується в рулон. У великому різноманітті реалізовані приводи для самонакладів у різних друкарських і друкарсько-обробних машинах.

Відомо, що в завдання самонакладів входить виконання таких операцій: підйом і підведення головки самонакладу до стопи паперу для відділення від неї листів, транспортування їх за допомогою подаючої системи на накладний стіл і точне їх позиціонування, тобто вирівнювання по передніх і бічних упорах. Самонаклади знаходять застосування як у листових офсетних машинах, так і у швидкохідних великоформатних друкарських машинах. У першому випадку використовують самонаклади з послідовною подачею паперу, а в другому – каскадні самонаклади, які забезпечують високодинамічну подачу паперу.

Спрощена схема транспортування аркуша паперу за допомогою приводу у вигляді самонакладу з послідовною подачею паперу подається таким чином.

У вхідному самонакладі транспортування аркуша здійснюється за допомогою вакууму або сил тертя. Процес подачі зводиться до відділення верхнього аркуша від стопи за допомогою вакууму пневматичною головкою і транспортування його по накладному столу, де він проводиться між роликami, стрічками та щітками. Кожен аркуш підводиться до друкарського апарату з високою швидкістю. Перед цим він пригальмовується, зупиняється й вирівнюється по передніх і бічних упорах. Рух аркуша від вхідного стапеля через самонаклад до друкарської секції і далі до стапельного виводу повин бути забезпечений високоточними приводами транспортуючої системи, яка забезпечує заданий нерівномірний поступальний рух аркуша. Вирівняні листи захоплюються форгрейфером, розганяються до швидкості друку і передаються в друкарський апарат.

У друкарських апаратах машин, продуктивність яких досягає 15 000 аркушів/г, формату 70 см x 100 см, здійснюється проведення аркуша з швидкістю близько 3,5 м/с. Для плавного прискорення запечатаного матеріалу до швидкості друку передбачається відповідний прискорюючий механізм у вигляді форгрейфера і передавального циліндра. Коли аркуш подається до друкарського циліндра, то система захоплення приймає його (рис. 8.1) і під час робочого циклу вводить у контакт з офсетним циліндром, де він задруковується фарбою, а потім за допомогою передавальних циліндрів передається транспортною системою до наступного друкарського апарату, після чого – на вивідний стіл.

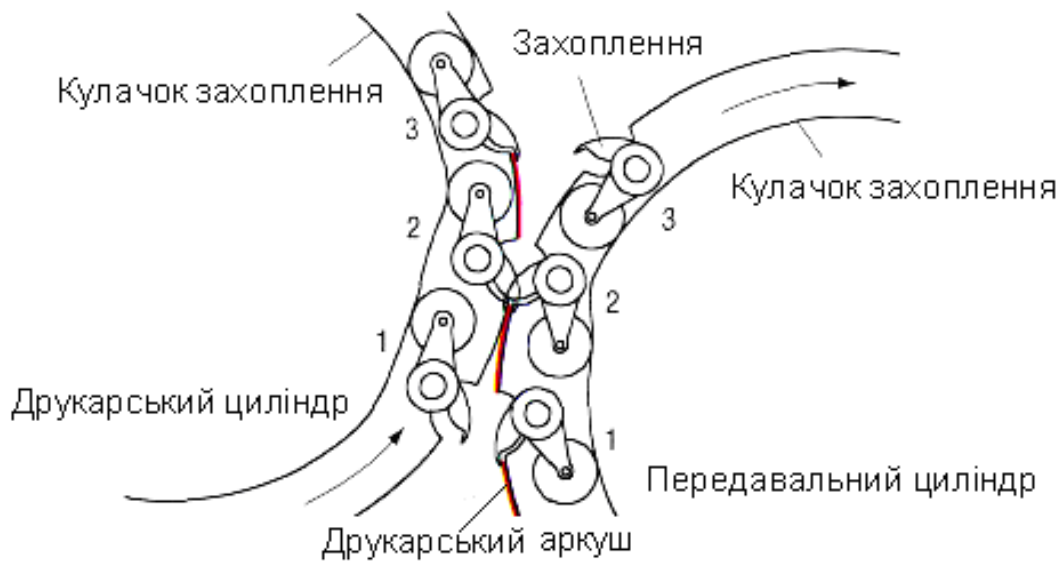


Рис. 8.1. Управління захопленнями при передачі аркуша

Оскільки кожен аркуш виходить з друкарського апарату з високою швидкістю, то перед виходом на стапель він розгладжується, пригальмовується й за допомогою системи захоплень потрапляє на стапель. Привід, будучи функціональним вузлом устаткування, що виконує найрізноманітніші функції для здійснення друкарського процесу, в загальному випадку складається з трьох основних частин: джерела руху (двигуна), передачі, що пов'язує двигун з виконавчим органом машини або переміщуваним елементом, і пристроїв управління.

Приводи як рухові технічні підсистеми є достатньо складними керованими енергосиловими пристроями, в яких завжди можна виділити два канали – силовий і інформаційний. По першому транспортується перетворювана енергія; по другому здійснюється управління потоком енергії, а також збір і обробка інформації про стан та режими функціонування приводної системи в цілому. При цьому приводи становлять доцільні і нероздільні сукупності джерел енергоживлення, виконавчих двигунів, передавальних механізмів та апаратури управління.

Апаратура управління приводами здійснює стабілізацію або заздалегідь задану зміну параметрів руху (переміщення, швидкості, прискорення, силових дій) виконавчого (передавального) механізму, регулюючи процеси перетворення й обміну енергією в силовому та інформаційних каналах управління.

Для здійснення як силових, так і управляючих функцій у приводах використовуються різні види енергії. Як джерело енергії застосовують електричну енергію, енергію стислого газу, енергію потоку робочої рідини, що отримується за допомогою насоса. За виглядом використовуваної енергії приводи розділяються на: електричні (електроприводи), пневматичні, гідравлічні і комбіновані.

Привід, у якому джерелом механічних рухів в устаткуванні є електричний двигун, називають електричним приводом (електроприводом). Саме такими електроприводами, головним чином, забезпечено сучасне поліграфічне устаткування. Система управління таким приводом реалізується на елементах силової електроніки та інтегральної цифрової автоматики. За рахунок цього, а також використання систем управління із зворотними зв'язками в них можна забезпечити точність позиціонування робочого органу не менше $\pm 0,05$ мм.

Перевагами електроприводів є вищий ККД, хороші регульовальні властивості і достатньо висока, порівняно з іншими видами приводів, економічність.

У поліграфічному устаткуванні для автоматизації технологічних процесів застосовуються також пневматичні приводи легкої і середньої вантажопідйомності з трьома ступенями рухливості. Привабливість застосування пневмоприводів обумовлена їх такими властивостями:

а) відносною простотою конструкції пневматичних двигунів для створення як поступальних, так і обертальних рухів механізмів устаткування;

б) відносною доступністю енергії стислого повітря від компресорних установок і відсутністю поворотних ліній та комунікацій. Порівняно з електроприводами, пневматичні приводи мають нижчий ККД, недостатньо жорсткі характеристики через значне стиснення повітря. Погрішність позиціонування робочих органів у таких приводів не перевищує $\pm 0,1$ мм.

Гідравлічний привід характеризується тим, що для отримання механічної енергії в ньому використовується енергія рухомої робочої рідини, джерелом якої зазвичай є насосна станція, що працює за рахунок споживання електричної енергії. Застосуванню гідроприводу в автоматизованому устаткуванні сприяють такі його особливості, як простота здійснення безступінчастого регулювання частоти обертання і швидкостей переміщення виконавчих механізмів, мала інерційність, а також можли-

вість використання електричних методів вимірювання, посилення й перетворення сигналу помилки у спостережних системах.

Управління рухом у мехатронній системі можна умовно розділити на поетапну установку положення, регулювання швидкості і контроль за положенням та швидкістю. У багатьох системах ці функції змішані.

Для управління рухом виконавчих органів поліграфічної машини, що визначаються технологічним процесом, для забезпечення необхідних режимів роботи використовуваних приводів необхідно здійснювати регулювання ряду змінних (у приводах їх часто називають координатами), наприклад, швидкості, прискорення або уповільнення, положення робочого органу машини. Якщо, наприклад, потрібно здійснити регулювання силових (крутильний момент, зусилля), швидкісних (кутова швидкість вихідного валу, швидкість поступального переміщення штока виконавчого механізму) або енергетичних параметрів машини, то механічні характеристики двигунів повинні змінюватися в результаті управління, наприклад, рівня живлячої напруги, тиску, витрати рідини. Процес регулювання цих та інших координат завжди пов'язаний з цілеспрямованою дією на двигун, що й повинна забезпечити система управління.

Для управління рухом виконавчих органів можуть застосовуватися такі способи регулювання координат.

В електроприводі регулювання швидкості руху виконавчих органів робочих машин і механізмів може здійснюватися у вигляді стабілізації швидкості обертання валу двигуна, зміни швидкості відповідно до довільно змінюваного сигналу (стеження) або за заздалегідь заданою програмою (програмний рух).

Регулювання положення характеризується процесом переміщення виконавчих органів робочої машини в задану точку простору (площини) і фіксацією їх там із заданою точністю. Таке переміщення робочих органів з однієї точки площини або простору (з однієї позиції) в іншу називається позиціонуванням і забезпечується відповідним регулюванням положення валу двигуна.

Якщо потрібно забезпечити необхідне прискорення або уповільнення руху робочих органів або створити необхідне натягнення в матеріалі, що транспортується, то проводиться, наприклад, регулювання моменту і струму електродвигуна.

Додамо, що у складних мехатронних системах, що мають у своєму складі декілька робочих машин, послідовність роботи окремих виконав-

чих механізмів повинна бути точно узгоджена (синхронізована) в часі рухів окремих виконавчих механізмів.

Якщо машинні технологічні процеси характеризуються періодичністю і їх реалізація супроводжується повторюваністю в часі, то треба у процесі управління забезпечити заданий технологічний цикл роботи, при якому послідовності дій робочих органів, що виконують певні закони руху, повинні бути точно пов'язані (синхронізовані) між собою в часі і за положенням робочих органів у просторі.

Простота формування механічних рухів безпосередньо з електричної енергії в приводах з електричним двигуном, порівняно з двигунами, що функціонують на інших фізичних ефектах, зумовила ряд переваг електричного приводу. А оскільки електропривод є основним структурним вузлом будь-якої сучасної технологічної машини автоматизованого виробництва, в тому числі і поліграфічного устаткування, то має сенс розглянути електропривод докладніше.

Електропривод призначений для приведення робочого органу технічної системи в рух і управління цим рухом за заданим законом. Він є (рис. 8.2) сукупністю джерела живлення (ДЖ), підсилювально-перетворювального пристрою (ППП), електричного двигуна (ЕД), виконавчого механізму (ВМ), системи автоматичного управління (САУ) та об'єкта управління (ОУ).

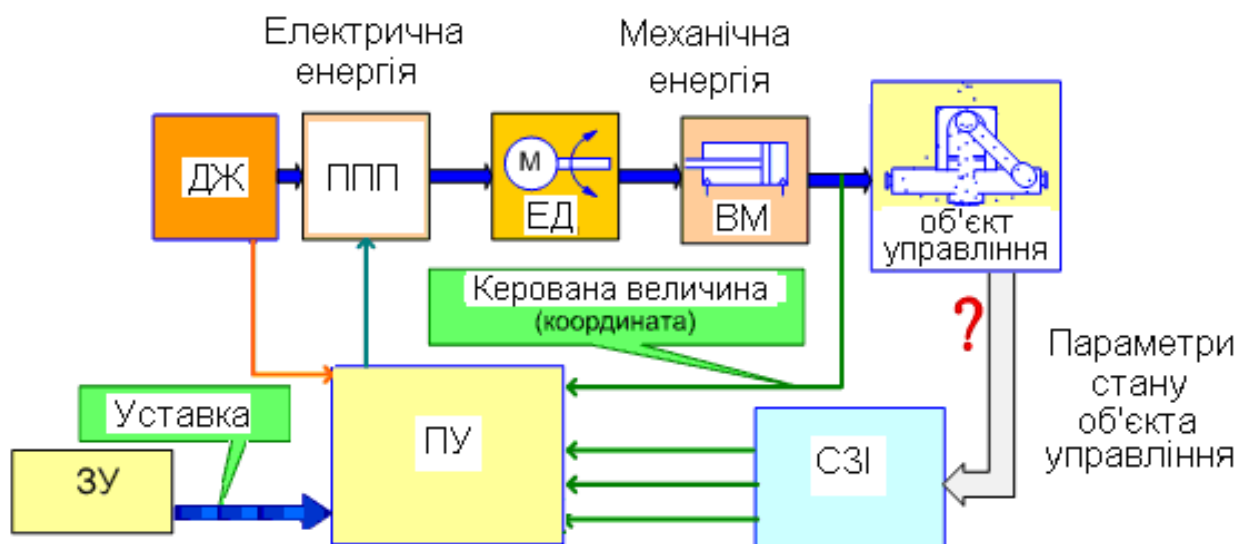


Рис. 8.2. Узагальнена функціональна схема електроприводу

Джерело живлення (ДЖ) є системою електропостачання (СЕР) приводу, що забезпечує генерування, розподіл і передачу електричної енергії необхідної кількості та заданої якості.

Система електропостачання може бути виконана на постійному або змінному струмі. Незалежно від використовуваного роду струму СЕР включає джерело енергії, регулюючі і погоджувальні пристрої.

Підсилювально-перетворювальний пристрій (ППП) зазвичай створюється на основі сучасних силових напівпровідникових перетворювачів (транзисторних, тиристорних та ін.). Його завдання – забезпечити регулювання напруги, що подається на електродвигун. ППП, або, ще по-іншому, силовий перетворювач енергії (СПЕ), регулює параметри та об'єми енергії, що поступає на двигун, за рахунок чого забезпечується управління електричним двигуном.

Електродвигун (ЕД) служить для перетворення електричної енергії в механічну роботу і необхідний для дії на об'єкт управління. Він повинен розвивати рушійні зусилля: створювати механічне зусилля або рушійний момент, що передається на виконавчий механізм, і виконувати функції з переміщення робочого органу відповідно до заданого закону управління. Виконавчі механізми (ВМ) безпосередньо забезпечують переміщення робочих органів усіх вузлів і механізмів щодо носійної (нерухомої) частини об'єкта управління як одиниці технологічного устаткування, в результаті функціонування яких забезпечується задана дія (змінюється положення, форма, фізичні властивості та ін.).

Змінну величину, значення якої необхідно підтримувати постійною або змінювати за бажаним законом, називають керованою величиною (координатою). Пристрій управління (ПУ) є складовою частиною електроприводу. У його склад у загальному випадку входять пристрої отримання, перетворення, зберігання, розподілу й видачі інформації та різні функціональні вузли управління. ПУ і силовий перетворювач енергії утворюють систему управління електроприводом. ПУ в загальному випадку забезпечує прийом команд і установок вихідних координат (установок) від системи більш високого рівня або від людини-оператора і, відповідно до цих «вказівок», здійснює процес управління.

Якщо всі функції управління виконуються без участі людини-оператора, то управління називається автоматичним, а управляючий пристрій – автоматизованим.

У складі окремого електроприводу завжди можна виділити підсистеми управління нижчого рівня, наприклад, підсистему управління транзисторним перетворювачем УПП. У свою чергу, така підсистема низького рівня управління також містить підсистеми ще нижчого рівня управління, наприклад підсистему управління транзисторним (або IGBT-транзисторним) ключем.

Для зв'язку зі всіма переліченими вище пристроями управління використовуються пристрої сполучення (інтерфейси, драйвери). Набір апаратних і програмних засобів, призначених для забезпечення електричних комунікацій між пристроями збору інформації (датчиками тощо) з модулем управління й обробки інформації (контролером, комп'ютером і тому подібне) і передачею далі на виконавчі пристрої, називають промисловим інтерфейсом. Так, зокрема, у схемі управління електродвигуном можуть використовуватися оптопари тиристорів як драйвери для зв'язку з комп'ютером.

Відмітимо, що електропривод може поставлятися фірмою-виготівником уже з вбудованим пристроєм управління, який дозволяє реалізувати розрахункові можливості. При цьому управління електроприводом може зводитися лише до формування в тій або іншій формі задаючої дії від системи управління верхнього рівня, наприклад, установки швидкості або положення. Решта всіх операцій з відтворення заданого значення регульованої координати виконуватиметься автоматично ПУ електроприводу на нижчому рівні ієрархії.

Щоб здійснювалося управління, крім керованої координати, на ПУ поступають ряд додаткових сигналів, що дають інформацію про хід реалізації технологічного процесу, характер руху виконавчого органу, про роботу окремих елементів електроприводу, про виникнення аварійних ситуацій і т. д. Для цієї мети до складу електроприводу входить система збору інформації (СЗІ). Ця інформаційно-вимірювальна система зазвичай включає датчики параметрів мережі (напруги, частоти та ін.), сенсори електричних змінних усередині і на вихідних затискачах електричних перетворювачів (напруги, струму, потужності та ін.), датчики електромагнітних величин, що характеризують стан двигуна (магнітного потоку, напруги, струму).

Для збору інформації й реалізації різноманітних алгоритмів автоматизованого управління технологічними процесами можуть застосовуватися спеціалізовані вимірювальні контролери. Основні функції такого

контролера полягають у тому, щоб здійснювати перетворення вхідних аналогових сигналів, виконувати їх вимірювання, формувати вихідні дискретні та аналогові сигнали для дії на технологічний процес.

Спеціалізовані вимірювальні контролери можуть також проводити архівацію подій у внутрішній пам'яті, здійснювати виведення інформації на дисплеї: пульта оператора, кишенькового або персонального комп'ютерів через спеціальний інтерфейс.

У складі СЗІ обов'язково використовуються датчики механічних змінних на валу двигуна або робочого органу (швидкості, положення, прискорення, моменту, зусилля), сенсори параметрів технологічного процесу (температури, тиску, витрати і т. д.), які в сукупності забезпечують інформацію про поточний стан електроприводу в цілому. В основі організації автоматичної СЗІ і, відповідно, введення даних у ПУ лежить застосування сенсорів вхідної інформації з електричним виходом і подальшим перетворенням електричного сигналу в цифрову форму.

Ефективне управління виробничими процесами і процесами транспортування неможливе без вирішення такої задачі як вимірювання фізичних величин – довжини і кута. Завдання вимірювання лінійних і кутових переміщень зазвичай вирішується завдяки використанню у пристроях сенсорів і датчиків вимірювання лінійних і кутових переміщень. Для побудови високоточних датчиків лінійного або кутового положення в електроприводах досить часто застосовують оптичні позиційно-кодуючі пристрої. У них для перетворення значення координати в цифровий код застосовані прозорі кодуючі пластини або диски, виготовлені способом фотолітографії. Фактично в таких оптоелектричних квантуючих перетворювачах мірою служить довжина світлової хвилі, відома з високою точністю, що дозволяє отримати високу точність вимірювань.

Фоторастрові вимірники переміщень (перетворювачі переміщень у число-імпульсний код накопичуючого типу) мають дві оптичні лінійки – вимірника та індикаторної – з паралельними штрихами. Для фіксації оптичних сигналів у таких вимірниках лінійних переміщень використовуються фотоприймачі, а для їх обробки – спеціальні електронні схеми. Зазвичай такі вимірники лінійних переміщень містять довгу шкалу і скануючу головку, яка рухається вздовж цієї шкали, фіксує відносне переміщення. Скануюча головка в цій системі закріплюється на направляючій, яка забезпечує її точне переміщення вздовж шкали. Перша шкала складається з ряду непрозорих і прозорих областей, що відображають двійко-

вий код. Діафрагма скануючої головки містить чотири щілини. Щілини розміщені так, що вихідні сигнали фотоприймачів зрушені на чверть періоду вимірювальних ґрат. Через зсув щілин зрушені по фазі і синусоїдальні сигнали фотоприймачів. При переміщенні вимірювальної лінійки відносно індикаторної на фотоприймачах виникають електричні сигнали, зрушені по фазі на 90° . Відповідна електронна схема з фотоприймачів, компараторів і формувачів імпульсів перетворить вихідні сигнали в сигнали прямокутної форми, які потім поступають на схему збігу. На виході схеми формується цифровий код, однозначно пов'язаний з координатою «Х». За порядком чергування імпульсів можна визначити знак напрямку руху вимірювальної лінійки. Подібні системи вимірювання лінійних переміщень забезпечують погрішність вимірювань до 0,003 мм.

Ряд перетворювачів переміщень побудований на використанні кутових зсувів. Проста конструкція такого пристрою побудована на реалізації перетворення обертального руху в лінійне переміщення за допомогою механізму «рейка – шестерня» або «гайка – ходовий гвинт». Точність таких пристроїв залежить від механічного перетворювача лінійного руху в обертальне. Такі перетворювачі можуть формувати лінійні переміщення важелів машин (точних передач важелів).

Для вирішення одного з найважливіших завдань у сфері промислової автоматизації — вимірювання кутових переміщень — призначені енкодери, тобто кодуючі фотоелектричні перетворювачі «кут – код». Енкодери (encoder) незамінні при вимірюванні кутового положення вала, його швидкості і прискорення.

Сучасні енкодери забезпечують високу роздільну здатність, надійність, точність. Завдяки принципу функціонування пристрою, а саме фотоелектронного сканування оптичних кодів, дозвіл при вимірюванні кута складає всього декілька тисячних градуса. У вимірюваннях лінійних зсувів, побудованих на перетворенні обертального руху в лінійне переміщення, енкодери мають дозвіл, вимірюваний у міліметрах.

Фотоелектричні перетворювачі «кут – код» зазвичай виконуються з рухомим кодуючим диском. Кодуючі диски таких пристроїв, виготовлені фотоспособом, містять прозорі ділянки в непрозорій підкладці. Радіальні лінії в них наносяться з погрішністю до 0,007 кутової секунди.

До складу кодуючого перетворювача входить джерело оптичного випромінювання (світла), зазвичай об'єднане з оптичною системою, і лінійка розміщених уздовж радіусу фотоприймачів. У рухомому кодуючому

диску просвічувані ділянки розміщені по зонах. Якщо прозора ділянка в диску знаходиться напроти фотоприймача даної зони, то промінь оптичного випромінювання через щілину потрапляє на фотоприймач і змінює його стан, наприклад, електричний опір. Зміна фотоопору перетвориться в електричний імпульс за даним каналом. При обертанні диска промінь періодично переривається і в ланцюзі фотоприймачів формується прямокутний імпульс. Вихідний ланцюг перетворить усі імпульси в певну послідовність. Кодуючі перетворювачі при повороті кодуєчого диска на елементарний крок формують код, тобто цифровий сигнал, неповторний для кожного приватного положення осі в межах роздільної здатності кодуєчого пристрою, який є функцією кутового положення валу диска, а отже, і валу двигуна, оскільки вони механічно зв'язані. Зазвичай такі перетворювачі на один повний оборот створюють двійкове «слово» по 12 двійкових розрядів, що забезпечує погрішність квантування 10^{-6} .

Оскільки оптоелектронні кодуєчі пристрої створюють на виході цифровий код, то їх можна використовувати в управляючих системах із замкнутим контуром управління. Вихідний код перетворювача можна порівняти цифровим способом з кодом, що задається мікроконтролером. Результат цього порівняння буде результатом розузгодження в цифровому вигляді, значення якого буде прямо пропорційне погрішності кутового положення валу двигуна.

Двійковий кодуєчий перетворювач має положення, в яких зміни стану фотоприймачів можуть відбуватися одночасно. Створити одночасність, навіть при найточнішому виготовленні перетворювача, недосяжно. З цієї причини існує вірогідність, що при мінімальному кутовому переміщенні змінить свій стан лише частина фотоприймачів, а інші залишаться в колишньому стані. Таким чином, може виникати ціла група помилкових кодових комбінацій на виході. Для подолання даних труднощів використовується ряд методів. При їх застосуванні всі вихідні сигнали змінюються від логічного 0 до логічної 1 і навпаки в один і той же момент та при відповідному положенні диска.

Зокрема, подібних проблем не виникає, якщо в кодуєчих дисках використовуються спеціальні коди, такі, як код Грея або код Баркера, оскільки в них при будь-якому переході змінюється тільки один розряд. При цьому час неоднозначності прочитування будь-якого розряду перевищує тривалість переходу фотоприймача з одного стану в інший. Помилковий вихідний сигнал у цьому випадку не виникне ніколи. Перетво-

рення спеціального коду у звичайний двійковий вимагає додаткових логічних пристроїв або програмних зусиль.

Промисловість випускає цілий ряд еncoderів різних типів:

- 1) інкрементальні обертальні;
- 2) абсолютні однооборотні обертальні;
- 3) абсолютні багатооборотні обертальні;
- 4) інкрементальні та абсолютні обертальні з тросовим барабаном;
- 5) лінійні абсолютні;

6) системи зворотного зв'язку (motor feedback systems) для приводів з інтерфейсом SinCos.

Інкрементальні еncoderи генерують інформацію щодо положення і кута об'єкта у вигляді електричних імпульсів, що відповідають положенню валу. Якщо вал нерухомий, передача імпульсів припиняється. Порівняно з інкрементальними еncoderами, абсолютні мають важливу перевагу – вони зберігають поточне значення кутового переміщення незалежно від наявності живлення.

Абсолютні еncoderи надають інформацію про положення, кут і число оборотів об'єкта у формі унікальних кодів, які відповідають кожному кроку. Вони дозволяють у будь-який момент часу знати поточний кут повороту осі, в тому числі і після пропажі та відновленні живлення.

Багатооборотні абсолютні еncoderи, крім того, підраховують і запам'ятовують кількість повних оборотів осі. Основною робочою характеристикою для абсолютних еncoderів є число унікальних кодів на оборот і кількість таких оборотів. Оскільки абсолютне положення визначається унікальним кодом, первинної установки датчика не вимагається.

Лінійні еncoderи застосовуються в конвеєрних лініях та ін. Поточне положення об'єкта безперервно контролюється блоком датчика, і прочитувана інформація передається вбудованим блоком управління як закодований сигнал.

У даний час управління електроприводами здійснюється, як правило, за допомогою мікроконтролерів. Такий спосіб управління застосовується скрізь, де використовується сучасна силова перетворювальна техніка. Основні переваги мікроконтролерного способу управління полягають у такому:

- 1) забезпечує гнучкість системи управління, дозволяючи реалізувати програмними засобами різні методи управління;
- 2) забезпечує високу точність регулювання змінних (координат);

3) дає можливість залежно від ситуації змінювати параметри регуляторів, що працюють у реальному часі;

4) дозволяє лінеаризувати характеристики управління і реалізувати нелінійні функції;

5) використання мікроконтролерів для управління дозволяє уніфікувати апаратуру.

Слід мати на увазі, що при цьому управління електроприводом є лише частиною функцій мікроконтролера. Він також використовується для вирішення завдань діагностики устаткування, включаючи власне електропривід і систему електропостачання приводу, для управління електроавтоматикою, обробки сигналів датчиків, що характеризують стан об'єкта управління.

8.2. Управління кроковими електричними двигунами поліграфічного обладнання при застосуванні мікроконтролерів

8.2.1. Дискретні електроприводи з кроковими двигунами

Виконавчі органи деяких робочих машин і механізмів повинні здійснювати строго дозовані переміщення з фіксацією свого положення в кінці руху. У електроприводах таких машин і механізмів, що створюють основу дискретного електроприводу, застосовуються крокові двигуни (КД) різних типів. Основна відмінність КД від двигунів інших типів полягає в тому, що магнітне поле в них переміщається дискретно (кроками). Внаслідок цього рух ротора складається з послідовних елементарних кроків. Кут повороту ротора визначається числом імпульсів, які подані на двигун.

За характером своєї роботи КД близький до цифрових пристроїв, тому він володіє багатьма перевагами для застосування як виконавчий механізм цифрових систем управління рухом. КД зазвичай використовується для побудови дискретного приводу з обертальним рухом вихідного валу або поступальним рухом рухомого елемента. При цьому здійснюється перетворення команд-імпульсів в дискретний поворот вихідного валу або дискретне переміщення рухомого елемента виконавчого механізму. Дискретний крок (кут повороту ротора) може складати лише одну соту від повного обороту, тому установку кутового положення можна виконати з великою точністю. Швидкість такої установки може досягати до 1 000 кроків за секунду (600 оборотів за хвилину). Оскільки накопичення

погрешностей в КД немає, десятки тисяч кроків можуть бути виконані з точністю окремого кроку (0,01 %). Використовуючи ходовий гвинт на валу крокового двигуна, можна отримати виключно точний лінійний рух. Так, якщо кроковий двигун працює в парі з різьбовим з'єднанням, то при кроці різьблення близько 0,1 мм забезпечується точність позиціонування об'єкта близько 0,25 – 1 мкм (рис. 8.3).

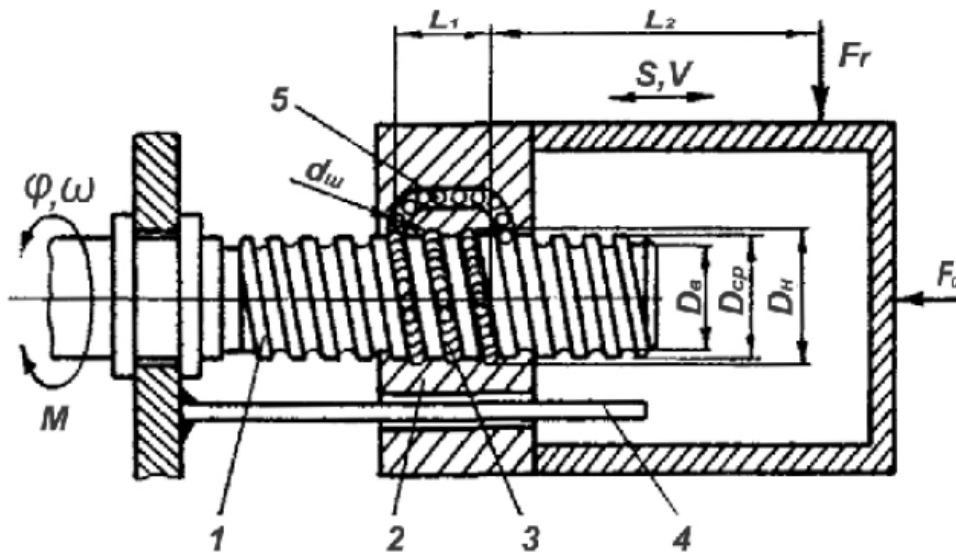


Рис. 8.3. Зовнішній вигляд ходового гвинта на валу крокового двигуна, що дозволяє отримати точний лінійний рух

КД забезпечує повний момент у режимі зупинки (якщо обмотки жив-ляться), прецизійне позиціонування і повторюваність. З цієї причини КД використовують у різних кінематичних механізмах у тих випадках, коли потрібно здійснити з високою точністю виконання операцій позиціонування, перетворення обертального руху в поступальний.

КД особливо важливі для прецизійних механізмів і з цієї причини, що вони не вносять погрешності під час здійснення координатних і кутових переміщень.

Кроковий двигун володіє такими важливими перевагами:

- 1) простота, надійність (завдяки відсутності контактних щіток) і жорсткість конструкції за наявності тільки двох підшипників;
- 2) КД має двонаправлене обертання і просте управління, – оскільки двигун відпрацьовує всього один приріст, то у ряді випадків відпадає навіть необхідність зворотного зв'язку;

3) у КД є можливість неодноразової зупинки й запуску двигуна без шкоди для нього самого і навантаження;

4) КД легко сумісний з методами цифрового управління. Оскільки приростами є дискретні значення, для їх зберігання можна використовувати цифрову пам'ять, а для генерування кривих (траєкторій, що характеризують зміну координат) – цифрові логічні схеми;

5) у електромеханічних системах вони надають можливість побудови безредукторних приводів або приводів з мінімальним числом кінематичних ланок. При цьому така функція редуктора, як збільшення моментів КД, замінюється збільшенням числа пар полюсів двигуна. При рівності моментів КД, що розвиваються, порівняно з двигунами постійного струму мають кращі масогабаритні показники і підвищену швидкодію;

6) при використанні КД з приводу можна виключити такі компоненти, як вимірники кутової швидкості (тахометри), зубчаті передачі. При цьому в системах управління з КД навіть у режимі розімкненого контуру можна забезпечити точне завдання кутового положення.

У даний час промисловістю випускається безліч різних типів КД на всі випадки життя. Електропривод з КД сьогодні використовується на потужності від доль вата до декількох кіловат. КД у поліграфічному устаткуванні широко застосовують у таких ситуаціях:

1) у комп'ютерному устаткуванні для управління прочитуючими головками дисководів (жорсткого та оптичних дисків). КД можна зустріти у принтерах, плотерах, факсах (для переміщення кареток друкуючих пристроїв), у факсимільних апаратах, у копіювальних машинах, у лотках подачі й сортувальниках паперу. Типова сфера застосування крокових двигунів: подача плівки і зміна масштабу зображення в камерах;

2) у традиційних копіювальних пристроях, що використовуються для одноколірного друку офісної документації, а також для здійснення прецизійних переміщень вузла прочитування (системи введення) зображення, променя, дзеркал при електронній репродукції або «скануванні».

Відомо, що в електронних репродукційних апаратах, які називають також планшетними сканерами і які працюють за принципом планшетного сканування, введення інформації здійснюється шляхом прочитування зображення оригіналу по рядках або точках. При цьому відбитий від оригіналу світловий потік перетворюється на електричний сигнал, що відповідає тоновим і колірним величинам оригіналу. Оригінал прочитується оптоелектронним приймачем. Для прочитування образотворчого оригі-

налу у сканерах планшетного типу у процесі сканування потрібно забезпечити високоточне переміщення джерела випромінювання і світлочувливих елементів. Дане завдання якраз і дозволяє вирішити використання крокових двигунів.

КД широко застосовуються для здійснення точних переміщень при прочитуванні прозорих оригіналів у сканерах барабанного типу. Такі сканери застосовуються для повторного переведення в цифрову форму растрованих і аналогових оригіналів або для сканування оригіналів, виконаних на прозорій основі (слайди, прозорі оригінали великих форматів). Сканери, що працюють на пропускання світла (діасканери), використовуються для сканування кольорових слайдів.

КД використовуються для здійснення прецизійних переміщень у системах додрукової підготовки, де зображення записується не на фотоплівку, а безпосередньо на формовий матеріал (для виведення інформації способом «комп'ютер–друкована форма»).

Відомо, що з проникненням цифрових технологій у додрукові процеси застосовуються нові технології, що дозволяють виготовляти офсетні форми безпосередньо в друкарській машині (технології типу «комп'ютер-друкарська машина» (Computer to Press/Direct Imaging)). Друкарська форма випалюється лазером на формовому матеріалі, розміщеному на формовому циліндрі.

Аналогічним чином можна говорити про застосування КД при глибокому друці. У цьому випадку, як відомо, застосовується пряме гравіювання, коли циліндр гравіюється безпосередньо з цифрового файлу для отримання друкованого зображення, зафіксованого на механічно стабільній друкарській формі. Сигнали від скануючої головки (дані про зображення) перетворюються в комп'ютері й управляють рухом у просторі головою гравіювання. При управлінні головою гравіювання потрібно дуже точно забезпечити обертання циліндра, а також швидкість подачі.

КД застосовуються для здійснення точних переміщень скануючої денситометричної головки, що автоматично вимірює щільність контрольних смуг друкарського аркуша за один прохід.

У багатобарвних машинах, як відомо, подача фарби в кожній друкарській секції повинна контролюватися й регулюватися окремо. Для цієї мети на полі обрізу друкарського аркуша прийнято друкувати кольорові шкали, вимірювальні поля яких відповідають певним фарбам. Щільність

полів шкал на відтисненні контролюють за допомогою денситометра. За значеннями щільності можуть бути визначені зміни в подачі фарби.

У ряді випадків використовують рухому скануючу денситометричну головку, яка автоматично вимірює контрольні смуги друкарського аркуша за один прохід. При цьому для вимірювання на відтисненнях, виконаних різними друкарськими фарбами, на шляху ходу променів від джерела світла в денситометрі розміщують світлофільтри.

КД застосовуються для здійснення точних рухів у друкарських системах на основі технологій безконтактного друку таких, як електрофотографія. В цьому випадку використовується повний опис друкарського продукту і технологічних процесів у цифровій формі. У безконтактних способах друку дуже важливо забезпечити високоякісною технічною системою переміщення всіх елементів, що беруть участь у процесі друку і транс-портування паперу. Оскільки довжина розгортки кола світлочутливого барабана не співпадає з довжиною відтиснення, то транспортна система повинна забезпечити такі швидкості обертання циліндрів, щоб при друці відтиснень тонер і приховане зображення потрапляли в одне й те ж місце поверхні барабана.

Нарешті, крокові двигуни в поліграфічному устаткуванні застосовуються в автоматизованих пристроях здійснення корекції приведення фарб (у системі настройки друкарської машини).

Кроковий двигун зовні практично нічим не відрізняється від двигунів інших типів. Найчастіше це круглий корпус, вал, декілька виводів. КД (Stepper Motor) – це електромеханічний пристрій, який перетворює електричні імпульси в дискретні механічні переміщення. Він відноситься до класу безколекторних двигунів постійного струму. Як і будь-які безколекторні двигуни, КД мають високу надійність, великий термін служби (висока надійність, пов'язана з відсутністю щіток, а термін служби крокового двигуна фактично визначається терміном служби підшипників), що дозволяє використовувати їх у промисловості.

За принципом своєї дії КД є синхронним двигуном. Проте на відміну від звичайних синхронних двигунів ротори КД не мають пускової короткозамкнутої обмотки; їх пуск проводиться не асинхронним, а імпульсним способом. У КД обертаючий момент створюється магнітними потоками статора і ротора, які відповідним чином орієнтовані один відносно одного. Статор виготовлений з матеріалу з високою магнітною проникністю.

Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопроводи зібрані з окремих пластин, подібно до сердечника трансформатора.

У КД є декілька полюсів. Полюс можна визначити як деяку область намагніченого тіла, де магнітне поле сконцентроване найбільшою мірою. Полюси мають як статор, так і ротор. Обертальний момент КД пропорційний величині магнітного поля, яка пропорційна струму в обмотці і кількості витків. Таким чином, момент залежить від параметрів обмоток. Якщо хоча б одна обмотка крокового двигуна живиться, ротор приймає певне положення. Він знаходитиметься в цьому положенні до тих пір, поки зовнішній прикладений момент не перевищить деякого значення, яке називають моментом утримання. Після цього ротор обернеться і прагнутиме прийняти одне з наступних положень рівноваги.

За принципом дії КД можна розділити на три типи:

- 1) двигуни з ротором, що є постійним магнітом (Permanent-magnet);
- 2) синхронні реактивні двигуни із змінним магнітним опором (індукторні) (Variable-reluctance);
- 3) гібридні, або синхронно-реактивні двигуни (Hybrid).

Визначити тип двигуна можна, наприклад, за такими ознаками. Оскільки особливість КД з постійними магнітами полягає в тому, що ротор у кінці такту приходить у фіксоване положення навіть при знятті напруги (у положення фіксації), то при обертанні валу знеструмленого двигуна з постійними магнітами або гібридного відчувається змінний опір обертанню; двигун обертається ніби клацаннями. У той же час вал знеструмленого двигуна із змінним магнітним опором обертається вільно. Гібридні двигуни є подальшим удосконаленням двигунів з постійними магнітами і за способом управління від них не відрізняються.

Визначити тип двигуна можна також за конфігурацією обмоток. Двигуни із змінним магнітним опором зазвичай мають три (рідше чотири) обмотки з одним загальним виводом. Двигуни з постійними магнітами найчастіше мають дві незалежні обмотки. Ці обмотки можуть мати відведення від середини. Іноді двигуни з постійними магнітами мають 4 роздільних обмотки.

КД з постійними магнітами, що має найбільш просту конструкцію, отримав свою назву через те, що в нього як ротор використовується постійний магніт. Двигуни з постійними магнітами складаються із статора, який має обмотки, і ротора, що містить постійні магніти (рис. 8.4-а). По-

люси ротора, що чергуються, мають прямолінійну форму і розташовані паралельно осі двигуна.

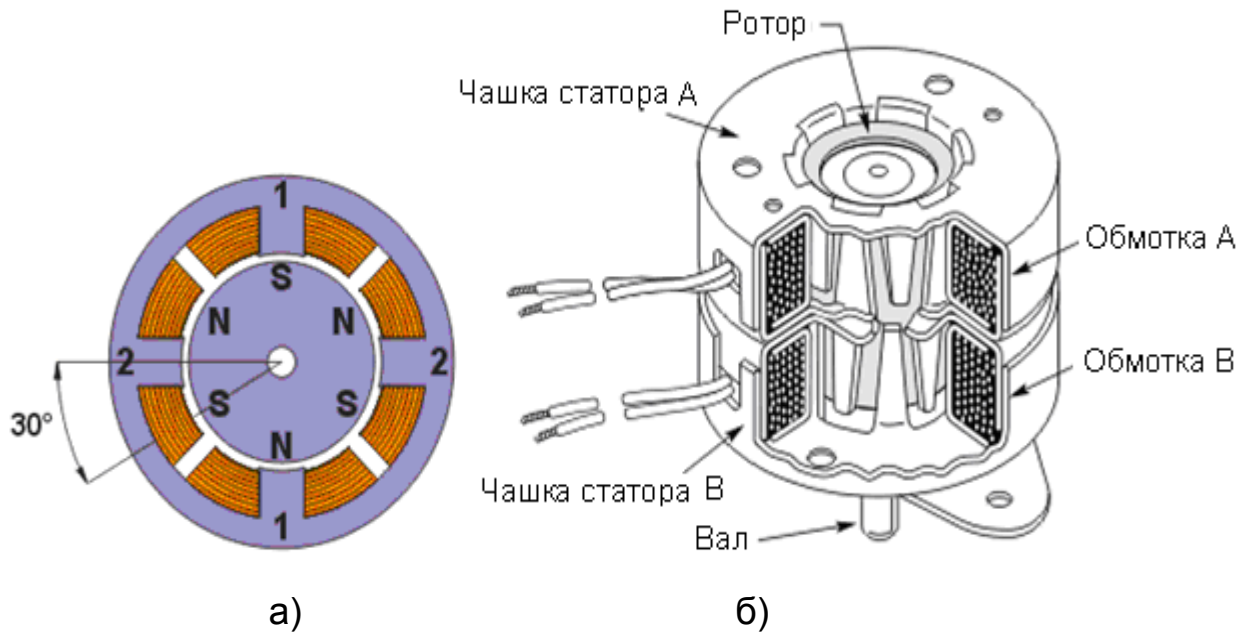


Рис. 8.4. Спрощена конструкція (а) і розріз (б) крокового двигуна з постійними магнітами

Показаний на рис. 8.4 а КД складається з 3-х пар полюсів ротора і 2-х пар полюсів (зубців) статора. Такий двигун має величину кроку 30° . Кожні два зубці статора розташовано на 180° один від одного і на них намотані котушки, що створюють магнітний потік.

Двигун на рис. 8.4 а має 2 незалежні обмотки, кожна з яких намотана на двох протилежних полюсах статора. Розріз реального крокового двигуна з постійними магнітами показаний на рис. 8.4 б.

Для здешевлення конструкції двигуна магнітопровід статора виконаний у вигляді штампованого стакану. Усередині знаходяться полюсні наконечники у вигляді ламелей. Обмотки фаз розміщені на двох різних магнітопроводах, які встановлені один на одному. Ротором є циліндровий багатополісний постійний магніт.

При підключенні напруги до однієї обмотки і, відповідно, при протіканні струму в одній з котушок ротор прагне зайняти таке положення, коли різнойменні полюси ротора і статора знаходяться один напроти одного. Тобто при холостому ході ротор крокового двигуна займає такі положення, в яких напрям вектора сили, що намагнічує, лежить на лініях про-

тилежних полюсів. При зміні конфігурації напруги, яка прикладається до обмоток, можна здійснити покрокове переміщення ротора. Кожному перебуванню напруги на обмотці (одному перемикаючому обмотки) відповідає один крок ротора. На практиці двигуни з постійними магнітами зазвичай мають 48 – 24 кроки на оборот (кут кроку $7,5^{\circ} - 15^{\circ}$).

Для здійснення динамічного режиму роботи КД і забезпечення обертання ротора потрібно включати фази поперемінно. Для цієї мети служать електронні комутатори, які забезпечують живлення обмоток статора КД імпульсами, або порізно, або групами в різних поєднаннях. Кожному такту комутації включених обмоток відповідає певна величина і напрям вектора результуючої намагнічуючої сили і цілком певне положення ротора у просторі. Послідовний перебір комбінацій включених фаз приводить до дискретного обертання магнітного поля в повітряному зазорі, до повороту ротора і його обертального руху. Цей рух складається з послідовних елементарних поворотів (кроків), здійснюється «кроками», частково нагадуючи безперервне обертання. При цьому залежно від комбінації імпульсів, що подаються на обмотки, в КД можна забезпечити обертання, як за, так і проти годинникової стрілки.

Для реверсу (зміни напрямку обертання) КД необхідно змінити полярність напруги на обмотці, яка була включена при даному такті комутації. КД, на відміну від синхронного двигуна, розраховані на входження в синхронізм зі стану спокою і примусове електричне гальмування. Завдяки цьому в кроковому електроприводі можна забезпечити пуск, гальмування, реверс, перехід з однієї частоти управляючих імпульсів на іншу. Завдяки намагніченості ротора в таких двигунах забезпечується великий магнітний потік і більший, ніж у двигунів із змінним магнітним опором, момент. Проте двигуни з постійними магнітами схильні до впливу зворотної електрорушійної сили з боку ротора, яка обмежує максимальну швидкість обертання ротора.

Для роботи на високих швидкостях використовуються двигуни із змінним магнітним опором.

У синхронному реактивному КД із змінним магнітним опором, показаному на рис. 8.5 а, ротор має зубчасту форму і виконаний з магнітом'якого матеріалу, який володіє високою магнітною проникністю. Статор має шість зубців (6 полюсів). Кожні два зубці статора, розташовані напроти один одного, належать одній фазі. Двигун має 3 незалежні обмотки, кожна з яких намотана на двох протилежних полюсах статора.

Котушки фаз можуть підключатися паралельно або послідовно. Такий двигун має крок 30° . При подачі імпульсу і, відповідно, при включенні струму в одній з котушок (фази 1) утворюється магнітний потік і ротор прагне зайняти положення, коли магнітний потік замкнутий, тобто положення, коли будь-які два зубці ротора знаходяться напроти тих полюсів, на яких знаходиться живлюча обмотка. У цій позиції магнітний опір мінімальний, що забезпечує стійке положення рівноваги (рис. 8.5 б).

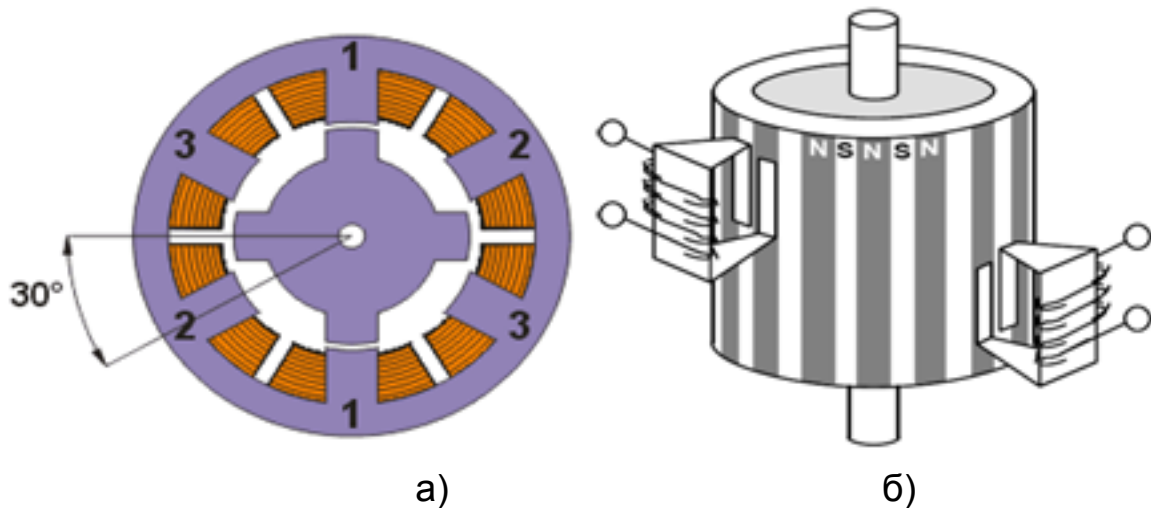


Рис. 8.5. Поперечний перетин (а) і положення ротора (б), коли магнітний потік замкнутий, синхронного реактивного КД із змінним магнітним опором

Процес повороту ротора можна здійснити таким чином. Якщо послідовно включити фазу 2 і відключити фазу 1, то це приведе до того, що положення ротора при переході від збудженої фази 1 до підключеної фази 2 змінюватиметься за годинниковою стрілкою. Ротор обернеться на кут 30° . Якщо потім вимкнути обмотку 2 і включити наступну – 3, то ротор знову змінить положення, замкнувши своїми зубцями магнітний потік. Тобто кожна комутація приводить до повороту ротора на кут 30° у напрямі годинникової стрілки. Після трьох комутацій ротор обернеться на 90 градусів. Число фаз статора m , зубців ротора n , а також кількість кроків S за один повний оборот ротора пов'язані співвідношенням $S = mn$.

Реальний кроковий двигун може мати більшу кількість полюсів статора і більшу кількість зубців ротора, що відповідає більшій кількості кроків на оборот. Іноді для зменшення кроку збільшують число зубців статора. Прагнення зменшити кут кроку привело до конструкції реактивного редуктора КД, у якій обмотка статора розташовується навколо ве-

ликих виступаючих частин (полюсів). Поверхню кожного полюса статора виконують зубчатою і полюси статора, що мають два і більше зубців, намагнічуються в одному напрямі.

Ротор також має зубчасту структуру. Зубцеві ділення статора і ротора рівні. Така конструкція КД забезпечує дуже маленьке значення кута кроку – близько декількох градусів. Таким чином, і в синхронних реактивних КД із змінним магнітним опором щоб, здійснити безперервне обертання, потрібно включати фази поперемінно.

Гібридні двигуни (ГД) (рис. 8.6) відрізняються від реактивних тим, що в них застосовується підмагнічування ротора (електромагнітне або постійними магнітами). Постійний потік підмагнічування збуджується з боку статора або ротора.

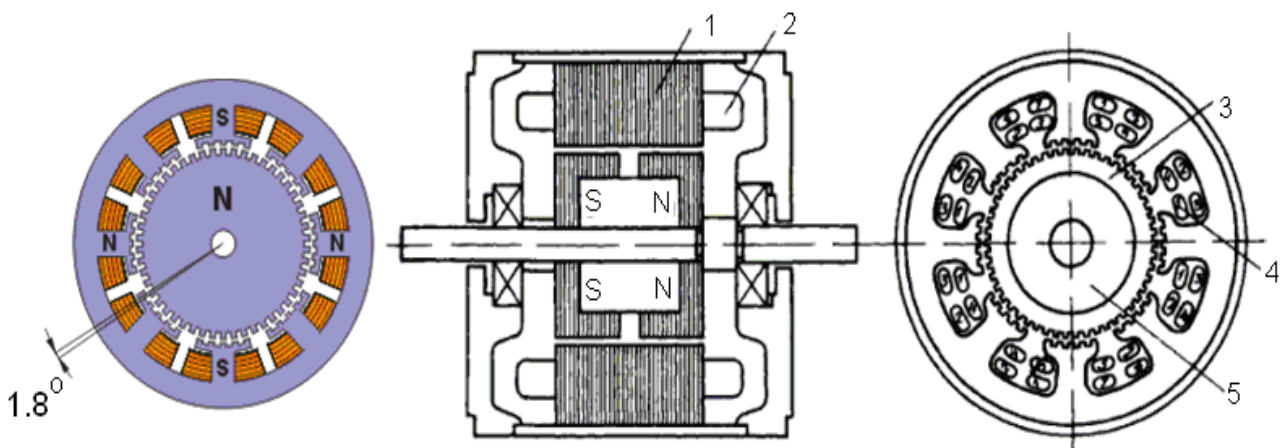


Рис. 8.6. Поперечний перетин гібридного КД: 1 – магнітопровід статора, 2 – обмотки, 3 – магнітопровід ротора, 4 – обмотка статора, 5 – постійний магніт

Такі двигуни називають гібридними тому, що в них використовуються принципи як реактивного двигуна, так і двигуна з постійними магнітами. ГД є дорожчими, ніж двигуни з постійними магнітами, зате вони забезпечують меншу величину кроку, більший момент і велику швидкість. Типове число кроків на оборот для гібридних двигунів складає від 100 до 400 (кут кроку складає $3,6^{\circ} - 0,9^{\circ}$). ГД поєднують у собі кращі риси двигунів із змінним магнітним опором і двигунів з постійними магнітами.

Ротор ГД має зубці, розташовані в осьовому напрямі. Ротор розділений на дві частини, між якими розташований циліндровий постійний магніт. Зубці верхньої половинки ротора є північними полюсами, а зубці

нижньої половинки – південними. Крім того, верхня і нижня половинки ротора повернені одна до одної на половину кута кроку зубців.

Число пар полюсів ротора рівне кількості зубців на одній з його половинок. Зубчаті полюсні наконечники ротора, як і статора, набрані з окремих пластин для зменшення втрат на вихрові струми.

Статор ГД також має зубці, забезпечуючи велику кількість еквівалентних полюсів, на відміну від основних полюсів, на яких розташовані обмотки. Зазвичай використовуються 4 основних полюси для $3,6^\circ$ двигунів і 8 основних полюсів для $1,8^\circ$ і $0,9^\circ$ двигунів. Зубці ротора забезпечують менший опір магнітному ланцюгу в певних положеннях ротора, що покращує статичний і динамічний моменти. Це забезпечується відповідним розташуванням зубців, коли частина зубців ротора знаходиться строго напроти зубців статора, а частина – між ними. Залежність між числом полюсів ротора, числом еквівалентних полюсів статора і числом фаз визначає кут кроку двигуна: $S = 360 / (N_{ph} \times Ph) = 360 / N$, де N_{ph} – кількість еквівалентних полюсів на фазу, що рівна кількості полюсів ротора, Ph – кількість фаз, N – повна кількість полюсів для всіх фаз. Ротор двигуна може мати 100 полюсів (50 пар). Якщо двигун має 2 фази, то повна кількість полюсів – 200, а крок, відповідно, $1,8^\circ$. Розрізи гібридного крокового двигуна показані на рис. 3.7. Стрілками показаний напрям магнітного потоку постійного магніта ротора. Частина потоку (на рис. 8.7 показана чорною лінією) проходить через полюсні наконечники ротора, повітряні зазори і полюсний наконечник статора. Ця частина не бере участі у створенні моменту.

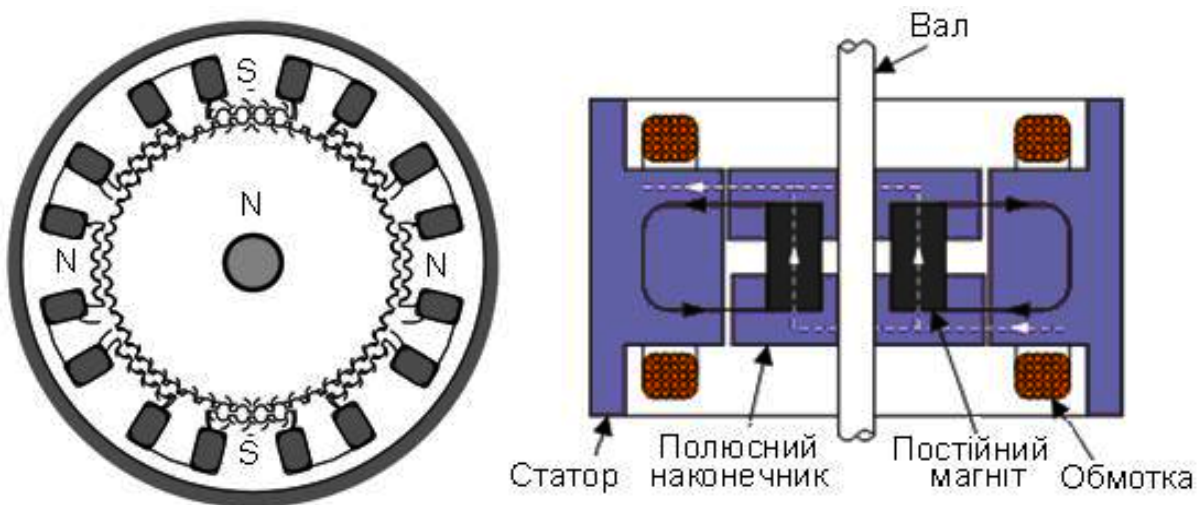


Рис. 8.7. Розрізи гібридного крокового двигуна

Як видно з рис. 8.7, повітряні зазори у верхнього і нижнього полюсних наконечників ротора різні. Це досягається завдяки повороту полюсних наконечників на половину кроку зубів. Тому існує інший магнітний ланцюг, який містить мінімальні повітряні зазори і, як наслідок, володіє мінімальним магнітним опором. По цьому ланцюгу замикається інша частина потоку (на рис. 8.7 показана штриховою білою лінією), яка і створює момент. Частина ланцюга лежить у площині, перпендикулярній рисунку, тому не показана. У цій же площині створюють магнітний потік котушки статора. У ГД цей потік частково замикається полюсними наконечниками ротора, і постійний магніт його «бачить» слабо. Тому на відміну від двигунів постійного струму, магніт ГД неможливо розмагнітити.

Величина зазору між зубцями ротора і статора невелика – 0,1 мм. Це вимагає високої точності при збірці, тому кроковий двигун не варто розбирати ради задоволення цікавості, інакше на цьому його термін служби може закінчитися.

Щоб магнітний потік не замикався через вал, який проходить у середині магніта, його виготовляють з немагнітних марок сталі. Вони зазвичай володіють підвищеною крихкістю, тому з валом, особливо малого діаметру, слід поводитися з обережністю.

Для отримання великих моментів необхідно збільшувати як поле, що створюється статором, так і поле постійного магніта. При цьому потрібний більший діаметр ротора, що погіршує відношення крутильного моменту до моменту інерції. Тому могутні крокові двигуни іноді конструктивно виконують з декількох секцій у вигляді етажерки. Крутильний момент і момент інерції збільшуються пропорційно кількості секцій, а їх відношення не погіршується.

Гібридні КД є основним типом КД, що використовуються в даний час. Більшість сучасних КД є гібридними. По суті, ГД – це двигун з постійними магнітами, але з великим числом полюсів. Найчастіше на практиці двигуни мають 100 або 200 кроків на оборот, відповідно крок рівний $3,6^{\circ}$ або $1,8^{\circ}$. Якщо при цьому врахувати, що, використовуючи спеціальні контролери, можна працювати в так званому напівкроковому режимі, то цей кут удвічі менший.

Залежно від конфігурації обмоток статора двигуни діляться на біполярні та уніполярні (рис. 8.8).

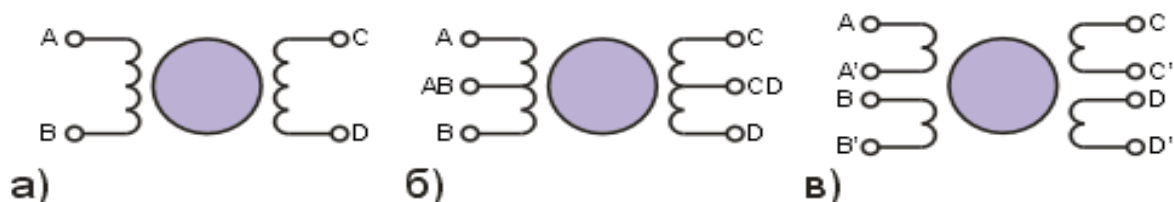


Рис. 8.8. Біполярний (а), уніполярний (б) і чотирьохобмотувальний (в) двигуни

Біполярний двигун має одну обмотку в кожній фазі, яка для зміни напрямку магнітного поля повинна перемикатися спеціальним комутуючим пристроєм – драйвером. Для такого типу двигуна потрібний мостовий драйвер або напівмостовий з двополярним живленням. Біполярний двигун має дві обмотки і, відповідно, чотири виводи.

Уніполярний двигун також має одну обмотку в кожній фазі, але від середини обмотки зроблено відведення. Це дозволяє змінювати напрям магнітного поля, що створюється обмоткою, простим перемиканням половинок обмотки. При цьому істотно спрощується схема драйвера. Драйвер повинен мати тільки 4 простих ключі.

Таким чином, слід зазначити, що в уніполярному двигуні використовується інший спосіб зміни напрямку магнітного поля. Середні виводи обмоток можуть бути об'єднані всередині двигуна, тому такий двигун може мати 5 або 6 виводів. Іноді уніполярні двигуни мають роздільні 4 обмотки, з цієї причини їх помилково називають 4-фазними двигунами. Кожна обмотка має окремі виводи, тому всього виводів 8. При відповідному з'єднанні обмоток такий двигун можна використовувати як уніполярний або біполярний. Уніполярний двигун з двома обмотками і відведеннями теж можна застосовувати в біполярному режимі, якщо відведення залишити непідключеними. У будь-якому випадку струм обмоток слід вибирати так, щоб не перевищити максимальної розсіюваної потужності.

Біполярний двигун має вищу питому потужність, ніж уніполярний. При одних і тих же розмірах біполярні двигуни забезпечують більший момент. Момент, що створюється кроковим двигуном, пропорційний величині магнітного поля, створюваного обмотками статора.

Спосіб підвищення магнітного поля – це збільшення струму або числа витків обмоток. Природним обмеженням при підвищенні струму обмоток є небезпека насичення залізного сердечника. Але на практиці це обмеження діє рідко. Істотнішим є обмеження щодо нагрівання двигу-

на внаслідок омичних втрат в обмотках. Якраз цей факт і демонструє одна з переваг біполярних двигунів.

В уніполярному двигуні в кожен момент часу використовується лише половина обмоток. Інша половина просто займає місце у вікні сердечника, що змушує робити обмотки дротом меншого діаметру. У біполярному двигуні завжди працюють усі обмотки, тобто їх використання оптимальне. У такому двигуні перетин окремих обмоток удвічі більший, а омичний опір – удвічі менший. Це дозволяє збільшити струм у корінь у два рази при тих же втратах, що дає вигреш у моменті приблизно 40 %. Якщо ж підвищеного моменту не вимагається, уніполярний двигун дозволяє зменшити габарити або просто працювати з меншими втратами.

На практиці все ж таки частіше застосовують уніполярні двигуни, оскільки вони вимагають значно простіших схем управління обмотками. Це важливо, якщо драйвери виконані на дискретних компонентах. У даний час існують спеціалізовані мікросхеми драйверів для біполярних двигунів, з використанням яких драйвер виходить не складніше, ніж для уніполярного.

Існує декілька режимів роботи і, відповідно, способів управління фазами крокового двигуна. Особливістю дискретного електроприводу з КД є можливість тривалої роботи при частоті вхідних імпульсів управління $f_y = 0$. Такий режим роботи, що отримав назву *статичного*, передбачає проходження постійного струму по обмотках статора, які створюють нерухоме магнітне поле.

Стартстопний режим (режим відробітку одиничних кроків) має місце при такій частоті управляючих сигналів, при якій перехідний процес, викликаний управляючим імпульсом, закінчується до моменту надходження наступного імпульсу. Це означає, що ротор двигуна переміщається на один кутовий крок і встигає загальмуватися. Даний процес супроводжується перехідними процесами в обмотках КД унаслідок комутації напруги і дії електромагнітного моменту на ротор двигуна. Рух ротора в кінці кроку характеризується тим, що щодо положення стійкої рівноваги з'являються коливання. Вони затухають, коли кінетична енергія ротора буде витрачена на електричні, магнітні і механічні втрати. Такі коливання є небажаними, тому розроблені різні прийоми їх гасіння.

Сталій режим обертання має місце при постійній частоті управляючих імпульсів f_y . Швидкість обертання ротора при цьому визначається

ся виразом $\omega = 2\pi f_y / Zn$, де Z – число пар полюсів, n – число тактів комутації. Електромагнітний момент, що виникає в результаті взаємодії полів ротора і статора, врівноважуючи моменти зовнішніх сил, істотним чином залежать від прийнятого способу комутації (збудження) обмоток статора КД і подачі імпульсів. При побудові схеми управління роботою КД використовують декілька способів.

Перший спосіб забезпечується попеременною комутацією фаз, при цьому вони не перекриваються, і в певний момент часу включена тільки одна фаза (рис. 8.9-а). Цей спосіб в літературі називають one phase on full step, або wave drive mode. Точки рівноваги ротора для кожного кроку співпадають з «природними» точками рівноваги ротора у двигуна, який не живиться. Недоліком способу управління є те, що для біполярного двигуна в один і той же момент часу використовується 50 % обмоток, а для уніполярного – 25 %. Це означає, що в такому режимі не може бути отриманий повний момент.

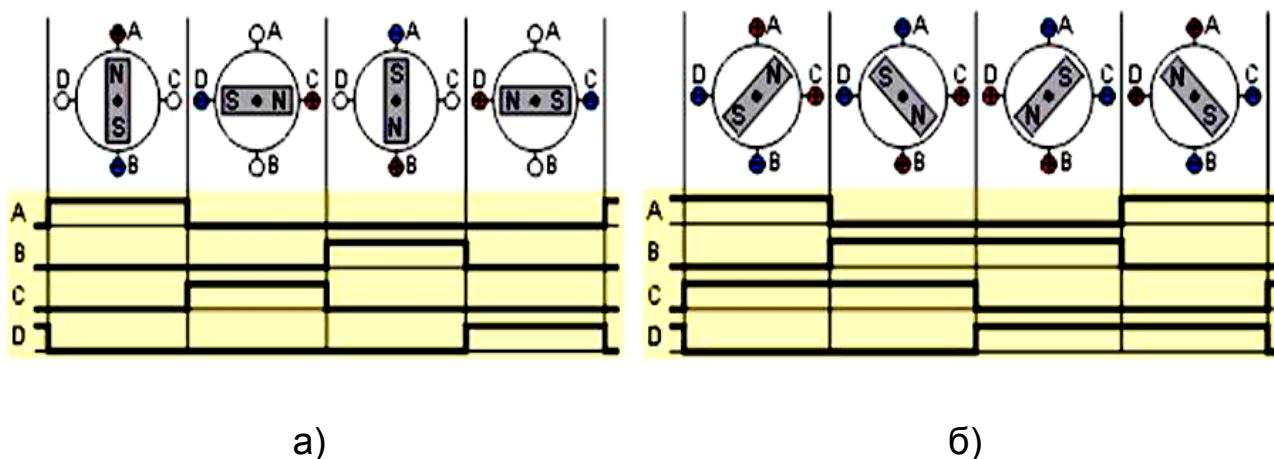


Рис. 8.9. Положення ротора КД і напруга, що подається на обмотки статора, в повнокрокових режимах управління з включенням однієї фази (а) і з включенням двох фаз (б)

Другий спосіб – управління фазами з перекриттям, тобто коли дві фази включено в один час. Його називають two-phase-on full step (рис. 3.9-б). При цьому способі управління ротор фіксується в проміжних позиціях між полюсами статора і забезпечується приблизно на 40 % більший момент, ніж у разі однієї включеної фази. Цей спосіб управління забезпечує такий же кут кроку, як і перший спосіб, але положення точок рівноваги ротора зміщене на півкроку.

Третій спосіб є комбінацією перших двох і називається напівкроковим режимом, або *one and two-phase-on half step*, коли двигун робить крок в половину основного (рис. 8.10).

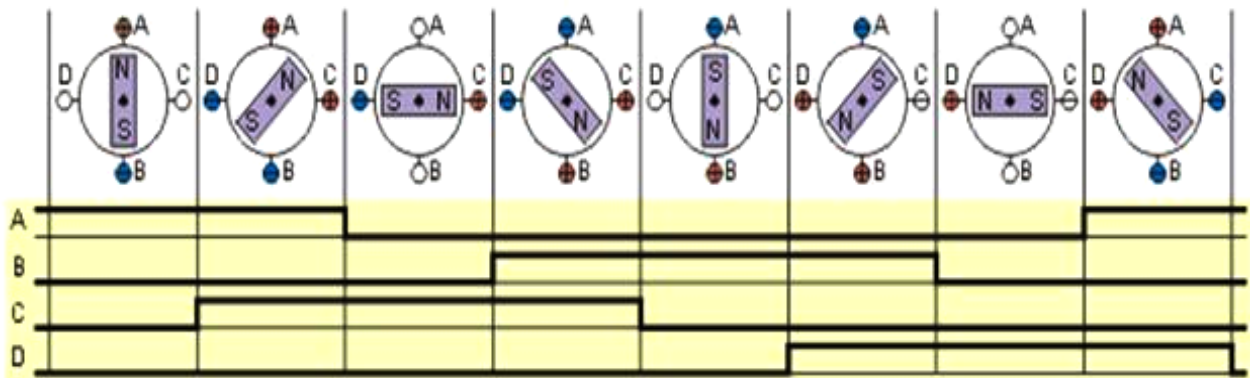


Рис. 8.10. Положення ротора КД і напруга, що подається на обмотки статора, в напівкроковому режимі управління

Цей метод управління достатньо поширений, оскільки двигун з меншим кроком коштує дорожче і дуже пригодно отримати від 100-крокового двигуна 200 кроків на оборот. Кожен другий крок живить лише одна фаза, а в решті випадків живлять дві. У результаті кутове переміщення ротора складає половину кута кроку для перших двох способів управління. Окрім зменшення розміру кроку, цей спосіб управління дозволяє частково позбавитися від явища резонансу. Напівкроковий режим зазвичай не дозволяє отримати повний момент, але найбільш досконалі драйвери реалізують модифікований напівкроковий режим, у якому двигун забезпечує повний момент, при цьому розсіювана потужність не перевищує номінальної.

Ще один спосіб управління називається мікрокроковим режимом, або *micro stepping mode*. При цьому способі управління струм у фазах потрібно змінювати невеликими кроками, забезпечуючи, таким чином, дроблення половинного кроку на ще менші мікрокроки. Коли одночасно включено дві фази, але їх струми не рівні, то положення рівноваги ротора лежатиме не в середині кроку, а в іншому місці, що визначається співвідношенням струмів фаз. Змінюючи це співвідношення, можна забезпечити деяку кількість мікрокроків усередині одного кроку.

Окрім збільшення роздільної здатності, мікрокроковий режим має й інші переваги, які будуть описані далі. Разом з тим для реалізації мікрок-

рокового режиму потрібні значно складніші драйвери, які дозволяють задавати струм в обмотках з необхідною дискретністю. Напівкроковий режим є окремим випадком мікрокрокового режиму, але він не вимагає формування ступінчастого струму живлення котушок, тому часто реалізується.

У повнокроковому режимі з двома включеними фазами положення точок рівноваги ротора зміщені на півкроку. Ці положення ротор приймає при роботі двигуна, але положення ротора не може зберігатися незмінним після виключення струму обмоток. Тому при включенні й виключенні живлення двигуна ротор зміщуватиметься на півкроку. Щоб він не зміщувався при зупинці, необхідно подавати в обмотки струм утримання. Те ж справедливо і для напівкрокового, і мікрокрокового режимів.

Відзначимо, що якщо у вимкненому стані ротор двигуна повертався, то при включенні живлення можливий зсув ротора і на більшу, ніж половина кроку, величину. Струм утримання може бути менше номінального, оскільки від двигуна з нерухомим ротором зазвичай не вимагається великого моменту. Проте є застосування, коли в зупиненому стані двигун повинен забезпечувати повний момент, що для КД можливо. Ця властивість КД дозволяє в таких ситуаціях обходитися без механічних гальмівних систем.

Оскільки сучасні драйвери дозволяють регулювати струм живлення обмоток двигуна, завдання необхідного струму утримання не становить проблем. Завдання зазвичай полягає у відповідній програмній підтримці для управляючого мікроконтролера.

Розглянемо детальніше напівкроковий і мікрокроковий режими роботи КД. Основним принципом роботи КД є створення магнітного поля, що обертається і примушує ротор повертатися. Магнітне поле, що обертається, створюється статором, обмотки якого відповідним чином збуджуються (отримують живильну напругу).

Для двигуна, у якого живить одна обмотка, залежність статичного моменту від кута повороту ротора щодо точки рівноваги (кута розузгодження між полем статора і ротором) є приблизно синусоїдальною. Реально характер залежності може бути дещо інший, що пояснюється не ідеальністю геометрії ротора і статора. Пікове значення моменту називається моментом утримання. Залежність моменту від кута повороту ротора має вигляд: $T = - Th \cdot \sin((\pi/2)/S) \cdot \Phi$, де T – момент, Th – момент утримання, S – кут кроку, Φ – кут повороту ротора. Якщо до ротора прикласти

зовнішній момент, що перевищує момент утримання, ротор повернеться. Якщо зовнішній момент не перевищує моменту утримання, то ротор знаходитиметься в рівновазі в межах кута кроку.

Відзначимо, що у знеструмленого двигуна момент утримання не рівний нулю внаслідок дії постійних магнітів ротора. Цей момент зазвичай складає близько 10 % максимального моменту, що забезпечується двигуном.

Іноді використовують терміни «механічний кут повороту ротора» і «електричний кут повороту ротора». Механічний кут обчислюється виходячи з того, що повний оборот ротора складає 2π радіан. При обчисленні електричного кута приймається, що один оборот відповідає одному періоду кутової залежності моменту. Для наведеної вище формули Φ є механічним кутом повороту ротора, а електричний кут для двигуна, що має 4 кроки на періоді кривої моменту, рівний $((\pi/2)/S)\Phi$, або $(N/4)\Phi$, де N – кількість кроків на оборот.

Електричний кут фактично визначає кут повороту магнітного поля статора і дозволяє будувати теорію незалежно від числа кроків на оборот для конкретного двигуна.

Якщо жити одночасно дві обмотки двигуна, то момент буде рівний сумі моментів, що забезпечуються обмотками окремо. При цьому якщо струми в обмотках однакові, то точка максимуму моменту буде зміщена на половину кроку. На половину кроку зміститься і точка рівноваги ротора. Цей факт і покладений в основу реалізації напівкрокового режиму. Пікове значення моменту (момент утримання) при цьому буде в $\sqrt{2}$ більше, ніж при одній обмотці $Th2 = \sqrt{2}Th1$, де Th – момент утримання при двох обмотках, що живляться, $Th1$ – момент утримання при одній обмотці, що живить.

Саме цей момент зазвичай і вказується в характеристиках крокового двигуна.

Порівняно з повнокроковим, напівкроковий режим має такі переваги: вища роздільна здатність без застосування дорожчих двигунів, менші проблеми з явищем резонансу. Резонанс призводить лише до часткової втрати моменту, що зазвичай не заважає нормальній роботі приводу. Недоліком напівкрокового режиму є досить значне коливання моменту від кроку до кроку. У тих положеннях ротора, коли живить одна фаза, момент складає приблизно 70 % від повного, коли живлять дві фази. Ці

коливання можуть з'явитися причиною підвищених вібрацій і шуму, хоча вони все одно залишаються меншими, ніж у повнокроковому режимі.

Способом усунення коливань моменту є підняття моменту в положеннях з однією включеною фазою і забезпечення таким чином однакового моменту у всіх положеннях ротора. Це може бути досягнуто шляхом імпульсного форсування, тобто короткочасної подачі на фазу КД імпульсу підвищеної напруги (збільшення струму в цих положеннях до рівня приблизно 141 % від номінального). Деякі драйвери, такі як, PBL 3717/2 і PBL 3770A фірми Ericsson, мають логічні входи для зміни величини струму.

Потрібно відзначити, що величина 141 % є теоретичною, тому в додатках, що вимагають високої точності підтримки моменту, вона повинна бути підібрана експериментально для конкретної швидкості і конкретного двигуна. Оскільки струм піднімається тільки в ті моменти, коли включена одна фаза, розсіювана потужність рівна потужності в повнокроковому режимі при струмі 100 % від номінального. Проте таке збільшення струму вимагає вищої напруги живлення, що не завжди можливо. Але є й інший підхід.

Для усунення коливань моменту при роботі двигуна в напівкроковому режимі можна знижувати струм в ті моменти, коли включено дві фази.

Для отримання постійного моменту цей струм повинен складати 70,7 % від номінального. Таким чином реалізує напівкроковий режим, наприклад, мікросхема драйвера A3955 фірми Allegro.

Для напівкрокового режиму дуже важливим є перехід у стан з однією вимкненою фазою. Щоб змусити ротор прийняти відповідне положення, струм у відключеній фазі повинен бути зменшений до нуля щонайшвидше. Тривалість спаду струму залежить від напруги на обмотці в той час, коли вона втрачає свою запасену енергію. Замикаючи в цей час обмотку на джерело живлення, яке становить максимальну напругу, наявну в системі, забезпечується максимально швидкий спад струму.

Для отримання швидкого спаду струму при живленні обмоток двигуна Н-мостом усі транзистори повинні закриватися, при цьому обмотка через діоди виявляється підключеною до джерела живлення. Швидкість спаду струму значно зменшиться, якщо один транзистор моста залишити відкритим і замкнати обмотку на транзистор та діод. Для збільшення швидкості спаду струму при управлінні уніполярними двигунами придуд-

шення викидів ЕДС самоіндукції переважно слід здійснювати не діодами, а варисторами або комбінацією діодів і стабілітрона, які обмежать викид на більшому, але безпечнішому для транзисторів рівні.

Мікрокроковий режим забезпечується шляхом отримання поля статора, що обертається плавніше, ніж в повно- або напівкроковому режимах. У результаті забезпечуються менші вібрації і практично безшумна робота аж до нульової частоти. До того ж менший кут кроку здатний забезпечити точніше позиціонування.

Існує багато різних мікрокрокових режимів з величиною кроку від $1/3$ повного кроку до $1/32$ і навіть менше. Кроковий двигун є синхронним електродвигуном. Це означає, що положення рівноваги нерухомого ротора співпадає з напрямом магнітного поля статора. При повороті поля статора ротор теж повертається, прагнучи зайняти нове положення рівноваги. Щоб отримати потрібний напрям магнітного поля, необхідно вибрати не тільки правильний напрям струмів у котушках, а й правильне співвідношення цих струмів.

Якщо одночасно живлять дві обмотки двигуна, але струми в цих обмотках не рівні, то результуючий момент буде $Th = (a^2 + b^2)^{0,5}$, а точка рівноваги ротора зміститься в точку $x = (S / (\pi/2)) \arctan(b/a)$, де a і b – момент, що створюється першою і другою фазою відповідно, Th – результуючий момент утримання, x – положення рівноваги ротора в радіанах, S – кут кроку в радіанах. Зсув точки рівноваги ротора говорить про те, що ротор можна зафіксувати в будь-якій довільній позиції. Для цього потрібно правильно встановити відношення струмів у фазах. Цей факт і використовується при реалізації мікрокрокового режиму.

У межі кроковий двигун може працювати як синхронний електродвигун у режимі безперервного обертання. Для цього струми його фаз повинні бути синусоїдальними, зрушеними один щодо одного на 90° .

Результатом використання мікрокрокового режиму є набагато плавніше обертання ротора на низьких частотах. На частотах у 2 – 3 рази вище за власну резонансну частоту ротора і навантаження мікрокроковий режим дає незначні переваги порівняно з напів- або повнокроковим режимами. Причиною цього є дія інерції ротора і навантаження, що фільтрує. Система з кроковим двигуном працює подібно до фільтру нижніх частот. У мікрокроковому режимі можна здійснювати тільки розгін і гальмування, а в основний час працювати в повнокроковому режимі. До того ж для досягнення високих швидкостей у мікрокроковому режимі по-

трібно дуже висока частота повторення мікрокроків, яку не завжди може забезпечити управляючий мікроконтролер.

Для запобігання перехідним процесам і втраті кроків перемикання режимів роботи двигуна (з мікрокрокового режиму в повнокроковий тощо) необхідно проводити в ті моменти, коли ротор знаходиться в положенні, що відповідає одній включеній фазі. Деякі мікросхеми драйверів мікрокрокового режиму мають спеціальний сигнал, який інформує про таке положення ротора. Наприклад, це драйвер A3955 фірми Allegro.

У багатьох застосуваннях, де потрібні малі відносні переміщення і висока роздільна здатність, мікрокроковий режим має можливість замінити механічний редуктор. Часто простота системи є вирішальним чинником, навіть якщо при цьому доведеться застосувати двигун великих габаритів. Незважаючи на те, який драйвер, який забезпечує мікрокроковий режим, набагато складніший ніж звичайний драйвер, усе одно система може опинитися більш простою і дешевою, ніж кроковий двигун плюс редуктор. Сучасні мікроконтролери іноді мають вбудовані ЦАП, які можна використовувати для реалізації мікрокрокового режиму замість спеціальних контролерів. Це дозволяє зробити практично однаковою вартість устаткування для повнокрокового і мікрокрокового режимів.

Іноді мікрокроковий режим використовується для збільшення точності величини кроку понад заявлену виробником двигуна. При цьому застосовується номінальне число кроків. Для підвищення точності використовується корекція положення ротора в точках рівноваги.

На практиці при здійсненні кожного кроку ротор не відразу зупиняється в новому положенні рівноваги, а здійснює затухаючі коливання навколо положення рівноваги. Час встановлення залежить від характеристик навантаження і схеми драйвера. У багатьох застосуваннях такі коливання є небажаними. Позбавитися від цього явища можна шляхом використання мікрокрокового режиму.

На практиці існують деякі чинники, що обмежують точність роботи приводу в мікрокроковому режимі. Деякі з них відносяться до драйвера, а деякі безпосередньо до двигуна. Через ці обмеження мікрокроковий режим використовується в основному для забезпечення плавного обертання, особливо на дуже низьких швидкостях, для усунення шуму і явища резонансу. Мікрокроковий режим також здатний зменшити час встановлення механічної системи, оскільки на відміну від повнокрокового режиму відсутні викиди та осциляції. Проте в більшості випадків для звичай-

них двигунів не можна гарантувати точного позиціонування в мікрокроковому режимі. Синусоїдальний струм фаз може бути забезпечений застосуванням спеціальних драйверів. Деякі з них, наприклад A3955, A3957 фірми Allegro, вже містять ЦАП і вимагають від мікроконтролера тільки цифрових кодів. Інші ж, такі, як L6506, L298 фірми SGS-Thomson, вимагають зовнішньої опорної напруги синусоїдальної форми, яку повинен формувати мікроконтролер за допомогою ЦАП.

Момент, що створюється кроковим двигуном, залежить від декількох чинників: швидкості, струму в обмотках, схеми драйвера. Залежність моменту від кута повороту ротора в ідеального КД синусоїдальна.

Якщо до валу двигуна прикласти зовнішній момент, менший ніж момент утримання, то кутове положення ротора зміниться на деякий кут $\Phi = (N/(2\pi))x\sin(Ta/Th)$, де Φ – кутовий зсув, N – кількість кроків двигуна на оборот, Ta – зовнішній прикладений момент, Th – момент утримання. Кутовий зсув Φ є помилкою позиціонування навантаженого двигуна. Якщо до валу двигуна прикласти момент, що перевищує момент утримання, то під дією цього моменту вал повернеться. У такому режимі положення ротора є неконтрольованим. На практиці завжди є прикладений до двигуна зовнішній момент, хоча б тому, що двигуну доводиться долати тертя. Тертя знижує момент на валу двигуна, і з'являються мертві зони навколо кожного положення рівноваги ротора. Мертві зони обмежують точність позиціонування. Наприклад, наявність статичного тертя в половину від пікового моменту двигуна з кроком 90° викличе наявність мертвих зон у 60° . Це означає, що крок двигуна може коливатися від 30° до 150° залежно від того, в якій точці мертвої зони зупиниться ротор після чергового кроку. Наявність мертвих зон є дуже важливою для мікрокрокового режиму. Якщо, наприклад, є мертві зони величиною d , то мікрокрок величиною менше d не зрушить ротор з місця. Тому для систем з використанням мікрокроків дуже важливо мінімізувати тертя спокою.

Кожного разу, коли кроковий двигун здійснює крок, ротор повертається на S радіан. При цьому мінімальний момент має в місці, коли ротор знаходиться рівно між сусідніми положеннями рівноваги. Цей момент називають робочим моментом, він означає, який найбільший момент може долати двигун при обертанні з малою швидкістю. При синусоїдальній залежності моменту від кута повороту ротора, цей момент $Tr = Th/(20,5)$. Якщо двигун робить крок з двома обмотками, що живлять, то робочий момент рівний моменту утримання для однієї обмотки, що живить.

Параметри приводу на основі крокового двигуна сильно залежать від характеристик навантаження. Окрім тертя, реальне навантаження володіє інерцією. Інерція перешкоджає зміні швидкості. Інерційне навантаження, з одного боку, вимагає від двигуна великих моментів на розгоні і гальмуванні, обмежуючи максимальне прискорення. З іншого боку, збільшення інерційності навантаження збільшує стабільність швидкості.

Такий параметр крокового двигуна, як залежність моменту від швидкості, є найважливішим при виборі типу двигуна, методу управління фазами і схеми драйвера. Відзначимо, що схема драйвера значною мірою впливає на хід кривий «момент–швидкість».

При розгоні двигун проходить ряд швидкостей, при цьому на одній з них можна зіткнутися з неприємним явищем резонансу. Для нормального розгону бажано мати навантаження, момент інерції якого як мінімум рівний моменту інерції ротора. На ненавантаженому двигуні явище резонансу виявляється найсильніше. При здійсненні розгону або гальмуванні важливо правильно вибрати закон зміни швидкості й максимальне прискорення повинне бути тим менше, чим вище інерційність навантаження. Критерій правильного вибору режиму розгону – це здійснення розгону до потрібної швидкості для конкретного навантаження за мінімальний час. На практиці найчастіше застосовують розгін і гальмування з постійним прискоренням. Реалізація закону, за яким буде проводиться прискорення або гальмування двигуна, зазвичай проводиться програмно управляючим мікроконтролером, оскільки сам мікроконтролер зазвичай є джерелом тактової частоти для драйвера крокового двигуна.

Кроковим двигунам властивий небажаний ефект – резонанс. Ефект виявляється у вигляді раптового падіння моменту на деяких швидкостях. Це може призвести до пропуску кроків і втрати синхронності. Ефект виявляється в тому випадку, якщо частота кроків співпадає з власною резонансною частотою ротора двигуна. Коли двигун здійснює крок, ротор не відразу встановлюється в нову позицію, а здійснює затухаючі коливання. Зважаючи на складну конфігурацію магнітного поля, резонансна частота ротора залежить від амплітуди коливань. При зменшенні амплітуди частота зростає, наближаючись до малоамплітудної частоти, яка простіше обчислюється кількісно. На практиці ефект резонансу призводить до труднощів при роботі на частоті, близькій до резонансної. Момент на частоті резонансу рівний нулю і без вживання спеціальних заходів кроковий двигун не може при розгоні пройти резонансну частоту.

У будь-якому випадку явище резонансу здатне істотно погіршити точнісні характеристики приводу. У системах з низьким демпфуванням існує небезпека втрати кроків або підвищення шуму, коли двигун працює поблизу резонансної частоти. У деяких випадках проблеми можуть виникати і на гармоніках частоти основного резонансу. Коли використовується не мікрокроковий режим, основною причиною появи коливань є переривисте обертання ротора. У мікрокроковому режимі явище резонансу практично непомітне.

Для боротьби з резонансом можна використовувати різні методи. Наприклад, застосування еластичних матеріалів при виконанні механічних муфт зв'язку з навантаженням. Еластичний матеріал сприяє поглинанню енергії в резонансній системі, що приводить до загасання паразитних коливань.

Іншим способом є застосування в'язкого тертя. Випускаються спеціальні демпфери, де всередині порожнистого циліндра, заповненого в'язким кремнієорганічним мастилом, може обертатися металевий диск. При обертанні цієї системи з прискоренням диск випробовує в'язке тертя, що ефективно демпфує систему. Існують електричні методи боротьби з резонансом. Ротор, що коливається, приводить до виникнення в обмотках статора ЕРС. Якщо закортити обмотки, які на даному кроці не використовуються, це приведе до демпфування резонансу. І, нарешті, існують методи боротьби з резонансом на рівні алгоритму роботи драйвера. Якщо це можливо, при старті і зупинці потрібно використовувати частоти вище резонансної. Збільшення моменту інерції системи ротор навантаження зменшує резонансну частоту. Проте найефективнішою мірою для боротьби з резонансом є застосування мікрокрокового режиму.

8.3. Управління асинхронними електричними двигунами поліграфічного обладнання при застосуванні мікроконтролерів

8.3.1. Початкові відомості про асинхронні двигуни і прості способи управління ними в електроприводах

Для поліграфічного устаткування, як наголошувалося раніше, важливі електроприводи, які забезпечують достатньо точне позиціонування робочих органів. Проте разом з цим у поліграфічному устаткуванні широко застосовуються приводи, що виконують на різних стадіях процесу

друку протягом тривалого часу вирішення різних «силових», що вимагають великих витрат енергії, завдань і забезпечують допоміжні технологічні операції «силового» характеру.

У даний час більшість приводів систем нагріву, сушки фарби, вентиляції та кондиціонування повітря і таких механізмів, як насоси, компресори, підйомники, використовують асинхронні двигуни (АД). Інша сфера використання електроприводів, де асинхронні двигуни є найбільш масовим електричним двигуном, пов'язана з транспортерами і намотувально-розмотувальними вузлами, зокрема друкарських машин.

Широке використання асинхронних двигунів для названих промислових застосувань обумовлене їх високою витривалістю, надійністю, низькою вартістю і високим ККД (80 %).

Відзначимо й ту обставину, що велика частка споживаної електроенергії в устаткуванні друку припадає на двигуни змінного струму, що виконують «силові» функції, серед яких значну частину складають могутні АД. З метою охорони навколишнього середовища і зниження ефекту випромінювання парникових газів уряди по всьому світу вводять правила, що вимагають від виробників електроустаткування випускати продукцію, що більш економічно витрачає електроенергію. Тому економія електроенергії, підвищення ККД робочих механізмів, зниження експлуатаційних витрат – це ті чинники ефективності, на які звертають увагу в даний час при використанні електроприводів в устаткуванні друку.

Високих показників устаткування можна досягти за рахунок ефективного управління електродвигуном, зокрема його швидкістю. Проте традиційні АД при безпосередньому підключенні до мережі змінної напруги здатні працювати тільки на номінальній швидкості при одній частоті обертання ротора. Це стало причиною того, що багато виробників для сучасного устаткування почали розробляти економічні пристрої для регулювання частоти обертання асинхронних електродвигунів.

З появою могутніх, тобто «силових», польових і біполярних транзисторів з ізолюваним затвором, здатних комутувати великі струми за короткий час, з введенням мікроконтролерного управління з'явилася можливість практично здійснити регулювання швидкості електродвигуна відповідно до раніше розроблених теоретичних методів, що дають велику економію енергії. В устаткуванні почали використовувати економічні і недорогі регульовані електроприводи, які мають знижені споживану потужність, акустичні шуми та механічну вібрацію.

Тривалий час потреба в керованому, економічному і регульованому електроприводі забезпечувалася за рахунок електроприводу постійного струму. Удосконалення його характеристик продовжується в даний час. Проте останнім часом широко розвивається регульований електропривід на базі асинхронних короткозамкнутих двигунів. Самі асинхронні двигуни відрізняються, перш за все, простотою конструкції, економічністю, відносно малою вартістю, надійністю в роботі. Вони протягом тривалого часу здатні працювати без значних втрат енергії, без перегріву двигуна.

Через свої конструктивні особливості асинхронна машина позбавлена ряду недоліків, властивих двигунам інших конструкцій. Зокрема, відсутність колектора і щіток в асинхронному короткозамкнутому двигуні обумовлює велику граничну потужність, високі швидкості обертання, хороші масогабаритні показники, велику перевантажувальну здатність, а також високу допустиму швидкість зміни моменту. Використання електронних систем, у яких забезпечується достатньо висока швидкодія, надійність і високі енергетичні характеристики приводу, дозволяє найповніше реалізувати методи управління швидкістю і навантаженням (моментом) на валу двигуна, обумовлює широке використання саме АД у сучасному устаткуванні з автоматизованим регульованим електроприводом.

У зв'язку з революційними змінами у перетворювальній техніці, що базуються на використанні могутніх польових транзисторів і біполярних транзисторів з ізольованим затвором, на значному збільшенні швидкодії напівпровідникових перетворювачів, у зв'язку з повсюдним розвитком комп'ютерних технологій істотно змінилися підходи до створення могутніх електроприводів.

Відмітною особливістю сучасного етапу розвитку електроприводів стало використання в електроприводах з асинхронними двигунами силових напівпровідникових перетворювачів електроенергії, що дозволяє підвищити ККД приводу, зменшити його масу і габарити, реалізувати в ньому мікроконтролерне управління.

Нагадаємо, що дія асинхронного двигуна заснована на використанні магнітного поля, що обертається. У простому випадку таке поле може бути отримане шляхом обертання підковоподібного магніта. При обертанні магніту поле буде безперервно повертатися й індукувати в циліндрі, що знаходиться між полюсами, електрорушійну силу (ЕРС) і, отже, вихрові струми. Взаємодія цих струмів з полем, що обертається, ви-

кличе появу електромагнітних сил, які приведуть циліндр в обертання відповідно до відомого закону Ленца.

У реальних асинхронних двигунів магнітне поле створюється системою, що складається з трьох нерухомих котушок, площини яких повернені у просторі щодо один одного на кут 120° і які живляться струмами, в яких початкові фази відрізняються на 120° .

При пропусканні по обмотках котушок, наприклад, синусоїдальних струмів, створюється кругове магнітне поле, що обертається, в якого вектор магнітної індукції, не змінюючись по модулю, обертається у просторі з постійною кутовою частотою. Для отримання поля, що обертається, необхідно три однакові фазні обмотки розташувати на статорі так, щоб кути між їх осями були рівні 120° .

Якщо фазні обмотки з'єднати зіркою і підключити до трифазної мережі живлення, то струми фазних обмоток створюють магнітні поля $B_A = B_m \sin \omega t$, $B_B = B_m \sin(\omega t - 120^\circ)$, $B_C = B_m \sin(\omega t - 240^\circ)$. Сума векторів цих магнітних індукцій утворює магнітну індукцію поля статора. Магнітне поле статора обертається у площині осей котушок за годинниковою стрілкою з кутовою швидкістю m . Вектор індукції поля послідовно співпадає по напрямку з віссю тієї з фазних обмоток, струм у якій досягає максимального значення, тобто поле обертається в напрямі послідовності фаз трифазної системи струмів у трифазних обмотках.

Щоб змінити напрям обертання магнітного поля статора, досить змінити порядок підключення два будь-яких фазних обмоток.

Основними елементами асинхронного двигуна є статор і ротор. Статор – нерухома частина двигуна, всередині якого розташовані обмотки, зміщені у просторі на кут 120° (рис. 8.11). Зазвичай статор має литий чавунний корпус, усередині якого запресований порожнистий сталевий циліндровий сердечник, зібраний з пластин електротехнічної сталі, ізольованих одна від одної шаром лаку. Сердечник набирають з листів електротехнічної сталі завтовшки 0,5 мм для того, щоб ослабити вихрові струми. На внутрішній поверхні сердечника статора є пази. У них укладають дроти обмоток статора. У пазах на внутрішньому боці статора розміщуються три фазні обмотки. Кожна фазна обмотка містить одну або декілька котушкових груп, сполучених послідовно і розташованих уздовж кола статора на рівній відстані одна від одної.

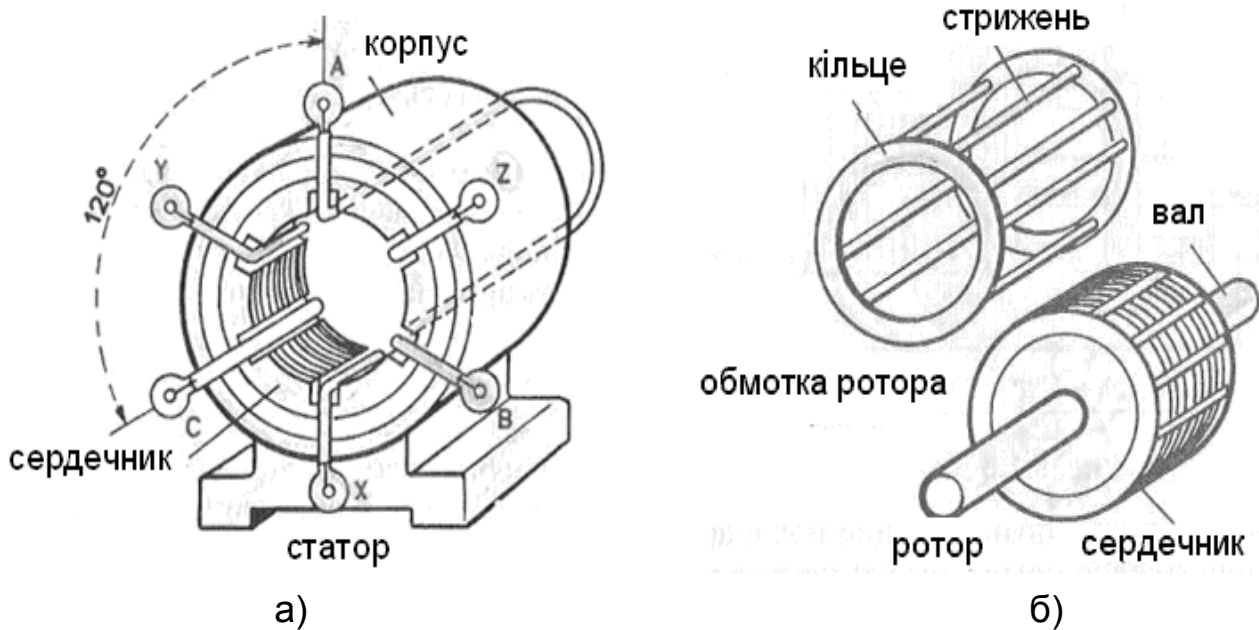


Рис. 8.11. Спрощене зображення статора (а) і ротора (б) асинхронного двигуна

Для укладання багатовиткової котушкової групи в пазах статора її розділяють на q послідовно сполучених секцій по w_c витків у кожній секції. Фазні обмотки з'єднуються зіркою або трикутником і підключаються до трифазної мережі. Струми у фазних обмотках порушують у машині магнітне поле статора, яке обертається, з числом пар полюсів p , рівним числу котушкових груп в одній фазній обмотці. Це досягається взаємним розташуванням фазних обмоток, при якому їх котушкові групи зрушені по колу статора щодо груп сусідньої фазної обмотки на кут $120^\circ/p$. Для простоти на рис. 8.11-а ці обмотки зображені у вигляді трьох одновиткових котушок, площини яких зміщені у просторі на кут 120° щодо одна одної. Початки кожної фази обмотки (котушки) позначають відповідно буквами А, В, С, а кінці – Х, Y, Z. Початки і кінці обмоток статора маркуються буквою з відповідним індексом С1, С2, С3, С4, С5, С6. Ротором асинхронного двигуна є циліндровий сердечник, зібраний з пластин електро-технічної сталі, ізолюваних одна від одної лаком.

Сердечник ротора насаджений на вал, закріплений на підшипниках (рис. 8.11-б). У пазах ротора розташовуються витки обмотки ротора. У більшості АД застосовується короткозамкнутий ротор. На зовнішній поверхні сердечника є пази. У пази укладаються стрижні, які на кінцях з'єднуються з кільцями. Стрижні спільно з торцевими кільцями утворюють

короткозамкнуту обмотку ротора. З цієї причини двигун з таким ротором називають короткозамкнутим асинхронним двигуном.

Обмотка короткозамкнутого ротора виконується у вигляді циліндрової клітки з мідних або алюмінієвих стрижнів, які без ізоляції вставляються в пази сердечника (рис. 8.11-б). Торцеві кінці стрижнів замикаються накоротко кільцями з того ж матеріалу, що і стрижні («біляче колесо»). Часто стрижні обмотки разом із замикаючими кільцями виготовляють шляхом заливки пазів ротора розплавленим алюмінієм.

Короткозамкнутий ротор значно дешевший, і, що дуже істотно, обслуговування двигуна з короткозамкнутим ротором значно простіше.

Таким чином, асинхронний двигун, з погляду електротехніки, є системою підключених до симетричних трифазних джерел напруги трифазних обмоток, одна з яких розташована на нерухомій частині (статорі), інша – на частині, що обертається (роторі). Момент АД утворюється в результаті взаємодії струмів у цих обмотках. Трифазна обмотка статора підключається до живильної мережі, трифазна обмотка ротора замкнута. Обмотки статора і ротора магнітозв'язані, тому потокозчеплення обмотки статора визначається як струмами, що протікають по трьох фазах обмотки статора, так і струмами фаз ротора. Це ж відноситься і до обмотки ротора. Струми обмоток статора, підключених до трифазної мережі, порушують у машині *магнітне поле статора, яке обертається* й індукує ЕРС у замкнутій накоротко (або пусковими реостатами) обмотці ротора. Струми ротора, що виникають під дією ЕДС, порушують *магнітне поле ротора, яке обертається*. Частота і напрям обертання цих полів однакові, що обумовлює результуюче обертальне магнітне поле, яке називають *робочим полем* машини.

У короткозамкнутій обмотці ротора під дією ЕРС, яка викликається обертовим полем статора, виникають вихрові струми. Взаємодіючи з полем, вони залучають ротор до обертання зі швидкістю ω , що принципово менша ніж швидкість обертання поля ω_0 . Звідси назва двигуна – асинхронний. При цьому є очевидним, що має місце нерівність швидкостей магнітного поля і ротора. При $\omega = \omega_0$ обертове магнітне поле не перетинатиме струмопровідних стрижнів ротора і, отже, в них не наводитимуться струми, що беруть участь у створенні обертового моменту. Результуюче магнітне поле обертається з постійною швидкістю. Швидкість обертання магнітного поля прийнято визначати в оборотах за хвилину:

$n_o = 60f/p$. Оскільки частота електричної мережі 50 Гц, то всі асинхронні двигуни мають стандартну шкалу кутових швидкостей (табл. 8.1).

Таблиця 8.1

Стандартна шкала кутових швидкостей асинхронних двигунів

Число пар полюсів, p	1	2	3	4	5
Кутова швидкість поля, 1/с	314	157	104,7	78,5	62,83
Частота обертання поля, об/хв	3000	1500	1000	750	600

Індукований у роторній обмотці струм створює своє магнітне поле з числом полюсів, рівним числу полюсів статора. Поле ротора обертається. Швидкість обертання ротора менше швидкості обертання магнітного поля, через що в роторній обмотці виникає змінна ЕРС, частота якої пропорційна відносній швидкості обертання ротора: $n = sn_{o1} = 60fs/p$.

Величина $s = (\omega_o - \omega)/\omega_o$ називається відносним ковзанням. Для двигунів нормального виконання $s = 0,02 - 0,05$. Тому можна стверджувати, що поля ротора і статора обертаються з однаковою швидкістю й номінальна частота обертання ротора близька до частоти обертання магнітного поля. Залежно від величини ковзання АД може працювати в таких режимах:

1) у режимі двигуна ($0 < s < 1$) він перетворює електричну енергію в механічну. Ротор двигуна повинен обертатися асинхронно повільніше за поле, з такою частотою, при якій струми в обмотці ротора, взаємодіючи з обертовим магнітним полем, яке створюється струмами в обмотках статора, створюють обертовий момент, який врівноважує гальмівний момент від сил тертя і навантаження на валу;

2) у режимі електромагнітного гальма ($s > 1$) ротор двигуна обертається в напрямі, протилежному напрямку обертання магнітного поля, що створюється струмами в обмотках статора. При цьому в машині розсівається значна енергія;

3) у режимі генератора ($s < 0$) двигун перетворює механічну енергію в електричну. Ротор генератора обертається у напрямі обертання магнітного поля, яке створюється струмами в обмотках статора, з частотою більшою, ніж частота обертання поля. Величина струму ротора зале-

жить від механічного навантаження на валу двигуна. Із збільшенням навантаження швидкість обертання ротора сповільнюється, а ковзання збільшується.

Отже, асинхронна машина, як і всі електричні машини, оборотна, тобто в режимі двигуна вона може перетворювати електричну енергію в механічну, а в режимі генератора — механічну в електричну.

Щоб перевести АД з режиму двигуна в режим генератора, необхідно за допомогою зовнішньої механічної сили, прикладеної до валу двигуна, надати ротору частоту обертання, яка перевищує синхронну, тобто потрібно, щоб виконувалася умова $n > n_1$. Тоді ротор обганятиме обертове магнітне поле, а дроти його обмотки перетинатимуть лінії магнітного поля в напрямі, зворотному напрямку перетину при обертанні в режимі двигуна. Унаслідок цього напрями ЕРС і струми в обмотці ротора змінюються на протилежні. У результаті сили взаємодії обертого поля і струмів ротора також змінять свій напрям на зворотний і почнуть протидіяти обертанню ротора. Потужність, що розвивається машиною, в таких випадках негативна, тобто машина не споживає енергію, а віддає її в мережу. При такому режимі ковзання $s = (n_1 - n) / n_1 < 0$. Негативне ковзання — характерна ознака роботи АД у режимі генератора.

Якщо за допомогою зовнішньої механічної сили обертати ротор проти напрямку обертання магнітного поля машини, то у вираз ковзання частота обертання ротора n увійде вже з негативним знаком, а в таких умовах ковзання $s = (n_1 + n) / n_1 > 1$. У цих умовах напрям струму в обмотці ротора не зміниться, а, отже, ротор розвиватиме момент, протидіючий гальмівному моменту, прикладеному до валу машини. Остання отримуватиме механічну енергію, що підводиться з боку валу, й електричну енергію з мережі. Це буде режим електромагнітного *гальма*.

Такий режим застосовується для швидкої зупинки двигуна або в разі застосування АД для гальмування приводного механізму.

Обертальний момент, що розвивається ротором асинхронного двигуна, слід розглядати як суму моментів електромагнітних сил, які діють на кожен провідник роторної обмотки. Електромагнітний момент, що розвивається на валу електродвигуном, залежить від ковзання складним чином. При малих значеннях ковзання обертольний момент ротора пропорційний ковзанню і зростає при збільшенні s , досягаючи максимуму. Далі, при значних величинах ковзання, цей момент зменшується, досягаючи при $s = 1$ величини, рівної пусковому моменту. Відповідно, це

означає, що в момент пуску асинхронного двигуна, коли $s = 1$, пусковий момент не є максимальним. До того ж слід урахувати, що в момент включення двигуна напруга в мережі може зменшуватися на 20 %, і, отже, пусковий момент може складати тільки 64 % від пускового моменту при номінальному навантаженні.

Асинхронний двигун при певній величині ковзання розвиває обертальний максимальний момент. Ковзання, при якому обертальний момент досягає максимального значення, називається критичним.

Максимальний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги і не залежить від активного опору ланцюгу ротора. Максимальний обертальний момент M_{MAX} зазвичай у двигунів з короткозамкнутим ротором перевершує номінальний в 2 – 2,5 рази.

Механічна характеристика, що становить залежність числа оборотів від моменту на валу двигуна, складається з двох ділянок. На дві частини цю характеристику ділить точка максимального моменту.

У верхній частині характеристики, яку називають стійкою, при збільшенні навантаження (протидіючого моменту зовнішніх сил) зростає обертаючий момент, а швидкість обертання валу не надто змінюється. Двигун проявляє «жорсткість» характеристики.

У нижній нестійкій частині характеристики збільшення навантаження викликає різке зменшення обертального моменту і числа оборотів. Врешті-решт двигун може зупинитися.

Звичайний асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором (типу «біляча клітка») володіє малим пусковим моментом. З цієї причини промисловістю випускаються асинхронні двигуни з покращуваними пусковими властивостями. Пускові характеристики АД можуть бути істотно покращені, якщо обмотка ротора має спеціальний пристрій ротора. Ці двигуни відрізняються від двигунів нормального виконання пристроєм короткозамкнутої обмотки ротора (типу подвійна «біляча клітка»).

Зазвичай обмотка ротора складається з двох короткозамкнутих обмоток різного діаметру, що лежать одна на іншій: зовнішньої – пускової і внутрішньої – робочої. Стрижні кліток розміщені відповідно в зовнішній і внутрішній частинах паза. Внутрішня обмотка 2 ротора з подвійною «білячою кліткою» є мідною і має менший активний опір, ніж зовнішня латунна. До того ж зовнішня обмотка має і менше число стрижнів. Таке розташування кліток приводить до значної відмінності їх індуктивностей розсіювання. У внутрішньої клітки індуктивність розсіювання велика,

оскільки стрижні цієї клітки оточені сталлю, яка прорізана лише зверху вузькою щілиною паза. У зовнішньої клітки вона значно менша, оскільки значна частина шляху ліній поля розсіяння навколо стрижнів проходить у повітряному проміжку між ротором та статором з великим магнітним опором і по щілині паза під стрижнями.

У перший момент пуску двигуна частота струмів в обмотці ротора рівна частоті мережі. Таким чином, при пуску двигуна струм у роторі витісняється з внутрішньої «білячої клітки». Повний опір зовнішньої клітки визначається переважно її активним опором. У міру розгону ротора частота струмів у ньому зменшується і разом з тим зменшується вплив індуктивного опору на розподіл струмів. Струм зовнішньої клітки буде менше струму внутрішньої клітки, активний і повний опори якої в таких умовах малі, як у звичайного двигуна з короткозамкнутим ротором. При номінальному навантаженні струм у внутрішній обмотці значно більше, ніж у зовнішній. Це і створює головний обертальний момент, тому внутрішню обмотку часто називають робочою обмоткою.

У результаті взаємодії струму ротора і поля статора, який обертається зі швидкістю ω_0 , створюється електромагнітний момент M . Потужність на валу двигуна, без урахування механічних втрат, визначатиметься співвідношенням $P = M\omega_0$. Асинхронний двигун для мережі є активно-індуктивним навантаженням. Тому струм цього двигуна завжди відстає по фазі від напруги мережі, і коефіцієнт потужності двигуна менше одиниці. Реактивні складові повного струму двигунів (реактивний струм) завантажують генератори електричних станцій і електричні мережі, знижуючи їх ККД. Коефіцієнт потужності асинхронних двигунів знижується із зменшенням навантаження і має найменше значення при роботі двигуна на неробочому ході.

Залежність $\cos \varphi$ від навантаження на двигун можна пояснити на основі енергетичних уявлень про роботу двигуна. Електрична енергія, споживана двигуном з мережі, перетворюється, з одного боку, в енергію магнітного поля, а з іншого – у внутрішню енергію провідників обмоток і сердечників (вони нагріваються) і витрачається на здійснення механічної роботи. Перший процес оборотний: електрична енергія двічі за період перетворюється в енергію магнітного поля, а енергія магнітного поля перетворюється в електричну енергію. Цей процес характеризується реактивною потужністю Q або реактивним струмом I_p . Реактивний струм є

намагнічуючим струмом, який підтримує змінне магнітне поле в кожній фазі двигуна. Другий процес необоротний: електрична енергія, що пішла на нагрівання провідників, сердечників і витрачена на здійснення роботи, для електричного ланцюга є безповоротно втраченою. Цей процес характеризується активною потужністю P або активним струмом I . Цілком очевидно, що активна потужність пропорційна навантаженню.

Швидкість обертання валу i , відповідно, момент АД можна регулювати таким чином. Якщо підтримувати постійним значення синхронної швидкості ω_0 , то регулювання швидкості обертання ротора можна отримати шляхом зміни ковзання. Зробити це можна за рахунок збільшення втрат у роторі. Реалізувати такий спосіб зміни швидкості можна, включаючи активні або індуктивні додаткові опори в ланцюг статора і ротора, а також шляхом зміни напруги, що підводиться.

При включенні додаткових резисторів у ланцюг ротора швидкість ідеального холостого ходу ω_0 і момент M залишаються незмінними, а критичне ковзання збільшується. Цей спосіб забезпечує лише ступінчасту зміну швидкості (реостат з плавною зміною опору практично не реалізується при великих струмах).

Регулювання швидкості обертання валу АД шляхом зміни напруги реалізується шляхом застосування простих технічних засобів. З цією метою між мережею змінного струму із стандартною напругою U_m встановлюється регулятор напруги, вихідна напруга якого U_{out} регулюється шляхом подачі деякого сигналу управління. Як регулятор напруги можуть використовуватися тиристорні регулятори. Вони мають високий ККД і хороші масогабаритні показники.

Іншим способом регулювання швидкості обертання валу АД є частотне управління, при якому змінюється ω_0 . З використанням цього принципу побудовано багато асинхронних електроприводів. Дискретна зміна ω_0 і ступінчасте регулювання швидкості АД, у простому випадку, можуть бути забезпечені зміною числа пар полюсів (частота напруги, що підводиться, залишається незмінною, а частота обертання поля статора змінюється ступінчасто).

Найбільше розповсюдження в даний час через економічність і високі технічні показники отримали електроприводи з використанням різних електронних перетворювачів частоти. У перетворювачах для зміни синхронній швидкості АД змінюється частота живлення статора. При такому

регулюванні частоти не відбувається збільшення ковзання, тому такий спосіб частотного регулювання швидкості вельми економічний.

Відомо, що механічні, динамічні характеристики, енергетичні показники АД у частотно-регульованому електроприводі залежать від типу реалізації автоматичної системи регулювання електроприводу.

Асинхронні системи з частотним управлінням будуються як розімкнені, тобто такі, що підтримують певне співвідношення між частотою і напругою, так і замкнуті.

У розімкнених системах вибір співвідношення між частотою і напругою залежить від моменту навантаження й визначається з умови збереження перевантажувальної здатності: $\lambda = M_K / M_H = const$, де M_K – критичний момент АД, M_H – момент навантаження на валу. Якщо закон зміни моменту навантаження заздалегідь відомий, то можна визначити необхідні співвідношення напруги і частоти.

Як «класичні» види навантажень на валу АД можуть бути навантаження, що визначаються такими співвідношеннями $M_H = const$, $P_H = M_H \omega_m$, $M_H = k \omega_m^2$. Їм відповідають такі співвідношення між напругою і частотою: $U_S / \omega_K^{1;1/2;2} = const$.

Частотні способи у замкнутих системах використовуються тоді, коли заздалегідь невідомий характер зміни навантаження й одночасно до системи не пред'являється жорстких вимог по динаміці. Частотні способи управління забезпечують досягнення необхідних статичних, в основному енергетичних, характеристик і використовуються в системах зі «спокійним» навантаженням. На вході цих систем включаються задатчики інтенсивності, які обмежують швидкість наростання (убування) вхідного сигналу до такої величини, при якій електромеханічні процеси в системі можна вважати сталими, тобто можна нехтувати доданками $J(d\omega/dt)$ $J(d\omega/dt) \ll M_H$. При цьому реалізація постійності потокозчеплення вимагає застосування негативного зворотного зв'язку по відповідній ЕРС.

Функціональна схема електроприводу з частотним регулюванням швидкості показана на рис. 8.12-а.

Згідно з термінологією, що склалася, такі електроприводи називають частотними. Головним елементом цієї схеми є перетворювач частоти, що здійснює регулювання частоти і напруги за одним із законів. Завданням його є перетворення напруги мережі в напругу, що подається на асинхронний двигун.

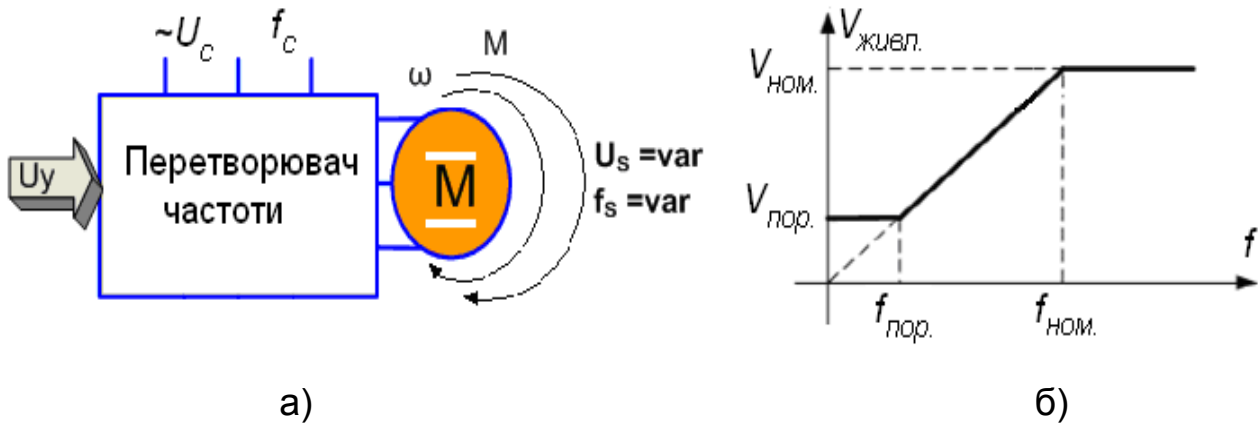


Рис. 8.12. Функціональна схема електроприводу з частотним управлінням (а) і залежність амплітуди напруги статора від частоти статора, визначена з принципу V/f (б)

8.3.2. Скалярне частотне управління електроприводом з асинхронним двигуном при використанні мікроконтролерів

Частотне регулювання швидкості АД, як наголошувалося, є найбільш економічним способом управління в сучасному устаткуванні. При частотному регулюванні швидкості прагнуть забезпечити номінальний магнітний потік Φ в АД і при цьому не допускають збільшення ковзання, що в цілому дає вигоду. Тому цей спосіб зміни швидкості розглядається в даний час як основний і найбільш перспективний спосіб регулювання АД, який дає економію електроенергії.

Повне використання АД має місце, якщо він працює з номінальним магнітним потоком Φ . Можна показати, що цей потік залежить від співвідношення $\hat{O} \sim E_s / f_s = const$. Для ідеального АД це співвідношення забезпечує постійність перевантажувальної здатності двигуна та економічність регулювання. Це співвідношення свідчить про те, що для повного використання АД разом із зміною частоти живлення f_s двигуна необхідно одночасно пропорційно їй змінювати величину ЕРС E_s , що підводиться до статора. Тому найбільш популярним алгоритмом управління трифазним асинхронним електродвигуном є алгоритм з підтримкою постійності відношення напруга/частота (правило Костенко). При цьому економії електроенергії можна добитися, якщо при зміні напруги, що підводиться

до АД, у ланцюг статора включити напівпровідникові перетворювачі напруги, які змінюють свою вихідну напругу (першу гармоніку) пропорційно частоті.

Принцип постійності відношення напруга/частота дозволяє використовувати синусоїдальну сталу модель асинхронного електродвигуна, в якій величина магнітного потоку статора пропорційна відношенню амплітуди і частоти напруги обмотки статора. Якщо дане відношення підтримувати на постійному рівні, то постійність зберігатиме і магнітний потік статора і, таким чином, обертальний момент залежатиме тільки від частоти ковзання.

Коли частота статора знижується менше порогової частоти, амплітуду напруги необхідно підтримувати на певному рівні для підтримки постійності магнітного потоку ротора. Коли частота стає вищою за номінальне значення, амплітуда напруги залишиться на номінальному рівні завдяки насиченню ключів інвертора. У цьому випадку потік ротора буде непостійним і обертальний момент знизиться.

Отже, принцип управління « V/f » полягає в подачі на обмотки електродвигуна 3-фазної синусоїдальної напруги, амплітуда якої пропорційна частоті, за винятком частот нижче порогового значення і вище номінального, як показано на рис 8.12-б. На практиці нахил, який визначає відношення амплітуди напруги до частоти напруги, розраховується за номінальними значеннями напруги живлення і частоти живильної мережі, які наводяться в паспорті на електродвигун, а порогова частота вибирається за відсотком (наприклад 5 %), від номінальної частоти.

З використовуваних у даний час регульованих електроприводів з АД з частотним управлінням простими є розімкнені скалярні системи з напівпровідниковими перетворювачами частоти, які знаходять застосування в тих випадках, коли заздалегідь відомо, що при відносно невеликому діапазоні регулювання швидкості навантаження буде «спокійним» – у ньому не виникнуть інтенсивні зміни моменту і швидкості.

Регулювання АД при плавній зміні швидкості ідеального холостого ходу у простих системах управління може здійснюватися на основі *скалярного управління*. Скаляр змінної напруги подається тільки величиною, отриманою за допомогою безпосереднього вимірювання, розрахунку або перетворення миттєвих значень. Отже, загальною рисою всіх скалярних систем управління є модуль регульованої величини.

Необхідна для управління частотою обертання асинхронного двигуна напруга, регульована по частоті і величині, може бути отримана шляхом використання системи управління, тобто розімкненої асинхронної системи з частотним регулюванням і з підтримкою $U/f = const$, функціональна схема якої показана на рис. 8.13.

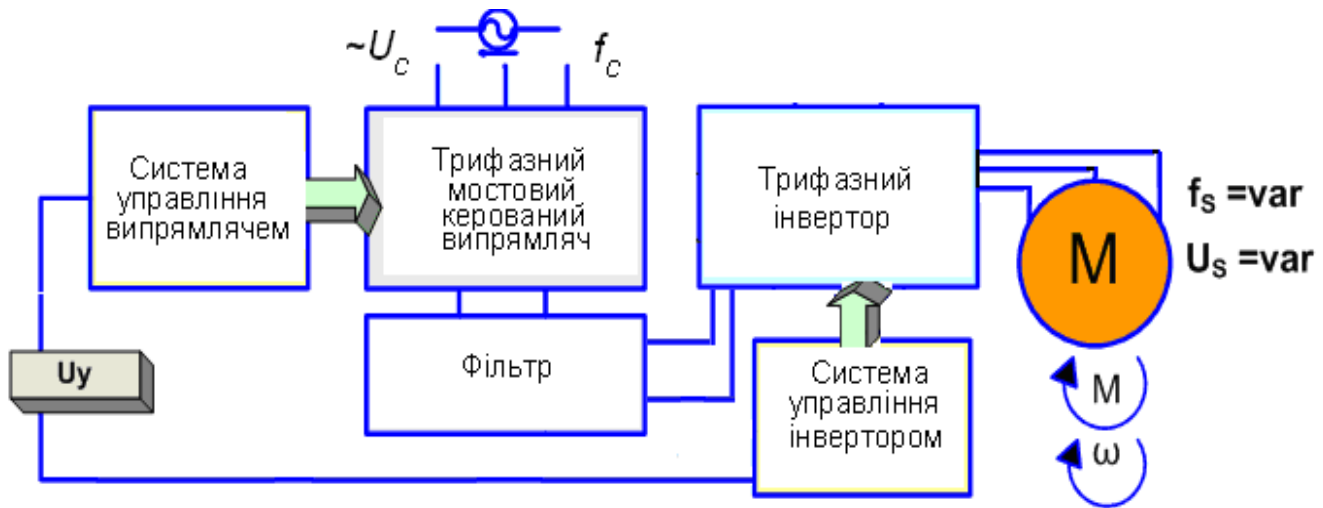


Рис. 8.13. Функціональна схема розімкненої асинхронної системи з частотним управлінням АД

Асинхронна система управління з частотним регулюванням включає такі блоки:

1) трифазний двонапівперіодний мостовий керований випрямляч (three-phase full converter). У цьому блоці трифазна напруга електричної мережі перетвориться в слабопульсуючу напругу;

2) систему управління випрямлячем. Дана система регулює амплітуду напруги на виході керованого випрямляча і містить регулятор постійної напруги живлення інвертора (DC bus voltage regulator);

3) трифазний інвертор (three-phase inverter). У сучасних системах електроприводу практично повсюдно при регулюванні швидкості асинхронних двигунів використовуються автономні транзисторні інвертори з широтно-імпульсною модуляцією). Принцип дії таких інверторів полягає у формуванні вихідної напруги з імпульсів із змінною шпаруватістю;

4) систему управління інвертором (six step generator), до складу якої входить блок генерування імпульсів управління (bridge firing unit). Для забезпечення регулювання вихідної напруги самим інвертором використовують широтно-імпульсне регулювання (ШІР) і широко-імпульсну модуляцію (ШІМ) на носійній частоті. Відмінність між цими двома спосо-

бами полягає в тому, що при ШІР задана шпаруватість залишається незмінною протягом напівперіоду вихідної напруги, а при ШІМ шпаруватість імпульсів безперервно змінюється за деяким законом. Кращі показники досягаються при широтно-імпульсній модуляції на носійній частоті, коли модулюючим сигналом є синусоїдальна напруга. Зміна амплітуди напруги на виході інвертора в цих випадках здійснюється за рахунок зміни тривалості імпульсів. До складу асинхронної системи управління з частотним регулюванням може також входити ланцюг скидання енергії гальмування асинхронного двигуна (braking chopper);

5) фільтр. Залежно від схеми фільтру автономні інвертори діляться на інвертори напруги (AИ) і струму (AТ). AИ є майже ідеальними джерелами напруги, тому фільтром таких інверторів є індуктивно-ємнісна Г-подібна ланка, яка, окрім індуктивності $L\phi$, містить конденсатор великої ємності $C\phi$, що забезпечує незмінність напруги при зміні навантаження. Управляючими діями на двигун в AИ є напруга, що прикладається до виводів статора. AТ є майже ідеальним джерелом струму.

Для забезпечення незмінності струму у фільтр включається індуктивна котушка з великою індуктивністю. У схемі такого інвертора управляючими діями на двигун є струми статора.

При частотно-струмовому управлінні АД управляючими величинами є частота і величини струмів статора. У розімкнених системах управління частота і величина струму статора задаються незалежно. Проте, якщо використовується AИ, як часто буває, то додатково застосовується регулятор струму. Отже, закони частотного управління в розімкнених скалярних системах, коли напруга змінюється тільки у функції частоти, не забезпечують постійність перевантажувальної здатності реального АД в широкому діапазоні моментів і швидкостей. АД при цьому, функціонуючи в номінальному режимі, працюють з номінальним магнітним потоком, який неможливо збільшити через насичення магнітного ланцюга.

Недоліки розімкнених систем частотного управління усуваються в замкнутих системах, коли напруга на двигуні змінюється як у функції частоти, так і струму (моменту навантаження). Для цього використовуються зворотні зв'язки по ЕРС, струму, швидкості, абсолютному ковзанню. Основне завдання, яке вирішується в замкнутих системах частотного управління, полягає у стабілізації потокозчеплення (магнітного потоку) при зміні навантаження.

Формування динамічних характеристик асинхронного електроприводу при скалярному частотному управлінні здійснюється завданням законів зміни частоти в перехідних процесах (лінійного, експоненціального, квадратичного, S-подібного тощо). Тому невід'ємною частиною замкнутої системи управління електроприводом є задатчик інтенсивності, де ці закони формуються.

Слід мати на увазі, що, крім виду зворотного зв'язку, замкнуті системи частотного регулювання розрізняються за використанням типом автономного інвертора: напруги (АІН) і струму (АІТ). Функціональна схема системи скалярного частотного управління АД із зворотним зв'язком по потокозчепленню та автономному інвертору напруги (АІН) показана на рис. 8.14.

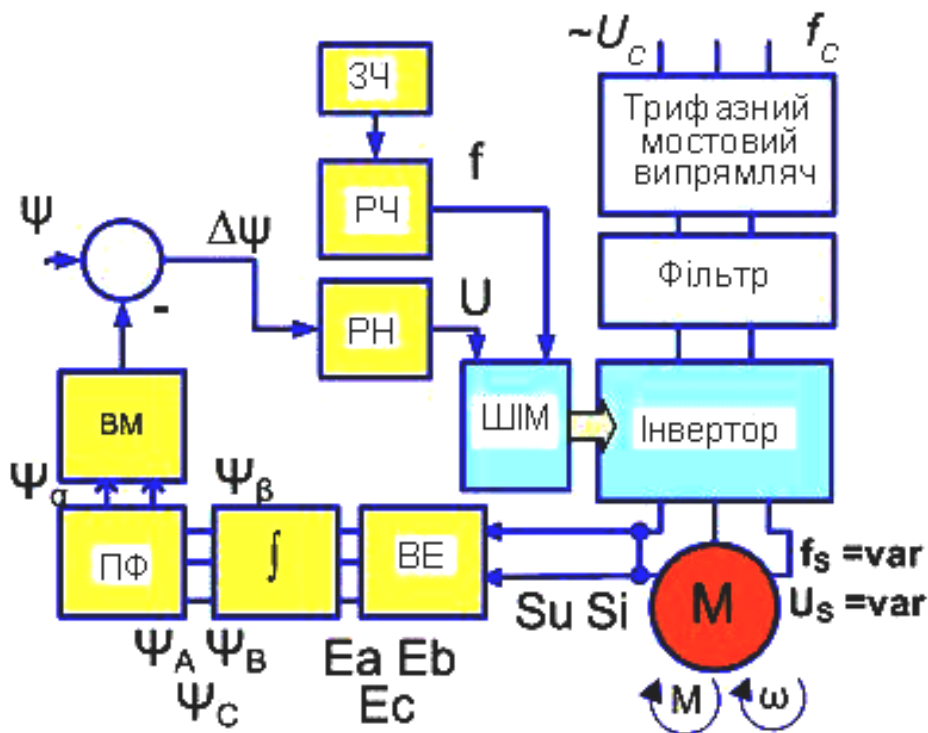


Рис. 8.14. Функціональна схема системи скалярного частотного управління АД із зворотним зв'язком по потокозчепленню

На схемі показано, що відповідні фазні потокозчеплення спочатку визначають за допомогою обчислювача ЕРС (ВЕ) та інтегратора на основі зміряних за допомогою сенсорів миттєвих значень напруги і струмів фаз статора АД: $\psi = \int e dt + C$. Потім за допомогою перетворювача фаз (ПФ) на основі фазних потокозчеплень знаходиться модуль вектора по-

токозчеплення: $\psi = 2^{-0.5} \sqrt{\psi_{\alpha}^2 + \psi_{\beta}^2}$. На основі порівняння обчисленого токозчеплення ψ із заданим виробляється сигнал управління, який за допомогою регулятора напруги (РН) змінює напругу, яка виробляється ШІМ-модулятором і подається на обмотки статора.

За допомогою регулятора частоти формується сигнал на ШІМ модулятор, щоб частота напруги на виході статора відповідала тій, яка задана задатчиком частоти (ЗЧ).

У сучасних приводах реалізація блоків функціональної схеми частотного управління АД здійснюється з використанням розроблених спеціально для застосування в силовій електроніці мікроконтролерів. При цьому настроювання їх параметрів і характеристик проводиться програмним шляхом.

Для управління АД можна використовувати, наприклад, мікроконтролер на основі AVR RISC-архітектури AT90PWM3. Основною особливістю, яка робить даний мікроконтролер привабливим для застосування у пристроях управління електроприводами, є інтеграція в нього трьох контролерів управління силовим каскадом.

До складу даних периферійних пристроїв входять 12-розрядні реверсивні лічильники з двома компараторами, виходи яких можуть управляти силовими транзисторами інвертора. Ці функціональні елементи, використовуючи широтно-імпульсну модуляцію, дозволяють генерувати сигнали трифазної форми. У даному мікроконтролері реалізують контур автоматичного управління швидкістю, в якому відхилення бажаної швидкості від фактичного зміряного значення швидкості поступає в ПІ-регулятор, де обчислюється значення частоти напруги статора.

З метою зниження складності регулятора як початкові дані для правила V/f і ШІМ-алгоритму використовується абсолютне значення частоти напруги статора. В основі роботи широтно-імпульсного модулятора при вирішенні задачі формування за допомогою інвертора трифазної синусоїдальної системи напруги із зрушенням по фазі 120° на обмотках статора лежить програмне формування таблиці синусів.

Для звичайного ШІМ-алгоритму використовується таблиця найближчих значень $127 \sin(2 k/180)$ або $127 (\sin(2 k/480) + 1/6 \sin(6 k/480))$ для значень $k = 0 - 120$. Розмір даної таблиці (121 байт) є оптимальним з погляду розміру доступної внутрішньої пам'яті та періодичності оцифрування частоти обертання ротора.

У мікроконтролері реалізований алгоритм ПІ-регулятора. ПІ – це скорочення від "пропорційний і інтегральний". Метою даного алгоритму є визначення управляючого сигналу об'єктом управління (в даному випадку це частота напруги статора), при якому контрольований вихідний сигнал об'єкта управління (в даному випадку це частота обертання ротора) досягне заданого значення (бажаної частоти обертання, що задана користувачем).

Пропорційна частина ПІ-регулятора виконує множення результуючого сигналу розузгодження (різниці зміряного вихідного сигналу об'єкта управління і заданого значення) на постійну величину, яка називається коефіцієнтом передачі пропорційної частини. Пропорційна частина визначає короткострокову поведінку регулятора, оскільки вона характеризує, як сильно потрібно реагувати регулятору на зміну заданих значень. Інтегральна частина додає ПІ-регулятору довготривалу точність.

Дана частина регулятора формує твір суми всіх попередніх сигналів розузгодження на постійну величину, яка називається коефіцієнтом передачі інтегруючої частини. Попередні значення сигналу розузгодження для обчислення суми зберігаються в пам'яті й оновлюються доти, доки значення розузгодження не буде рівне нулю. Це дозволяє регулятору прибрати відмінності між зміряним вихідним значенням і розрахунковим.

8.3.3. Векторне частотне управління електроприводом з асинхронним двигуном при використанні мікроконтролерів

У розглянутих вище системах скалярного частотного управління АД при управлінні використовувалися скалярні величини – напруга статора, струм статора, частота. Закони управління реальним АД, які реалізуються при цьому, забезпечують хорошу якість регулювання в сталих режимах.

Для багатьох механізмів з помірними вимогами до динаміки, особливо інерційних, не швидкодіючих механізмів, скалярні системи частотного управління як відносно прості і дешеві є розумним технічним вирішенням регульованого електроприводу. Проте у промисловому устаткуванні існують механізми з високими вимогами до динаміки (маніпулятори, спостережної системи), де необхідно, забезпечуючи максимальну швидкодію, досягати параметрів необхідного режиму без коливань швидкості і моменту. Динамічні властивості електроприводу при скалярному

управлінні визначаються функцією завдання частоти в перехідному процесі і параметрами самого електроприводу. При цьому магнітний потік у перехідному процесі не залишається постійним, що обумовлює можливість коливань електромагнітного моменту і швидкості.

Точно підтримувати на заданому рівні магнітний потік і електромагнітний момент, як виявилось, можна при векторному управлінні. Це стало передумовою розробки векторних систем управління, здатних забезпечити високу якість і великі діапазони регулювання змінних асинхронного електроприводу у сталих та змінних режимах.

Векторне управління – це різновид частотного управління, де як дії управління використовуються просторові (узагальнені) вектори електромагнітних величин.

Використання методу векторного ШІМ-управління замість скалярного ШІМ-управління дозволяє економічніше витратити енергію і поліпшити перехідні процеси. При такому способі управління за допомогою складових вектора струму статора можна незалежно змінювати магнітний потік і електромагнітний момент двигуна. Відповідно, при реалізації векторного управління потрібно здійснювати контроль миттєвих величин напруги, струмів і потокозчеплень, що є складовими відповідних векторів. Принцип векторного управління був описаний більше 30 років тому, проте практична його реалізація почалася з того часу, коли з'явилися хороші силові напівпровідникові прилади і мікроконтролерні системи, здатні в цифровому вигляді переробити потрібну для управління інформацію.

У даний час векторне управління АД переживає період бурхливого розвитку, і загальна кількість запропонованих різновидів векторного управління перевищує два десятки. Вирішення завдань векторного управління забезпечується за рахунок заданого електромагнітного моменту АД.

У теорії АД показано, що рівняння електромагнітного моменту, яке визначається векторним твором, залежно від використовуваних у цих рівняннях змінних і вибраної системи координат для їх уявлення, може приймати, взагалі кажучи, 8 різних форм запису.

На практиці зі всієї різноманітності можливих способів векторного управління вибирають такі, які простіше реалізувати, в першу чергу, з погляду вимірюваних величин. Крім того, при цьому враховують, що електромагнітний момент досягає максимуму при зрушенні векторів, що створюють момент, на 90 електричних градусів. Зручно як управляючі векто-

ри, що формують електромагнітний момент двигуна, взяти вектори струму \vec{i}_{2R} і потокозчеплення $\vec{\psi}_2$ ротора, які у сталому режимі перпендикулярні. Проте при цьому виникає одна незручність: струм \vec{i}_{2R} є практично не вимірюваною величиною. Тому векторне управління на практиці здійснюють інакше: з визначенням вектора струму ротора \vec{i}_{2R} через складові вектора струму статора \vec{i}_{1S} . При цьому векторний вираз електромагнітного моменту приймає вигляд: $\vec{M} = p_n k_R (\vec{\psi}_2 \times \vec{i}_1)$, де k_R – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора, p_n – число пар полюсів двигуна.

Ортогональність векторів струму \vec{i}_1 , і потокозчеплення $\vec{\psi}_2$, що існує у сталому режимі, слід підтримувати і протягом перехідного процесу. Оскільки вектори \vec{i}_1 , $\vec{\psi}_1$, \vec{i}_2 , $\vec{\psi}_2$ обертаються з кутовою швидкістю ω_1 то, якщо, використовуючи обертову систему координат x-y, вісь x направити вздовж вектора потокозчеплення ротора $\vec{\psi}_2$ а, відповідно, вісь y – вздовж вектора приведенного струму ротора \vec{i}_{2R} , електромагнітний момент визначатиметься твором $i_{1y}\psi_2$: $\vec{M} = p_n k_R (\vec{\psi}_2 \times \vec{i}_1) = p_n k_R (\psi_2 \times i_{1y})$, де i_{1y} – проекція вектора струму статора на вісь y.

Відмітимо, що складова струму статора i_{1x} (по осі x) визначає потокозчеплення ротора $\vec{\psi}_2$, а складова i_{1y} , перпендикулярна $\vec{\psi}_2$, створює момент. Складову i_{1x} можна розглядати як реактивну намагнічуючу складову струму статора двигуна, а i_{1y} – як активну складову, що йде на створення моменту двигуна. Це свідчить про те, що при використанні векторного управління в АД є можливість роздільного управління потоком і моментом.

При цьому треба мати на увазі, що незалежне управління потоком, моментом і швидкістю здійснюється не шляхом використання реальних змінних двигуна, а величинами, перетвореними до тієї або іншої, рухомої і нерухомої, систем координат. Перехід від рівнянь, поданих у тій або іншій системі координат, до рівнянь реального трифазного асинхронного двигуна здійснюється за допомогою рівнянь координатних перетворень і заміни введених змінних реальними фазними значеннями змінних АД. Таким чином, перше завдання векторного управління полягає в тому, щоб під час перехідного процесу, коли змінюється частота, за допомогою системи управління дотримувалася ортогональність векторів $(i_{1y} + \vec{\psi}_2)$.

Разом з тим просторовий вектор струму статора – це фізична величина, де зміна однієї з його складових приводить до зміни другої. Тому друге завдання векторного управління полягає в тому, щоб мати можливість незалежно регулювати потокозчеплення ротора та електромагнітний момент. Іншими словами, треба виключити взаємну залежність складових i_{1x} і i_{1y} вектора струму статора i_{1s} .

Для завдання незалежних величин i_{1x} і i_{1y} при управлінні треба використовувати «розв'язані», які можна незалежно регулювати, складові напруги управління u_{1x} і u_{1y} , що визначаються таким чином:

$$u_{1x} = R_1(i_{1x} + T_{1x} \frac{di_{1x}}{dt}), \quad u_{1y} = R_1(i_{1y} + T_{1y} \frac{di_{1y}}{dt}), \quad \text{де } T_{1x}, T_{1y} - \text{постійні часу.}$$

Математичний опис і функціональна схема замкнутої системи з векторним управлінням АД залежать також від того, який використовується автономний інвертор, напруги або струму (АІН або АІТ).

Іншими словами, схема управління істотним чином залежить від того, яким чином отримує живлення інвертор. Наприклад, функціональна схема векторного управління АД на основі АІН містить три контури: а) швидкості (містить сенсор швидкості BR і регулятор швидкості обертання (моменту) AR); б) потокозчеплення (магнітного потоку) з регулятором потоку $A\psi$ і каналом зворотного зв'язку, що має вихідну величину u_ϕ ; в) активної і реактивної складових вектора струму статора i_{1x} і i_{1y} з регуляторами AA2 і AA1.

Сигнал зворотного зв'язку по струму статора поступає від сенсорів струму UA, які вимірюють струми (фазні) двигуна в трьох фазах А, В, С, і виробляє сигнали u_{IA} , u_{IB} і u_{IC} .

Трифазний асинхронний двигун, у загальному випадку, характеризується трьома струмами, визначеними в нерухомій трикоординатній системі. Для перетворення цих сигналів до нерухомої двокоординатної системи α - β служить функціональний перетворювач U1. Він виконує координатні перетворення відповідно до таких формул: $u_{I\alpha} = u_{IA}$,

$$u_{I\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_{IB} + u_{IC}).$$

Вимірювання потокозчеплення проводиться за допомогою датчиків Холу, що поміщаються в повітряний зазор двигуна. Сигнали датчика $U\psi$ у функціональному перетворювачі U2 перетворюються в сигнали нерухо-

мої двокоординатної системи α - β : $u_{\hat{o}\alpha} = u_{\psi a}$; $u_{\psi\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_{\psi b} + u_{\psi c})$. Отримані величини перетворюються до системи координат x - y , що обертається у просторі зі швидкістю поля двигуна. З цією метою в перетворювачі D виділяється модуль потокозчеплення ротора $\psi_2 = \sqrt{\psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2}$ у вигляді відповідного сигналу $U_\phi = \sqrt{u_{\phi\alpha}^2 + u_{\phi\beta}^2}$. Тут же визначаються сигнали $\sin \varphi = (u_{\hat{o}\beta} / U_{\hat{o}})$, $\cos \varphi = u_{\hat{o}\alpha} / U_{\hat{o}}$, які в перетворювачі A2 дозволяють перейти від нерухомих координат $\alpha - \beta$ до координат $x - y$ за формулами $u_{ix} = u_{i\alpha} \cos \varphi + u_{i\beta} \sin \varphi$; $u_{iy} = u_{i\beta} \cos \varphi - u_{i\alpha} \sin \varphi$.

Нагадаємо, що сигнали $u_{\hat{o}\alpha}$, $u_{\hat{o}\beta}$, U_{IX} , U_{IY} пропорційні відповідним фізичним величинам. На вхід регулятора потокозчеплення А ψ подається різниця сигналів завдання потокозчеплення $U_{3\phi}$ і зворотного зв'язку U_ϕ , тобто $u_{y\phi} = U_{3\phi} - U_\phi$, а на виході А ψ формується сигнал завдання струму статора по осі X, тобто U_{3IX} . Різниця сигналів $u_{3IX} - u_{IX}$, проходячи через регулятор струму AA1, перетворюється на сигнал u_{IX}^* . Аналогічні перетворення мають місце в каналі управління по осі Y, за винятком того, що тут встановлений регулятор швидкості (моменту) AR, вихідний сигнал якого ділиться на сигнал модуля потокозчеплення U_ϕ для отримання сигналу завдання струму U_{3IY} по осі Y. На виході регулятора AA2 складової струму статора по осі Y виробляється сигнал u_{IY}^* , який разом із сигналом u_{IX}^* подається на входи блоку A1, на виході якого отримуємо перетворені сигнали u_X і u_Y , у яких відсутній взаємний вплив контурів регулювання складових струмів по осях X і Y. Управляючі сигнали u_X і u_Y , записані в обертовій системі координат x - y , у координатному перетворювачі A3 перетворюються на сигнали управління інвертора в нерухомій системі координат $\alpha - \beta$ до рівнянь $u_{y\alpha} = u_X \cos \varphi - u_Y \sin \varphi$; $u_{y\beta} = u_X \sin \varphi + u_Y \cos \varphi$.

Для управління силовими ключами інвертора у трифазній системі координат необхідно за допомогою блоку A4 отримати три сигнали:

$$U_{YA} = u_{y\alpha}; U_{YB} = (-u_{y\alpha} + \sqrt{3}u_{y\beta}/2); U_{YC} = (-u_{y\alpha} - \sqrt{3}u_{y\beta}/2).$$

Таким чином, завдяки координатним перетворенням у системі векторного управління вдається створити два незалежні канали регулювання: потокозчеплення (магнітного потоку) і швидкості обертання (моменту). Для багато-

кратного перетворення координат електроприводу відповідно до наведених вище формул служать спеціалізовані мікроконтролери, які працюють у режимі реального часу. Це дозволяє, використовуючи асинхронний двигун, отримати глибоко регульовані за швидкістю електроприводи з високою швидкодією.

Електропривід з векторним управлінням забезпечує діапазон регулювання швидкості (до 10 000) і у багатьох випадках замінює широко регульований електропривід з двигунами постійного струму.

Існує багато варіантів технічних рішень векторного управління. Було стисло розглянуто варіант так званого прямого векторного управління, при якому безпосередньо вимірюється потокозчеплення (магнітний потік).

Існують також системи непрямого векторного управління, які непрямыми методами вимірюють положення ротора та електричні параметри. Непрямі варіанти широко використовують з двох основних причин:

- а) вимірювання потоку трудомістке;
- б) використання датчика положення ускладнює систему.

Якщо немає необхідності вимірювати положення ротора, застосовують так зване «бездатчикове» векторне управління (датчик положення ротора відсутній). Проте останнє вимагає від мікроконтролера виконання значно складніших процедур.

Векторне ШІМ-управління асинхронним двигуном можна реалізувати на основі того ж мікроконтролера AT90PWM3. Він є недорогим і економічним однокристальним мікроконтролером, що досягає продуктивності до 16 мільйонів інструкцій за секунду. Він спеціально призначений для виконання функцій управління трифазними асинхронними електродвигунами.

У мікроконтролері для управління інвертором і здійснення ШІМ реалізований принцип просторово-векторної модуляції. Такий підхід базується на понятті результуючого (узагальненого) просторового вектора.

Суть результуючого просторового вектора полягає в тому, що миттєві значення симетричних змінних можна математично перетворити так, щоб вони були подані одним просторовим вектором. Просторовий вектор для трифазної симетричної системи синусоїдальної напруги є вектором довжини (амплітуди) U_m , що обертається в нерухомій комплексній площині з кутовою швидкістю m .

Функціональна схема, використовувана для побудови контура векторного управління ШІМ, показана на рис. 8.15-а.

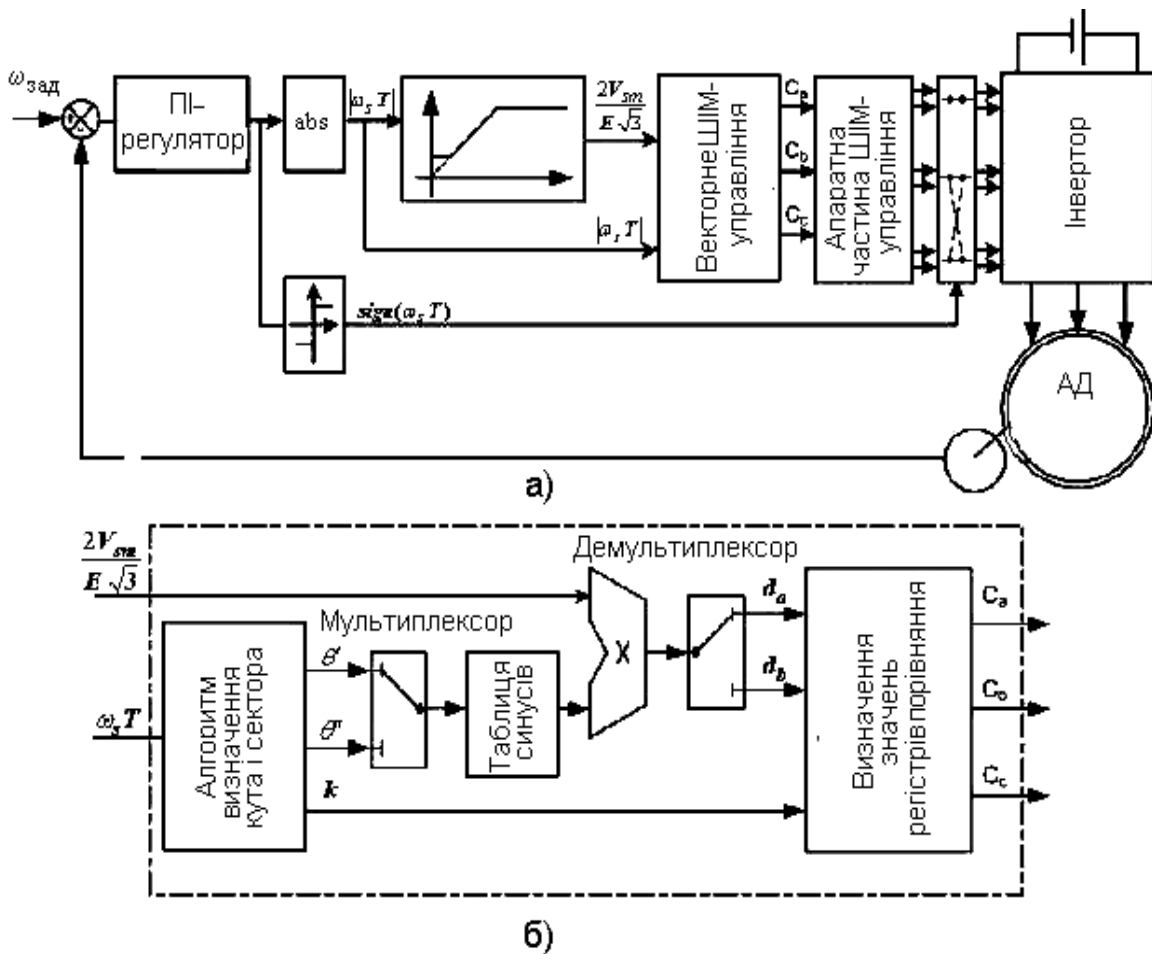


Рис. 8.15. Функціональна схема (а) та операції, що виконуються для отримання сигналів векторного управління ШІМ (б)

У даному випадку різниця між бажаною і зміряною швидкостями поступає на вхід ПІ-регулятора, в якому визначається частота напруги статора. Для зниження складності контролера як початкові дані для обчислення правила V/f і алгоритму векторного ШІМ-управління використовуються абсолютні значення частоти напруги статора.

Якщо на виході ПІ-регулятора присутнє негативне значення, то вмісти двох змінних управління силовими транзисторами інвертора обмінюються місцями. Для отримання сигналів управління ключами виконуються операції, показані на рис. 3.15-б.

Практичні завдання

1. Використовуючи довідкові матеріали або Інтернет-ресурси, охарактеризуйте стан справ при вирішенні таких важливих для поліграфії завдань, як управління процесами позиціонування, транспортування і проведення аркушів або паперового полотна (вимірювання лінійних та кутових переміщень, а також швидкості і прискорення).

Який робочий принцип пристрою і функціонування закладений у приладах вимірювання лінійних зсувів та кута повороту (використовуються енкодери)?

Який дозвіл при вимірюванні лінійних зсувів кута вдається отримати в сучасних приладах?

Поясніть, для якої мети використовують кодування сигналів, що отримуються після проходження оптичного випромінювання через кодуєчу пластину або кодуєчий диск, пов'язаний з валом.

Які коди при цьому застосовуються для мінімізації помилки прочитування?

Які різновиди (типи) енкодерів випускаються промисловістю?

2. Використовуючи довідкові матеріали, виберіть енкодер, який дозволяє контролювати кут повороту валу друкарської машини на $0,05^\circ$.

3. Припустивши, що для перетворення обертального руху в поступальний лінійний хід використовується механізм «рейка – шестерня» або «гайка – ходовий гвинт з шарикопідшипниковими опорами» і що обертання ходового гвинта викликає лінійне переміщення гайки, виберіть, використовуючи довідкові матеріали, енкодер який дозволяє позиціонувати гайку з точністю до 1 мм.

Бажано, щоб код повороту валу був кодом Грея.

4. Використовуючи довідкові матеріали або Інтернет-ресурси, опишіть, якими параметрами характеризуються сучасні крокові двигуни, що випускаються промисловістю.

У яких режимах роботи вони можуть працювати? Охарактеризуйте режим, який, на ваш погляд, найбільш підходить для використання в поліграфічному устаткуванні.

5. Використовуючи довідкові матеріали або Інтернет-ресурси, стисло охарактеризуйте блоки управління і драйвери, що застосовуються для роботи із сучасними кроковими двигунами. Для якої мети в них використовуються мікроконтролери?

6. Виконати, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2, моделювання роботи біполярного чотирифазного двигуна, підключеного до схеми контролера і драйвера.

7. Використовуючи Інтернет-ресурси (наприклад ресурси сайту <http://www.pechatnick.com/analitika/articles/index.phtml?id>), стисло охарактеризуйте стан справ і ті тенденції, які мають місце при застосуванні в поліграфічних машинах електроприводів, пов'язаних з вирішенням «силових» і енергетичних завдань.

8. На основі моделювання виконайте дослідження асинхронних електроприводів з векторним управлінням.

9. На основі моделювання отримайте практичні рекомендації щодо вдосконалення електричних приводів, які є енергетичною основою базових і допоміжних технологічних процесів у поліграфічному виробництві, і виконайте дослідження асинхронних електроприводів зі скалярним управлінням.

10. Розгляньте векторний спосіб управління АД при реалізації режиму джерела струму в автономному інверторі. Це забезпечується введенням релейних елементів, на вхід яких подається різниця сигналу, що управляє, і сигналу з датчика реального струму двигуна.

11. Дослідіть можливості управління кроковим двигуном при використанні мікроконтролера.

Вирішення завдання.

Початкові відомості.

Для введення інформації, необхідної для функціонування системи управління кроковим двигуном, часто використовують мікроконтролер. У цьому випадку виходить система управління, яка вдало комбінує функції мікроконтролера, контролера і драйвера крокового двигуна.

Таку систему можна використовувати як автономно, так і при спільній роботі з комп'ютером більш високого рівня управління.

При цьому управління кроковим двигуном можливо в тому режимі, який найбільш підходить для даної ситуації: робота за програмою або ручне управління кроковим двигуном.

Для виконання завдання необхідно:

1. Запустити CodeVisionAVR і дочекатися появи основного вікна з файлами, що відкривалися раніше, або проектами.

2. Відкрити для перегляду діалогове вікно і в ньому виділити завдання.

3. Провести компіляцію проекту.

4. Після компіляції проекту за допомогою відладчика Atmel AVR Studio провести відладку розробленої програми.

Для використання відладчика AVR Studio необхідно встановити на комп'ютер відповідну версію AVR Studio, а потім визначити місцеположення та ім'я відладчика (див. команди Setting > Debugtr).

5. Вивчити на програмному рівні, як функціонує АЦП і здійснюється виведення цифрового коду.

6. Виконати моделювання пристрою вимірювання напруги на базі МК з АЦП, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2.

Вивчити роботу виконаної на мікроконтролері системи ручного управління кроковим двигуном.

Сформулювати, в якому з режимів, напівкроковому (half step mode) або в режимі повного кроку, швидкість обертання валу ротора більша.

Дослідити роботу крокового двигуна при перемиканні напрямку обертання.

Контрольні запитання

1. Назвіть і стисло поясніть прилади за виглядом використовуваної енергії.

2. Назвіть основні переваги електроприводів, що використовуються в поліграфічному устаткуванні для автоматизації технологічних процесів.

3. Назвіть і поясніть основні особливості пневматичних приводів, що використовуються в поліграфічному устаткуванні.

4. Охарактеризуйте поняття мехатронної системи. Назвіть і поясніть її основні особливості.

5. Назвіть і поясніть способи регулювання координат, які можуть застосовуватися для управління рухом виконавчих органів сучасного поліграфічного устаткування.

6. З яких компонентів складається електропривід будь-якої сучасної технологічної машини автоматизованого виробництва?

7. Нарисуйте і поясніть узагальнену функціональну схему електроприводу.

8. Що називають промисловим інтерфейсом? Назвіть і поясніть основні його особливості.
9. Які пристрої називають спеціалізованими вимірювальними контролерами?
10. Які пристрої називають енкодерами? Чому? Для чого вони служать?
11. Назвіть і стисло охарактеризуйте основні типи сучасних енкодерів.
12. Назвіть основні переваги мікроконтролерного способу управління.
13. Який пристрій називають кроковим двигуном і якими перевагами він володіє?
14. Назвіть основні застосування крокових двигунів у сучасних друкарських системах.
15. На які три типи за принципом дії можна розділити шагові двигуни (ШД)?
16. Які пристрої називають гібридними кроковими двигунами. Поясніть їх устрій і роботу.
17. Назвіть і стисло поясніть особливості біполярних та уніполярних двигунів.
18. Назвіть і стисло поясніть основні режими роботи крокового двигуна.
19. Охарактеризуйте стисло мікрокроковий режим роботи ШД, які використовуються у сучасному поліграфічному обладнанні.
20. Поясніть терміни «механічний кут повороту ротора» та «електричний кут повороту ротора».
21. Розгляньте векторний спосіб управління АД при реалізації режиму джерела струму в автономному інверторі.

Тема 9. Застосування послідовного інтерфейсу в комп'ютеризованому поліграфічному обладнанні

9.1. Основні поняття і відомості про інтерфейси послідовного вводу-виводу

9.1.1. Початкові відомості про обмін даними в комп'ютеризованому обладнанні

При роботі комп'ютеризованого устаткування йде постійний обмін потоками інформації або, як ще говорять, даними. Дані – це інформація, приведена до вигляду, придатного для обробки за допомогою комп'ютеризованих засобів. З одного боку, в устаткуванні проводиться збір даних про стан і режими роботи основних вузлів устаткування, а з іншого – за допомогою управляючої інформації постійно задаються параметри, які визначають необхідні режими роботи цих вузлів, наприклад, швидкості переміщення паперу в транспортному модулі, температури здійснення сушки та ін. При цьому обмін інформацією між пристроями, в загальному випадку, може відбуватися з різною швидкістю.

Для того щоб передати електричні сигнали, що несуть інформацію, з однієї точки простору в іншу, використовуються різні середовища, через які ці сигнали можуть переноситися в просторі, і різні способи, які дозволяють ефективно здійснювати цю передачу. Шлях у просторі, якому можна в певному напрямі передати електричний сигнал, що несе інформацію того або іншого вигляду, або, по-іншому, шлях, що дозволяє передати дані від джерела до одержувача, називається каналом.

Найбільш простим каналом передачі даних є два паралельні відрізки дроту з діелектричним проміжком між ними, наприклад двопровідної лінії зв'язку. Іноді другий дріт, або, як ще говорять, зворотний дріт, може бути загальним для декількох різних каналів.

Двопровідна лінія може бути симетричною і несиметричною. У несиметричному ланцюзі передбачається, що один провідник має потенціал «землі». «Земля» – це загальна точка відліку потенціалів (напруги) у схемі, щодо якої вимірюються вся напруга і потенціали.

Якщо два паралельні дроти скручено разом, канал називається скрученою парою. Скручування двох проводів зменшує перехресні пе-

решкоди, тобто небажаний сигнал від сусіднього каналу, який є результатом електромагнітної взаємодії проводів.

У складній електромагнітній обстановці використовують екрановані двопровідні лінії, або коаксіальні кабелі. Нагадаємо, що коаксіальний кабель – це двопровідний канал, у якому струм протікає «туди» через центральну жилу, а «назад» – по стінках провідної трубки, всередині якої розташована ця жила. Така конструкція практично не створює зовнішнього електромагнітного поля, внаслідок чого в ньому різко скорочуються втрати за рахунок випромінювання енергії.

За допомогою каналів здійснюють передачу даних у вигляді бітів або цифрового зв'язку. При цьому в системах обміну інформацією можуть використовуватися два конкуруючих один з одним способи.

Передача інформації від одного пристрою до іншого може здійснюватися шляхом паралельної передачі бітів, при якій усі дані пересилаються одночасно через паралельні порти вводу-виводу.

Порт є спеціальною схемою, зазвичай це частина великої мікросхеми, за допомогою якої здійснюється цифровий зв'язок між декількома пристроями. Порт є також засобом підключення зовнішніх пристроїв до мікроконтролера. На порт вводу (в мікроконтролері це адресований восьмирозрядний регістр, підключений до шини даних) інформація поступає від деякого зовнішнього джерела. За допомогою 8-бітового порту виводу здійснюється передача інформації до зовнішнього пристрою.

При паралельному способі обміну даними інформація пересилається паралельними кодами і послідовно в часі. При цьому кожен «шматочок» інформації у вигляді слова існує дуже короткий час, а потім замінюється іншим. Паралельний спосіб передачі даних підходить для тих ситуацій, коли пред'являються дуже жорсткі вимоги до швидкості інформаційного обміну.

Незважаючи на очевидні швидкісні переваги паралельного способу передачі інформації, його застосування виявляється скрутним, а часто й неможливим, у тих випадках, коли з ряду причин потрібно організувати обмін даними з видаленим зовнішнім пристроєм. Це пов'язано з декількома причинами.

По-перше, це дорогий спосіб, що вимагає великих витрат. Навіть у простому випадку, коли 8 сигналів передаються в одному напрямі і 8 в іншому, коли до того ж потрібні шина живлення, нейтральний (зворотний)

дріт, для обміну даними буде потрібно 18-жильний кабель, поміщений в оболонку. Цей кабель треба «прокласти» в устаткуванні.

По-друге, при швидкісній передачі даних у кабелі матимуть місце електромагнітні взаємодії між численними сигнальними провідниками. Поява на близько розташованих сигнальних провідниках так званих перехресних наведень приведе до появи «перешкод», які вельми важко видалити.

Крім того, при високих швидкостях передачі даних швидкості розповсюдження імпульсів у кожній лінії можуть бути різними. Через це втрачається «паралельність» імпульсів і передавана інформація, дійшовши до точки прийому, може істотним чином спотворюватися. Крім того, слід також мати на увазі, що, проходячи через лінію зв'язку, імпульс спотворюється, змінює свою форму, «розповзається» в часі. У результаті він виходить за межі відведеного йому часового інтервалу, «залізаючи» в інтервал, який призначений для сусіднього імпульсу, стаючи для останнього перешкодою. Таким чином, довгі сигнальні тракти, «розкидані» по устаткуванню, не дозволяють досягти граничних часових характеристик і рівнів перешкод.

У комп'ютеризованому устаткуванні з малими об'ємами передаваних даних швидкість передачі може бути другорядним чинником. Але завжди число сполучних проводів – критичний чинник. У зв'язку з цим доцільно скорочувати кількість використовуваних для передачі даних фізичних провідників до двох (сигнального тракту і зворотного дроту) й використовувати послідовний спосіб передачі інформації.

При послідовному способі обміну даними, як і при паралельному, також є джерело інформації та її одержувач. Але в цьому випадку передача інформації від одного пристрою до іншого може здійснюватися тільки в послідовному режимі. Дані з восьми бітів, які складають слово і поступають від джерела, передаються один за одним через лінію до одержувача не одночасно, а біт за бітом. При цьому в певний момент часу передається тільки 1 біт даних. Перевага послідовного способу передачі даних полягає в його дешевизні. Для встановлення двостороннього зв'язку необхідно в ідеалі два дроти.

Відомо, що як такі сполучні проводи можуть використовуватися або металеві провідники, або коаксіальні кабелі. Це залежить від виду передаваної інформації, від вимог до пропускної спроможності, до допустимого рівня перешкод, що виникають у процесі передачі.

До недоліків послідовного способу передачі даних слід віднести втрату швидкості, схильність до перешкод і складність програмування.

Послідовна передача даних виконується набагато повільніше, ніж паралельна (пропорційно кількості паралельних проводів). При послідовній передачі даних сигнали є низьковольтними і, отже, схильні до впливу перешкод. Тому доводиться приймати всі можливі заходи захисту, включаючи екранування і методи виявлення помилок.

Для послідовного обміну даними використовуються послідовні порти. Вони називають так тому, що в них у кожен момент часу передається тільки один біт інформації.

Найголовніша перевага послідовних портів перед паралельними – зниження числа ліній, що використовуються в каналі для з'єднань. Разом з тим, як це не парадоксально, але сучасні послідовні канали мають перевагу перед паралельними щодо високих швидкостей, коли на швидкість передачі починають впливати затримки в лініях. Останні неможливо зробити строго однаковими, і це одна з причин того, що послідовні інтерфейси в даний час домінують у пристроях обміну даними.

Відзначимо, що наявність у складі 8-розрядного мікроконтролера послідовних портів вводу-виводу стала настільки звичайним явищем, що лише найпростіші, такі, що мають риси виводів, мікроконтролери не мають портів послідовного обміну.

У комп'ютеризованому поліграфічному устаткуванні завдання, що вирішуються за допомогою послідовних портів, можуть бути умовно розділені на такі групи:

1) зв'язок вбудовуваної у вузол устаткування локальної мікроконтролерної системи управління із системою управління верхнього рівня: офісним комп'ютером, промисловим контролером, комп'ютером настільної видавничої системи та ін.;

2) зв'язок мікроконтролера системи збору й обробки інформації про стан і режими роботи устаткування з датчиками фізичних величин з послідовним виходом;

3) забезпечення обміну даними із зовнішніми відносно мікроконтролера периферійними інтегральними схемами, що забезпечують вирішення спеціалізованих завдань (пристроями додаткової пам'яті, аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворення);

4) забезпечення зв'язку з локальною мережею в багатопроцесорних системах, міжмережного і мережного обмінів даними, коли мікроконтролери можуть мати загальну пам'ять і «викликати» один одного.

На жаль, створення ефективної і гнучкої організації послідовного обміну інформацією між пристроями ускладнюється тим, що пристрої, які випускаються різними виробниками й об'єднуються в систему, зазвичай розрізняються за фізичними принципами дії, виконуваними робочими операціями, використовуваними командами, сигналами (кодами) управління, за формами подання даних і швидкостями передачі інформації. Зрозуміло, що для нормального функціонування системи послідовної передачі даних необхідно забезпечити узгоджену роботу джерела інформації (передавача) та її одержувача (приймача).

Для вирішення завдань узгодження при послідовному обміні даними треба принаймні чітко визначити таке:

- 1) рівні використовуваних електричних сигналів;
- 2) код передаваного повідомлення, тобто вказати, що означають бітові комбінації і як формується повідомлення;
- 3) швидкість передачі, тобто швидкість, з якою посилається бітова комбінація;
- 4) спосіб часового поєднання бітових комбінацій у часі (спосіб синхронізації) передавача і приймача;
- 5) метод перевірки на наявність помилок і процедури «відновлення» початкового сигналу;
- 6) метод обміну сигналами управління між передавачем і приймачем.

Для забезпечення вирішення названих завдань необхідні засоби «стиківки» джерела інформації та її одержувача. Організація «стиківки» мікроконтролера, комп'ютера, різних пристроїв вводу-виводу здійснюється за допомогою спеціальних засобів сполучення і взаємодії – інтерфейсу і протоколів інформаційного обміну.

Під інтерфейсом розуміють сукупність уніфікованих апаратурних (ліній, шин, електронних схем та ін.), програмних (алгоритмічних) і конструктивних засобів, що здійснює обмін інформацією між пристроями. Ця сукупність необхідна для реалізації взаємодії різних блоків і функціональних вузлів, що входять до складу автоматичних систем управління. Вона забезпечує інформаційну, електричну і конструктивну сумісність різних функціональних компонент.

Інтерфейси зазвичай вирішують завдання електричного, енергетичного і логічного підключення периферійних пристроїв до мікроконтролера, комп'ютера і стандартних інформаційних магістралей.

За режимом обміну інформацією інтерфейси підрозділяють на такі: симплексні, дуплексні та мультиплексні.

В інтерфейсах із *симплексним режимом обміну* інформацією можлива лише однонаправлена передача інформації від одного абонента до іншого.

Симплексний режим означає, що одна сторона каналу може тільки передавати, а інша тільки приймати інформацію. Відповідно передавач і приймач інформації є однонаправленими.

В *інтерфейсах з дуплексним режимом обміну* у будь-який момент часу може проводитися одночасний прийом і передача даних між двома абонентами. Дуплексний режим означає, що обидві сторони каналу можуть приймати й передавати дані одночасно. Лінії прийому і передачі інформації при цьому розділені. Відповідно, контролер обміну кожного абонента має два виводи – приймача та передавача, і буфери цих виводів однонаправлені.

В *інтерфейсах з мультиплексним режимом обміну* в кожен момент часу може здійснюватися прийом і передача даних між парою будь-яких абонентів мережі.

Фізичний рівень реалізації інтерфейсу визначає число ліній зв'язку, електричні рівні сигналів на лініях, швидкість передачі, максимальну довжину ліній. Також інтерфейси послідовної передачі інформації можуть відрізнятися режимом передачі даних (запити на встановлення зв'язку та обмін інформацією можуть виникати в довільних або в точно певні моменти часу, бути терміновими або не дуже терміновими і т. д.), числом бітів у посилці при передачі байта корисної інформації, рівнями сигналів і положенням фронтів на лініях при перемиканні. Через всі ці відмінності можливі різні «нестиковки» у тракці передачі даних. Зокрема, може виникнути проблема узгодження моментів спрацьовування зовнішнього пристрою і мікроконтролера: передача даних може відбутися в той момент, коли дані ще «не готові». Тому для успішного здійснення зв'язку повинен існувати набір правил (протокол), відповідно до яких проводиться передача даних.

Ці правила називають протоколом взаємодії (інформаційного обміну), або «рукостисканням».

Під протоколом інформаційного обміну розуміють комплекс правил, положень і рекомендацій (функціональну та синтаксичну специфікації сигналів управління й обміну даними), що визначають основні принципи взаємодії між окремими пристроями (вузлами) системи і забезпечують функціональну сумісність конкретного пристрою з програмним забезпеченням. Ці правила визначаються стандартами, що встановлюють зміст і контроль власне повідомлень, рівні використовуваної напруги, спосіб з'єднання та управління взаємодією.

Протоколом інформаційного обміну, в першу чергу, визначають «механізми» передачі даних. Окрім визначення форми повідомлення, (тобто, того яка група бітів утворює символи повідомлення і які групи символів утворюють повідомлення), протокол встановлює, як ініціюється й завершується зв'язок, визначає, які необхідно зробити дії, якщо зв'язок уривається під час повідомлення. Він також указує на те, як виявляються помилки і які за цим виникають дії.

Підтримка протоколів інформаційного обміну на рівні логічних сигналів (впорядкування пересилок даних) забезпечується на програмному рівні спеціальними програмами – програмними драйверами, а на апаратному – відповідними контролерами або апаратними драйверами. Реальні фізичні рівні сигналів, характерні для кожного типу інтерфейсу, отримують за допомогою спеціалізованих функціональних вузлів (модулів), які називають приймачами, конверторами, трансиверами.

Відповідно до протоколів зв'язку, що існують у даний час, системи обміну інформацією, що включають у свій склад багатьох абонентів (пристроїв), можна умовно розділити на дві категорії. До першої категорії можна віднести системи, до складу яких входять рівноправні відносно один до одного пристрої. Послідовний зв'язок при цьому може бути ініційований будь-яким пристроєм (вузлом), підключеним до послідовної шини даних, у довільний момент часу.

Друга категорія даних систем припускає наявність у системі одного головного пристрою (MASTER) і сукупності підлеглих (SLAVE). Весь зв'язок у подібних системах, а також ініціалізація передач послідовних даних здійснюються головним (ведучим) пристроєм. Підлеглі (ведені) пристрої, як правило, працюють у режимі приймачів інформації.

Передача даних від SLAVE до MASTER може бути здійснена на вимогу ведучого, що визначається посилкою відповідного коду. SLAVE,

отримавши вказаний код, проводить видачу необхідних даних протягом часу зв'язку, що залишився.

Вибір підлеглого пристрою з метою ініціалізації зв'язку між ним і ведучим проводиться в індивідуальному порядку за допомогою програмної установки активного рівня сигналу на апаратному вході вибору відповідного веденого пристрою. Отже, в циклі послідовного зв'язку у будь-який момент часу можуть брати участь тільки два вузли із загальної кількості тих, що входять у мережу: MASTER і вибраний ним SLAVE.

При послідовному обміні даними потрібно забезпечити побітну і покадрову синхронізацію. Побітна синхронізація необхідна для правильного прийому передаваних бітів, покадрова – для виділення всього повідомлення з прийнятої послідовності бітів.

Відомі в даний час інтерфейси периферійних пристроїв з послідовою передачею інформації можуть працювати як у синхронному, так і в асинхронному режимах [12]. У *синхронному режимі* паралельно з передачею по лінії даних послідовності інформаційних бітів по лінії синхро-сигналів передається послідовність синхроімпульсів. Імпульси на лінії синхроімпульсів служать для виділення індивідуальних бітів у каналі. Як джерело, так і одержувач інтерпретують один і той же синхроімпульс як вказівку на наявність у каналі чергового біта, що дозволяє вирішити проблеми побітної синхронізації передавача та приймача при передачі довгих інформаційних повідомлень і підвищити швидкість передачі.

В *асинхронному режимі*, коли на передавальній і на приймальній сторонах використовуються два окремі генератори тактових імпульсів і джерело та одержувач не мають загальної синхронізації, джерело й одержувач повинні точно відмірювати час появи кожного біта відносно початку слова. Для цього джерело повинне позначати початок слова так, щоб одержувач міг його розпізнати.

У зв'язку з цим в асинхронному режимі побітна синхронізація приймача і передавача здійснюється зазвичай по першому (стартовому) біту і потім підтримується абонентами протягом часу передачі всього повідомлення стабільністю тактових імпульсів, що отримуються від передавача і приймача (два генератори синхронізуються на початку передачі кожного символу).

Швидкість передачі інформації в асинхронному режимі нижча і число бітів в інформаційній посилці (кадрі) менше. Покадрова синхронізація в асинхронному режимі здійснюється обрамленням інформації при пере-

дачі по лінії стартовими і стоповими бітами. Передній фронт стартового біта використовується в одержувачі і як ознака початку слова, і як початок відліку часу для визначення моментів приходу окремих бітів слова.

Покадрова синхронізація в *синхронному режимі* здійснюється з використанням спеціальних кодових послідовностей (прапорів або спеціальних знаків) у загальному випадку на початку і в кінці кадру. Оскільки в синхронному режимі інформаційні біти повідомлення передаються безперервним потоком, то для кодування й декодування кадрів використовують спеціальні домовленості, викладені у протоколі обміну.

Самі по собі біти не містять інформації до тих пір, поки потік бітів не організований відповідно до певного коду. Тому у протоколах зв'язку, що зустрічаються в системах обміну інформацією, обов'язково вказано, які використовуються коди символів для формування повідомлень.

За багато років було створено різні види кодування символів, але в даний час універсальним став код ASCII (American Standard Code for Information Interchange – американський стандартний код для обміну інформацією). ASCII – це 7-бітовий код, що дає повний набір буквено-цифрових символів верхнього і нижнього регістрів плюс знаки пунктуації і 32 управляючих символів.

При обміні даними, поданими в дискретному двійковому вигляді, важливі такі параметри, як інформаційна швидкість передачі і вірогідність помилок. Тому в протоколі вказуються значення швидкостей, які рекомендуються і з якими може відбуватися обмін даними.

Інформаційна швидкість передачі – це швидкість, з якою передаються дані. Швидкість передачі сигналів виражається в бодах, вимірюваних числом дискретних переходів або подій за секунду. У системах послідовної передачі даних є тільки два сигнальні стани – 0 і 1. Тому 1 бод рівний 1 біт/с. Найвища швидкість, з якою можна передати інформацію в каналі, називається пропускною спроможністю каналу.

За наявності високоякісного кабелю пропускна здатність каналу при передачі даних може досягати швидкості до 115 кілобод. Важливо мати при цьому на увазі, що до інформаційних символів часто додаються старт/стопові біти і біти для перевірки на наявність помилок. Тому кількість бітів за секунду – це швидкість передачі імпульсів, і число 115 кілобод не слід розуміти як здатність передавати по кабелю 115 000 біт інформації за 1 с.

9.1.2. Обмін даними в комп'ютеризованому устаткуванні за допомогою послідовного периферійного інтерфейсу SPI

Послідовний спосіб обміну даними широко застосовується в комп'ютеризованому устаткуванні, в якому використовуються МК. Такий спосіб передачі інформації зазвичай призначений для зв'язку МК з периферійними пристроями цієї комп'ютеризованої системи, основою якої він є. Номенклатура подібних периферійних компонентів дуже широка. Використання подібних периферійних компонентів – шлях до проектування сучасних комп'ютеризованих систем.

Периферійні пристрої можуть бути реалізовані у вигляді окремих мікросхем, які можуть розташовуватися на одній платі з МК або бути винесені за межі цієї плати [20].

Для здійснення інтерфейсних функцій із зовнішніми відносно до мікроконтролера периферійними пристроями у структурі мікроконтролера передбачені «внутрішні» інтерфейсні периферійні схеми. Відомо, що периферійними у структурі МК AVR називають усі пристрої, зовнішні щодо обчислювального ядра і пам'яті. Для реалізації послідовного інтерфейсу мікроконтролери серії AVR у своєму складі можуть мати такі вбудовані в мікроконтролер («внутрішні») інтерфейсні схеми:

1) послідовний периферійний інтерфейс SPI (Serial Peripheral Interface), що призначений для організації послідовного обміну даними між двома пристроями. З його допомогою може здійснюватися обмін даними між мікроконтролером і різними зовнішніми периферійними пристроями. Через інтерфейс SPI може здійснюватися програмування МК. Це друге призначення інтерфейсу SPI. З його допомогою можна здійснювати послідовне програмування пам'яті програм і внутрішнього EEPROM.

Перевага програмування через SPI полягає в тому, що такий спосіб дозволяє програмувати пам'ять, не виймаючи мікросхему МК з пристрою. Це так зване внутрішньосхемне програмування;

2) універсальний послідовний синхронно/асинхронний приймач USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter - UART або USART) – зручний і простий послідовний інтерфейс для організації інформаційного каналу обміну МК із «зовнішнім світом». Він здатний працювати в дуплексному режимі. У ньому можна регулювати швид-

кість передачі інформації шляхом програмування МК. За допомогою UART (USART) можна організувати лінію зв'язку між двома МК.

Такий інтерфейс забезпечує можливість організації зв'язку з персональним комп'ютером через послідовний порт комп'ютера (COM-порт);

3) двопровідний послідовний інтерфейс TWI (Two-wire Serial Interface), що є аналогом базової версії інтерфейсу I²C (двопровідна двонаправлена шина) фірми Philips. Даний інтерфейс може застосовуватися для сполучення різних складних мікросхем управління, зокрема, контролерів дисплеїв на рідких кристалах, мікросхем Flash-пам'яті та інших пристроїв, керованих по шині I²C.

Цей інтерфейс дозволяє об'єднати разом до 128 різних пристроїв за допомогою двонаправленої шини, яка складається з лінії тактового сигналу (SCL) і лінії даних (SDA) ;

4) чотирипровідний послідовний інтерфейс JTAG (Joint Test Action Group), що використовується для тестування друкарських плат, внутрішньосхемної відладки, програмування МК. Багато МК сімейства Mega мають сумісний з IEEE Std 1149.1 інтерфейс JTAG або debugWIRE для вбудованої відладки. Крім того, всі МК Mega з флеш-пам'яттю ємністю більш 16 Кбайтів можуть програмуватися через інтерфейс JTAG.

В основі всіх вбудованих у МК інтерфейсів лежить ідея передачі інформації побітно з певними інтервалами часу. Вони розрізняються лише способами синхронізації. Тому почнемо вивчення з випадку синхронної передачі даних через послідовний периферійний інтерфейс SPI. SPI, незважаючи на ряд «тонкощів», найпростіший зі всіх послідовних інтерфейсів, оскільки реалізує у чистому вигляді головну їх ідею: передавати в кожен момент часу один біт по одній послідовній лінії.

Простота SPI обумовлена й тим, що при реалізації синхронного протоколу тактові імпульси в ньому передаються по окремій лінії. Це дозволяє точно визначати моменти відліку бітів. Послідовний периферійний інтерфейс SPI служить для здійснення зв'язку МК із зовнішніми периферійними блоками.

Як такі пристрої можуть використовуватися як прості зсувні регістри або буквено-цифрові модулі індикації, так і складні периферійні інтегральні мікросхеми з вбудованими контролерами управління, такі, як ЦАП, сигма-дельта АЦП з цифровою фільтрацією сигналу, послідовні запам'ятовуючі пристрої типу Flash або EEPROM тощо.

Будова інтерфейсу SPI і схема обміну даними показані на рис. 9.1.

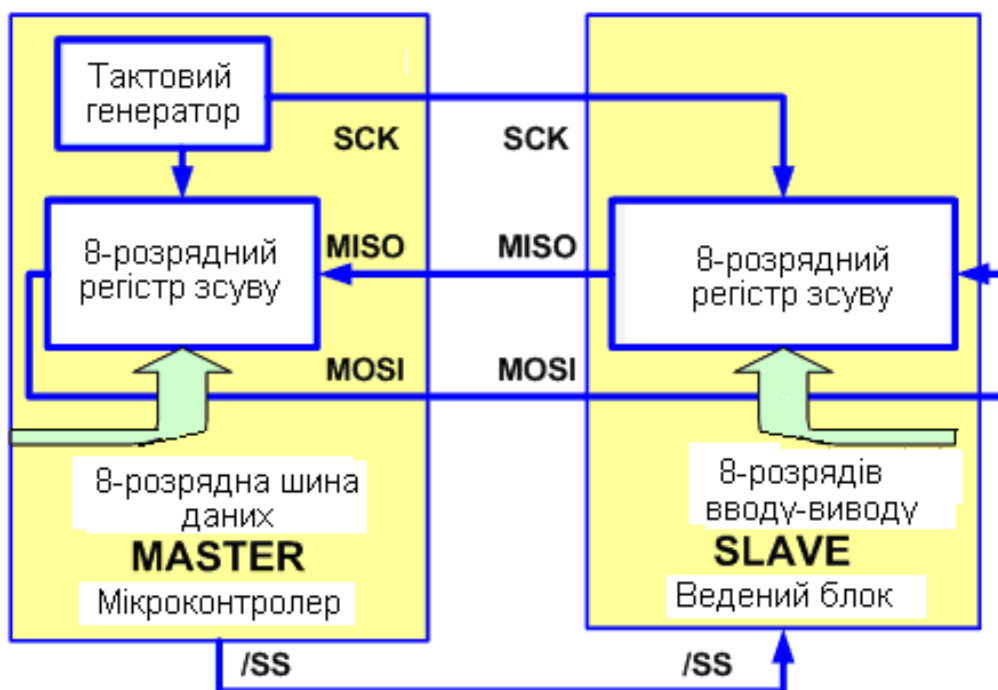


Рис. 9.1. Будова і схема передачі даних по інтерфейсу SPI

Інтерфейс SPI, призначений для організації обміну даними між двома пристроями (один з них є ініціатором обміну (MASTER), другий – пасивний (SLAVE)), є двома сполученими восьмирозрядними регістрами зрушення (джерела і приймача), що сполучені в кільце лініями MISO і MOSI (вихід регістра MASTER підключається до входу регістра SLAVE і навпаки). Вони утворюють єдиний регістр зрушення.

Основна операція, виконувана при роботі SPI, полягає в тому, щоб передати через вихід MOSI (Master Out Slave In – вихід ведучого, вхід веденого) 8 біт даних на вхід MISO (Master In Slave Out – вхід ведучого, вихід веденого) синхронно з вісьма тактовими імпульсами на виводі SCK (Shift Clock – такт зрушення). Утворений таким чином 16-розрядний регістр, як і будь-який регістр зрушення, синхронно з тактовими імпульсами SCK, послідовно зрушує дані, якщо вони поступають на вхід крайнього тригера регістра, тим самим послідовно «завантажуючи бітами» регістр по одному розряду за одиницю часу. Якщо MASTER генерує тактові імпульси, то з ведучого по лінії MOSI «виштовхуються» біти, «витісняючи» з веденого біти по лінії MISO.

Зрушення інформації в обох пристроях відбувається за 8 тактових імпульсів, тому за час даного циклу регістри MASTER і SLAVE повністю обмінюються вмістом один з одним. Якщо не перервати даний цикл і ге-

нератор тактових імпульсів продовжуватиме працювати, то інформація так і продовжуватиме «крутитися» в цьому кільці.

Якщо необхідно рахувати дані в регістрах або відновити циркулюючу інформацію, то треба після кожного циклу обміну прочитувати прийнятий байт і записувати новий. Наприклад, одночасно з передачею даних через MOSI ведений, якщо це передбачено, може вести передачу своїх даних, які у ведучому можуть бути прочитані відразу після закінчення циклу передачі. При цьому запис даних (у ведений) і читання (з веденого) можна виконати за одну операцію.

Інтерфейс SPI називають трипровідним, оскільки для забезпечення обміну даними в ньому використовується три сигнальні провідники: дві лінії даних MOSI (Master Out Slave In – вихід ведучого, вхід веденого), MISO (Master In Slave Out – вхід ведучого, вихід веденого) і лінію синхронізації SCK (Shift Clock – такт зрушення).

У позначеннях інтерфейсів прийнято рахувати тільки сигнальні шини. Але в більшості випадків повинні бути сполучені і провідники (шини) заземлення пристроїв. Тому формально трипровідний SPI припускає наявність чотирьох з'єднаних проводів. Крім того, є ще один провідник SS (Slave Select), який завжди присутній, коли до одного провідного пристрою підключено більше двох ведених пристроїв.

Уже наголошувалося, що до інтерфейсу SPI може бути одночасно підключено декілька периферійних пристроїв. З ведучим може працювати лише один ведений зі всіх. Для забезпечення цього використовується вивід /SS (/Slave Select – вибір веденого), який позначається з інверсією, тому що вибір необхідного периферійного пристрою проводиться подачею сигналу низького рівня на цей вивід.

При цьому, якщо на виводи інших незадіяних пристроїв поданий сигнал логічної одиниці, виводи MISO в таких периферійних пристроях знаходяться у високоімпедансному (високоомному) стані і ніяк не впливатимуть на обмін даними.

9.1.3. Асинхронна передача даних у комп'ютеризованому устаткуванні через приймач UART

Відзначимо, що синхронна послідовна передача даних застосовується для близько розташованих пристроїв, головним чином, для обміну даними на рівні друкарських плат, зокрема, для обміну даними між різ-

ними блоками у складі багатопроцесорної схеми управління, між МК і різними периферійними схемами. Разом з тим часто доводиться організувати передачу інформації між пристроями, які знаходяться на відстані в декілька метрів один від одного.

У ситуації, коли доводиться мати справу з комунікацією між просторово розділеними блоками, виникають проблеми, які вимагають їх вирішення.

По-перше, це проблема синхронізації. Як правило, такі блоки функціонують від «своїх» окремих генераторів тактових імпульсів. Частоти їх роботи неминуче відрізняються, тому в такій ситуації приймач не буде узгоджений з передавачем і між ними виникне асинхронна взаємодія. Якщо потрібно здійснювати передачу інформації, то необхідно забезпечити якийсь новий спосіб синхронізації роботи передавача і приймача.

По-друге, будь-які «протяжні канали» схильні до перешкод, що може призводити до спотворення інформації. Тому при передачі інформації між пристроями, що знаходяться на відстані в декілька метрів один від одного, повинні застосовуватися електричні сигнали, які б у меншій мірі піддавалися дії перешкод.

При просторовому рознесенні взаємодіючих пристроїв, особливо в тих випадках, коли інтенсивність обміну інформацією не дуже велика, віддають перевагу *асинхронним режимам передачі* даних, навіть якщо при цьому є можливість використовувати синхронний спосіб обміну інформацією. Застосування асинхронної передачі даних на великі відстані, аж до декількох сотень метрів, обумовлено тим, що її протоколи не передбачають використання в каналі дуже схильних до перешкод електричних сигналів з ТТЛ-рівнями і вирішують проблему синхронізації.

Форми, які проводять асинхронну передачу даних між рознесеними пристроями, оформлені у вигляді «Стандарту взаємодії між приймачем і передавачем, що використовують послідовний обмін даними у вигляді двійкової коди». Цей стандарт, з початковими буквами RS (Recommended Standard – рекомендований стандарт), відомий як стандарт послідовного інтерфейсу RS-232 [19]. За його допомогою організують лінію зв'язку між комп'ютером і зовнішніми пристроями. Асинхронний послідовний інтерфейс RS-232 – зручний і простий спосіб «стиківки» комп'ютера та МК (вбудовуваної мікроконтролерної системи управління).

Стандарт RS-232 визначає апаратні засоби, електричні параметри використовуваних сигналів і протокол передачі повідомлень.

Асинхронний обмін даними відбувається в повнодуплексному асинхронному режимі, при якому прийом і передача здійснюються одночасно. При цьому є незалежні апаратні засоби: приймач (Receiver) і передавач (Transmitter). Основною частиною будь-якого пристрою, що підтримує RS-232, є UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter – універсальний асинхронний приймач). Оскільки при обробці інформації комп'ютери, МК працюють з паралельним кодом, а по лініях даних інформація передається у вигляді рядка бітів, то в UART здійснюється перетворення паралельного коду в послідовний і навпаки за допомогою зсувних регістрів. Багато МК серії AVR мають вбудований універсальний послідовний асинхронний приймач (UART). Обмін даними проводиться по двох лініях: лінія RXD використовується для прийому даних, лінія TXD – для передачі даних. Лінія передачі одного пристрою з'єднується з лінією прийому іншого і навпаки (повний дуплекс).

Для формування з'єднання стандарт передбачає й інші сигнали управління, тому в асинхронному режимі можуть використовуватися 9 сигнальних ліній, через що з'єднання виконуються за допомогою спеціального або 25-штиркового, або 9-штиркового роз'єму D-типу.

Використовувані в інтерфейсі RS-232 рівні логічних сигналів (високий і низький) відрізняються від електричних рівнів ТТЛ-сигналів, що діють у цифровій електроніці, мікроконтролерах, персональних комп'ютерах. Логічний 0, що визначається в ТТЛ-логіці рівнем напруги близько 0 В) подається позитивною напругою в діапазоні від 3 до 15 вольт. Логічна 1, що визначається в ТТЛ-логіці рівнем напруги близько 5 В) задається негативною напругою в діапазоні від -3 до -15 В.

Очевидно, що для підключення до МК, який працює з ТТЛ-сигналами, ліній, які працюють за стандартом RS-232, треба використовувати схеми «перетворення рівнів».

Промисловістю випускається ряд таких схем-драйверів. Найбільш поширеним драйверним модулем є мікросхема MAX232 компанії Maxim, яка завдяки вбудованим перетворювачам напруги може обходитися єдиним видом робочої напруги +5 В.

Описана частина стандарту RS-232 визначає апаратну частину. Разом з тим важливу роль при передачі даних відіграє також використовуваний протокол, який визначає зміст повідомлень.

При асинхронній взаємодії, коли передавач і приймач застосовують два окремі генератори тактових імпульсів, повідомлення розбивається

на символи, і генератори синхронізуються на початку передачі кожного символу. Повідомлення передаються у вигляді послідовності пакетів даних. Кожен пакет містить один символ коду ASCII. Відомо, що символи коду ASCII, подаються сім'ю бітами. ASCII дозволяє отримати 128 різних комбінацій, які охоплюють повний набір буквено-цифрових символів верхнього і нижнього регістрів плюс знаки пунктуації і 32 символи управління.

Одиницею передачі даних є кадр – це одне слово даних плюс супутні йому біти (стартовий біт, стоповий біт). Сюди ж може бути доданий біт парності, який застосовується для перевірки правильності передачі інформації.

Універсальний асинхронний приймач UART підтримує 30 різних варіантів формату кадру. Будь-який допустимий формат має такі елементи: один стартовий біт; 5, 6, 7, 8 або 9 бітів даних; біт парності, якщо включений контроль парності; один або два стопових біти. Кадр починається зі стартового біта, за яким виникає молодший розряд слова даних. Потім йдуть інформаційні розряди. Їх може бути до дев'яти. Розряди йдуть у порядку зростання. Найбільш старший розряд передається останнім. Якщо режим перевірки включений, то біт парності вставляється між старшим розрядом слова даних і стоповими бітами. Після передачі одного повного кадру канал може відразу починати передачу нового кадру. Якщо новий кадр даних не готовий, канал переходить у режим очікування.

Передача може бути розпочата у будь-який момент часу. Для того,, щоб передати повідомлення приймача про початок передачі, посилається стартовий біт з логічним рівнем «нуль», тобто так званий старт-біт, який завжди є «0» і ознакою початку передачі. За ним виникають 8 бітів даних, з молодшим бітом спочатку. Їх число зазначається у протоколі передачі даних. Закінчується посилення стоп-бітом, який завжди рівний логічній одиниці. Він може бути запрограмований з тривалістю 1; 1,5 або 2 довжини біта. Після відправки стоп-біта лінія даних переходить у початковий стан і готова до наступної передачі. У кінці байта, перед стоп-бітом, може бути і біт парності. Бітів може бути не 8, а 9. Про всі ці параметри домовляються до початку передачі. Найпопулярнішим же є формат 8 бітів, один старт, один стоп, без парності. У зв'язку з тим, що синхронізуюча лінія відсутня і сигнал для синхронізації передачі не пересилається, початок розряду (біта) може бути розпізнаний тільки по вимірюванню часу, що пройшов з моменту появи спаду стартового біта. Тому

приймач синхронізується по першому спаду старт-біта. Для цього відлічується половина часу передачі одного біта і перевіряється рівень на лінії. Якщо цей логічний рівень рівний «0», то проводиться відлік повного періоду і біти, що відповідають повідомленню (0 або 1), поміщаються у зсувний регістр приймача. Якщо він не рівний «0», то це означає, що в лінії є перешкода і «все відміняється». Коли всі 8 бітів прийняті, відлічується ще один період і перевіряється наявність на вході "1" – стоп-біта. Якщо стоп-біт не рівний «1», фіксується помилка, інакше байт вважається прийнятим. Відмітимо, що описані рівні сигналу для RS232 такі: логічна 1 = -15 В, а логічний 0 = +15 В. Це спрощений опис, але насправді все може бути складніше. Кількість інформаційних бітів може бути різною, в кінці (перед стоп-бітом) може бути перевірочний біт (парність, непарність), кількість стоп-біт також буває різною.

Асинхронну передачу даних при використанні МК можна організувати програмним шляхом. Але це у центрального процесора «відбиратиме» багато обчислювальних ресурсів. Тому компанія Atmel оснастила багато своїх МК вбудованим приймачем. Він може працювати в дуплексному режимі і завдяки цьому одночасно передавати та приймати дані, тим самим істотно розвантажуючи центральний процесор.

Для роботи з UART у МК виділено чотири регістри в області вводу-виводу. Регістр, куди заносяться дані, називається *регістром даних* UDR (UART Data Register) і є здвоєним регістром – регістром даних передавача і регістром даних приймача. Один з них використовується для передачі, а інший – для прийому даних. Звернення до цих двох регістрів здійснюється за однією й тією ж адресою \$0C. При записі в регістр звернення проводиться до регістра передавача, а при читанні – до регістра приймача.

Регістр статусу USR (UART Status Register) знаходиться в області вводу-виводу за адресою \$0B. Після надходження сигналу скидання всі його розряди аж до розряду 5 (UDRE) ініціалізуються в логічний нуль. Розряд UDRE встановлюється в логічну 1, щоб вказати, що приймач готовий до передачі нового байта даних.

Регістр управління UCR (UART Control Register) знаходиться в області вводу-виводу за адресою \$0A. Після надходження сигналу скидання всі його розряди ініціалізуються в логічний нуль. Регістр UCR знаходиться в області вводу-виводу за адресою \$09. Після надходження сигналу скидання всі його розряди UBRR ініціалізуються в логічний нуль.

Регістром настройки необхідної швидкості передачі даних UBRR (формувачем асинхронного синхросигналу послідовного обміну) є дільник, на виході якого утворюється синхросигнал, тобто такти системної синхронізації з частотою, що визначається таким виразом $f_{BAUD} = f_{CLOCK} / 16(UBRR + 1)$, де f_{BAUD} – швидкість передачі в бодах, f_{CLOCK} – частота процесора (системна синхронізація), UBRR – вміст восьмирозрядного регістра UBRR (0-255).

9.2. Передача цифрових потоків у вбудованих багатопроцесорних системах

9.2.1. Обмін даними в комп'ютеризованому устаткуванні за допомогою послідовного двопровідного інтерфейсу TWI і шини ІС

У даний час у сучасній електронній апаратурі, в комп'ютеризованому устаткуванні з'явилася велика кількість вельми складних у функціональному відношенні мікросхем. Ускладнення мікросхеми неминуче приводить до значного збільшення контактів і, відповідно, місць паяння й вимагає великого числа сполучних ліній. Якщо при цьому сигнали переходять на іншу друкарську плату, то потрібне велике число роз'ємів. Усе це збільшує вартість системи, що складається зі складних мікросхем, підвищує вірогідність виникнення збоїв в її роботі й обмежує кількість модулів, які можуть бути розташовані на одній друкарській платі. При цьому зростає ціна багатовивідних корпусів інтегральних схем.

Логіка підказує, що через велику кількість використовуваних сигналів і, відповідно, сигнальних ліній складні мікросхеми просто «приречені» були на те, щоб обмінюватися інформацією за допомогою послідовного способу передачі даних.

Поняття «інтерфейс» прийшло в комп'ютеризоване устаткування і у вбудовувані мікроконтролерні системи управління з обчислювальної техніки. Але якщо раніше складні мікросхеми, як і сам МК, виступали в ролі периферійних пристроїв «великої» ЕОМ, то тепер ситуація змінилася. Як правило, сам МК перетворився на «маленьку» ЕОМ, яка зв'язує «свої» периферійні пристрої у вигляді складних мікросхем. З цієї причини не завжди традиційні рішення з комп'ютерної техніки, що використовує магі-

стралі адрес і даних, виявилися якнайкращими для мікроконтролерних систем із закритою архітектурою RISC.

Наприклад, розглянутий раніше інтерфейс RS-232 є вдалим для передачі даних між двома окремими й іноді видаленими одиницями устаткування. Але якщо знадобиться організувати взаємодію декількох однакових модулів, або складних мікросхем, по лінії зв'язку в межах однієї друкарської плати, то такий підхід матиме безліч недоліків. У зв'язку з цим сучасні виробники мікроелектронних пристроїв і мікроконтролерних систем управління пропонують нові способи вирішення завдань підключення периферійних пристроїв.

Вельми вдалою виявилася ідея, коли складні мікросхеми забезпечили спеціальною схемою управління, яка б була здатна приймати й передавати дані по двох проводах у послідовному коді.

Абревіатурою TW (Two-Wire Interface – двопровідний інтерфейс) компанія Atmel назвала свою реалізацію послідовного інтерфейсу, який був розроблений фірмою Philips для використання в комерційних аудіо-та відеосистемах і широко відомий як шина даних I²C.

Назва шини походить від скорочення IC, що розшифровується, як «Inter IC». Скорочення «IC – Integrated Circuit» – це відоме скорочення, яке розшифровується як «інтегральна схема». Тому «Inter IC bus» – це «міжмікросхемна шина». Для більшої наочності скорочення IC вирішено було записувати як I²C. Це назва добре «прижилася» в мікроелектроніці і відома в усьому світі. Як впливає з назви, TWI (I²C) використовується для передачі даних між мікросхемами по двонаправленій двопровідній лінії. У позначеннях інтерфейсів прийнято враховувати тільки сигнальні лінії, але формально двопровідний інтерфейс припускає ще і третю лінію – шину «земля». Тому інтерфейс I²C, як і UART, вимагає двопровідного з'єднання, але з обов'язковим об'єднанням «земель».

Незважаючи на те, що і RS 232, і TWI (I²C) є 8-бітовими, двонаправленими, послідовними методами обміну інформацією, I²C є дійсно «внутрішньоплатною» багатоабонентською шиною, яка включає захисні механізми вирішення конфліктів даних, що запобігає втраті цілісності даних (при створенні мережі з використанням RS 232 основною проблемою є запобігання колізіям). При цьому, на відміну від інтерфейсу RS 232, протокол I²C не потребує яких-небудь перетворень напруги або у спеціальних інтерфейсних елементах (дешифраторів адрес, стандартних логічних вентилів, необхідних для інших протоколів). У разі сумісних мік-

росхем TWI (I²C) все забезпечення, необхідне для підтримки роботи шини I²C, інтегроване в мікросхемі.

Інтерфейс (шина) TWI має ряд переваг перед іншими способами організації обміну даними. Основна перевага TWI (I²C)-шини – це простота і невисока вартість її апаратної реалізації. «Внутрішньооплатна» шина є двопровідною лінією, на яку паралельно підключаються всі керовані нею мікросхеми.

Пристрої, що підключаються до шини, повинні мати спеціальний інтерфейс I²C, який апаратним шляхом реалізує всю логіку роботи шини. При цьому немає особливих вимог до самих провідників, які складають шину. Два провідники, або дві доріжки, – це все, що необхідно для фізичного проходження сигналу. Запропонований спосіб з'єднання з малим числом ліній дозволяє відійти від багат шарової технології при збереженні мінімальної площі плати. Для дешевих систем, якими є 8-розрядні мікроконтролерні системи управління, це дуже важливо. Тому шина I²C дозволяє отримати невисоку ціну всієї мікроконтролерної системи. Для комп'ютеризованого устаткування низька вартість є дуже важливим показником.

Технологія передачі інформації за допомогою TWI (I²C)-шини дозволяє вирішувати великий спектр практичних завдань підключення до МК периферійних пристроїв, що мають різне функціональне призначення. У стандартному режимі роботи, не використовуючи при цьому допоміжні схеми (без драйверів і приймачів лінії), за допомогою шини I²C можна підключити до шини або від'єднати від неї, без впливу на інші підключені до шини інтегральні мікросхеми, 128 різних пристроїв, причому кожен з таких пристроїв може належати множині з більше тисячі різних видів мікросхем.

Ось тільки короткий перелік таких пристроїв: АЦП і ЦАП, контролери рідкокристалічних індикаторів і світлодіодних дисплеїв, різні датчики, мікросхеми незалежної пам'яті (EEPROM), контролери DIP-перемикачів, цифрові потенціометри, комутатори тощо. Досить вибрати одну або декілька мікросхем з потрібним функціональним призначенням, під'єднати їх до МК за допомогою I²C-шини і можна отримати дешеву систему з необхідними якостями. При цьому істотним чином скорочується час на розробку комп'ютеризованої системи.

Слід мати на увазі ще одну важливу обставину. Шина TWI дозволяє вирішити більшість проблем, що виникають при об'єднанні в мережі різ-

них пристроїв. Незважаючи на те, що шина I²C може працювати на високій швидкості, все ж таки послідовна суть шини добре підходить для управлінських додатків невисокої швидкодії. Оскільки шина I²C передбачає декілька режимів роботи (стандартна швидкість – 100 кбіт/с, прискорена – 400 кбіт/с, підвищена – 3,4 Мбіт/с), то за допомогою I²C вдається вирішити проблему «стиковки» пристроїв з різною швидкістю обміну інформацією. При цьому можна організувати роботу так, щоб «повільні» пристрої взаємодіяли з «повільними», а «швидкі» – із «швидкими».

До недоліків шини TWI (I²C) слід віднести складність протоколу і, відповідно, програмування.

Як і в SPI, в інтерфейсі TWI (I²C)-пристрої можуть працювати в режимі Master або Slave. Для правильної роботи один з пристроїв, що підключаються до шини, є таким, що веде, як правило, це МК. Провідний пристрій бере на себе все управління шиною. Він виробляє тактові імпульси на лінії синхронізації SCL (Serial Clock Line – лінія послідовної передачі синхроімпульсів), а також ініціює сеанси передачі інформації.

Інформація може передаватися як від провідного пристрою до веденого, так і у зворотному напрямі. В обох випадках процес передачі інформації управляється провідним пристроєм. Залежно від напрямку передачі інформації, як Master-, так і Slave-пристрій у різні моменти часу можуть виступати як передавач або як приймач. Якщо інформація передається від Master до Slave, то Master-пристрій виступає як передавач, а Slave – як приймач. При передачі інформації від Slave до Master уже Master стане приймачем, а Slave, відповідно, – передавачем.

З електричної точки зору кожен з двох виводів TWI (I²C) пристрою-мікросхеми може бути і входом і виходом. Така схемна побудова шини дозволяє не тільки легко змінювати напрям передачі даних, але й вирішувати завдання «захоплення-відпущення» шини, передачі сигналів підтвердження і т. д.

При використанні TWI (I²C) можливі два способи передачі даних: 1) передача даних від головного передавача до підлеглого приймача. У цьому випадку передавачем першим передається байт, який указує на адресу підлеглого приймача. Потім йдуть декілька байтів даних. Після кожного прийнятого байта даних підлеглий приймач повертає сигнал (біт підтвердження), що свідчить про те, що байт прийнятий;

2) передача даних від підлеглого передавача до головного приймача. При цьому способі передачі даних перший байт (адреса підлеглого

передавача) передається головним пристроєм. Потім підлеглий передавач повертає біт підтвердження. Наступні декілька байтів даних передаються підлеглим пристроєм головному, який повертає біт підтвердження після всіх прийнятих байтів, окрім останнього. У кінці останнього прийнятого байта повертається сигнал «немає підтвердження».

Загальний принцип роботи TWI (I²C)-шини такий, що він дозволяє легко змінювати напрям передачі інформації у процесі одного сеансу обміну даними. При цьому повна передача даних через TWI (I²C)-інтерфейс у принципі складається з умови початку передачі одного або декількох байтів даних, за якими слідує біт квитування, й умови завершення передачі.

Для того щоб пристрої могли обмінюватися інформацією, необхідно, щоб у всіх мікросхемах була організована певна логіка роботи. Набір правил, що визначає логіку взаємодії всіх елементів TWI (I²C)-шини, описує процес передачі даних по шині у будь-який момент часу й не допускає помилкової інтерпретації стану шини, називається протоколом TWI (I²C). Повний опис протоколу міститься в документі «The I²C-bus specification» (Специфікація I²C-шини), який міститься на сайті компанії Philips. У протоколі обумовлені правила адресації кожного пристрою.

Робота протоколу TWI (I²C) регламентується точною синхронізацією кожного провідного пристрою. Для виконання протоколу шини I²C і реалізації інтерфейсу TWI в мікроконтролері AVR використовується зовнішній відносно обчислювального ядра і пам'яті периферійний пристрій (TWI Unit).

9.2.2. Обмін даними в комп'ютеризованому устаткуванні за допомогою послідовного однопровідного інтерфейсу 1-Wire

Успішний розвиток будь-якого сучасного виробництва неможливий без використання інтегрованих комп'ютерних систем і технологій. Найважливішою частиною таких систем є підсистеми для збору даних, управління технологічним устаткуванням, контролю виробничих процесів. Особлива роль у комп'ютерних системах відводиться апаратно-програмним засобам, які «стикують» (сполучають) управляючу та обчислювальну частини системи з її унікальними периферійними пристроями або іншими засобам обміну інформацією. За допомогою цих засобів

здійснюється обмін даними між усіма частинами системи. Ці засоби обміну інформацією часто називають коротко мережами.

Вимоги до параметрів мереж відрізняються залежно від їх застосування, проте для будь-якої мережі найважливішими є адаптивність, живучість і відкритість. Під адаптивністю розуміють можливість настройки при зміні конфігурації мережі та її елементів. Живучість припускає здатність виконувати встановлені функції в умовах дії зовнішнього середовища і відмов компонентів системи. Відкритість мережі означає можливість її модернізації без порушення функціонування. Окрім цих технічних параметрів, необхідно враховувати й економічний критерій — вартість.

Відомо, що в даний час однією зі складових частин сучасного комп'ютеризованого поліграфічного устаткування є сталі мережі (шини), по яких у цифровому вигляді передаються різні дані. Вони також відіграють важливу роль на етапі додрукової підготовки, для зв'язку устаткування з комп'ютерами «верхнього рівня», коли з центрального пульта на устаткування поступає інформація, необхідна для проведення операцій друку і здійснення контролю за станом різних вузлів устаткування та ходом технологічного процесу.

Цифрові шини також важливі при обміні даними на «нижньому рівні», при включенні або виключенні різних агрегатів, при управлінні різними елементами і частинами устаткування, при передачі сигналів управління та інформації про стан і режими роботи вузлів устаткування.

Відзначимо, що для систем управління і мереж «нижнього рівня», при різних, на перший погляд, вирішуваних завданнях і областях застосування, характерні деякі загальні властивості:

- а) велика кількість точок розташування датчиків та приладів контролю за станом і режимами роботи устаткування;
- б) значна протяжність ліній зв'язку;
- в) невеликий об'єм даних, що передаються і не критичність до швидкостей передачі інформації.

Для будь-якої цифрової мережі завжди прагнуть мінімізувати витрати, необхідні для її створення і прокладення ліній, по яких інформація з різних точок поступає на приймач інформації та пристрій управління.

Після того як ознайомилися з інтерфейсом і протоколом двопровідної шини TWI (I^2C), можна відзначити, що ця шина добре підходить для передачі сигналів управління між мікросхемами, розташованими на одній і тій же платі. Оскільки максимальна протяжність TWI-шини не може

перевищувати 10 м, то, в крайньому випадку, цю шину можна застосувати в межах одного блоку. Але при цьому максимальне число мікросхем, яке можна підключити до даної мережі, становить 128. Якщо стоїть завдання з'єднати велике число мікросхем різного функціонального призначення, які знаходяться на значних відстанях одна від одної, то двопровідна шина TWI не підходить для багатьох застосувань. Це обумовлено такими її особливостями:

- а) вона не підтримує необхідну протяжність ліній зв'язку;
- б) вона не призначена для постійної зміни конфігурації мережі;
- в) шини TWI не володіють достатнім адресним простором.

Ряд інших розглянутих раніше мереж при вирішенні завдань обміну даними між частинами системи на «нижньому рівні» вимагають дуже великих інвестицій для установки й обслуговування.

У середині 1980-х років компанією Bosch був розроблений протокол CAN (Controller Area Network – мережа контролерів). У шині CAN, призначеній для контролю й управління в реальному масштабі часу, була зроблена спроба реалізувати простий і оптимальний спосіб побудови розподілених систем управління на основі одного дроту. Іншими перевагами даної шини були: можливість створення повністю синхронної системи; відключення дефектного вузла для запобігання блокуванню мережі; висока надійність. На жаль, шина CAN виявилася дорогою: наприклад, вартість мережі для автомобіля на базі шини складала близько 10 % від загальної вартості автомобіля.

Значно вищий рівень захищеності, ефективності, гнучкості в установці й обслуговуванні, а також мінімальні фінансові витрати можуть бути досягнуті, якщо при створенні системи управління, що об'єднують усі датчики в єдину мережу, застосовувати розроблений у кінці 1990-х років мережний стандарт, запропонований корпорацією Dallas Semiconductor Inc. У цьому випадку система може бути створена на основі інтерфейсу 1-Wire (однопровідної шини, що називається MICROLAN), спеціально розробленого для подібних застосувань.

Мережа MICROLAN ґрунтується на використанні зведеного до абсолютного мінімуму, тобто до однієї лінії даних і загального дроту, інтерфейсу з однопровідною шиною. Паралельне підключення до провідника декількох мікросхем з інтерфейсом MICROLAN і приєднання цього провідника до комп'ютера й утворює мережу MICROLAN.

Створюючи шину MICROLAN корпорація Dallas Semiconductor Inc поставила перед собою здавалося б нерозв'язне завдання: з'єднати між собою безліч різних пристроїв (мікросхем), що називаються вузлами мережі і розташовані на значній відстані один від одного, використовуючи всього один сигнальний дріт (звичайно для замикання ланцюга обов'язково повинен бути і зворотний, так званий «земляний» дріт). Усі вузли (мікросхеми) повинні підключатися до такої двопровідної шини паралельно. При цьому по шині, що складається всього з двох провідників, від однієї мікросхеми до іншої повинна передаватися інформація в прямому і зворотному напрямі. Крім того, передбачалося, що в разі потреби по тій же однопровідній шині можна буде здійснювати живлення підключених до лінії мікросхем. Це завдання було вирішене, і засновані на ньому мережі MICROLAN з успіхом застосовуються в комп'ютеризованих системах.

Для побудови мережі MICROLAN необхідні три складові: ведучий шини (комп'ютер або МК), двопровідний кабель та набір однопровідних пристроїв, що розрізняються за функціональним призначенням і відповідають протоколу MICROLAN.

Мережі MICROLAN притаманні такі властивості:

1) для реалізації зв'язку між комп'ютером (МК) і компонентами 1-Wire в мережі MICROLAN необхідні тільки один провідник і «земляний» дріт. Це означає, що для побудови мережі можна використовувати неекрановану виту пару або телефонний дріт. Мережа володіє практично необмеженим адресним простором (кількістю пристроїв, що підключаються) і забезпечує роботу на відстані до 300 м без додаткових повторювачів;

2) MICROLAN має стандартні КМОП/ТТЛ логічні рівні. Напруга нижче 0,8 В відповідає логічному нулю («0»), а напруга вище 2,2 В є логічною одиницею («1»). Діапазон робочої напруги складає 2,8 – 6 В;

3) у приладах MICROLAN реалізована можливість живлення від лінії зв'язку. Цей принцип живлення приладів отримав назву «паразитне живлення» (parasite power);

4) при розробці протоколу 1-Wire велика увага була приділена надійності роботи мережі. Було поставлено умову – функціонування мережі повинне відбуватися в «поганих» умовах, у складній перешкоджаючій ситуації, тобто коли поряд з мережею функціонують різні пристрої, що створюють перешкоди, істотні для цифрової мережі. При цьому ставиться та-

ка вимога: якщо контакт між ведучим шини і будь-яким приладом MICROLAN порушений, то через деякий час зв'язок обов'язково повинен бути відновлено, щоб дані не були втрачені. Якщо дані будуть спотворені, то це має бути виявлено до того, як вони будуть використані. Крім того, допускається підключення й відключення ведених елементів у процесі роботи.

Для забезпечення надійної і стійкої роботи всіх елементів у мережі MICROLAN використовуються спеціальний механізм двохетапного запису інформації із застосуванням проміжної пам'яті, так званої «блокнутої пам'яті», а також метод контрольних сум для контролю цілісності інформації, що передається. Мікросхеми пам'яті MICROLAN, призначені для роботи в мережі, не зберігають дані у вигляді єдиного масиву. Весь масив даних розбитий на окремі сторінки. Для виявлення помилок при читанні даних після передачі кожної сторінки виконується передача контрольної суми, яка формується з попередніх даних за спеціальним алгоритмом. На прийомі ведучий шини знов обчислює контрольну суму й порівнює її із значенням, взятим з мікросхеми. Якщо два значення контрольної суми не співпадають, то проводиться одне або декілька повторень читання даних і обчислень контрольної суми. При набутті співпадаючого значення контрольної суми прочитані дані вважаються правильними.

Для запису у пристрої застосовується попереднє розміщення прочитуваних даних у внутрішній буфер пам'яті. При правильності контрольної суми дані переписуються в задану область пам'яті приладу;

5) MICROLAN використовує архітектуру, в якій однопровідний інтерфейс є однопровідною мережею MICROLAN з одним ведучим шини і численними веденими. На шині повинен бути хоч би один провідний пристрій MASTER. Решта всіх пристроїв повинна бути веденою (SLAVE). При цьому всі прилади, призначені для роботи на шині MICROLAN, містять вбудований мережний контролер. Це дозволяє побудувати розподілену систему збору і зберігання інформації, яка використовує тільки одну загальну лінію даних до ведучого шини. Як ведучий може використовуватися будь-якій промисловий МК або персональний комп'ютер. Як ведучий, так і ведені є «передавачами» інформації, що дозволяє передавати дані в будь-якому напрямі, але в конкретний момент – тільки в одному. Іншими словами, передача даних є напівдуплексною та асинхронною. Провідний пристрій ініціює всі процеси передачі інформації в межах шини. MASTER може прочитати дані з будь-якого SLAVE-пристрою або за-

писати їх туди. Передача інформації від одного SLAVE до іншого безпосередньо неможлива. Швидкість передачі по мережі оптимізована для роботи на великих відстанях і з погляду простоти інтерфейсу й використання дешевих і доступних компонентів;

6) для того щоб MASTER міг звертатися до будь-якого з ведених пристроїв по шині, всі мікросхеми MICROLAN містять ідентифікаційний номер, кожен ведений пристрій – індивідуальний код (ID-код). Цей код заноситься у спеціальну область мікросхеми за допомогою лазера. Фірма-виготівник гарантує, що цей код ніколи не повториться і всі коли-небудь виготовлені мікросхеми, що містять 1-Wire-інтерфейс, завжди матимуть різні коди. Оскільки цей номер унікальний для кожного приладу, то його зручно використовувати як ідентифікатор вузла. Конфлікт ідентифікаторів вузлів відсутній, оскільки фірмою-виготівником гарантується неможливість випуску двох мікросхем з однаковим серійним номером. Побудова вихідного каскаду приладів на базі транзистора із загальним стоком дозволяє уникнути потенційних проблем;

7) можливість автоматичного виявлення факту підключення нових компонентів. Протокол 1-Wire включає спеціальну команду пошуку, за допомогою якої провідний пристрій (MASTER) може здійснювати автоматичний пошук ведених пристроїв. У процесі пошуку MASTER визначає ID-коди для всіх підключених до мережі мікросхем. Пошук відбувається шляхом поступового відсіювання неіснуючих адрес. Тому для того, щоб знайти всі пристрої, підключені до шини, їх ще називають вузлами мережі, потрібний досить значний час.

Середня швидкість пошуку елементів у мережі MICROLAN складає приблизно 75 вузлів за секунду.

Прикладом побудови мережі MICROLAN з топологією у вигляді однієї гілки з підключенням усіх приладів на одну загальну магістраль може служити система моніторингу стану і режимів роботи устаткування, стану середовища у виробничому приміщенні. У цьому випадку в різних місцях устаткування і приміщення встановлені мініатюрні датчики температури, вологості, освітленості та інші, з'єднані між собою однією двопровідною лінією і підключені до єдиного пристрою управління. До тієї ж самої двопровідної шини можуть також підключаються всі необхідні для роботи устаткування виконавчі механізми. Вони, наприклад, можуть включати і вимикати обігрівачі, освітлювальні прилади, вентилятори, електричні замки на дверях, зумери, механізми відкриття штор та будь-які інші, електричні і

неелектричні прилади, розташовані в різних місцях устаткування та приміщення.

Оскільки при використанні топології, що складається з однієї шини, виникають обмеження, викликані дуже великою сумарною ємністю або великим сумарним струмом споживання всіх підключених до шини пристроїв, то спеціально для таких випадків у стандарті мережі MICROLAN передбачена можливість галуження.

Для підключення великої кількості пристроїв без одночасного збільшення електричного навантаження в мережі MICROLAN застосовується деревовидна структура з декількома рівнями галужень, яка дозволяє підключати різні гілки мережі в міру їх потреби. Лінія даних мережі підключена одночасно до всіх приладів системи. Поворотна лінія знаходиться у провідному стані тільки для тих гілок, які задіяні в сеансі зв'язку з вибраним приладом.

Для галуження шини 1-Wire застосовуються спеціальні мікросхеми – керовані розгалужувачі, тобто перетворювачі інтерфейсу, адресовані ключі, керовані ключі-розгалужувачі). Розгалужувач управляється по тій же самій 1-Wire шині, яку він же і комутує. Перетворювач інтерфейсу приймає команди з мережі й управляє електронним комутатором. По команді з провідного пристрою шина «відгалуження» може бути підключена або відключена від основної («стволової») шини.

Якщо відгалуження підключене до основної шини (до «стовбура»), то ці дві шини є єдиними цілими.

Корпорація Dallas Semiconductor Inc випускає декілька типів адресованих ключів. Основним компонентом для утворення гілок мережі є адресований ключ. Він є трививідним пристроєм з вихідним польовим транзистором з відкритим стоком, керованим по однопровідній шині. Зокрема адресований ключ DS2405 є N-канальним польовим транзистором з відкритим стоком і вихідним струмом 4 мА, що перемикається при збігу 64-бітного реєстраційного номера з передаваною по шині адресою.

Зв'язок з пристроєм здійснюється за стандартним протоколом MICROLAN. Вихідний ключ кожного приладу може встановлюватися у відкритий або закритий стани незалежно від кількості мікросхем, підключених до лінії. Вихід кожного приладу може бути окремо визначений ведучим шини.

Для управління гілками мережі, а також як перемикач індикаторів і зовнішніх транзисторів може застосовуватися мікросхема DS2405. Вона

може визначити стан логічного рівня в місці свого підключення, у зв'язку з чим може використовуватися як дистанційний датчик стану різних перемикачів або разом із зовнішнім силовим транзистором управляти електромагнітом або двигуном. Як керований розгалужувач мережі може застосовуватися мікросхема DS2409, що має два керовані електронні комутатори, які дозволяють створити одразу два відгалуження. Вони називаються MAIN (основне) і AUX (додаткове). Крім того, мікросхема містить електронний ключ для управління сигнальним світлодіодом.

Застосування цієї мікросхеми дозволяє також уникнути припинення передачі даних, викликане приладами з «паразитним» живленням при активації гілки. Отже, мікросхема-розгалужувач дозволяє зробити в будь-якому місці однопровідної шини кероване відгалуження.

Шина може містити будь-яку кількість відгалужень. При цьому структура мережі нагадуватиме дерево. Деревовидна структура дозволяє включати різні гілки мережі в міру потреби. Решта гілок тимчасово відключається і не створює додаткового навантаження.

Останнім часом корпорація Dallas Semiconductor Inc розробила безліч нових типів мікросхем. Цей набір компонентів дозволяє побудувати повнофункціональну систему збору інформації про режими роботи і стан устаткування.

Для того, щоб мати уявлення про можливості цієї технології, відзначимо, що серед мікросхем, оснащених 1-Wire-інтерфейсом, за функціональним призначенням можна знайти аналоги майже всіх традиційно використовуваних мікросхем. Так, у традиційному корпусі можна знайти мікросхеми пам'яті (EEPROM), годинник реального часу, вимірники температури, АЦП, цифровий потенціометр, універсальний транзисторний ключ, пристрій моніторингу елементів живлення, лічильник зовнішніх імпульсів та ін. Подібний набір компонентів дозволяє побудувати повнофункціональну систему збору інформації про стан і режими устаткування, зокрема, систему обліку витрат енергоресурсів.

Відмітимо, що протокол роботи MICROLAN спеціально призначений для спрощення електричного інтерфейсу і найбільш широкої підтримки існуючого комунікаційного устаткування та устаткування з обміну даними. Швидкість передачі даних по мережі була оптимізована для умов роботи на великих відстанях, простоти інтерфейсу і використання дешевих та широко розповсюджених компонентів. Швидкість передачі даних 16 300 біт/с достатня для того, щоб забезпечити адресацію вузла й почати

передачу даних за час менше 7 мс. Швидкість передачі даних по мережі може бути зменшена до будь-якої необхідної величини шляхом введення затримки між передачею окремих бітів даних. Багато промислових МК, а також будь-який послідовний порт RS232 може легко підтримувати протокол обміну MICROLAN.

Кожна мікросхема, розрахована на роботу з 1-Wire-інтерфейсом, має два режими живлення. Перший режим – звичайний. У цьому режимі живлення подається на спеціальне виведення мікросхеми. Такий вивід є у багатьох мікросхем. Крім того, будь-яка мікросхема може житися безпосередньо від інформаційної шини. Цей спосіб отримання електроенергії називається «паразитним живленням».

Відомо, що декілька електронних (мікросхем) пристроїв, включених по схемі, це ще не 1-Wire-шина. Для того щоб вона стала такою, роботу кожного з підключених пристроїв потрібно організувати так, щоб дотримувалися правила, відповідні протоколу шини. Саме протокол визначає всі правила передачі інформації.

Протоколом роботи зазвичай є багаторівнева структура, кожен з рівнів якої призначений для виконання певних функцій. Як і в разі I²C-шини, протокол 1-Wire має декілька різних рівнів. Роботу приладів на шині MICROLAN визначають перші чотири рівні цієї структури.

Найнижчий, фізичний рівень описує, яким чином передаються окремі біти: як виконано схемне вирішення шини, які рівні напруги нуля й одиниці, як здійснюється взаємодія на рівні електричних сигналів. На цьому рівні визначаються електричні характеристики, логічні рівні напруги і загальні часові параметри протоколу обміну на шині MICROLAN.

Мережний рівень описує, яким чином йде обмін інформацією на рівні байтів. На мережному рівні виконується ідентифікація приладів MICROLAN і пов'язаних з ними можливостей мережі.

На транспортному рівні здійснюється запис і читання даних з мікросхеми. У зв'язку з тим, що склад приладів відрізняється за функціональним призначенням, команди транспортного рівня можуть сильно розрізнятися. Докладний опис команд, що виконуються кожним приладом, можна знайти в довідкових матеріалах.

Усі прилади однодротової шини є самотактованими кремнієвими пристроями. Логіка обробки часових інтервалів ґрунтується на вимірюванні й генеруванні цифрових імпульсів різної тривалості. Передача даних асинхронна і напівдуплексна. Дані можуть інтерпретуватися як ко-

манди відповідно до заздалегідь певного формату, які порівнюються з інформацією, вже збереженою в приладі, для ухвалення рішення, або можуть бути просто збережені для подальшого використання.

Усі пристрої в мережі вважаються веденими, тоді як керуючий мережею комп'ютер вважається тим, що ведуть. Це дозволяє уникнути конфліктів, пов'язаних з роботою на загальній шині декількох ведучих. Крім того, побудова вихідного пристрою всіх мікросхем на основі польового транзистора з відкритим стоком спільно з використанням алгоритмом роботи приладів дозволяє вирішити всі конфлікти, пов'язані з одночасною роботою на шині декількох ведених пристроїв.

Для надійної роботи однодротового інтерфейсу необхідно, щоб у процесі передачі інформації всіма елементами мережі строго дотримувалися часові параметри. Кожна мікросхема, підключена до мережі, самостійно виробляє всі необхідні для її роботи інтервали часу. Для ведучого пристрою в мережі ці вимоги жорсткіші, ніж для ведених. Це пов'язано з тим, що як ведучий пристрій зазвичай виступає мікроконтролер. Будь-який мікроконтролер здатний з високою точністю відпрацьовувати будь-які часові інтервали завдяки використанню кварцевого резонатора. Ведені ж мікросхеми зазвичай виконані в мікромініатюрном корпусі. Часові параметри 1-Wire інтерфейсу таких мікросхем формуються параметричними методами, без допомоги кварцу.

У системі 1-Wire логічні значення 1 і 0 подані низькими рівнями напруги. Тривалість низькорівневого імпульсу, що відповідає логічній 1, повинна бути коротше 15 мкс. Щоб мережа надійно працювала навіть у якнайгірших умовах, тривалість низького імпульсу для логічного 0 повинна бути, принаймні 60 мкс. Імпульс тривалістю 480 мкс визначений як імпульс скидання. У кінці активної частини кожного бітового інтервалу необхідний особливий інтервал часу (мінімум 1 мкс), протягом якого лінія зв'язку підтягується до верхнього рівня напруги. Він потрібний для відновлення готовності до пересилки наступного біта. Цей час (неактивна частина часового інтервалу) також повинен бути доданий до тривалості активної частини при розрахунку повного часу, потрібного для передачі одного біта.

Відзначимо, що підключення шини MICROLAN до МК не викликає проблем, оскільки вона є однодротовою. Питання виникають, якщо як ведучий використовується персональний комп'ютер (ПК). Фірмою Dallas Semiconductor випускається ряд приладів для підключення однодротової

шини MICROLAN до ПК. Щоб підключитися безпосередньо до послідовного порту і працювати через інтерфейс RS-232C застосовується драйвер послідовного порту DS2480. Він безпосередньо підключається до асинхронного послідовного порту (UART) і до будь-яких систем, що підтримують 5В RS-232C інтерфейс. Мікросхема забезпечує обмін даними на 4-х швидкостях: 115,2, 57,6, 19,2 і 9,6 Кбіт/с.

Підключення MICROLAN до паралельного порту забезпечується шинним драйвером DS1481. Це спеціалізований тактовий генератор однодротової шини. Зазвичай він використовується для підключення до паралельного порту й забезпечення з'єднання інтерфейсу з ведучим.

Сигнали “зайнято” дозволяють ведучому виконувати завдання після завершення передачі на однодротовій шині. Окрім підключення однодротової шини до стандартного послідовного порту, Dallas Semiconductor пропонує з'єднання шин MICROLAN і USB. Остання є найбільш перспективною для обміну даними між комп'ютером і множиною одночасно доступних периферійних пристроїв.

9.3. Застосування в комп'ютеризованому поліграфічному обладнанні передач даних по інтерфейсах USB, Wireless USB, протоколах Bluetooth і Wi-Fi

9.3.1. *Різновиди універсальних послідовних інтерфейсів USB*

Для реалізації середовища обміну даними між комп'ютером і периферійними пристроями в 1996 році з'явився перший затверджений варіант стандарту, який визначив застосування шини USB (Universal Serial Bus – універсальна послідовна шина). Розробка стандарту була ініційована кампаніями Intel, DEC, IBM, NEC, Northern Telecom і Compaq.

Основна мета стандарту, поставлена перед його розробниками послідовного інтерфейсу, – створити реальну можливість користувачам працювати в режимі Plug&Play з периферійними пристроями. Це означає, що повинне бути передбачене підключення пристроїв до працюючого комп'ютера, автоматичне розпізнавання їх негайно після підключення і подальша установка відповідних драйверів.

Швидкість шини повинна бути достатньою для переважної більшості периферійних пристроїв. Окрім цього, в такому інтерфейсі потрібно,

щоб живлення малопотужних пристроїв здійснювалося із самої шини. Передбачалося також, що цей інтерфейс буде зручний для використання в часто підключуваних/відключуваних приладах. Конструкція роз'ємів для USB розрахована на багатократне з'єднання/роз'єднання.

Шина USB повинна бути зручна для застосування з такими периферійними пристроями, як Flash-пам'ять, клавіатури, миші, принтери, цифрові фотокамери, модеми для звичайних телефонних ліній. У 1999 році той же консорціум комп'ютерних компаній, який ініціював розробку першої версії стандарту на шину USB, почав активно розробляти чергову версію 2.0 USB, яка відрізняється тим, що смуга пропускання шини збільшена у 20 разів, до 250 Mbits/s, що робить можливою передачу відеоданих по USB. При цьому зберігається сумісність усієї раніше випущеної периферії і високошвидкісних кабелів. Зберігається також одна з переваг USB – низька вартість контролера.

Інтерфейс USB дозволяє проводити обмін інформацією з периферійними пристроями на трьох швидкостях (специфікація *USB 2.0*):

- 1) низька швидкість (*Low Speed – LS*) – 1,5 Мбіт/с;
- 2) повна швидкість (*Full Speed – FS*) – 12 Мбіт/с;
- 3) висока швидкість (*High Speed – HS*) – 480 Мбіт/с.

Можливість використання декількох швидкостей обміну даними істотно спрощує апаратну реалізацію інтерфейсу.

Інші можливості USB виходять з її технічних характеристик:

- 1) напруга живлення для периферійних пристроїв – 5 В;
- 2) максимальний струм споживання на один пристрій – 500 мА;
- 3) відсутність необхідності в установці додаткових елементів;
- 4) можливе підключення пристроїв з різними швидкостями обміну;
- 5) максимальна довжина кабелю – 5 м.

Сигнали USB передаються по 4-дротяному кабелю: VBus = + 5В – це ланцюг живлення периферійних пристроїв, а GND – ланцюг «землі». Живлення безпосередньо від USB можливо тільки для пристроїв з малим споживанням, таких, як клавіатури, миші тощо.

Шина D+ призначена для передачі даних по шині, а шина D – для прийому даних.

Кабель шини USB зазвичай виконується як вита пара й захищається екраном. Для підключення пристроїв до шини USB використовуються роз'єми, які показані на рис. 9.2.

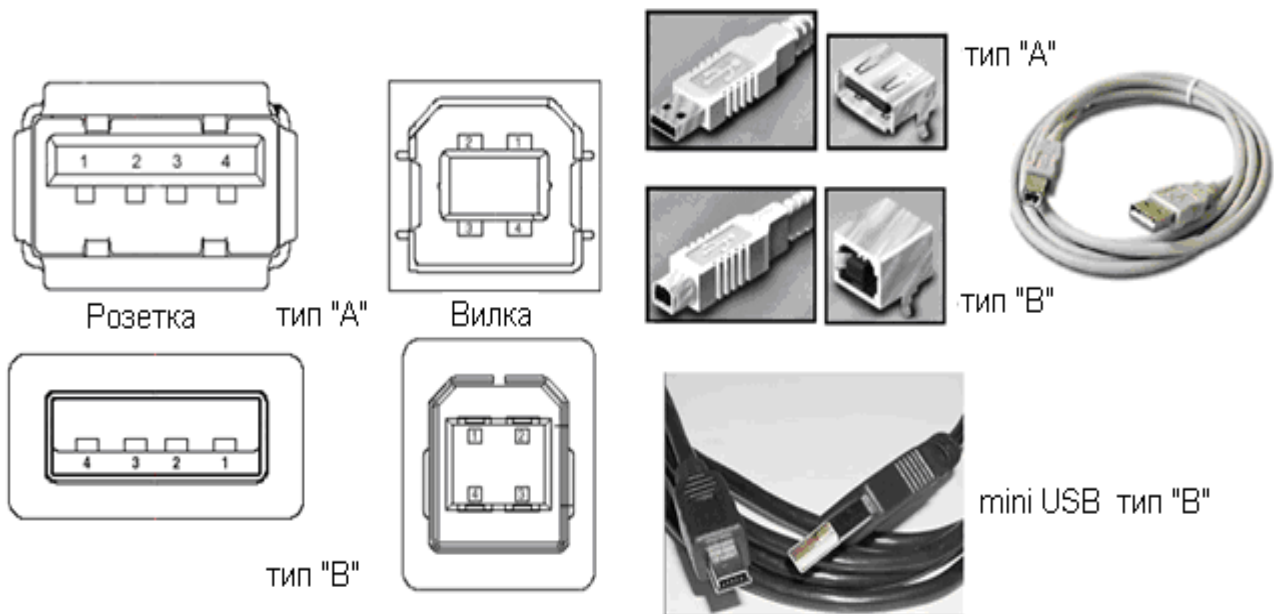


Рис. 9.2. Роз'єми USB

Роз'єми серії «А» призначені тільки для підключення до джерела, тобто до комп'ютера, або до «HUB»у. Роз'єми серії «В» призначені для підключення до периферійного пристрою. Пара роз'ємів виконана так, що неможливо підключити пристрій неправильно. Роз'єм серії «А» можна підключити тільки до активного пристрою на USB, до так званого «HUB»у, або комп'ютера, а серії «В» – тільки до власне периферійного пристрою USB. Метод з'єднання пристроїв, які обмінюються даними в мережі, називається топологією.

Топологія мережі – це схема, яка відображає розташування вузлів мережі і з'єднання їх кабелем. Топологія USB практично не відрізняється від топології локальної мережі на витій парі, що зазвичай називається «зіркою». Основна відмінність USB від топології звичайної локальної мереж, полягає в тому, що комп'ютер, або, по-іншому, *host*-пристрій, може бути тільки один. HUB може бути як окремим пристроєм з власним блоком живлення, так і вбудованим у периферійний пристрій.

З використанням USB-інтерфейсу до ноутбука можна підключити мишу, флеш-пам'ять, зовнішній оптичний привід, зовнішні аудіо-карти, TV-тюнери, принтери, сканери, цифрові фотоапарати, бездротові інтерфейси та ін.

Інтерфейс USB з'єднує між собою хост (*host* – центральний комп'ютер) і пристрої. Хост знаходиться всередині персонального комп'ютера й

управляє роботою всього інтерфейсу. Для того щоб до одного порту USB можна було підключати більш ніж один пристрій, застосовуються хаби (*hub* – концентратор, пристрій, що забезпечує підключення до інтерфейсу інших пристроїв). Кореневий хаб (*root hub*) знаходиться всередині комп'ютера і підключений безпосередньо до хосту.

В інтерфейсі USB використовується спеціальний термін «функція» – це логічно закінчений пристрій, такий, що виконує яку-небудь специфічну функцію. Топологія інтерфейсу USB є набором з 7 рівнів (*tier*): на першому рівні знаходиться хост і кореневий хаб, а на останньому – тільки функції.

Пристрій, до складу якого входить хаб і одна або декілька функцій, називається складеним (*compaund device*).

Хост – програмно-апаратний комплекс, в обов'язки якого входять:

- 1) стеження за підключенням і відключенням пристроїв;
- 2) організація управляючих потоків між USB-пристроєм і хостом;
- 3) контроль стану пристроїв і ведення статистики активності;
- 4) забезпечення підключених пристроїв електроживленням.

Хост-контролер є апаратним посередником між пристроями USB і хостом. Хост-контролер виконує фізичні транзакції з пристроями по шині USB. Транзакція на шині – це послідовність обміну пакетами між хостом і периферійним пристроєм, у ході якої може бути переданий або прийнятий один пакет даних.

Обмін даними відбувається відповідно до описів (дескрипторів) цих транзакцій, що поміщені в системне ОЗУ драйвером хост-контролера. Драйвер контролера хоста приймає від системного драйвера USB перелік транзакцій і виконує такі дії: планує виконання отриманих транзакцій, додаючи їх до списку транзакцій, витягує зі списку чергову транзакцію й передає її рівню хост-контролера інтерфейсу шини USB, відстежує стан кожної транзакції аж до її завершення. У результаті хост-контролер інтерфейсу шини USB формує кадри. Кожен кадр складається з найбільш пріоритетних посилок, склад яких формує драйвер контролера хоста. Кожна передача складається з однієї або декількох транзакцій, кожна транзакція – з пакетів, кожен пакет – з ідентифікатора пакета, даних і контрольної суми.

Хаб, концентратор, є ключовим елементом в архітектурі USB. Він виконує декілька функцій, основні з яких такі:

1) забезпечує фізичне підключення пристроїв, формуючи і сприймаючи сигнали відповідно до специфікації шини на кожному зі своїх портів і транслюючи трафік з висхідного порту на низхідних і навпаки;

2) забезпечує керований інформаційний зв'язок сегментів шини, включаючи і зв'язок сегментів, що працюють на різних швидкостях, причому кожному низхідному порту може бути селективно дозволена або заборонена трансляція трафіка;

3) відстежує стан підключених до нього пристроїв, повідомляючи хост про зміни — підключення і відключення пристроїв;

4) виявляє помилки на шині, виконує процедури відновлення й ізолює несправні сегменти шини;

5) управляє енергоспоживанням: подає живильну напругу на низхідні порти, селективно генерує сигнал припинення портів, транслює ці сигнали в різних напрямках.

Хаб дозволяє здійснити множинні підключення до одного порту, створюючи додаткові порти. Порт хаба, що підключається до хаба більш високого рівня, називається висхідним портом (*upstream port*), а порт хаба, що підключається до хаба нижчого рівня або до функції, – низхідним портом (*downstream port*). Кожен хаб має один висхідний порт, призначений для підключення до вільного порту, що є в наявності, і декілька низхідних, до яких можуть бути підключені або знову концентратори, або кінцеві пристрої, або суміщені пристрої.

У концентраторі стандарту USB 2.0 виділяють 3 функціональних блоки: контролер, повторювач і транслятор транзакцій.

Контроллер відповідає за з'єднання з хостом.

Повторювач здійснює з'єднання вхідного і потрібного вихідного порту.

Транслятор транзакцій з'явився в USB 2.0 і потрібний з міркувань сумісності з попередніми версіями.

Частина USB-пристрою, яка є одержувачем або відправником інформації, що передається по шині USB і яка має унікальний ідентифікатор, називається *кінцевою точкою* (*endpoint*). Це звичайно буфер, тобто пам'ять або регістр, що зберігає декілька байтів. Дані, що зберігаються в кінцевій точці, можуть бути або прийнятими даними, або даними, які чекають передачу.

У хості також присутній буфер для прийому і передачі даних, але відсутні кінцеві точки. Будь-який USB-пристрій має кінцеву точку нульового

рівня. Ця точка дозволяє хосту опитувати USB-пристрій з метою визначення його типу і параметрів. Додаткові точки можуть працювати тільки на прийом даних від хосту (вхідні точки, IN) або на передачу даних хосту (вихідні точки, OUT).

Усі передачі даних по інтерфейсу ініціюються хостом. Дані передаються у вигляді пакетів. В інтерфейсі USB використовується декілька різновидів пакетів:

1) пакет-ознака, або пізнавальний пакет (*token packet*), що описує тип і напрям передачі даних, адреси пристрою і порядковий номер кінцевої точки (КТ-адресована частина USB-пристрою);

2) пакет з даними (*data packet*), що містить дані, що передаються;

3) пакет узгодження (*handshake packet*), що призначений для повідомлення про результати пересилання даних.

В інтерфейсі USB використовуються декілька типів пересилок інформації:

1) управляюче пересилання (*control transfer*), що використовується для конфігурації пристрою, а також для інших специфічних для конкретного пристрою цілей;

2) потокове пересилання (*bulk transfer*), що використовується для передачі великого об'єму інформації;

3) пересилання з перериванням (*interrupt transfer*), що використовується для передачі відносно невеликого об'єму інформації, для якого важливе своєчасне її пересилання. Має обмежену тривалість і підвищений пріоритет щодо інших типів пересилань;

4) ізохронне пересилання (*isochronous transfer*) – потокове пересилання реального часу. Інформація, що передається таким чином, вимагає реального масштабу часу при її створенні, пересиланні і прийомі.

Потокові пересилання характеризуються гарантованою безпомилковою передачею даних між хостом і функцією за допомогою виявлення помилок при передачі й повторного запиту інформації.

У зв'язку з тим, що в інтерфейсі USB реалізований складний протокол обміну інформацією, у пристрої з'єднання з інтерфейсом USB необхідний мікропроцесорний блок, що забезпечує підтримку протоколу. Тому основним варіантом при розробці пристрою з'єднання є застосування мікроконтролера, який забезпечуватиме підтримку протоколу обміну. У даний час усі основні виробники мікроконтролерів випускають продукцію, яка має у своєму складі блок USB.

У даний час інтерфейс USB дуже популярний. Це пояснюється простотою використання – підключай і застосовуй без перезавантаження комп'ютера після підключення пристрою. На жаль, для розробників комп'ютеризованого устаткування впровадження USB у їх пристрої утруднене, оскільки, порівняно з RS232, USB – складніший протокол. Крім того, потрібні відповідні драйвера. Тому більшість пристроїв, виготовлених дрібними виробниками, підключаються, як і раніше, через RS232. Цей інтерфейс є одним із найстаріших і має хорошу підтримку з боку операційних систем. Але останніми роками інтерфейс RS232 усе рідше встановлюють на нові комп'ютери. У таких випадках допомагають тільки PCI-плати розширення з цим інтерфейсом.

Сьогодні впровадження USB у різні зовнішні пристрої здійснюється двома способами:

1) спочатку використовується мікроконтролер, який підтримує інтерфейс USB. Потім, знаючи, як працює USB, пишеться програмне забезпечення для МК. Крім того, необхідно створити драйвер для ПК, тому що операційна система не знайде пристрій у стандартних драйверах пристроїв USB;

2) друга можливість полягає у використанні деякого універсального конвертера між USB та «іншим» інтерфейсом. Цей «інший» інтерфейс залежить від типу конвертера: тут використовуються в основному RS232, 8-бітова шина даних, шина I²C. У цьому випадку не потрібно спеціального вбудованого програмного забезпечення, адже фактично не потрібно знати, як працює USB, і немає необхідності в написанні драйвера, адже продавець конвертера пропонує безкоштовні драйвера. Недолік такого рішення полягає у високій ціні конвертера.

Багато комп'ютерних експертів характеризують USB не інакше як найуспішніший дротовий комп'ютерний інтерфейс в історії персональних комп'ютерів. Це найбільш універсальний, зручний і затребуваний інтерфейс, який використовуються сьогодні для підключення і мишей, і клавіатур, і принтерів, і жорстких дисків, і DVD-приводів, та іншої комп'ютерної периферії. Такий значний успіх змусив задуматися про перенесення стандарту USB і у світ бездротових технологій. Ідея, що стосується позбавлення звичного інтерфейсу USB від проводів у світлі модної сьогодні мобільності, виглядає цілком закономірною й обгрунтованою.

Оскільки у всьому світі сьогодні особлива увага приділяється впровадженню бездротових технологій зв'язку та інтерфейсів, хотілося б при

цьому, щоб бездротові інтерфейси успадкували від своїх дротових аналогів лише найкраще. Тим часом використовуваний набір локальних комп'ютерних інтерфейсів – усього того, що працює на відстані декількох метрів, наприклад в межах одного відділу компанії або невеликої будівлі, й забезпечує обмін даними і/або зв'язок будь-якої електроніки з периферією або один з одним, розвивався тривалий час не так успішно.

Бездротовий інфрачервоний інтерфейс IRDA, що використовується для з'єднання між собою комп'ютера і периферійних пристроїв, розташованих на обмеженій території, тихо пішов у минуле разом з портами COM та LPT, так і не отримавши широкого визнання.

Не виправдала очікувань з обслуговування бездротового доступу до локальних комп'ютерних мереж і технологія Bluetooth, яка застосовується сьогодні як бездротова гарнітура мобільних телефонів.

Технологія Wi-Fi надає бездротовий доступ на великих відстанях, поза зоною прямої видимості між антенами абонентської і базової станцій, що не зовсім підходить для локальних комп'ютерних інтерфейсів.

Не випадково, компанія Intel та інші галузеві лідери на початку 2004 року створили консорціум Wireless USB Promoter Group, основним завданням якого стало просування високошвидкісної технології для бездротового підключення зовнішніх пристроїв — Wireless USB (WUSB). Wireless USB Promoter Group розробила специфікації для технології Wireless USB з пропускнуою спроможністю 480 Мбіт/с, які підтримують ту ж модель використання і ту ж архітектуру, що і дротова технологія USB 2.0, яка сьогодні застосовується як високошвидкісний засіб підключення зовнішніх пристроїв до персональних комп'ютерів.

Крім сектору локальних інтерфейсів, що забезпечують обмін даними і/або зв'язок будь-якої електроніки з периферією або один з одним, у бездротового (Wireless) USB є ще одна важлива місія, з якою не під силу справитися ні Bluetooth, ні Wi-Fi. Мова йде про так звану концепцію цифрового будинку, для реалізації якої знадобиться зручна, надійна і при цьому недорога інфраструктура з високою пропускнуою спроможністю. Передача цифрових аудіо- і відео- потоків між численними пристроями, що формують середовище цифрового будинку, вимагає величезної пропускнуої спроможності. Ні технологія Bluetooth, максимальна швидкість якої рівна 3 Мбіт/с, ні Wi-Fi, до 54 Мбіт/с, забезпечити її не можуть, і не пристосовані для одночасного транспортування декількох високошвидкісних потоків на невеликі відстані в умовах жорстких обмежень на випро-

мінювану потужність. А ось Wireless USB завдяки своїм технічним характеристикам і архітектурним особливостям дозволить користувачам об'єднати в домашній мережі всю мультимедійну апаратуру та побутову техніку.

У функціональному відношенні пристрої з інтерфейсом Wireless USB повинні успадкувати від своїх дротових аналогів усі їх переваги, включаючи високу швидкість обміну до 480 Мбіт/с версії USB 2.0, і додати до них ще одну цінну якість — повну відсутність проводів, а отже, високу мобільність.

Платформа Wireless USB є розвитком технології UWB (Ultra Wideband – надширока смуга), яка розроблялася дослідницькою групою 3A підкомітету стандартів IEEE 802.15.3. Основна ідея UWB, що дала назву даній технології, базується на використанні смуги спектру, ширина якої складає не менше 25 % величини центральної частоти сигналу, тобто більше 500 МГц. У цьому відношенні UWB, яка для передачі даних використовує частоти з діапазону 3,1 – 10,6 ГГц, принципово відрізняється від так званих вузькосмугових технологій – там ширина смуги не перевищує 10 % від центрального номіналу, а на практиці виявляється ще менше, наприклад, у мережах 802,11b, що застосовують діапазон частот 2,4 ГГц, ширина каналу складає всього 22 МГц.

Застосування надширокого частотного діапазону дозволяє значно збільшити пропускну спроможність каналу передачі даних при вкрай низькій випромінюваній потужності, і це є ключовим моментом для побудови персональних бездротових мереж, правда, мала потужність істотно обмежує дальність такого зв'язку. Технології UWB як найкраще підішли до використання у Wireless USB для бездротового підключення зовнішніх пристроїв локальної мережі. Малий радіус дії передавального UWB-обладнання дозволяє повторно задіювати одну й ту ж область частотного спектру, тому пристрої, що розташовані в сусідніх приміщеннях і відносяться до різних кластерів (так називається сукупність пристроїв, що безпосередньо обмінюються трафіком), можуть передавати дані по одному каналу і при цьому не заважати один одному. Крім того, використання надширокосмугового сигналу означає, що навіть в одному приміщенні декілька кластерів UWB можуть функціонувати одночасно, майже не створюючи перешкод ні один одному, ні іншим пристроям. Надширокосмуговий сигнал UWB ніби розмазується у вигляді своєрідного білого шуму по широкому спектру частот і фактично не впливає на роботу різ-

них засобів зв'язку, оскільки піковий рівень випромінювання реально не перевищує ефірного рівня шумів. До того ж явна перевага UWB перед іншими бездротовими технологіями, які є вузькосмуговими полягає у прогнозованій дешевизні готових виробів.

Широкосмугові UWB-передавачі можуть модулювати сигнал, що передається, без будь-яких дорогих компонентів і не потребують точного настроювання параметрів. Звичайно, архітектура приймаючих пристроїв декілька ускладниться, але використання процесорів цифрової обробки сигналів дозволить утримати ціни рішень у розумних межах. Слід також мати на увазі високу стійкість мереж UWB до перешкод в ефірі і до заганяння сигналу при множинних віддзеркаленнях. Більш того, за рахунок наявності в мережах UWB декількох шляхів розповсюдження сигналу можна поліпшити якість прийому.

Розробники UWB визначали три основні сфери застосування даної технології: бездротове підключення периферійних пристроїв до настільних і портативних комп'ютерів, високошвидкісна передача мультимедіа-контенту (*content* – зміст, вміст) між комп'ютерами і компонентами цифрового будинку (цифровими камерами, відеокамерами, MP3-плеєрами та ін.) і обслуговування власників мобільних терміналів. Крім того, UWB може використовуватися при побудові невеликих локальних мереж, наприклад, для збору інформації з різних датчиків, при організації високошвидкісного доступу до бездротових мереж загального користування і навіть у додатках, що вимагають визначення місцеположення об'єкта (дана технологія дозволяє досягти точності близько 30 см).

Базовими елементами інфраструктури WUSB є WUSB-хост і радіальні лінії до USB-пристроїв у топології «зірка» (у топології «зірка» всі пристрої «приєднані» до центрального компонента – *host*). У такій топології хост-контролер ініціює будь-який обмін даними між підключеними до нього пристроями (*Device*), виділяючи часові інтервали і смугу пропускання кожному підключеному пристрою. Кожному пристрою, що знаходиться в радіусі дії, виділяється окремий канал зв'язку. Останнє особливо важливе, якщо доводиться передавати великі дані з великою швидкістю. Один «нормальний» WUSB-хост підтримує підключення до 127 пристроїв.

Описані з'єднання відносяться до типу «точка-точка» і здійснюються між WUSB-хостом та WUSB-пристроєм. За обмін даними між пристроями відповідає хост. Кожен пристрій WUSB підтримує один або декілька

каналів для зв'язку з хостом. У даній топології хост-контролер (центральний комп'ютер) ініціює будь-який обмін даними між підключеними до нього пристроями, виділяючи часові інтервали і смугу пропускання кожному підключеному пристрою. Подібна група пристроїв називається кластером.

USB-хост з логічно підключеними до нього USB-пристроями утворює *неформальний USB-кластер*, що підтримує підключення до 127 пристроїв. Зо аналогією з дротовим USB-пристроєм Wireless USB володіють власною адресою, що отримується при підключенні.

У мережі з Wireless USB існують також не зовсім «нормальні» хост-контролери – це безпосередньо самі пристрої. Вони володіють обмеженим переліком можливостей, проте також можуть приймати й передавати дані від інших джерел. Таким чином, виходить подібність стільникової мережі, коли інформація від видаленого джерела може пройти через декілька пристроїв, після чого потрапить на головний хост, який передасть її безпосередньо на комп'ютер, що зробив запит.

Як впливає з назви, безпроводний USB-інтерфейс призначений для підключення різних периферійних пристроїв, таких, як принтери, зовнішні жорсткі диски, звукові карти, мультимедійні плеєри і навіть монітори до комп'ютера, безпроводним способом. Підключення можна реалізувати через вбудований або зовнішній адаптер.

Концентратори (*hub*) у визначенні Wireless USB відсутні внаслідок їх повної незатребуваності в такій архітектурі. WUSB-кластери співіснують у просторовому середовищі, що перекривається, з мінімальними взаємними перешкодами, що дозволяє функціонувати декільком WUSB-кластерам у межах загальної зони дії радіовипромінюючих пристроїв.

Величезна перевага Wireless USB — це повна сумісність з оригінальним дротовим стандартом. Тут доречна аналогія з LAN (Local Area Network – локальна мережа): точка доступу Wireless USB підключається до дротової локальної мережі за допомогою найзвичайнішої витої пари, після чого всі пристрої, що знаходяться в радіусі її дії, можуть спокійно користуватися ресурсами всієї мережі, а не тільки безпроводною. Оскільки Wireless USB сумісний з дротовою версією USB, у нього є можливість створювати прозорі мости на дротові USB-пристрої і хост-контролери, тобто організувати передачу даних між двома кластерами. Така подвійна модель використання Wireless USB, де будь-який пристрій може дістати обмежені можливості хост-контролера, базується на розширенні

USB-протокола USB-On-The-Go. У ранніх версіях дротового USB такої можливості не було, а з'явилася вона тільки в USB 2.0.

Головною особливістю бездротового інтерфейсу Wireless USB є швидка й ефективна масштабованість трафіку, тобто можливість зміни швидкості потоку даних, що передаються. Так, залежно від відстані між хостом і пристроєм швидкість обміну даними може миттєво змінюватися в межах від 53,3 до 480 Мбіт/с.

Слід мати на увазі, що бездротова технологія WUSB у перспективі володітиме дуже надійним захистом трафіку від несанкціонованого доступу на рівні дротового стандарту USB 2.0. У процесі аутентифікації WUSB підтримує шифрування з відкритими ключами, а при передачі даних буде застосовано шифрування AES-128 з використанням алгоритму CBC-MAC (Cipher-Block Chaining with Message Authentication Code Protocol) – це стандартний потоковий криптоалгоритм із застосуванням блоків AES (високошвидкісне AES-шифрування широко використовується в VPN-мережах).

Архітектура шифрування при змішаних дротових/бездротових USB-з'єднаннях також припускає шифрування трафіку, що проходить по проводах. Це дозволяє уникнути плутанини і помилок при сортуванні трафіку на дротовій і бездротовій.

Що стосується програмної підтримки Wireless USB на рівні операційної системи, то тут проблем теж не буде, оскільки компанія Microsoft брала участь у розробці специфікацій WUSB і як ніхто інший зацікавлена в реалізації підтримки стандарту на рівні своїх платформ.

На сьогодні вже доступні нормальні модулі Wireless USB і пристрої з його підтримкою. Це такі самі пристрої, які підключаємо через звичайний роз'єм USB: принтери, сканери, фотоапарати, мишки, зовнішні жорсткі диски, КПК (кишеньковий персональний комп'ютер, або PDA-Personal Digital Assistant) тощо. WUSB дозволяє перенести можливості такої популярної дротової послідовної шини на бездротові рейки.

При уважному вивченні можливостей сучасних бездротових технологій можна відмітити, що інтерфейсів багато, але немає жодного, який був би спеціально пристосований для обміну могутніми потоками інформації (мультимедійного контенту) на близькій відстані, тобто щось подібне до дротових USB і FireWire.

Наступне питання: як розмістити з великою пропускною спроможністю канал і достатньо широкопasmовий інтерфейс, якщо нині частотні ді-

апазони і без цього більш ніж завантажені. Єдиний розумний вихід – використання надширокопосмугової модуляції (UWB, UltraWideBand) з низькою спектральною щільністю сигналу. При цьому виявляється вельми розумним застосування модуляції з мультиплексуванням по ортогональних носійних частотах (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing). У разі використання OFDM у поєднанні з декількома частотними діапазонами, отримуємо багатосмугову технологію MultiBand OFDM, що має значні переваги перед варіантами порівняно з вузькою смугою.

При MultiBand OFDM сигнал ніби «розмазується» у вигляді своєрідного білого шуму по широкому діапазону частот. Використання виділеного для UWB на вторинній основі спектру частот фактично не впливає на роботу інших засобів зв'язку, оскільки піковий рівень випромінювання практично не перевищує рівня шумів, що вже існує в цьому діапазоні.

У разі застосування MultiBand OFDM спектральна ділянка шириною 7,5 ГГц розділений на п'ять каналів (Band Group#) і декілька окремих 528 МГц піддіапазонів (Band#) у кожному каналі. У результаті виходить 14 піддіапазонів шириною 528 МГц кожен, згрупованих у 5 частотних ділянок. Сенс саме такого ділення на канали і піддіапазони не випадковий і є відповідним, оскільки дозволяє добитися надійної передачі даних і високої перешкодостійкості, плюс використовувати і без того невелику потужність передавача цілеспрямовано у вузькій ділянці. Слід особливо підкреслити, що кожен з 14 піддіапазонів стосовно стандарту Wireless USB володіє можливістю підтримки обміну даними зі швидкістю до 480 Мбіт/с. За рахунок розділення спектру на канали і піддіапазони є достатньо можливостей для маніпулювання використовуваними частотами в межах кожної держави. Можливість динамічного або статичного підключення тих або інших ділянок дозволяє задовольнити вимоги будь-яких національних комітетів електрозв'язку.

У спрощеному вигляді інтерфейс Wireless USB можна описати таким чином: стандарт має на увазі використання двох основних «шарів» для обміну даними – транспортного і фізичного рівнів. Транспортний рівень базується на згаданій вище надширокопосмуговій (UWB) технології; фізичний є рівнем формування середовища передачі даних. Базовим елементом – «квантом» для WUSB-обміну – є так званий OFDM Symbol – OFDM-посилання даних зі стандартною довжиною 312,5 мс. Кожне OFDM-посилання «шириною» 4 МГц вміщає в себе 100 «тональних» посилок даних. При цьому варто підкреслити, що формат посилок зали-

шається незмінним для будь-якої швидкості обміну даними, змінюється тільки «тональність» модуляції в посиленнях і між ними, що якраз й відображає різні бітрейти потоку даних і різні рівні стійкості передачі. Шість послідовних посилень формують у результаті базовий пакет тривалістю 1,875 мкс, який, у свою чергу, згодом перетворюється в конкретні біти даних.

Частотно-часові кодеки (TFC, Time Frequency Codecs) дозволяють формувати й розносити пакети як по декількох діапазонах каналу, так і передавати їх у єдиному діапазоні. Кожен UWB-пакет формується з певної кількості компонентів, але кінцева його довжина залежить від швидкості обміну даними. Для стандартотворюючого WiMedia PHY підтримка швидкостей обміну даними 53,3 Мбіт/с, 106,7 Мбіт/с і 200 Мбіт/с є вимогою; решта швидкостей – 80 Мбіт/с, 160 Мбіт/с, 320 Мбіт/с, 400 Мбіт/с і 480 Мбіт/с – є опціональними. Обов'язковою вимогою є підтримка першого каналу з трьома першими діапазонами.

Канал Wireless USB є тривалою послідовністю зв'язаних управляючих пакетів даних, що випромінюються хостом в обумовлених стандартом часових рамках. Часові рамки каналу WUSB обумовлені у специфікаціях каналів MBOA і формуються командами управління MMC – Micro-schedule Management Commands.

Передача даних з використанням протоколу Wireless USB заснована на тих же типах трансферів, що і дротовий USB. Проте у зв'язку з підвищеною можливістю виникнення помилок протокол Wireless USB визначає декілька інший тип ізохронної передачі даних, що включає пакети handshake для підтвердження доставки даних і деяке буферизування, що дозволяє підвищити надійність роботи ізохронного каналу.

Базова структура, використовувана для реалізації протоколу Wireless USB, є послідовністю команд MMC з набором ув'язнених у ній інформаційних елементів, плюс фаза ідентифікації до появи наступної команди MMC. Пам'ятаючи про завдання збереження максимальної зворотної сумісності з традиційним дротовим інтерфейсом USB 2.0, розробники організували транзакції (способи обміну даними) за його образом і подобою, включаючи сигнальні події (з'єднання, роз'єднання, тимчасове припинення обміну, відновлення тощо), особливості побудови протоколу організації транзакцій та ін.

Кожен Wireless USB-пристрій, так само як і його драйвери, володітимуть власною системою управління енергоспоживанням, без участі хост-контролера.

Необхідно також відзначити те, що інтерфейси USB настільки щільно увійшли в наше життя, що ми приймаємо їх як належне. Найімовірніше, що найближчим часом почнеться інтенсивний частковий перехід на використання Wireless USB. Уже з'явилася перша хвиля роздрібних продуктів – модулів, що вбудовуються в готові вироби з підтримкою цього стандарту, а саме: ноутбуків, хабів і «подовжувачів».

Наступна хвиля рішень з підтримкою буде пов'язана з пристроями з контролерами, вже інтегрованими в чіпсети. Серед них слід виділити цифрові відеомагнітофони, плеєри і телевізори; принтери, компактні цифрові камери, PMP/MP3-плеєри, зовнішні HDD, мобільні телефони, старт-фони і т. д. Серед рішень Wireless USB наступного покоління – з інтегрованими контролерами – слід зазначити такий цікавий варіант, як цифрова камера від компанії Samsung.

Слід мати на увазі, що в рамках просування стандарту Wireless USB група Wireless USB Promoter Group займається розробкою стандарту Wireless USB 1.1, який врахує всі «вузькі місця» нинішньої версії. Максимальна продуктивність інтерфейсу стандарту Wireless USB 1.0 досягає 480 Мбіт/с на відстані до 3 м. Саме цей параметр у майбутній версії стандарту буде збільшений до 1 Гбіт/с! Крім цього, у версії Wireless USB 1.1 більше уваги буде приділено більш високочастотним діапазонам UWB, тобто тим, що розташовуються вище 6 ГГц. Це в сукупності з новими режимами енергозбереження – Sleep, Listen, Wake, Conserve – забезпечить велику економію витрати батарей. У плані спрощення використання інтерфейсу у версії Wireless USB 1.1 передбачається реалізація режиму, коли для ідентифікації буде достатньо лише розмістити пристрій у безпосередній близькості від хосту, внаслідок чого відбудеться миттєве розпізнавання, без необхідності введення додаткових ручних установок, тобто в повній аналогії з дротовим USB.

9.3.2. Різновиди універсальних послідовних інтерфейсів Wi-Fi і Bluetooth

Одним з головних критеріїв мобільності сучасних пристроїв обміну інформацією є наявність зовнішнього інтерфейсу бездротового зв'язку.

У даний час найбільшу популярність у мобільних системах отримали протоколи WiFi (стандарт IEEE 802.11a/b/g/n) і Bluetooth (стандарт IEEE 802.15.1). WiFi є технологією, що забезпечує безпроводний обмін даними з великою швидкістю (108 Мбіт/с) на середніх відстанях. Bluetooth – технологія передачі даних із середніми швидкостями (до 3 Мбіт/с) на малі і середні дистанції, а також технологія бездротових локальних мереж.

Розглянемо спочатку Wi-F. Wi-Fi – це абревіатура від Wireless Fidelity – дослівно «бездротова точність, відданість». Таку назву отримав стандарт бездротової передачі даних по радіоканалах IEEE 802.11b. Для передачі даних Wi-Fi використовує частоту 2,4 ГГц. Швидкість передачі даних становить 54 Мбіт/с, проте ведуться роботи, щоб забезпечити швидкість передачі даних 320 Мбіт/с. Це технологія, яка, перш за все, забезпечує комп'ютеру, ноутбуку, КПК або смартфону (мобільному телефону з додатковими функціями КПК) швидкий і зручний безпроводний зв'язок.

На сьогодні Wi-Fi вважається однією з перспективних і оптимальних за співвідношенням «ціна-якість» технологій в Інтернет-індустрії. Стандарт Wi-Fi дозволяє надавати високошвидкісний доступ до всіх ресурсів мережі Інтернет як корпоративним клієнтам, так і власникам ноутбуків та кишенькових комп'ютерів. У зоні покриття мережі Wi-Fi можливе підключення будь-якого пристрою, оснащеного модулем, що підтримує стандарт IEEE 802.11. Технологія забезпечує одночасну роботу в мережі декількох десятків активних користувачів. При цьому швидкість передачі інформації для кінцевого абонента може досягати 54 Мбіт/с.

Wi-Fi організуються на базі власної широкосмугової мережі передачі даних. Використання цифрових методів обробки й передачі інформації, застосування сучасного устаткування покращують технічні параметри зв'язку, забезпечують її безпеку і гарантують стійкий високошвидкісний доступ в Інтернет. Користувачі можуть переміщатися між точками доступу по території покриття мережі Wi-Fi, залишаючись на зв'язку. Мобільні пристрої, оснащені клієнтськими Wi-Fi приймально-передавальними пристроями, можуть підключатися до локальної мережі й одержувати доступ в Інтернет через точки доступу (хотспоти).

Прикладом використання технології Wi-Fi може служити багатофункціональна бездротова 2,4 ГГц (стандарт IEEE 802.11g) Інтернет-камера D-Link DCS-950G, яку можна застосовувати в системі контролю безпеки, що створена для використання в невеликому офісі або будинку.

Камера підключається до широкосмугового каналу мережі Інтернет або локальної мережі й забезпечує високоякісне видалене аудіо- та відеоспостереження. Доступ і управління камерою здійснюються з використанням Інтернет-браузера.

Стандарт Wi-Fi був розроблений у кінці 1990-х років. Попит на Wi-Fi-компоненти постійно зростає. Wi-Fi зручний і оптимальний за співвідношенням «ціна-якість». Він прийшов на зміну громіздким та незручним базовим станціям, які, крім своєї високої вартості, вимагали достатньо високої кваліфікації користувача.

Корпорація Microsoft приступила до випуску власних бездротових пристроїв, що використовують для роботи стандарт Wi-Fi. Спочатку Wi-Fi замислювався як стандарт для організації корпоративних мереж, як альтернатива Ethernet, що дало йому ряд переваг, ураховуючи його достатньо високу пропускну спроможність і дальність дії до 300 метрів. Дальність дії дозволяє вирішити багато проблем, пов'язаних з прокладенням кабелю у важкодоступних місцях.

Для організації мережі на основі Wi-Fi необхідна установка однієї або декількох базових станцій, а також мережної карти з антеною в кожен комп'ютер. В умовах відсутності капітальних стін на шляху розповсюдження сигналу можна говорити про відстані передачі даних, близьких до 100 метрів. За наявності антени підвищеної потужності дальність і швидкість зв'язку легко можна збільшити. При цьому ціни на адаптери і точки доступу для Bluetooth та Wi-Fi порівнянні, але перший можна застосовувати лише для організації низькошвидкісної мережі в рамках однієї кімнати.

Із самого початку Wi-Fi почав ділити сфери впливу в області мобільних пристроїв із ще одним безпроводним стандартом – Bluetooth. Цей стандарт, що з'явився в 1994 році в компанії Ericsson, спочатку розроблявся для зв'язку головної гарнітури з мобільним телефоном. Як і у випадку з Wi-Fi, Bluetooth пророкували велике майбутнє.

Так, якщо вірити обіцянкам, то найближчим часом модулі бездротового зв'язку Bluetooth з'являться у всіх пристроях, включаючи холодильники і мікрохвильові печі. Проте поки Bluetooth надає користувачеві зв'язок зі швидкістю 800 kbps і радіусом дії до 10 метрів, що, звичайно, не йде в порівняння з Wi-Fi.

Стандарти бездротової передачі даних по радіоканалах (стандарт IEEE 802.11) – це, по суті, просто Radio Ethernet, тобто безпроводний ва-

ріант звичайного Ethernet, який став останнім часом стандартом де-факто в області локальних мереж. Не дивлячись на все сказане, технологію Wi-Fi поки можна назвати зрілою тільки з дуже великою натяжкою. Її властивий ряд недоліків:

- 1) в останній на сьогоднішній день версії специфікації Wi-Fi відсутня така важлива річ, як роумінг;
- 2) до кінця не вирішені питання сумісності;
- 3) збільшується небезпека;
- 4) практично відсутні сертифіковані фахівці в області бездротових мереж.

Слід також ураховувати, що в боротьбі за споживача на ринку надшвидкого зв'язку загострюється конкуренція. У стандартів GSM і UMTS з'явився серйозний супротивник W-LAN, який дозволяє володарям ноутбуків виходити в Інтернет з будь-якого місця, що знаходиться в зоні дії так званих Hot spots, – колективних точок бездротового доступу на базі спеціальних радіопередавачів. Wireless LAN – це новий спосіб надшвидкого зв'язку.

Звичайні на сьогоднішній день стандарти мобільного зв'язку передають дані зі швидкістю до 11 мегабіт за секунду. Нова технологія дозволяє досягти 54 мегабіти за секунду. Такі швидкості не під силу ні GSM, ні UMTS. Хоча радіус цих зон не перевищує двохсот метрів, все ж таки Hot spots стають дуже популярними.

Пристрій бездротового зв'язку Wireless LAN Multiport W200 легко підключається до будь-якого ноутбука Compaq із серії EVO безпосередньо в кришку, замість заглушки, що дозволяє використовувати його без збільшення розмірів і ваги ноутбука (пристрій важить близько 10 г). За допомогою нього можна користуватися локальною мережею в офісі, не захаращуючи робоче місце зайвими проводами, за умови, що в мережі присутні інші комп'ютери з пристроями бездротового зв'язку. А також можна користуватися Інтернетом з будь-якої точки, що знаходиться в зоні дії, так званих Hot spots, тобто колективних точок бездротового доступу до Інтернету, або при наявності зв'язку з іншим комп'ютером, що підключений до Інтернету й має пристрій Wireless LAN.

WLAN є у багатьох відношеннях зручною для застосування в устаткуванні, оскільки існує величезна кількість додатків у промисловій автоматизації, які вимагають передачі даних. У цих додатках промислової автоматизації також затребувані технології WLAN. Причому технологічний

прогрес у багатьох сферах приводить до істотного зростання об'ємів даних, що передаються. Одна з таких сфер – охоронні системи. Для передачі відео- і аудіоінформації потрібна висока пропускна спроможність, і для таких систем, мабуть, єдиним виходом може служити використання технології WLAN. Зручним для охоронних систем також є можливість організації точок «тривожного зв'язку», телефонного повідомлення з диспетчерськими і наглядовими пунктами. Як приклад WLAN можна привести функціонально закінчені пристрої для промислових застосувань, призначені для монтажу в шафи.

Було розглянуто декілька класів апаратного забезпечення бездротових мереж WLAN для додатків промислової автоматизації, охоронних систем тощо. Радіочастотна частина пристроїв має схожі характеристики, а ось решта параметрів визначається використаними виробником елементною базою і рівнем відробітку вбудованого мікропрограмного забезпечення. У будь-якому випадку рішень досить багато, їх можна комбінувати, і те, що буде використовуватись у вашій системі, диктується вибором оптимального співвідношення між вартістю та забезпеченням вимог технічного завдання.

Розглянемо також Bluetooth («Блакитний зуб»), який став одним з перших стандартів в області бездротових мереж з малим радіусом дії (персональних мереж передачі даних). Bluetooth був розроблений консорціумом фірм – виробників мобільних електронних пристроїв. Стандарт набув достатньо широкого розповсюдження, він підтримується IEEE під назвою IEEE.802.15.1. Розглянемо стисло принципи першого стандарту Bluetooth.

Загальний опис бездротової мережі з малим радіусом дії доцільно почати з архітектури Bluetooth і її основних елементів, що є сукупністю засобів, здатних вести обробку інформації та реалізовувати функції взаємодії.

Архітектура мереж Bluetooth може бути побудована як «точка-точка», так і «точка-багатоточка». Кожному виробу з Bluetooth при виготовленні привласнюється унікальна 48-розрядна адреса. Базова одиниця системи Bluetooth – пікомережа. У кожному пікомережу входить один пристрій-контролер (К) пікомережі і до 255 крайових пристроїв (КП). Одночасно можуть бути активні тільки контролер і 7 КП. Останні знаходяться у стані парковки до команди активізації від контролера. Пікомережі

можуть взаємодіяти між собою, оскільки контролер однієї з них може бути одночасно крайовим пристроєм іншої.

Радіообмін у Bluetooth відбувається на частотах 2,4 – 2,4835 Гц. Весь цей діапазон розділено на 79 каналів. У кожен момент часу обмін відбувається тільки по одному з них. Після передачі одного пакета даних обмін переходить на інший канал. Частота переходів з каналу на канал становить до 1600 Гц. Такий принцип передачі даних, що здійснюється за допомогою частотних стрибків (FHSS), називають псевдовипадковою перебудовою робочої частоти (ППРЧ). Послідовність зміни каналів задається псевдовипадковою послідовністю (ПВП), єдиною для пікомережі. ПВП генерується на основі адреси контролера, тому для кожної пікомережі послідовність перемикання між каналами різна.

Для зовнішніх відносно до пікомережі пристроїв сигнал, що має дуже широкий спектр, стає практично шумоподібним, тому він лише трохи погіршує умови їх роботи. Перешкоди від зовнішніх пристроїв також не сильно впливають на роботу пікомережі, оскільки в разі помилки обміну даними повторна передача відбувається по іншому каналу. У пікомережі всі дії ініціює тільки контролер.

Дуплексний обмін відбувається на основі часового розділення – спочатку протягом інтервалу перебудови частот тривалістю 625 мкс (протягом так званого тайм-слоту) інформацію передає контролер, а потім протягом наступного слота – крайовий пристрій, потім знову контролер і т. д. Повідомлення одного пристрою може займати до п'яти тайм-слотів, наступних підряд. Передавати може тільки той кінцевий пристрій, до якого в попередньому тайм-слоті звернувся контролер.

Мережа Bluetooth підтримує синхронний і асинхронний режими обміну даними. Синхронний режим можливий тільки у разі радіального з'єднання контролера з крайовим пристроєм. Контроль передачі при цьому не ведеться. Продуктивність інтерфейсу в синхронному режимі дозволяє організувати до трьох каналів передачі голосової інформації зі швидкістю по 64 Кбіт/с у кожному напрямі. Асинхронний режим дозволяє досягти високої надійності обміну даними. Передача кожного пакета даних квітується. У разі помилки прийому передача збійного пакета повторюється. Швидкість передачі в асинхронному режимі становить до 723,2/57,6 Кбіт/с у прямому/зворотному каналах в асиметричній моді і до 433,9 Кбіт/с у кожному напрямі при симетричному обміні. Стандартний пакет Bluetooth містить код доступу пікомережі (72/68 біт), заголовок (18

бітів після кодування перетворюються на 54 біти) і поле інформації (не більше 2 745 бітів). Заголовок і/або поле даних можуть бути відсутніми. Код доступу ідентифікує пакети даної пікомережі. Заголовок містить інформацію: про адресу крайового пристрою, тип даних, готовність крайового пристрою, прапори підтвердження правильного прийому, послідовності пакетів, а також контрольну суму.

У листопаді 2003 року з'явилася версія Bluetooth 1.2. Вона містила ряд змін і доповнень, основними серед яких є: прискорене встановлення з'єднання; адаптивна схема перемикавання каналів (можна задавати менше, ніж 79, але не менше 20 каналів, між якими відбувається перемикавання при FHSS); розширені синхронні з'єднання; вдосконалені алгоритми виявлення помилок, контролю потоків і покращувані схеми синхронізації. Через рік з'явилася остання версія Bluetooth 2.0+EDR. Як і виходить з назви, вона складається з двох частин, які можуть підтримуватися апаратурою незалежно: це власне оновлена версія специфікації 2.0 (не містить принципових відмінностей від 1.2) і розширений набір швидкостей передачі даних EDR (Enhanced Data Rate). Розширений набір швидкостей означає, що, крім базової швидкості 1 Мбіт/с, можливий обмін зі швидкостями 2 і 3 Мбіт/с. Збільшення швидкості передачі відбувається за рахунок зміни методів модуляції. У базовій версії використовується частотна модуляція з фільтром Гауса (GFSK), у якій на один модуляційний символ припадає один біт. Швидкість модуляції при цьому рівна швидкості потоку даних і складає 1 Мбіт/с. У режимі EDR застосовується диференціальна фазова модуляція – 4- і 8-позиційні $\pi/4$ -DQPSK і 8-DPSK- коди. При цьому один модуляційний символ представляє відповідно два і три біти (модуляція називається диференціальною, оскільки зміна фази відбувається щодо попереднього символу). У результаті при тій же швидкості модуляції 1 Мбіт/с швидкість передачі даних складає 2 і 3 Мбіт/с. Режим EDR можливий не тільки при асинхронному з'єднанні, але і в розширеному синхронному.

Швидкий розвиток технології Bluetooth був пов'язаний з розвитком елементної бази цифрової обробки сигналів. Масове впровадження Bluetooth-пристроїв, виконаних у вигляді великих і складних у функціональному відношенні інтегральних схем, привело до лавиноподібного падіння цін на комплектуючі для них.

Для роботи пристроїв Bluetooth у вигляді інтегральних схем потрібні тільки зовнішні джерела живлення, генератор тактової частоти, інтер-

фейсні пристрої передачі даних, антена і декілька конденсаторів. Усе це зробило використання інтерфейсу Bluetooth ефективним і привабливим для застосування в різноманітних системах передачі даних.

Наприклад, на рис. 9.3 показана IC PMB8761, яка в документації називається універсальною платформою Bluetooth.

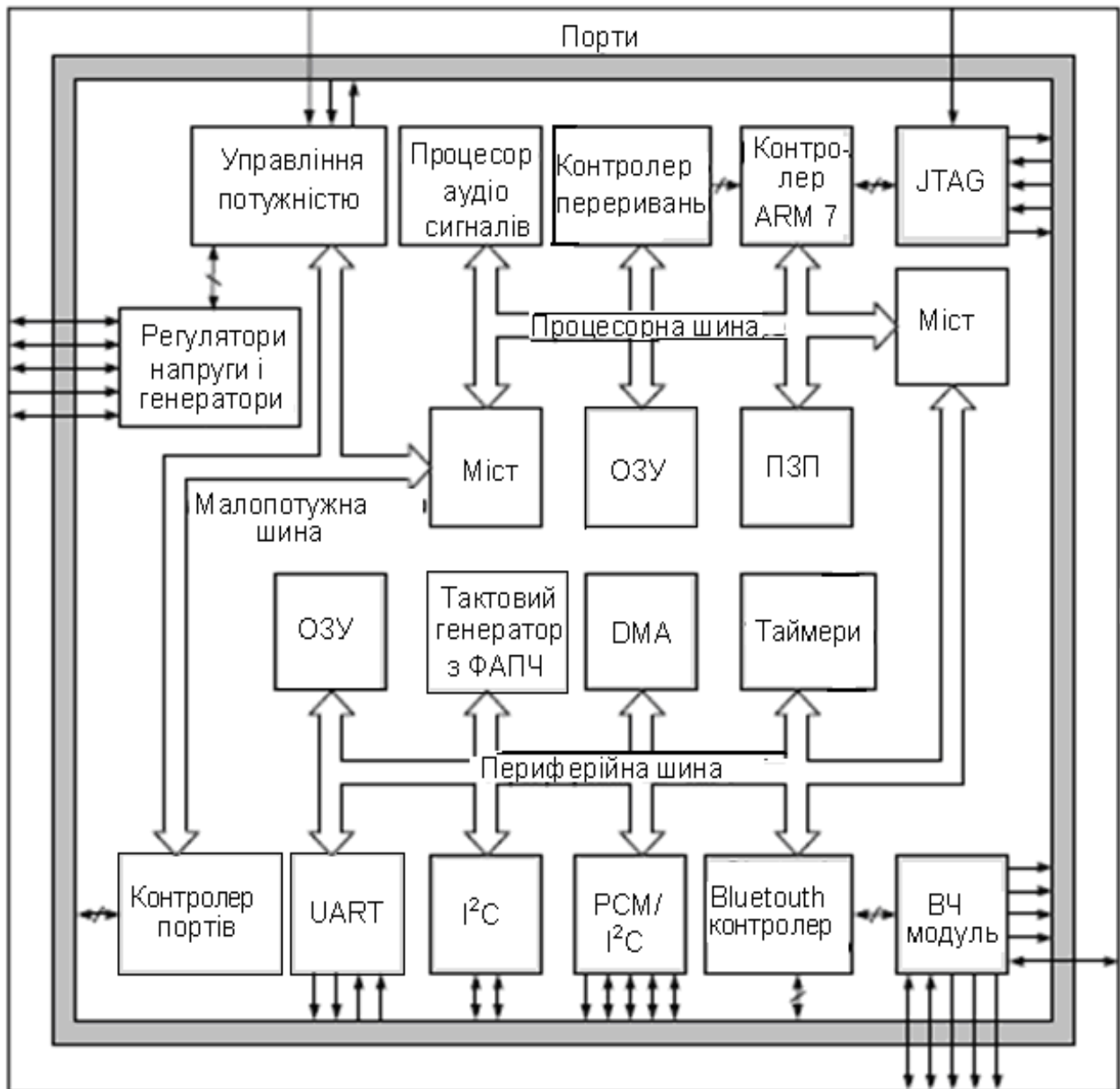


Рис. 9.3. Функціональна схема IC PMB8761

Її універсальність виявляється в тому, що IC оснащена вбудованим універсальним процесором з ядром ARM7, який може виконувати програми користувачів. Для відладки системи до складу мікросхеми введе-

ний інтерфейс JTAG. Інтегральна схема PMB8761 підтримує специфікацію Bluetooth 2.0 + EDR, зокрема швидкості обміну до 3 Мбіт/с.

Інтегральна схема PMB8761 розроблялася для застосування у стільникових телефонах. Вона включає: асинхронний універсальний порт UART (для обміну даними з host-пристроєм), порт PCM з ІКМ-імпульсною кодовою модуляцією для синхронних аудіоданих (оцифрованих, у форматі ІКМ), трансивер Bluetooth, підсистеми синхронізації, управління і живлення. На базі цієї мікросхеми випускається готовий до застосування модуль PBA31307. Завдяки вбудованій схемі електроживлення і кварцевому тактовому генератору на 26 МГц модуль потребує тільки зовнішнього нестабілізованого джерела напруги і тактового генератора 32,768 кГц.

Важлива особливість ІС така: якщо пристрій підключений до персональної мережі Bluetooth і до бездротової локальної мережі (WLAN), апаратним чином підтримується безконфліктна робота цих мереж відповідно до стандарту IEEE 802.15. Packet Traffic Arbitration. Схема контролю блокує одночасну роботу передавачів і приймачів WLAN та Bluetooth, дозволяючи роботу одному або іншому на основі пріоритезації пакетів. Внутрішні вузли ІС зв'язані трьома шинами: шиною низького споживання, процесорною шиною і периферійною шиною.

Для зберігання службових даних Bluetooth-пристрою (конфігурації) можна використовувати додаткову EEPROM-пам'ять, що підключається до Bluetooth-процесору по інтерфейсу I²C. Порт UART (3,25 Мбіт/с) працює в асинхронному режимі, тому обмін цифровими аудіопотоками ефективніше проводити по окремому інтерфейсу PCM.

Робота в синхронному режимі дозволяє використовувати його пропускну спроможність найповніше. Пропускної спроможності інтерфейсу досить для організації двох двонаправлених аудіоканалів.

Іншим прикладом вузла для створення порту Bluetooth може служити модуль LMX9820A (6 x 9 x 1 мм), що підтримує специфікацію Bluetooth 2.0. і є функціонально закінченим портом Bluetooth 2.0. Модулем LMX9820A є комунікаційний процесор – пристрій, оснащений 16-розрядним універсальним RISC-процесором і DSP-ядром з фіксованою точкою, контролерами пам'яті і прямого доступу до пам'яті, 10-розрядним 10-канальним АЦП та аудіокодеками. Крім того, LMX9820A включає різноманітні зовнішні інтерфейси.

Така висока концентрація обчислювальної потужності, пам'яті та інтерфейсів на одному кристалі дозволяє використовувати дану ІС для вирішення найрізноманітніших завдань, включаючи розробку багатофункціонального уніфікованого модуля, що може значно підвищити економічну ефективність виробництва.

Практичні завдання

1. Використовуючи довідкові матеріали та Інтернет-ресурси, в короткій формі опишіть, для яких цілей застосовується в сучасному комп'ютеризованому устаткуванні послідовний периферійний трипровідний інтерфейс SPI (Serial Peripheral Interface).

2. Використовуючи довідкові матеріали та Інтернет-ресурси, сформулюйте в короткій формі, якими перевагами і недоліками характеризується обмін даними між мікроконтролером і різними пристроями, такими, як цифрові потенціометри, ЦАП/АЦП, FLASH-ПЗУ та ін.

3. Виконайте моделювання мікроконтролерної системи, що вимірює і відображає температуру, на базі МК з цифровим датчиком TC72, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2.

4. Дослідіть можливості контролю обміну даними між мікроконтролером і цифровим температурним датчиком з послідовним периферійним трипровідним інтерфейсом SPI за допомогою SPI-відладчика.

5. Дослідіть можливості обміну даними за допомогою послідовного трипровідного інтерфейсу SPI між двома мікроконтролерами.

6. Дослідіть можливості обміну даними за допомогою послідовного трипровідного інтерфейсу SPI між мікроконтролером і цифроаналоговим перетворювачем (ЦАП).

7. Використовуючи довідкові матеріали та Інтернет-ресурси, в короткій формі сформулюйте, в якому напрямі в даний час розвиваються мережі для збору даних, обміну інформацією, управління технологічним устаткуванням, контролю виробничих процесів.

8. Використовуючи довідкові матеріали та Інтернет-ресурси, в короткій формі сформулюйте, що дають для енергозбереження сучасні цифрові технології.

9. Використовуючи CodeVisionAVR і програмний продукт Proteus Professional 7.2, дослідіть можливості обміну даними між мікроконтроле-

ром і мікросхемою EEPROM з послідовним інтерфейсом TWI (I²C) при відображенні операцій запису-читання на рідкокристалічному індикаторі.

10. Використовуючи CodeVisionAVR і програмний продукт Proteus Professional 7.2, дослідіть можливості обміну даними між мікроконтролером та цифровим температурним датчиком з інтерфейсом TWI (I²C).

11. Використовуючи Code Vision AVR і програмний продукт Proteus Professional 7.2, дослідіть можливості обміну даними між мікроконтролером та мікросхемою EEPROM з послідовним інтерфейсом TWI (I²C).

Вирішення завдання.

Загальний принцип роботи TWI (I²C) шини такий, що він дозволяє легко змінювати напрям передачі інформації у процесі одного сеансу обміну даними. При цьому повна передача даних через TWI (I²C)-інтерфейс у принципі складається з умови початку передачі одного або декілька байтів даних, за якими слідує біт квитування й умови завершення передачі.

Для виконання завдання необхідно:

- 1) запустити CodeVisionAVR і відкрити проект;
- 2) відкрити файл у проекті, дочекавшись появи панелі з текстом програми на мові Cі в області редагування. Текст програми був створений за допомогою майстра-будівника CodeWizardAVR;

Текст програми починається із заголовка, який з погляду програми є коментарем.

Далі слідує директиви Cі, які під'єднують до основного тексту програми і потрібні для роботи МК, і файл описів МК AT90S2313;

- 3) вивчити на програмному рівні, як здійснюється доступ до зовнішньої пам'яті EEPROM на мікросхемі 24C01 і які проводяться операції при послідовному записі даних у пам'ять EEPROM і потім при проведенні читання;

- 4) провести компіляцію проекту. Для цього слід вибрати відповідну команду Project > Compile (Проект > Компілювати).

При цьому буде запущений компілятор, який створить асемблерний файл з ім'ям поточного проекту і розширенням «.asm».

Цей файл можна, при необхідності, проглянути і навіть змінити, відкривши його в редакторі.

При цьому слід мати на увазі, що можна скомпілювати тільки проєкт, а окремий файл скомпілювати не можна.

Після того як компіляція буде завершена, відкриється вікно інформації про проєкт з результатами компіляції. У цьому вікні буде відображена інформація про кількість помилок при компіляції і/або попереджень;

5) після компіляції проєкту за допомогою налагоджувача Atmel AVR Studio слід провести налагодження розробленої програми;

Для використання налагоджувача AVR Studio необхідно встановити на комп'ютер відповідну версію AVR Studio, а потім визначити місцеположення та ім'я налагоджувача (див. команди Setting > Debugtr);

6) закрити програми, зберігши внесені зміни, й виконати моделювання доступу до зовнішньої пам'яті EEPROM на мікросхемі 24C01 та операцій послідовного запису даних у пам'ять EEPROM і проведення читання, використовуючи програмний продукт Proteus Professional 7.2.

Для виконання завдання необхідно запустити Proteus Professional 7.2, визначити ISIS 7 Professional і дочекатися появи основного вікна з чистим робочим простором.

Відкрити, використовуючи вкладку File, для перегляду список файлів, що знаходяться в робочому просторі й вибрати проєкт. Для аналізу роботи схеми застосовується осцилограф і TWI (I²C) – налагоджувач;

7) запустити на виконання модель.

Модель налагоджувача I²C-шини дозволяє в інтерактивному режимі здійснювати моніторинг виконання протоколу I²C-шини, аналізувати як ті, що посилаються, так і ті, що приймаються по лініях I²C.

Для проведення аналізу ходу обміну даними використовується спеціальне вікно;

8) запустити на виконання модель, натиснувши внизу кнопку у вигляді трикутника, і скопіювати дані, які з'являються у вікні I²C-налагоджувача.

Зупинити моделювання, натиснувши внизу кнопку у вигляді квадрата.

Запустити на виконання модель, натиснувши внизу кнопку у вигляді трикутника, і скопіювати осцилограми напруги на лініях TWI (I²C)-інтерфейсу.

Зупинити моделювання, натиснувши внизу кнопку у вигляді квадрата.

Описати кожен сигнал осцилограми і те, як послідовно передається кожен байт по лініях SDA та SCL.

Після виконання експерименту зупинити процес моделювання кнопкою «Стоп» і закрити файл симуляції.

Контрольні запитання

1. Що таке порти вводу-виводу?
2. Як пересилається інформація при паралельному способі обміну даними?
3. Як пересилається інформація при послідовном способі обміну даними?
4. Назвіть три групи завдань у комп'ютеризованому поліграфічному устаткуванні, що вирішуються за допомогою послідовних портів.
5. Що розуміють під протоколом інформаційного обміну?
6. Поясніть поняття MASTER і SLAVE.
7. Для чого призначений послідовний периферійний інтерфейс SPI (Serial Peripheral Interface)?
8. Що розуміють під UART (USART)?
9. Охарактеризуйте стисло інтерфейс TWI.
10. Поясніть призначення та особливості інтерфейсу I²C.
11. Чим обумовлено використання асинхронної передачі даних на великі відстані?
12. Поясніть, як утворюють мережу MICROLAN?
13. Назвіть основні властивості мережі MICROLAN.
14. Назвіть і поясніть основні можливості USB.
15. Що розуміють під такими поняттями, як хост, хаб, хост-контролер?
16. Назвіть, які можна відмітити 3 функціональні блоки у концентраторі стандарту USB 2.0.
17. Стисло поясніть, що таке Wireless USB. Назвіть його основні особливості.
18. Назвіть основні особливості Bluetooth й Wi-Fi.
19. Поясніть що таке технології UWB.
20. Назвіть основні різновиди універсальних послідовних інтерфейсів Wi-Fi і Bluetooth.
21. Поясніть, що таке W-LAN. Назвіть його основні особливості.

22. З чим був пов'язаний останніми роками швидкий розвиток технології Bluetooth?

23. Назвіть три швидкості (специфікація *USB 2.0*), за допомогою яких інтерфейс USB дозволяє проводити обмін інформацією з периферійними пристроями.

Рекомендована література

1. Агуров П. В. Интерфейсы USB. Практика использования и программирования / П. В. Агуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 576 с.
2. Аппаратно-программное обеспечение полиграфического оборудования: Межведомственный сб. науч. тр. / А. С. Сидоров (гл. ред.), Московский гос. ун-т печати. – М. : МГУП, 2001. – 178 с.
3. Арменский Е. В. Электрические микромашины / Е. В. Арменский, Г. Б. Фалк. – М. : Высшая школа, 1985. – 231 с.
4. Баранов В. Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы / В. Н. Баранов. – М. : Изд. дом «Додэка-XXI», 2004. – 288 с.
5. Башарин А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 224 с.
6. Волощак І. А. Автоматизований електропривод поліграфічних машин / І. А. Волощак, І. Т. Стрепко. – Львів : Фенікс, 1998. – 239 с.
7. Гоков О. М. Комп'ютеризовані системи поліграфічного обладнання: навчальний посібник / О. М. Гоков, Є. А. Жидко. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2009. – 246 с.
8. Гоков О. М. Технічне забезпечення видавничих систем: навчальний посібник / О. М. Гоков, В. Ю. Вдовьонков, Є. А. Жидко – Харків : Вид. ХНЕУ, 2009. – 266 с.
9. Гоков О. М. Основы электротехники и электроники. Изделия аналоговой электроники и базовые логические элементы: учебное пособие. Ч. 3 / О. М. Гоков, Є. А. Жидко. – Харьков : Изд. ХНЭУ, 2007. – 187 с.
10. Гоков О. М. Основы электротехники и электроники. Изделия цифровой электроники и электродвигатели: учебное пособие. Ч. 4 / О. М. Гоков, Є. А. Жидко. – Харьков : Изд. ХНЭУ, 2007. – 276 с.
11. Гольц М. Е. Автоматизированные электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями / М. Е. Гольц, А. Б. Гудзенко, В. М. Остреров – М. : Энергия, 1972. – 216 с.
12. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК: энциклопедия / М. Гук. – СПб. : Питер, 2002. – 528 с.
13. Друкарське устаткування : підручник / Я. І. Чехман, В. Т. Сенкус, В. П. Дідич та ін. – Львів : УАД, 2005. – 468 с.

14. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы «ATMEL» / А. В. Евстифеев – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 560 с.
15. Ижеля Г. И. Линейные асинхронные двигатели / Г. И. Ижеля, С. А. Ребров, А. Г. Шаповаленко – К. : Техника, 1975. – 136 с.
16. Карпенко Б. К. Шаговые электродвигатели / Б. К. Карпенко, В. И. Ларченко, Ю. А. Прокофьев – К. : Техника, 1972. – 216 с.
17. Киппхан Г. Энциклопедия по печатным средствам информации. Технологии и способы производства / Киппхан Гельмут : пер. на русск. Московский Государственный Университет Печати. – Heidelberg : Springer Verlag, 2003. – 1280 с.
18. Костров Б. В. Микропроцессорные системы и микроконтроллеры / Б. В. Костров, В. Н. Ручкин. – М. : ТсхБук, 2007. – 320 с.
19. Кузьминов А. Ю. Интерфейс RS232. Связь между компьютером и микроконтроллером / А. Ю. Кузьминов. – М. : Радио и связь, 2004. – 168 с.
20. Лапин А. И. Интерфейсы. Выбор и реализация / А. И. Лапин – М. : Техносфера, 2005. – 218 с.
21. Лебедев М. Б. CodeVisionAVR : пособие для начинающих / М. Б. Лебедев – М. : Издательский дом "Додэка-XXI", 2008. – 592 с.
22. Мортон Дж. Микроконтроллеры AVR. Вводный курс / Дж. Мортон; пер. с англ. – М. : Изд. дом "Додэка-XXI", 2006. – 272 с.
23. Партала О. Н. Цифровые КМОП микросхемы : справочник / О. Н. Партала. – СПб : Н и Т, 2001. – 400 с.
24. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / И. В. Петров. – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.
25. Предко М. Справочник по PIC-микроконтроллерам / М. Предко : пер. с англ. – М. : ДМК Пресс, 2002. – 512 с.
26. Трамперт В. AVR-RISC микроконтроллеры / В. Трамперт ; пер. с нем. – К. : МК-Пресс, 2006. – 464 с.
27. Трамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров / В. Трамперт : пер. с нем. – К. : МК-Пресс, 2006. – 208 с.
28. Туманов М. П. Технические средства автоматизации и управления: цифровые средства обработки информации и программное обеспечение : учебное пособие / М. П. Туманов. – М. : МГИЭМ, 2005. – 71 с.

Зміст

Вступ	3
Модуль 3. Реалізація функцій збору, обробки і перетворення інформації в комп'ютеризованому поліграфічному обладнанні	
Тема 6. Засоби відображення стану і режимів роботи обладнання в комп'ютеризованих системах	11
6.1. Загальні відомості про засоби відображення стану і режимів роботи обладнання	11
6.2. Основи і принципи роботи засобів відображення буквено-цифрової інформації на рідкокристалічному модулі	20
6.3. Апаратні і програмні рішення для відображення інформації. Загальні відомості про управління рідкокристалічними індикаторними дисплеями	30
Практичні завдання	42
Контрольні запитання	46
Тема 7. Мікроконтролерні системи вимірювання й перетворення інформації у поліграфічному обладнанні	48
7.1. Забезпечення проведення вимірювань аналогових величин...	48
7.1.1. Початкові відомості про аналогові сигнали і засоби введення даних комп'ютеризованих систем	48
7.1.2. Використання мікроконтролерів AVR у системах збору й обробки інформації про стан і режими роботи поліграфічного устаткування	59
7.2. Основи управління процесами проведення перетворень цифрової інформації в аналогову	69
7.2.1. Початкові відомості про цифро-аналоговий інтерфейс комп'ютеризованих систем	69
7.2.2. Цифро-аналогові перетворювачі паралельного типу інтегрального виконання	77
7.2.3. Цифро-аналогові перетворювачі послідовного типу на основі мікроконтролерів (ЦАП із широтно-імпульсною модуляцією)	84
7.3. Управління виробничими процесами за допомогою мікроконтролера	97

7.3.1. Початкові відомості про управління виробничими процесами та устаткуванням за допомогою мікроконтролера	97
7.3.2. Корекція даних при введенні із сенсорів і перетворенні електричного сигналу в цифрову форму	108
7.3.3. Вступ до теорії управління замкнутими системами	115
Практичні завдання	120
Контрольні запитання	125
Модуль 4. Компоненти управлінських систем та інтерфейсу комп'ютеризованого поліграфічного обладнання	127
Тема 8. Застосування мікроконтролерів для управління електричними двигунами поліграфічного обладнання	127
8.1. Основні поняття та особливості застосування мікроконтролерів для управління виконавчими механізмами	127
8.1.1. Початкові відомості про управління приводами поліграфічного устаткування і мехатронними системами	127
8.2. Управління кроковими електричними двигунами поліграфічного обладнання при застосуванні мікроконтролерів	139
8.2.1. Дискретні електроприводи з кроковими двигунами	139
8.3. Управління асинхронними електричними двигунами поліграфічного обладнання при застосуванні мікроконтролерів	162
8.3.1. Початкові відомості про асинхронні двигуни і прості способи управління ними в електроприводах	162
8.3.2. Скалярне частотне управління електроприводом з асинхронним двигуном при використанні мікроконтролерів	174
8.3.3. Векторне частотне управління електроприводом з асинхронним двигуном при використанні мікроконтролерів	180
Практичні завдання	187
Контрольні запитання	189

Тема 9. Застосування послідовного інтерфейсу в комп'ютеризованому поліграфічному обладнанні	191
9.1. Основні поняття і відомості про інтерфейси послідовного вводу-виводу	191
9.1.1. Початкові відомості про обмін даними в комп'ютеризованому обладнанні	191
9.1.2. Обмін даними в комп'ютеризованому устаткуванні за допомогою послідовного периферійного інтерфейсу SPI	200
9.1.3. Асинхронна передача даних у комп'ютеризованому устаткуванні через приймач UART	203
9.2. Передача цифрових потоків у вбудованих багатопроцесорних системах	208
9.2.1. Обмін даними в комп'ютеризованому устаткуванні за допомогою послідовного двопровідного інтерфейсу TWI і шини I ² C	208
9.2.2. Обмін даними в комп'ютеризованому устаткуванні за допомогою послідовного однопровідного інтерфейсу 1-Wire	212
9.3. Застосування в комп'ютеризованому поліграфічному обладнанні передач даних по інтерфейсах USB, Wireless USB, протоколах Bluetooth і Wi-Fi	222
9.3.1. Різновиди універсальних послідовних інтерфейсів USB	222
9.3.2. Різновиди універсальних послідовних інтерфейсів Wi-Fi і Bluetooth	236
Практичні завдання	245
Контрольні запитання	248
Рекомендована література	249

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Гоков Олександр Михайлович
Жидко Євген Анатолійович

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Підсистеми управління обладнанням
і технологічними процесами

Навчальний посібник

Відповідальний за випуск Лапта С. І.

Відповідальний редактор Сєдова Л. М.

Редактор Лященко Т. О.

Коректор Даценко Л. О.

План 2011 р. Поз. № 66-П.

Пол. до друку 4.05.2011. Формат 60 x 90 1/16. Папір MultiCopy. Друк Ризо.
Ум.-друк. арк. 15,0. Обл.-вид. арк. 20,0. Тираж 400 прим. Зам. № 267

Видавць і виготівник – видавництво ХНЕУ, 61001, м. Харків, пр. Леніна, 9а

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи
Дж № 481 від 13.06.2001 р.



КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

ПІДСИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ОБЛАДНАННЯМ
І ТЕХНОЛОГІЧНИМИ
ПРОЦЕСАМИ

Навчальний посібник

Викладено питання, що пов'язані з технічним забезпеченням комп'ютеризованих систем поліграфічного обладнання і видавничих систем. Розглянуто загальні принципи побудови і функціонування комп'ютеризованих систем і вузлів обладнання; засоби обміну інформацією в системах управління обладнанням; мікроконтролерні системи вимірювання і перетворення інформації; основні підсистеми управління обладнанням і технологічними процесами; засоби відображення стану та режимів роботи обладнання; компоненти управлінських систем і інтерфейсу обладнання.



ВИДАВНИЦТВО ХНЕУ

ХАРКІВ 2011