

## ОСОБЛИВОСТІ ВІДМОВОСТІЙКИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ З ПРОГРАМОВАНОЮ ЛОГІКОЮ ЯК ОБ'ЄКТІВ ДІАГНОСТУВАННЯ

*В статті розглянуто особливості відмовостійких комп'ютерних систем з програмованою логікою як об'єктів діагностування. Розглянуто напрямки побудови відмовостійких систем, а також наведена класифікація ПЛІС. Досліджено особливості процесу діагностування відмовостійких комп'ютерних систем на етапі експлуатації.*

*The article discusses the features of fault-tolerant computer systems with programmable logic as an object of diagnosis. Directions of fault tolerant systems building are considered, and PLD classification is given. Features of fault-tolerant computer systems diagnostic at the guide stage is investigated.*

Ключові слова: надійність, безвідмовність, відмовостійкі комп'ютерні системи, ПЛІС, діагностування.

### Вступ

Однією з основних проблем побудови обчислювальних систем лишається задача забезпечення їх тривалого функціонування. Ця задача має три складові: надійність, готовність та зручність обслуговування. Всі ці три складові передбачають, в першу чергу, діагностування несправностей системи, які виникають внаслідок відмов та збоїв в її роботі. Підвищення надійності ґрунтується на принципі попередження виникнення несправностей шляхом зниження відмов та збоїв за рахунок застосування електричних схем і компонентів з надвисоким ступенем інтеграції, зокрема мікросхем з програмованою логікою. Особливо це актуально для галузей, де помилка в роботі системи або тимчасовий її простій (навіть тривалістю в кілька секунд) призводять до людських жертв та екологічних катаклізмів (ядерна енергетика, військова та авіаційна промисловість, транспортна галузь), або, щонайменше, до значних економічних (фінансова індустрія) втрат.

### Відмовостійкі комп'ютерні системи

Особливостями відмовостійких комп'ютерних систем (КС) є: їх висока безвідмовність, безперебійність роботи системи при наявності відмов та більш тривалий життєвий цикл експлуатації. Відмовостійкі системи мають і ряд специфічних характеристик: складність дизайну, висока вартість розгортки, підвищення енергоспоживання, ускладнення системи.

Типи систем за рівнем надійності [1] представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Типи відмовостійких систем за рівнем надійності

Рівень надійності, %	Максимальний час простою, на рік	Тип системи
99	3,5 доби	Звичайна (Conventional)
99,9	8,5 годин	Високої надійності (High availability)
99,99	1 година	Відмовостійка (Fault resilient)
99,999	5 хвилин на рік	Безвідмовна (Fault tolerant)

При виборі та експлуатації відмовостійких систем визначальний вплив мають наступні характеристики:

- 1) доступність – ймовірність того, що система у певний момент часу буде знаходитись в роботоздатному стані;
- 2) безвідмовність – властивість системи протягом певного проміжку часу працювати без відмов;
- 3) висока ремонтоздатність – готовність до роботи після виникнення несправності, яка визначає ступінь складності виправлення дефекту/несправності/помилки у системі.

Розробка відмовостійкої системи, а також її відмовостійка експлуатація, повинні базуватись на розумінні природи таких типів відмов, ймовірність виникнення яких є максимальною за даних умов експлуатації системи.

За часом впливу на об'єкт *відмови* поділяються на [2]: постійні (permanent fault) – одноразовий вплив без можливості наступного використання системи; переривчасті (intermittent fault) – багаторазове повторення ситуації без можливості визначення її закономірності; перехідні (transient fault) – одноразова тимчасова відмова без можливості її повторення при рестарті системи. Відмови можуть виникати раптово (без попереднього погіршення вихідних характеристик) або наперед прогнозуватись за постійними змінами вихідних характеристик [2].

Ціна відмови комп'ютерної системи складається з декількох компонентів [1]: втрати прибутку; непродуктивної роботи персоналу; зростаючої недовіри клієнтів; втрачених ділових можливостей. За оцінками різних дослідників, простій комп'ютерних систем обходиться американському бізнесу в мільярди доларів [1] – порядку сотні тисяч доларів за годину простою. На сьогодні не існує системи, яка гарантує

100 %-ву відмовостійкість [2], тобто 100 %-ву ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого проміжку часу.

Існує два основних напрямки побудови відмовостійких систем [2]: 1) використання лише відмовостійких компонентів – при такій реалізації кожен компонент системи може продовжувати своє функціонування, навіть якщо один/декілька підкомпонентів системи виходять з ладу; 2) розроблення методів, які гарантують побудову відмовостійкої системи з невідмовостійких компонентів – відмовостійкість в таких системах реалізується за рахунок введення надлишковості та розроблення спеціального програмного забезпечення, елементних взаємозв'язків та алгоритмів функціонування.

Отже, основною задачею при розробці та експлуатації відмовостійких КС є забезпечення їх надійності.

Технічне діагностування КС передбачає такі основні функції, як контроль їх технічного стану, пошук місця і визначення причин несправності та прогнозування технічного стану [].

Процес діагностування відмовостійких КС на етапі експлуатації має ряд особливостей:

1) можливість виникнення відмови довільних елементів, кількість яких перевищує максимально допустиме число для характерних несправностей;

2) наявність проміжних відмов, які призводять до різних несправностей;

3) вплив невиявлених відмов на результати діагностування;

4) взаємний вплив прихованих несправностей;

5) виникнення додаткових проблем забезпечення надійності при використанні зовнішніх засобів діагностування;

6) вплив типу архітектури таких систем, особливостей зв'язків між елементами (наявність несиметричної нерегулярної структури зв'язків) та кількості цих зв'язків на результат діагностування.

Крім особливостей процесу діагностування КС на етапі експлуатації, самі відмовостійкі комп'ютерні системи, як об'єкти діагностування, мають такі особливості:

1) неможливість або обмеженість доступу до окремих вузлів в реальному часі на етапі експлуатації, особливо в таких галузях, як авіаційна, космічна, атомна енергетика та транспорт;

2) відсутність або висока вартість спеціалізованих апаратних та програмних засобів діагностування КС;

3) наявність надлишковості апаратури для всіх функційних блоків, включаючи процесори, джерела живлення, підсистеми введення/виведення та підсистеми дискової пам'яті, що, в свою чергу, зумовлює особливості цих складових як об'єктів діагностування;

4) ускладнення складових елементної бази апаратних компонентів, що мають високий ступінь інтеграції з різними фізичними та обчислювальними характеристиками.

Слід враховувати також, що на даний час суттєво скорочуються строки проектування та виробництва КС, внаслідок чого етап експлуатації відмовостійких КС недостатньо забезпечений документацією.

Головними характеристиками відмовостійких КС, у порівнянні із стандартними системами, є мінімальна частота відмов та збоїв і швидкий перехід до нормального режиму функціонування після виникнення несправності шляхом швидкого відновлення додатків та мережевих сесій до того стану, в якому вони знаходились у момент відмови системи.

У процесі розробки відмовостійких КС ключовим моментом є вибір оптимальної елементної бази, що має задовольняти певним вимогам. На сьогоднішній день, у зв'язку із значними змінами в технології розробки мікросхем, розробники надають перевагу таким технологіям, які дають змогу збільшити кількість логічних елементів на кристалі, при цьому мати можливість не тільки задавати певну конфігурацію мікросхеми, а й, при потребі, виконувати її конфігурацію; досягти зниження вартості; споживаної потужності і складності систем. Всім цим характеристикам відповідають програмовані логічні інтегральні мікросхеми (ПЛІС). ПЛІС отримали застосування в системах керування військовою технікою, наприклад АРАСНЕ, СОМАНСНЕ, В-52, в системах керування запуском та наведенням ракет, системах керування радаром і т.і [4].

### Класифікація ПЛІС

Очевидно, що, на сьогодні, ПЛІС є найбільш перспективною елементною базою для побудови цифрової апаратури різноманітного призначення. Перспективність ПЛІС базується на перевагах, показаних на рис. 1.

ПЛІС класифікують за наступними ознаками [6]:

1) архітектурою;

2) рівнем інтеграції та однорідності/гібридності;

3) кількістю припустимих циклів програмування та пов'язаному з цим типом пам'яті конфігурації.

Наприклад, в одноразово програмованих ПЛІС використовуються елементи з незворотними змінами станів – спеціальні перемички (плавкі – в простих ПЛІС перших поколінь, пробивані – в одноразово програмованих FPGA) або ЛІЗМОП-транзистори. Для одноразово програмованих ПЛІС можливості ЛІЗМОП-транзисторів використовуються лише частково: для них застосовуються такі конструкції, в яких відсутні можливості стирання записаної інформації. В простих ПЛІС перших поколінь застосовувались плавкі перемички типу fuse. У початковому стані такі ПЛІС мали всі можливі з'єднання, а для одержання потрібної конфігурації схеми частина перемичок руйнувалась (перепалювалась). При програмуванні

плавких перемичок виникає певний процент браку. Протягом багатьох років проводилась робота по підбору матеріалів перемичок та вдосконаленню технологічних процесів програмування, тим не менш для ПЛІС високого рівня інтеграції схеми з плавкими перемичками не підійшли. В одноразово програмованих FPGA знайшли застосування пробивані перемички типу antifuse. У початковому стані опори перемичок надзвичайно великі, а в пробитому – достатньо малі. Перемички дуже компактні – їх площа близька до площі перетину двох доріжок між'єднань. Паразитні ємності також дуже малі. У варіанті з плаваючими затворами роль програмованих елементів відіграють однозатворні ЛІЗМОП-транзистори, а кристали мікросхем розташовуються в дешевих корпусах, які не мають спеціальних віконцець для стирання інформації (зарядів в плаваючих затворах). Пам'ять конфігурації з елементами описаного типу називають EPROM-OTP (Electrically Programmable Read-Only Memory – One Time Programmable). Однозатворні ЛІЗМОП-транзистори компактні та дешеві. Одноразово програмовані послідовні ПЛІС випускає фірма Xilinx – серія XC1700 (5- и 3,3-В версії). Фірма Actel випускає наступні одноразово програмовані сімейства ПЛІС (Antifuse): eX – дуже маленькі ПЛІС; MX – невеликі ПЛІС, здатні працювати від одного джерела живлення 5 В; SX – ПЛІС середнього обсягу; Axcelerator – швидкі ПЛІС великого обсягу. Нові сімейства одноразово програмованих ПЛІС з технологією Antifuse фірми Actel характеризуються рекордною надійністю – число відмов/збоїв на 109 год напрацювання (FIT) не більше 10. Компанія QuickLogic, повністю орієнтована на ринок портативних пристроїв, до 2007 року основним своїм продуктом вважала серію недорогих одноразово програмованих ПЛІС PolarPro з низьким енергоспоживанням.

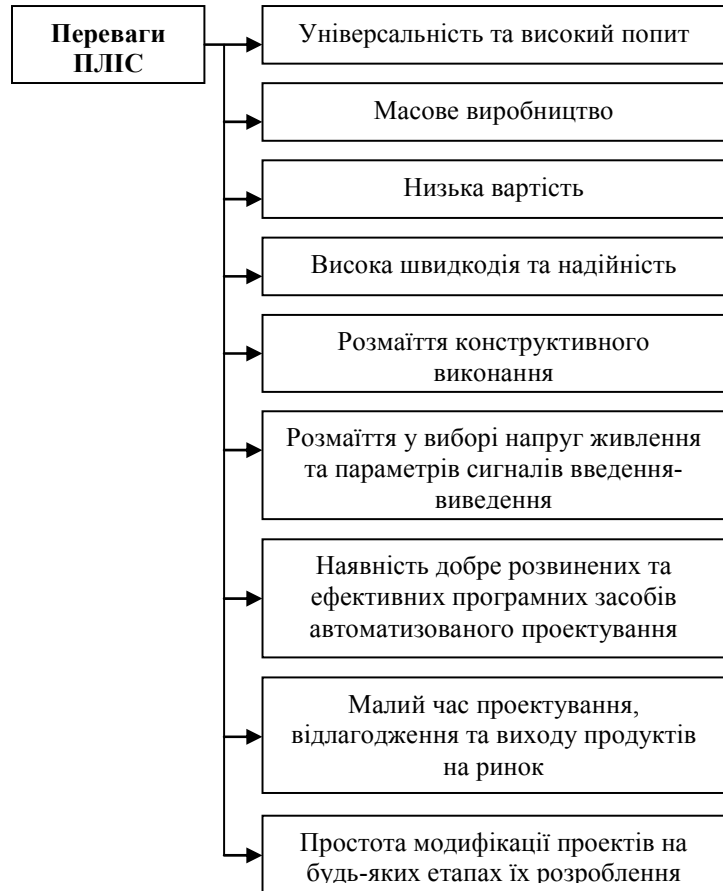


Рис. 1 Переваги ПЛІС

В ПЛІС з динамічним репрограмуванням конфігурація може бути змінена надзвичайно швидко. Перехід від однієї конфігурації до іншої не потребує введення ззовні нового файлу конфігурації. Декілька варіантів налагоджень (файлів конфігурації) вже наперед підготовлені та введені в тінюву пам'ять і постійно зберігаються в ній. Перехід з однієї конфігурації на іншу робиться за один такт по команді керуючого сигналу. ПЛІС типу SRAM на сьогодні випускають: Aeroflex Circuit Technology, Alliance Semiconductor Corporation, AMIC Technology, Elpida Memory, Etron Technology, Fujitsu Media Devices Limited, GSI Technology, Honeywell Solid State Electronics Center, Integrated Circuit Solution, Integrated Device Technology, Intersil Corporation, Integrated Silicon Solution, IXYS Corporation, Maxwell Technologies, Mosel Vitelic, NEC, Sanyo Semicon Device, Sharp Electronic Components, STMicroelectronics, White Electronic Designs Corporation, Winbond, G-Link Technology Corp., MoSys. ПЛІС з динамічним репрограмуванням виготовляють: Xilinx, Altera, Actel, Lattice. Фірмою Xilinx випускаються наступні серії ПЛІС FPGA по SRAM кМОП технології: серія Virtex, серія Spartan, серія XC4000, серія XC5200, серія XC3000 [7-10].

Отже, ПЛІС мають переваги в гнучкості розробки системи на кристалі та наявності внутрішньої пам'яті, які можуть використовуватись для: розширення структури забезпечення відмовостійкості та забезпечення широкого обсягу помилок обчислювального процесу на базі кристалу; забезпечення послідовності відновлення типу "зупинка-фіксація-перезапуск"; відключення не всього обчислювача, а його частин, які є причиною виникнення помилок.

Враховуючи гнучкість проектування з використанням ПЛІС-технології, стає можливою побудова модуля виявлення несправностей та керування перемиканням на базі одного кристалу, що дозволяє реалізовувати апаратно-кероване відновлення, яке не виходить за межі кристалу.

В зв'язку із значними змінами в технології розробки мікросхем з приходом ПЛІС, проводились численні дослідження одного з підходів до реалізації відмовостійких систем – ПЛІС, які дозволяють не лише реалізовувати складні проекти на одному кристалі і проводити багаторівневу верифікацію на всіх етапах розробки, але й здійснювати оперативну реконфігурацію внутрішньої архітектури в процесі їх функціонування. Саме тому використання ПЛІС-систем дає можливість здійснити перехід на нову фазу розвитку. Отже, технічне діагностування відмовостійких КС з програмованою логікою не може

здійснюватись однорідними засобами діагностування. Особливості відмовостійких комп'ютерних систем з програмованою логікою як об'єктів діагностування зумовлюють необхідність застосування комплексних підходів до діагностування таких систем. багатoversійних систем та технологій, які забезпечують відмовостійкість інформаційно-керуючих систем [4].

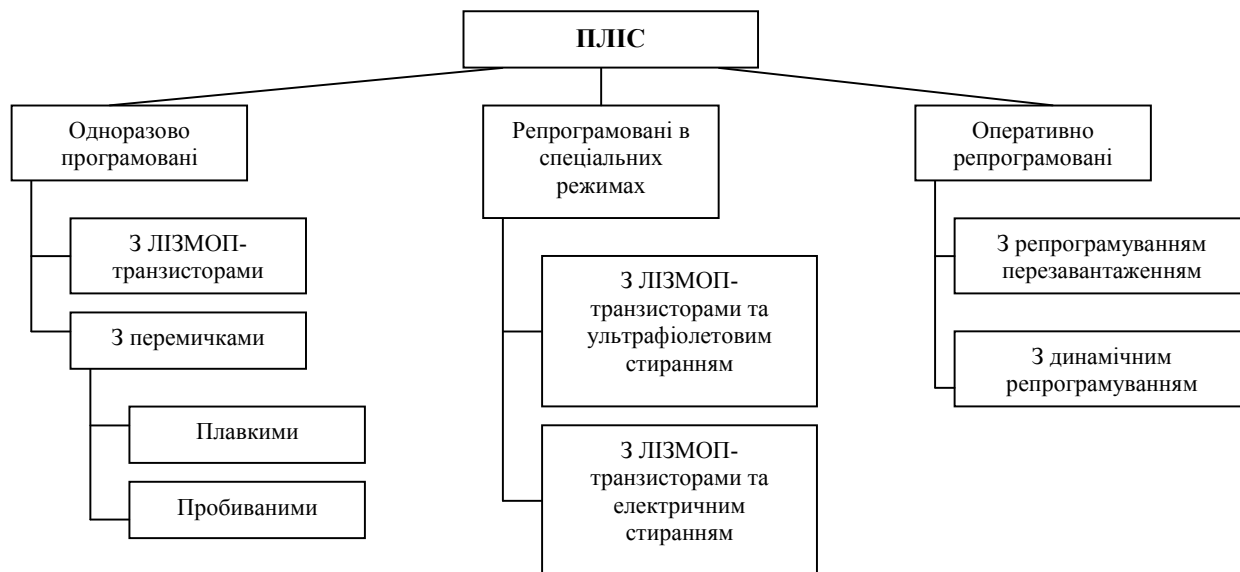


Рис. 2. Класифікація ПЛІС за типом тильової пам'яті

Отже, технічне діагностування відмовостійких КС з програмованою логікою не може здійснюватись однорідними засобами діагностування. Особливості відмовостійких комп'ютерних систем з програмованою логікою як об'єктів діагностування зумовлюють необхідність застосування комплексних підходів до діагностування таких систем. ПЛІС-систем без вилучення ПЛІС зі складу схеми дозволяє частково вирішити проблему забезпечення відмовостійкості бортових комплексів та космічних апаратів, де розробники не мають можливості виправити помилки проектування і не можуть боротись із старінням таких систем, термін служби яких складає 20-40 років [4].

Незважаючи на всі наявні переваги використання ПЛІС в складі відмовостійких КС існує ряд причин, що ускладнюють процес діагностування і таким чином визначають особливості ПЛІС, як об'єкта діагностування:

- 1) ПЛІС як об'єкт діагностування не дають можливості достатньо повного формального представлення логічними рівняннями, графами тощо;
- 2) потреба діагностування ПЛІС може виникнути на будь-якому інтервалі часу віддаленому від початку функціонування КС;
- 3) більшість ПЛІС відомих виробників мають у своєму складі вбудовані засоби діагностування, що не завжди можуть суміщатись з іншими апаратно-програмними засобами діагностування.

### Висновок

Отже, технічне діагностування відмовостійких КС з програмованою логікою не може здійснюватись окремими засобами діагностування. Особливості відмовостійких комп'ютерних систем з програмованою логікою як об'єктів діагностування зумовлюють необхідність застосування комплексних підходів до діагностування таких систем.

### Література

1. Медея Цнобиладзе. Отказоустойчивые компьютерные системы: путь к максимальной эффективности / Медея Цнобиладзе // <http://www.pcweek.ru/themes/detail.php?ID=45692>
2. Отказоустойчивые системы: зачем нужны и как построить // [http://www.cnews.ru/reviews/index.shtml?2006/05/26/202334\\_1](http://www.cnews.ru/reviews/index.shtml?2006/05/26/202334_1)
3. G. Candea. Principles of Dependable Computer Systems. Lectures in Stanford University, 2003, 2006, 2007
4. Федухин А.В. ПЛИС-системы как средство повышения отказоустойчивости / Федухин А.В., МухаА.А., МухаА.А // Математичні машини і системи. – Київ: Інститут проблем математичних машин і систем, 2010. – № 1, с.198-204
5. Локазюк В.Н. Отказоустойчивые встроенные системы на программируемой логике. Лекционный материал / Локазюк В.Н., Остроумов С.Б., Поморова О.В., Прохорова Ю.Н., Ушаков А.А., Харченко В.С. / Под ред. Харченко В.С. – Министерство образования и науки Украины, Национальный аэрокосмический

університет "ХАИ", 2008. – 264 с.

6. Грушвицкий Р.И. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики / Грушвицкий Р.И., Мурсаев А.Х., Угрюмов Е.П.. – СПб.: БХВ -Петербург, 2002. – 608 с.

7. Бахмач Е.С. Отказобезопасные информационно-управляющие системы на программируемой логике / Бахмач Е.С., Герасименко А.Д., Головир В.А., Сиора А.А., Скляр В.В., Токарев В.И., Харченко В.С. / Под ред. Харченко В.С., Скляра В.В. – Национальный аэрокосмический университет "ХАИ", Научно-производственное предприятие "Радий", 2008. – 380 с.

8. Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы Altera: элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры / Стешенко В.Б. – М.: Додэка-XXI, 2002. – 576 с.

9. Ушаков А.А. Проектирование цифровых устройств на ПЛИС в САПР Quartus II / Ушаков А.А., Нечаусов С.Н., Волковая А.А. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет "ХАИ", 2006. – 50 с.

Надійшла 14.11.2010 р.

УДК 681.325: 519.713

**В.М. ЛОКАЗІЮК**, Д.М. МЕДЗАТИЙ

Хмельницький національний університет

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ПРИСТРОЇВ З ПРОГРАМОВАНОЮ ЛОГІКОЮ

*В роботі розглянуто та проведено класифікацію інтегральних схем з програмованою логікою. Проведено аналіз надійності інтегральних схем з програмованою логікою за трьома напрямками: надійність самих інтегральних схем, придатність до діагностування та ефективність засобів контролю. Надано оцінку методики проведення прискорених випробувань інтегральних схем. Обґрунтовано ефективність та доцільність використання інтегральних схем з програмованою логікою у спеціалізованих та критичних системах.*

*In this paper classification of Application Specific Standard Products was conducted in order to study efficiency of use in specific and critical systems. The assessment of FPGA reliability was made by subdivided into three ways: the reliability of integrated electronics, efficiency of diagnosis and control methods. The efficiency and reasonability of FPGA use in the critical systems were established.*

Ключові слова: діагностування, пристрої з програмованою логікою, інтегральні схеми з програмованою структурою.

### Вступ

На сьогодні, інтегральні схеми з програмованою структурою (ASSP Application Specific Standard Products) є достатньо конкурентоздатною технологією для розроблення цифрових пристроїв довільної складності. В порівнянні із інтегральними схемами, які мають жорстку структуру інтегральні схеми з програмованою структурою (ІСПС) мають ряд переваг, що роблять їх використання привабливим як для розробників, так і для виробників інтегральних схем. Серед таких переваг можна виділити низьку вартість (найпростіші моделі – до 2 у.о.), високу швидкодію (час проходження сигналу від 1 н.с., частота до 500 МГц), можливість багаторазового перепрограмування, значні функційні можливості, низька споживана потужність, високий ступінь інтеграції (регулярність структури дозволяє застосовувати 0,15-0,13 мікронну технологію), великий відсоток виходу придатних інтегральних схем та інші [1, 2]. Крім великого відсотку виходу придатних мікросхем, слід відзначити і доволі високий рівень їх надійності [3].

Однак, використання пристроїв з програмованою структурою не завжди є доцільним. Наприклад, немає сенсу використовувати схеми з програмованою структурою, якщо планується масове виробництво пристрою, який проектується. При масовому виробництві, витрати на проектування інтегральної схеми, що замовляється, будуть розкладені на всі екземпляри. Чим більший тираж таких інтегральних схем (ІС), тим менша частка витрат на проектування закладена у вартість конкретної ІС. В цьому разі, більш доцільним є використання спеціалізованих інтегральних схем (ASIC – Application Specific Integrated Circuit) [1, 4]. В порівнянні з ІСПС вони мають ряд принципових переваг. Однак їх використання є виправданим для великих партій пристроїв. У випадку виготовлення невеликої партії спеціалізованих пристроїв, а це, як правило, периферійні модулі комп'ютерних систем (пристрої спряження, інтерфейсні засоби, засоби захисту інформації, апаратура підтримки телекомунікацій, апаратних прискорювачів) або високопродуктивна апаратура спеціалізованих систем (обробка сигналів реального часу, автономні інтелектуальні давачі, засоби кодування та декодування інформації), використання замовних ІС є недоцільним, оскільки їх вартість буде надвелика, в наслідок витрат на проектування [1,2]. В цьому випадку варто скористатись інтегральними схемами з програмованою структурою. При такому підході, на сьогодні, проектувальник має доволі широкі можливості щодо вибору конкретної технології. Неможливо однозначно зробити висновок яка з технології, або які з програмованих схем кращі. Вибір доводиться робити зважаючи на умови конкретного проекту. Найвагомішими факторами є кількість необхідних для виготовлення екземплярів, можливості виробничих потужностей, вимоги до надійності та продуктивності, складність реалізації проекту з використанням тієї чи іншої технології, а також фінансові аспекти проекту [1, 4].

Разом з тим, не зважаючи на суттєві переваги, пристрої, що мають у складі ІСПС, мають і ряд особливостей, які впливають як на їх надійність так і експлуатаційні характеристики. Зокрема, наявність у