

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПЛІС В СКЛАДІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ МІКРОСУПУТНИКІВ

© Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г., 2016

У роботі розглянуто особливості ПЛІС вітчизняних супутникових системи збору наукової інформації (СЗНІ). Перше покоління ПЛІС СЗНІ було розроблено для супутника «Січ-2». Після аналізу результатів експлуатації СЗНІ було встановлено нові вимоги до наступного покоління ПЛІС, набір виконуваних функцій було розширено, що веде до необхідності проектування нових моделей ПЛІС, модельних стендів та наборів тестів для відлагодження окремих ПЛІС та СЗНІ у цілому. До набору ПЛІС входять ПЛІС центрального боку СЗНІ, комплект ПЛІС периферійних модулів та ПЛІС контрольно-перевірочної апаратури. Модельний стенд дозволяє перевірити обмін даними каналами SciWay, CAN, послідовними каналами типу RS та радіоканалом. Також моделюється обмін даними з давачами наукових пристроїв, моделюється робота модулів з динамічною пам'яттю та робота під дією різноманітних завад. У роботі викладені підходи до проектування, тестування та відлагодження супутникових СЗНІ як до кіберфізичних систем з метою зменшення витрат та покращення надійності СЗНІ та якості згаданих операцій. Наведено пропонувану структуру кіберфізичної системи збору наукової інформації, склад її основних модулів та вимоги до них з боку перспективних СЗНІ.

Ключові слова – кіберфізична система, СЗНІ, система збору наукової інформації, Січ-2, ПЛІС, SciWay.

The paper describes the features of FPGA national satellite scientific data collecting system (SDCS). The first generation of FPGAs SDCS was developed for "Sich-2" satellite. After analyzing the results of operation SDCS new requirements for next-generation FPGAs were defined, function set has been expanded. This leads to the need to design new FPGAs models, new testbenches and test kits for separate FPGA debugging as well as SDCS in general debugging. The FPGA set includes SDCS central unit FPGA, a set of peripheral modules FPGA and control and checking equipment FPGA. Testbench allows to check data exchange by SciWay and CAN channels, by RS type serial link and by radiochannel. Also data exchange with scientific devices sensors is simulated, the work of dynamic memory modules and work under different obstacles is simulated too. The paper outlined approaches to the design, testing and debugging of satellite SDCS as to cyber-physical systems to reduce costs and improve SDCS reliability and operations quality.

The proposed structure of cyber-physical system for scientific information collection and composition of its basic modules and requirements to them from the advanced SDCS are shown.

Keywords – cyber-physical system, SDCS, scientific data collection system, Sich-2, FPGA, SciWay.

Вступ

Ідеологія побудови системи збору та оброблення наукової інформації (СЗНІ), яка використовувалась на борту супутника «Січ-2» в експерименті «Потенціал», показала високу надійність та ефективність її роботи. Аналіз результатів експлуатації СЗНІ супутника «Січ-2» та нові завдання із створення комплексу наукової апаратури (КНА) для перспективних супутників дистанційного зондування землі показали необхідність розширення виконуваних СЗНІ функцій. Це в свою чергу зумовило перегляд вимог як до складових частин СЗНІ (мікроконтролерів, ПЛІС, наукових давачів, інтерфейсів) так і до системи в цілому, а також до засобів їх проектування та відлагодження. З проведеного аналізу випливає необхідність розширення функціональних можливостей ПЛІС, вдосконалення їхніх моделей, створенню систем автоматизованого проектування елементів СЗНІ та модельних стендів для комплексного перевіряння роботи розроблених ПЛІС. До комплексу ПЛІС СЗНІ входять ПЛІС центрального блоку (ЦБ), ПЛІС периферійних мікромодулів (ПМ), ПЛІС контрольно-перевірочної апаратури. Модельний стенд повинен забезпечувати моделювання обмінів каналами SciWay (в тому числі і інтерфейсом CAN), послідовними каналами типу RS, обмінів через радіоканал, також повинна моделюватися робота з давачами наукової апаратури, з динамічною пам'яттю і дія завад. Результати проведеного макетування роботи елементів СЗНІ, необхідність взаємодії з великою кількістю давачів, керування їхньою роботою, забезпечення високошвидкісного пересилання інформації в умовах обмежених габаритів та електроспоживання, в умовах дії зовнішніх завад змушує розглядати СЗНІ як кіберфізичну систему з урахуванням усіх особливостей проектування таких систем. Додатково необхідно враховувати обмеження структурної та часової складності проектів, які накладає на розробник необхідність використовувати ПЛІС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Принципи побудови бортової СЗНІ для космічних наукових апаратів описані в [1, 2, 3]. Кожний базовий модуль СЗНІ є дворівневою системою і складається з протокольного мікроконтролера та спеціалізованого базового вузла на основі ПЛІС [4, 5]. У свою чергу сама СЗНІ є багаторівневою системою (давачі – найнижчий рівень, периферійні модулі, модуль центрального блоку – найвищий рівень). Базовими модулями СЗНІ є центральний блок, периферійний модуль та модуль контрольно-перевірочної апаратури. Для базового набору модулів СЗНІ супутника Січ-2 було розроблено модельний стенд, який дозволяв промоделювати роботу як кожної окремої ПЛІС, так і усього набору ПЛІС. Для кожного конкретного варіанту використання базові модулі модифікуються за рахунок реконфігурації ПЛІС [6]. Також підлягає модифікації базовий модельний стенд [7]. Можливості зміни конфігурації СЗНІ на прикладі СЗНІ КНА супутника «Іоносат-мікро» (перспективна СЗНІ) на основі базової конфігурації СЗНІ КНА «Потенціал» (супутник Січ-2) розглянуто в [8, 9]. Особливості використанням уніфікованого інтерфейсу SciWay розглянуто в [10]. Структурні схеми ПЛІС ПМ, ЦБ та КПА, контролера швидкісної радіолінії, який відповідає рекомендаціям [11, 12] та особливості моделювання їхньої роботи описано у роботах [13, 14]. Підхід до проектування СЗНІ як кіберфізичної системи, і використання існуючих доробок як базу для створення перспективних кіберфізичних систем запропоновано в [15], огляд наукових пристроїв, зокрема малогабаритної астровиміральної системи (МАВС) наведено в [16].

Цілі статті

Метою роботи є уточнення підходів до проектування, тестування та відлагодження супутникових СЗНІ як до кіберфізичних систем з метою зменшення витрат та покращення надійності СЗНІ та якості згаданих операцій.

Базова структура ПЛІС СЗНІ та модельного стенду

СЗНІ комплексу наукової апаратури (КНА) складається з модуля центрального блоку (рис. 4) і набору периферійних модулів. На рис. 4 також наведено зовнішній вигляд електронної плати блоку аналізатора густини заряджених і нейтральних частинок (АГЧ) космічної плазми, яка використовує комплект периферійних модулів (основний та резервний) СЗНІ.

Структура ПЛІС СЗНІ КНА

ПЛІС ЦБ СЗНІ є типовою (рис. 5) і практично не змінюється для різних СЗНІ. Зараз існує два варіанти ЦБ: з одно- та двонаправленим радіоканалом. Двонаправлений радіоканал містить кодер-декодер Ріда-Соломона, формувач згорткових кодів та декодер Вітербі. Однонаправлений радіоканал містить тільки контролер передавача (кодер Ріда-Соломона) та формувач згорткових кодів (рис. 1).

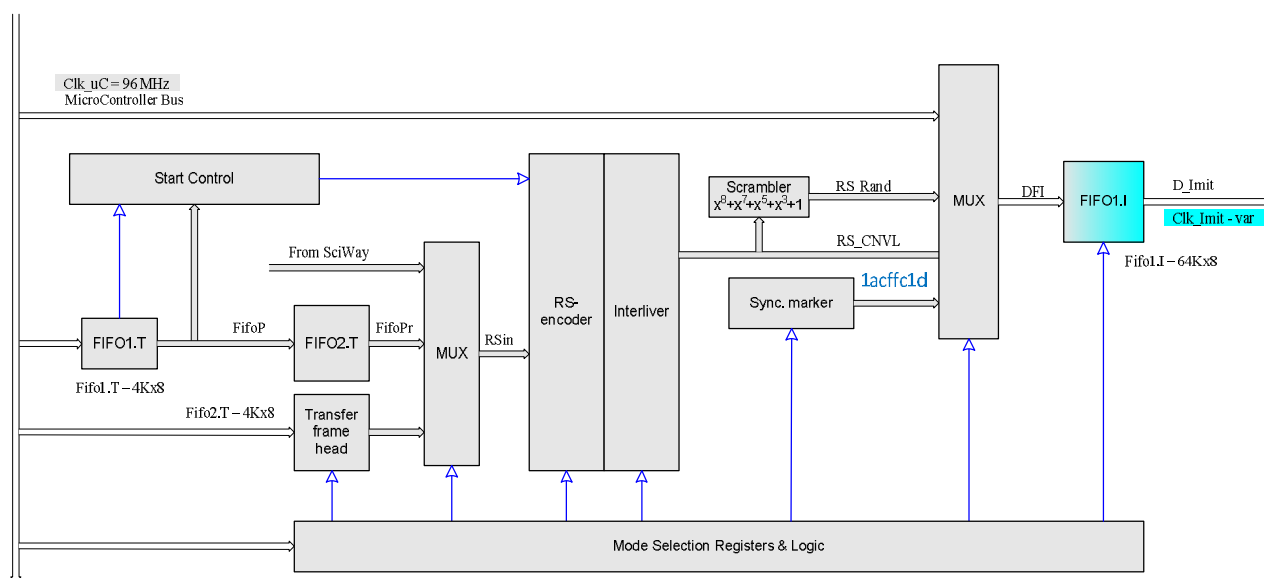


Рис. 1. Кодер Ріда-Соломона

ПЛІС ПМ [13, 14] є базовою і уточнюється та модифікується для кожного конкретного наукового пристрою. Останні модифікації ПЛІС ПМ враховують результати макетування роботи з одним з наукових пристроїв – малогабаритною астро-вимірювальною системою МАВС ([16] рис. 2, функціональна схема ПЛІС ПМ МАВС показано на рис. 3).

Остання модифікація ПЛІС ПМ (рис. 7) містить контролер (FIFO Controller) зовнішньої пам'яті типу FIFO, яка розташована в зовнішньому по відношенні до ПЛІС динамічному запам'ятовуючому пристрої DRAM. ПЛІС забезпечує роботу DRAM як основної пам'яті вбудованого ПМ, так і його пам'яті типу FIFO. Для цього контролер динамічної пам'яті в складі ПЛІС зроблено трипортовим (3 port DRAM Controller).

Особливістю ПМ є велика кількість внутрішніх статичних FIFO, які розділяють внутрішні вузли ПЛІС, чим досягається висока продуктивність каналів обміну з периферійними пристроями, зовнішньою динамічною пам'яттю та зовнішнім FIFO.

Обмін інформацією з периферійними науковими пристроями, кожний з яких, як правило, здійснює обмін інформації з використанням унікального інтерфейсу та унікальних частот, вимагає використання в повному обсязі ресурсів ПЛІС, кількість яких обмежена: буферів синхроімпульсів та доріжок. Типовою є ситуація, коли ПЛІС, на якій задіяно 30-50% логічних елементів (слайсів) перестає розводитися при проведенні найпростіших модифікацій.



Рис. 2. Малогабаритна астровимірювальна система

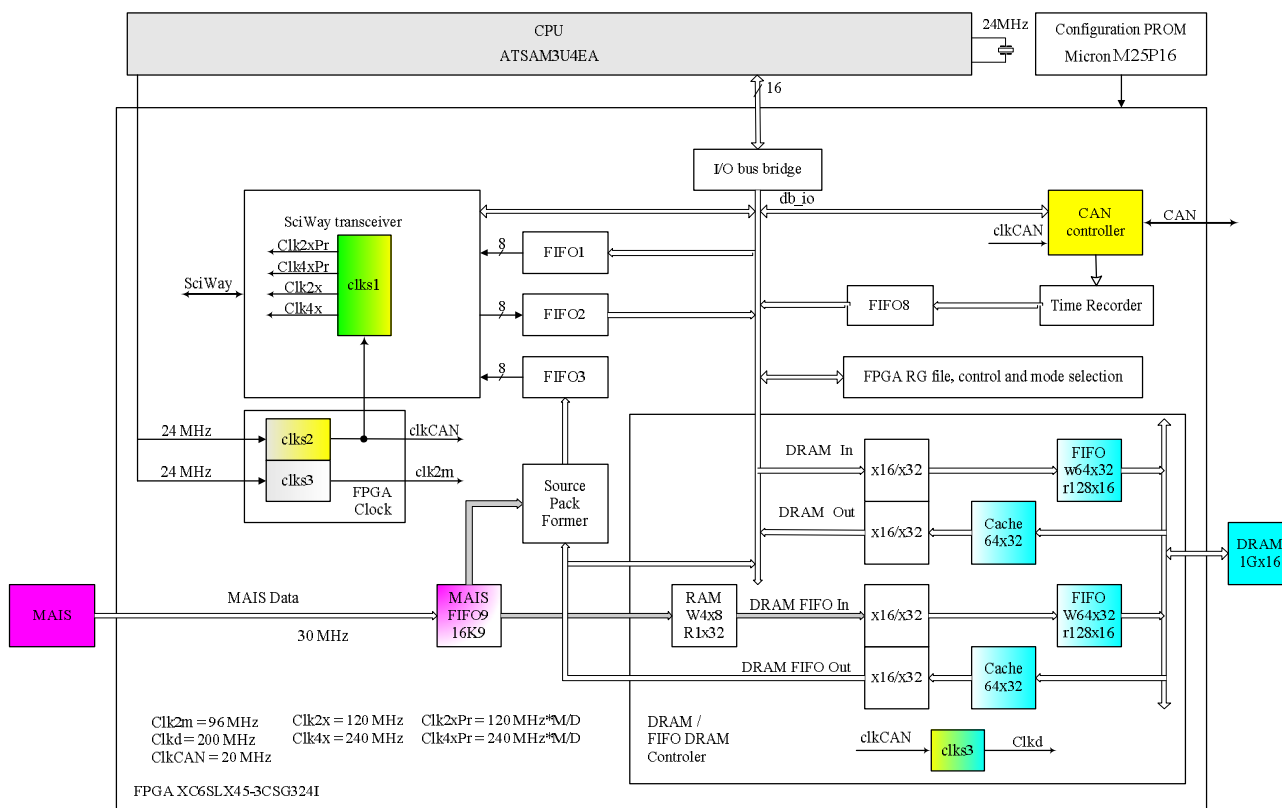


Рис. 3. ПЛІС ПМ MAIC

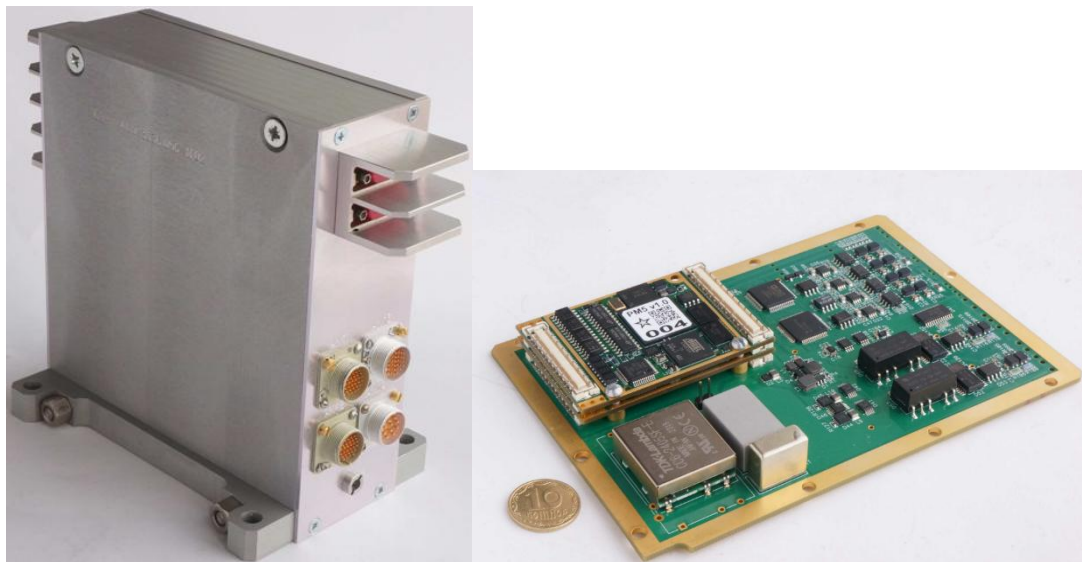


Рис. 4. Зовнішній вигляд центрального блоку та резервованого ПМ

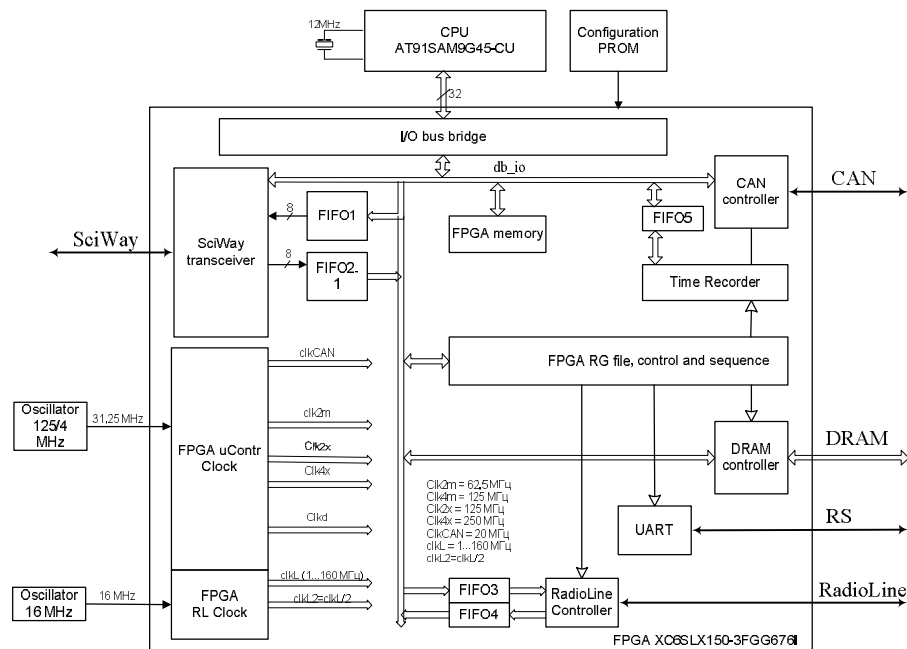


Рис. 5. ПЛІС центрального блоку СЗНІ

Тестування моделі СЗНІ

Модельний стенд СЗНІ [13, 14] є базовим і уточнюється для кожного КНА. Для КНА «Іоносат-мікро» структурна схема стенду має вигляд рис. 8. Додатково до складу стенда введено модель МАВС, моделі інших наукових пристроїв та збільшено кількість ПЛІС периферійних модулів. У ході роботи проведено моделювання процесів обміну інформацією між МАВС, ПМ, ЦБ та КПА за допомогою існуючих інтерфейсів під дією зовнішніх завад. Масштаб часу при функціональному моделюванні складає приблизно від $1:10^6$ до $1:10^5$, тобто, 1 мкс реального часу роботи системи моделюється приблизно за 0,1 ... 1 с машинного часу в залежності від типу комп'ютера та конфігурації системи. Логічне моделювання відбувається приблизно на порядок довше.

Для тестування моделі СЗНІ розроблено ряд тестів: тест ОЗП, тест регістрів, тест ДОЗП, тест CAN, тести контролерів давачів, тест роботи контролерів давачів з FIFO на

основі ДОЗП, тест імітатора давачів, тест синхронних каналів SciWay, комплексний тест ланцюжка передачі даних: мікроконтролер – імітатор давача – контролер давача – FIFO на основі ДОЗП – автомат перекачки до контролера синхронного каналу SciWay – передавач синхронного каналу SciWay – приймач синхронного каналу SciWay – мікроконтролер. Набір тестів постійно розширюється і доповнюється новими перевірками.

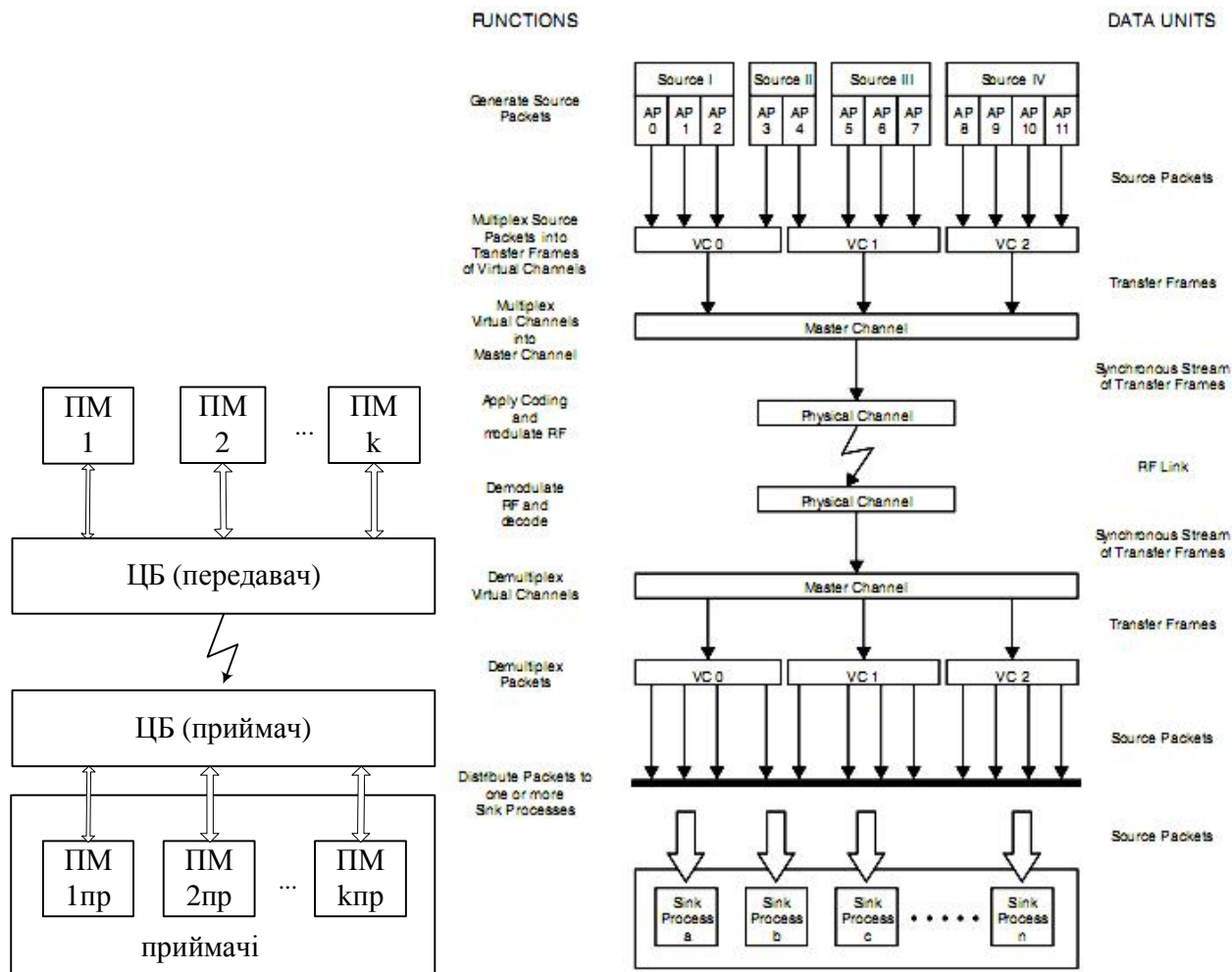


Рис. 6. Модулі СЗНІ в структурі передачі телеметричної інформації

Напрямок подальших робіт

Результати моделювання роботи ПЛІС ПМ та ЦБ та макетування роботи ПМ і наукових пристроїв дозволяють встановити вимоги до нових вузлів (PU Input Unit, PU OutputUnit, рис. 7), які необхідно буде розмістити в нових модифікаціях ПЛІС:

- для додаткових вузлів можна задіяти 50...70 % апаратних ресурсів ПЛІС (слайсів);
- у той же час існує жорстке обмеження на використання синхроімпульсів: дозволяється використовувати тільки ті синхроімпульси, які вже є в ПЛІС;
- можливе використання додаткових синхроімпульсів (не більше 2), якщо їх можна утворити засобами ПЛІС з існуючих синхроімпульсів або прийняти ззовні;
- введення до схеми ПЛІС додаткових функціональних вузлів не повинно приводити до неможливості імплементації схеми;

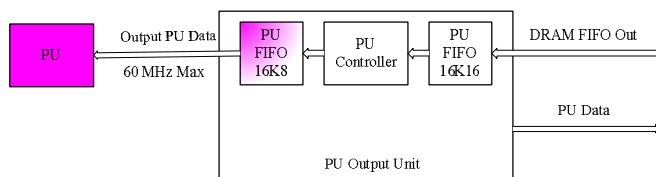
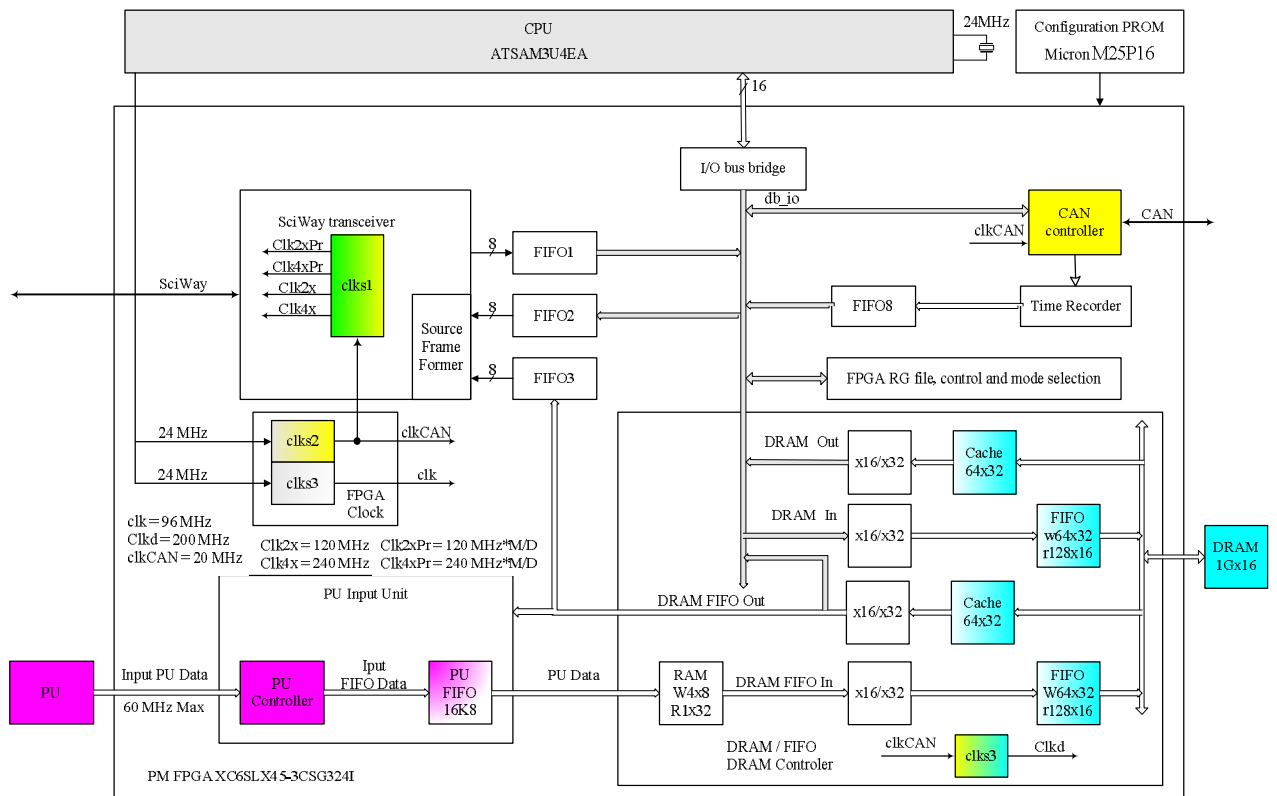


Рис. 7. ПЛІС ПМ

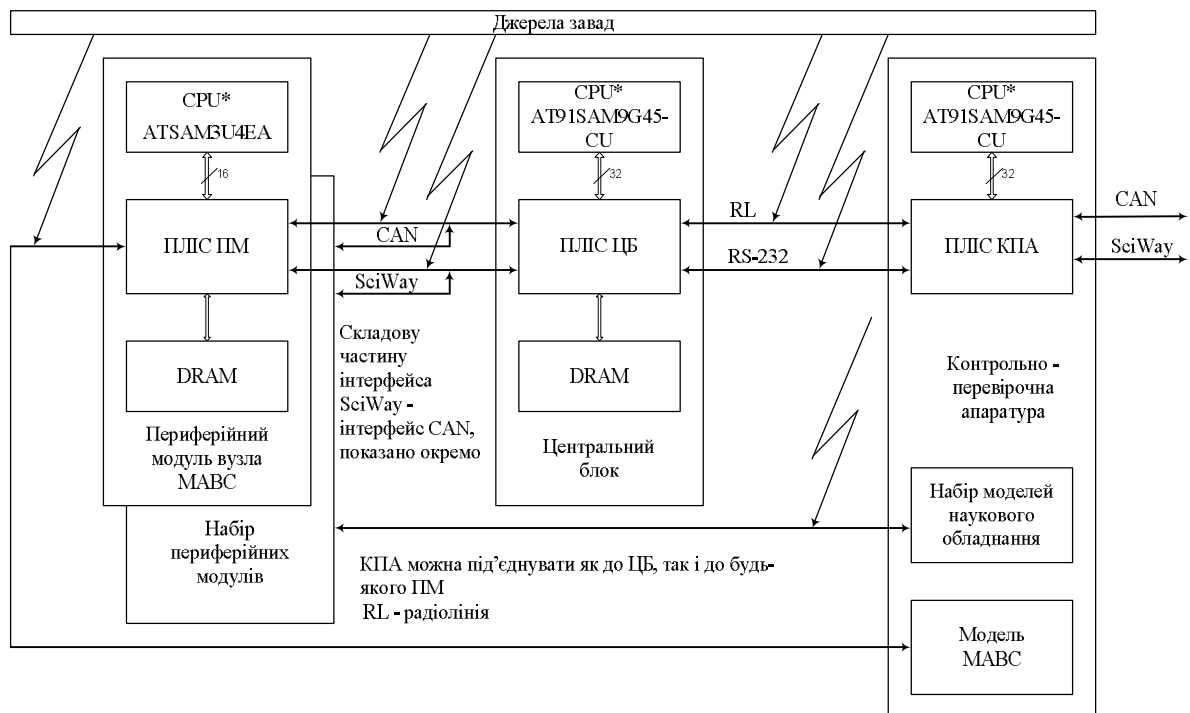


Рис. 8. Модельний стенд КНА «Юносат-мікро»

Характеристики ПЛІС СЗНІ

Параметр	ПМ	ЦБ
ПЛІС	xc6slx45 csg324-3	xc6slx150 fgg676-3
кількість синхронних каналів SciWay	1	4
частоти синхронного каналу SciWay, МГц	120/240	125/250
кількість контролерів CAN	1	4
частота CAN, МГц	20	20
системна шина мікроконтролера, біт	16	32
частота мікроконтролера, МГц	24	31,25
частота радіоканалу, МГц	немає	1 ... 160
кількість задіяних слайсів ПЛІС	1189 (17%)	7758 (33%)
кількість задіяних контактів ПЛІС	105	274
кількість блоків RAMB 16-бітних	6 (5%)	21 (7%)
кількість блоків RAMB 8-бітних	1 (1%)	4 (1%),
кількість DRAM (частота DRAM, МГц)	1 (200)	2 (200)
Споживана потужність, загальна (на кристалі), мВт	913 (701)	3435 (2997)
джиттер синхронного каналу, пс	200	200
температура кристалу ПЛІС, град. Ц	40,8	68,2
струм джерела Vccint 1,2 В, мА	198 / 173 / 25	1107 / 900 / 207
струм джерела Vccaux 3,3 В, мА	90 / 42 / 48	139 / 68 / 71
струм джерела Vcco33 3,3 В, мА	33 / 31 / 2	292 / 272 / 21
струм джерела Vcco18 1,8 В, мА	150 / 14 / 137	380 / 94 / 286

Висновки

У роботі викладено результати моделювання та макетування роботи ПЛІС супутникових СЗНІ, які розглядаються як елементи кіберфізичних систем. Наведено пропонувану структуру кіберфізичної системи збору наукової інформації, склад її основних модулів та вимоги до нових функціональних вузлів, які будуть вводитися до складу ПЛІС СЗНІ.

1. А.А. Лукенюк, С.Г. Шендерук. Принципи побудови бортової системи збору та обробки наукової інформації для космічних досліджень. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки». Збірник доповідей. Частина II. 26-27 квітня 2007 р. Київ. С.313-319. 2. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Уніфікована бортова система збору і обробки інформації з наукової апаратури // Вторая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям. Сборник тезисов. С.68. Кацивели, Крым, 2002. 3. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Специализированный контролер для системы збору наукової інформації супутника «Січ-2» // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» “Комп’ютерні системи та мережі” – Львів, 2011. – № 717. – С.10 – 16.4. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Використання реконфігурованих елементів у бортових системах збору й обробки даних // Вторая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям. Сборник тезисов. С.67. Кацивели, Крым, 2002. 5. В.Глухов, А.Лукенюк, С.Шендерук // НВІС системи збору наукової інформації супутника «Січ-2». Матеріали 5-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні комп’ютерні системи та мережі: розробка та використання» ACSN-2011 29 вересня–01 жовтня, 2011, Львів, Україна С.57-60.6. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Комплект ПЛІС системи збору наукової інформації космічного апарата. Космічний проект «Іоносат-мікро». Наукове видання. Національна академія наук України. Державне космічне агентство України. Інститут космічних досліджень. Київ, «Академперіодика». 2013.

C. 134 – 139. 7. V.Hlukhov, A. Lukenuk, S. Shenderuk. "IonoSat micro" satellite scientific data collecting system model. "Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання". Матеріали 6-ої Міжнародної науково-технічної конференції ACSN-2013, 16-18 вересня 2013, Львів, Україна С. 15 – 17. 8. Лизунов Г.В., Лукенюк А.А., Макараов А.Л., Фёдоров О.П. Космический проект «Ионосат-микро». Цели и методы. Космічний проект «Ионосат-мікро». Наукове видання. Національна академія наук України. Державне космічне агентство України. Інститут космічних досліджень. Київ, «Академперіодика». 2013. С. 11 – 25. 9. Лукенюк А.А., Корепанов В.Е., Шувалов В.А., Шендерук С.Г. Комплекс научной аппаратуры «Ионосат-микро». Космічний проект «Ионосат-мікро». Наукове видання. Національна академія наук України. Державне космічне агентство України. Інститут космічних досліджень. Київ, «Академперіодика». 2013. С. 118 – 125. 10. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Унифицированный интерфейс бортовых систем КА. Космічний проект «Ионосат-мікро». Наукове видання. Національна академія наук України. Державне космічне агентство України. Інститут космічних досліджень. Київ, «Академперіодика». 2013. С. 126 – 133. 11. Recommendation for space. Data system standards. TELEMETRY CHANNEL CODING. CCSDS 101.0-B-5. Blue book. June 2001. 12. Recommendation for space. Data system standards. Packet telemetry. CCSDS 102.0-B-5. Blue book. November 2000. 13. В.С. Глухов, А.А. Лукенюк, С.Г. Шендерук // Комплект ПЛІС бортової системи збору наукової інформації. IX Міжнародна науково-технічна конференція "Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки". Збірник доповідей, 17 – 18 квітня 2013 року, Київ, Україна. С. 401 – 409. 14. В.С. Глухов, А.А. Лукенюк, С.Г. Шендерук // Моделювання роботи ПЛІС системи збору наукової інформації. 14-я международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии», Одесса, 27 — 31 мая 2013 г. С. 131 – 134. 15. В.С. Глухов, А.А. Лукенюк, С.Г. Шендерук. Погляд на супутникову систему збору наукової інформації як на кіберфізичну систему. Перший науковий семінар «Кіберфізичні системи: досягнення та виклики» 25 -26 червня 2015р. Львів, Україна. 16. РІЧНИЙ ЗВІТ Державного космічного агентства України за 2012 рік. http://www.nkau.gov.ua/pdf/SSAU_report_2012.pdf

Наукові результати, подані у цій статті, було отримано в рамках дослідницького проекту ДБ/КІБЕР з реєстраційним номером 0115U000446, 01.01.2015 – 31.12.2017, фінансово підтриманим Міністерством освіти та науки України.