Жүйелерді FPGA негізінде жобалау

Дәріс 2: FPGA архитектурасы және құрылымы

ДӘРІСКЕР:PhD, доцент м.а.
Сқабылов Әлішер Әлиұлы

Дәрістің мақсаты:

FPGA құрылғысының ішкі аппараттық архитектурасын зерттеу, оның негізгі конфигурацияланатын және мамандандырылған ресурстарының құрылымы мен қызметін түсіндіру, сондай-ақ осы ресурстардың өзара байланысу принциптерін қарастыру.

FPGA архитектурасының жалпы құрылымы

FPGA архитектурасы цифрлық жүйелерді іске асыратын логикалық және мамандандырылған аппараттық ресурстардан тұрады. Оның негізгі құрамдастарына CLB, LUT, Flip-Flop, бағдарламаланатын байланыс желілері, жады блоктары, DSP, I/O және тактілік басқару ресурстары жатады.

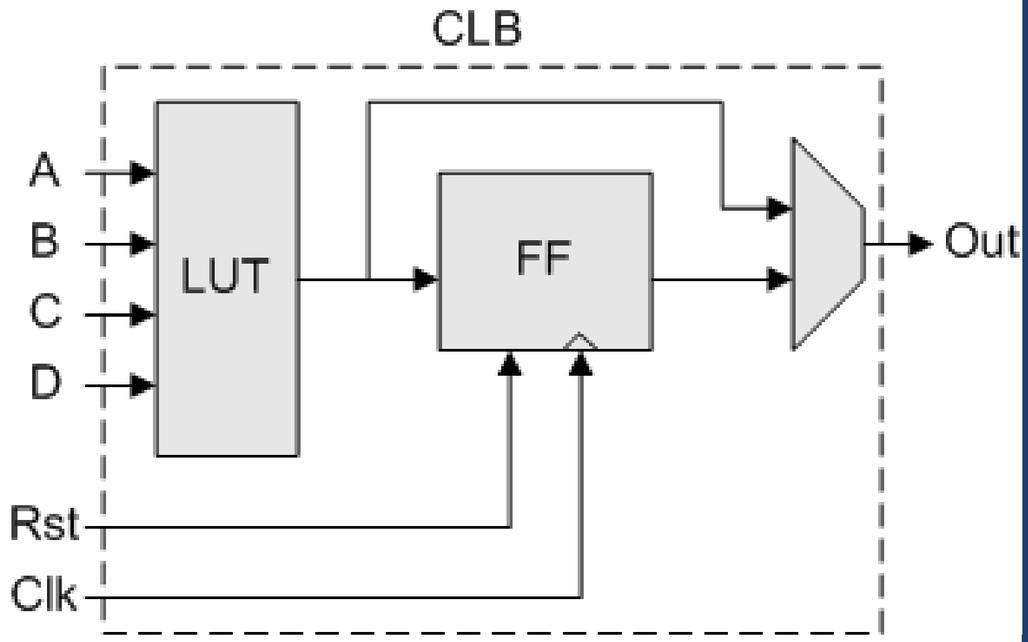
Әр ресурс белгілі **бір міндет** атқарады: логикалық элементтер есептеулерді орындайды, сақтау элементтері деректерді сақтайды, ал routing жүйесі ресурстар арасында сигналдарды жеткізеді. Барлық компоненттер бірігіп, біртұтас **цифрлық жүйені** қалыптастырады.

Конфигурацияланатын логикалық блоктар (CLB)

CLB (Configurable Logic Block) — FPGA ішіндегі негізгі логикалық ресурстардың бірі. Ол комбинациялық және тізбектей логикалық схемаларды іске асыруға мүмкіндік береді.

CLB құрамында LUT, Flip-Flop, мультиплексорлар және арифметикалық операцияларға арналған Carry Logic болуы мүмкін. **AMD 7 Series** архитектурасында бір CLB екі slice-тан тұрады. Нақты құрылымы мен ресурстары FPGA моделіне байланысты өзгереді.

CLB блоктары бір-бірімен бағдарламаланатын байланыс желілері арқылы қосылып, күрделі цифрлық схемаларды құрады.



LUT және логикалық функцияларды орындау

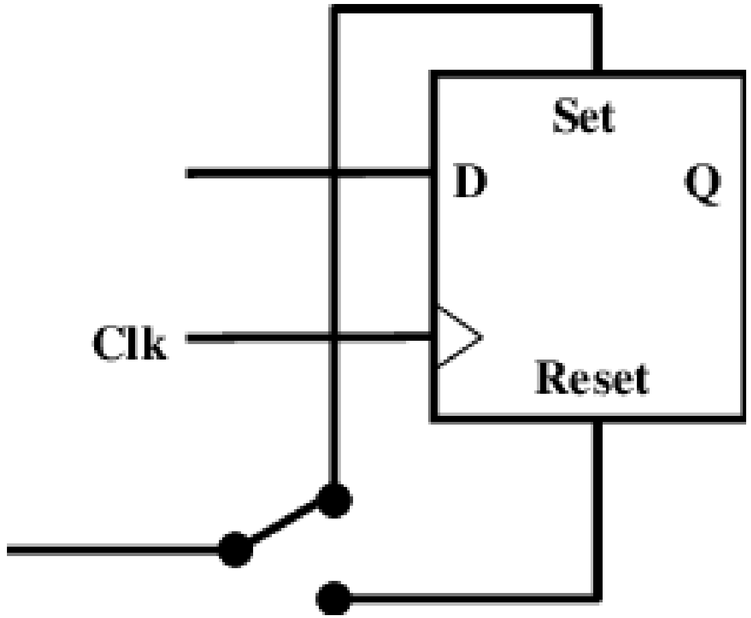
LUT (Look-Up Table) — кіріс сигналдарының комбинациясына сәйкес логикалық нәтиже қалыптастыратын бағдарламаланатын элемент. Ол логикалық функцияның мәндерін сақтап, қажетті кіріс комбинациясына сәйкес шығысты таңдайды.
Мысалы, екі кірісті AND функциясында шығыс екі кіріс те 1 болғанда ғана 1-ге тең болады.

A	B	Y = A ANI
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

LUT әртүрлі комбинациялық функцияларды орындауға конфигурацияланады. Кейбір FPGA архитектураларында LUT шағын жад немесе жылжыту регистрі ретінде де қолданылады.

Flip-Flop және сақтау элементтері

Flip-Flop — бір бит ақпаратты сақтайтын тізбектей логикалық элемент. Ол әдетте тактілік сигналдың белгілі бір фронтында кіріс мәнін қабылдап, оны **келесі жаңартуға дейін** сақтайды.
Бірнеше Flip-Flop бірігіп регистрлерді, санауыштарды және күй автоматтарын құрайды.



Мысалы, 8 биттік регистрге 8 бит ақпарат сақтау үшін 8 Flip-Flop қажет.

LUT комбинациялық есептеуді орындаса, Flip-Flop оның нәтижесін тактілік сигналмен байланыстырып сақтай алады. Бұл құрылым синхронды цифрлық жүйелердің негізін құрайды.

Carry Logic және мультиплексорлар

Carry Logic — екілік сандарды қосу және басқа арифметикалық операцияларды тиімді орындауға арналған арнайы логикалық тізбек. Қосу кезінде пайда болатын тасымалдау сигналдары разрядтар арасында беріледі. Арнайы **Carry Chain** бұл сигналдардың таралуын жылдамдатуға көмектеседі.
Carry Logic санауыштар мен арифметикалық схемаларды іске асыруда маңызды рөл атқарады.

Мультиплексор (MUX) бірнеше кіріс сигналының бірін таңдап, шығысқа береді. Таңдау басқарушы сигналдардың көмегімен орындалады. FPGA ішінде мультиплексорлар **логикалық функцияларды** және **деректерді таңдау схемаларын** құрастыру үшін пайдаланылады.

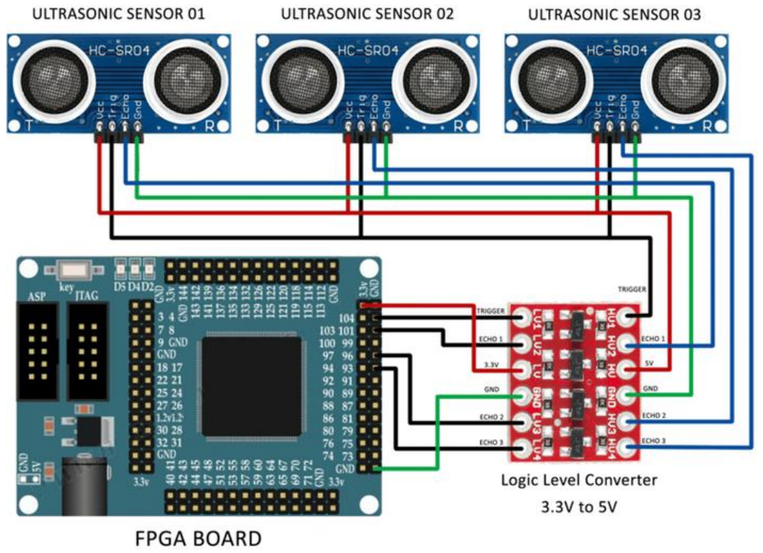
Бағдарламаланатын байланыстар және Routing

Interconnect — FPGA ішіндегі логикалық және арнайы аппараттық ресурстарды байланыстыратын бағдарламаланатын желілер жүйесі.

Routing — сигналдарды осы желілер арқылы қажетті бағытқа жеткізу процесі. Routing көмегімен CLB, жады блоктары, DSP және басқа ресурстар арасында байланыс ұйымдастырылады. Байланыстар FPGA конфигурациясы кезінде жобаның талаптарына сәйкес орнатылады.

Routing жүйесінің ұйымдастырылуы сигналдардың таралу кідірісіне және жобаның жалпы өнімділігіне әсер етеді. Сондықтан FPGA жобасында логикалық функцияларды ғана емес, олардың арасындағы байланыстарды да ескеру қажет.

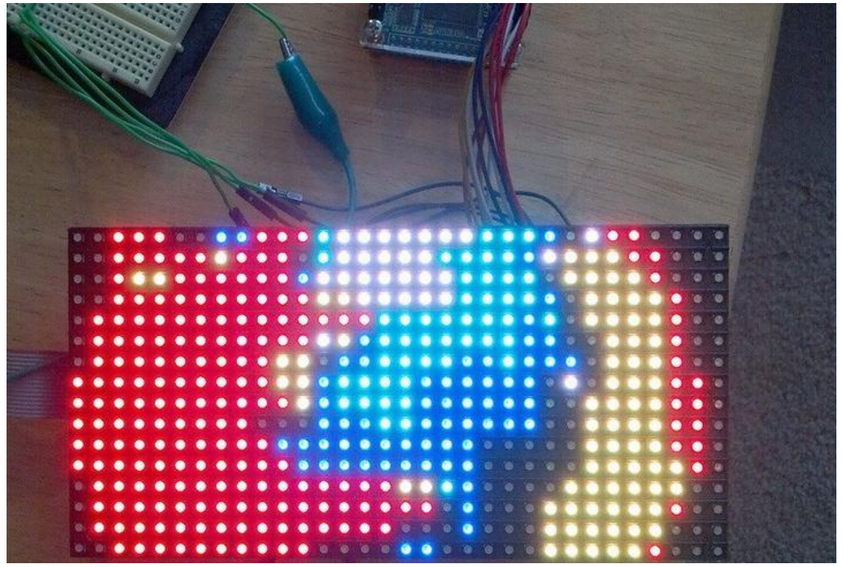
FPGA енгізу/шығару ресурстары (I/O)



I/O (Input/Output) ресурстары FPGA-ның ішкі логикасын сыртқы электрондық құрылғылармен байланыстырады. Олар сигналдарды қабылдауға, сыртқа шығаруға және құрылғылар арасында деректер алмасуды ұйымдастыруға арналған.

I/O арқылы FPGA сенсорлармен, жарық диодтармен, дисплейлермен және басқа цифрлық құрылғылармен жұмыс істей алады. Ресурстардың нақты мүмкіндіктері FPGA моделіне және қолдайтын енгізу/шығару стандарттарына байланысты.

.



Жобаны іске асыру кезінде логикалық сигналдарды физикалық pin-дермен сәйкестендіру қажет. Бұл процесс **pin assignment** деп аталады.

FPGA жады ресурстары

FPGA ішінде деректерді сақтау үшін бірнеше түрлі ресурс қолданылады:
Flip-Flop негізіндегі сақтау шағын көлемдегі ақпаратты, регистрлер мен аралық нәтижелерді сақтауға жарамды.

Distributed RAM LUT ресурстарын жад ретінде конфигурациялау арқылы жүзеге асырылады. Ол шағын деректер көлеміне қолданылады.

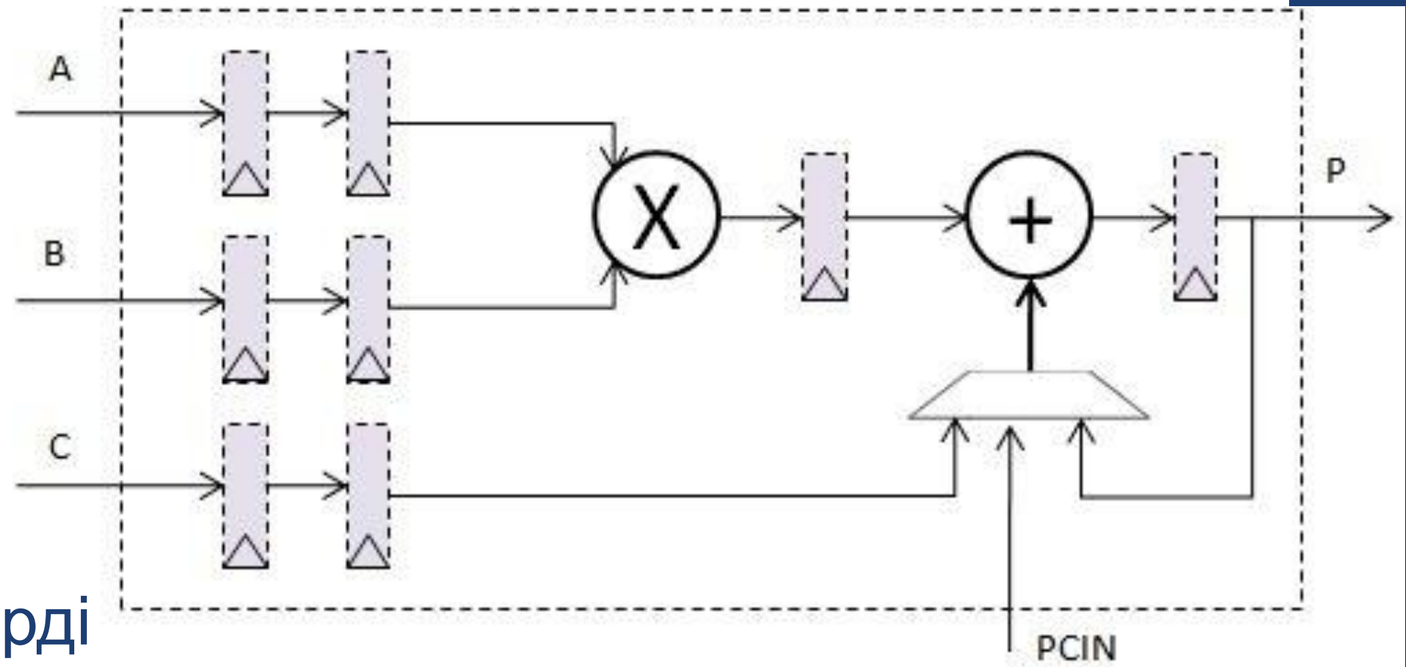
Block RAM (BRAM) — үлкенірек көлемдегі деректерге арналған арнайы жад блогы. Ол буферлер, FIFO, ROM және деректер массивтерін ұйымдастыруға пайдаланылады.

Кейбір FPGA отбасыларында **UltraRAM** сияқты қосымша жад ресурстары да бар. Жад түрін таңдағанда оның көлемі, деректер ені және жұмыс режимі ескеріледі.

DSP блоктары

DSP (Digital Signal Processing) блоктары арифметикалық есептеулерді аппараттық деңгейде тиімді орындауға арналған. Олар көбейту, қосу, жинақтау және көбейту нәтижелерін жинақтау (MAC) сияқты операцияларды орындай алады.

DSP ресурстары цифрлық сүзгілерде, сигналдарды өңдеу жүйелерінде және көптеген арифметикалық амалдарды қажет ететін құрылғыларда қолданылады.



Мұндай операцияларды арнайы DSP блоктарына беру жалпы логикалық **ресурстардың жүктемесін азайтып**, аппараттық мүмкіндіктерді **тиімді** пайдалануға көмектеседі.

Тактілік сигналдарды басқару ресурстары

Тактілік сигнал (Clock) синхронды цифрлық жүйелердегі сақтау элементтерінің жұмыс уақытын анықтайды. Ол Flip-Flop және регистрлердің **ақпаратты қашан қабылдайтынын** белгілейді.

FPGA құрамындағы *clocking resources* тактілік сигналды қалыптастыруға, таратуға және қажет жағдайда жиілігін өзгертуге арналған. Арнайы clock routing желілері тактілік сигналды көптеген логикалық ресурстарға жеткізеді.

Clock management ресурстары жиілік пен тактілік сигналдың таралуын басқаруға көмектеседі. Тактілік жүйені дұрыс ұйымдастыру бүкіл цифрлық схеманың **синхронды** және **тұрақты** жұмыс істеуі үшін маңызды.

FPGA конфигурациясы және ресурстардың өзара байланысы

FPGA конфигурациясы құрылғының қандай **логикалық функцияларды** орындайтынын және **аппараттық ресурстардың** қалай байланысатынын анықтайды. *Конфигурациялық ақпарат* LUT функцияларын, routing байланыстарын және басқа ресурстардың жұмыс режимдерін белгілейді.

Мысалы, цифрлық сигналды өңдеу жүйесінде: кіріс деректер I/O арқылы қабылданады, CLB басқару логикасын орындайды, BRAM деректерді сақтайды, ал DSP арифметикалық есептеулерді орындайды. Clocking ресурстары синхрондауды қамтамасыз етеді, ал routing барлық блоктарды байланыстырады.

Осылайша FPGA архитектурасы **3 негізгі қызметке** негізделеді: есептеу, сақтау және байланыс. Олардың үйлесімді жұмысы күрделі цифрлық жүйелерді бір құрылғыда іске асыруға мүмкіндік береді.

Білімді бекітуге арналған сұрақтар:

1. FPGA архитектурасының негізгі компоненттерін атаңыз.
2. CLB дегеніміз не және оның негізгі қызметі қандай?
3. LUT FPGA ішінде қандай міндет атқарады?
4. LUT пен кәдімгі логикалық қақпаның айырмашылығы неде?
5. Flip-Flop FPGA архитектурасында не үшін қолданылады?
6. LUT пен Flip-Flop бірге қандай цифрлық құрылымдарды жүзеге асыра алады?
7. Carry Logic қандай есептерді тиімді орындауға мүмкіндік береді?
8. Мультиплексордың FPGA архитектурасындағы қызметі қандай?
9. Interconnect және Routing ұғымдарының мағынасы қандай?
10. FPGA ресурстарының өзара байланысын түсіндіріңіз.
11. Неліктен барлық логикалық функцияларды тек LUT көмегімен орындау тиімді бола бермейді?
12. FPGA архитектурасында мамандандырылған аппараттық ресурстарды қолданудың қандай артықшылығы бар?

Әдебиеттер тізімі:

1. AMD. FPGA Architecture. AMD Documentation.
2. AMD. 7 Series FPGAs Configurable Logic Block User Guide (UG474).
3. AMD. Interconnect Resources – 7 Series FPGAs Configurable Logic Block User Guide (UG474).
4. AMD. UltraScale Architecture Clocking Resources User Guide (UG572).
5. AMD. UltraScale Architecture and Product Data Sheet: Overview.
6. Brown S., Vranesic Z. Fundamentals of Digital Logic with Verilog Design. McGraw-Hill.
7. Harris D., Harris S. Digital Design and Computer Architecture. Morgan Kaufmann.
8. Chu P. P. FPGA Prototyping by Verilog Examples. Wiley.
9. Wakerly J. F. Digital Design: Principles and Practices. Pearson.