



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ

Εργασία 1<sup>η</sup>: Αλγόριθμος Tomasulo  
Υλοποίηση υπομονάδων

Σωτήριος Μιχαήλ, Α.Μ. : 2015030140

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

## Σκοπός της εργαστηριακής άσκησης

Η πρώτη εργαστηριακή άσκηση περιλαμβάνει την υλοποίηση υποσυστήματος ενός επεξεργαστή, το οποίο υποσύστημα υλοποιεί τον αλγόριθμο Tomasulo για την εκτέλεση των εντολών. Η υλοποίηση της σχεδίασης αυτή αποτελείται από πέντε βασικές δομικές βαθμίδες(blocks):

- Reservation Stations (RS)
- Register File (RF)
- Common Data Bus (CDB)
- Functional Units (FU)
- Issue Stage

Η κάθε δομική βαθμίδα, εκτός από βασικά στοιχεία σχεδίασης (όπως flip-flop, καταχωρητές, πολυπλέκτες και αποκωδικοποιητές), περιέχει και μία μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων για τον έλεγχο της, όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο. Η σχεδίαση αυτή επεξεργάζεται τις εντολές που εκτελεί ο επεξεργαστής με επίπεδα διοχέτευσης (pipeline stages).

Η είσοδος των εντολών γίνεται από μία μονάδα IF, η οποία, σύμφωνα με την εκφώνηση της άσκησης, δεν υλοποιείται.

## Διεπαφές

### Διεπαφή Issue Stage

Σήμα	Πλάτος (bits)	Είδος	Περιγραφή
tags	15	Είσοδος	Ετικέτες αποστολής των RS (x3, ένα για κάθε RS)
available	3	Είσοδος	Διαθεσιμότητα RS (x3, ένα για κάθε RS)
issue_rs	3	Έξοδος	Υποδεικνύει στον κατάλληλο RS να αποθηκεύσει την εντολή (x3, ένα για κάθε RS)
fop	2	Έξοδος	Κωδικός πράξης
ri	5	Έξοδος	Αριθμός καταχωρητή προορισμού
rj	5	Έξοδος	Αριθμός καταχωρητή πηγής #1
rk	5	Έξοδος	Αριθμός καταχωρητή πηγής #2
tag_rf	5	Έξοδος	Η ετικέτα του RS block που δέχτηκε την εντολή
valid	1	Έξοδος	Ενημερώνει το RF ότι η εντολή είναι έγκυρη

## Διεπαφή Common Data Bus

Σήμα	Πλάτος (bits)	Είδος	Περιγραφή
request	3	Είσοδος	Σήματα αίτησης χρήσης του CDB από τα FU
q_0	5	Είσοδος	Ετικέτα από το FU1
q_1	5	Είσοδος	Ετικέτα από το FU2
q_2	5	Είσοδος	Ετικέτα από το FU3
val_0	32	Είσοδος	Αποτέλεσμα του FU1
val_1	32	Είσοδος	Αποτέλεσμα του FU2
val_2	32	Είσοδος	Αποτέλεσμα του FU3
grant	3	Έξοδος	Ενημερώνει τα FU αν θα πάρουν τον έλεγχο τον επόμενο κύκλο
cdb_out	38	Έξοδος	Συνδυασμός της σωστής ετικέτας και αποτελέσματος, καθώς και του cdb_valid (1 εάν τα αποτελέσματα είναι έγκυρα, αλλιώς 0)

## Διεπαφή Register File

Σήμα	Πλάτος (bits)	Είδος	Περιγραφή
ri	5	Είσοδος	Αριθμός καταχωρητή προορισμού
rj	5	Είσοδος	Αριθμός καταχωρητή πηγής #1
rk	5	Είσοδος	Αριθμός καταχωρητή πηγής #2
valid	1	Είσοδος	Υποδεικνύει αν η εντολή είναι έγκυρη
cdb	38	Είσοδος	Δεδομένα που κοινοποιεί ο CDB
vj	32	Έξοδος	Δεδομένα καταχωρητή πηγής #1
vk	32	Έξοδος	Δεδομένα καταχωρητή πηγής #2
qj	5	Έξοδος	Ετικέτα καταχωρητή πηγής #1
qk	5	Έξοδος	Ετικέτα καταχωρητή πηγής #2

## Διεπαφή Reservation Station

Σήμα	Πλάτος (bits)	Είδος	Περιγραφή
rf_vj	32	Είσοδος	Δεδομένα καταχωρητή πηγής #1
rf_vk	32	Είσοδος	Δεδομένα καταχωρητή πηγής #2
rf_qj	5	Είσοδος	Ετικέτα καταχωρητή πηγής #1
rf_qk	5	Είσοδος	Ετικέτα καταχωρητή πηγής #2
fop_in	2	Είσοδος	Κωδικός πράξης
ready_issue	1	Είσοδος	Εγκυρότητα εντολής. Υποδεικνύει ότι πρέπει να αποθηκευτεί.
cdb	38	Είσοδος	Δεδομένα που κοινοποιεί ο CDB
ready_fu	1	Είσοδος	Υποδεικνύει ότι το FU είναι διαθέσιμο
available	1	Έξοδος	Ενημερώνει ότι έχει ελεύθερο χώρο
tag_rf	5	Έξοδος	Υποδεικνύει σε πιο block αποθηκεύεται η εντολή
vj_out	32	Έξοδος	Δεδομένα πρώτου τελεστέου
vk_out	32	Έξοδος	Δεδομένα δεύτερου τελεστέου
fop_out	2	Έξοδος	Κωδικός πράξης
tag_fu	5	Έξοδος	Δείχνει από πιο block έρχεται η εντολή

**Σημείωση:** Και οι δύο τύποι Reservation Station (Arithmetic & Logical), έχουν την ίδια διεπαφή.

## Διεπαφή Functional Unit

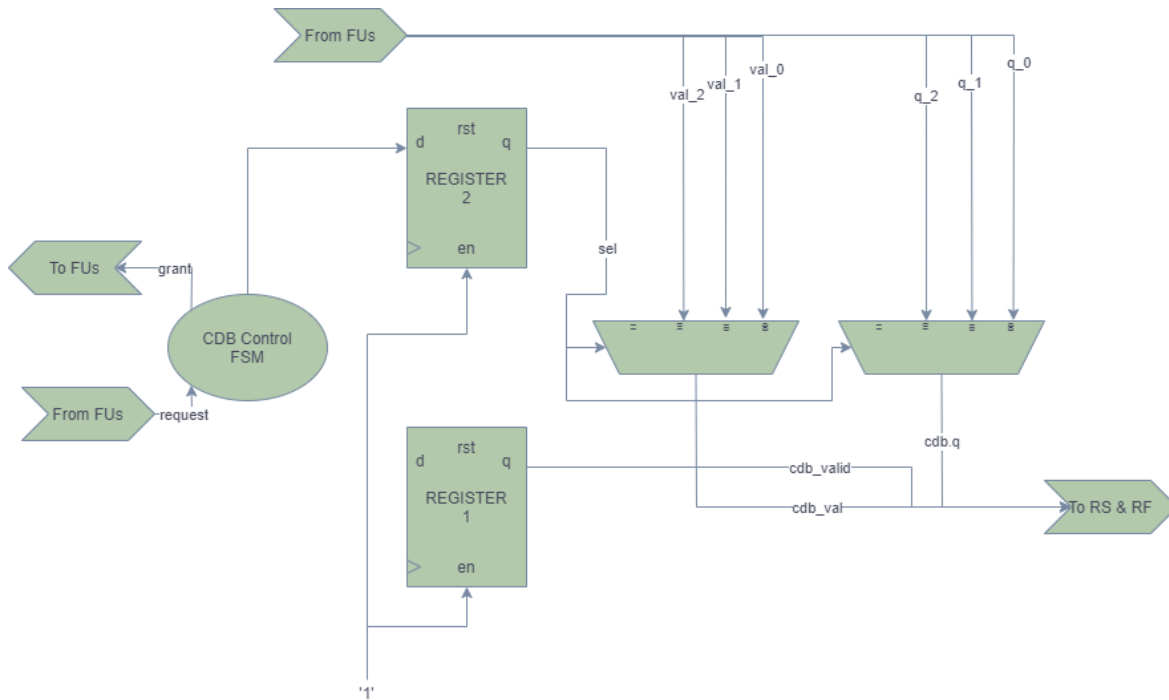
Σήμα	Πλάτος (bits)	Είδος	Περιγραφή
tag	5	Είσοδος	Υποδεικνύει από πιο block έρχεται η εντολή
op	2	Είσοδος	Κωδικός πράξης
val_0	32	Είσοδος	Δεδομένα πρώτου τελεστέου
val_1	32	Είσοδος	Δεδομένα δεύτερου τελεστέου
grant	1	Είσοδος	Ενημερώνει το FU αν θα πάρει τον έλεγχο του CDB κατά τον επόμενο κύκλο
ready	1	Έξοδος	Υποδεικνύει ότι το FU είναι διαθέσιμο
val_out	32	Έξοδος	Αποτέλεσμα του FU
q	5	Έξοδος	Υποδεικνύει από πιο block έρχεται η εντολή
request	1	Έξοδος	Σήμα αίτησης χρήσης του CDB από το FU

**Σημείωση:** Και οι δύο Functional Unit (Arithmetic & Logical), έχουν την ίδια διεπαφή, αλλά τα δεδομένα τους προέρχονται από διαφορετικά Reservation Stations.

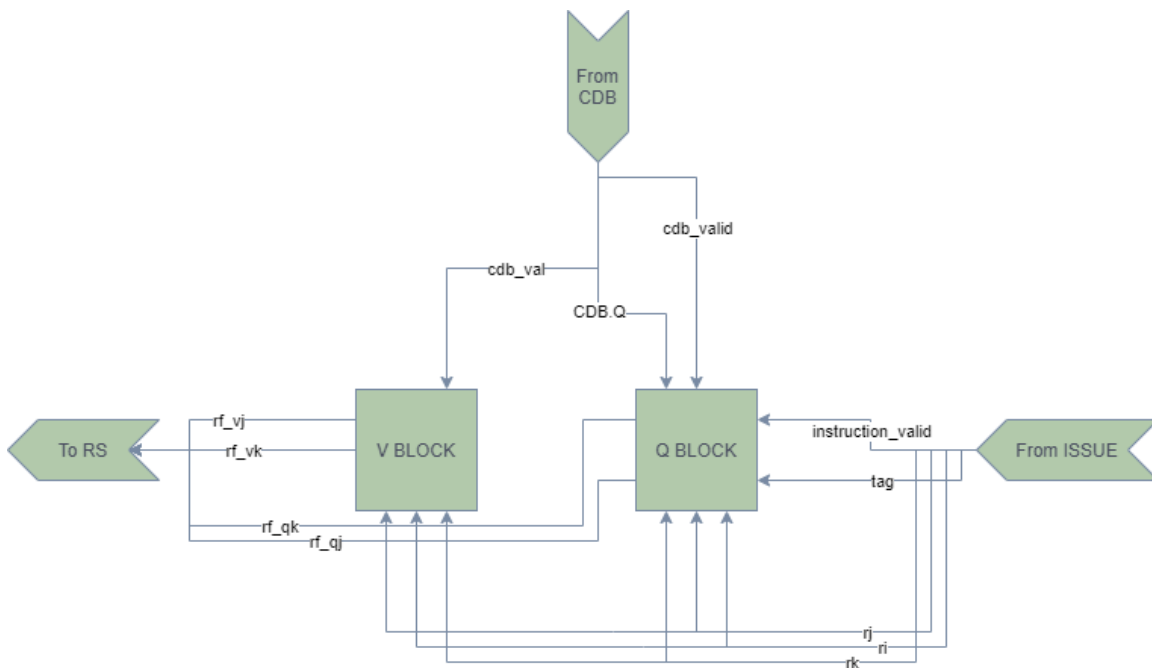
## Δομικά διαγράμματα

Τα αξιοσημείωτα διαγράμματα των δομικών βαθμίδων παρουσιάζονται παρακάτω:

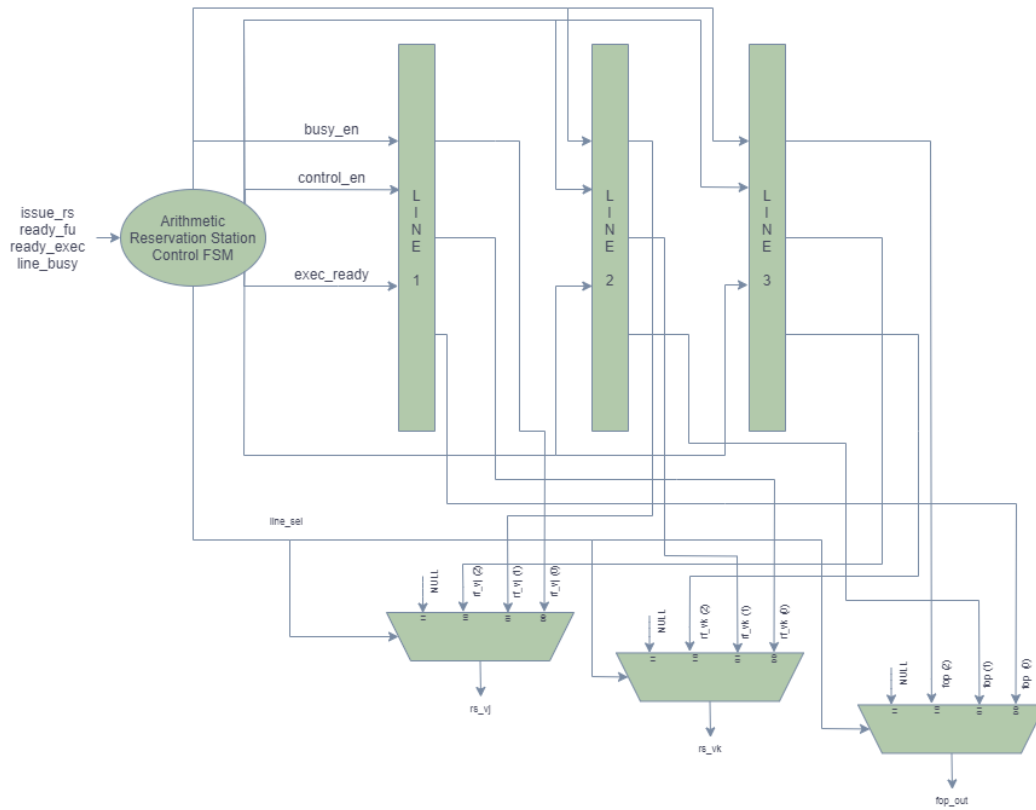
### Μονάδα Common Data Bus



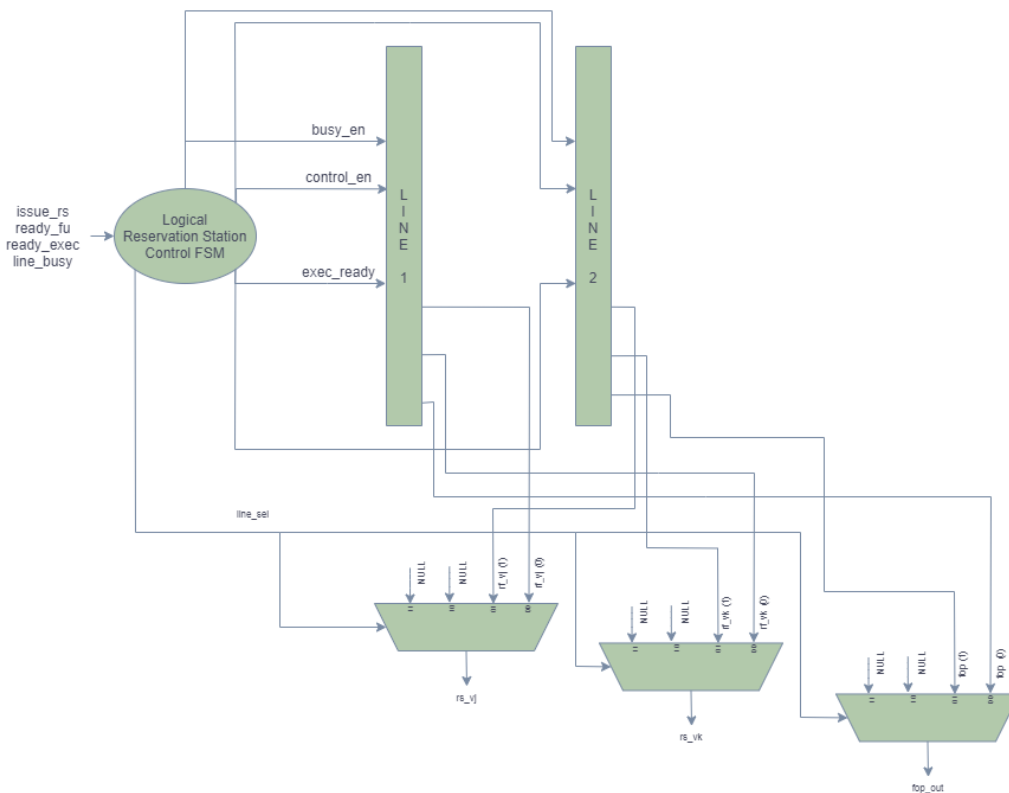
### Μονάδα Register File



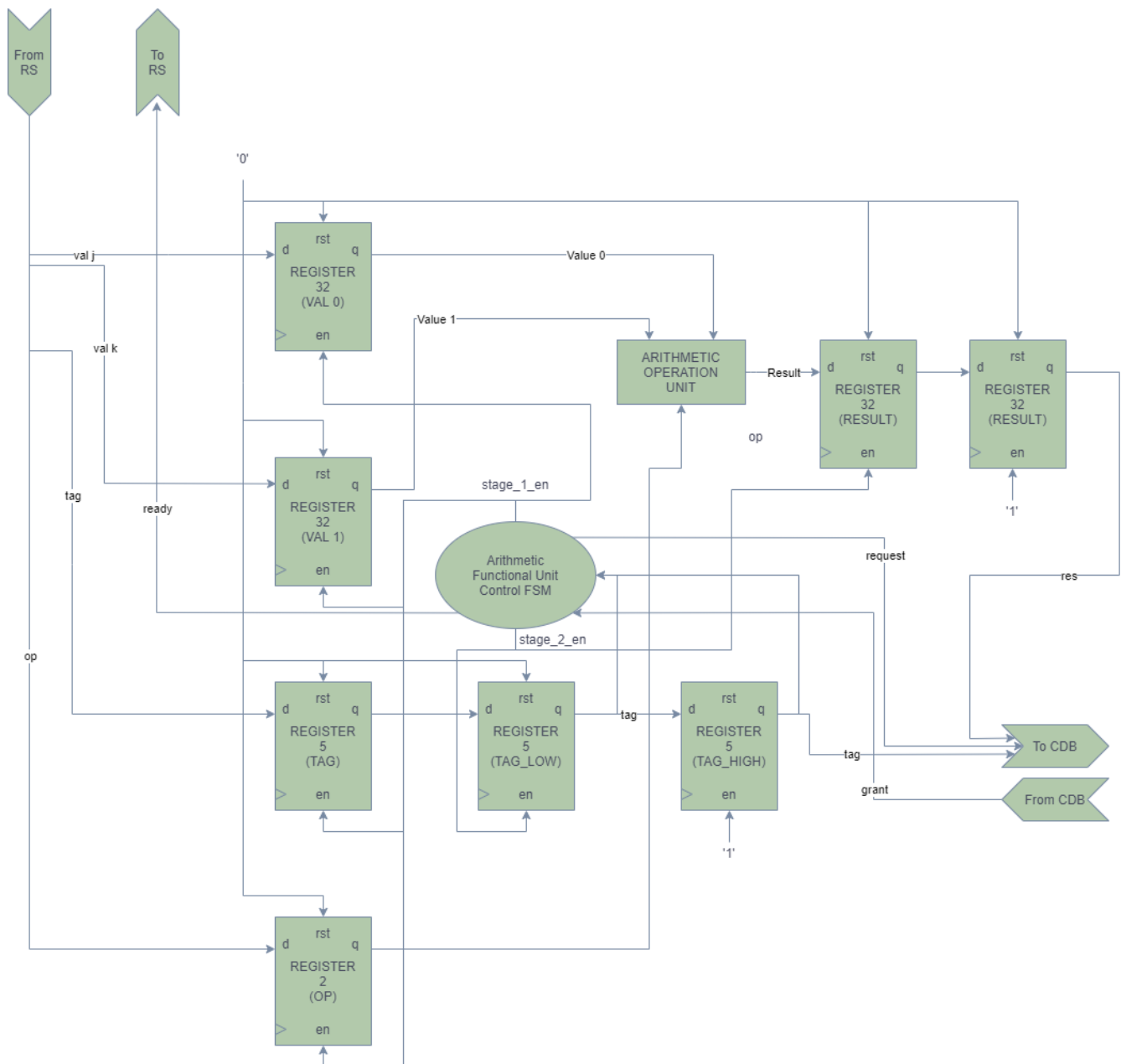
## Μονάδα Reservation Station – Arithmetic



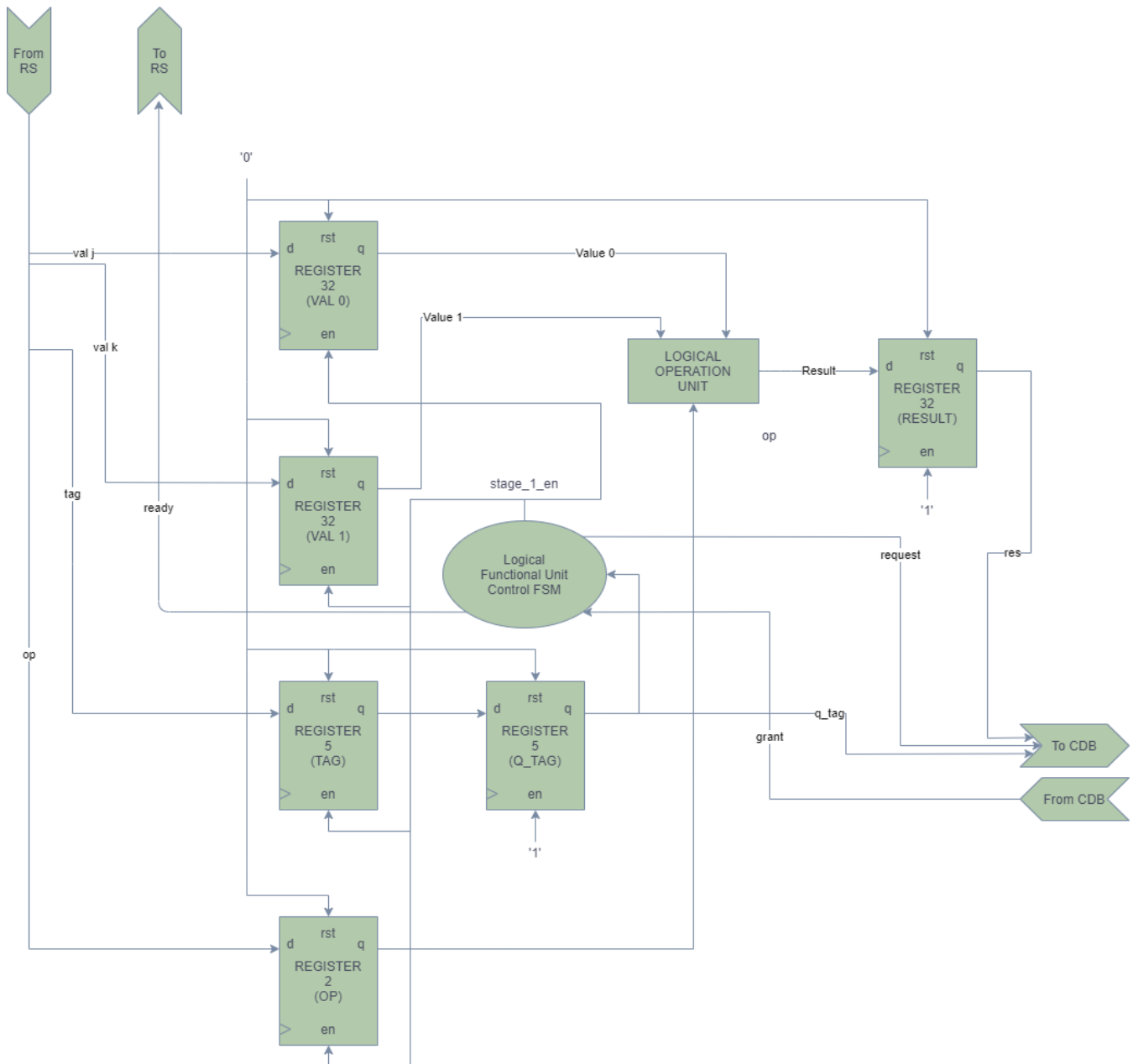
## Μονάδα Reservation Station – Logical



## Μονάδα Functional Unit – Arithmetic

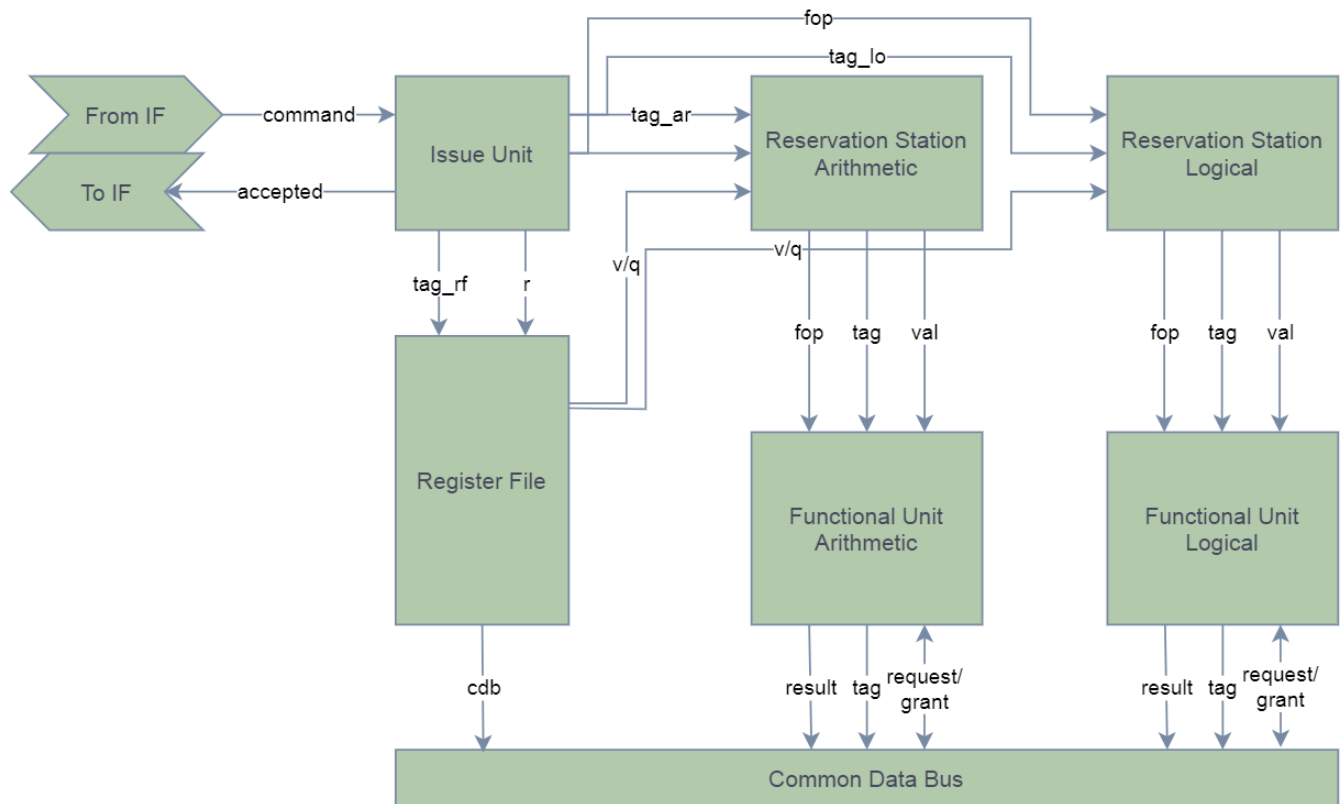


## Μονάδα Functional Unit – Logical



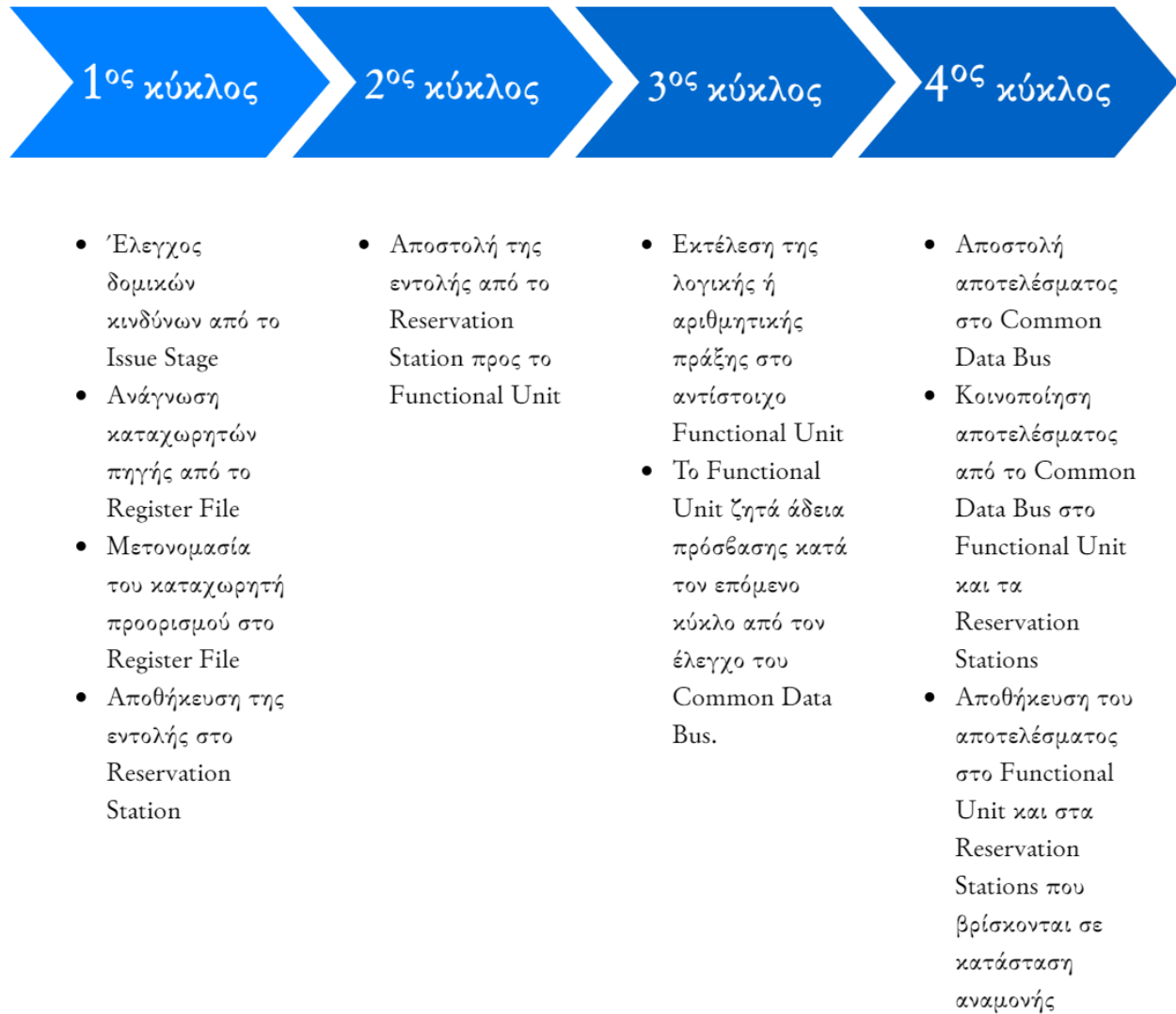


## Διασυνδεδεμένα υποσυστήματα – Ολοκληρωμένο Tomasulo Backend



## Χρονισμός συστήματος

Η εκτέλεση μίας εντολής γίνεται με συγκεκριμένο τρόπο και χρονισμό από το Tomasulo backend. Ακολουθεί ένα παράδειγμα, με την εκτέλεση μίας εντολής AND:



# Περιγραφή συστήματος και δομικών μονάδων

## Issue Stage

Στο Issue Stage γίνεται η έκδοση των εντολών και ο έλεγχος δομικών κινδύνων αυτών. Δέχεται από το (εξωτερικό, σε αυτή τη σχεδίαση) επίπεδο IF μία αποκωδικοποιημένη εντολή και μία αίτηση έκδοσης της. Εφόσον η αίτηση είναι έγκυρη, γίνεται ο έλεγχος δομικών πόρων οι οποίοι θα είναι απαραίτητη για την επιτυχή ολοκλήρωσή της. Ο έλεγχος γίνεται με την εξέταση του τύπου της εντολής (fu\_type) και την διαθεσιμότητα χώρου στο κατάλληλο RS. Εφόσον ο έλεγχος ολοκληρωθεί επιτυχώς, δίνεται σήμα στο κατάλληλο RS για την αποδοχή της εντολής από αυτό, ανακατευθύνει τους καταχωρητές πηγής (rj, rk) και προορισμού (ri) καθώς και την ετικέτα του RS στο οποίο θα αποθηκευθεί η εντολή στο RF. Το RF επίσης ενημερώνεται για την εγκυρότητα της εντολής. Σε περίπτωση αποτυχίας του ελέγχου (ύπαρξη δομικού κινδύνου), τα σήματα έκδοσης και εγκυρότητας λαμβάνουν την τιμή μηδέν, και οι υπόλοιπες μονάδες αγνοούν την εντολή. Καθώς η διαδικασία υλοποιείται με διοχέτευση, δύναται η έκδοση εντολής ανά κύκλο.

## Common Data Bus (CDB)

Το CDB, όπως υποδηλώνει και το όνομά του, είναι ο δίαυλος μεταφοράς δεδομένων του συστήματος. Κοινοποιεί στα RS και RF τα αποτελέσματα των FU. Δέχεται αιτήματα (requests) από τα FU, και ανταποκρίνεται ασύγχρονα με άδειες (grant) προς αυτά. Σε περίπτωση συγκρούσεων, η διαιτησία γίνεται με αλγόριθμο round-robin, ώστε να αποφεύγεται η αποκλειστική χρήση του διαύλου από ένα συγκεκριμένο FU. Το FU το οποίο θα πάρει άδεια μετάδοσης δεδομένων μέσω του διαύλου το κάνει κατά στον επόμενο κύκλο. Ο έλεγχος της μονάδας τότε δημιουργεί δύο ακόμη σήματα, ένα επιλογής δεδομένων, το οποίο δρομολογεί τα κατάλληλα δεδομένα μέσω των πολυπλεκτών, και ένα σήμα εγκυρότητας των δεδομένων που μεταφέρονται στον δίαυλο.

## Reservation Stations (RS)

Τα Reservation Stations (RS), παρέχουν τρεις λειτουργίες στο σύστημα. Η πρώτη είναι η προσωρινή αποθήκευση της εντολής μετά την έκδοσή της. Η δεύτερη είναι η αντικατάσταση των δεδομένων που προέρχονται από το Register File (RF) σε περίπτωση που αυτά είναι απαρχαιωμένα, με τα κατάλληλα ενημερωμένα δεδομένα. Τέλος, τα RS προωθούν την τρέχουσα εντολή στα Functional Units (FU).

Η αποθήκευση της εντολής γίνεται κατά την εκδόσή της και προϋποθέτει την ύπαρξη ελεύθερου αποθηκευτικού χώρου στο RS. Εάν υπάρχει, η αίτηση της μονάδας Issue θα ικανοποιηθεί, και η εντολή θα αποθηκευθεί. Αμέσως μετά, επιλέγεται η πρώτη διαθέσιμη μονάδα RS, στο οποίο θα αποσταλεί η ετικέτα και τα κατάλληλα δεδομένα από το RF. Η μονάδα μένει σε κατάσταση “busy” έως ότου η εντολή αποχωρήσει από αυτή.

Εάν τα δεδομένα “Q” τα οποία προήλθαν από το RF δεν ισούνται με το μηδέν, σημαίνει πως τα δεδομένα “V” είναι ακατάλληλα και πρέπει να αντικατασταθούν το αποτέλεσμα μίας εντολής η οποία δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμη. Σε αυτή τη περίπτωση, η μονάδα παρακολουθεί το CDB.Q, έως

όπου να ισούται με το Q της τρέχουσας εντολής, και το αποτέλεσμα αυτής αποθηκεύεται στα κατάλληλα V. Στη συνέχεια, μηδενίζεται το Q, και η εκτέλεση της επόμενης εντολής συνεχίζεται. Τα δεδομένα Q είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και δύναται να εξυπηρετηθούν σε διαφορετικούς κύκλους.

Εάν και τα δύο Q ισούνται με το μηδέν, τότε η εντολή είναι έτοιμη να αποσταλεί στο Functional Unit. Εάν το FU είναι διαθέσιμο, τότε η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων ελέγχου δρομολογεί την εντολή η οποία έχει προτεραιότητα. Η προτεραιότητα των εντολών ανατίθεται μέσω ενός αλγορίθμου round-robin. Η κατάσταση “busy” της μονάδας αλλάζει αυτόματα, και είναι έτοιμο να δεχθεί μία νέα εντολή. Η αλλαγή κατάστασης προωθείται, έτσι ώστε η νέα εντολή να έρθει απευθείας στη μονάδα, και να επιτευχθεί πλήρης διοχέτευση (pipelining).

## Register File (RF)

Το αρχείο καταχωρητών έχει κύριο σκοπό την αποθήκευση των αποτελεσμάτων τα οποία μεταφέρονται μέσω του CDB. Επιπλέον, αποστέλλει τα δεδομένα τα οποία απαιτούνται από τα RS και μετονομάζει καταλλήλως τους καταχωρητές. Η μονάδα RF αποτελείται από δύο δομικές καταχωρητών, καθώς και λογική (V Block & Q Block), καθώς και διεπαφή εξόδου προς τα RS και εισόδου από το CDB.

Η αποστολή δεδομένων προς τα RS λαμβάνει χώρα μέσω δύο πολυπλεκτών, 32 προς 1, πλάτους 32 bit, σε κάθε έξοδο (υπάρχουν 2 “πόρτες” εξόδου προς τα RS). Τα δεδομένα επιλέγονται μέσω των στοιχείων καταχωρητών πηγής (rj, rk), τα οποία αποστέλλονται από το Issue Stage. Εάν η εντολή είναι έγκυρη, η ετικέτα η οποία προέρχεται από το RS αποθηκεύεται στον καταχωρητή Q που υποδεικνύει το σήμα ri. Έτσι, θα είναι γνωστό ποιος θα είναι ο καταχωρητής αποθήκευσης του αποτελέσματος.

Η αποθήκευση του αποτελέσματος περιλαμβάνει την χρήση ενός συγκριτή για κάθε καταχωρητή Q. Εάν τα δεδομένα που προέρχονται από το CDB είναι έγκυρα, και η τιμή ενός καταχωρητή Q είναι ίδια με αυτή της τιμής CDB.Q, η τιμή του CDB.V αποθηκεύεται στον αντίστοιχο καταχωρητή V. Έπειτα, ο καταχωρητής Q μηδενίζεται.

Σε κάθε κύκλο μπορεί να λάβει χώρα μία έκδοση εντολής και μία ανάγνωση από το CDB. Όμως, μπορεί να υπάρξει σύγκρουση των δύο λειτουργιών. Μία περίπτωση σύγκρουσης είναι να υπάρξει προσπάθεια εγγραφής και ταυτόχρονης ανάγνωσης του ίδιου καταχωρητή σε ένα κύκλο. Σε αυτή τη περίπτωση, τα δεδομένα του CDB.V προωθούνται και το Q έχει τιμή μηδέν. Μία άλλη περίπτωση σύγκρουσης είναι να υπάρξει προσπάθεια εγγραφής και ταυτόχρονης μετονομασίας του ίδιου καταχωρητή σε ένα κύκλο. Σε αυτή τη περίπτωση, δίνεται προτεραιότητα στην έκδοση της νέας εντολής και λαμβάνει χώρα μόνο η μετονομασία του καταχωρητή.

## Functional Units (FU)

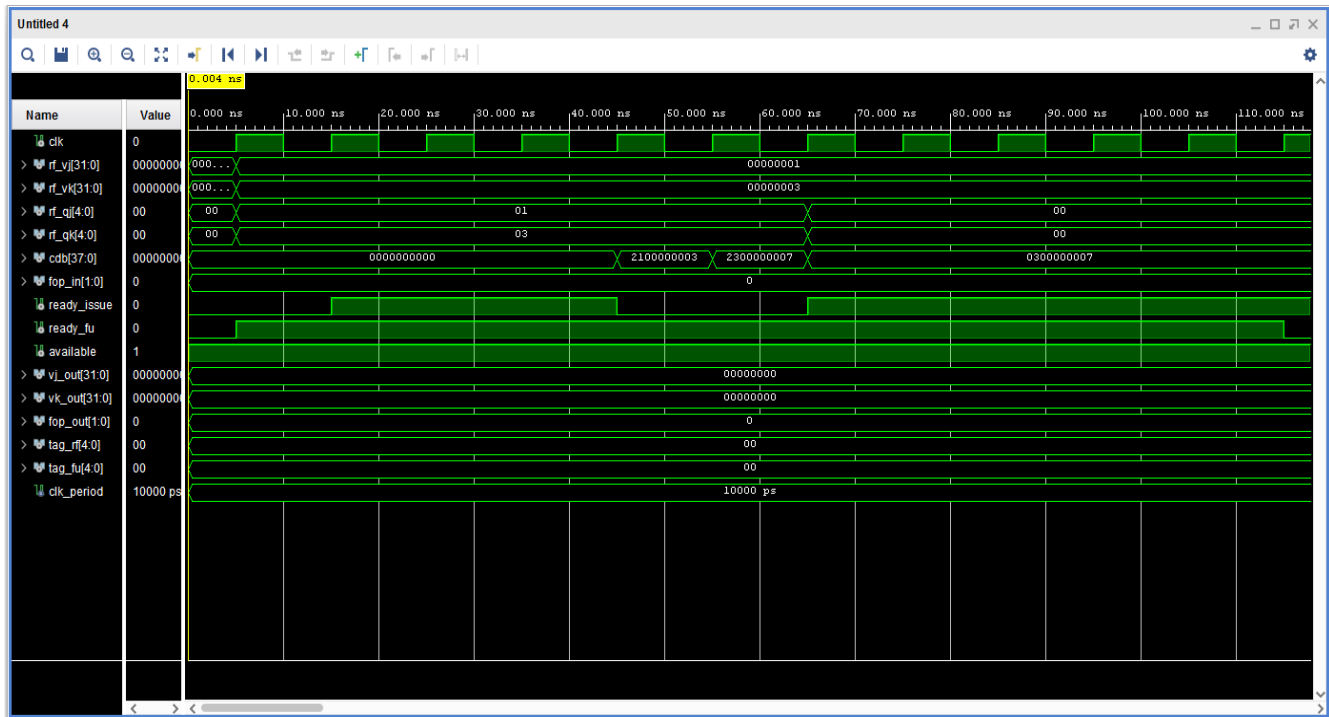
Τα FU είναι οι μονάδες εκτέλεσης των εντολών του συστήματος. Υπάρχουν δύο μονάδες υλοποίησης εντολών, μία για κάθε βασική μορφή εντολής, λογικής και αριθμητικής. Η μονάδα λογικών πράξεων (AND, OR και NOT) έχει καθυστέρηση 2 κύκλων, και η μονάδα αριθμητικών πράξεων έχει καθυστέρηση 3 κύκλων. Οι καθυστερήσεις των αποτελεσμάτων γίνονται μέσω επιπέδων καταχωρητών. Εφόσον υπάρχουν ελεύθεροι πόροι στις μονάδες πράξεων, τα δεδομένα από τα RS γίνονται δεκτά (τύπος πράξης και τελεστές, ετικέτα RS). Η εγκυρότητα της εντολής επαληθεύεται με τον έλεγχο της ετικέτας.

Οι μονάδες πράξεων είναι πλήρως διοχετευμένες, επομένως σε κάθε κύκλο του ρολογιού μπορεί να λάβει χώρα η αποστολή αποτελέσματος μίας εντολής, η αίτηση άδειας αποστολής για τα αποτελέσματα της τρέχουσας εντολής, καθώς και η αποδοχή της επόμενης εντολής προς εκτέλεση.

**Παρατηρήσεις:** (25 ns) Μέσω του request (rq), ζητείται άδεια μόνο από το πρώτο FU, η οποία δίνεται απευθείας. Στον επόμενο κύκλο (75 ns), περνούν τα δεδομένα αυτού, η σημαία εγκυρότητας επανενεργοποιείται, και ζητείται άδεια μετάδοσης από το δεύτερο FU, όπου και δίνεται απευθείας. Στη συνέχεια (175 ns – 325 ns), παρατηρούνται συγκρούσεις, καθώς πάνω από ένα FU ζητά άδεια μετάδοσης δεδομένων, και παρατηρείται η λειτουργία του μηχανισμού επίλυσης συγκρούσεων μέσω

αλγορίθμου round-robin. Τέλος (375 ns), παρατηρείται πως η σημαία εγκυρότητας απενεργοποιείται, καθώς κανένα FU δεν ζητά άδεια μετάδοσης, και επομένως, τα δεδομένα που βρίσκονται στον δίαυλο είναι απαρχαιωμένα ή λανθασμένα.

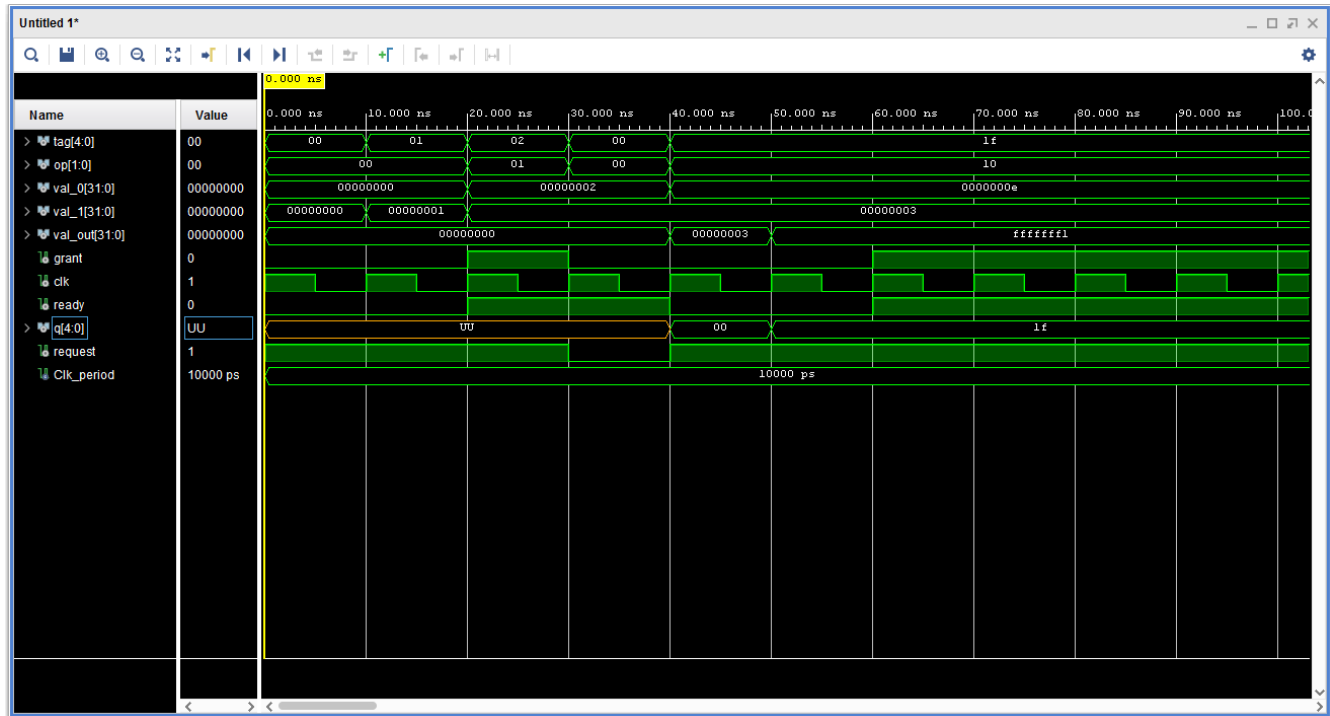
## Μονάδα RS - Logical



**Σημείωση:** Ενώ οι κυματομορφές καθώς και οι ακόλουθες παρατηρήσεις αφορούν το *Reservation Station - Logical* που διαχειρίζεται τις εντολές με λογικές πράξεις, δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική διαφορά από αυτό που διαχειρίζεται τις αριθμητικές πράξεις. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός πως το *Reservation Station - Arithmetic* μπορεί να αποθηκεύσει μία παραπάνω εντολή, και επομένως έχει καθυστέρηση ενός ακόμη κύκλου για την ανάγνωση εντολής και τον “καθαρισμό” από αυτή.

**Παρατηρήσεις:** Το RS απορρίπτει τις μη-έγκυρες εντολές (5 ns), καθώς η σημαία `ready_issue` είναι απενεργοποιημένη, και επομένως η ετικέτα του rf (`tag_rf`) ισούται με το μηδέν. Στη συνέχεια (15 – 35 ns), η σημαία `ready_issue` ενεργοποιείται και οι εντολές αποθηκεύονται στη μονάδα που υποδεικνύει η ετικέτα rf (`tag_rf`). Καθώς τα δεδομένα έρχονται με μη-μηδενικά Q, οι εντολές δεν αποστέλλονται στα FU ακόμη (`tag_fu = 0`), καθώς δεν είναι έτοιμες. Όταν όλες οι διαθέσιμες μονάδες γεμίσουν (35 ns), η σημαία `available` απενεργοποιείται και δεν εισέρχεται άλλη εντολή. Τα αποτελέσματα τα οποία αναμενόταν από τον δίαυλο εισέρχονται (45 ns – 65 ns). Με την έλευση του τελευταίου αποτελέσματος, αποστέλλεται απευθείας η επόμενη εντολή προς επεξεργασία στο κατάλληλο FU. Κατά τους επόμενους 5 κύκλους (65 ns – 115 ns), εισέρχονται εντολές έτοιμες προς εκτέλεση, ενώ ταυτόχρονα αποχωρούν οι εντολές που διεκπεραιώνονται. Τέλος (115 ns), το FU σταματά να είναι διαθέσιμο και δεν αποστέλλεται προς αυτό κάποια εντολή, η σημαία `available` απενεργοποιείται και η μονάδα RS δε δέχεται περαιτέρω εντολές.

## Μονάδα FU - Logical



**Παρατηρήσεις:** Αρχικά (0 ns – 50 ns), το FU βρίσκεται σε αδράνεια, και στις εισόδους του βρίσκονται “σκουπίδια”, δηλαδή, λανθασμένα δεδομένα. Έπειτα (50 ns), ο καταχωρητής έχει αποθηκεύσει την ετικέτα, επομένως το FU δέχεται νέα δεδομένα προς επεξεργασία. Όταν η εντολή έχει αποθηκευτεί στο RS, η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων ελέγχου ελέγχει την ετικέτα ως προς την προέλευσή της από το σωστό RS, και αποστέλλει αίτηση στο δίαυλο, η οποία απαντάται με άδεια. Εφόσον υπάρχει η άδεια μετάδοσης, στον επόμενο κύκλο (100 ns) μπορούν να αποσταλούν τα δεδομένα.