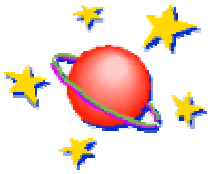


Ενότητα 8η: *Επεκτείνοντας τη σωλήνωση του υπολογιστή DLX, ώστε να χειρίζεται λειτουργίες πολλαπλών κύκλων (εντολές κινητής υποδιαστολής)*

Σκοπός **Ο σκοπός της ενότητας αυτής είναι να μελετήσει τους τρόπους με τους οποίους η σωλήνωση του υπολογιστή DLX μπορεί να επεκταθεί, έτσι ώστε να χειρίζεται εντολές κινητής υποδιαστολής (FP λειτουργίες). Επίσης θα εξετάσουμε πότε εμφανίζονται κατασκευαστικοί κίνδυνοι σε μια σωλήνωση υπολογιστή με λειτουργίες κινητής υποδιαστολής και ποιες λύσεις προτείνονται για την αντιμετώπισή τους. Τέλος θα δούμε πόσοι και ποιοι έλεγχοι πρέπει να γίνουν προτού διευθετηθεί μια εντολή σε μία σωλήνωση υπολογιστή με λειτουργίες FP.**

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα **Όταν θα έχετε μελετήσει την ενότητα, θα είστε σε θέση:**

<u>να επεκτείνετε τη σωλήνωση του υπολογιστή DLX, έτσι ώστε να περιλαμβάνει τις εντολές κινητής υποδιαστολής,</u>

<u>να εντοπίζετε και να αντιμετωπίζετε τους κινδύνους σε μια σωλήνωση υπολογιστή με λειτουργίες κινητής υποδιαστολής.</u>

λειτουργίες FP, αδράνεια, διάστημα αρχικοποίησης

Επέκταση της σωλήνωσης του DLX για λειτουργίες κινητής υποδιαστολής

Είναι πρακτικά αδύνατο να απαιτήσουμε όλες οι εντολές κινητής υποδιαστολής του DLX να ολοκληρώνονται σε ένα κύκλο ρολογιού, ή ακόμα και δύο κύκλους. Κάνοντάς το αυτό θα σήμαινε την αποδοχή ενός αργού ρολογιού, ή τη χρήση τεράστιων ποσοτήτων λογικών κυκλωμάτων στις μονάδες κινητής υποδιαστολής ή και των δύο. Αντίθετα, η σωλήνωση κινητής υποδιαστολής πρέπει να επιτρέπει μεγαλύτερη αδράνεια στις εντολές. Αυτό είναι ευκολότερο να κατανοηθεί αν φανταστούμε τις εντολές κινητής υποδιαστολής ως να έχουν την ίδια σωλήνωση με τις εντολές ακεραίων, με δύο σημαντικές διαφορές:

1. Ο κύκλος EX μπορεί να επαναληφθεί όσες φορές χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η λειτουργία κινητής υποδιαστολής. Ο αριθμός των επαναλήψεων μπορεί να ποικίλλει για διαφορετικές λειτουργίες. Αντίθετα, στη σωλήνωση ακεραίων το στάδιο EX εκτελείται μια μόνο φορά για κάθε εντολή.

2. Στη λειτουργία κινητής υποδιαστολής μπορούν να υπάρχουν πολλαπλές λειτουργικές μονάδες. Καθυστέρηση θα συμβεί αν η προς εκτέλεση εντολή προκαλέσει είτε κατασκευαστικό κίνδυνο για τη λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιεί, είτε κίνδυνο δεδομένων.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 1

Θυμάστε ποιες είναι οι εντολές κινητής υποδιαστολής του υπολογιστή DLX; Για περισσότερες λεπτομέρειες καλό θα ήταν να ανατρέξετε στις σημειώσεις του μαθήματος «Αρχιτεκτονική Υπολογιστών Ι» και συγκεκριμένα στο 2^{ο} κεφάλαιο: «Αρχιτεκτονικές Συνόλου Εντολών».

Υποθέτουμε ότι υπάρχουν τέσσερις ξεχωριστές λειτουργικές μονάδες στον υπολογιστή DLX :

1. Η κύρια μονάδα ακεραίων που χειρίζεται:
- εντολές φόρτωσης-αποθήκευσης
- λειτουργίες ακεραίων της ALU
- διακλαδώσεις

2. Πολλαπλασιαστής
- ακεραίων
- κινητής υποδιαστολής

3. Αθροιστής κινητής υποδιαστολής που χειρίζεται
- πρόσθεση
- αφαίρεση
- μετατροπή αριθμών κινητής υποδιαστολής.

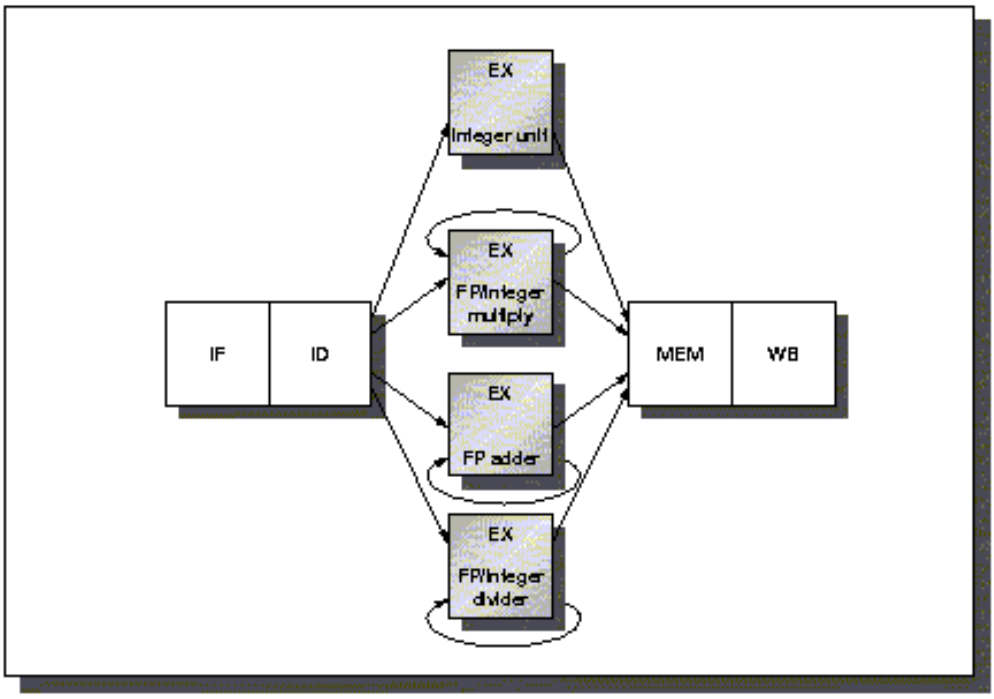
4. Διαιρέτης

- ακεραίων
- κινητής υποδιαστολής.

Επίσης, υποθέτουμε ότι τα στάδια εκτέλεσης αυτών των λειτουργικών μονάδων δεν είναι σωληνωμένα. Το σχήμα 1.8.1 δείχνει τη σωληνωμένη δομή που προκύπτει.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 2

Μπορείτε να σχεδιάσετε τα στάδια της σωλήνωσης έτσι ώστε να περιλαμβάνει τις τέσσερις ξεχωριστές λειτουργικές μονάδες του υπολογιστή DLX; Να συγκρίνετε το σχήμα που σχεδιάσατε με το σχήμα 1.8.1.



Σχήμα 1.8.1 - Η σωλήνωση του DLX με τρεις επιπλέον μη σωληνωμένες λειτουργικές μονάδες κινητής υποδιαστολής. Επειδή μόνο μια εντολή διευθετείται σε κάθε κύκλο ρολογιού, όλες οι εντολές διέρχονται από τη βασική σωλήνωση για λειτουργίες ακεραίων. Οι λειτουργίες κινητής υποδιαστολής απλώς επαναλαμβάνονται (πέφτουν σε loop) όταν φτάνουν στο στάδιο EX. Όταν τελειώσουν το στάδιο EX, προχωρούν στο MEM και το WB για την ολοκλήρωση της εκτέλεσης.

Επειδή το στάδιο EX δεν είναι σωληνωμένο, καμία άλλη εντολή που χρησιμοποιεί αυτή τη λειτουργική μονάδα δε μπορεί να διευθετηθεί προτού η προηγούμενη εντολή τελειώσει το στάδιο EX. Επιπλέον, αν μια εντολή δε μπορεί να προχωρήσει στο στάδιο EX, ολόκληρη η σωλήνωση πριν από αυτή την εντολή θα καθυστερήσει.

Στην πραγματικότητα, τα ενδιάμεσα αποτελέσματα πιθανώς δεν ανακυκλώνονται γύρω από τη μονάδα EX όπως δείχνει το σχήμα 1.8.1. Αντίθετα το στάδιο EX έχει έναν αριθμό καθυστερήσεων ρολογιού μεγαλύτερο από 1.
Μπορούμε να γενικεύσουμε τη δομή της σωλήνωσης κινητής υποδιαστολής που φαίνεται στο σχήμα 1.8.1 ώστε να επιτραπεί η σωλήνωση μερικών σταδίων και πολλαπλές εν ενεργεία λειτουργίες.

Για να περιγράψουμε μια τέτοια σωλήνωση, πρέπει να καθορίσουμε τόσο την αδράνεια των λειτουργικών μονάδων όσο και το διάστημα αρχικοποίησης ή διάστημα επανάληψης.

- Ορίζουμε την **αδράνεια** ως τον αριθμό των κύκλων που μεσολαβούν μεταξύ μιας εντολής που παράγει ένα αποτέλεσμα και μιας άλλης εντολής που χρησιμοποιεί το αποτέλεσμα αυτό.
- Ορίζουμε το **διάστημα αρχικοποίησης** ή επανάληψης ως τον αριθμό των κύκλων που πρέπει να περάσουν μεταξύ της διευθέτησης δύο εντολών δοσμένου τύπου. Σαν παράδειγμα, θα χρησιμοποιήσουμε τις αδράνειες και τα διαστήματα αρχικοποίησης του σχήματος 1.8.2.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 3

Να προσδιορίσετε την αδράνεια των εντολών ακεραίων της ALU και των εντολών φόρτωσης. Να αιτιολογήσετε την απάντησή σας.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 3

Οι εντολές ακεραίων της ALU έχουν αδράνεια 0, καθώς τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον επόμενο κύκλο ρολογιού. Οι εντολές φόρτωσης έχουν αδράνεια 1, αφού τα αποτελέσματα τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετά από ένα κύκλο που μεσολαβεί.

Λειτουργική μονάδα	**Αδράνεια**	**Διάστημα αρχικοποίησης**
ALU ακεραίων	0	1
Μνήμη δεδομένων (φορτώσεις ακεραίων και FP)	1	1
FP πρόσθεση	3	1
FP πολλαπλασιασμός (και ακεραίων)	6	1
FP διαίρεση (επίσης διαίρεση ακεραίων και τετραγωνική ρίζα FP)	24	24

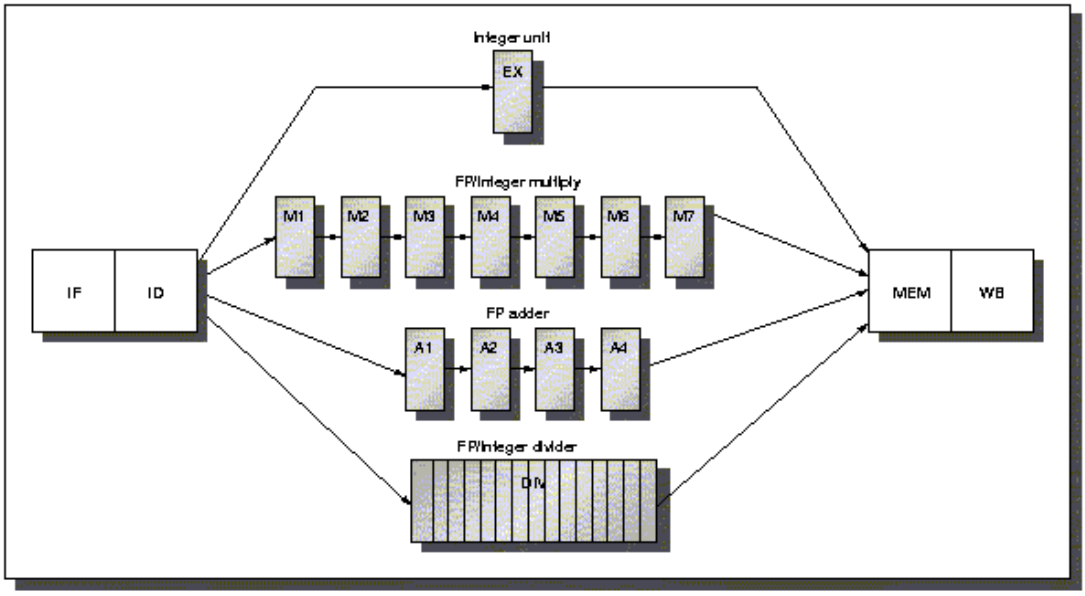
Σχήμα 1.8.2 - Αδράνειες και διαστήματα αρχικοποίησης για λειτουργικές μονάδες.

Καθώς οι περισσότερες εντολές χρησιμοποιούν τους τελεστέους τους στην αρχή του σταδίου EX, η αδράνεια είναι συνήθως ο αριθμός των σταδίων μετά το EX που μια εντολή παράγει ένα αποτέλεσμα – για παράδειγμα, μηδέν στάδια για λειτουργίες της ALU και ένα στάδιο για εντολές φόρτωσης. Η πρωταρχική εξαίρεση είναι οι εντολές αποθήκευσης, οι οποίες χρησιμοποιούν την τιμή που αποθηκεύεται ένα κύκλο αργότερα. Από εδώ και πέρα η αδράνεια μιας αποθήκευσης για την τιμή που αποθηκεύεται, αλλά όχι για τον καταχωρητή διεύθυνσης βάσης, θα είναι έναν κύκλο λιγότερη. Η αδράνεια της σωλήνωσης είναι απαραιτήτως ίση με ένα κύκλο λιγότερο από το βάθος της σωλήνωσης εκτέλεσης, το οποίο είναι ο αριθμός των σταδίων από το στάδιο EX ως το στάδιο που παράγει το αποτέλεσμα.

Έτσι, για το παραπάνω παράδειγμα σωλήνωσης, ο αριθμός των σταδίων για μια FP πρόσθεση είναι τέσσερα, ενώ ο αριθμός των σταδίων για ένα FP πολλαπλασιασμό είναι εφτά. Επομένως το παράδειγμα δομής σωλήνωσης του σχήματος 1.8.2 μας επιτρέπει μέχρι και τέσσερις ξεχωριστές προσθέσεις κινητής υποδιαστολής (FP προσθέσεις), εφτά ξεχωριστούς FP πολλαπλασιασμούς ή πολλαπλασιασμούς ακεραίων, αλλά μόνο μια FP διαίρεση.

Το σχήμα 1.8.3 μας δείχνει πώς αυτή η σωλήνωση μπορεί να σχεδιαστεί επεκτείνοντας το σχήμα 1.8.1. Το διάστημα επανάληψης υλοποιείται στο σχήμα 1.8.3 προσθέτοντας επιπλέον στάδια σωλήνωσης, τα οποία θα διαχωριστούν από επιπρόσθετους καταχωρητές. Επειδή οι μονάδες είναι ανεξάρτητες, ονομάζουμε τα στάδια με διαφορετικό τρόπο. Τα στάδια σωλήνωσης που απαιτούν πολλαπλούς κύκλους ρολογιού, όπως η μονάδα διαίρεσης, διαχωρίζονται περαιτέρω ώστε να δείχνουν την αδράνεια αυτών των σταδίων. Επειδή δεν είναι ολοκληρωμένα στάδια, μόνο μια λειτουργία μπορεί να είναι ενεργή.

Η δομή της σωλήνωσης του σχήματος 1.8.3 απαιτεί την εισαγωγή των επιπρόσθετων καταχωρητών σωλήνωσης (π.χ. A1/A2, A2/A3, A3/A4) και τη μετατροπή των συνδέσεων με αυτούς τους καταχωρητές. Ο καταχωρητής ID/EX πρέπει να επεκταθεί ώστε να συνδέει τον ID με τους EX, DIV, M1 και A1.
Μπορούμε να αναφερθούμε στο μέρος του καταχωρητή που σχετίζεται με ένα από τα επόμενα στάδια με την ένδειξη ID/EX, ID/DIV, ID/M1 ή ID/A1. Τον καταχωρητή σωλήνωσης μεταξύ του ID και όλων των άλλων σταδίων μπορεί να τον φανταστούμε ως λογικά ξεχωριστούς καταχωρητές και μπορεί, στη πραγματικότητα, να είναι υλοποιημένος με ξεχωριστούς καταχωρητές. Επειδή μόνο μια λειτουργία μπορεί να βρίσκεται σε ένα στάδιο σωλήνωσης μια χρονική στιγμή, οι πληροφορίες ελέγχου μπορούν να συσχετιστούν με τον καταχωρητή στην αρχή του σταδίου.



Σχήμα 1.8.3 - Μια σωλήνωση που επιτρέπει πολλαπλές ξεχωριστές λειτουργίες κινητής υποδιαστολής. Ο FP αθροιστής και ο FP πολλαπλασιαστής είναι πλήρως σωληνωμένοι και έχουν βάθος τεσσάρων και εφτά σταδίων, αντίστοιχα. Ο FP διαιρέτης δεν είναι σωληνωμένος, αλλά απαιτεί 25 κύκλους ρολογιού για να ολοκληρωθεί. Η αδράνεια στις εντολές ανάμεσα στη διευθέτηση μιας FP λειτουργίας και της χρησιμοποίησης του αποτελέσματός της, χωρίς την έκθεση σε μια καθυστέρηση RAW, καθορίζεται από τον αριθμό των κύκλων που δαπανώνται στα στάδια εκτέλεσης. Για παράδειγμα, η τέταρτη εντολή μετά από μια FP πρόσθεση μπορεί να χρησιμοποιήσει το αποτέλεσμά της πρόσθεσης αυτής. Για λειτουργίες ακεραίων της ALU, το βάθος της σωλήνωσης εκτέλεσης είναι πάντα 1 και η επόμενη εντολή μπορεί να χρησιμοποιήσει τα αποτελέσματα. Τόσο οι φορτώσεις ακεραίων όσο και κινητής υποδιαστολής ολοκληρώνονται κατά τη διάρκεια του MEM, που σημαίνει ότι το σύστημα μνήμης πρέπει να παρέχει είτε 32 είτε 64 bits σε ένα παλμό του ρολογιού.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 4

Με ποιο τρόπο θα σχεδιάζατε τα στάδια της σωλήνωσης ώστε να πετύχετε υψηλότερο ρυθμό ρολογιού και ποια θα ήταν τα μειονεκτήματα αυτού του τρόπου σχεδίασης;

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 4

Για να επιτύχουμε υψηλότερο ρυθμό ρολογιού, πρέπει να βάλουμε λιγότερα επίπεδα λογικής σε κάθε στάδιο σωλήνωσης, πράγμα που κάνει μεγαλύτερο τον αριθμό των σταδίων σωλήνωσης που απαιτούνται για πιο πολύπλοκες λειτουργίες. Το τίμημα, οπότε, για το γρηγορότερο ρυθμό ρολογιού, είναι η μεγαλύτερη αδράνεια για τις λειτουργίες.

Η δομή της σωλήνωσης φαίνεται επίσης χρησιμοποιώντας διαγράμματα όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8.4 για ένα σύνολο ανεξάρτητων FP λειτουργιών και FP φορτώσεων-αποθηκεύσεων. Φυσικά, η μεγαλύτερη αδράνεια των λειτουργιών κινητής υποδιαστολής αυξάνει τη συχνότητα των κινδύνων RAW και των καθυστερήσεων που προκύπτουν, όπως θα δούμε αργότερα σε αυτή την ενότητα.

MULTD	IF	ID	*M1*	M2	M3	M4	M5	M6	**M7**	MEM	WB
ADDD		IF	ID	*A1*	A2	A3	**A4**	MEM	WB		
LD			IF	ID	*EX*	**MEM**	WM				
SD				IF	ID	*EX*	*MEM*	WB			

Σχήμα 1.8.4 - Ο χρονισμός της σωλήνωσης ενός συνόλου ανεξάρτητων λειτουργιών κινητής υποδιαστολής. Τα στάδια με πλαγιαστά γράμματα δείχνουν πού χρειάζονται δεδομένα, ενώ τα στάδια με έντονα γράμματα δείχνουν πού είναι διαθέσιμο ένα αποτέλεσμα. Οι FP αποθηκεύσεις, όπως οι αποθηκεύσεις ακεραίων, χρησιμοποιούν τους πηγαίους τελεστέους τους σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Κίνδυνοι και προώθηση σε σωληνώσεις μεγαλύτερης αδράνειας.

Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών απόψεων για τον εντοπισμό κινδύνων και την προώθηση για μια σωλήνωση όπως αυτή του σχήματος 1.8.3:

1. Επειδή η μονάδα διαίρεσης δεν είναι πλήρως σωληνωμένη, κατασκευαστικοί κίνδυνοι μπορεί να συμβούν. Αυτοί θα πρέπει να εντοπιστούν και οι εντολές προς διευθέτηση πρέπει να καθυστερήσουν.

2. Επειδή οι εντολές έχουν διαφορετικούς χρόνους εκτέλεσης, ο αριθμός των εγγραφών σε καταχωρητές που απαιτείται σε ένα κύκλο μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 1.

3. Οι κίνδυνοι WAW είναι πιθανοί, καθώς οι εντολές δεν φτάνουν στο στάδιο WB με τη σειρά. Σημειώστε ότι οι κίνδυνοι WAR δεν είναι δυνατοί, καθώς οι αναγνώσεις καταχωρητών πάντα γίνονται στο στάδιο ID.

4. Οι εντολές μπορεί να ολοκληρωθούν σε διαφορετική σειρά από αυτή με την οποία διευθετήθηκαν, προκαλώντας προβλήματα με τις διακοπές.

5. Εξαιτίας της μεγαλύτερης αδράνειας των λειτουργιών, οι καθυστερήσεις για κινδύνους RAW θα είναι πιο συχνές.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 5

Θυμάστε τις κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται οι κίνδυνοι δεδομένων; Να αναφέρετε ποιοι είναι και πότε προκαλούνται οι κίνδυνοι δεδομένων. Για περισσότερες λεπτομέρειες καλό θα ήταν να ανατρέξετε στην 4η ενότητα αυτού του κεφαλαίου: «Κίνδυνοι δεδομένων».

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 5

Έστω ότι έχουμε δύο διαδοχικές εντολές τις i και j (πρώτα την i και μετά την j).

RAW: Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι κίνδυνοι που συμβαίνουν όταν η εντολή j προσπαθεί να διαβάσει έναν πηγαίο τελεστέο προτού η εντολή i ενημερώσει την τιμή του τελεστέου. Στην περίπτωση αυτή η εντολή j παίρνει την παλιά τιμή που είναι λάθος.

WAW: Ο κίνδυνος αυτός εμφανίζεται όταν η εντολή j προσπαθεί να γράψει σε έναν τελεστέο προορισμού πριν αυτός ενημερωθεί από την εντολή i. Αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης είναι να γίνονται με λάθος σειρά οι εγγραφές, αφήνοντας στον προορισμό την τιμή που γράφτηκε από την i και όχι αυτή που γράφτηκε από τη j, όπως θα ήταν και το σωστό.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 5

WAR: Οι κίνδυνοι αυτοί παρατηρούνται όταν η εντολή j προσπαθεί να γράψει σε ένα τελεστέο προορισμού πριν προλάβει η εντολή i να τον διαβάσει, με αποτέλεσμα η εντολή i να παίρνει λάθος τη νέα τιμή.

Η αύξηση των καθυστερήσεων εξαιτίας της μεγαλύτερης αδράνειας των λειτουργιών είναι βασικά η ίδια με αυτή για τη σωλήνωση ακεραίων.

Πριν τη περιγραφή των νέων προβλημάτων που προκύπτουν σε αυτή την FP σωλήνωση και την εξέταση των λύσεων, ας εξετάσουμε τη δυνατή επίδραση των κατασκευαστικών κινδύνων. Το σχήμα 1.8.5 δείχνει μια τυπική ακολουθία FP κώδικα και τις καθυστερήσεις που προκύπτουν.

	Αριθμός κύκλου ρολογιού										
Εντολή	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
MULTD F0, F4, F6	IF	ID	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	MEM	WB
...		IF	ID	EX	MEM	WB					
...			IF	ID	EX	MEM	WB				
ADDD F2, F4, F6				IF	ID	A1	A2	A3	A4	MEM	WB
...					IF	ID	EX	MEM	WB		
...						IF	ID	EX	MEM	WB	
LD F8, 0 (R2)							IF	ID	EX	MEM	WB

Σχήμα 1.8.5 - Τρεις εντολές θέλουν να κάνουν μια επανεγγραφή στο αρχείο καταχωρητών FP ταυτόχρονα, όπως φαίνεται στον κύκλο ρολογιού 11. Αυτή δεν είναι η χειρότερη περίπτωση, αφού μια προγενέστερη διαίρεση στη μονάδα FP θα μπορούσε επίσης να τερματίζει στον ίδιο κύκλο.

Το παρακάτω παράδειγμα αφορά στα προβλήματα που προκύπτουν από τις εγγραφές.

Παράδειγμα

Υποθέστε ότι το αρχείο καταχωρητών FP έχει μόνο μια θύρα εγγραφής, ακολουθίες FP λειτουργιών, όπως επίσης και μια FP φόρτωση μαζί με FP λειτουργίες. Όλα αυτά μπορούν να προκαλέσουν συγκρούσεις στη θύρα εγγραφής καταχωρητών. Παρατηρήστε την ακολουθία σωλήνωσης του σχήματος 1.8.5. Στο κύκλο ρολογιού 11, και οι τρεις εντολές θα φτάσουν στο στάδιο WB και θα θέλουν να γράψουν στο αρχείο καταχωρητών. Με μία μόνο θύρα εγγραφής στο αρχείο καταχωρητών, ο υπολογιστής πρέπει να ταξινομήσει κατά σειρά την ολοκλήρωση των εντολών. Αυτή η μοναδική θύρα καταχωρητών αντιπροσωπεύει ένα κατασκευαστικό κίνδυνο.

Απάντηση:

Προτεινόμενες λύσεις και παρατηρήσεις για το παραπάνω πρόβλημα:

Λύση 1η :
Θα μπορούσαμε να αυξήσουμε τον αριθμό των θυρών εγγραφής.

Παρατηρήσεις:
Η λύση αυτή δε είναι η καλύτερη γιατί οι επιπρόσθετες θύρες εγγραφής θα χρησιμοποιούνταν σπάνια. Αυτό γίνεται επειδή ο μέγιστος αριθμός σταθερής κατάστασης απαιτούμενων θυρών εγγραφής είναι 1. Αντί αυτού, επιλέγουμε να ανιχνεύσουμε και να ενισχύσουμε τη πρόσβαση στη θύρα εγγραφής ως ένα κατασκευαστικό κίνδυνο.

Λύση 2η :
Προσπαθούμε να εντοπίσουμε τη χρήση της θύρας εγγραφής στο στάδιο ID και να καθυστερήσουμε μια εντολή προτού διευθετηθεί, όπως ακριβώς θα κάναμε για κάθε άλλο κατασκευαστικό κίνδυνο.
Ο εντοπισμός της χρήσης της θύρας εγγραφής μπορεί να γίνει με ένα καταχωρητή ολίσθησης που δείχνει πότε μια ήδη διευθετημένη εντολή θα χρησιμοποιήσει το αρχείο καταχωρητών. Αν η εντολή στο στάδιο ID χρειάζεται να χρησιμοποιήσει το αρχείο καταχωρητών ταυτόχρονα με μια ήδη διευθετημένη εντολή, η εντολή στο στάδιο ID καθυστερεί για ένα κύκλο. Σε κάθε κύκλο ο καταχωρητής κρατήσεων ολισθαίνει κατά ένα bit.

Παρατηρήσεις:
Αυτή η λύση έχει ένα πλεονέκτημα: διατηρεί την ιδιότητα της καθυστέρησης εντολών μόνο στο στάδιο ID. Το μειονέκτημα είναι η πρόσθεση του καταχωρητή ολίσθησης και των λογικών κυκλωμάτων ανίχνευσης σύγκρουσης εγγραφών. Θα βασιστούμε σε αυτή τη λύση για το υπόλοιπο της ενότητας.

Αριθμός κύκλου ρολογιού															
Εντολή	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
LD F4, 0 (R2)	IF	ID	EX	MEM	WB										
MULTD F0, F4,F6	IF	ID	stall	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	MEM	WB			
ADDD F2, F0, F8				IF	ID	stall	stall	stall	stall	stall	A1	A2	A3	A4	MEM
SD F2, 0 (R2)					IF	stall	stall	stall	stall	stall	stall	stall	stall	stall	MEM

Σχήμα 1.8.6 - Μία τυπική ακολουθία FP κώδικα που δείχνει τις καθυστερήσεις που προκαλούνται από κινδύνους RAW. Η μακρύτερη FP σωλήνωση αυξάνει σημαντικά τη συχνότητα των καθυστερήσεων έναντι της ρηχότερης σωλήνωσης ακεραίων. Κάθε εντολή σε αυτή την ακολουθία εξαρτάται από τη προηγούμενη και προχωρεί μόλις υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, υποθέτοντας ότι η σωλήνωση έχει πλήρη παράκαμψη (bypassing) και προώθηση (forwarding). Σημειώστε ότι η εντολή SD (αποθήκευσης αριθμού FP διπλής ακριβείας) έχει το στάδιο MEM της ταυτόχρονα με την ADDD, αλλά εφόσον αυτές οι εντολές είναι σε διαφορετικές σωληνώσεις και η εντολή SD έχει τα δεδομένα της, ο συγχρονισμός αυτός θα δουλέψει σωστά.

Λύση 3η :
Η τελευταία λύση είναι να καθυστερήσουμε μια εντολή, η οποία προκαλεί σύγκρουση, όταν προσπαθεί να εισέλθει στο στάδιο MEM. Αν, λοιπόν, περιμένουμε να καθυστερήσουμε τις εντολές, οι οποίες προκαλούν συγκρούσεις έως ότου θελήσουν να εισέλθουν στο στάδιο MEM, μπορούμε να επιλέξουμε να καθυστερήσουμε οποιαδήποτε εντολή. Μια απλή, αν και μερικές φορές όχι ιδανική, λύση είναι να δίνουμε προτεραιότητα στη μονάδα με τη μεγαλύτερη αδράνεια, καθώς αυτή είναι η πιθανότερη να έχει προκαλέσει τη καθυστέρηση μιας άλλης εντολής για ένα κίνδυνο RAW.

Παρατηρήσεις:
Το πλεονέκτημα αυτής της λύσης είναι ότι δεν απαιτεί από εμάς να εντοπίζουμε τη σύγκρουση ως την είσοδο του σταδίου MEM, όπου είναι εύκολο να τη δούμε.
Το μειονέκτημα είναι ότι περιπλέκει τον έλεγχο σωλήνωσης, καθώς καθυστερήσεις μπορούν τώρα να προκύπτουν από δύο μεριές. Σημειώστε ότι η καθυστέρηση πριν την είσοδο στο στάδιο MEM θα δημιουργήσει καθυστέρηση στο στάδιο EX(A4 ή M7), πιθανώς αναγκάζοντας τη καθυστέρηση να πηγαίνει προς τα πίσω στη σωλήνωση.

Παράδειγμα

Το άλλο μας πρόβλημα είναι η πιθανότητα των κινδύνων WAW. Για να δείτε ότι αυτοί υπάρχουν, παρατηρείστε το παράδειγμα του σχήματος 1.8.5. Αν η εντολή LD είχε διευθετηθεί ένα κύκλο νωρίτερα και είχε προορισμό τον F2, τότε θα δημιουργούσε ένα κίνδυνο WAW, καθώς θα έγραφε τον F2 ένα κύκλο νωρίτερα από την ADDD. Οι ενδιάμεσες εντολές δε χρησιμοποιούν τον F2 σαν πηγαίο τελεστέο.
Αν υπήρχε χρήση του F2 ανάμεσα στην ADDD και την FD, η σωλήνωση θα έπρεπε να καθυστερήσει για ένα κίνδυνο RAW, και η LD δεν θα διευθετούνταν μέχρις ότου η ADDD είχε ολοκληρωθεί. Για τη δικιά μας σωλήνωση, μπορούμε να αντικρούσουμε το ότι οι κίνδυνοι WAW συμβαίνουν μόνο όταν εκτελείται μια άχρηστη εντολή, αλλά πρέπει και πάλι να τους εντοπίζουμε και να βεβαιωθούμε ότι το αποτέλεσμα της εντολής LD εμφανίζεται στον F2 όταν τελειώσουμε. Υπάρχουν δύο δυνατοί τρόποι για το χειρισμό αυτού του κινδύνου WAW.

Απάντηση:

Προτεινόμενες λύσεις και παρατηρήσεις για το παραπάνω πρόβλημα:

Λύση 1η :
Η πρώτη προσέγγιση είναι να καθυστερήσουμε τη διευθέτηση της εντολής φόρτωσης μέχρις ότου η ADDD να εισέλθει στο στάδιο MEM.

Λύση 2η :

Η δεύτερη προσέγγιση είναι να εξαλείψουμε το αποτέλεσμα της εντολής ADDD με τον εντοπισμό του κινδύνου και αλλάζοντας τον έλεγχο ώστε η εντολή ADDD να μη γράψει το αποτέλεσμά της. Τότε, η εντολή LD μπορεί να διευθετηθεί αμέσως.

Παρατηρήσεις:
Επειδή ο κίνδυνος είναι σπάνιος, κάθε μία από τις παραπάνω λύσεις θα δουλεύει άψογα — μπορείτε να διαλέξετε όποιο είναι ευκολότερο να υλοποιηθεί. Σε κάθε περίπτωση, ο κίνδυνος μπορεί να εντοπιστεί κατά τη διάρκεια του σταδίου ID όταν η εντολή LD διευθετείται. Τότε η καθυστέρηση της LD ή εξάλειψη του αποτελέσματος της εντολής ADDD είναι εύκολη. Η δύσκολη κατάσταση είναι να εντοπίσουμε ότι η εντολή LD μπορεί να τελειώσει πριν την εντολή ADDD, καθώς αυτό απαιτεί τη γνώση του μήκους της σωλήνωσης και της τρέχουσας θέσης της εντολής ADDD. Ευτυχώς, αυτή η ακολουθία κώδικα (δύο εγγραφές χωρίς ενδιάμεσο διάβασμα) θα είναι πολύ σπάνια, οπότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια απλή λύση.

Λύση 3η :
Αν μια εντολή στο στάδιο ID θέλει να γράψει στον ίδιο καταχωρητή με μια εντολή που διευθετήθηκε νωρίτερα, μην διευθετείς την εντολή στο στάδιο EX.

Στον εντοπισμό των πιθανών κινδύνων, πρέπει να λάβουμε υπόψη κινδύνους ανάμεσα σε:
- **FP εντολές και σε**
- **μια FP εντολή και μια εντολή ακεραίων.**

Εκτός από τις FP φορτώσεις – αποθηκεύσεις και τις μετακινήσεις (moves) ακεραίων καταχωρητών, οι καταχωρητές FP και ακεραίων είναι διακεκριμένοι. Όλες οι εντολές ακεραίων λειτουργούν στους καταχωρητές ακεραίων, ενώ οι λειτουργίες κινητής υποδιαστολής χρησιμοποιούν μόνο τους δικούς τους καταχωρητές. Έτσι, πρέπει να λαμβάνουμε υπ' όψιν μας μόνο τις FP φορτώσεις – αποθηκεύσεις και τις μετακινήσεις καταχωρητών μεταξύ κλασματικών αριθμών και ακεραίων αριθμών στον εντοπισμό κινδύνων μεταξύ εντολών FP και ακεραίων.

Αυτή η απλοποίηση του ελέγχου σωλήνωσης είναι ένα επιπλέον πλεονέκτημα του να έχουμε ξεχωριστά αρχεία καταχωρητών για δεδομένα που είναι ακέραιοι και κινητής υποδιαστολής.

Τα κύρια **πλεονεκτήματα** είναι:
- ο διπλασιασμός του αριθμού των καταχωρητών, χωρίς να μεγαλώνουμε κανένα από τα δύο σύνολα
- η αύξηση του εύρους ζώνης χωρίς να προσθέτουμε επιπλέον θύρες σε κανένα από τα δύο σύνολά.

Το κύριο **μειονέκτημα**, πέρα από την ανάγκη για ένα επιπλέον αρχείο καταχωρητών, είναι το μικρό κόστος των περιστασιακών μετακινήσεων που χρειάζονται ανάμεσα στα δύο σύνολα καταχωρητών.

Υποθέτοντας ότι η σωλήνωση κάνει όλη την ανίχνευση κινδύνων στο στάδιο ID, υπάρχουν τρεις έλεγχοι που πρέπει να γίνουν προτού μια εντολή διευθετηθεί:

1. ***Έλεγχος για κατασκευαστικούς κινδύνους*** — Περίμενε ώσπου η απαιτούμενη λειτουργική μονάδα να μην είναι απασχολημένη (αυτό χρειάζεται μόνο για διαιρέσεις σε αυτή τη σωλήνωση) και βεβαιώσου ότι η θύρα εγγραφής καταχωρητών θα είναι διαθέσιμη όταν χρειαστεί.

2. ***Έλεγχος για κίνδυνο δεδομένων RAW*** — Περίμενε ώσπου οι πηγαίοι καταχωρητές να παύσουν να καταχωρούνται ως προορισμοί σε εκκρεμότητα σε ένα καταχωρητή σωλήνωσης που δε θα είναι διαθέσιμος όταν η εντολή χρειαστεί το αποτέλεσμα. Ένας αριθμός ελέγχων πρέπει να γίνει εδώ, που εξαρτάται τόσο από τη πηγαία εντολή, που καθορίζει πότε το αποτέλεσμα θα είναι διαθέσιμο, όσο και από την εντολή προορισμού, που καθορίζει πότε χρειάζεται η τιμή.

Παράδειγμα

Αν η εντολή στο στάδιο ID είναι μια FP λειτουργία με πηγαίο καταχωρητή F2, τότε ο F2 δεν μπορεί να καταχωρηθεί ως ένας προορισμός στο τμήμα ID/A1, A1/A2 ή A2/A3, που αντιστοιχούν σε εντολές πρόσθεσης FP, που δεν θα έχουν τελειώσει όταν η εντολή στο στάδιο ID χρειαστεί ένα αποτέλεσμα. (Το τμήμα ID/A1 είναι το τμήμα του καταχωρητή εξόδου του σταδίου ID που στέλνεται στον A1).

Η διαίρεση είναι κάπως πιο περίπλοκη, αν θέλουμε να επιτρέψουμε τους τελευταίους κύκλους της διαίρεσης να επικαλυφθούν, καθώς πρέπει να χειριστούμε με ειδικό τρόπο την περίπτωση όπου μια διαίρεση είναι κοντά στον τερματισμό της. Στην πράξη, οι σχεδιαστές πρέπει να αγνοούν αυτή τη βελτιστοποίηση προς όφελος ενός απλούστερου ελέγχου διευθέτησης.

3. ***Έλεγχος για κίνδυνο δεδομένων WAW*** — Προσδιόρισε αν κάποια εντολή στα A1, …, A4, D, M1, …, M7 έχει τον ίδιο καταχωρητή προορισμού με αυτή την εντολή. Αν ναι, καθυστέρησε τη διευθέτηση της εντολής στο στάδιο ID.

Παρόλο που η ανίχνευση κινδύνων είναι πιο πολύπλοκη με τις FP λειτουργίες πολλαπλών κύκλων, οι έννοιες είναι ίδιες με τη σωλήνωση ακεραίων του υπολογιστή DLX. Το ίδιο ισχύει και για τη λογική προώθησης.

Η προώθηση μπορεί να υλοποιηθεί ελέγχοντας αν ο καταχωρητής προορισμού σε οποιοδήποτε από τους καταχωρητές EX/MEM, A4/MEM, M7/MEM, D/MEM ή MEM/WB είναι ένας από τους πηγαίους καταχωρητές μιας εντολής κινητής υποδιαστολής. Αν είναι, ο κατάλληλος πολυπλέκτης εισόδου πρέπει να ενεργοποιηθεί ώστε να επιλέξει τα προωθημένα δεδομένα.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 6

Έστω η εξής σειρά εντολών:

DIV F0, F2, F4
ADDF F10, F10, F8
SUBF F12, F12. F14

Θεωρείστε δεδομένο ότι:

- **Οι εντολές ADDF και SUBF τελειώνουν πιο γρήγορα από την εντολή DIVF, δηλαδή διαρκούν λιγότερους κύκλους ρολογιού.**
- **Η εντολή ADDF τελειώνει και η DIVF έχει μια αριθμητική διακοπή στο στάδιο EX της σωλήνωσης.**

Να προτείνετε πιθανές λύσεις διαχείρισης της διακοπής, καθώς και τα προβλήματα που μπορεί να προκύπτουν σε κάθε περίπτωση.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 6

Οι δυνατές λύσης διαχείρισης της διακοπής που προκύπτει είναι:

1. **Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μη ακριβείς διακοπές. Αυτό επιβάλλει, μετά την ανίχνευση της διακοπής, την επανεκτέλεση του κώδικα σε μια πολύ αργή κατάσταση διακοπών ακριβείας. Αυτή η κατάσταση δεν μας επιτρέπει τόσο μεγάλη επικάλυψη των εντολών, αφού μόνο μία εντολή κινητής υποδιαστολής είναι ενεργή τη φορά.**

2. **Μπορούμε να αποθηκεύσουμε προσωρινά το αποτέλεσμα της εντολής ADDF, μέχρι όλες οι FP εντολές, οι οποίες είχαν ξεκινήσει πρωτύτερα, να τερματίσουν. Ωστόσο η προσωρινή αποθήκευση πολλών καταστάσεων κοστίζει σε υλικό υπολογιστή και μπορεί να είναι απαραίτητο να γίνει ανάγνωση στα προσωρινά αποθηκευμένα αποτελέσματα από επόμενες εντολές.**

3. **Μπορούμε να διατηρήσουμε αρκετή πληροφορία ώστε οι ρουτίνες διαχείρισης παγίδων να δημιουργήσουν μία διακοπή ακριβείας: το λογισμικό τελειώνει όλες τις εντολές οι οποίες προηγούνται αυτής που τελείωσε (ADDF). Αυτή η λύση είναι αρκετά πολύπλοκη και απλοποιείται μόνο στην περίπτωση που έχουμε δύο εντολές FP να εκτελούνται.**

4. **Μπορούμε να επιτρέψουμε στην εντολή να εισέλθει στο στάδιο EX της σωλήνωσης μόνο όταν γνωρίζουμε ότι όλες οι εντολές που έχουν μπει προηγουμένως στο στάδιο EX της σωλήνωσης, θα τερματίσουν χωρίς διακοπές. Αυτή η λύση όμως εγγυάται την εμφάνιση διακοπών ακριβείας και υπονοεί συχνά καθυστέρηση πριν την είσοδο της εντολής στο στάδιο EX της σωλήνωσης. Ωστόσο για να δουλέψει η σωλήνωση FP θα πρέπει να αποφασίσει νωρίς για το αν θα υπάρξουν διακοπές.**

Ανακεφαλαιώνοντας λοιπόν …

Οι διαφορές μεταξύ της σωλήνωσης υπολογιστών για λειτουργίες ακεραίων και της σωλήνωσης για λειτουργίες FP είναι ότι: (α) το στάδιο EX στη σωλήνωση για λειτουργίες FP μπορεί να επαναληφθεί όσες φορές χρειάζεται προκειμένου να ολοκληρωθεί η λειτουργία κινητής υποδιαστολής και (β) στις λειτουργίες FP μπορούν να υπάρχουν πολλαπλές λειτουργικές μονάδες. Αυτές οι λειτουργικές μονάδες είναι η κύρια μονάδα ακεραίων, ο πολλαπλασιαστής, ο αθροιστής κινητής υποδιαστολής κι ο διαιρέτης.

Ως αδράνεια ορίζουμε τον αριθμό των κύκλων που μεσολαβούν μεταξύ μιας εντολής, η οποία παράγει ένα αποτέλεσμα και μιας άλλης που το χρησιμοποιεί. Διάστημα αρχικοποίησης ονομάζουμε τον αριθμό των κύκλων που πρέπει να περάσουν μεταξύ της διευθέτησης δύο εντολών.

Οι κατασκευαστικοί κίνδυνοι προκύπτουν επειδή το αρχείο καταχωρητών FP έχει μια θύρα εγγραφής, ακολουθίες FP λειτουργιών, όπως επίσης και μια FP φόρτωση μαζί με FP λειτουργίες. Όλα αυτά μπορούν να προκαλέσουν συγκρούσεις στη θύρα εγγραφής καταχωρητών.

Οι κίνδυνοι WAW προκύπτουν επειδή οι εντολές δε φτάνουν στο στάδιο WB με τη σειρά που καθορίζει η ακολουθία εντολών του προγράμματος.
Οι λύσεις οι οποίες προτείνονται για την αντιμετώπιση τους είναι:

(1) η καθυστέρηση της διευθέτησης μιας εντολής β, η οποία θέλει να γράψει σε έναν καταχωρητή μέχρι να γράψει στον ίδιο καταχωρητή η εντολή α, η οποία πρέπει να γράψει πρώτη σε αυτόν τον καταχωρητή,
(2) να εξαλείψουμε το αποτέλεσμα της εντολής α με τον εντοπισμό του κινδύνου κι αλλάζοντας τον έλεγχο ώστε η εντολή α να μη γράψει το αποτέλεσμά της και (3) αν μια εντολή στο στάδιο ID θέλει να γράψει στον ίδιο καταχωρητή με μια εντολή που διευθετήθηκε νωρίτερα, μην διευθετείς την εντολή στο στάδιο EX.

Υπάρχουν τρεις έλεγχοι που πρέπει να γίνουν προτού μια εντολή διευθετηθεί, οι ποίοι είναι οι εξής: έλεγχος για κατασκευαστικούς κινδύνους, έλεγχος για κίνδυνο δεδομένων RAW και έλεγχος για κίνδυνο δεδομένων WAW.