

Κεφάλαιο 5

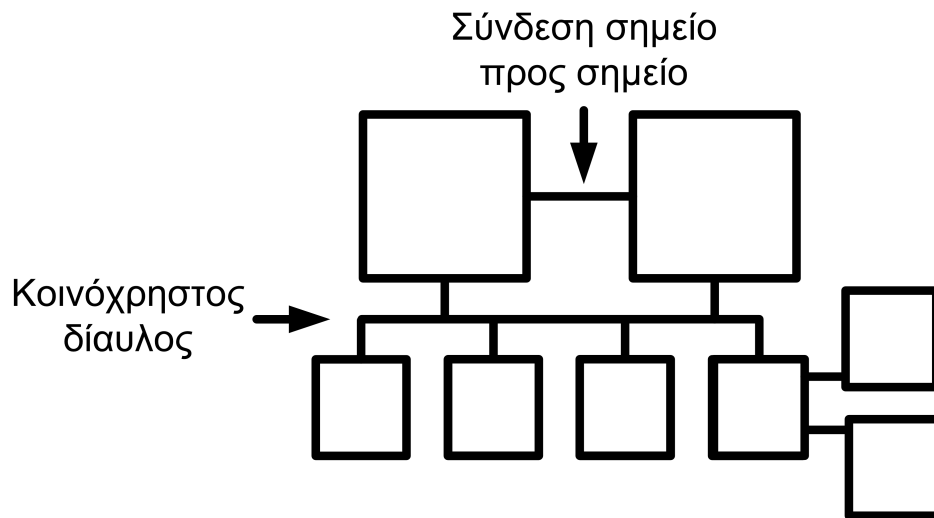
Διασύνδεση και Είσοδος / Έξοδος

Όπως κάθε υπολογιστικό σύστημα, έτσι και τα ενσωματωμένα συστήματα έχουν ένα θεμελιώδη σκοπό ύπαρξης, ο οποίος είναι η επεξεργασία των δεδομένων και η λήψη αποφάσεων ή εκτέλεση ενεργειών. Αυτό επιτυγχάνεται με τους τρόπους εισόδου και εξόδου του επεξεργαστή από τα περιφερειακά, μέσω κατάλληλων θυρών. Τα δεδομένα μεταφέρονται από και προς τα περιφερειακά μέσω κατάλληλων δικτύων διασύνδεσης και διαύλων. Αν και τα ενσωματωμένα συστήματα χρησιμοποιούν τους περισσότερους προτυποποιημένους διαύλους που υπάρχουν στα τυπικά υπολογιστικά συστήματα και τους διακομιστές, εντούτοις χρησιμοποιούν και πολλούς διαύλους που τους συναντάμε μόνο σε αυτή την περιοχή, λόγω της ευρείας χρήσης τους. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφουμε τους διαύλους και τη επικοινωνία και στη συνέχεια τις τυπικές λειτουργίες εισόδου εξόδου.

5.1 Διασύνδεση

Στη πιο βασική μορφή του, ένας υπολογιστής περιέχει ένα επεξεργαστικό στοιχείο (processing element, PE) είτε είναι επεξεργαστής, είτε είναι επαναδιαμορφώσιμη λογική, είτε ASIC, μνήμη και έναν ή παραπάνω τρόπους επικοινωνίας με το εξωτερικό περιβάλλον. Στις μέρες μας μπορεί ένας μηχανικός ενσωματωμένων συστημάτων να προμηθευτεί έναν πλήρη υπολογιστή σε μέγεθος όσο ένα πακέτο τσιγάρα, με κόστος κάτω από 10\$, με τους πιο γνωστούς αντιπρόσωπους τον υπολογιστή CHIP (κόστος 9\$, με 512MB RAM, 4MB Flash, ARM7, USB, HDMI, GPIO) ή τον υπολογιστή Raspberry Pi Zero (κόστος 5\$, με 512MB RAM, ARM6, USB, HDMI, GPIO). Αυτοί οι υπολογιστές, που ονομάζονται υπολογιστές μιας πλακέτας (single board computers, SBC), μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το κατάλληλο λογισμικό σε ενσωματωμένες εφαρμογές μέτρων υπολογιστικών απαιτήσεων, χωρίς κανένα πρόβλημα. Όπως οι μεγα-

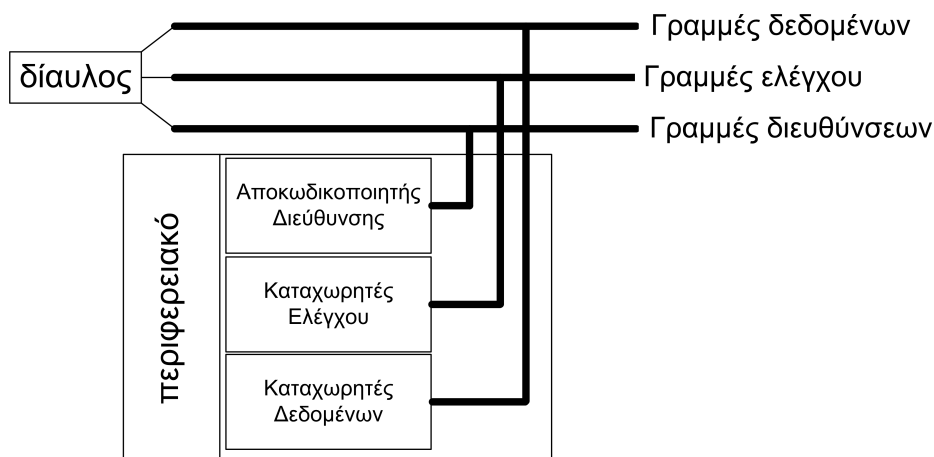
λύτεροι υπολογιστές, έτσι και αυτοί, αλλά και κάθε υπολογιστικό σύστημα, χρησιμοποιούν κανάλια διασύνδεσης ή διαύλους για να συνδέουν τα περιφερειακά και τα δομοστοιχεία, τόσο εντός του ολοκληρωμένου κυκλώματος όσο και εκτός. Υπάρχουν πάρα πολλοί δίαυλοι με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ο μηχανικός θα πρέπει να επιλέγει κάθε φορά το δίαυλο που θα χρησιμοποιήσει για την επικοινωνία, με βάση τη διαθεσιμότητα και την κάλυψη των αναγκών. Αν το ενσωματωμένο σύστημα βρίσκεται ήδη στη διάθεσή του, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιήσει τους διαύλους που αυτό υποστηρίζει, όπως για παράδειγμα το CHIP που υποστηρίζει το δίαυλο USB ή το GPIO και για να διασυνδεθεί θα πρέπει να επιλεγεί ένα περιφερειακό που να είναι συμβατό με το USB ή μπορεί να επικοινωνήσει μέσω του GPIO. Αν το ενσωματωμένο σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ανάπτυξης, τότε θα πρέπει να επιλεγθούν οι δίαυλοι που θα υποστηρίζει. Η σύνδεση του επεξεργαστή με το περιφερειακό γίνεται μέσω ενός δικτύου διασύνδεσης (Interconnection Network, IN), και περιλαμβάνει είτε αποκλειστικές γραμμές σημείο-προς-σημείο, ή διαμοιραζόμενα κανάλια πολλών συσκευών (Εικόνα 5.1).



Σχήμα 5.1: Το δίκτυο διασύνδεσης ενός συστήματος αποτελείται από κοινόχρηστους διαύλους και αποκλειστικές διασυνδέσεις σημείο-προς-σημείο.

Για να επικοινωνήσει ο επεξεργαστής με ένα περιφερειακό θα πρέπει να του στείλει πληροφορίες που ανήκουν σε 3 κατηγορίες: (α) δεδομένα, (β) διεύθυνση, και (γ) έλεγχος (Εικόνα 5.2). Τα δεδομένα είναι το ωφέλιμο φορτίο και μπορεί ο επεξεργαστής είτε να στείλει ή να ζητήσει να διαβάσει. Η διεύθυνση χρησιμοποιείται είτε στη περίπτωση που ένα περιφερειακό έχει πολλαπλές θέσεις μνήμης και ο επεξεργαστής αιτεί πρόσβαση σε μια από αυτές, είτε για να προσδιοριστεί ακριβώς το περιφερειακό, αν υπάρχουν περισσότερο από ένα, από

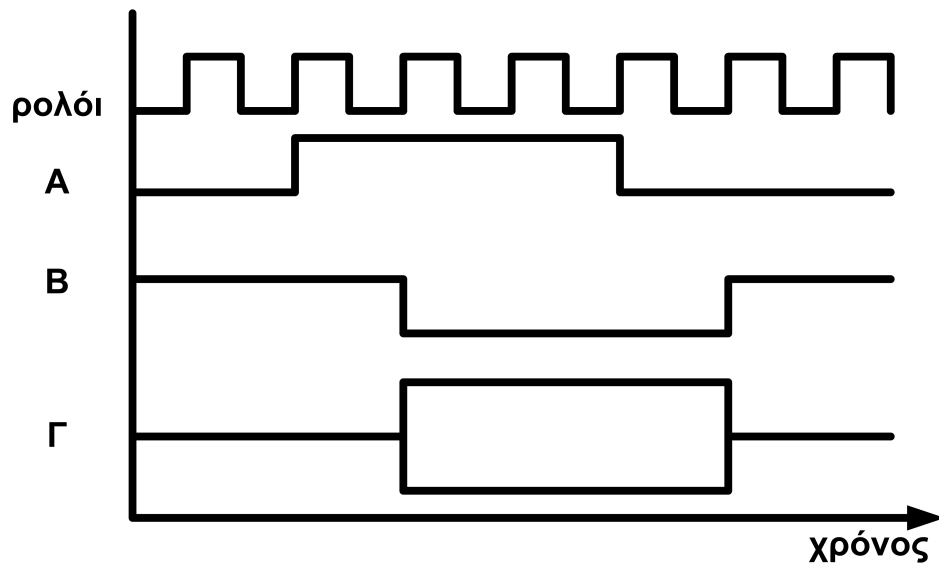
τα οποία το καθένα έχει δικιά του μοναδική διεύθυνση. Ο έλεγχος προσδιορίζει κυρίως αν θα γίνει εγγραφή ή ανάγνωση, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για πιο προχωρημένες λειτουργίες όπως αίτηση για διακοπή, εξυπηρέτηση διακοπής, αίτηση για έλεγχο του διαύλου κ.α., που θα αναλύσουμε σε επόμενη ενότητα. Το κάθε περιφερειακό έχει μια διεπαφή, στην οποία υπάρχουν οι καταχωρητές ελέγχου, κατάστασης και δεδομένων. Ο καταχωρητής ελέγχου τροποποιείται από τον επεξεργαστή και καθορίζει τη λειτουργία που αιτείται, ο καταχωρητής κατάστασης δείχνει την κατάσταση της συσκευής (αν είναι αδρανής, αν έχει δεδομένα προς αποστολή, αν είναι απασχολημένη με προηγούμενη επεξεργασία).



Σχήμα 5.2: Τα περιφερειακά για να συνδεθούν στο δίαυλο χρησιμοποιούν μια διεπαφή που επεξεργάζεται τα δεδομένα, τα σήματα ελέγχου και τη διεύθυνση που έχει τοποθετήσει ο επεξεργαστής.

Η λειτουργία, η χρήση και η πρόσβαση στους προτυποποιημένους διαύλους καθορίζεται από αυστηρά πρωτόκολλα, ηλεκτρικών προδιαγραφών (π.χ. τι τάση θα πρέπει να υπάρχει και σε ποιους ακροδέκτες), χρονισμού (για πόσο χρονικό διάστημα θα πρέπει να εφαρμοστεί κάτι στο δίαυλο, Εικόνα 5.3), και καταστάσεων (ποιες είναι οι καταστάσεις που διέρχεται μια μεταφορά). Τα πρωτόκολλα διαύλων καθορίζουν πως επικοινωνούν οι συσκευές και πρέπει όλες οι συνδεδεμένες συσκευές να τα σέβονται στην εντέλεια. Προκειμένου ένα περιφερειακό να είναι συμβατό με το συγκεκριμένο δίαυλο θα πρέπει να έχει πιστοποιηθεί ότι ακολουθεί όλες τις προδιαγραφές, διαφορετικά είτε δε θα λειτουργήσει, είτε θα προκαλέσει πρόβλημα επικοινωνίας ή και καταστροφής στις υπόλοιπες συσκευές. Συνοψίζοντας, ο δίαυλος είναι ένα κοινόχρηστο μέσο μετάδοσης που αποτελείται από καλώδια και προδιαγραφές.

Το πρώτο χαρακτηριστικό των διαύλων είναι το μέγεθος της ταυτόχρονης



Σχήμα 5.3: Η λειτουργία κάθε διαύλου καθορίζεται από το διάγραμμα χρονισμού. Στην εικόνα φαίνεται το ρολόι, ένα σήμα A που από χαμηλή στάθμη εξυψώνεται 3 κύκλους ρολογιού, ένα σήμα B που βρίσκεται σε υψηλή στάθμη και χαμηλώνει στο 0 για 3 κύκλους ρολογιού, και ένα σήμα Γ που βρίσκεται για 3 κύκλους σε μια απροσδιόριστη κατάσταση (π.χ. είτε είναι 1 είτε 0, είτε πολλαπλά διαφορετικά bit).

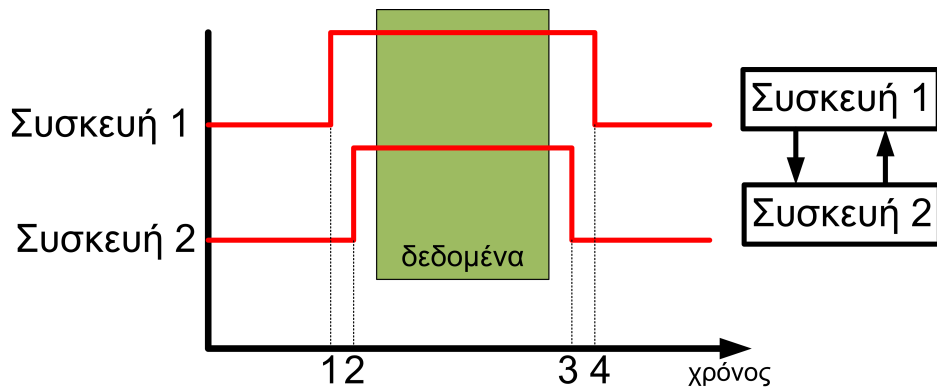
μεταφοράς των δεδομένων. Υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες: (α) σειριακό και (β) παράλληλο. Στη σειριακή επικοινωνία στέλνεται το κάθε bit ξεχωριστά, και ο δέκτης έχει τους κατάλληλους καταχωρητές που επιτελούν τη μετατροπή σειριακό σε παράλληλο, αφού τα δεδομένα χρησιμοποιούνται σε λέξεις των 8 ή 16 ή 32 bit. Στην παράλληλη επικοινωνία, υπάρχουν πολλαπλοί αγωγοί μεταφοράς που χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1990, υπήρχε μια προτίμηση στους παράλληλους διαύλους για τη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων, όπως π.χ. από το σκληρό δίσκο ή την κάρτα γραφικών. Όμως, διαπιστώθηκαν αρκετά προβλήματα που εμπόδιζαν τα συστήματα να επιτύχουν μεγαλύτερες ταχύτητες επικοινωνίας και έτσι εγκαταλείφθηκαν οι παράλληλοι δίαυλοι. Το πρώτο πρόβλημα είναι ο όγκος των διαύλων. Ένας σειριακός δίαυλος καταλαμβάνει πολύ μικρότερη επιφάνεια από τον παράλληλο. Οι παράλληλοι δίαυλοι παρουσιάζουν διαφορετικές καθυστερήσεις σε κάθε αγωγό, επειδή είναι αδύνατο να κατασκευαστούν όλοι οι αγωγοί με μια ιδανική διαδικασία και να έχουν ίδιες αντιστάσεις. Η διαφορά της αντίστασης, όσο μικρή και να είναι, προκαλεί διαφορετική καθυστέρηση σε κάθε αγωγό και έτσι δημιουργείται πρόβλημα συγχρονισμού. Οι σειριακοί δίαυλοι δεν έχουν τέτοιο πρόβλημα, αφού όλα τα bit διέρχονται από τον ίδιο αγωγό και έχουν την

ίδια καθυστέρηση. Οι παράλληλοι δίαυλοι δεν έχουν εγκαταλειφθεί. Χρησιμοποιούνται μέσα στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, αν και υπάρχει μια τάση να αποσυρθούν και εκεί. Εκτός ολοκληρωμένου κυκλώματος, χρησιμοποιούνται μόνο σειριακοί δίαυλοι σε κάθε σύγχρονο ψηφιακό σύστημα. Υπάρχουν όμως και υβριδικές υλοποιήσεις, στις οποίες χρησιμοποιείται ένας σειριακός δίαυλος (όπως το PCI express) και πολλαπλές ανεξάρτητες παράλληλες κλωνοποιήσεις αυτού (όπως το PCI express x8, που αποτελείται από 8 σειριακούς δίαυλους).

Το δεύτερο χαρακτηριστικό των διαύλων αφορά το μέγιστο αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών. Αν είναι μόνο δυο συσκευές, ο δίαυλος αφορά την επικοινωνία σημείο-προς-σημείο (point-to-point), ενώ αν αφορά περισσότερες από δυο συσκευές, ο δίαυλος είναι κοινόχρηστος. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ανεξάρτητο ως προς το προηγούμενο. Δηλαδή, υπάρχουν σειριακοί δίαυλοι που ανήκουν στην κατηγορία σημείο-προς-σημείο (π.χ. το RS232) και άλλοι που ανήκουν στην κατηγορία του κοινόχρηστου (π.χ. το 1-wire). Επίσης, υπάρχουν παράλληλοι δίαυλοι που ανήκουν στην κατηγορία σημείο-προς-σημείο (π.χ. Accelerated Graphics Port, AGP) και παράλληλο δίαυλοι που ανήκουν στην κατηγορία της κοινόχρηστης επικοινωνίας (π.χ. PCI).

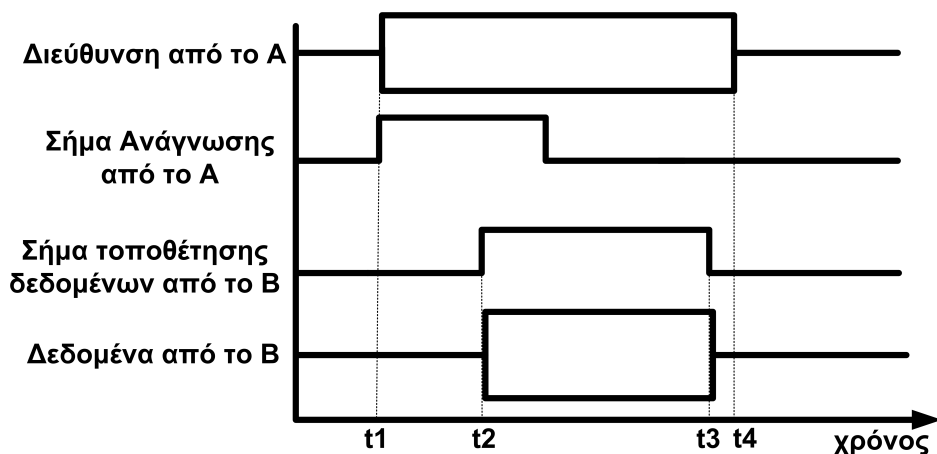
Το τρίτο χαρακτηριστικό αφορά το συγχρονισμό. Υπάρχουν σύγχρονοι και ασύγχρονοι δίαυλοι. Ο όρος σύγχρονος σημαίνει συγχρονισμένος με το ίδιο κοινό ρολόι επικοινωνίας (Εικόνα 5.3). Ο επεξεργαστής και τα περιφερειακά που συνδέονται έχουν πρόσβαση στο ίδιο ρολόι του συστήματος, το οποίο είτε παρέχεται με ξεχωριστό κανάλι διαύλου, είτε μπορεί να εξαχθεί από την κωδικοποίηση των δεδομένων από τον παραλήπτη (με όφελος λιγότερους αγωγούς). Στην περίπτωση του σύγχρονου δίαυλου, η αίτηση τοποθετείται στο κανάλι ελέγχου μαζί με τη διεύθυνση για κάποιους συγκεκριμένους κύκλους ρολογιού και μετά γίνεται η ανάγνωση των δεδομένων από το περιφερειακό ή η εγγραφή των δεδομένων. Όταν ολοκληρωθεί το έργο, απομακρύνεται ο έλεγχος και η διεύθυνση. Η αλληλουχία των καταστάσεων ορίζεται σαφώς από τον επεξεργαστή και τα περιφερειακά στις ρυθμίσεις του συστήματος, με τα wait states (καταστάσεις αναμονής).

Στην περίπτωση του ασύγχρονου διαύλου, δεν υπάρχει κοινό ρολόι, αλλά γίνεται μια χειραψία ανάμεσα στον επεξεργαστή και στο περιφερειακό. Ο επεξεργαστής τοποθετεί ένα σήμα ελέγχου στο δίαυλο, το περιφερειακό το διαβάζει και ανταποκρίνεται με ένα άλλο σήμα, ο επεξεργαστής μπορεί να ενεργοποιεί ένα άλλο σήμα και να στέλνει τα δεδομένα κ.ο.κ. Η πιο διαδεδομένη χειραψία στην επικοινωνία με τα περιφερειακά, είναι η χειραψία τεσσάρων φάσεων κατά την οποία μια συσκευή ανυψώνει ένα σήμα σε υψηλή στάθμη, το άλλο περιφερειακό απαντάει με το να σηκώσει και αυτό ένα δεύτερο σήμα σε υψηλή στάθμη, στη συνέχεια, η 1η συσκευή στέλνει τα δεδομένα, μόλις ληφθούν αυτά με επιτυχία η 2η συσκευή απομακρύνει το σήμα, και μετά από κάποια καθυστέρηση η 1η συσκευή απομακρύνει και αυτή το δικό της σήμα (Εικόνα 5.4) Ένα



Σχήμα 5.4: Ένα διαδεδωμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας ανάμεσα σε δυο συσκευές, είναι η χειραψία τεσσάρων φάσεων.

παράδειγμα ασύγχρονης επικοινωνίας φαίνεται στην Εικόνα 5.5, στην οποία μια συσκευή A τοποθετεί μια διεύθυνση και ενεργοποιεί το σήμα ανάγνωσης, και μια άλλη συσκευή B τοποθετεί τα δεδομένα στο δίαυλο και ταυτόχρονα χρησιμοποιεί το κατάλληλο σήμα για να ενημερώσει τη συσκευή A να τα διαβάσει. Όπως φαίνεται, οι 2 συσκευές εκτελούν συγχρονισμένα βήματα εκτέλεσης, αφού κάθε ενέργεια είναι μια απάντηση στην προηγούμενη, και επίσης οι ενέργειες δεν έχουν καμία σχέση με το ρολόι (και για αυτό παραλείπεται από το σχήμα). Η χρήση των ασύγχρονων διαύλων είναι πολύ δύσκολη, λόγω της καθυστέρησης της χειραψίας, κάτι που πρέπει να γίνεται κάθε φορά, για αυτό και δε χρησιμοποιείται.



Σχήμα 5.5: Στην ασύγχρονη επικοινωνία δε χρησιμοποιείται ρολόι, αλλά μόνο οι λογικές στάθμες των σημάτων.

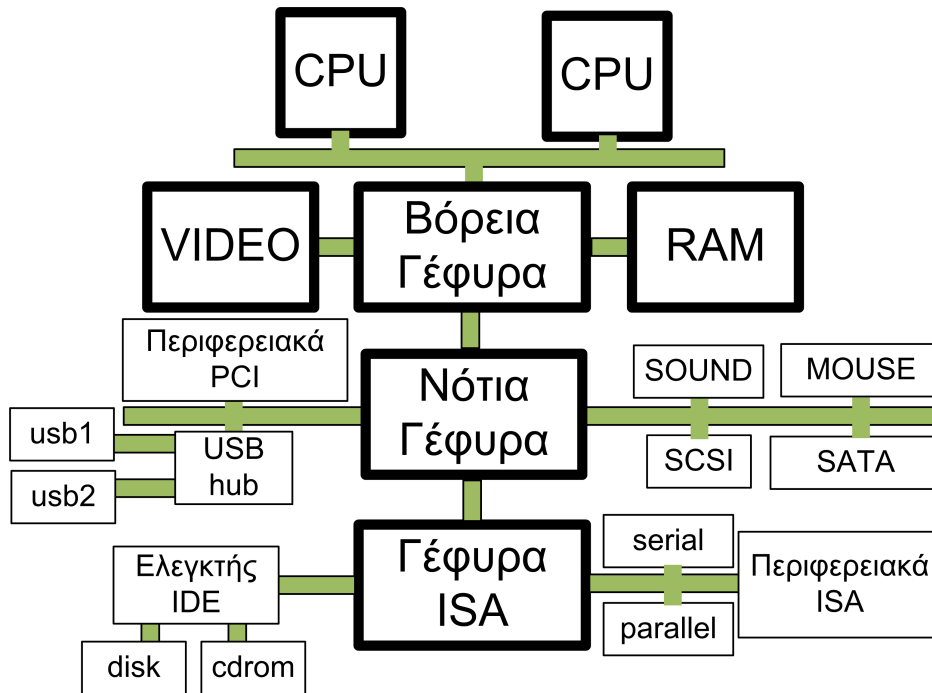
Το τέταρτο χαρακτηριστικό του διαύλου αφορά την πολυπλεξία. Για λόγους εξοικονόμησης καλωδίων, ιδιαίτερα στους παράλληλους διαύλους, δεν υπάρχουν ξεχωριστοί αγωγοί για δεδομένα και διευθύνσεις, αλλά χρησιμοποιούνται οι ίδιοι ακροδέκτες άλλοτε για την ανάγνωση της διεύθυνσης και άλλες φορές για την πρόσβαση των δεδομένων. Ασφαλώς, η επίτευξη της πολυπλεξίας απαιτεί κατάλληλα σήματα ελέγχου που να προσδιορίζουν το νόημα των bit που βρίσκονται στους ακροδέκτες, αν είναι bit διεύθυνσης ή δεδομένων. Πολυπλεξία συναντάμε και στους σειριακούς διαύλους που μοιράζονται τα bit διεύθυνσης και δεδομένων, ενώ σχεδόν πάντα υπάρχουν και καλώδια ελέγχου που δεν πολυπλέκονται.

Το πέμπτο χαρακτηριστικό αφορά τη διαιτησία του διαύλου στις κοινόχρηστες επικοινωνίες. Σε αυτές τις επικοινωνίες, κάθε φορά μια συσκευή έχει τον έλεγχο, που ονομάζεται και κύριος του διαύλου (bus master). Θα πρέπει να υπάρχει ένας τρόπος να αποφασιστεί, ποιος είναι κάθε φορά ο κυρίαρχος. Σε περίπτωση που στο δίαυλο συνδέεται ένας επεξεργαστής, τότε αυτός είναι ο κύριος του διαύλου και κάθε φορά καθορίζει ποιος χειρίζεται το δίαυλο. Μπορεί όμως και να παραχωρήσει προσωρινά την κυριαρχία σε ένα βοηθητικό επεξεργαστικό στοιχείο, όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο. Η διαιτησία συνδέεται με την είσοδο έξοδο και έτσι θα περιγραφεί στην επόμενη ενότητα. Η διαιτησία σε κάποια συστήματα είναι κεντρική (δηλαδή γίνεται πάντα από τον επεξεργαστή) και σε κάποια άλλα είναι κατανεμημένη, δηλαδή όλες οι συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίαυλο αποφασίζουν για το ποιος θα έχει κάθε φορά το δίαυλο, είτε μέσω ενός κουπονιού (token), είτε μέσω μιας ακολουθίας.

Επίσης, κάποια άλλα χαρακτηριστικά αφορούν συγκεκριμένα περιφερειακά, όπως η υποστήριξη ρυθμού ριπής (burst) ή σελίδας, κατά την οποία ο επεξεργαστής αντί να στέλνει κάθε φορά μια διεύθυνση και δεδομένα, τοποθετεί μόνο την πρώτη διεύθυνση και το μέγεθος της μεταφοράς σε Byte, και το αντίστοιχο περιφερειακό (π.χ. η μνήμη) στέλνει σε ριπή όλα τα δεδομένα που έχει ζητήσει. Ομοίως, υπάρχουν και οι αποσυνδεδεμένες μεταφορές στις οποίες η διεύθυνση και τα δεδομένα μπορεί να έχουν μια χρονική απόσταση, και ενδιάμεσα να έχουν συμβεί άλλες συναλλαγές με το δίαυλο από άλλα περιφερειακά.

Υπάρχουν πολλά περιφερειακά που συνδέονται σε έναν επεξεργαστή. Κάποια μπορεί να λειτουργήσουν σε μεγάλες συχνότητες λειτουργίας ενώ άλλα σε αρκετά χαμηλές. Επειδή η μέγιστη συχνότητα λειτουργίας ενός διαύλου καθορίζεται από το περιφερειακό με τη χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας, από νωρίς αποφασίστηκε η χρήση μιας ιεραρχίας διαύλων επικοινωνίας. Επειδή τα σημερινά συστήματα έχουν πολλαπλούς διαύλους επικοινωνίας, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κάποια εξειδικευμένα κυκλώματα που ονομάζονται γέφυρες διαύλων. Αυτά, συνδέονται σε δυο διαφορετικούς διαύλους (π.χ. σε ένα γρήγορο και σε ένα αργό) και μπορούν και μετατρέπουν τα σήματα επικοινωνίας

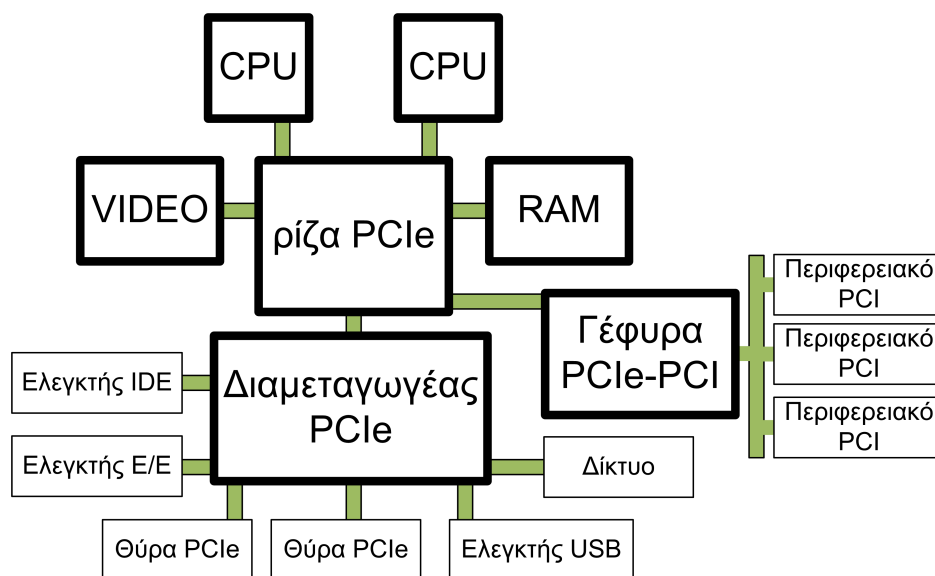
και τα πρωτόκολλα από το ένα είδος στο άλλο, ώστε να δίνεται η δυνατότητα της διασύνδεσης όλων των περιφερειακών του συστήματος. Στους προσωπικούς υπολογιστές, για πολλά χρόνια χρησιμοποιήθηκαν δυο γέφυρες, η γρήγορη γέφυρα (ή βόρεια γέφυρα, north bridge) διασύνδεσης του επεξεργαστή (ή των επεξεργαστών αν το σύστημα ήταν πολυπύρηνια) με τη μνήμη και την κάρτα γραφικών, και η αργή γέφυρα (ή νότια γέφυρα, south bridge) διασύνδεσης του δίσκου, πληκτρολογίου, ποντικού, γέφυρας ISA των θυρών εισόδου/εξόδου κτλ. (Εικόνα 5.6). Οι γέφυρες συνδέονταν μεταξύ τους, οπότε ο επεξεργαστής μπορούσε να έχει πρόσβαση σε οποιοδήποτε τμήμα του συστήματος. Οι γέφυρες μπορεί να είναι αρκετά εξελιγμένες και να εκτελούν και κάποια επεξεργασία γνωρίζοντας ακριβώς το πρωτόκολλο επικοινωνίας του αντίστοιχου δίαυλου, ή μπορεί να είναι απλά μετατροπείς λογικής στάθμης χωρίς ευφυΐα



Σχήμα 5.6: Μια τυπική ιεραρχική αρχιτεκτονική διαύλων στην οποία φαίνονται οι γέφυρες διασύνδεσης.

Η αρχιτεκτονική των σημερινών υπολογιστών (είτε σταθμών εργασίας, είτε ενσωματωμένων συστημάτων), έχει απομακρυνθεί από τη χρήση κοινόχρηστων διαύλων και έχει εξελιχθεί στη χρήση αποκλειστικών συνδέσεων σημείο-προς-σημείο. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.7, η νότια γέφυρα έχει αντικατασταθεί από το PCIe συγκρότημα ρίζας (root complex) όπου και συνδέει τη μνήμη, τους επεξεργαστές, και την κάρτα γραφικών. Το συγκρότημα ρίζας συνδέεται σε ένα

διαμεταγωγέα PCIe (PCIe switch), από τον οποίο ξεκινάνε συνδέσεις σημείο-προς-σημείο προς κάθε περιφερειακό ή προς άλλες γέφυρες. Στο διαμεταγωγέα PCI συνδέεται η γέφυρα PCI για το δίαυλο PCI, και οι ελεγκτές IDE, USB, E/E.



Σχήμα 5.7: Η ιεραρχική αρχιτεκτονική διαύλων των σημερινών υπολογιστών, όπου κυριαρχούν οι συνδέσεις σημείο-προς-σημείο.

5.2 Είσοδος και Έξοδος

Με τον όρο είσοδο και έξοδο ενός ενσωματωμένου συστήματος, αναφερόμαστε στην τοποθέτηση δεδομένων που προέρχονται από κάποια εξωτερική συσκευή μέσα σε καταχωρητές και στην αντιγραφή των δεδομένων των καταχωρητών του επεξεργαστή, στους ακροδέκτες της συσκευασίας και στη συνέχεια, την κατάλληλη μεταφορά στο περιφερειακό δομοστοιχείο.

Το πως υλοποιείται η είσοδος/έξοδος (E/E) εξαρτάται από το συγκεκριμένο επεξεργαστή. Μικροί 8bit επεξεργαστές, μπορούν να υποστηρίξουν μόνο απλές λειτουργίες, ενώ σύνθετοι 32bit μπορούν να υποστηρίξουν περισσότερες τεχνικές. Για να υλοποιηθεί η E/E απαιτείται αφενός υποστήριξη από το υλικό, αφετέρου και προγραμματιστική υποστήριξη.

Υπάρχουν 2 δημοφιλείς τεχνικές που υποστηρίζουν τις E/E: (α) περιόδευση (polling), και (β) διακοπές (interrupts). Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, υπάρχουν κατ ελάχιστον 3 καταχωρητές στο περιφερειακό. Ένας από αυτούς είναι ο καταχωρητής κατάστασης. Ο επεξεργαστής ελέγχει περιοδικά τον καταχωρητή κατάστασης κάθε περιφερειακού για να διαπιστώσει αν υπάρχουν

δεδομένα που πρέπει να λάβει. Αν ο καταχωρητής σηματοδοτήσει ότι υπάρχουν δεδομένα (π.χ. από το πληκτρολόγιο), τότε διαβάζει τον καταχωρητή δεδομένων. Είναι ευκολονόητο ότι τις περισσότερες φορές δεν υπάρχουν δεδομένα και έτσι σπαταλώνται κύκλοι του επεξεργαστή. Αυτή η τεχνική είναι πολύ απλή να υλοποιηθεί και δεν απαιτεί καθόλου υποστήριξη από το υλικό. Αυτή η τεχνική μπορεί να παρομοιαστεί με κάποιον που βλέπει συνεχώς το κινητό τηλέφωνο του αν έχει λάβει SMS. Με τις διακοπές υποστηρίζεται και η διαιτησία του διαύλου. Μια συσκευή που θέλει να στείλει δεδομένα στον επεξεργαστή χρησιμοποιεί μια διακοπή για να τον ενημερώσει. Ο επεξεργαστής εξετάζει τη διακοπή και παρέχει τον έλεγχο, αφού χρησιμοποιήσει κατάλληλο σήμα.

Η δεύτερη τεχνική είναι η βελτιωμένη έκδοση E/E. Σε αυτή την τεχνική κάθε περιφερειακό συνδέεται με μια αποκλειστική γραμμή με τον επεξεργαστή, και όταν θελήσει να στείλει δεδομένα, αλλάζει τη λογική στάθμη της γραμμής, προκαλώντας μια διακοπή αίτησης εξυπηρέτησης (interrupt service request, IRQ). Ο επεξεργαστής σταματάει να εκτελεί αυτό που επεξεργάζονταν, ενημερώνει το περιφερειακό με κατάλληλο σήμα επιβεβαίωσης διακοπής (interrupt acknowledge) και αρχίζει την εκτέλεση ενός ειδικού κώδικα που ονομάζεται ρουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής (interrupt service routine, ISR). Αυτός ο κώδικας αναλαμβάνει τη μεταφορά των δεδομένων από το περιφερειακό στον επεξεργαστή. Σε περίπτωση που ο επεξεργαστής δεν έχει τόσες πολλές γραμμές διακοπών, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια υβριδική διασύνδεση στην οποία συνδέονται πολλές συσκευές σε μια γραμμή διακοπής. Όταν ο επεξεργαστής διαπιστώσει ότι έχει συμβεί μια διακοπή, σταματάει το έργο που εκτελεί, και ελέγχει όλες τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο κοινό κανάλι με περιόδευση. Επειδή η χρήση της διακοπής, σημαίνει την παρεμπόδιση εκτέλεσης του προγράμματος που εκτελείται ήδη, θα πρέπει να έχει μικρή καθυστέρηση (latency), ώστε να μη προκαλεί πρόβλημα. Κάποιοι επεξεργαστές ενσωματωμένων συστημάτων υποστηρίζουν και πολύ γρήγορες κλήσεις εξυπηρέτησης διακοπών, όπως ο ARM που παρέχει είτε την κανονική εξυπηρέτηση, είτε τη γρήγορη εξυπηρέτηση. Η επιλογή εξαρτάται από τον προγραμματιστή και τις δυνατότητες που θέλει να χρησιμοποιήσει, αφού η γρήγορη εξυπηρέτηση παρέχει μειωμένες λειτουργίες.

Στην απλή υλοποίηση των διακοπών, ο επεξεργαστής εκτελεί κάθε φορά την ίδια συνάρτηση εξυπηρέτησης διακοπής, ανεξαρτήτου του πια συσκευή την έχει δημιουργήσει. Μια βελτιωμένη υλοποίηση υποστηρίζει διαφορετικές ρουτίνες εξυπηρέτησης διακοπής για κάθε περιφερειακό. Σε αυτή την περίπτωση, όλες οι διακοπές είναι αριθμημένες και μοναδικές. Κατά την έναρξη λειτουργίας του συστήματος καταγράφονται οι αντιστοιχίσεις της κάθε διακοπής με τη διεύθυνση που ξεκινάει η αντίστοιχη ρουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής. Οπότε, όταν εμφανιστεί μια συγκεκριμένη διακοπή, ο επεξεργαστής εκτελεί τον κώδικα που έχει καθοριστεί. Αυτό το είδος της διακοπής ονομάζεται διανυσματική δια-

κοπή (vectored interrupt), επειδή για κάθε διακοπή αντιστοιχεί ένα διάνυσμα που είναι μια διεύθυνση μνήμης κώδικα. Για λόγους διευκόλυνσης του επεξεργαστή, υπάρχει ένα ειδικό υλικό που ονομάζεται προγραμματιζόμενος ελεγκτής διακοπών (programmable interrupt controller, PIC), στο οποίο συνδέονται όλα τα κανάλια διακοπών, και όταν συμβεί μια διακοπή αυτό ενημερώνει τον επεξεργαστή μαζί με τη διεύθυνση του ISR. Η Intel ήταν η πρώτη που πρόσθεσε αυτό το ειδικό ολοκληρωμένο κύκλωμα το 1990 και του έδωσε την ονομασία 89C59A. Μετά από 10 χρόνια παρουσιάστηκε μια βελτιωμένη έκδοση, ο ελεγκτής APIC που υποστηρίζει 255 προγραμματιζόμενες διακοπές, ταυτόχρονη είσοδο/έξοδο, παρέχει μετρητές υψηλής ακριβείας, μεταβίβαση διακοπής στον πρώτο διαθέσιμο επεξεργαστή και βελτίωση στην απόδοση επεξεργασίας των διακοπών. Στα σημερινά συστήματα ο προγραμματιζόμενος ελεγκτής διακοπών βρίσκεται πάνω στο ίδιο chip με τον επεξεργαστή. Το APIC απαιτεί επίσης την κατάλληλη υποστήριξη από το λειτουργικό σύστημα, προκειμένου να ρυθμιστεί.

Με την εισαγωγή των πολλαπλών διακοπών, δημιουργήθηκε η απαίτηση των προτεραιοτήτων. Κάποιες διακοπές είναι πιο σημαντικές από κάποιες άλλες, όπως για παράδειγμα η διακοπή που έρχεται από το ρολόι του συστήματος, είναι πιο σημαντική από τη διακοπή που έρχεται από το πληκτρολόγιο. Τα περισσότερα σημερινά συστήματα υποστηρίζουν προτεραιότητες ως εξής: μια ρουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής μπορεί να σταματήσει προσωρινά να εκτελείται, αν συμβεί μια διακοπή μεγαλύτερης προτεραιότητας και μόνο τότε. Δηλαδή, οι διακοπές χαμηλότερης προτεραιότητας δεν ικανοποιούνται. Για να υποστηρίξουν αυτή τη δυνατότητα, θα πρέπει οι επεξεργαστές να χρησιμοποιούν εμφωλευμένες διακοπές (nested interrupts), και επίσης να μπορούν να απενεργοποιούν προσωρινά τις διακοπές. Η δυνατότητα προσωρινής απενεργοποίησης των διακοπών χρησιμοποιείται σε περίπτωση που ο επεξεργαστής εκτελεί ένα κομμάτι κώδικα που δεν πρέπει να διακοπεί σε καμία περίπτωση, όπως π.χ. όταν γίνεται εξυπηρέτηση μιας διακοπής υψηλής προτεραιότητας. Για την υλοποίηση υπάρχει μια σημαία μέσα στον επεξεργαστή, η οποία τίθεται σε '0' όταν ο επεξεργαστής δε δέχεται διακοπές, και '1' όταν δέχεται. Η σημαία αυτή στην αρχιτεκτονική x86 είναι η IF και με τις εντολές assembly CLI (clear interrupts) και STI (set interrupts), μπορεί να απενεργοποιηθεί ή να ενεργοποιηθεί το χειρισμό διακοπών. Παρομοίως, στον ARM καλείται η εντολή MSR με τα κατάλληλα ορίσματα όπου γράφει στην κατάλληλη θέση του καταχωρητή κατάστασης που αντιστοιχεί στην αποδοχή των διακοπών, είτε τη τιμή 1 είτε την τιμή 0. Όταν ο επεξεργαστής δεν εξυπηρετεί διακοπές, τότε απλώς τις αγνοεί. Το περιφερειακό που έχει ζητήσει μια διακοπή διατηρεί τη λογική στάθμη της γραμμής της διακοπής σε υψηλή τιμή, μέχρι να εξυπηρετηθεί, οπότε δεν χάνονται διακοπές. Βέβαια, αν ο επεξεργαστής διατηρεί για πολύ χρόνο απενεργοποιημένες τις διακοπές, τότε μπορεί να καθυστερήσει σημαντικά να εξυπηρετήσει μια δια-

κοπή και να γίνει κάποια υπερχείλιση ή κάποιο άλλο μη επιθυμητό γεγονός.

Μια βελτίωση που έχει γίνει αφορά τη χρήση ενός ειδικού συνεπεξεργαστή άμεσης πρόσβασης στη μνήμη (direct memory access, DMA). Αυτός μπορεί να γίνει κυρίαρχος του διαύλου και να μεταφέρει από ή προς τη μνήμη από οποιαδήποτε συνδεδεμένη συσκευή. Ο επεξεργαστής έχει άμεση πρόσβαση και ρυθμίζει τους καταχωρητές του DMA, και συγκεκριμένα το μέγεθος της μεταφοράς, τη διεύθυνση μνήμης, τη διεύθυνση του περιφερειακού και αν είναι εγγραφή ή ανάγνωση, του παραχωρεί την κυριότητα του διαύλου και ξεκινάει αυτόνομα τη μεταφορά των δεδομένων. Ο επεξεργαστής μπορεί να συνεχίσει να εκτελεί τον ίδιο ή άλλον κώδικα προγράμματος, και όταν ολοκληρωθεί η αντιγραφή θα ενημερωθεί με διακοπή από τον ελεγκτή DMA.

Με την παραχώρηση του ελέγχου στον ελεγκτή DMA μπορεί να εμφανιστεί και ένα πρόβλημα που ονομάζεται αντιστροφή των προτεραιοτήτων. Συγκεκριμένα, μπορεί να ρυθμιστεί μια μεταφορά DMA από τον επεξεργαστή και να του δοθεί ο έλεγχος, και καθώς γίνεται η μεταφορά, να δημιουργηθεί μια διακοπή υψηλής προτεραιότητας στον επεξεργαστή, που όμως επειδή δεν έχει τον έλεγχο του διαύλου δε μπορεί να την ικανοποιήσει. Με την εισαγωγή ενός ατομικού καναλιού επικοινωνίας του επεξεργαστή με το DMA, το πρόβλημα λύνεται, αφού μπορεί να δοθεί εντολή από τον επεξεργαστή να σταματήσει τη μεταφορά.

Τα περιφερειακά που χρησιμοποιούνται για E/E, υποστηρίζουν δυο προγραμματιστικούς τρόπους πρόσβασης. Ο πρώτος τρόπος ονομάζεται προγραμματιζόμενη E/E και οι διευθύνσεις που αντιστοιχούν σε κάθε περιφερειακό βρίσκονται σε ένα ανεξάρτητο χώρο διευθύνσεων ως προς τη μνήμη. Σε περίπτωση που απαιτηθεί πρόσβαση σε μια τέτοια διεύθυνση ο επεξεργαστής χρησιμοποιεί ειδικές εντολές εισόδου και εξόδου. Για παράδειγμα, οι ενσωματωμένοι μικροεπεξεργαστές της Intel, χρησιμοποιούν τις εντολές *in* και *out*. Ο δεύτερος τρόπος πρόσβασης ονομάζεται απεικόνιση στη μνήμη, και η διεύθυνση που αντιστοιχεί στο περιφερειακό, βρίσκεται μέσα στο χώρο διευθύνσεων μαζί με τις διευθύνσεις της μνήμης. Οι επεξεργαστές της Intel, υποστηρίζουν και αυτόν τον τρόπο πρόσβασης μέσω των τυπικών εντολών πρόσβασης διευθύνσεων μνήμης *mov*, δηλαδή δεν υπάρχουν άλλες εντολές, είτε γίνεται πρόσβαση στη μνήμη είτε σε ένα περιφερειακό. Σχεδόν όλοι οι επεξεργαστές χρησιμοποιούν αυτόν τον τρόπο πρόσβασης, και κάποιοι και τον πρώτο. Οι MIPS και οι ARM επεξεργαστές χρησιμοποιούν μόνο αυτόν τον τρόπο.

5.3 Τυπικοί δίαυλοι ενσωματωμένων συστημάτων

Κατά τα 30 τελευταία χρόνια τα ενσωματωμένα συστήματα έχουν ακολουθήσει τις εξελίξεις των σταθερών υπολογιστών στην επικοινωνία και έχουν υιοθετήσει πολλές φορές διαύλους που αρχικά είχαν προταθεί για τους προσωπικούς υπολογιστές. Η πρώτη σοβαρή πρόταση προήλθε από την IBM το 1980, όπου αφορούσε τον πρότυπο δίαυλο 8bit της βιομηχανίας, ISA (Industry Standard Association). Χρησιμοποιούνταν στους πρώτους προσωπικούς υπολογιστές της IBM και στη συνέχεια από όλους τους κατασκευαστές που παρείχαν συμβατούς υπολογιστές με IBM (IBM PC compatible). Ο δίαυλος γρήγορα επεκτάθηκε σε 16bit και αργότερα σε 32bit το 1988 με την ονομασία επεκταμένος ISA (extended ISA). Η IBM προσπάθησε στη συνέχεια να χρησιμοποιήσει ένα νέο δικό της δίαυλο, που δεν έδινε όμως δικαιώματα χρήσης στους άλλους το MCA (microchannel architecture). Λόγω των δικαιωμάτων χρήσης, οι υπόλοιποι κατασκευαστές παρέμειναν με το EISA και πρότειναν δυο νέες εκδόσεις: το PCI (peripheral component interconnect) και το VESA local bus. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τους πιο δημοφιλείς διαύλους που έχουν χρησιμοποιηθεί από το 1980 έως σήμερα. Μπορεί κάποιος να παρατηρήσει ότι με την πρόοδο της τεχνολογίας αποσύρονται οι παράλληλοι δίαυλοι και χρησιμοποιούνται οι σειριακοί. Το πιο χαρακτηριστικό γεγονός είναι η αντικατάσταση των παράλληλων διαύλων IDE (αργότερα μετονομάστηκαν σε PATA, Parallel ATA) που είχαν μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς 133 MB/sec, από τους σειριακούς διαύλους SATA (serial ATA), με μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς περίπου 2GB/sec.

Οι δίαυλοι ISA και EISA ήταν από τους μακροβιότερους διαύλους, που οφείλονταν στην μεγάλη χρήση και ευκολία ανάπτυξης εκείνα τα χρόνια. Όμως, είχαν εγγενή προβλήματα που δεν επέτρεπαν την εύκολη χρήση τους, ιδιαίτερα από χρήστες που δε γνώριζαν εσωτερικές λεπτομέρειες. Προκειμένου να λειτουργήσει ένα περιφερειακό θα έπρεπε να αναφέρει τη γραμμή διακοπής, τη διεύθυνση επικοινωνίας και το κανάλι DMA που έπρεπε να λειτουργήσει, στοιχεία που χαρακτήριζαν μοναδικά το περιφερειακό. Αν ένα άλλο περιφερειακό τοποθετούνταν στον κοινό δίαυλο με ίδιες παραμέτρους, τότε δυσλειτουργούσε όλο το σύστημα. Επίσης, η χρήση της πολυπλεξίας διευθύνσεων και δεδομένων μείωνε το μέγιστο ρυθμό επικοινωνίας. Τέλος, η διευθυνσιοδότηση στο δίαυλο ήταν 20bit και άρα μπορούσαν να υπάρχουν διευθύνσεις από 1 έως 1MB. Αυτά τα προβλήματα ώθησαν τους σχεδιαστές να βρουν ένα νέο δίαυλο. Αυτός ήταν ο PCI.

Ο δίαυλος PCI προτάθηκε αρχές του 1990 με το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της αυτόματης ρύθμισης των παραμέτρων επικοινωνίας των περιφερειακών. Είναι ο πιο κοινός δίαυλος και βρίσκεται ακόμη στις κεντρικές πλακέτες

Πίνακας 5.1: Τυπικοί Δίαυλοι Συστήματος

Δίαυλος	bits	Mhz	Ταχύτητα (MB/sec)
8-bit ISA	8	8	4
16-bit ISA	16	8	8
EISA	32	8.33	33.3
32-bit PCI	32	33	133
64-bit PCI	64	33	266
1x AGP	64	66	266
8x AGP	64	533	2100
VL BUS	33	50	132
SCSI I/II	8	5	40
FAST SCSI	8	10	80
Wide SCSI	16	10	60
Ultra SCSI	16	20	320
PCIe x1	1	2500	>500
RAMBUS	32	1066	4200
IDE / PATA	16	66	133
SATA 1.0	1	1500	150
SATA 2.0	1	-	300
SATA 3.0	1	-	600
SATA 3.2	1	-	1969

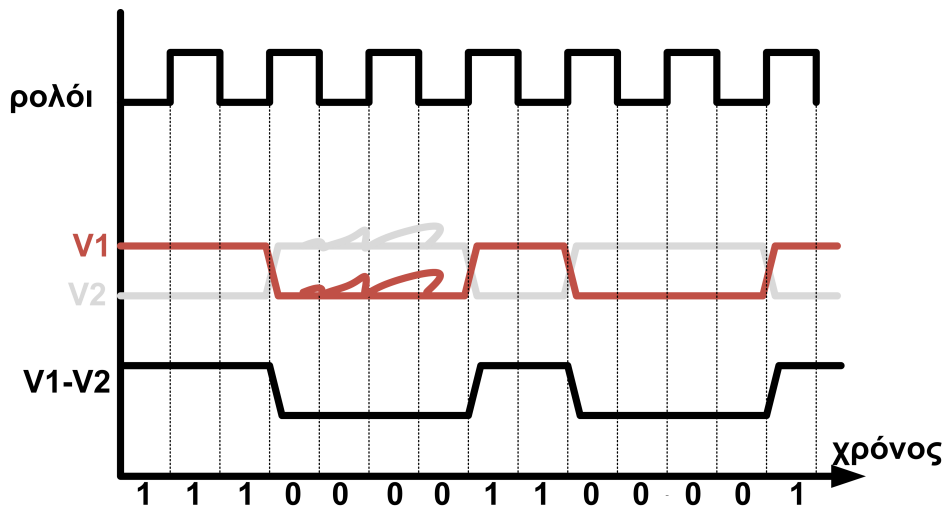
των περισσότερων συστημάτων, αν και τείνει να αντικατασταθεί και να εξαλειφθεί από νέους διαύλους. Σε αντίθεση με το ISA που λειτουργούσε στα 8Mhz, αυτός ο 32bit δίαυλος λειτουργεί στα 33/66Mhz με υποστήριξη τάσεων 3.3V και 5V, ενώ επιτυγχάνονταν εύρος ζώνης 524MB/sec για 64bit μεταφορές. Όπως και στον ISA έτσι και εδώ υπάρχει πολυπλεξία των διευθύνσεων και των δεδομένων για εξοικονόμηση ακροδεκτών, αλλά λόγω της μεγάλης συχνότητας λειτουργίας δεν αποτελεί πρόβλημα. Κάθε συσκευή παρέχει κάποιους καταχωρητές κατάστασης και ελέγχου, όπου έχει πρόσβαση ο επεξεργαστής τόσο για να κάνει την αυτόματη ρύθμιση, όσο και για να χειριστεί το περιφερειακό.

Προκειμένου να μειωθεί το πλάτος των αγωγών ο παράλληλος δίαυλος PCI εξελίχθηκε σε ένα σειριακό υβριδικό δίαυλο με δυνατότητα παραλληλίας με την ονομασία PCIe (PCI express) (Εικόνα 5.7). Συγκεκριμένα, αυτός ο δίαυλος αποτελείται από κανάλια επικοινωνίας (ονομάζονται lanes) και είναι τύπου σημείο-προς-σημείο (δηλαδή, μια συσκευή PCIe συνδέεται σε μια άλλη PCIe και δε γίνεται να συνδεθεί και τρίτη συσκευή. Το κάθε κανάλι επιτρέπει την αμφίδρομη αποστολή και λήψη δεδομένων από δυο γραμμές, με κατάλληλη διαφορική κωδικοποίηση, δηλαδή σειριακά. Ένα περιφερειακό μπορεί να σχεδιαστεί για να χρησιμοποιήσει πολλαπλά κανάλια (π.χ. 4 κανάλια και ονομάζεται x4, με μέγι-

στο τα 32 κανάλια), οπότε τα κανάλια χρησιμοποιούνται παράλληλα, αλλά η πρωταρχική επικοινωνία παραμένει σειριακή. Ένα θετικό χαρακτηριστικό αυτού του διαύλου, είναι ότι περιφερειακά που χρησιμοποιούν λιγότερα κανάλια επικοινωνίας (π.χ. 4 κανάλια), μπορούν να συνδεθούν σε μεγαλύτερες υποδοχές επέκτασης πολλών καναλιών (π.χ. υποδοχή x8), και να λειτουργήσουν χωρίς κανένα πρόβλημα. Τα δεδομένα πριν σταλούν σε ένα κανάλι συσκευάζονται σε πακέτα. Οπότε, σε περίπτωση που υπάρχουν πολλαπλά κανάλια, το κάθε πακέτο προς αποστολή προωθείται σε οποιοδήποτε κανάλι είναι ελεύθερο. Συνήθως, όλα τα κανάλια από κάθε συσκευή καταλήγουν στις αντίστοιχες θύρες ενός διακόπτη μεταγωγής (switch), που συνδέεται στο κεντρικό δίκτυο (root complex), δημιουργώντας μια ιεραρχική δομή. Οι δίαυλοι PCIe είναι αρκετά διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται σε κάθε υπολογιστικό σύστημα. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν και σε ενσωματωμένα συστήματα, όταν υπάρχει ανάγκη για αυξημένο εύρος ζώνης, αλλά τις περισσότερες φορές επιλέγονται άλλοι δίαυλοι πιο οικονομικοί στους οποίους μπορούν να συνδεθούν άμεσα και εξωτερικά περιφερειακά. Ο δίαυλος PCIe χρησιμοποιείται κυρίως για τα εσωτερικά περιφερειακά ενός συστήματος, δηλαδή για αυτά που βρίσκονται άμεσα συνδεδεμένα στην κεντρική πλακέτα του συστήματος.

Ένα χαρακτηριστικό του διαύλου PCI express, είναι η υποστήριξη διαφορικής σηματοδότησης χαμηλής τάσης (low voltage differential signalling, LVDS), η οποία μπορεί να υποστηρίξει έως και 2 Gbit/s με κατανάλωση ισχύος κάποια mW. Η κωδικοποίηση LVDS αφορά το φυσικό επίπεδο, και έχει υιοθετηθεί από πολλά πρωτόκολλα διαύλων. Σε αυτή τη σηματοδότηση χρησιμοποιούνται 2 καλώδια για τη ταυτόχρονη σειριακή μετάδοση των bit, και η αποστολή των bit βασίζεται στη διαφορά δυναμικού ανάμεσα τους. Αν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από κάποια τιμή, τότε ανιχνεύεται ως '1' διαφορετικά ως '0'. Η διαφορική σηματοδότηση επιτρέπει την μεγάλη ανοχή στο θόρυβο, αφού αν υπάρχει κάποια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία θα επηρεάσει ταυτόχρονα και τους 2 αγωγούς που έχουν παράλληλη όδευση (Εικόνα 5.8). Οι τάσεις που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως 0.3 V και αυτό επιτρέπει την επίτευξη μεγάλης ταχύτητας αλλαγής από 0 σε 1 και 1 σε 0, με συνέπεια την επίτευξη εύρους ζώνης των Gbit.

Προς τα μέσα της δεκαετίας του 1990, η εταιρία ARM εισήγαγε το δίαυλο Advanced Microcontroller Bus Architecture (AMBA), στις σχεδιάσεις εντός ολοκληρωμένου κυκλώματος για τη διασύνδεση των διαφόρων δομοστοιχείων που συνθέτουν ένα σύστημα πάνω στο chip. Ο AMBA χρησιμοποιείται σε κάθε σχεδίαση που χρησιμοποιεί τον επεξεργαστή ARM (π.χ. στο 90% των έξυπνων κινητών τηλεφώνων) και επιτρέπει πολλαπλούς επεξεργαστές και μεγάλο αριθμό περιφερειακών. Η ARM αν και κράτησε την κυριότητα, δημοσίευσε τις προδιαγραφές και έτσι υιοθετήθηκε από πολλούς κατασκευαστές και εκτός του οικοσυστήματος της ARM (π.χ. σε σχεδιασμούς ASIC). Η τρέχουσα έκδοση του AMBA είναι η 5 και παρουσιάστηκε το 2013. Θεωρείται το de facto standard για



Σχήμα 5.8: Η διαφορική σηματοδότηση LVDS, που χρησιμοποιείται στο PCIe, επιτρέπει την απροβλημάτιστη μεταφορά bit ακόμη και αν εμφανιστεί θόρυβος.

τη σχεδίαση ενσωματωμένων συστημάτων SoC, επειδή έχει πολύ καλή υποστήριξη από πολλούς παρόχους και επειδή έχει πολύ καλή τεκμηρίωση. Ο διάυλος AMBA χωρίζεται σε υποκατηγορίες, αναλόγως του είδους των συσκευών που συνδέονται. Υπάρχει ο διάυλος υψηλών ταχυτήτων AHB/AMBA που υποστηρίζει έως και 128bit, ο διάυλος χαμηλών ταχυτήτων που συνδέονται περιφερειακά χαμηλών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης, και διάυλοι ειδικών προδιαγραφών, όπως αποσφαλμάτωσης, διατήρησης συνέπειας μνήμης κ.ο.κ. Από τις πρώτες εκδόσεις ο διάυλος δημιουργήθηκε στοχεύοντας στην απόδοση· υποστηρίζει διασωληνωμένες μεταφορές, μεταφορές ριπής, αποδεσμευμένες μεταφορές και πολλαπλούς κυρίους των διαύλων.

Ένας αρκετά κοινός σειριακός διάυλος που δημιουργήθηκε το 1994 από την κοινοπραξία 7 εταιριών (όπως IBM, Microsoft, και άλλες), είναι ο ενιαίος σειριακός διάυλος επικοινωνίας (universal serial bus, USB). Στις προδιαγραφές του καθορίζονται τα καλώδια, οι συνδετήρες και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Ως τώρα έχουν παρουσιαστεί αρκετές εκδόσεις, με την τελευταία να φέρει τον αριθμό 3.1 (Πίνακας 5.2). Η ιδιαιτερότητα αυτού του διαύλου και το πιο σημαντικό πλεονέκτημα που οδήγησε στην ευρεία αποδοχή του, είναι ότι εκτός από τα δεδομένα μεταφέρει και ενέργεια (από 500mA έως 3A στα 5 Volt) από τον υπολογιστή προς τα περιφερειακά. Στο διάυλο μπορούν να συνδεθούν πολλαπλές συσκευές μέσω ενός USB διανομέα (hub). Στα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του USB είναι η τοποθέτηση και άμεση χρήση (plug and play) χωρίς να απαιτείται η ρύθμιση παραμέτρων επικοινωνίας από το χρήστη, η τοποθέτηση και απομάκρυνση του περιφερειακού, ενώ ο υπολογιστής είναι σε λειτουργία

(hot pluggable), η υποστήριξη πολλών ταχυτήτων, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο από συσκευές χαμηλού εύρους ζώνης (όπως το πληκτρολόγιο), όσο και από συσκευές υψηλού εύρους ζώνης (π.χ. σκληρός δίσκος ή κάρτα γραφικών) και η χρήση καλωδίων διαφορετικών τύπων που δεν επιτρέπουν τη λανθασμένη συνδεσμολογία περιφερειακών USB στο διανομέα USB. Ο δίαυλος USB χρησιμοποιεί την περιόδευση των περιφερειακών, και κάθε φορά μόνο ένα περιφερειακό μπορεί να επικοινωνήσει με τον υπολογιστή· έτσι, δε μπορούν να προκληθούν συγκρούσεις. Το μέγιστο μήκος σύνδεσης είναι 5m, επειδή μετά υπάρχει εξασθένιση των σημάτων ή αυξημένα επίπεδα θορύβου που αλλοιώνουν τα σήματα. Ο δίαυλος USB είναι πολύ δημοφιλής στα ενσωματωμένα συστήματα, επειδή δίνει τη δυνατότητα της διασύνδεσης με μιας πληθώρας περιφερειακών. Ακόμη και οι πιο οικονομικοί υπολογιστές μιας πλακέτας των 5\$, όπως το Raspberry pi zero, διαθέτουν διεπαφή USB, αν έχουν εξαλείψει άλλους ακροδέκτες που ως τώρα θεωρούνταν σημαντικοί (όπως του δικτύου LAN).

Πίνακας 5.2: Εκδόσεις του USB

Έκδοση	Ημερομηνία	Ταχύτητα
0.9	Απρίλιος 1995	1.5 Mbit/s
1.0	Ιανουάριος 1996	1.5 Mbit/s και 12 Mbit/s
2.0	Απρίλιος 2000	480 Mbit/s
3.0	Νοέμβριος 2008	5 Gbit/s
3.1	Ιούλιος 2013	10 Gbit/s

Ένα άλλο πρωτόκολλο που αναπτύχθηκε παράλληλα με το USB από την εταιρία Apple αρχές του 1990 είναι το Firewire, το οποίο έχει προτυποποιηθεί κατά IEEE 1394. Είναι ένα σειριακό πρωτόκολλο όπως το USB με τις παρακάτω διαφορές: (α) οι συσκευές συνδέονται στο Firewire σε αλυσίδα, δηλαδή η κάθε μια με τις διπλανές της, και μια μόνο συνδέεται στον υπολογιστή, (β) επιτρέπει τη χρήση του DMA, ώστε να μεταφέρει η μια συσκευή δεδομένα σε μια άλλη χωρίς τη διαμεσολάβηση του επεξεργαστή (όπως γίνεται στο USB), (γ) μπορεί και παρέχει πολύ περισσότερη ενέργεια στις συσκευές που διασυνδέονται (έως 30V σε 1.5A), (δ) κάθε έκδοση Firewire έχει διαφορετικό συνδετήρα (όλες οι εκδόσεις του USB έχουν συμβατούς συνδετήρες), (ε) η ταχύτητα της τελευταίας έκδοσης Firewire 800 είναι πολύ καλύτερη από την ταχύτητα του USB 2.0, αλλά είναι πιο χαμηλή από την ταχύτητα του USB 3.0. Το Firewire υποστηρίζεται κυρίως από την Apple, και η τελευταία έκδοση ονομάζεται thunderbolt, αλλά με την έλευση του USB 3.1 το μέλλον για αυτό το δίαυλο φαίνεται δυσοίωνο.

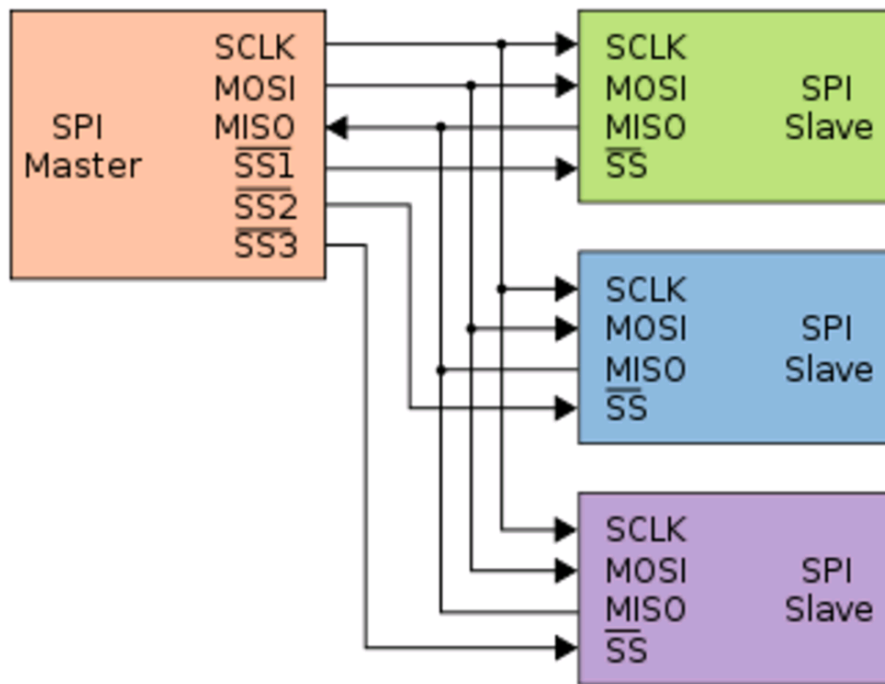
Στις τυπικές διεπαφές εισόδου εξόδου βρίσκουμε και τη σειριακή διασύνδεση RS232 με μέγιστη ταχύτητα 115200 bps σε 12V. Αυτή η διασύνδεση είναι πολύ χρήσιμη στην ανάπτυξη ενσωματωμένων συστημάτων, γιατί μπορεί να

επιτευχθεί ακόμη και με 2 καλώδια αποστολής και λήψης. Χαρακτηριστικό είναι ότι κατά την ανάπτυξη προγραμμάτων σε FPGA ή σε μικροεπεξεργαστές, οι σχεδιαστές εκτυπώνουν στη σειριακή θύρα μηνύματα αποσφαλμάτωσης. Αν και οι σημερινοί σταθμοί εργασίας δεν έχουν θύρα RS232, εντούτοις υπάρχουν μετατροπείς USB-RS232 που καλύπτουν αυτή την έλλειψη. Η θύρα αυτή υπάρχει ακόμη στους διακομιστές που επιτρέπουν την εμφάνιση διαγνωστικών μηνυμάτων του βασικού συστήματος εισόδου εξόδου (Basic Input Output System, BIOS) πριν φορτωθεί το λειτουργικό σύστημα. Υπάρχουν και άλλα σειριακά πρωτόκολλα, όπως το RS422 για αποστάσεις έως 1.5 Km και χρησιμοποιείται για το βιομηχανικό αυτοματισμό, το RS485 που είναι παρόμοιο με το RS422 αλλά επιτρέπει πολλαπλούς κυρίους του διαύλου, το ps/2 που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν για τη διασύνδεση πληκτρολογίων και ποντικιών, αλλά αντικαθίσταται από τη διασύνδεση USB, και η παράλληλη θύρα 25 ακίδων IEEE1284 στην οποία συνδέονται εκτυπωτές, αλλά με την έλευση του USB αντικαταστάθηκε από μικρούς και ευέλικτους ακροδέκτες USB.

Στα ενσωματωμένα συστήματα χρησιμοποιούνται επίσης και πιο απλοί δίαυλοι, που φέρουν ονομασίες όπως 4-wire, 3-wire, 2-wire, 1-wire ανάλογα με τον αριθμό των καλωδίων που χρησιμοποιούν για να συνδέσουν τα περιφερειακά στον επεξεργαστή. Ένας δίαυλος 4-wire είναι ο SPI (Serial Peripheral Interface, σειριακή περιφερειακή διεπαφή) και χρησιμοποιεί 4 καλώδια: ρολόι, επιλογή περιφερειακού, εγγραφή και ανάγνωση (Εικόνα 5.9). Η μέγιστη συχνότητα λειτουργίας είναι 20Mhz, ταχύτητα η οποία ικανοποιεί τις απαιτήσεις μεταφοράς τιμών αισθητήρων σε κάποιον μικροεπεξεργαστή ή τον έλεγχο κάποιων περιφερειακών. Ένας ακόμη δίαυλος 4 καλωδίων είναι ο SSI (Synchronous Serial Interface, σειριακή σύγχρονη διεπαφή), που βασίζεται στο RS-422 και χρησιμοποιεί 2 καλώδια για το ρολόι και 2 για τα δεδομένα. Μια παραλλαγή του SPI χρησιμοποιεί 3 καλώδια (3-wire) όπου υπάρχει μόνο μια γραμμή για την εγγραφή και ανάγνωση (αμφίδρομη επικοινωνία).

Ο δίαυλος με 2 καλώδια ονομάζεται I²C και υποστηρίζει πολλαπλούς κυρίους, πολλαπλά περιφερειακά, και έχει αναπτυχθεί από την εταιρία Philips. Ο δίαυλος αυτός υποστηρίζει διάφορες ταχύτητες επικοινωνίας από 100 Khz έως 5 Mhz. Χρησιμοποιεί κατάλληλες αντιστάσεις pull-up που συνδέουν την κάθε γραμμή (ρολόι και δεδομένα) με την τροφοδοσία (Εικόνα 5.10). Πάνω στις προδιαγραφές αυτού του διαύλου έχει αναπτυχθεί ο δίαυλος SMB με πολύ πιο αυστηρές οδηγίες για να επιτευχθεί σταθερότητα και αξιοπιστία. Οι σημερινοί υπολογιστές χρησιμοποιούν το SMB προκειμένου να διαβάσει ο επεξεργαστής τις τιμές από τα αισθητήρια πάνω στην κεντρική πλακέτα, όπως θερμοκρασίας και ταχύτητας ανεμιστήρα ψήκτρας. Το I²C είναι ένα αρκετά διαδεδομένο πρωτόκολλο στα ενσωματωμένα συστήματα που διαβάζουν τιμές από αισθητήρια, αφού χρησιμοποιεί ελάχιστα καλώδια και άρα έχει μειωμένο κόστος.

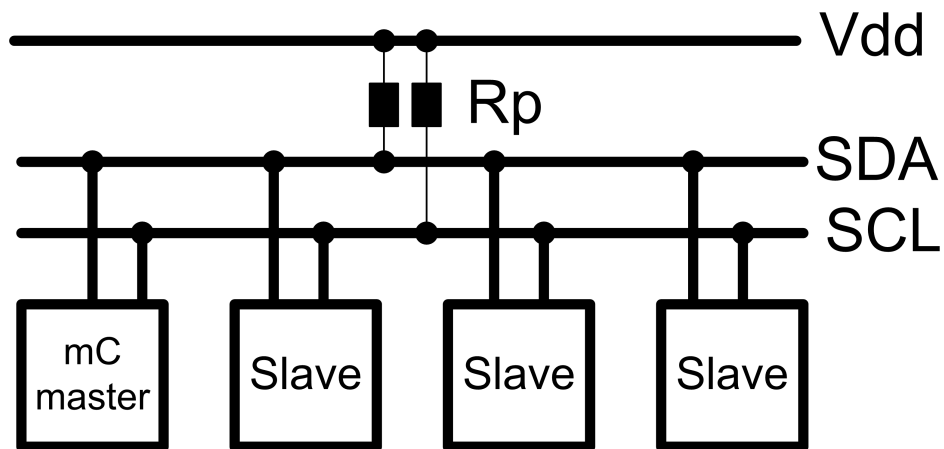
Ο δίαυλος με 1 καλώδιο έχει προταθεί από την Dallas Semiconductor και



Σχήμα 5.9: Ο διάυλος SPI με 3 περιφερειακά. Από το χρήστη Cburnett της wikipedia.com.

χρησιμοποιεί το ίδιο καλώδιο για δεδομένα χαμηλού εύρους ζώνης, σηματοδότηση και ρολόι. Η απόσταση που υποστηρίζεται είναι πολύ μεγαλύτερη από τον I²C. Τα περιφερειακά του 1-wire έχουν ένα πυκνωτή που συγκεντρώνει το φορτίο και μπορεί να τα τροφοδοτεί με ενέργεια τα χρονικά διαστήματα που δεν παρέχεται ενέργεια από τη μια γραμμή. Συνήθως χρησιμοποιείται από αισθητήρια (π.χ. θερμοκρασίας ή υγρασίας) που έχουν ελάχιστες ανάγκες σε εύρος ζώνης.

Ένας άλλος διάυλος είναι ο CAN (controller area network, περιοχή δικτύου ελεγκτών), ο οποίος έχει προτυποποιηθεί και χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία. Χρησιμοποιεί μηνύματα και επιτυγχάνει καλή απόδοση λόγω χρονικής πολυπλεξίας. Η ανάπτυξη του ξεκίνησε το 1983 από τη Bosch GmbH, και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1988 στη BMW 8. Είναι ένα σειριακός διάυλος πολλαπλών κυρίων, πολλαπλών κόμβων, και υποστηρίζει από απλά περιφερειακά, έως σύνθετους σταθμούς επεξεργασίας δεδομένων. Όλοι οι κόμβοι συνδέονται με 2 καλώδια μεταξύ τους και έχουν τις κατάλληλες τερματικές αντιστάσεις των 120 Ω. Αν και δεν υπάρχει σήμα ρολογιού, εντούτοις όλοι οι κόμβοι είναι συγχρονισμένοι μεταξύ τους και έχουν ρυθμιστεί να δειγματολη-



Σχήμα 5.10: Ο διάυλος I²C χρησιμοποιεί μόνο 2 καλώδια για την επικοινωνία.

πτούν τα bit όλοι, την ίδια στιγμή. Αυτός ο διάυλος χρησιμοποιείται μόνο στα ενσωματωμένα συστήματα των οχημάτων, πλοίων ή αεροπλάνων.

Εκτός από αυτούς τους διαύλους, υπάρχουν και πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας, όπως το bluetooth, Wifi, Wi-MAX, 3G και άλλα τα οποία συνδέονται τις περισσότερες φορές μέσω USB με τον επεξεργαστή, και έτσι δεν είναι ξεχωριστοί διάυλοι. Ιδιαίτερα, τον τελευταίο καιρό έχουν σχεδιαστεί πολύ οικονομικά περιφερειακά διασύνδεσης με το διαδίκτυο, όπως το ESP8266 που κοστίζει 5\$, απαιτεί τάση 3.3 V, είναι συμβατό με 802.11b και επικοινωνεί μέσω σειριακής σύνδεσης 2 αγωγών με κάποιον επεξεργαστή. Σε παρόμοια τιμή μπορεί κάποιος να προμηθευτεί ένα περιφερειακό Bluetooth ή το περιφερειακό nRF24L01 για επικοινωνία στα 2.4 Ghz σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς οπτική επαφή, δημιουργώντας ένα ασύρματο κατακευματωμένο ενσωματωμένο σύστημα. Η προσθήκη ασύρματης επικοινωνίας στα ενσωματωμένα συστήματα, προσδίδει μια ελευθερία και ευελιξία, ιδιαίτερα όταν συνδέονται στο διαδίκτυο, κατασκευάζοντας το IoT (internet of things, διαδίκτυο των συσκευών). Όμως, η ελευθερία αυτή δεν έχει μόνο πλεονεκτήματα. Το πιο σοβαρό μειονέκτημα είναι η ασφάλεια, αφού δίνει τη δυνατότητα σε κακόβουλους χρήστες για απομακρυσμένη επίθεση στο ενσωματωμένο σύστημα. Η ασφάλεια των ενσωματωμένων συστημάτων είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα που θα πρέπει να απασχολεί κάθε σχεδιαστή ΕΣ.

5.4 Σύνοψη Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύξαμε όλα τα θέματα της διασύνδεσης των Ενσωματωμένων Συστημάτων. Περιγράψαμε τους πιο σημαντικούς διαύλους, εξη-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ

γήσαμε τους τρόπους εισόδου και εξόδου, και τις βελτιώσεις που έχουν επιτευχθεί όλα αυτά τα χρόνια από το 1980 έως σήμερα. Μετά την ανάλυση των θεμάτων διαιτησίας και διακοπών, αναφερθήκαμε στους πιο σημαντικούς διαύλους 4,3,2 και 1 καλωδίων και ολοκληρώσαμε το κεφάλαιο με τα ασύρματα δίκτυα και τους κινδύνους που ελλοχεύουν με τη σύνδεση στο διαδίκτυο.

