

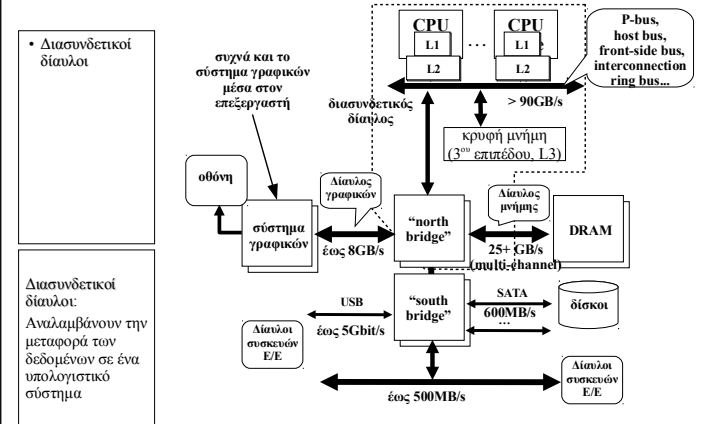
## Διασύνδεση Εισόδου-Εξόδου (συσκευές και δίαυλοι E/E)

<http://mixstef.github.io/courses/comparch/>



Μ.Στεφανιδάκης

## Διασυνδετικοί Δίαυλοι



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Διασύνδεση E/E”

2

## Μεταφορά δεδομένων

### • Διασυνδετικοί δίαυλοι

- Σε ένα υπολογιστικό σύστημα
  - Μεταφορά δεδομένων επεξεργασίας
    - Μεταξύ ΚΜΕ, κύριας μνήμης και συσκευών E/E
  - Απόδοση των διαύλων μεταφοράς
    - Σημαντική παράμετρος για τη συνολική απόδοση του υπολογιστή
- Χαρακτηριστικά διαύλων
  - Υπάρχει μεγάλη ποικιλία διαύλων
    - Με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά
  - Ανάλογα με τον ρόλο του καθενός διαύλου
    - Σε ένα υπολογιστικό σύστημα τα διασυνδεδεμένα μέρη (και ιδίως οι συσκευές E/E) έχουν τελείως διαφορετικές ανάγκες μεταφοράς δεδομένων

Ποιο θα μπορούσε να είναι το ζητούμενο από έναν διασυνδετικό δίαυλο εκτός της απόδοσης;

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Διασύνδεση E/E”

3

## Τι διασυνδέει ένας δίαυλος;

### • Διασυνδετικοί δίαυλοι

- Μέσα στο ολοκληρωμένο κύκλωμα
  - π.χ. ΚΜΕ-κρυφή μνήμη
    - Μέσα στο ολοκληρωμένο κύκλωμα επιτυγχάνεται η μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς των δεδομένων, μέσω αγωγών μετάλλου “τυπωμένων” στην επιφάνεια πυριτίου
- Πάνω στο ίδιο τυπωμένο κύκλωμα
  - π.χ. μεταξύ κύριας μνήμης και ελεγκτή μνήμης
    - Αγωγοί σχεδιασμένοι με ακρίβεια πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα
- Μεταξύ τυπωμένων κυκλωμάτων
  - π.χ. η διασύνδεση με τις μονάδες δίσκου
    - Διασύνδεση μέσω εύκαμπτων καλωδίων σε αποστάσεις της τάξης του ενός μέτρου
- Μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων
  - π.χ. η (τοπική) διασύνδεση της κάρτας δικτύου

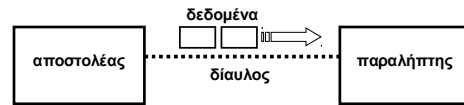
Η μεταφορά των δεδομένων μέσα σε έναν υπολογιστή επιτυγχάνεται ηλεκτρικά μέσω αγωγών χαλκού. Νέες φωτονικές τεχνολογίες υπόσχονται πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες (>10Gbps ανά αγωγό)

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Διασύνδεση E/E”

4

## Βασικά χαρακτηριστικά διαύλων

- Διασυνδετικοί δίαυλοι

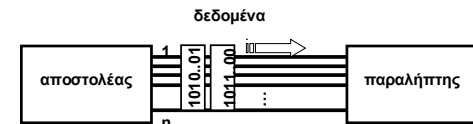


Μεταφορά δεδομένων: η γενική εικόνα

- Πόσα bits μεταφέρονται ταυτόχρονα;
- Πότε ο παραλήπτης θα διαβάσει την είσοδο;
- Ποια η τοπολογία του διαύλου;
- Πώς οργανώνεται η μεταφορά;

## Παράλληλοι δίαυλοι

- Διασυνδετικοί δίαυλοι
- Εύρος Διαύλου



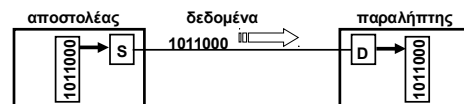
εύρος διαύλου =  $n$  bits

- Πολλαπλασιασμός των bits που μεταφέρονται ταυτόχρονα
  - Συνήα ο ρυθμός μετριέται σε μεταφορές/s (T/s)
  - Π.χ. 10MT/s για δίαυλο εύρους 64 bits  $\rightarrow$  640Mb/s
- Πολύ υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς
- Αλλά και μεγάλος ηλεκτρονικός “θόρυβος”
  - Απαιτείται ακριβής σχεδιασμός για να διατηρηθεί η ποιότητα του σήματος και ο συγχρονισμός στη μεταφορά δεδομένων
  - Χρησιμοποιείται στα υψηλότερα επίπεδα της ιεραρχίας διαύλων

Ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων μετριέται πάντοτε σε μονάδες με βάση το 10: ρυθμός 1Mb/s =  $10^6$  b/s

## Σειριακοί δίαυλοι

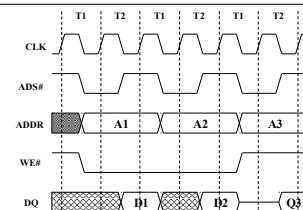
- Διασυνδετικοί δίαυλοι
- Εύρος Διαύλου



- Οι λέξεις (words) μετατρέπονται σε σειρά από bits πριν την αποστολή - και αντίστροφα μετά την παραλαβή
  - Serializer – deserializer (SerDes)
- Γιατί χρησιμοποιούνται;
  - Μεγαλύτερη ανοσία στον ηλεκτρονικό θόρυβο
  - Δυνατότητα μεταφοράς σε μεγαλύτερη απόσταση
  - Μικρότερες διαστάσεις αγωγού
  - Χρησιμοποιείται στα χαμηλότερα επίπεδα της ιεραρχίας διαύλων

## Χρονισμός μεταφοράς

- Διασυνδετικοί δίαυλοι
- Εύρος Διαύλου
- Χρονισμός

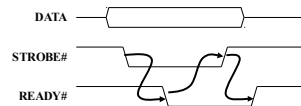


Οι σύγχρονοι δίαυλοι χρησιμοποιούνται στα ανώτερα επίπεδα της ιεραρχίας: π.χ. στο σχήμα φαίνεται η λειτουργία ενός τυπικού διαύλου της KME

- Πότε ο αποστολέας θα στείλει τα δεδομένα στις εξόδους;
- Πότε ο παραλήπτης θα δειγματοληπτήσει τις εισόδους;
- Γραμμή ρολογιού (clock)
  - Στις ανερχόμενες ή/και κατερχόμενες ακμές
  - Σύγχρονοι δίαυλοι (synchronous)
  - Αλλά: ευαισθησία στις παραμορφώσεις του clock
  - Θόρυβος και κατανάλωση ενέργειας

## Άλλα σχήματα χρονισμού

- Διασυνδετικοί διαύλοι
- Εύρος Διαύλου
- Χρονισμός

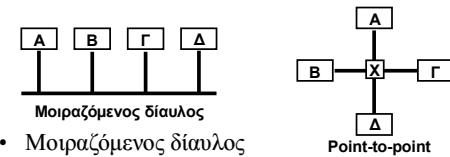


- Ασύγχρονοι διαύλοι (χωρίς ρολόι)
  - Σήματα συγχρονισμού
  - Ανοσία σε παραμορφώσεις σημάτων
  - Αλλά: αργότερη μεταφορά – πολύπλοκη ανταλλαγή σημάτων
- Ενσωμάτωση ρολογιού στα δεδομένα
  - Δεν υπάρχει ξεχωριστή γραμμή clock
  - Αλλά ο παραλήπτης μπορεί να συμπεράνει για το ρολόι του αποστολέα αν το μεταδιδόμενο σήμα έχει κανό αριθμό ακμών (εναλλαγές μεταξύ 0 και 1)

Σειριακοί διαύλοι με ενσωμάτωση της χρονικής πληροφορίας στα δεδομένα χρησιμοποιούνται στα κατώτερα επίπεδα της ιεραρχίας (π.χ. ο δίαυλος USB)

## Τοπολογίες Διαύλων

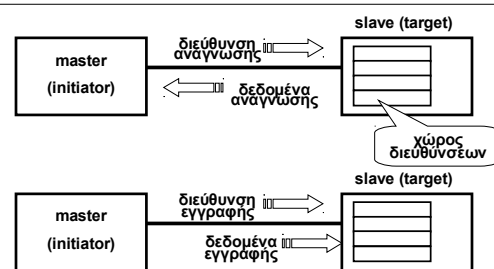
- Διασυνδετικοί διαύλοι
- Εύρος Διαύλου
- Χρονισμός
- Τοπολογίες



- Μοιραζόμενος δίαυλος
  - Η παλαιότερη λύση
  - Αναγκαία η διαιτησία για την κατοχή του διαύλου
  - Κακή ποιότητα σημάτων → χαμηλότερη ταχύτητα
- Point-to-point
  - Διασύνδεση πάντα μεταξύ δύο σημείων
  - Τμήματα συγκέντρωσης-ανταλλαγής δεδομένων
    - Hubs ή switches
  - Νεώτερες λύσεις για υψηλότερη ταχύτητα μεταφοράς

## Οργάνωση μεταφοράς

- Διασυνδετικοί διαύλοι
- Εύρος Διαύλου
- Χρονισμός
- Τοπολογίες
- Οργάνωση μεταφοράς

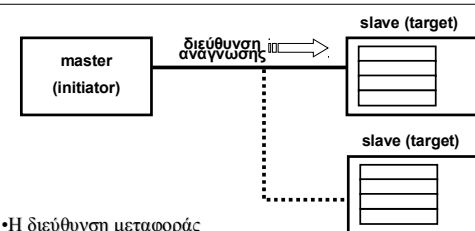


- Η μεταφορά ελέγχεται από τον master
- Ανάγνωση ή εγγραφή από/στον χώρο διευσθύνσεων του slave
  - Σε ποιον slave και σε ποιες λέξεις του slave γίνεται η μεταφορά

Η φορά της “ανάγνωσης” και της “εγγραφής” ορίζεται κατά σύμβαση!

## Διεύθυνση μεταφοράς

- Διασυνδετικοί διαύλοι
- Εύρος Διαύλου
- Χρονισμός
- Τοπολογίες
- Οργάνωση μεταφοράς



- Η διεύθυνση μεταφοράς
  - Επιλέγει slave
  - Επιλέγει λέξεις μέσα στον χώρο διευσθύνσεων του slave
- Κατανομή διευσθύνσεων
  - Είτε στατικά (στον σχεδιασμό)
  - Είτε δυναμικά (στην αρχικοποίηση του συστήματος)

Το διπλανό σχήμα υλοποιείται φυσικά (σε μοιραζόμενους διαύλους) ή λογικά (όταν ο δίαυλος είναι point-to-point)

## Φάσεις μεταφοράς

- Διασυνδετικοί δίαυλοι
- Εύρος Διαύλου
- Χρονισμός
- Τοπολογίες
- Οργάνωση μεταφοράς

Λόγω των φάσεων μεταφοράς, η χρήσιμη πληροφορία είναι (max) το 70% της μεταδιδόμενης! Σπάνια επιτυγχάνονται οι ρυθμοί μεταφοράς (peak rates) που αναφέρονται στις προδιαγραφές!

- Σε κάθε μεταφορά σε έναν δίαυλο
- Ορισμένες (ή όλες) από τις εξής φάσεις:
  - Διαιτησία (arbitration)
    - Σε μοιραζόμενους δίαυλους, απόκτηση του δίαυλου
  - Αίτηση (request)
    - Αποστολή διεύθυνσης, κατεύθυνσης μεταφοράς (read/write), μήκους μεταφερόμενων δεδομένων (σε bytes)
  - Απόκριση (response)
    - Κατάσταση μεταφοράς (ολοκλήρωση, αποτυχία, επανάληψη, αναμονή)
  - Δεδομένα (data)
    - Τα μεταφερόμενα δεδομένα (όταν υπάρχουν)

## Πληροφορία μεταφοράς

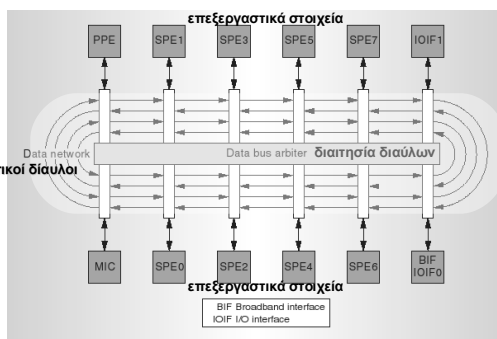
- Διασυνδετικοί δίαυλοι
- Εύρος Διαύλου
- Χρονισμός
- Τοπολογίες
- Οργάνωση μεταφοράς

- Διεύθυνση – δεδομένα – εντολές/κατάσταση
- Παράλληλοι δίαυλοι
  - Συνήθως χρησιμοποιούνται ξεχωριστές γραμμές ανά είδος πληροφορίας
  - Συχνά κάποιες πληροφορίες είναι χρονικά πολυπλεγμένες για οικονομία στο πλήθος αγωγών
    - Π.χ. διεύθυνση-δεδομένα
- Σειριακοί δίαυλοι
  - Τα πακέτα δεδομένων που ανταλλάσσονται περιέχουν και τα 3 είδη πληροφορίας

## Παράδειγμα διαύλου KME: Cell MP

- Διασυνδετικοί δίαυλοι
- Εύρος Διαύλου
- Χρονισμός
- Τοπολογίες
- Οργάνωση μεταφοράς
- Παράδειγμα

διασυνδετικοί δίαυλοι  
peak transfer rate  
>200GB/s



[IEEE Micro, May-June 2006]

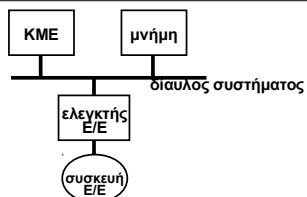
## Διασύνδεση συσκευών E/E

Διασύνδεση E/E

- Κατηγορίες συσκευών E/E ανάλογα με την διασύνδεσή τους στο σύστημα
  1. Καθορισμός από τη σχεδίαση του συστήματος
    - Βασικά μέρη συστήματος (στη μητρική πλακέτα)
    - Το BIOS γνωρίζει ήδη για τις συσκευές αυτές
  2. Προσθήκη κατά τη σύνθεση του συστήματος
    - Κάρτες επέκτασης
    - Αναγνώριση κατά την εκκίνηση του συστήματος
  3. Προσθήκη κατά τη λειτουργία του συστήματος
    - Συσκευές που συνδέονται εξωτερικά στο σύστημα
    - Αναγνώριση κατά τη λειτουργία του συστήματος (hot-plug)

## Οι πρώτες μορφές διασύνδεσης

### • Διασύνδεση E/E



- Διασύνδεση στον διάυλο του συστήματος μέσω ενός ελεγκτή E/E (I/O controller ή adapter)
- Η ΚΜΕ “βλέπει” απευθείας τον ελεγκτή E/E
- Ο ελεγκτής αναλαμβάνει την επικοινωνία με την πολύ αργότερη συσκευή E/E

## Ο ρόλος ενός ελεγκτή E/E

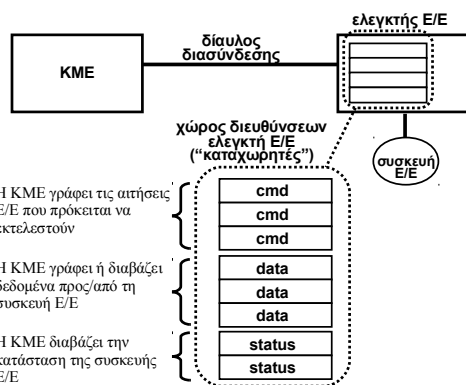
### • Διασύνδεση E/E

- Αποστολή εντολών προς τη συσκευή E/E
  - Μετάφραση των αιτήσεων E/E της ΚΜΕ
    - Μόνο εντολές load-store φτάνουν στον ελεγκτή από την ΚΜΕ!
- Λήψη ένδειξης κατάστασης συσκευής E/E
  - Δυνατότητα ελέγχου πορείας μιας αίτησης E/E
    - Οι αιτήσεις E/E ολοκληρώνονται πολύ αργά σε σχέση με την ταχύτητα επεξεργασίας της ΚΜΕ!
- Ειδοποίηση της ΚΜΕ
  - Μετά την ολοκλήρωση αίτησης E/E
    - Μηχανισμός interrupts
- Παροχή δεδομένων από συσκευή E/E
  - Προς την ΚΜΕ ή αυτόνομα προς τη μνήμη
    - Μηχανισμός DMA

Πώς επικοινωνεί η ΚΜΕ με τον ελεγκτή για την υλοποίηση των λειτουργιών αυτών;

## Πώς βλέπει η ΚΜΕ έναν ελεγκτή E/E

### • Διασύνδεση E/E



“Μοντέλο καταχωρητών” του ελεγκτή E/E

Οι καταχωρητές βρίσκονται στον χώρο διευθύνσεων του συστήματος

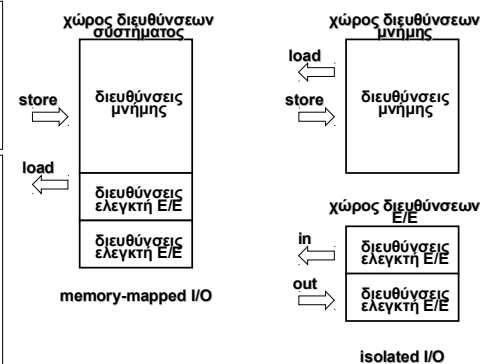
Η ΚΜΕ γράφει τις αιτήσεις E/E που πρόκειται να εκτελεστούν

Η ΚΜΕ γράφει ή διαβάζει δεδομένα προς/από τη συσκευή E/E

Η ΚΜΕ διαβάζει την κατάσταση της συσκευής E/E

## Χώροι διευθύνσεων για E/E

### • Διασύνδεση E/E

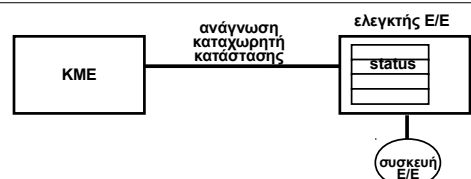


Memory-mapped I/O: ενιαίος χώρος και διαχείριση των διευθύνσεων συστήματος

Isolated I/O: εύκολος διαχωρισμός εντολών αν πρέπει E/E να γίνεται μόνο από το ΛΣ

## Ανίχνευση ολοκλήρωσης αίτησης E/E

- Διασύνδεση E/E
- Εξυπηρέτηση E/E από KME



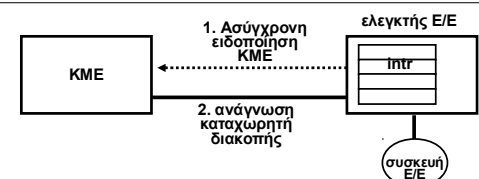
### • Περιοδική ανάγνωση καταχωρητή κατάστασης

- Ολοκληρώθηκε η τρέχουσα αίτηση;
- Εμφανίστηκε κάποια αλλαγή κατάστασης στη συσκευή E/E;
- Επαναληπτική διαδικασία polling
- Επιβάρυνση KME με άσκοπους κύκλους εκτέλεσης – για μεγάλο διάστημα η κατάσταση θα παραμένει σταθερή περιμένοντας τη συσκευή E/E

Το polling παρά την επιβάρυνση χρησιμοποιείται σε συστήματα ελέγχου, όπου ο έλεγχος πρέπει να γίνεται σε προκαθορισμένα διαστήματα

## Ανίχνευση ολοκλήρωσης αίτησης E/E

- Διασύνδεση E/E
- Εξυπηρέτηση E/E από KME



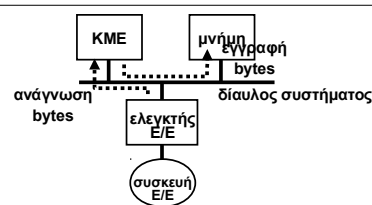
### • Ασύγχρονη ειδοποίηση KME (interrupts)

- Ο ελεγκτής ειδοποιεί την KME για αλλαγή κατάστασης της συσκευής E/E
- Στο μεταξύ η KME μπορεί να εκτελεί άλλη διεργασία
- Η διακοπή θα προκαλέσει την εκτέλεση ρουτίνας εξυπηρέτησης διακοπής (interrupt service routine – ISR)
- Ενδεχομένως η KME θα χρειαστεί πρόσθετη πληροφορία από ελεγκτή σχετικά με την αιτία της διακοπής

Παλαιότερα ο ελεγκτής ειδοποιούσε την KME με ξεχωριστό σήμα διακοπής. Σήμερα αυτό υλοποιείται με ανταλλαγή μηνυμάτων μέσω του διαύλου διασύνδεσης

## Μετακίνηση δεδομένων από/προς μνήμη

- Διασύνδεση E/E
- Εξυπηρέτηση E/E από KME

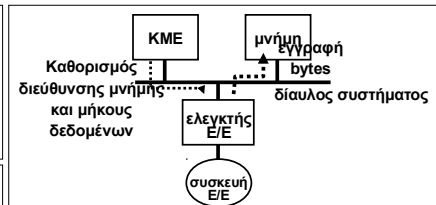


- Μετά από διακοπή ή polling
- Η KME επαναληπτικά διαβάζει δεδομένα από τον ελεγκτή E/E και τα γράφει στη μνήμη – και το αντίστροφο
- Σημαντική επιβάρυνση της KME όσο
  - το μέγεθος των δεδομένων κάθε αίτησης E/E αυξάνονται
  - ο ρυθμός ολοκλήρωσης αιτήσεων E/E αυξάνεται

Εάν η συσκευή E/E είναι κάρτα δικτύου 100Mbps Ethernet και δημιουργεί διακοπή για κάθε πακέτο με μέσο μήκος 256 bytes, πόσες φορές/sec θα ζητηθεί εξυπηρέτηση από την KME;

## Direct Memory Access (DMA)

- Διασύνδεση E/E
- Εξυπηρέτηση E/E από KME



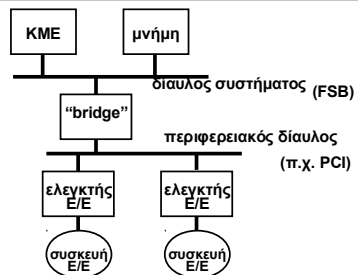
- Η KME απλά θέτει τις παραμέτρους της μεταφοράς
- Ο ελεγκτής διεκδικεί τον δίαυλο του συστήματος και μεταφέρει δεδομένα απευθείας προς/από τη μνήμη
  - Ή ξεχωριστός ελεγκτής DMA
  - Η KME μπορεί να εκτελεί άλλη διεργασία
  - Σύγκρουση στη μνήμη, αλλά η KME έχει και την κρυφή μνήμη!

Όταν το σύστημα χρησιμοποιεί εικονική μνήμη, θα πρέπει να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα ώστε κατά τη μεταφορά DMA τα δεδομένα να τοποθετηθούν στη σωστή φυσική διεύθυνση

## Η εμφάνιση του περιφερειακού διαύλου

- Διασύνδεση E/E
- Εξυπηρέτηση E/E από ΚΜΕ
- Δίαυλοι E/E

Εμφάνιση της ιεραρχίας διασυνδετικών διαύλων, με διαφορετικούς ρυθμούς μεταφοράς



- Οι συσκευές E/E (περιφερειακές συσκευές) συνδέονται σε περιφερειακό δίαυλο
- Η ΚΜΕ “βλέπει” μόνο μια “συσσκευή”: peripheral bus bridge
  - Μέσω της οποίας γίνεται η προσπέλαση των συσκευών E/E