

# ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΗΕ

## Ενότητα 10 Στατικοί ηλεκτρονόμοι



# Εισαγωγή

- Η βελτίωση του κόστους και της αξιοπιστίας των ηλεκτρονικών συσκευών προώθησαν τη κατασκευή συστημάτων προστασίας αντίστοιχης τεχνολογίας.
- Εξασφαλίζουν μεγάλη ταχύτητα και υψηλή ακρίβεια, στοιχεία που συμβαδίζουν με τη μεγάλη αύξηση του ποσού ισχύος που διαχειρίζονται τα ηλεκτρικά συστήματα.
- Ορισμός Διεθνούς Επιτροπής Ηλεκτροτεχνίας: «στατικός ηλεκτρονόμος είναι ο ηλεκτρονόμος που η σχεδιασμένη απόκρισή του επιτυγχάνεται με ηλεκτρονικές, μαγνητικές ή άλλες συσκευές χωρίς μηχανική κίνηση».
- Δηλαδή, ο όρος «στατικός» αναφέρεται στην απουσία κινούμενων μερών για τη δημιουργία της χαρακτηριστικής του ηλεκτρονόμου.
- Ουσιαστικά, ενσωματώνει εξαρτήματα στερεάς κατάστασης (π.χ. τρανζίστορ) για μέτρηση ή σύγκριση των δρόσων ποσοτήτων.
- Οι προδιαγραφές για τους στατικούς ηλεκτρονόμους είναι ίδιες με αυτές των ηλεκτρομηχανικών ηλεκτρονόμων.
- Συχνά τους αντικαθιστούν (συμβατότητα), έχοντας μία συσκευή ηλεκτρομηχανικής εξόδου.

- Αναμένεται το μέλλον των συστημάτων προστασίας να είναι ψηφιακό. Σε αυτά τα συστήματα τα σήματα των αναλογικών εισόδων μετατρέπονται σε ψηφιακά.
- Οι μετασχηματιστές τάσης και ρεύματος τους παρέχουν την απαραίτητη ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ του ηλεκτρικού συστήματος και του ηλεκτρονικού κυκλώματος.
- Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα απαρτίζονται από ξεχωριστές συνιστώσες τοποθετημένες σε τυπωμένες πλακέτες σε μορφή βησηματούμενη (plug-in).
- Έχουν βοηθητική τάση τροφοδοσίας μικρότερη των 40 V από μεγάλες μπαταρίες.
- Πραγματικά ολοκληρωμένες προτάσεις για την εφαρμογή της ψηφιακής προστασίας ξεκίνησαν με την εμφάνιση των μικροεπεξεργαστών.
- Οι πρόσφατες εξελίξεις στα ΣΗΕ με την αξιοποίηση ψηφιακών μετρήσεων φασικών γωνιών απομακρυσμένων μεταβλητών ενισχύουν το ψηφιακό μέλλον των συστημάτων προστασίας.

- Η ψηφιακή μορφή των σημάτων επιτρέπει την τηλερύθμισή, την τηλεμέτρηση και τον τηλέλεγχο τους.
- Τους κάνουν όμως επιρρεπείς σε προβλήματα της σύγχρονης ψηφιακής εποχής, όπως τις κυβερνοεπιθέσεις.
- Συγκρινόμενοι με τους ηλεκτρομηχανικούς :
  - ◆ έχουν βελτιωμένη ευαισθησία,
  - ◆ ταχύτερη λειτουργία (πιο «στενή» συνεργασία),
  - ◆ μεγαλύτερη επαναληπτικότητα,
  - ◆ απαιτούν μικρότερη συντήρηση,
  - ◆ έχουν χαμηλότερη επιβάρυνση σε VA (δρώσες ποσότητες από M/Σ χωρίς πυρήνα),
  - ◆ έχουν μικρότερο μέγεθος,
  - ◆ αλλά είναι περισσότερο ευαίσθητοι στη θερμοκρασία και EMI.

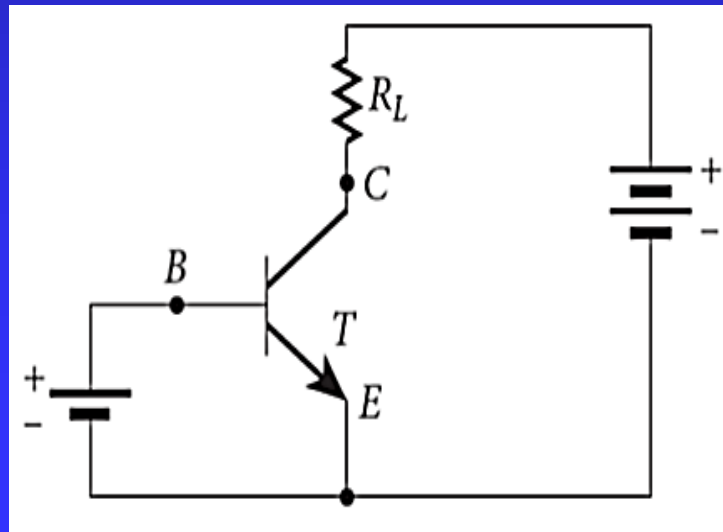


# Σχεδιασμός στατικών ηλεκτρονόμενων και χρήση τους στη προστασία ΣΗΕ

- Ο σχεδιασμός τους βασίζεται στη χρήση αναλογικών ηλεκτρονικών συσκευών, αντί για πηνία και μαγνήτες, για τη δημιουργία της χαρακτηριστικής λειτουργίας τους.
- Μπορούν να παρέχουν τα ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας με τους ηλεκτρομηχανικούς ηλεκτρονόμους τύπου υπερέντασης, κατεύθυνσης, απόστασης και διαφορικής προστασίας.
- Οι βασικές αρχές σχεδίασης των συστημάτων προστασίας είναι ίδιες και ανεξάρτητες από το είδος των ηλεκτρονόμενων.
- Εξαιρούνται ειδικές εφαρμογές:
  - ◆ όταν χρειαζόμαστε μεγαλύτερη αναισθησία σε EMI ή ανοχή σε θερμοκρασιακές μεταβολές, όπου πλεονεκτούν οι ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι,
  - ◆ όταν χρειαζόμαστε μικρότερο χρόνο επαναφοράς, οπότε πλεονεκτούν οι αναλογικοί ηλεκτρονόμοι (βλ. παρακάτω).<sup>5</sup>

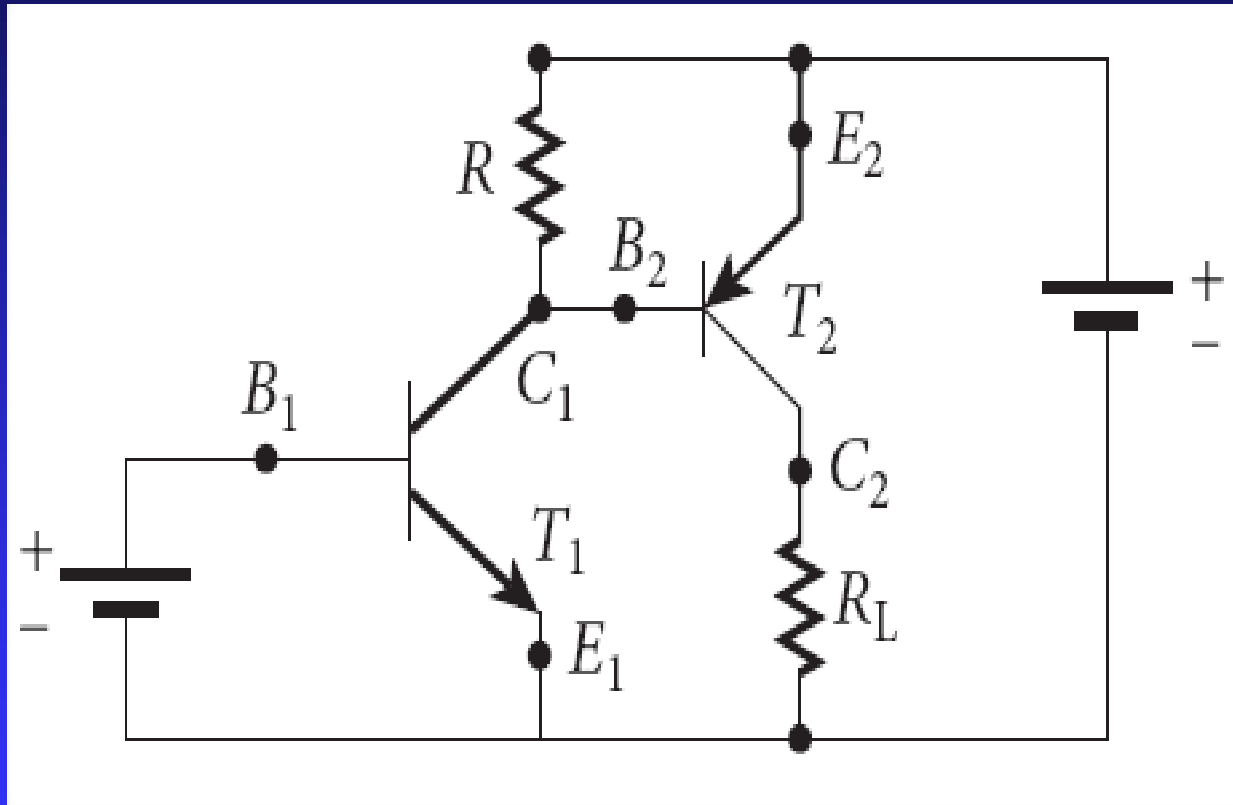
# Αξιοποίηση του τρανζίστορ – αναλογικοί ηλεκτρονόμοι

- Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του τρανζίστορ βοηθούν πάρα πολύ στην πραγματοποίηση των χαρακτηριστικών λειτουργίας που έχουν τα συστήματα προστασίας.
- Στο τρανζίστορ έχουμε λειτουργία όταν κάποια τάση ξεπεράσει κάποια τιμή, όπως οι ηλεκτρομαγνητικοί ηλεκτρονόμοι κλείνουν τις επαφές τους όταν η μετρούμενη τάση ξεπεράσει το επίπεδο επιλογής τους.



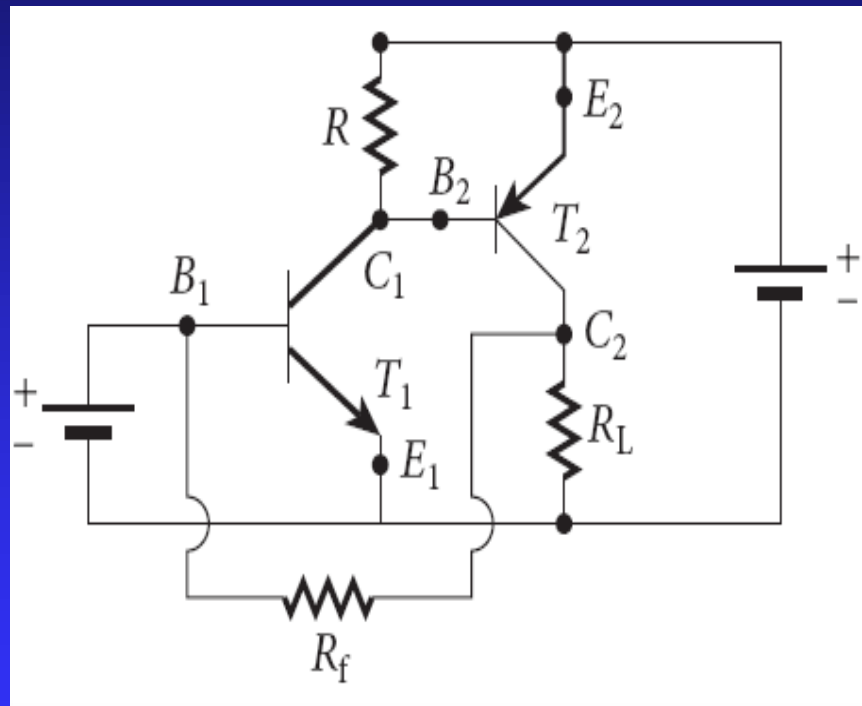
Κύκλωμα ηλεκτρονόμου με τρανζίστορ n-p-n.

Πιο ευαίσθητοι ηλεκτρονόμοι με τρανζίστορ επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας πρόσθετες ενισχυτικές βαθμίδες.



*Ηλεκτρονόμος με τρανζίστορ και ενισχυτική βαθμίδα.*

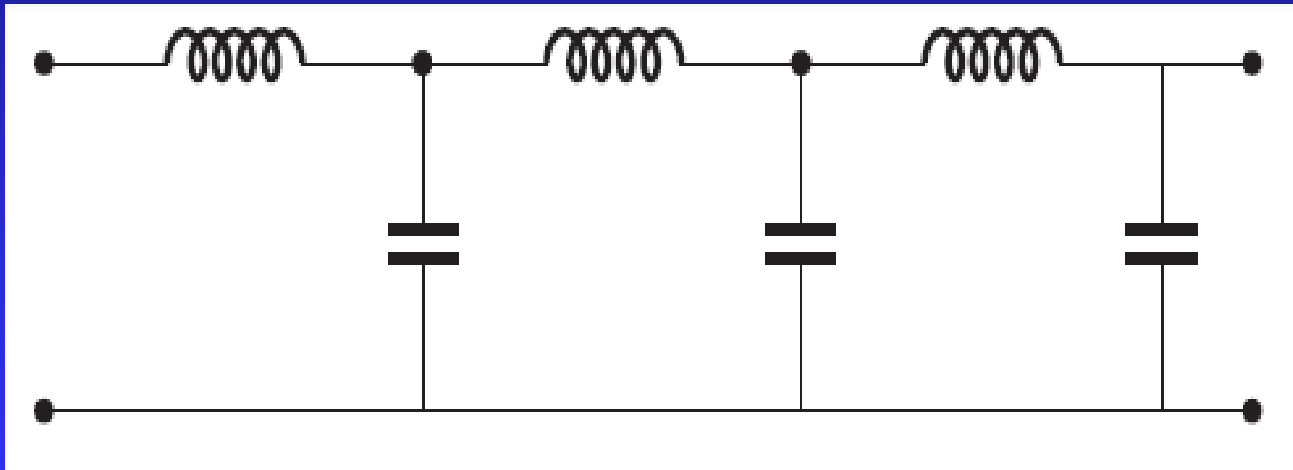
- Στους ηλεκτρομαγνητικούς ηλεκτρονόμους αυξάνουμε τη ταχύτητα των επαφών, αυξάνοντας τη σκληρότητα του ελατηρίου ελέγχου τους.
- Στους αναλογικούς ηλεκτρονόμους χρησιμοποιούμε θετική ανατροφοδότηση.



*Προσθήκη θετικής ανατροφοδότησης  
στον αναλογικό ηλεκτρονόμο.*



- Παρακάτω δείχνεται ένα κύκλωμα χρονικής καθυστέρησης (LC) της τάξης των μικροδευτερολέπτων ( $\mu\text{s}$ ).
- Για χρονική καθυστέρηση στη περιοχή των ms χρησιμοποιούμε αντίστοιχα κυκλώματα συντονισμού CL.
- Για ακόμα μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση χρησιμοποιούμε κυκλώματα RC.

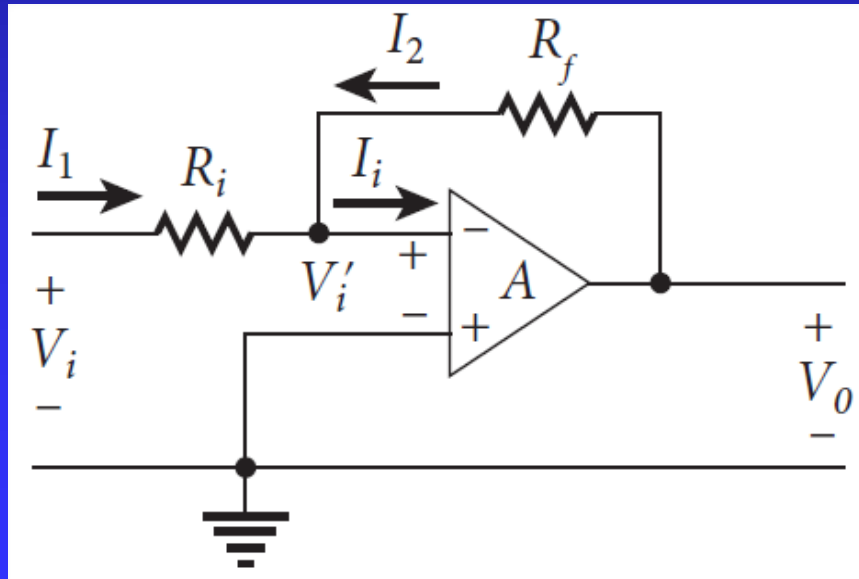


*Κύκλωμα για χρονική καθυστέρηση.*

# Τελεστικοί ενισχυτές

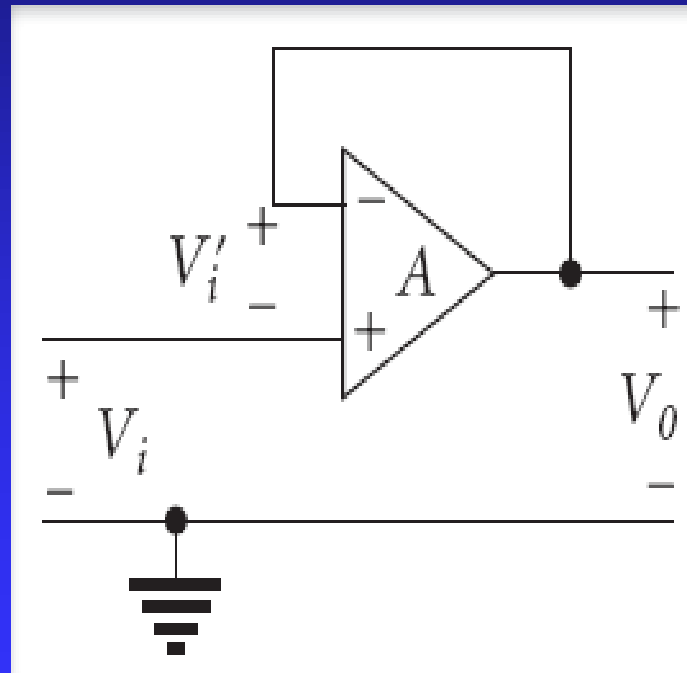
- Συχνά στους αναλογικούς στατικούς ηλεκτρονόμους χρησιμοποιείται ο τελεστικός ενισχυτής (Op Amp).
- Είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα με 20 ή περισσότερα τρανζίστορ: παρέχει ένα ευσταθές κέρδος της τάξεως  $10^4$  ή μεγαλύτερο σε χαμηλές συχνότητες.

Το ενεργό κέρδος του είναι:  $A' = \frac{V_0}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i}$



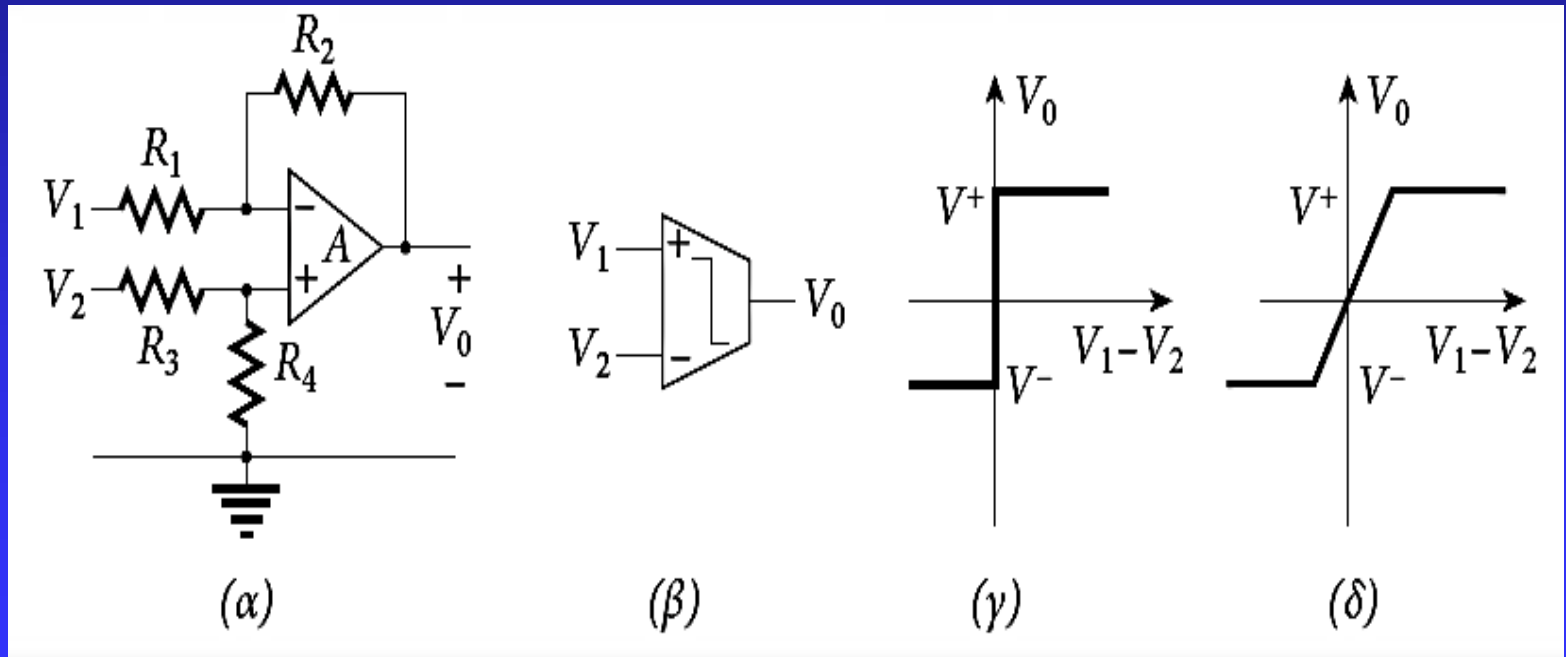
*Ο τελεστικός ενισχυτής.*

- Ο τελεστικός ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως **Απομονωτής** (isolator) :  
οι διαταραχές ενός κυκλώματος δεν επηρεάζουν πολύ το άλλο.
- Η εξίσωση που τον περιγράφει είναι:  $V_o = V_i$



*Ο τελεστικός ενισχυτής ως απομονωτής.*

- **Συγκριτής ή ανιχνευτής επιπέδου (comparator/level detector):**  
Η μία τάση εισόδου συγκρίνεται με την άλλη (αναφορά).
- Όταν είναι μεγαλύτερη, η τάση εξόδου παίρνει μία σταθερή, θετική τιμή.
- Όταν είναι μικρότερη, η τάση εξόδου παίρνει μια σταθερή, αρνητική τιμή.

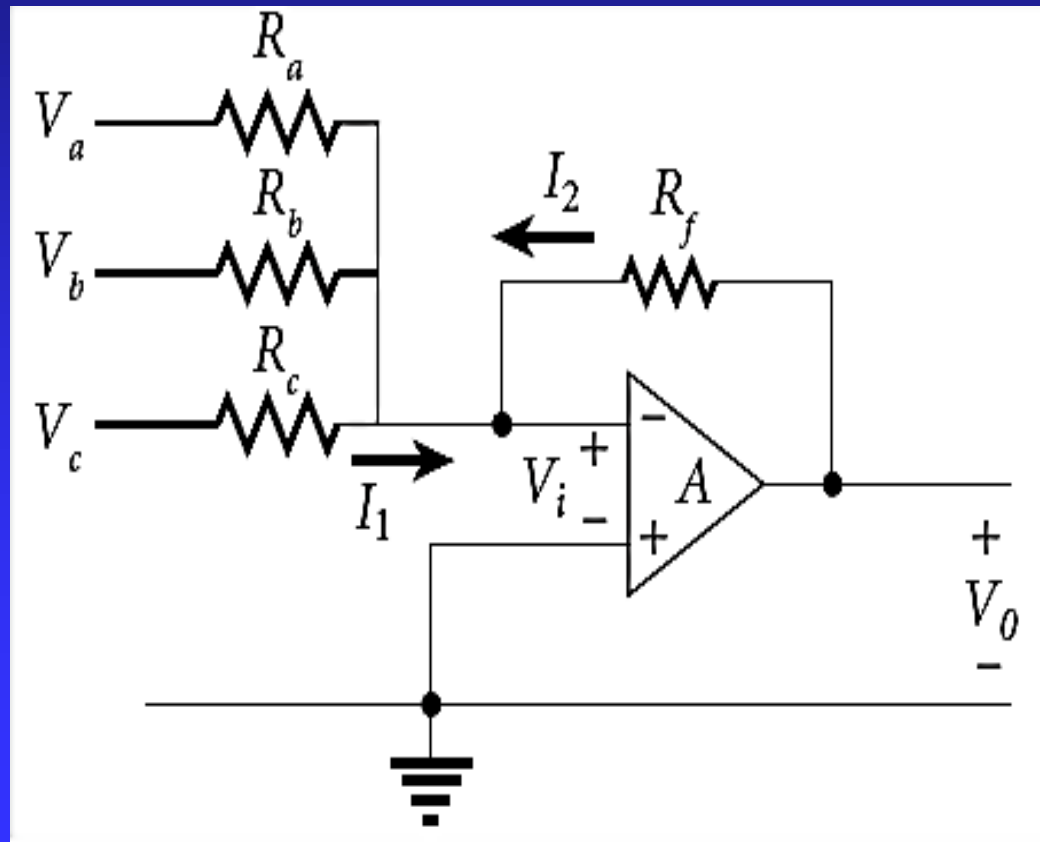


α) Το κύκλωμά του. β) Η συμβολική παράστασή του. γ) Ιδανικά χαρακτηριστικά. δ) Πραγματικά χαρακτηριστικά.

- **Άθροιστής** : η τάση εξόδου προκύπτει ως το σταθμισμένο άθροισμα των τάσεων εισόδου.

Η εξίσωση που τον περιγράφει είναι:

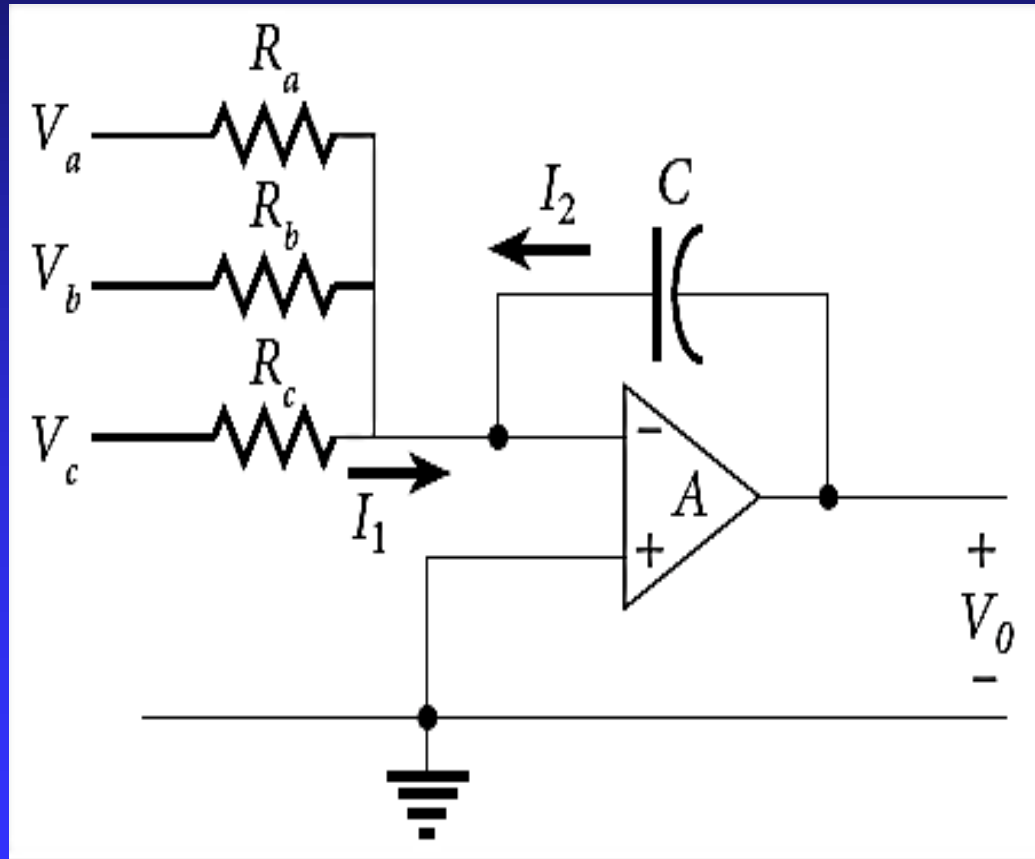
$$V_0 = -R_f \left( \frac{V_a}{R_a} + \frac{V_b}{R_b} + \frac{V_c}{R_c} \right)$$



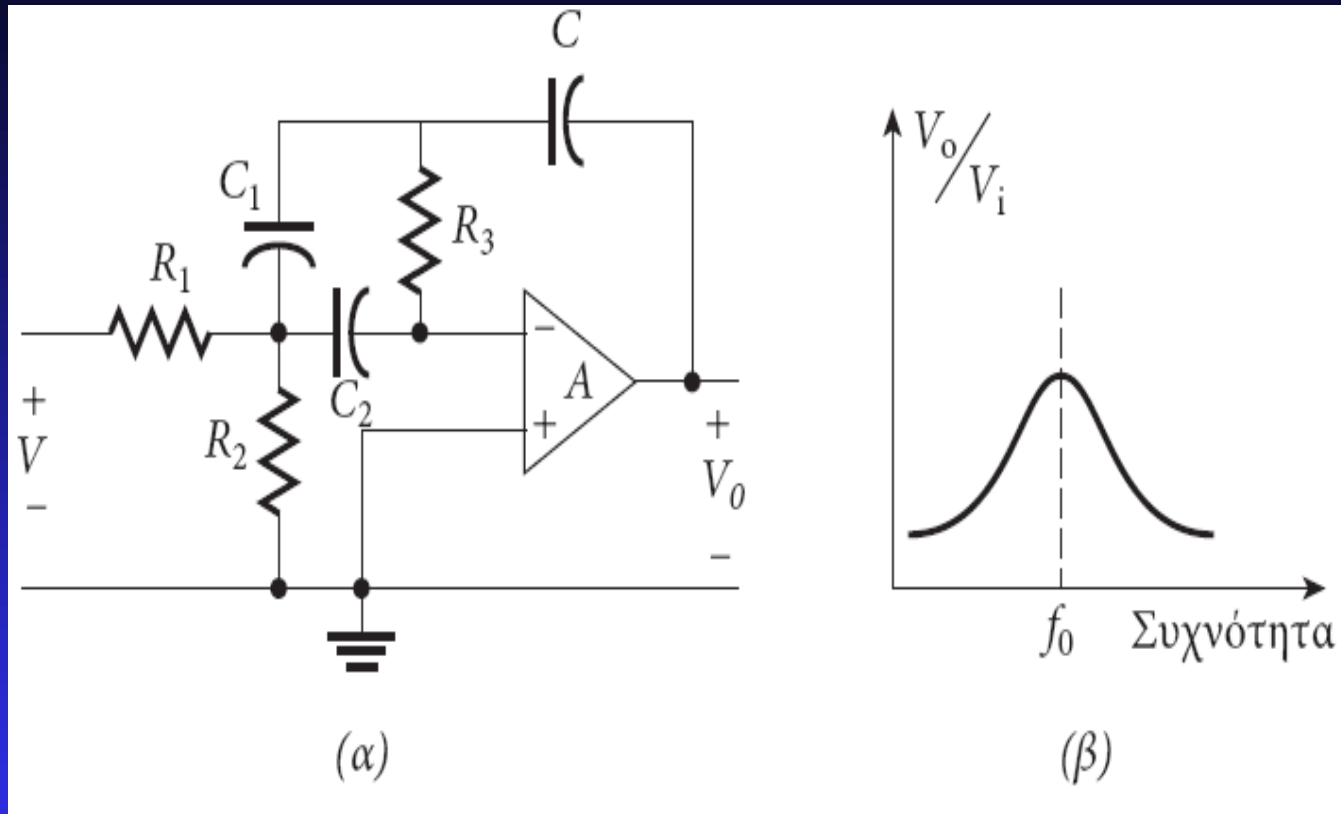


## Ολοκληρωτής (integrator):

$$V_o = -\frac{1}{C} \int_0^t \left( \frac{V_a}{R_a} + \frac{V_b}{R_b} + \frac{V_c}{R_c} \right) dt$$



## Ενεργό φίλτρο (active filter)

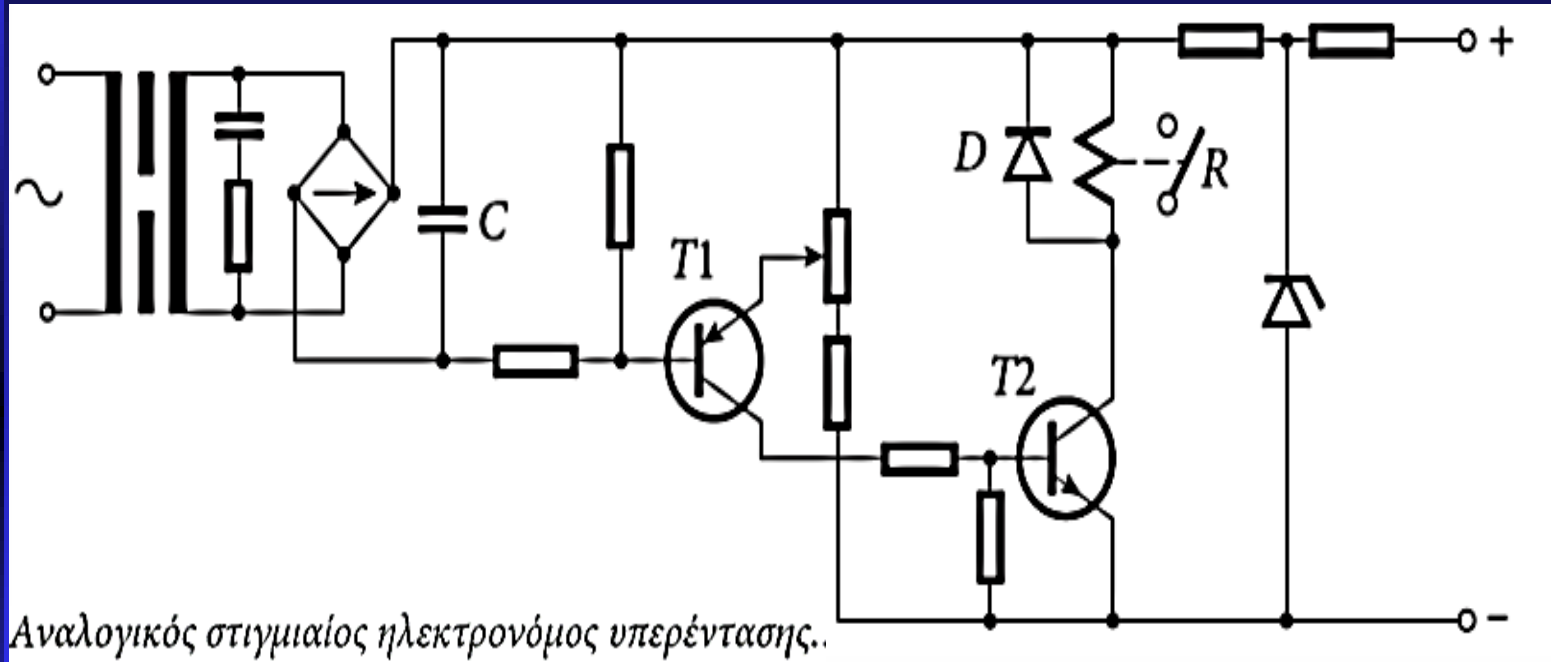


*Το ενεργό φίλτρο. α) Κύκλωμα. β) Απόκριση.*

Με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του μπορούμε να πάρουμε μεγάλες τιμές  $Q$  (δηλαδή στενή «ζώνη»), ρυθμιζόμενο κέρδος και συχνότητα συντονισμού.

# Στιγμιαίοι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης ή υπέρτασης (instantaneous overcurrent or overvoltage relay)

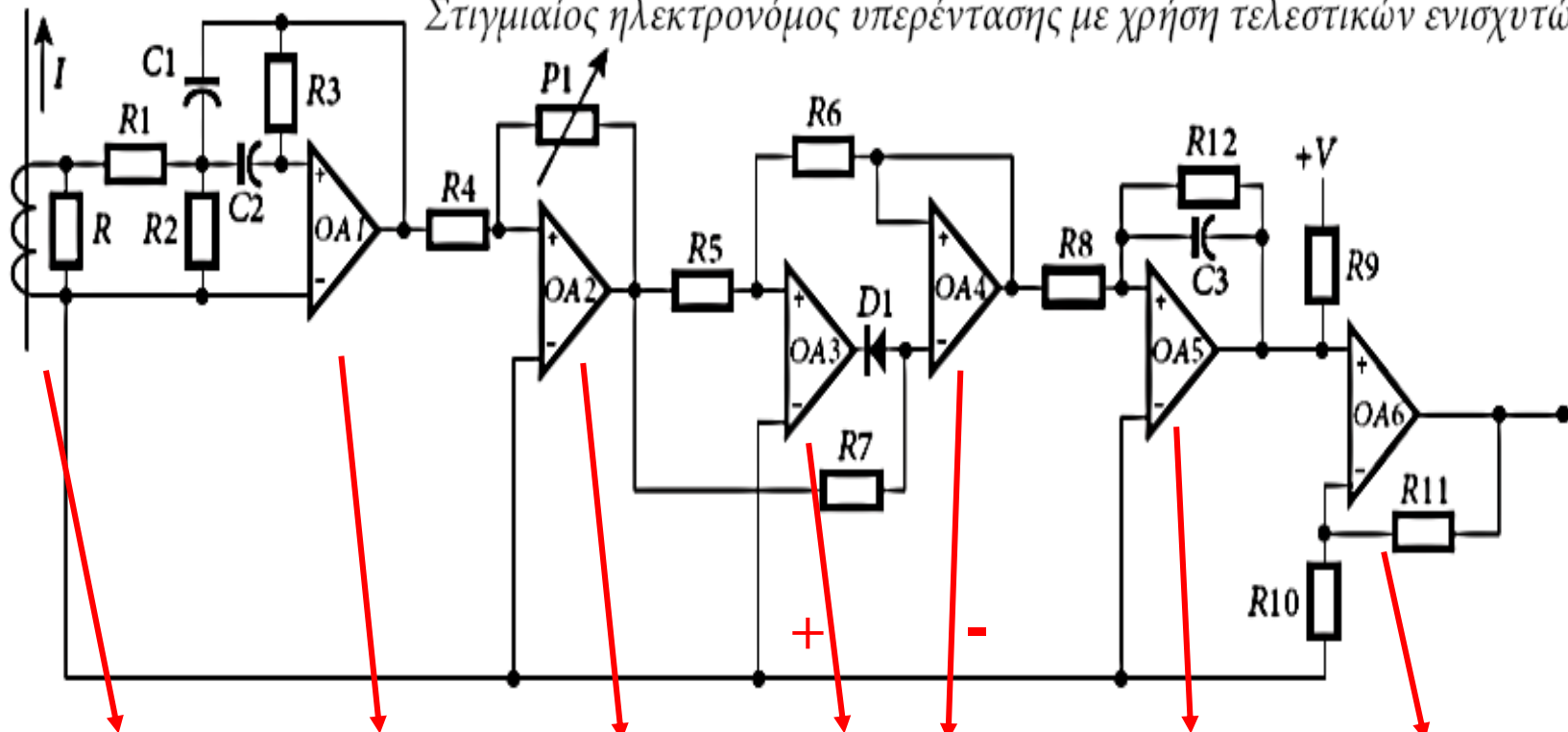
- Σε αυτούς τους ηλεκτρονόμους ρυθμίζουμε μόνο την αναφορά ρεύματος ή τάσης, που ονομάζεται **επίπεδο επιλογής** (pick-up level).



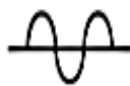
- Το ρεύμα μετατρέπεται με Μ/Σ διακένου αέρα σε τάση,
- αυτή σταθεροποιείται (για υψηλές  $f$ ), ανορθώνεται, εξομαλύνεται και
- συγκρίνεται με μια τάση αναφοράς στο τρανζίστορ  $T1$ .
- Όταν την υπερβαίνει, το  $T1$  ενεργοποιεί το τρανζίστορ  $T2$  και αυτό ενεργοποιεί τον  $R$ .

Σημείωση: η διάδος  $D$  λειτουργεί ως ελεύθερης διέλευσης, δηλαδή βοηθά στην εκφόρτιση της ενέργειας του πηνίου κατά την επαναφορά του  $R$ .

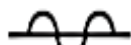
Στιγμιαίος ηλεκτρονόμος υπερέντασης με χρήση τελεστικών ενισχυτών.



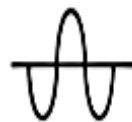
Ημιτονοειδής  
κυματομορφή



Φιλτραρισμένη  
κυματομορφή



Ενισχυμένη  
κυματομορφή



Ανορθωμένη  
κυματομορφή



Ολοκλήρωμα της  
ανορθωμένης  
κυματομορφής  
για συγκεκριμένο



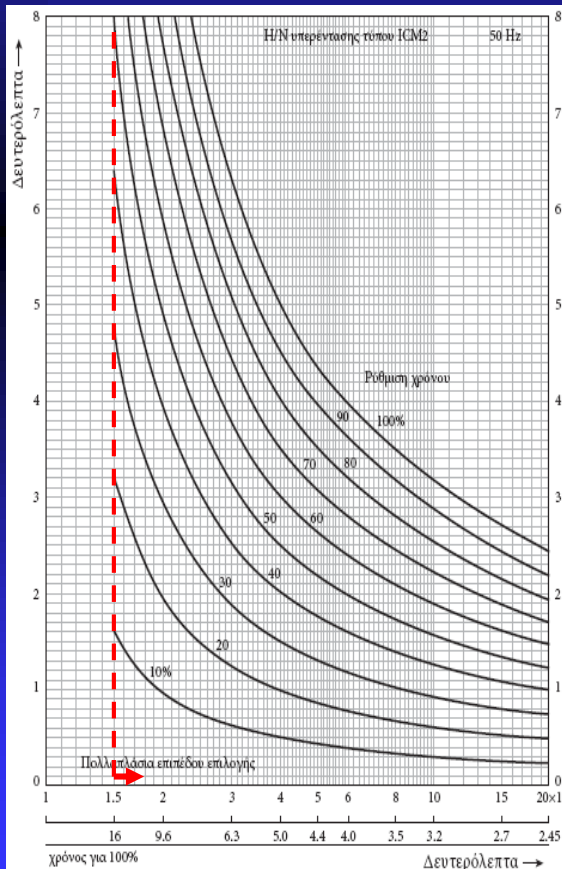
χρονικό διάστημα

Λογική έξοδος  
(0 ή 1)



# Ηλεκτρονόμοι υπέρεντασης με χρονική καθυστέρηση και αντίστροφου χρόνου χαρακτηριστικά

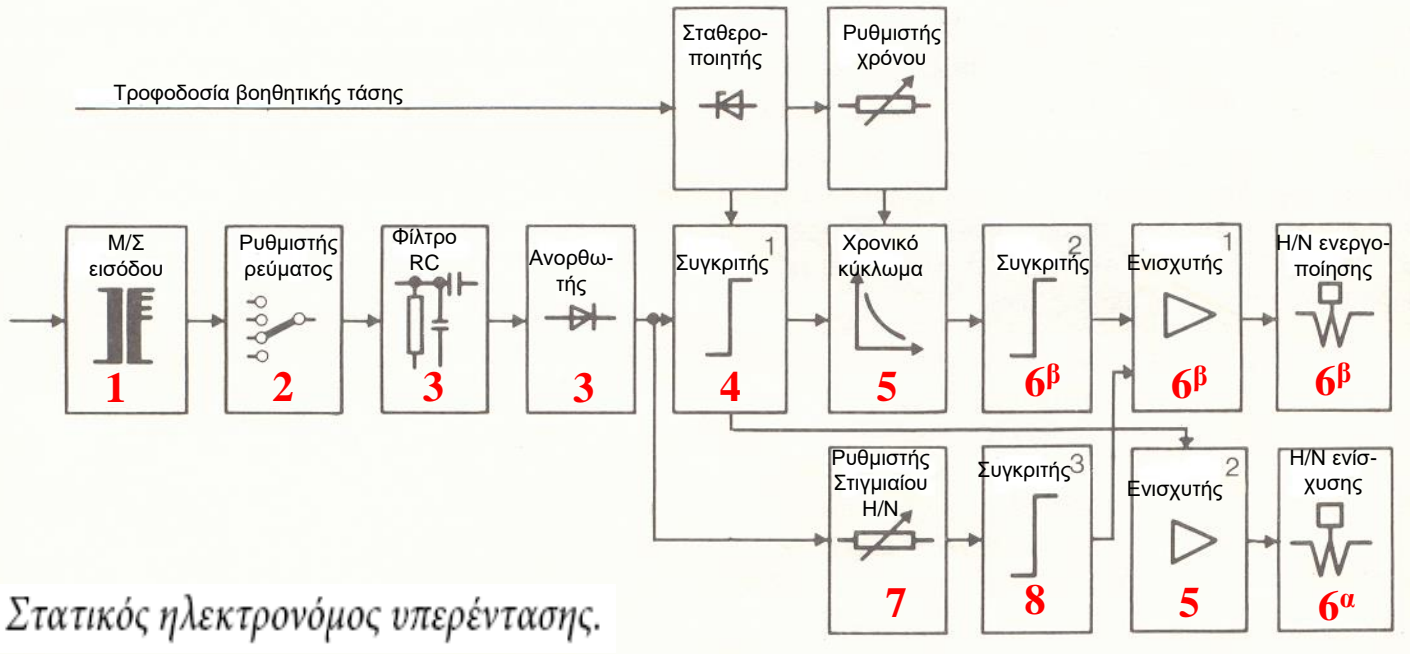
- Σε αυτούς τους ηλεκτρονόμους ρυθμίζουμε το επίπεδο επιλογής (pick-up level) και το χρόνο λειτουργίας (operating time).
- Για κάθε υποδιαίρεση του ρυθμιστή χρόνου παίρνουμε μία καμπύλη.



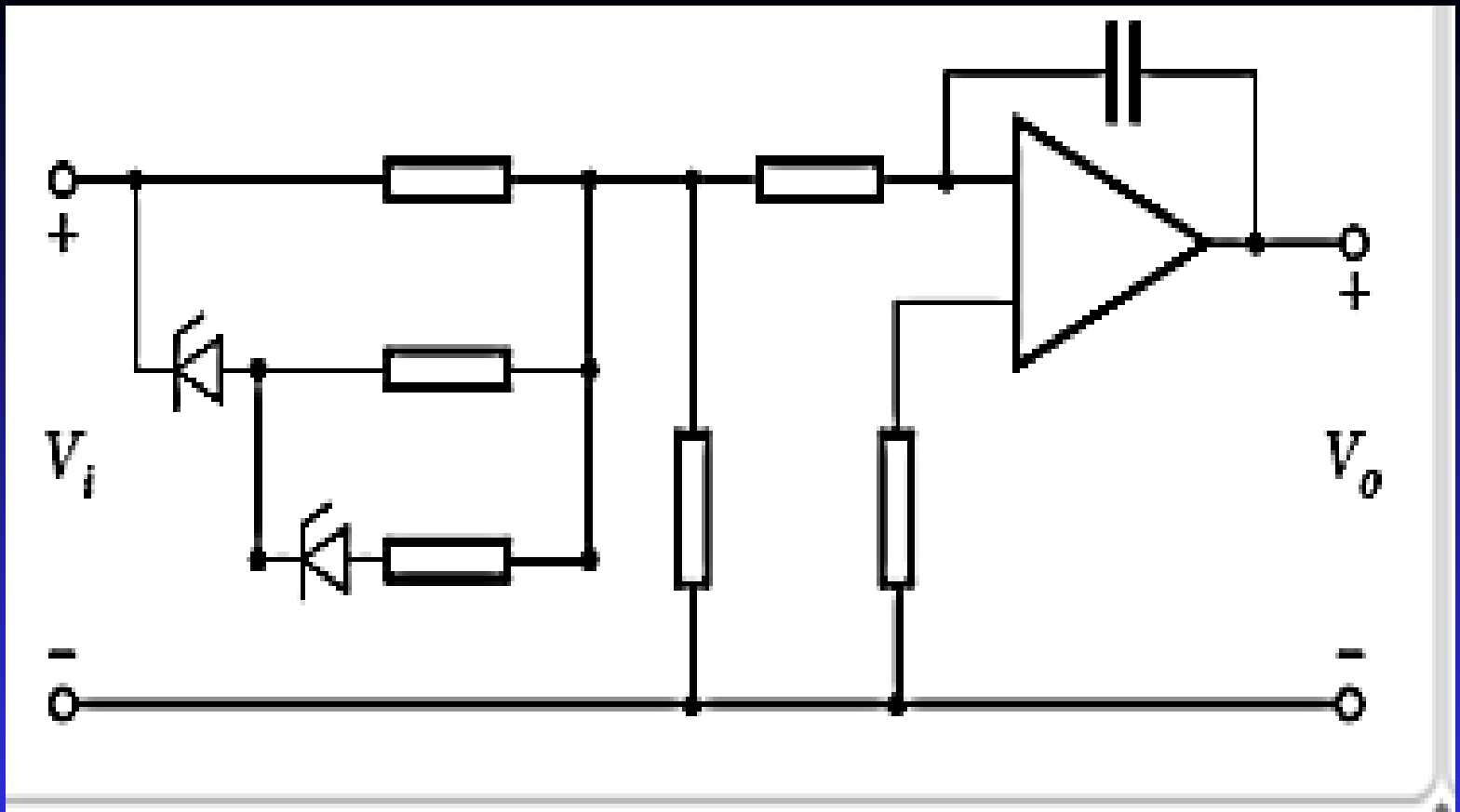
Καμπύλες αντίστροφου χρόνου.

- Οι καμπύλες εκφράζονται συναρτήσει πολλαπλασίων ρευμάτων του επίπεδου επιλογής.
- Έτσι ισχύουν και για διαφορετικά επίπεδα επιλογής.
- Η ελάχιστη τιμή του ρεύματος ενεργοποίησης για αξιόπιστη λειτουργία είναι τουλάχιστον 1.5 φορές το επίπεδο επιλογής.





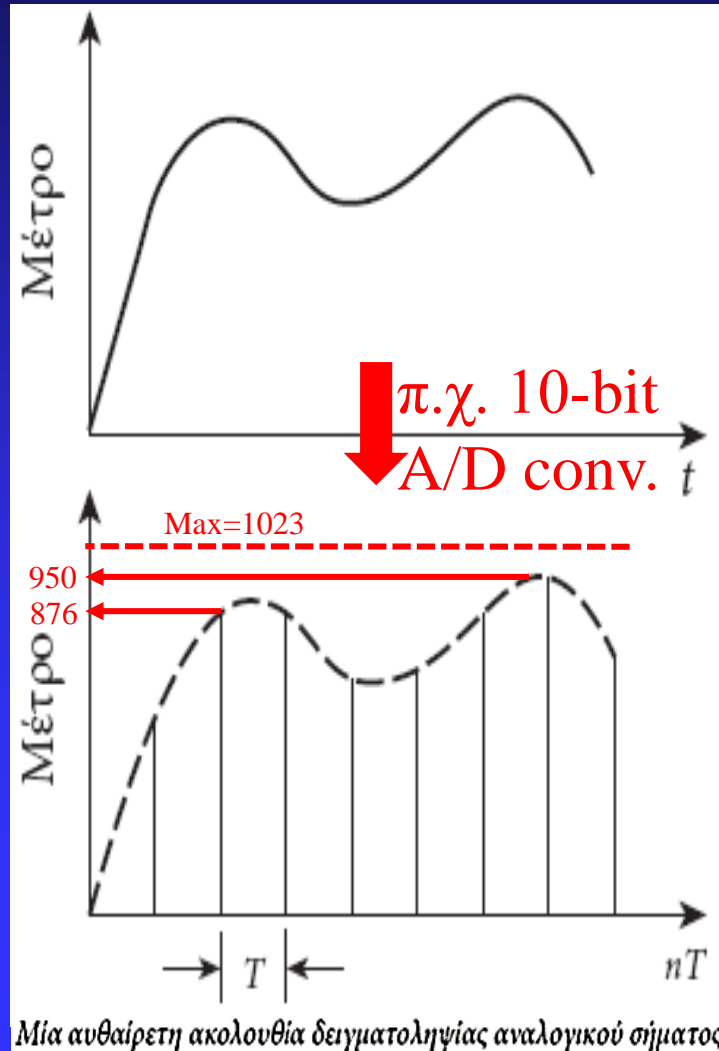
1. Το επίπεδο επιλογής ρυθμίζεται με μεταβλητές λήψεις στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.
2. Μια ωμική αντίσταση χρησιμοποιείται για να μετατρέπει το μετρούμενο ρεύμα σε τάση.
3. Αυτή τροφοδοτείται «καθαρή» σε ένα ανορθωτή μέσω ενός RC φίλτρου.
4. Η ανορθωμένη τάση εξομαλύνεται και συγκρίνεται με μια τάση αναφοράς στον συγκριτή 1.
5. Όταν η μετρούμενη τάση υπερβαίνει την τάση αναφοράς ενεργοποιείται το χρονικό κύκλωμα και ο ενισχυτής 2
- 6<sup>α</sup>. Ο ενισχυτής 2 διεγείρει τον ηλεκτρονόμο ενίσχυσης, που δέχεται μέρος του ρεύματος ενεργοποίησης για να μην υπερφορτίζονται οι επαφές του ηλεκτρονόμου.
- 6<sup>β</sup>. Μετά από κάποιο χρόνο, που καθορίζεται από το επίπεδο επιλογής που επιλέξαμε και το μετρούμενο ρεύμα, ο ηλεκτρομαγνητικός ηλεκτρονόμος ενεργοποίησης διεγείρεται μέσω του συγκριτή 2 και του ενισχυτή 1.
7. Η τάση εξόδου του ανορθωτή τροφοδοτείται επίσης μέσω ενός ποτενσιόμετρου στο συγκριτή 3.
8. Όταν το μετρούμενο ρεύμα είναι πολύ μεγάλο και ξεπεράσει κάποια τιμή που έχουμε ορίσει, ο συγκριτής 3 ενεργοποιεί μέσω του ενισχυτή 1 άμεσα τον ηλεκτρονόμο ενεργοποίησης.
- 7+8: Με αυτήν τη λειτουργία παρακάμπτεται το χρονικό κύκλωμα και έχουμε στιγμιαία λειτουργία. 19



- Το χρονικό κύκλωμα είναι ένα κύκλωμα ολοκληρωτή.
- Σημεία κατάρρευσης (διαφορετικές ταχύτητες φόρτισης) στη κανονική καμπύλη φόρτισης του πυκνωτή δημιουργούνται συνδέοντας παράλληλες αντιστάσεις μέσω διόδων Zener.
- Δηλαδή, όταν η τάση κατάρρευσης της Zener ενός κλάδου ξεπερνιέται, τότε αυτός συνεισφέρει στη ταχύτερη φόρτιση.

# Ψηφιακοί στατικοί ηλεκτρονόμοι

- Σε αυτούς οι αναλογικές μεταβλητές στην είσοδο ψηφιοποιούνται με τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (analog-to-digital converter, A/D).



- Η λογική ενεργοποίησης του ψηφιακού ηλεκτρονόμου είναι το πρόγραμμα που εκτελείται στον κεντρικό επεξεργαστή.
- Αυτό εξομοιώνει την επιθυμητή συνάρτηση προστασίας για την ενεργοποίηση ή όχι του διακόπτη ισχύος που ελέγχει.
- Η ψηφιακή προστασία είναι προγραμματιζόμενη και αυτοελεγχόμενη για να εξομοιώνει τις επιθυμητές συναρτήσεις προστασίας (ουσιαστικά «χαρακτηριστικές λειτουργίας»).
- Επίσης, αποθηκεύει πληροφορίες για τα συμβάντα, για να διευκολυνθεί αργότερα ο μηχανικός στην ανάλυση τους.
- Η πέμπτη γενιά των συστημάτων προστασίας ενσωματώνει το σύστημα προστασίας, τον εξοπλισμό μετρήσεων, τον έλεγχο και τις επικοινωνίες ενός ολόκληρου υποσταθμού σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα.
- Εκεί, κατανεμημένοι επεξεργαστές έχουν συγκεκριμένες αποστολές προστασίας με κεντρικό έλεγχο και επιτήρηση.
- Υπάρχει επίσης η προοπτική η προστασία να γίνει **προσαρμοστική** στις συνθήκες λειτουργίας του ΣΗΕ.
- Δηλαδή να αλλάζει ρυθμίσεις ανάλογα με το φορτίο, την ένταξη μονάδων ή την τρέχουσα τοπολογία δικτύου.