

# ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

ΕΝΟΤΗΤΑ 2<sup>Η</sup>

ΜΕΡΟΣ Γ΄

Σφάλματα μέτρησης

# Όργανα ηλεκτρικών μετρήσεων

## Βασικές κατηγορίες

1. Συνεχούς τάσης/ρεύματος (Direct Current, **DC**)
2. Εναλλασσόμενου τάσης/ρεύματος (Alternating Current, **AC**)
3. Συνεχούς και εναλλασσόμενου

# Συνηθισμένα όργανα και όργανα ακριβείας για DC και χαμηλής συχνότητας τάση

- Ψηφιακά πολύμετρα (DMM, Digital Multi – Meter)
- Νανοβολτόμετρα
- Ηλεκτρόμετρα
- Πικοαμπερόμετρα
- SMU (Source Mesuring Units)

## Σφάλματα Μέτρησης (Measurement Errors)

1. Σφάλμα φόρτισης (Load error)	Σφάλματα μέτρησης τάσης
2. Σφάλμα ρεύματος πόλωσης (Bias current error)	
3. Σφάλμα τάσης φορτίου (Burden voltage error)	Σφάλμα μέτρησης ρεύματος

# Σφάλμα φόρτισης

Αφορά σφάλμα κατά τη χρήση βολτομέτρου για τη μέτρηση τάσης

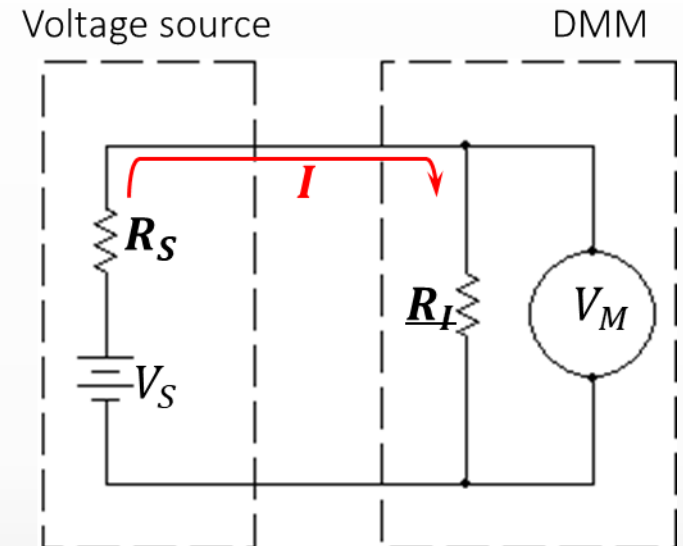
- Θεωρητικά,  $R_I = \infty \Rightarrow I = 0$   
 $\Rightarrow V_M = V_S$
- Στην πράξη,  $R_I$  πεπερασμένη  $\Rightarrow I \neq 0$

$$\Rightarrow V_M = V_S \frac{R_I}{R_I + R_S} \quad \color{red}{\vdots\vdots\vdots} (\neq V_S)$$

- Σφάλμα (error)  $V_{error} = |V_M - V_S|$

- Σχετικό (ή %) σφάλμα  $E\% = \left| \frac{V_M - V_S}{V_S} \right| \times 100$

$$\Rightarrow E\% = \frac{R_S}{R_I + R_S} \times 100$$



*Παρατήρηση:*  $R_I \gg R_S \Rightarrow E\% \cong 0$

# Παράδειγμα

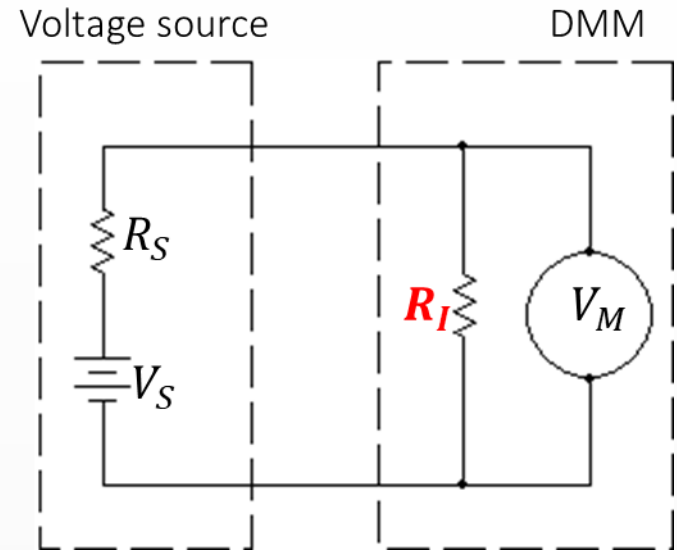
Για πηγή τάσης με  $R_S = 9\text{ k}\Omega$

A. Σφάλμα φόρτισης για  $R_I = 10\text{ M}\Omega$

$$E\% \cong 0.089\% = 890\text{ ppm}$$

B. Σφάλμα φόρτισης για  $R_I = 10\text{ G}\Omega$ )

$$E\% \cong 0.000089\% = 0.89\text{ ppm}$$



# Παράδειγμα: Μέτρηση τάσης από πηγή τάσης μεγάλης εσωτερικής αντιστάσης

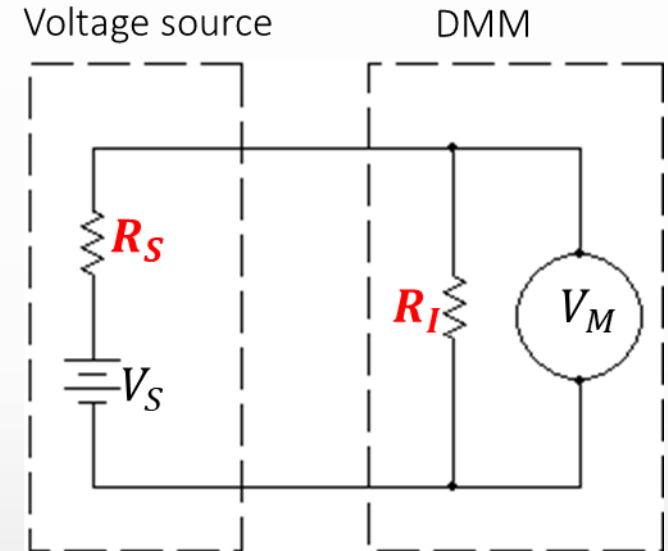
Υποθέτουμε  $R_S = 100\text{ k}\Omega$  και  $R_I = 10\text{ M}\Omega$

$$\begin{aligned} E\% &= \frac{R_S}{R_I + R_S} \times 100 \\ &= \frac{100\text{k}}{10\text{M} + 100\text{k}} \times 100 \\ E\% &= 0.99\% \cong 1\% \end{aligned}$$

Για  $V_S = 5\text{ V}$

$$V_M = V_S \frac{R_I}{R_I + R_S} = (5\text{ V}) \frac{10^7}{10^7 + 10^5}$$

$$V_M = 4.95\text{ V}$$



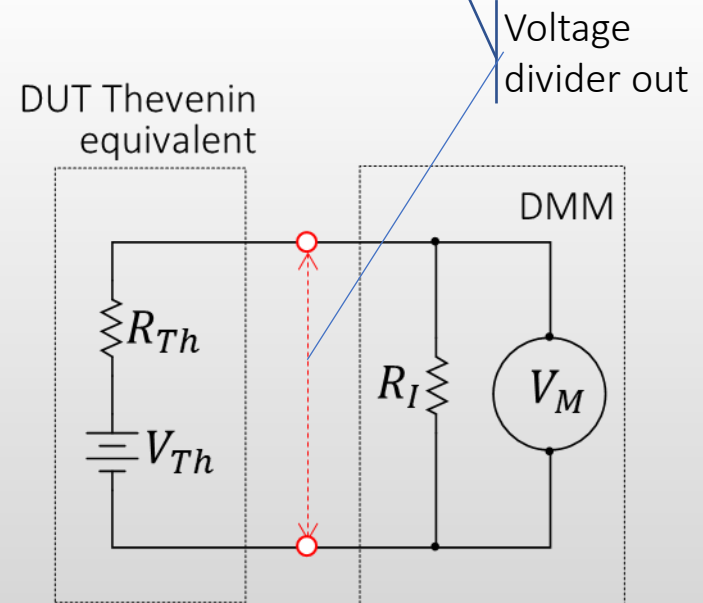
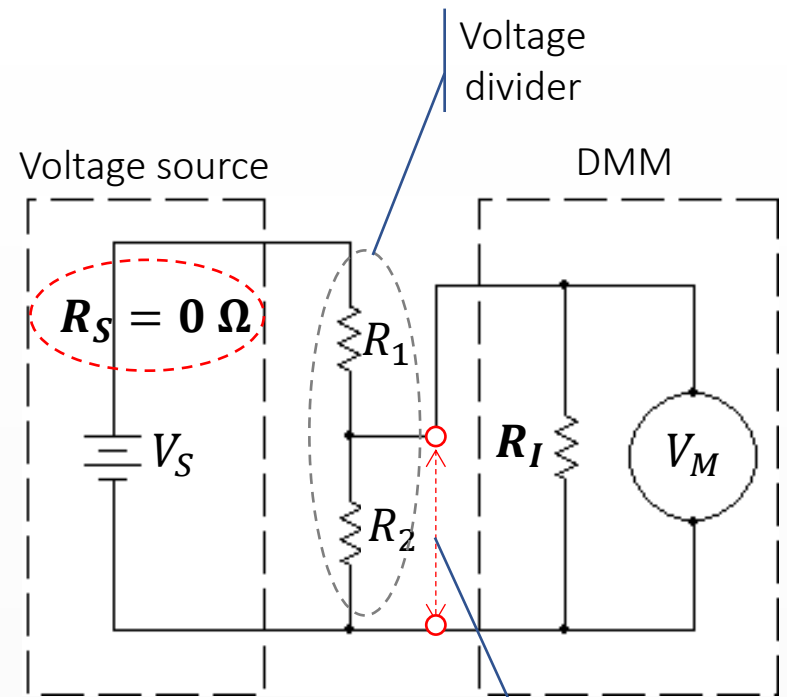
# Παράδειγμα

- Υποθέτουμε πηγή τάσης σχεδόν μηδενικής εσωτερικής αντίστασης ( $R_S \cong 0 \Omega$ )
- Μέτρηση εξόδου ( $V_{R_2}$ ) διαιρέτη τάσης με βολτόμετρο με  $R_I = 10 M\Omega$

DUT = πηγή τάσης + διαιρέτης

Υπολογίζουμε την ισοδύναμη αντίσταση Thevenin

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$





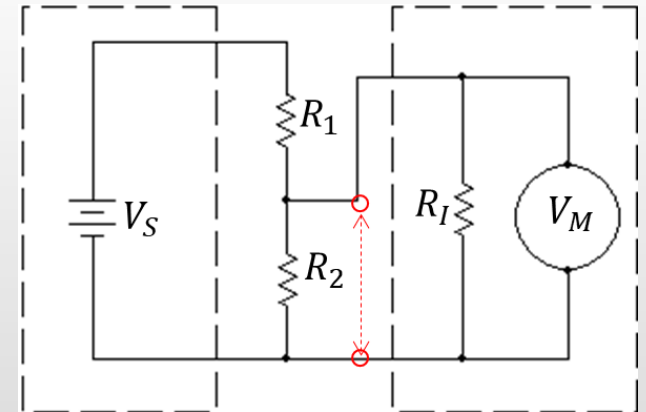
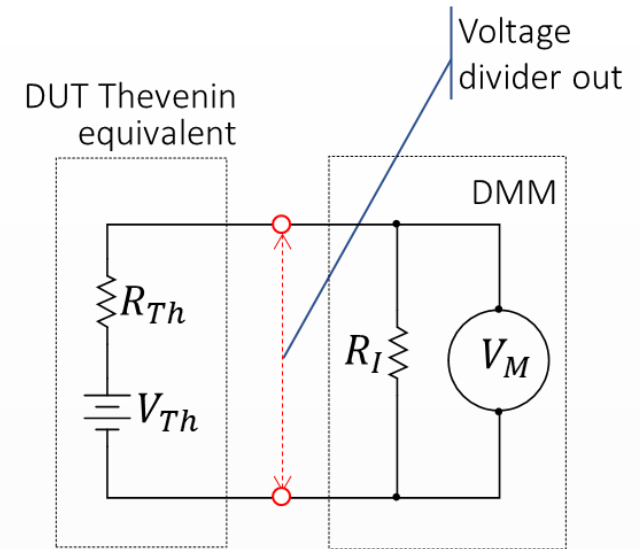
$$E\% = \frac{R_{Th}}{R_I + R_{Th}} \times 100$$

Εφαρμογή:  $R_1 = 90k\Omega$ ,  $R_2 = 10k\Omega$  και  
 $R_I = 10M\Omega$

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(90k)(10k)}{(90k) + (10k)} = 9k\Omega$$

$$E\% = \frac{9k}{10M + 9k} \times 100 = 0.089\%$$

$$E\% = 0.089\% \text{ ή } 890\text{ppm}$$

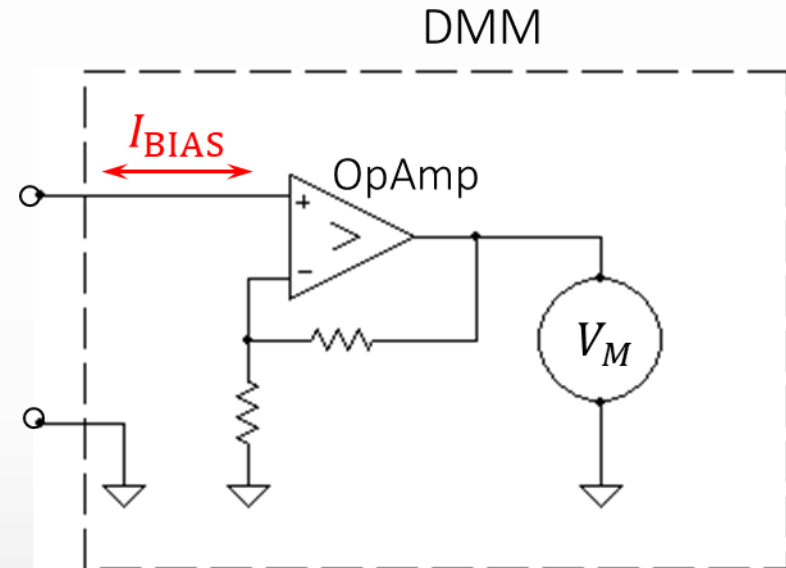


# Σφάλμα ρεύματος πόλωσης

Αφορά σφάλμα κατά τη χρήση βολτομέτρου για τη μέτρηση τάσης

## Ρεύμα πόλωσης (bias current)

- Είναι μικρά ρεύματα ( $I_{BIAS}$ ) που ρέουν μέσα από τους ακροδέκτες εισόδου στα περισσότερα μοντέρνα DMM.
- Οφείλονται σε ατέλεια του τελεστικού ενισχυτή (OpAmp) στην είσοδο του DMM
- Για ιδανικό (τέλειο) OpAmp,  
 $I_{BIAS} = 0$



## Σχετικά με το ρεύμα πόλωσης σε όργανα μέτρησης τάσης

- Είναι πολύ μικρό, συνεπώς, μπορεί να επηρεάσει μετρήσεις που απαιτείται υψηλή ακρίβεια.
- Μπορεί να εξαλειφθεί μετρώντας το ίδιο κύκλωμα με ανάστροφη πολικότητα.
- DMM και νανοβολτόμετρα έχουν ρεύματα πόλωσης από 1pA έως 1nA
- Τα ρεύματα πόλωσης δεν καθορίζονται πάντα για τα DMM.
- Τα ηλεκτρομέτρα είναι γνωστά για το χαμηλό ρεύμα εισόδου τους, συνήθως μερικά femtoamps.
- Τα picoammeters και τα όργανα SMU (Source Measuring Units) έχουν επίσης πολύ χαμηλά ρεύματα εισόδων, αν και συνήθως όχι τόσο χαμηλά όσο ένα ηλεκτρόμετρο.

# Σχετικό σφάλμα μέτρησης τάσης λόγω ρεύματος πόλωσης

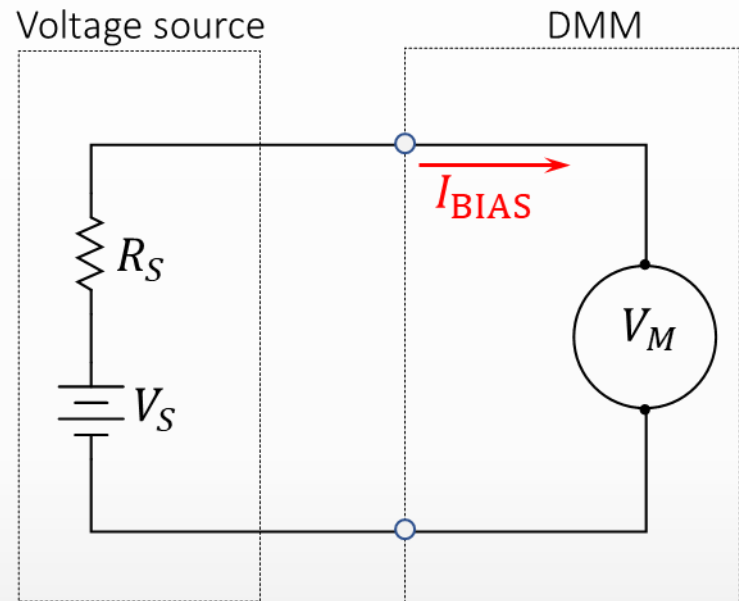
- $V_S$  η τάση προς μέτρηση
- $V_M$  η ένδειξη του βολτομέτρου

$$V_M = V_S - I_{BIAS}R_S$$

$$I_{BIAS} = \frac{|V_M - V_S|}{R_S} = \frac{V_{Error}}{R_S}$$

- Σφάλμα  $V_{Error} = I_{BIAS} \cdot R_S$

- Σχετικό σφάλμα  $E\% = \left| \frac{V_M - V_S}{V_S} \right| \times 100 = \frac{I_{BIAS}R_S}{V_S} \times 100$



## Παράδειγμα

Έστω οι κάτωθι παράμετροι:

$$I_{\text{BIAS}} = 1\text{pA}, R_S = 10\text{G}\Omega \text{ και } V_S = 10\text{V}$$

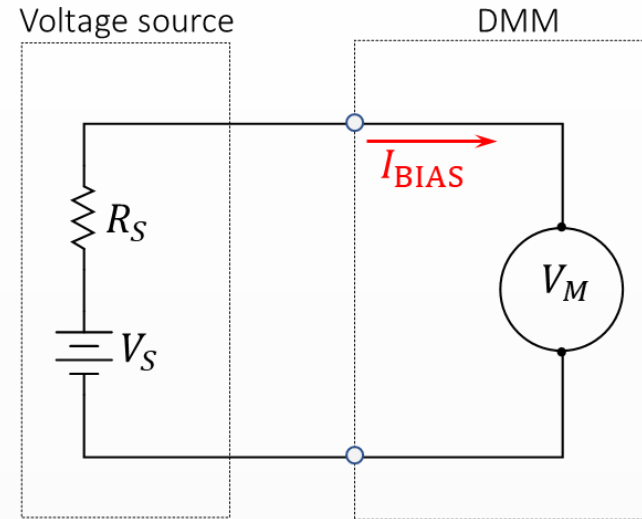
Η πραγματική τάση που μετριέται από το βολτόμετρο είναι

$$\begin{aligned} V_M &= V_S - I_{\text{BIAS}}R_S \\ &= 10 \pm (10^{-12} \cdot 10^{10}) \\ &= 10 \pm 0.01 \text{ V} \end{aligned}$$

$$V_M = 9.99\text{V} \text{ ή } V_M = 10.01\text{V} \text{ (εξαρτάται από τη φορά του } I_{\text{BIAS}})$$

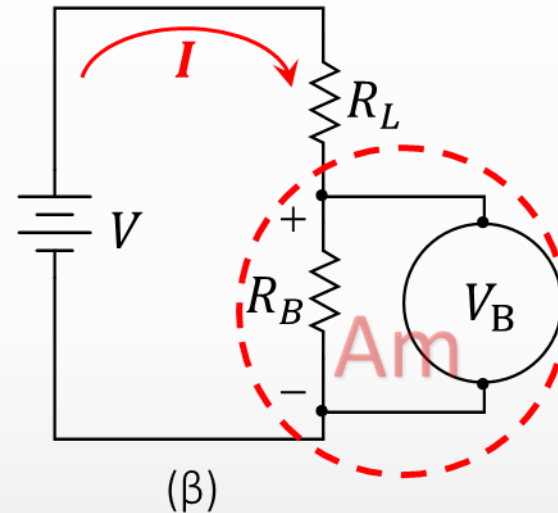
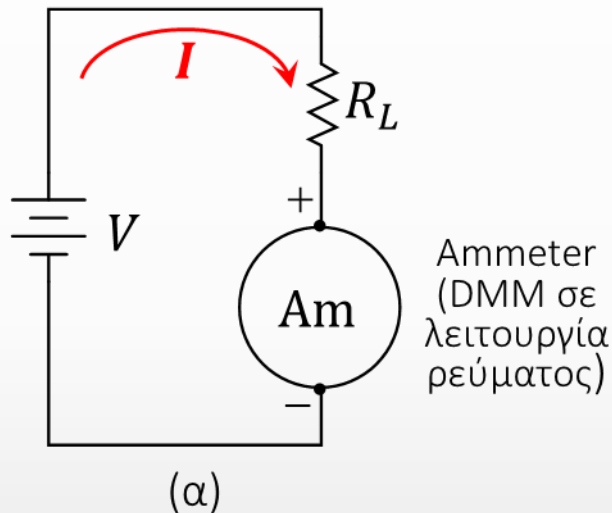
$$\text{Σχετικό σφάλμα} \quad E\% = \frac{I_{\text{BIAS}}R_S}{V_S} \times 100$$

$$E\% = 0.1\%$$



# Μέτρηση ρεύματος

- Για τη μέτρηση του ρεύματος  $I$  σε ένα κλάδο, ένα αμπερόμετρο (DMM σε λειτουργία ρεύματος) συνδέεται σε σειρά στον κλάδο (Εικ. (α)).



- Η μέτρηση  $I$  συνήθως πραγματοποιείται σαν λειτουργία τάσης πάνω σε μια γνωστή αντίσταση ακριβείας (Burden,  $R_B$ )
- Η τιμή του ρεύματος υπολογίζεται μετρώντας την πτώση τάσης στα άκρα αυτής της αντίστασης (burden voltage,  $V_B$ )

# Σφάλμα τάσης φορτίου

Αφορά σφάλμα κατά τη χρήση αμπερομέτρου για μέτρηση ρεύματος

- Τάση φορτίου (burden voltage) είναι η πτώση τάσης που προκαλείται από το ρεύμα που ρέει μέσω μιας συσκευής μέτρησης ρεύματος (Am).

## Παράδειγμα

Πηγή 1.5 V με φορτίο 5 Ω, Εικ. (α). Για τη μέτρηση του ρεύματος στο κύκλωμα, ένα αμπερόμετρο συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα. Σε αυτό το σχήμα, το αμπερόμετρο έχει τάση φορτίου 0.5 V.

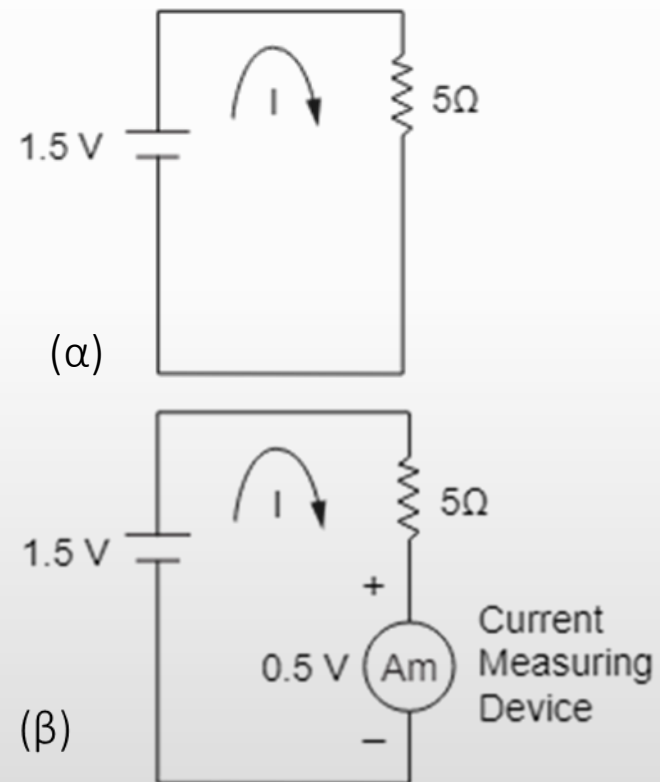
Χωρίς τάση φορτίου (Εικ. α), το ρεύμα είναι:

$$I = \frac{1.5 \text{ V}}{5 \Omega} = 0.3 \text{ A}$$

Με τάση φορτίου (Εικ. β), το ρεύμα γίνεται:

$$I_M = \frac{1.5 \text{ V} - 0.5 \text{ V}}{5 \Omega} = 0.2 \text{ A}$$

Σφάλμα (error) 0.1 A



<https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pxie-4081/page/burden-voltage.html>

# Σφάλμα τάσης φορτίου

Αφορά σφάλμα κατά τη χρήση αμπερομέτρου για μέτρηση ρεύματος

- Ιδανικό αμπερόμετρο,  $R_B = 0$ , Εικ. (α)

$$I = \frac{V}{R_L}$$

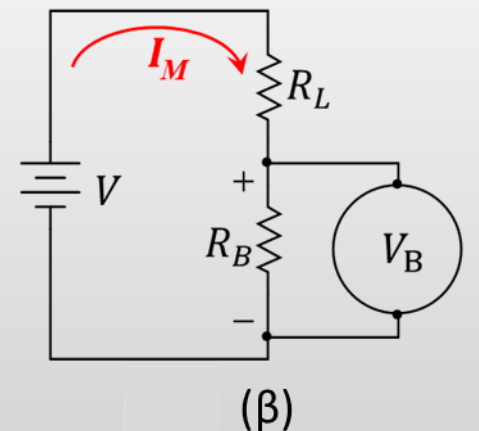
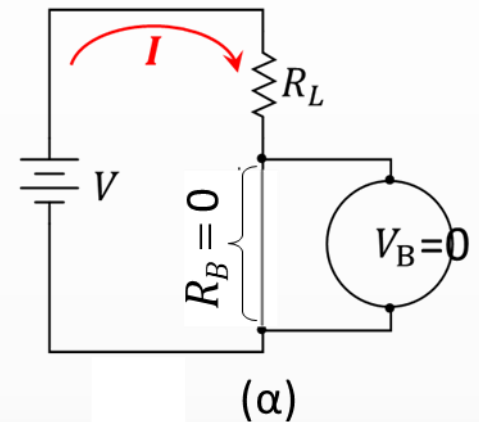
- Πραγματικό αμπερόμετρο,  $R_B \neq 0$ , Εικ. (β)

$$I_M = \frac{V - V_B}{R_L}$$

- Σφάλμα (Burden voltage error):  $I_{Error} = |I_M - I|$

$$I_{Error} = I_M \left| \left( 1 - \frac{I}{I_M} \right) \right|$$

$$I_{Error} = I_M \frac{V_B}{V - V_B}$$





## Εφαρμογή

$V = 15V$ ,  $V_B = 0.4V$  και  $I_M = 1460mA$ .

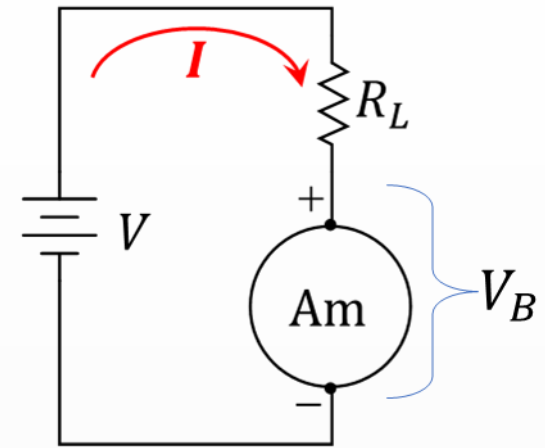
Εκτίμηση απόλυτου και σχετικού σφάλματος.

Απόλυτο σφάλμα  $I_{Error} = I_M \times \frac{V_B}{V - V_B}$

$$= 1460mA \times \frac{0.4}{15 - 0.4} = 40mA$$

Σχετικό (%) σφάλμα  $E\% = \left| \frac{I_{Error}}{I_M} \right| \times 100$

$$= \frac{40mA}{1460mA} \times 100 = 2.7\%$$



## Τάση φορτίου (Burden voltage, $V_B$ ) - Πως αποφεύγεται;

- Μεγάλη τάση φορτίου μπορεί να επηρεάσει το κύκλωμα που μετράται, καταστρέφοντας τη μέτρηση.
- Πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν χαμηλότερη.
- Είναι προτιμότερο, αντί για παρεμβολή αμπερομέτρου, να χρησιμοποιούμε μέτρηση τάσης στα άκρα μιας γνωστής αντίστασης

