

# 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)

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

# Σφάλματα μέτρησης τάσης: Σφάλμα φόρτισης

- Στη θεωρία ( $R_I = \infty \Rightarrow I = 0$ )

$$V_M = V_S$$

- Στην πράξη ( $R_I$  πεπερασμένη  $\Rightarrow I \neq 0$ )

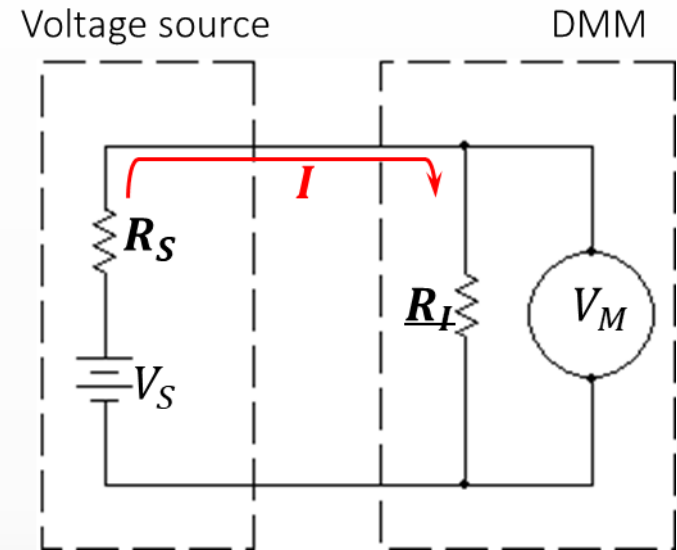
$$V_M = V_S \frac{R_I}{R_I + R_S} (\neq V_S)$$

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

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

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

Για  $R_I \gg R_S \Rightarrow E\% \cong 0$



# Παράδειγμα 1

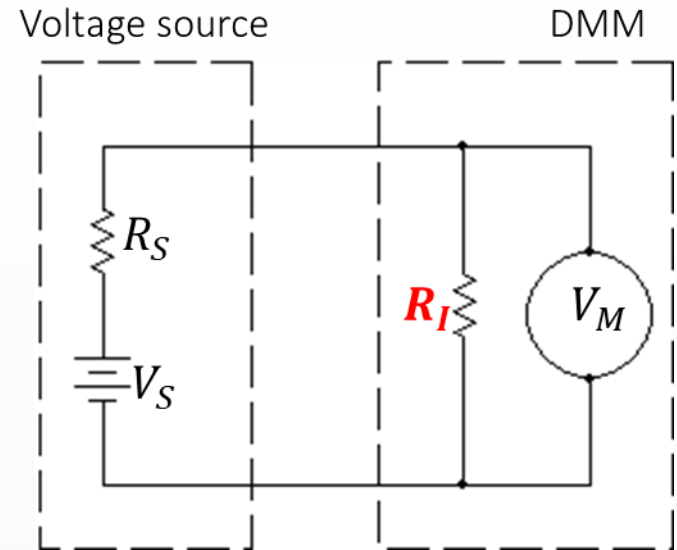
Για πηγή τάσης  $R_S = 9\text{ k}\Omega$

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

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

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

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



## Παράδειγμα 2 : Μέτρηση τάσης από πηγή τάσης μεγάλης εσωτερικής αντιστάσης

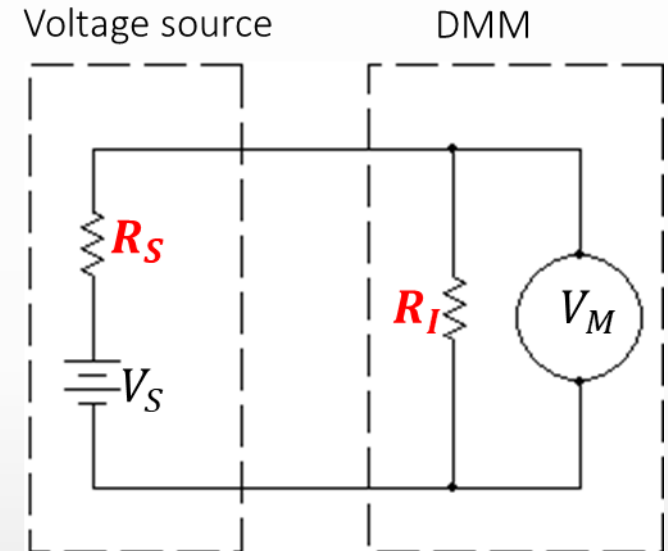
Υποθέτουμε  $R_S = 100\text{ k}\Omega$  και  $R_I = 10\text{ M}\Omega$

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

Για  $V_S = 5\text{ V}$

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

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



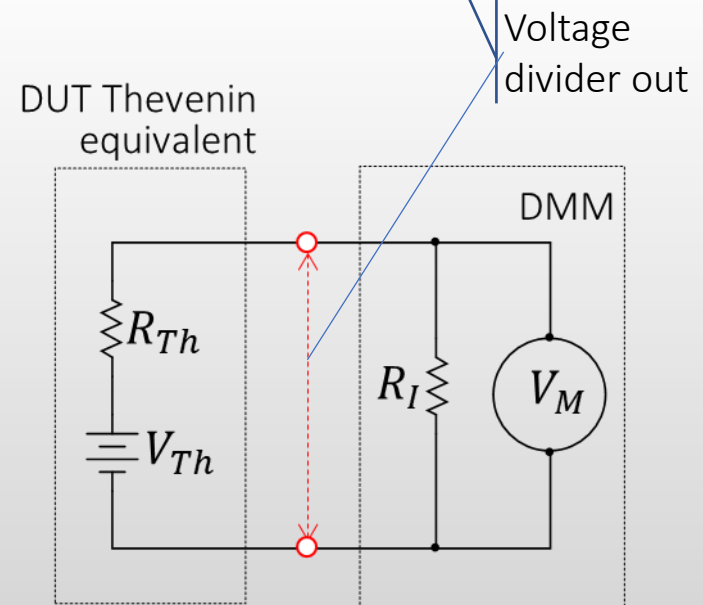
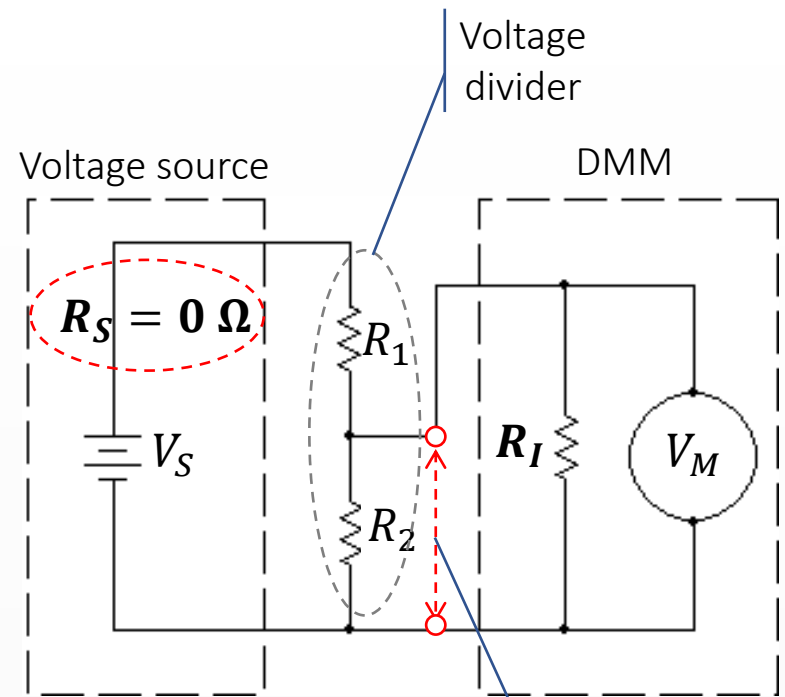
## Παράδειγμα 3

- 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

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





## Παράδειγμα 3 (συνέχεια)

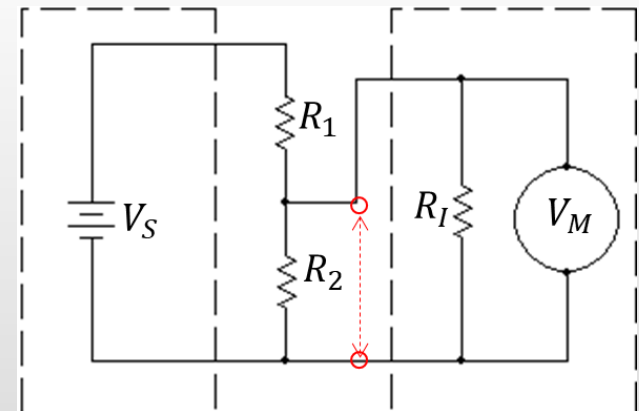
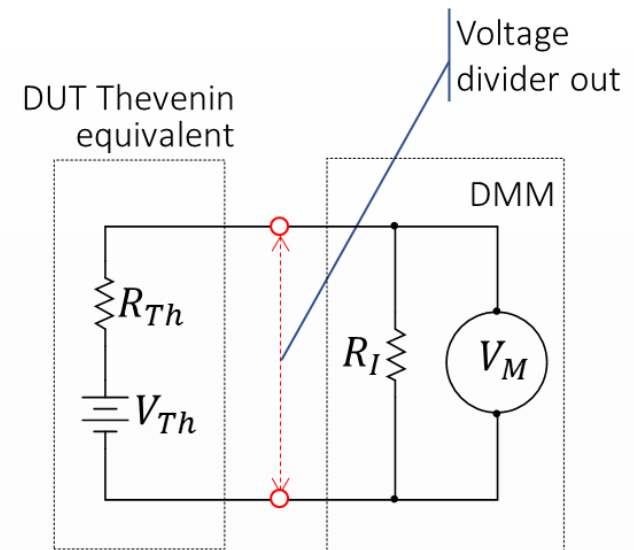
$$E\% = \frac{R_{Th}}{R_I + R_{Th}} \times 100$$

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

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

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

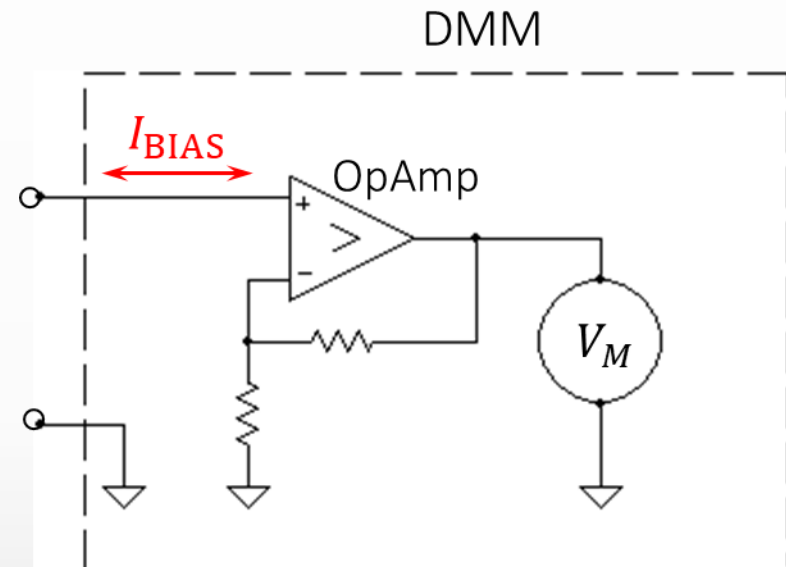
$$E\% = 0.089\% \text{ ή } 890\text{ppm}$$



# Σφάλματα μέτρησης τάσης: Σφάλμα ρεύματος πόλωσης

## 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,  $I_{BIAS} = 0$



FLUKE, "Calibration: Philosophy and Practice" 2<sup>nd</sup> edition  
<https://eu.flukecal.com/training/courses/Calibration-Book>

## 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.

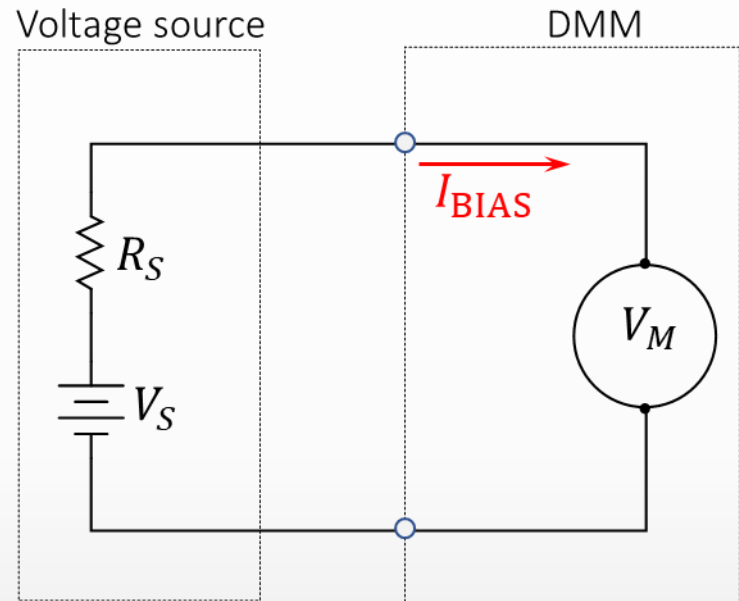
# Σχετικό σφάλμα μέτρησης τάσης λόγω ρεύματος πόλωσης

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

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

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

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



## Παράδειγμα 4

Έστω οι κάτωθι παράμετροι:

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

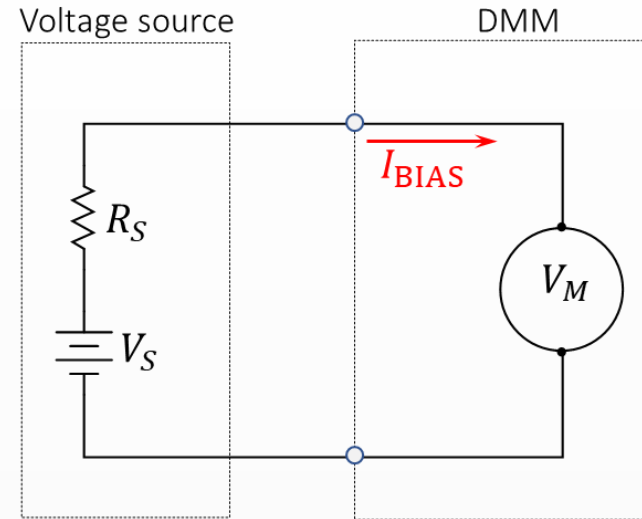
Η πραγματική τάση που μετριέται από το βολτόμετρο είναι

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

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

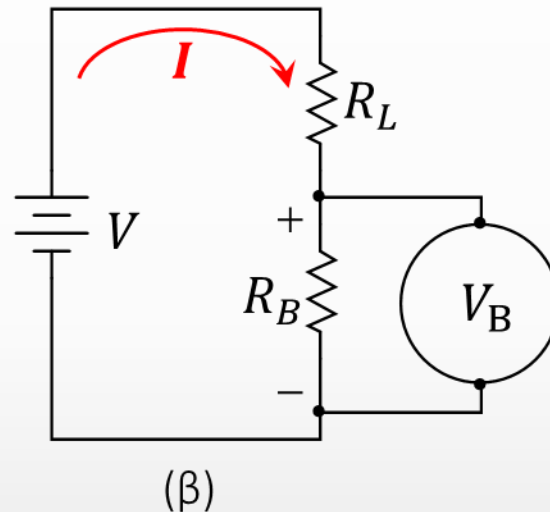
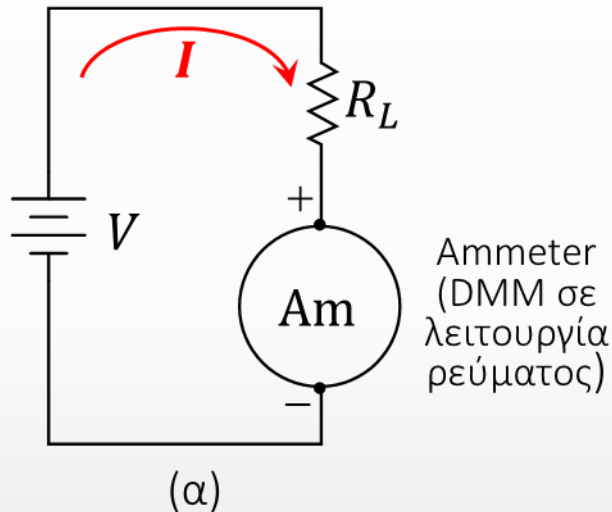
$$\text{Σχετικό σφάλμα} \quad E\% = \frac{I_{\text{BIAS}}R_S}{V_S} \times 100$$

$$E\% = 0.1\%$$



# 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 dc ή ac ρεύματος υπολογίζεται μετρώντας την αντίστοιχη dc ή ac τάση στα άκρα αυτής της αντίστασης (burden voltage,  $V_B$ )

# Σφάλματα μέτρησης ρεύματος: Σφάλμα τάσης φορτίου

- Χωρίς τάση φορτίου

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

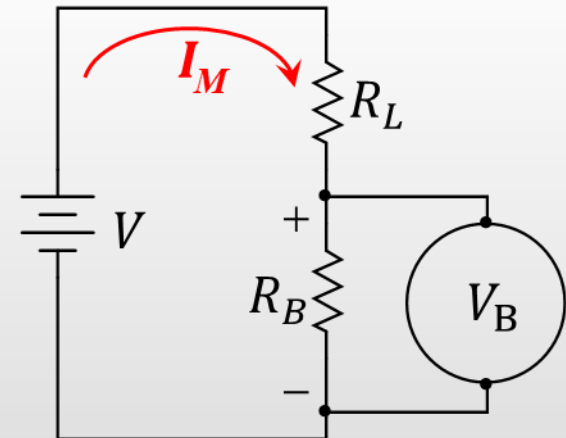
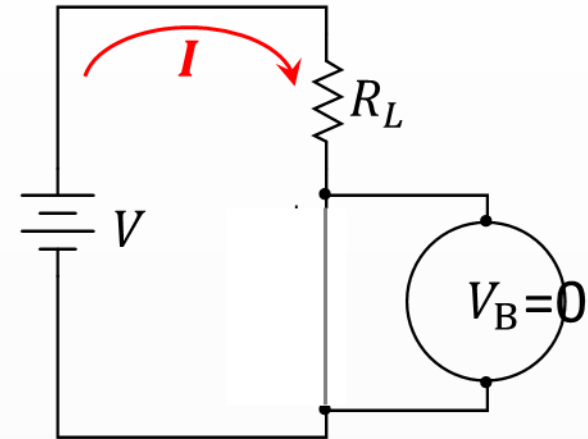
- Με τάση φορτίου

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

- Σφάλμα τάσης φορτίου στη μέτρηση ρεύματος (Burden voltage error)

$$E\% = 100 \times \left| \frac{I_M - I}{I} \right|$$

$$E\% = 100 \times \frac{V_B}{V}$$



## Σφάλμα τάσης φορτίου στη μέτρηση ρεύματος (συνέχεια)

- Απόλυτη τιμή σφάλματος στη μέτρηση ρεύματος

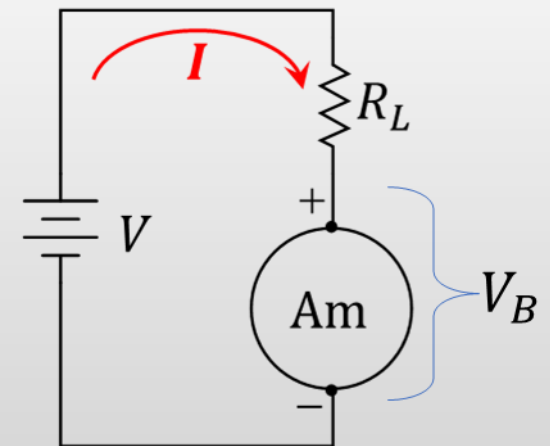
$$\begin{aligned} I_{Error} &= |I_M - I| \\ &= I_M \left| \left( 1 - \frac{I}{I_M} \right) \right| \end{aligned}$$

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

**Εφαρμογή:**  $V = 15V$ ,  $V_B = 0.4V$  και  $I_M = 1460mA$

$$\begin{aligned} I_{Error} &= I_M \times \frac{V_B}{V - V_B} \\ &= 1460mA \times \frac{0.4}{15 - 0.4} \end{aligned}$$

$$I_{Error} = 40mA$$





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

Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούμε μέτρηση τάσης στα άκρα μιας γνωστής αντίστασης

