



Πανεπιστήμιο Κύπρου
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών

Εργαστήριο Κυκλωμάτων και Μετρήσεων

Εργαστήριο 2
Ορθότητα, Ακρίβεια και Θόρυβος
(Accuracy, Precision and Noise)

Λευκωσία, 2010

Εργαστήριο 2

Ορθότητα, Ακρίβεια και Θόρυβος (Accuracy, Precision and Noise)

Σκοπός:

Σκοπός του εργαστηρίου αυτού είναι:

1. Η εξοικείωση με τους όρους ορθότητα (accuracy) και ακρίβεια (precision).
2. Η διερεύνηση της ακρίβειας και ορθότητας μερικών από τις συσκευές του εργαστηρίου που έχουν χρησιμοποιηθεί στο προηγούμενο εργαστήριο.
3. Η εισαγωγή στην έννοια και τις πηγές θορύβου και στο λόγο σήματος-θορύβου(signal-to-noise ratio, SNR.)

Εργαστηριακός Εξοπλισμός

- Παλμογράφος (Oscilloscope)
- Γεννήτρια Συναρτήσεων (Function Generator)
- Ψηφιακό Πολύμετρο (Digital Multimeter)
- Πλακέτα Κατασκευής Κυκλωμάτων (Breadboard)
- Αντιστάσεις: $2 \times 10 \text{ k}\Omega$.
- 10 αντιστάσεις διαφόρων τιμών
- Σετ καλωδίων

Προπαρασκευαστική Μελέτη

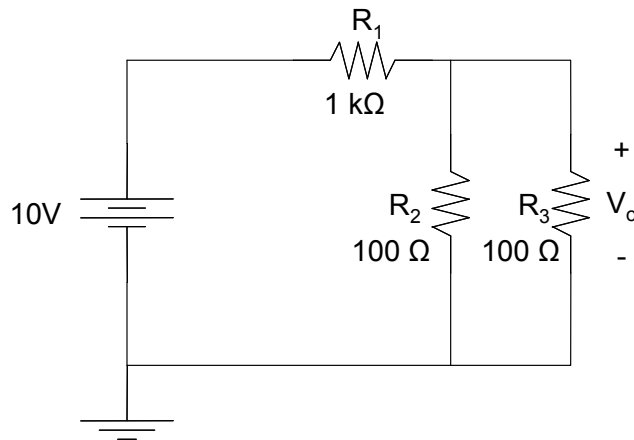
Πριν την παρακολούθηση του εργαστηρίου απαιτείται η μελέτη των

- Εργαστήριο 2 - Ορθότητα, Ακρίβεια και Θόρυβος (Accuracy, Precision and Noise)

Πρόβλημα 2.1

Σε αυτή την άσκηση θα μελετήσουμε πως η ανοχή των αντιστάσεων επηρεάζει κάποιες μετρήσεις.

1. Υλοποιήστε το πιο κάτω κύκλωμα σε PSPICE και αναλύστε την ευαισθησία της τάσης V_o . Ποια από τις αντιστάσεις επηρεάζει περισσότερο την τάση αυτή. Αν η ανοχή αυτής της αντίστασης ήταν 20% ποιες θα ήταν οι τιμές που θα έπαιρνε η τάση;
2. Καθορίστε τώρα την ανοχή όλων των αντιστάσεων στο 20 % και τρέξετε δύο προσομοιώσεις για να βρείτε τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή που μπορεί να έχει η τάση V_o .



Θεωρία

Σφάλμα (Error)

Το σφάλμα ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής και της μετρημένης τιμής. Εκτός από ελάχιστες τεχνητές περιπτώσεις, η πραγματική τιμή δεν είναι ποτέ γνωστή. Επομένως, η τιμή ενός σφάλματος δεν είναι ποτέ γνωστή. Σε εργαστηριακή εργασία, είναι καλύτερο να αναφερόμαστε στη διαφορά μεταξύ δύο τιμών, μετρήσιμη και θεωρητική, παρά στο "σφάλμα" σε μια μέτρηση. Μερικές φορές ο όρος σφάλμα χρησιμοποιείται, ίσως λανθασμένα, για να σημαίνει το σφάλμα στη μέτρηση του οργάνου.

Ορθότητα (Accuracy)

Η ορθότητα ορίζεται ως το πόσο κοντά μια μέτρηση βρίσκεται στην πραγματική τιμή και, όπως το σφάλμα, δεν είναι ποτέ γνωστή σε πρακτικές περιπτώσεις. Όταν η ορθότητα ενός οργάνου διευκρινίζεται, αυτή είναι η διαβεβαίωση του κατασκευαστή για το πόσο κοντά στην πραγματική τιμή θα βρίσκεται η μέτρηση.

Ακρίβεια (Precision)

Η ακρίβεια είναι η στενότητα της ομαδοποίησης των τιμών με την επανάληψη μιας μέτρησης. Σχετίζεται επίσης με τον αριθμό σημαντικών ψηφίων που είναι σε θέση μια συσκευή να μετρήσει.

Η ορθότητα και η ακρίβεια δεν πηγαίνουν απαραίτητα μαζί. Μια συσκευή μέτρησης μπορεί να είναι πολύ ορθή αλλά μη ακριβής, ή μπορεί να είναι πολύ ακριβής αλλά μη ορθή. Για να επεξηγηθεί αυτό το σημείο, θεωρήστε το ακόλουθο πείραμα: Θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε δύο όργανα για να μετρήσουμε την αντίσταση 10 kΩ. Για να είμαστε σίγουροι για τη μέτρηση, διάφορες μετρήσεις λαμβάνονται με κάθε μια συσκευή.

Οι μετρήσεις από την πρώτη συσκευή είναι:

10.8 kΩ
9.3 kΩ
9.9 kΩ
10.1 kΩ
10.7 kΩ

Οι μετρήσεις από τη δεύτερη συσκευή είναι:

15.11461 kΩ
15.11462 kΩ
15.11461 kΩ
15.11460 kΩ
15.11461 kΩ

Τι μπορούμε να πούμε για την ορθότητα και την ακρίβεια των δύο οργάνων; Η ορθότητα είναι το πόσο κοντά βρίσκόμαστε στην πραγματική αξία. Η πραγματική αξία δεν είναι γνωστή, αλλά φαίνεται λογικό ότι ο κατασκευαστής της αντίστασης έχει ονομάσει την αντίσταση ως 10 kΩ επειδή η αντίσταση είναι κάπου γύρω στα 10 kΩ. Επομένως το πρώτο όργανο δίνει λογικά αποτελέσματα, αν και οι τιμές διαφέρουν αρκετά. Εντούτοις, το δεύτερο όργανο δίνει αποτελέσματα που είναι πολύ επαναλαμβανόμενα, αλλά ξέρουμε ότι τα αποτελέσματα δεν φαίνονται λογικά. Από τη σύγκριση, η πρώτη συσκευή είναι ορθή αλλά μη ακριβής και η δεύτερη είναι ακριβής αλλά μη ορθή.

Η έλλειψη ορθότητας και ακρίβειας σε μια συσκευή μέτρησης οδηγεί πάντα σε αβεβαιότητα (uncertainty) σε μια μέτρηση. Μια μέθοδος για να δείξουμε την αβεβαιότητα σε μια μέτρηση είναι να περιληφθεί ένα εύρος (range). Παραδείγματος χάριν, μια τιμή $V_{AB} = 14 \pm 1$ Volts δείχνει ότι ο πειραματιστής έχει διαβάσει 14 Volts από τη συσκευή μέτρησης, αλλά η τάση μπορεί να είναι από 13 - 15 Volts. Το εύρος της αβεβαιότητας μπορεί να προκύψει από την έλλειψη ορθότητας, την έλλειψη ακρίβειας, ή και τις δύο.

Μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αβεβαιότητα σε μια μέτρηση είναι στον αριθμό σημαντικών ψηφίων στα δεδομένα. Μια μέτρηση 14.0 volts είναι διαφορετική από 14 volts. Υπάρχει ένα εύρος που πηγαίνει μαζί με τα δεδομένα, και αυτό είναι $\pm$ η μισή από την τιμή του τελευταίου ψηφίου. Για παράδειγμα μια μέτρηση 14.0 volts συνεπάγεται 14.0 ± 0.05 volts, και 14 volts συνεπάγεται 14 ± 0.5 volts.

Για το ψηφιακό πολύμετρο (DMM), ο κατασκευαστής δηλώνει ότι η ορθότητα είναι $\pm 0.05\%$ της μέτρησης για DC τάσεις. Η ακρίβεια εξαρτάται από το πόσα σημαντικά ψηφία αναγράφονται στην οθόνη. Για τον παλμογράφο η δηλωμένη ορθότητα είναι $\pm 3\%$. Η ορθότητα μιας μέτρησης από την οθόνη του παλμογράφου είναι $\pm$ (μισή μικρή υποδιαίρεση) και αλλάζει ανάλογα με τη κλίμακα, V/div για μετρήσεις τάσης και sec/div για μετρήσεις χρόνου.

Μερικές φορές η ακρίβεια μιας συσκευής υπερβαίνει την ορθότητα της, αν και αυτό δεν είναι ορθή πρακτική. Εάν αυτό συμβαίνει, δεν πρέπει να καταγράψετε μια μέτρηση όπως 84.5847 ± 0.5 . Το εύρος δείχνει ότι μια καλύτερη αντιπροσώπευση είναι 85. Το συνεπαγόμενο εύρος αυτής της τιμής συνάδει με την ορθότητα της.

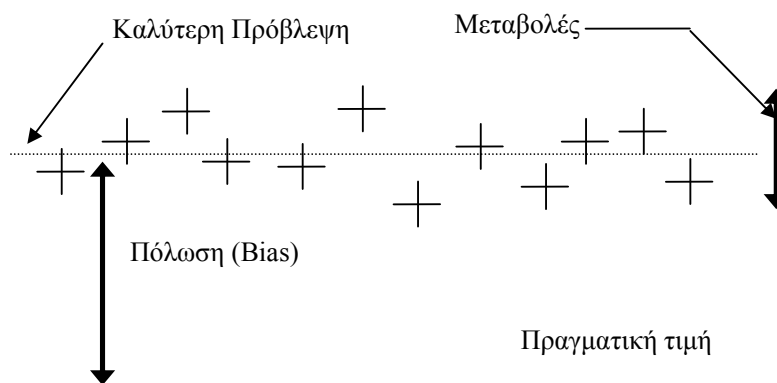
Όταν κάνετε υπολογισμούς βασισμένους σε εργαστηριακές μετρήσεις, μην γράφετε απαντήσεις που τυχόν να παραπλανήσουν τον αναγνώστη να πιστεύει ότι οι μετρήσεις σας έχουν μικρότερη αβεβαιότητα από ότι έχουν στην πραγματικότητα. Παραδείγματος χάριν, εάν μετράτε μια τάση 5.0 Volts και υπολογίσετε το ρεύμα χρησιμοποιώντας το νόμο του Ohm με μια αντίσταση $4.7k\Omega$, μην γράψετε την απάντηση σαν 1.0638298 mA. Μια καλή πρακτική είναι να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος αριθμός σημαντικών ψηφίων στην τελική τιμή με τη μέτρηση με το λιγότερο αριθμό σημαντικών ψηφίων. Στη πιο πάνω περίπτωση η απάντηση αντιπροσωπεύεται καλύτερα από 1.1 mA.

Επεξεργασία πειραματικών σφαλμάτων (Treatment of Experimental Errors)

Συστηματικά και τυχαία σφάλματα - Systematic and Random Errors

Η φύση των σφαλμάτων μπορεί να εξακριβωθεί με την επανάληψη μιας μέτρησης. Κατά συνέπεια, ένα σφάλμα λέγεται ότι είναι συστηματικό εάν η αξία της μέτρησης δεν αλλάζει, ανεξάρτητα από το πόσες φορές επαναλαμβάνεται η μέτρηση. Το σφάλμα ονομάζεται τυχαίο εάν η τιμή ποικίλλει από μια μέτρηση σε άλλη με έναν απρόβλεπτο τρόπο.

Ένα καλό παράδειγμα ενός συστηματικού σφάλματος είναι ένα βολτόμετρο. Η ορθή πειραματική πρακτική απαιτεί ότι όλα τα όργανα μέτρησης "μηδενίζονται" πριν από τη χρήση. Για να γίνει αυτό, τα τερματικά εισαγωγής βραχυκυκλώνονται και η μέτρηση πρέπει να είναι ακριβώς μηδέν. Σημειώστε ότι αυτό δεν επηρεάζει το σφάλμα ρύθμισης (calibration error), παραδείγματος χάριν όταν ο μετρητής μετρά τη διπλάσια από την πραγματική τάση.



Σχήμα 1: Δεδομένα από μια μέτρηση.

Το σχήμα 1 επεξηγεί την παρουσία συστηματικών και τυχαίων σφαλμάτων. Οι μετρήσεις επιδεικνύονται ως χρονική ακολουθία, αλλά η πραγματική χρονική ακολουθία δεν είναι σημαντική (εκτός αν παρουσιάζει κάποια συστηματική αλλαγή, παραδείγματος χάριν αλλαγές θερμοκρασίας). Η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει την πόλωση ή το όφσετ (offset), από την πραγματική τιμή, και είναι το συστηματικό σφάλμα. Οι διακυμάνσεις, πιο πάνω και πιο κάτω από την τιμή πόλωσης (bias value), αποτελούν τα τυχαία λάθη, δεδομένου ότι δεν ακολουθούν κανένα προφανές πρότυπο και δεν μπορούν να προβλεφθούν.

Τώρα, ακόμα κι αν η τιμή της πόλωσης είναι μηδέν, ακόμα δεν ξέρουμε την πραγματική αξία αυτού που προσπαθούμε να μετρήσουμε. Μπορούμε μόνο να την υπολογίσουμε από τις τιμές μέτρησης, που παρουσιάζονται στο σχήμα. Εάν δεν ξέρουμε τίποτα για τη φύση των τυχαίων σφαλμάτων, η καλύτερη πρόβλεψη μας για την πραγματική αξία δίνεται από τον αριθμητικό μέσο όρο των πραγματικών μετρημένων τιμών. Αυτή η εκτίμηση είναι η ίδια τυχαία, αλλά τέτοιες εκτιμήσεις είναι πολύ πιο κοντά στην πραγματική τιμή από τις μεμονωμένες μετρήσεις. Είναι επίσης σαφές ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των τυχαίων μετρήσεων που περιλαμβάνονται στο μέσο όρο, τόσο πιο κοντά θα είμαστε στην πραγματική τιμή. **Από το εύρος των τιμών μπορούμε να υπολογίσουμε την αβεβαιότητα της μέτρησης. Η αβεβαιότητα αυτή (από την ακρίβεια του οργάνου) συνήθως δεν υπερβαίνει την αβεβαιότητα λόγω της ορθότητας του οργάνου. Εάν την υπερβαίνει τότε σημαίνει ότι άλλοι παράγοντες επηρεάζουν τις μετρήσεις. Για τους υπολογισμούς μας χρησιμοποιούμε τη μεγαλύτερη από τις δύο.**

Έτσι μπορούμε να πούμε ότι εάν προσπαθούμε να μετρήσουμε μια ποσότητα που ποικίλλει τυχαία, η ορθή πειραματική πρακτική είναι να πάρουμε όσο το δυνατόν περισσότερες μετρήσεις, και να πάρουμε έπειτα το μέσο όρο τους. Σημειώστε ότι μπορείτε να μειώσετε το σφάλμα μόνο με τη λήψη περισσότερων μετρήσεων – δεν μπορείτε να βελτιώσετε την αρχική ακρίβεια μέτρησης, έτσι ο αριθμός σημαντικών ψηφίων στο αποτέλεσμα δεν μπορεί να υπερβεί αυτό των αρχικών μετρήσεων, ότι και να λέει ο υπολογιστής σας!

Ανάλυση Ανοχής - Tolerance Analysis

Για τα ηλεκτρικά στοιχεία, όπως οι αντιστάσεις, οι πυκνωτές κ.λ.π., καταγράφονται από τους κατασκευαστές τους τιμές μιας ορισμένης ανοχής. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή μιας αντίστασης, με μέση τιμή R_0 και ανοχή ΔR θα βρίσκεται στο εύρος $(R_0 - \Delta R)$ μέχρι $(R_0 + \Delta R)$, ή $(R_0 \pm \Delta R)$. Επίσης, όλες οι μετρήσεις χαρακτηρίζονται από κάποια αβεβαιότητα. Όταν υπολογίζονται κάποιες τιμές με βάση μετρήσεις που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα, τότε αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη για να υπολογιστεί η αβεβαιότητα της υπολογιζόμενης τιμής.

Στην περίπτωση πρόσθεσης ή αφαίρεσης αριθμών είναι εύκολο να καταλάβουμε τι γίνεται με την αβεβαιότητα της καινούργιας τιμής:

$$V_3 = (V_1 \pm \Delta V_1) + (V_2 \pm \Delta V_2) \Rightarrow \begin{cases} \text{Max}(V_3) = (V_1 + V_2) + (\Delta V_1 + \Delta V_2) \\ \text{Min}(V_3) = (V_1 + V_2) - (\Delta V_1 + \Delta V_2) \end{cases} \Rightarrow V_3 = (V_1 + V_2) \pm (\Delta V_1 + \Delta V_2)$$

$$V_3 = (V_1 \pm \Delta V_1) - (V_2 \pm \Delta V_2) \Rightarrow \begin{cases} \text{Max}(V_3) = (V_1 - V_2) + (\Delta V_1 + \Delta V_2) \\ \text{Min}(V_3) = (V_1 - V_2) - (\Delta V_1 + \Delta V_2) \end{cases} \Rightarrow V_3 = (V_1 - V_2) \pm (\Delta V_1 + \Delta V_2)$$

Παραδείγματος χάριν, η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων σε ένα κύκλωμα λαμβάνεται με την αφαίρεση της τάσης σε ένα σημείο από την τάση σε ένα άλλο σημείο. Εάν $V_1 = 6.4 \pm 0.1$ V και $V_2 = 6.3 \pm 0.1$ V, η αφαίρεση δίνει $V_1 - V_2 = 0.1$ volt. Το συνεπαγόμενο εύρος των τιμών είναι ± 0.2 volts, έτσι η απάντηση της αφαίρεσης μπορεί να είναι στο εύρος $-0.1 - 0.3$ volts. Το αποτέλεσμα τότε μπορεί να εκφραστεί σαν 0.1 ± 0.2 volt, έτσι η αβεβαιότητα σε έναν υπολογισμό θα μπορούσε να είναι τόσο μεγάλη ή και μεγαλύτερη από την απάντηση.

Κατά τον πολλαπλασιασμό και διαίρεση τιμών με αβεβαιότητα έχουμε

$$V = IR \Rightarrow$$

$$V \pm \Delta V = (I \pm \Delta I)(R \pm \Delta R) = IR \pm I\Delta R \pm R\Delta I \pm \Delta I\Delta R$$

$$\frac{V \pm \Delta V}{V} = \frac{(I \pm \Delta I)(R \pm \Delta R)}{IR} = \frac{IR}{IR} \pm \frac{I\Delta R}{IR} \pm \frac{R\Delta I}{IR} \pm \frac{\Delta I\Delta R}{IR}$$

$$1 \pm \frac{\Delta V}{V} = 1 \pm \frac{I\Delta R}{IR} \pm \frac{R\Delta I}{IR} \pm \frac{\Delta I\Delta R}{IR}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta I}{I}$$

(Ο όρος $\Delta I\Delta R$ μπορεί να παραλειφθεί αφού είναι "δευτέρου βαθμού".)

Το οποίο πάνω αποτέλεσμα λέει ότι η ανοχή στην τάση είναι το άθροισμα των μεμονωμένων "σχετικών" αβεβαιοτήτων στο ρεύμα και την αντίσταση. Σχετική αβεβαιότητα είναι το ποσοστό της αβεβαιότητας σε σχέση με την τιμή της παραμέτρου. Σημειώστε ότι στην πράξη η λέξη "σχετική" εννοείται και παραλείπεται, και η αβεβαιότητα ή ανοχή εκφράζονται συνήθως ως ποσοστά. Έτσι μια αντίσταση υψηλής ακρίβειας θα είχε μια ανοχή 1% ή λιγότερη, ενώ μιας χαμηλής ακρίβειας αντίσταση θα είχε μια ανοχή 20%.

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να δείξουμε ότι η σχετική αβεβαιότητα προστίθεται και στην περίπτωση διαίρεσης δυο τιμών.

$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow$$

$$I \pm \Delta I = \frac{V \pm \Delta V}{R \pm \Delta R} = \frac{V}{R} \frac{1 \pm \frac{\Delta V}{V}}{1 \pm \frac{\Delta R}{R}}$$

το οποίο με το δυνωνομικό θεώρημα και την παράληψη όλων των δυνάμεων $\Delta R/R_0$ ψηλότερων του πρώτου βαθμού ($\Delta R/R_0 \ll 1$), παίρνουμε

$$I \pm \Delta I \approx \frac{V}{R} \left(1 \pm \frac{\Delta V}{V} \right) \left(1 \mp \frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{V}{R} \left(1 \pm \frac{\Delta V}{V} \mp \frac{\Delta R}{R} \mp \frac{\Delta V \Delta R}{R} \right)$$

$$I \pm \Delta I \approx \frac{V}{R} \pm \frac{V}{R} \frac{\Delta V}{V} \mp \frac{V}{R} \frac{\Delta R}{R} = I \pm I \frac{\Delta V}{V} \mp I \frac{\Delta R}{R}$$

$$\frac{I \pm \Delta I}{I} \approx \frac{I}{I} \pm \frac{I}{I} \frac{\Delta V}{V} \mp \frac{I}{I} \frac{\Delta R}{R}$$

$$1 \pm \frac{\Delta I}{I} \approx 1 \pm \frac{\Delta V}{V} \mp \frac{\Delta R}{R}$$

$$\frac{\Delta I}{I} \approx \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta R}{R}$$

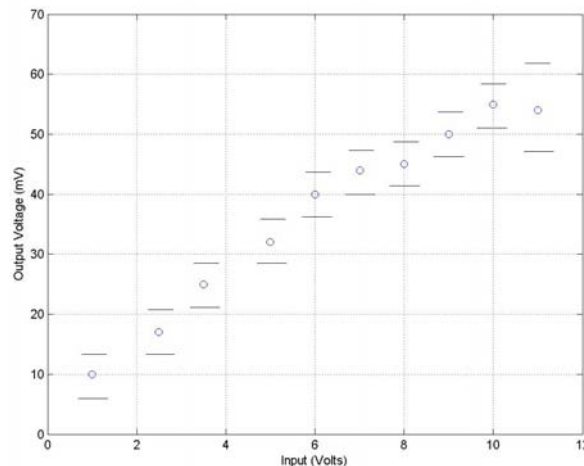
(Ο όρος $\Delta I \Delta R$ μπορεί να παραλειφθεί αφού είναι "δευτέρου βαθμού".)

Παραδείγματα

1. Αν μια αντίσταση 20kΩ με ανοχή 20% διαπερνάται από ρεύμα 10 mA το οποίο μετρήσαμε με το πολύμετρο (ορθότητα 0.05%) τότε η τάση θα είναι 200 V με αβεβαιότητα 20.05%, δηλαδή 200 ± 40.1 V.
2. Αν μια αντίσταση 20kΩ με ανοχή 20% έχει τάση στα άκρα της 4 mV την οποία μετρήσαμε με τον παλμογράφο (ορθότητα 3%) τότε το ρεύμα θα είναι 0,2 μΑ με αβεβαιότητα 23%, δηλαδή $0,20 \pm 0,046$ μΑ. (Γιατί 0,20 και όχι 0,2 ή 0,200;)

Προσαρμογή καμπυλών (Curve Fitting)

Το σχήμα 2 παρουσιάζει στοιχεία από ένα φανταστικό πείραμα, με τις γραμμές λάθους (error bars) (δηλ. ένα μέτρο του κατ' εκτίμηση λάθους). Αυτές οι γραμμές λάθους περιγράφουν τα όρια μέσα στα οποία κυμαίνονται οι μετρήσεις. Σχετίζονται άμεσα με την ορθότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων και των οργάνων. Οι απαντήσεις στις ακόλουθες ερωτήσεις είναι σημαντικές – αυτές θα εξαρτηθούν από τη σχετική θεωρία, και από τον τρόπο με τον οποίο το πείραμα πραγματοποιήθηκε:



Σχήμα 2: Παρουσίαση των πειραματικών δεδομένων.

- Ποία είναι η καλύτερη γραμμή που μπορεί να περάσει με το μάτι;
- Είναι ευθεία αυτή η γραμμή;
- Πρέπει να περάσει μέσω του 0;
- Το τελευταίο σημείο (bias = 11 V) έχει μεγαλύτερο σφάλμα. Θα άλλαζε η “καλύτερη γραμμή” αν το σφάλμα ήταν μικρότερο;

Θόρυβος

Ο θόρυβος που παρουσιάζεται μέσα σε ένα σήμα είναι οι οποιεσδήποτε διακυμάνσεις οι οποίες δεν ανήκουν στην πραγματικότητα στο σήμα υπό μελέτη. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορεί να είναι τυχαίες (random) ή να έχουν συγκεκριμένη κυματομορφή. Ο θόρυβος επηρεάζει την ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων καθορίζοντας την ουσιαστικά σε επίπεδο μεγαλύτερο από αυτό του πλάτους του θορύβου. Όταν ο θόρυβος είναι τυχαίος, όπως σε αρκετές περιπτώσεις, μπορούμε να επαναλάβουμε τις μετρήσεις αρκετές φορές και χρησιμοποιώντας τον αριθμητικό μέσο όρο, να βρούμε μια τιμή η οποία να επηρεάζεται λιγότερο από αυτές τις τυχαίες διακυμάνσεις.

Πηγές θορύβου

Όλα τα κυκλώματα αλλά και τα όργανα μετρήσεων επηρεάζονται από θόρυβο, είτε του ιδίου του κυκλώματος ή οργάνου, είτε από εξωτερικές πηγές. Οι κυριότερες μορφές θορύβου στα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι ο θόρυβος Johnson, ο θόρυβος $1/f$, ο ηλεκτρονικός και ο εξωτερικός θόρυβος. Όλες αυτές οι μορφές επηρεάζουν αθροιστικά τις μετρήσεις (δηλαδή οι επιδράσεις τους προστίθενται.)

Θόρυβος Johnson

Είναι αποτέλεσμα των διακυμάνσεων της πυκνότητας του φορτίου λόγω της θερμικής ενέργειας φορέων του φορτίου. Είναι ανάλογος της θερμοκρασίας (T), του φάσματος του σήματος (Δf) και της τιμής της “προβληματικής” αντίστασης (R).

$$\langle i^2(f) \rangle \propto \frac{T \Delta f}{R}$$

Ο θόρυβος αυτός μπορεί μόνο να εξαλειφθεί εντελώς στο απόλυτο μηδέν (-273°C). Μπορεί όμως η τιμή του θορύβου να μειωθεί με ψύξη του κυκλώματος αλλά επίσης και να διατηρηθεί σταθερή με έλεγχο της θερμοκρασίας ώστε να επηρεάσει όσο το δυνατό λιγότερο τα πειράματα.

Θόρυβος $1/f$

Ο θόρυβος αυτός, όπως υποδηλώνει και το όνομα του, είναι ανάλογος με το αντίστροφο της συχνότητας. Δηλαδή, η τιμή του είναι υψηλή σε χαμηλές συχνότητες και μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα. Είναι επίσης ανάλογος του ρεύματος και του φάσματος του κυκλώματος από το οποίο προέρχεται.

$$\langle i^2(f) \rangle \propto \frac{i \Delta f}{f}$$

Δεν είναι απόλυτα βέβαιο από πού προέρχεται ο θόρυβος αυτός. Πιστεύεται ότι επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως διάχυση φορέων φορτίου, μειωμένη καθαρότητα και ατέλειες στα υλικά, κλπ.

Ηλεκτρονικός Θόρυβος

Οι ημιαγωγοί παρουσιάζουν επίσης ακόμα ένα είδος θορύβου το οποίο είναι ανάλογο του ρεύματος και έχει να κάνει με τον ανασυνδιασμό φορέων φορτίου (charge carrier generation-recombination).

Εξωτερικός Θόρυβος

Σήματα από το περιβάλλον μπορούν επίσης να επηρεάσουν την ποιότητα των πειραματικών μετρήσεων. Τέτοια σήματα μπορεί να προέρχονται από άλλες παρακείμενες συσκευές ή ακόμα και από την εγκατάσταση παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτός ο θόρυβος μπορεί να μειωθεί με κατάλληλη απομόνωση (screening), όπως για παράδειγμα με την χρήση ομοαξονικού καλωδίου καλής ποιότητας.

Λόγος Σήματος-Θορύβου (Signal-to-Noise Ratio ή SNR)

Η δυνατότητα ενός πειράματος να μετρήσει αποτελεσματικά κάποια παράμετρο εξαρτάται από το πόσο αποτελεσματικά μπορεί να διακρίνει αυτή την παράμετρο μέσα από το θόρυβο που πιθανό να υπάρχει. Ένα μέτρο αυτής της δυνατότητας είναι ο λόγος σήματος-θορύβου. Όταν μετρούμε τάσεις ο λόγος αυτός παίρνει τη μορφή

$$SNR = \frac{V_{signal}}{V_{noise}}$$

και ανάλογα για ρεύματα. Πολλές φορές η τιμή του λόγου αυτού δίνεται σε λογαριθμική κλίμακα, για να αποφεύγονται τα πολλά μηδενικά ή δεκαδικές υποδιαίρέσεις. Σε αυτή τη κλίμακα η τιμή του λόγου εκφράζεται σε μονάδες decibel (dB).

$$SNR_{dB} = 20 \log \left(\frac{V_{signal}}{V_{noise}} \right)$$

Πειραματική Εργασία

Εργαστηριακή Άσκηση 2.1

Κωδικοί Χρώματος (Colour Code) και Μέτρηση Αντιστάσεων

Στόχοι

- Να ερμηνευθεί και να καταγράψει η ωμική αξία μίας αντίστασης από τον κωδικό χρώματος.
- Να μετρηθεί η ωμική αξία μίας αντίστασης με τη βοήθεια ενός ψηφιακού πολύμετρου.
- Να καθορισθεί εάν μία αντίσταση είναι μέσα στην περιοχή ανοχής (tolerance) του κωδικού χρώματος.

Να θυμάστε κατά τη μέτρηση της τάσης, αντίστασης, και ρεύματος

- Η τάση μετριέται παράλληλα.
- Το ρεύμα μετριέται σε σειρά.
- Η αντίσταση μετριέται παράλληλα.
- Η αντίσταση μετριέται με το διακόπτη σβηστό.
- Επιλέξτε τη σωστή θέση του πολύμετρου (DMM) - Τάση, ρεύμα, ή αντίσταση.
- Να γνωρίζετε εάν μετράτε την αντίσταση ενός στοιχείου ή την ισοδύναμη αντίσταση κυκλώματος.

Διαδικασία

Θα επιθυμούσαμε να μετρήσουμε την αντίσταση διάφορων αντιστάσεων. Γιατί να το κάνουμε αυτό αφού κάθε αντίσταση έχει τον κωδικό χρώματος της που μας δίνει την αντίσταση; Ναι αυτό είναι αλήθεια αλλά η τιμή δεν είναι πολύ ακριβής. Θυμηθείτε ότι η τελευταία ζώνη μας δίνει την ανοχή της αντίστασης. Έτσι μια αντίσταση 10 kΩ με μια ανοχή 5% θα μπορούσε να έχει μια τιμή από 9500 -10500 Ω. Εάν τύχει να επιλέξετε μια αντίσταση που είναι στο χαμηλό όριο και μια στο υψηλό όριο, θα μπορούσατε να έχετε δύο αντιστάσεις που χαρακτηρίζονται από την ίδια τιμή αλλά οι πραγματικές τους τιμές διαφέρουν κατά 10%.

Προειδοποίηση: Κατά τη μέτρηση αντίστασης, αποφύγετε να αγγίζετε και τα δύο άκρα του πολυμέτρου ταυτόχρονα επειδή η αντίσταση του σώματός σας θα επηρεάσει τη μέτρηση.

1. Πάρτε μιαν αντίσταση από το δίσκο.
2. Καταγράψτε τον **ΚΩΔΙΚΑ ΧΡΩΜΑΤΟΣ** της στη στήλη 1 του πίνακα.
3. Καθορίστε, χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα κώδικα χρώματος, τη κωδικοποιημένη αντίστασή της σε Ohms. Γράψτε αυτήν την τιμή στη στήλη 2.
4. Καθορίστε, χρησιμοποιώντας τον κώδικα χρώματος, την **ανοχή** (σε %) της αντίστασης, και καταγράψτε την στη στήλη 3.
5. Χρησιμοποιώντας την **κωδικοποιημένη αντίσταση** και την **ανοχή**, βρείτε τη **μέγιστη κωδικοποιημένη αντίσταση**, και καταγράψτε την τιμή στη στήλη 4.
6. Χρησιμοποιώντας την **κωδικοποιημένη αντίσταση** και την **ανοχή**, βρείτε την **ελάχιστη κωδικοποιημένη αντίσταση**, και καταγράψτε την τιμή στη στήλη 5.
7. Χρησιμοποιώντας το πολύμετρο, και θέτοντας το σε λειτουργία **Ohm**, μετρήστε την αντίσταση. Σημειώστε ότι πρέπει πάντα να ρυθμίσετε το πολύμετρο για να λάβετε όσο το δυνατόν περισσότερα σημαντικά ψηφία (significant digits). Καταγράψτε την **αντίσταση** στη στήλη 6.
8. Συγκρίνοντας την αντίσταση που μετρήσατε με τις μέγιστες και ελάχιστες κωδικοποιημένες αντιστάσεις, αποφασίστε εάν η αντίσταση είναι μέσα στο εύρος της ανοχής. Καταγράψτε το αποτέλεσμα (ΝΑΙ ή ΟΧΙ) στη στήλη 7.
9. Επαναλάβετε και για τις 10 αντιστάσεις

Σημειώστε ότι πρέπει πάντα να ρυθμίσετε το πολύμετρο για να λάβετε όσο το δυνατόν περισσότερα σημαντικά ψηφία. Παραδείγματος χάριν, 3.27 kΩ (με τρία σημαντικά ψηφία) είναι καλύτερο από 3.3 K Ω (δύο σημαντικά ψηφία).

Παράδειγμα

Μελετήστε προσεκτικά το παράδειγμα που δίνεται στην πρώτη σειρά του πίνακα πιο κάτω. Μία αντίσταση με ένα κώδικα χρώματος **"κόκκινο-ιώδης-πορτοκαλί-ασημί"** (**Red-Violet-Orange-Silver**) θα είχε **κωδικοποιημένη αξία 27 kΩ**. Η **κωδικοποιημένη ανοχή θα ήταν $\pm 10\%$** , και 10% του 27 kΩ είναι 2.7 kΩ.

Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση πρέπει να έχει πραγματική αξία μέσα στο εύρος ($27\text{ k}\Omega - 2.7\text{ k}\Omega = 24.3\text{ k}\Omega$) και ($27\text{ k}\Omega + 2.7\text{ k}\Omega = 29.7\text{ k}\Omega$). Μαθηματικά, θα λέγαμε ότι για την αντιστάτη που μετρήσαμε για να είμαστε μέσα στο εύρος ανοχής:

$$24.3\text{ k}\Omega \leq R_{\text{measured}} \leq 29.7\text{ k}\Omega$$

Έτσι αφού η μετρημένη αντίσταση είναι 25.1 kΩ, τότε θα λέγαμε ότι **ΕΙΝΑΙ** μέσα στο εύρος της κωδικοποιημένης ανοχής.

Μετα-Εργαστηριακή Μελέτη

1. Εξηγήστε γιατί η μέτρηση του πολύμετρου δεν είναι 0 ακόμα και όταν τα δύο σύρματα έρθουν σε επαφή.
2. Σε αυτό το εργαστήριο, πήρατε διαφορετικές τιμές αντίστασης ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης. Εξηγήστε την πιθανή προέλευση οποιουδήποτε λάθους σε αυτές τις τιμές αντίστασης.
3. Τι εύρος τιμών αντίστασης θα αναμένετε να μετρήσετε εάν μία αντίσταση είχε τα χρώματα καφέ-μαύρο-πράσινο-χρυσό;
4. Περιγράψτε άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές των αντιστάσεων που μετρήσατε.

Εργαστηριακή Άσκηση 2.2

Στόχοι

- Να εξηγηθεί η διαφορά μεταξύ της ορθότητας και της ακρίβειας.
- Να καθοριστεί το εύρος αβεβαιότητας μιας μέτρησης λόγω της ορθότητας ενός οργάνου.
- Να καθοριστεί το καλύτερο όργανο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για μια ιδιαίτερη μέτρηση.

Διαδικασία

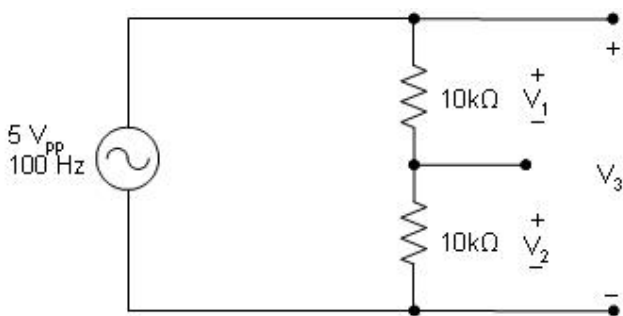
1. Χρησιμοποιήστε τη γεννήτρια σημάτων για να πάρετε μια ημιτονοειδή τάση 5 V_{pp} συχνότητας 100 Hz . Επιβεβαιώστε ότι το σήμα πληροί αυτές τις προδιαγραφές με τη βοήθεια του παλμογράφου.
2. Κατασκευάστε το κύκλωμα του σχήματος 3.
3. Μετρήστε τις τάσεις V_1 , V_2 , και V_3 χρησιμοποιώντας το πολύμετρο (DMM). Δεδομένου ότι η πηγή είναι ημιτονοειδής, η στιγμιαία τάση αλλάζει συνεχώς, γι' αυτό μετρούμε την τιμή V_{rms} (root-mean-square).

Οι τιμές θα αλλάζουν πιθανώς λίγο. Καταγράψετε τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές και χρησιμοποιήστε το μέσο όρο στους υπολογισμούς σας. Αποφασίστε τον αριθμό σημαντικών ψηφίων που θα χρησιμοποιήσετε ώστε να είναι κατάλληλα για την καταγραφή των τάσεων από το πολύμετρο. Συμπληρώστε τον Πίνακα 2.1 με τις μετρήσεις σας.

Καθορίστε το εύρος λόγω της ορθότητας του οργάνου και το εύρος λόγω της ακρίβειας της μέτρησης για κάθε μέτρηση.

Υπολογίστε τη διαφορά τάσης $V_1 - V_2$. Περιλάβετε και το εύρος με το αποτέλεσμα σας. Χρησιμοποιήστε τις μέσες τιμές V_1 και V_2 από τον πίνακα 2.1 για τους υπολογισμούς σας. Τοποθετήστε τα αποτελέσματά σας στον πίνακα 2.1.

Προσθέστε τις τάσεις V_1 και V_2 και να την ονομάσετε V_3 . Χρησιμοποιήστε και πάλι τις μέσες τιμές V_1 και V_2 και τοποθετήστε τα αποτελέσματά σας στον πίνακα 2.1.



Σχήμα 3: Βασικό κύκλωμα μέτρησης.

Πίνακας 2.1

V ₁ max	
V ₁ min	
V ₁ average	
ΔV από ακρίβεια (ΔV = (V ₁ max – V ₁ min)/2)	
ΔV από ορθότητα οργάνου	
V ₁ = _____ ± _____	
V ₂ max	
V ₂ min	
V ₂ average	
ΔV από ακρίβεια (ΔV = (V ₂ max – V ₂ min)/2)	
ΔV από ορθότητα οργάνου	
V ₂ = _____ ± _____	
V ₃ max	
V ₃ min	
V ₃ average	
ΔV από ακρίβεια (ΔV = (V ₃ max – V ₃ min)/2)	
ΔV από ορθότητα οργάνου	
V ₃ = _____ ± _____	
V ₁ – V ₂ = _____ ± _____	
V ₃ ' = V ₁ + V ₂ = _____ ± _____	

Σημείωση:

Ορθότητα μετρήσεων παλμογράφου: ± 3%

Ορθότητα Ψηφιακού Πολυμέτρου: ± 0.05%

Ορθότητα μετρήσεων από την οθόνη του παλμογράφου: ± 0.5 μικρή υποδιαίρεση (minor div)

4. Μετρήστε τις τάσεις V_2 και V_3 χρησιμοποιώντας την οθόνη του παλμογράφου. Για κάθε τάση, πάρτε μια μέτρηση με τη μεγαλύτερη ρύθμιση ευαισθησίας (volts/div) ούτως ώστε το κύμα να καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της οθόνης. Αποφασίστε τον αριθμό των σημαντικών ψηφίων που θα χρησιμοποιήσετε ώστε να είναι κατάλληλα για την καταγραφή των τάσεων από την οθόνη του παλμογράφου. Θα πρέπει να διαβάσετε τις τιμές V_{pp} και να υπολογίσετε τις τιμές V_{rms} για να μπορείτε να συγκρίνετε τις μετρήσεις με αυτές από το πολύμετρο. Συμπληρώστε τον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2

V_2 pp	
V_2 rms	
ΔV από ορθότητα οργάνου	
$V_2 = \text{_____} \pm \text{_____}$	
V_3 pp	
V_3 rms	
ΔV από ορθότητα οργάνου	
$V_3 = \text{_____} \pm \text{_____}$	

Σημείωση:

Ορθότητα μετρήσεων παλμογράφου: $\pm 3\%$

Ορθότητα Ψηφιακού Πολυμέτρου: $\pm 0.05\%$

Ορθότητα μετρήσεων από την οθόνη του παλμογράφου: ± 0.5 μικρή υποδιαίρεση (minor div)

5. Τώρα μετρήστε τις τάσεις V_2 και V_3 χρησιμοποιώντας τη λειτουργία μέτρησης τάσης του ψηφιακού παλμογράφου. Για κάθε τάση, πάρτε μια μέτρηση για τη μεγαλύτερη ρύθμιση ευαισθησίας (volts/div) που σας επιτρέπει το σήμα και η οθόνη. Χρησιμοποιήστε το "Measure" κουμπί και το " V_{rms} " για τη μέτρηση. Οι τιμές μπορεί μεταβάλλονται συνεχώς. Καταγράψτε τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές στο πίνακα 2.3 και χρησιμοποιήστε το μέσο όρο στους υπολογισμούς σας. Αποφασίστε τον αριθμό σημαντικών ψηφίων που θα χρησιμοποιήσετε ώστε να είναι κατάλληλα για τη καταγραφή των τάσεων με τις μετρήσεις του παλμογράφου.

Καθορίστε το εύρος λόγω της ορθότητας του οργάνου και το εύρος λόγω της ακρίβειας της μέτρησης για κάθε μέτρηση.

Πίνακας 2.3

V_2 max	
V_2 min	
V_2 average	
ΔV από ακρίβεια ($\Delta V = (V_2 \text{ max} - V_2 \text{ min})/2$)	
ΔV από ορθότητα οργάνου	
$V_2 = \text{_____} \pm \text{_____}$	
V_3 max	
V_3 min	
V_3 average	
ΔV από ακρίβεια ($\Delta V = (V_3 \text{ max} - V_3 \text{ min})/2$)	
ΔV από ορθότητα οργάνου	
$V_3 = \text{_____} \pm \text{_____}$	

Σημείωση:

Ορθότητα μετρήσεων παλμογράφου: $\pm 3\%$

Ορθότητα Ψηφιακού Πολυμέτρου: $\pm 0.05\%$

Ορθότητα μετρήσεων από την οθόνη του παλμογράφου: ± 0.5 μικρή υποδιαίρεση (minor div)

6. Ρυθμίστε τη γεννήτρια συναρτήσεων (Function Generator) για να παράξετε ένα ημιτονοειδές κύμα και ρυθμίστε τη συχνότητα κοντά στο 1 kHz **χρησιμοποιώντας την κλίμακα 1 kHz** και πηγαίνοντας κοντά στο "1" στη γεννήτρια συναρτήσεων. Μην αλλάξετε το πλάτος!

Μετρήστε τη συχνότητα της V_3 με το ψηφιακό παλμογράφο. Χρησιμοποιήστε το "Measure" και επιλέξτε "frequency" για να πάρετε τις μετρήσεις. Καταγράψτε την πραγματική μετρημένη συχνότητα στον πίνακα 2.4.

7. **Αλλάξτε την κλίμακα συχνότητας της γεννήτριας σημάτων στα 10 kHz.** Ρυθμίστε τη **συχνότητα και πάλι στο 1 kHz** (αυτή τη φορά χρησιμοποιώντας την κλίμακα των 10 kHz). Μετρήστε με τον παλμογράφο και καταγράψτε τη μετρημένη συχνότητα στον πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4

Μετρημένη Συχνότητα (Κλίμακα 1 kHz)	Μετρημένη Συχνότητα (Κλίμακα 10 kHz)

Εκτός αν ήσαστε εξαιρετικά τυχεροί, τα αποτελέσματά σας πρέπει να είναι πιο κοντά στη συχνότητα στόχου 1 kHz όταν χρησιμοποιήσατε την κλίμακα 1 kHz. **Εάν αυτό δεν ισχύει, τουλάχιστον πρέπει να έχετε δει ότι η γεννήτρια συναρτήσεων ήταν λιγότερο ευαίσθητη στις περιστροφές του κουμπιού όταν η κλίμακα ήταν 1 kHz.** Εξηγήστε το λόγο.

8. Ρυθμίστε, με τη βοήθεια της οθόνης του παλμογράφου, το πλάτος του κύματος στη γεννήτρια σήματος για να έχετε 2 V peak-peak.
9. Ρυθμίστε την κάθετη κλίμακα (Volts/div) και μετρήστε την τιμή peak-to-peak της τάσης από την οθόνη του παλμογράφου για κάθε περίπτωση κλίμακας που αναγράφεται στον πίνακα 2.5. **Μην αλλάξετε το πλάτος του σήματος από τη γεννήτρια σήματος κατά τη διάρκεια όλων των μετρήσεων.** Για κάθε περίπτωση κρατήστε τον κατάλληλο αριθμό δεκαδικών ψηφίων.
10. Χρησιμοποιήστε τη ρύθμιση V/DIV και ρυθμίστε την κάθετη κλίμακα έτσι ώστε το κύμα να λαμβάνει ολόκληρη την οθόνη. Καταγράψτε την κλίμακα και την τιμή της V_{pp} . Αυτή πρέπει να είναι η ακριβέστερη μέτρηση. Κατά γενικό κανόνα για τους ψηφιακούς παλμογράφους, όσο πιο μικρή είναι η κατακόρυφη ρύθμιση (V/DIV), τόσο ακριβέστερη θα είναι η μέτρηση τάσης.

Πίνακας 2.5

Κάθετη Κλίμακα (V/div)	Τάση Peak-to Peak (V) από οθόνη παλμογράφου
5V/div	
2V/div	
1V/div	
500mV/div	
_____mV/div	

11. Τι παρατηρείτε από τις πιο πάνω μετρήσεις;

Μετά το πέρας των μετρήσεων, κρατήστε το κύκλωμα ανέπαφο για την επόμενη εργαστηριακή άσκηση.

Εργαστηριακή Άσκηση 2.3

Στόχοι

- Να μελετηθεί το εύρος του θορύβου στις μετρήσεις με τον παλμογράφο.
- Να μελετηθούν κάποιες από τις πιθανές πηγές θορύβου.

Διαδικασία

1. Μετατρέψτε την κυματομορφή από τη γεννήτρια συναρτήσεων από ημιτονοειδή σε τετραγωνική (square waveform) και συχνότητα 10 Hz. Χρησιμοποιήστε 2 BNC-Alligator μεταξύ της γεννήτριας και του κυκλώματος.
2. Μετρήστε το πλάτος (V_{pp}) της τάσης V_3 με τη βοήθεια του παλμογράφου. Πρέπει να χρησιμοποιήσετε το “measure voltage” στον παλμογράφο και να διαλέξετε το “ V_{pp} ” για αυτήν τη μέτρηση.

$$V_{pp} = \underline{\hspace{4cm}}$$

3. Ρυθμίστε την κλίμακα του χρόνου έτσι ώστε να φαίνεται μόνο ένα μέρος ενός από τα οριζόντια τμήματα της κυματομορφής στην οθόνη του παλμογράφου και καθόλου από τα κάθετα τμήματα.
4. Ρυθμίστε τη κάθετη θέση του σήματος, χρησιμοποιώντας το “Offset” της γεννήτριας σημάτων, έτσι ώστε το οριζόντιο τμήμα της κυματομορφής να βρίσκεται ακριβώς στο μέσο της οθόνης. (Σημείωση: σε μερικές γεννήτριες σημάτων πρέπει να τραβήξετε το κουμπί “Offset” προς τα έξω για να λειτουργήσει.)
5. Μεγαλώστε την κλίμακα της τάσης (μειώνοντας τα V/DIV) ώστε ο θόρυβος που επικαλύπτει εκείνο το μέρος της κυματομορφής να γεμίζει όλη σχεδόν την οθόνη. Μετρήστε και πάλι το πλάτος του κύματος, που αυτή τη φορά περιλαμβάνει μόνο το θόρυβο. Υπολογίστε το λόγο σήματος-θορύβου (SNR) σε dB.

$$V_n = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$\text{SNR} = \underline{\hspace{4cm}}$$

6. Επαναλάβετε το πιο πάνω πείραμα αλλά με τον παλμογράφο να πραγματοποιεί αριθμητικό μέσο όρο 16 κυματομορφών. (Επιλέξτε από το μενού “Acquire” το “Average” και τον αριθμό 16.) Μετρήστε και πάλι το πλάτος του κύματος, που αυτή τη φορά περιλαμβάνει μόνο το θόρυβο. Υπολογίστε το λόγο σήματος-θορύβου (SNR) σε dB.

$$V_n = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$\text{SNR} = \underline{\hspace{4cm}}$$

7. Επαναφέρετε τον παλμογράφο σε κανονική κυματομορφή χωρίς αριθμητικό μέσο όρο. (Επιλέξτε από το μενού “Acquire” το “Normal”.)
8. Μεταξύ των άκρων των καλωδίων BNC-Alligator τοποθετήστε ένα καλώδιο χωρίς γείωση, π.χ. ένα banana-banana. Καταγράψτε και πάλι το πλάτος του θορύβου και υπολογίστε το SNR σε dB. Πιθανόν να χρειαστεί να αλλάξετε την κάθετη κλίμακα του παλμογράφου.

$$V_n = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$\text{SNR} = \underline{\hspace{4cm}}$$

9. Επαναλάβετε το πιο πάνω πείραμα αλλά με τον παλμογράφο να πραγματοποιεί αριθμητικό μέσο όρο 16 κυματομορφών. Μετρήστε και πάλι το πλάτος του κύματος, που αυτή τη φορά περιλαμβάνει μόνο το θόρυβο. Υπολογίστε το λόγο σήματος-θορύβου (SNR) σε dB.

$V_n =$ _____

SNR = _____

Επαναφέρετε τον παλμογράφο σε κανονική κυματομορφή χωρίς αριθμητικό μέσο όρο.

10. Που νομίζετε ότι οφείλονται οι αλλαγές στις πιο πάνω μετρήσεις; Σχολιάστε τα αποτελέσματα αυτής της άσκησης.

Μετα εργαστηριακή Εργασία

1. Εξηγήστε με δικά σας λόγια τη διαφορά μεταξύ ορθότητας και ακρίβειας.
2. Συζητήστε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μιας από τις τεχνικές μέτρησης/συσκευές που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις στην Άσκηση 2.2.
3. Εάν ο παλμογράφος σας είχε μια μέγιστη κλίμακα 5V ανά διαίρεση, και υπήρχαν 8 κάθετες διαιρέσεις στην οθόνη, εξηγήστε πώς θα μπορούσατε να μετρήσετε μια καθαρή AC τάση 62 Volts peak-to-peak.
4. Για το κύκλωμα που χρησιμοποιήσαμε στο σχήμα 3, η τάση μεταξύ των δύο αντιστάσεων πρέπει να είναι ακριβώς η μισή τάση της πηγής. Τι είναι μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν την ορθότητα αυτής της υπόθεσης;
5. Αν η ορθότητα ενός οργάνου μέτρησης δίνεται από τον κατασκευαστή σαν $\pm 1\%$ και η μέτρηση που πήρατε είναι 36.212V.
 - i. Ποιο είναι το εύρος αβεβαιότητας (uncertainty range) λόγω της ορθότητας που δίδεται από τον κατασκευαστή;
 - ii. Ποιο είναι το εύρος αβεβαιότητας που συνεπάγεται από τη μέτρηση;
 - iii. Τι θα ήταν ένας καλύτερος τρόπος να γραφτεί η μέτρηση με βάση την ορθότητα (accuracy) του οργάνου μέτρησης;
6. Αν δύο μετρήσεις τάσης που λαμβάνονται σε ένα κύκλωμα είναι $V_1 = 47\text{ V}$ και $V_2 = 45\text{ V}$, καθορίστε τη διαφορά τάσης $V_1 - V_2$, δίδοντας μια ένδειξη του εύρους αβεβαιότητας (uncertainty range).
7. Ποιος από τους τρεις τρόπους μέτρησης είναι ο πιο ορθός και ποιος ο πιο ακριβής. Εξηγήστε την απάντησή σας.
8. Περιγράψτε τις πηγές θορύβου που παρατηρήσατε σε αυτό το εργαστήριο.
9. Ποια μέτρα μπορεί να λάβει κάποιος για να αποφύγει ή να μειώσει το θόρυβο στις μετρήσεις του;
10. Εξηγήστε πως ο θόρυβος επηρεάζει την ορθότητα και την ακρίβεια των μετρήσεών σας.
11. Εξηγήστε, με δικά σας λόγια, γιατί ο αριθμητικός μέσος όρος πολλών μετρήσεων μειώνει το θόρυβο.