

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Μελετάται η εφαρμογή της αρχής των μετατροπών μεταβλητού μήκους στους μετρητές μηχανικής τάσης (strain gauges).

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Περιγραφή	Ποσότητα
Μονάδα οργάνων TK2941A	1
Εξοπλισμός για τη δοκιμή γραμμικών μετατροπών TK294	1
Υπομονάδα μετρητή μηχανικής τάσης TK294E	1
Τροφοδοτικό, $\pm 15V$ dc, $5Vdc$	1
Ψηφιακό πολύμετρο (DMM)	1

ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

10.1 Ο Βασικός Μετρητής Μηχανικής Τάσης

10.2 Ο Διπλός Μετρητής Μηχανικής Τάσης

ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

- Να μάθουμε πως η μεταβολή στην αντίσταση ενός υλικού, που προκαλείται από μια αλλαγή στο φυσικό του μήκος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει τη μηχανική τάση στο υλικό.
- Να μελετήσουμε μεθόδους χρησιμοποιώντας έναν και δύο μετρητές μηχανικής τάσης και να παρατηρήσουμε τα πλεονεκτήματα του συστήματος με τους δύο μετρητές.

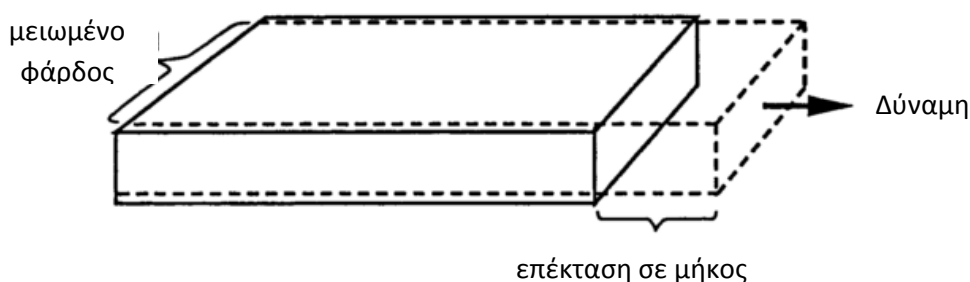
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι δυνατόν να κατασκευάσουμε μετατροπείς οι οποίοι να χρησιμοποιούν την αρχή της μεταβολής του μήκους μιας αντίστασης για να προκαλούν μια μεταβολή στην αντίσταση του μετατροπέα. Μεταβολή, επίσης, στο εμβαδόν της διατομής μιας αντίστασης προκαλεί μεταβολή της τιμής της αντίστασης και η αρχή αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε μετατροπείς.

Στους μετατροπείς μεταβλητού μήκους, που εξετάστηκαν στην Εργασία 9, το μήκος της αντίστασης άλλαζε πρακτικά αλλάζοντας την απόσταση μεταξύ των επαφών. Αυτό γινόταν έχοντας μία επαφή σταθερή και την άλλη μεταβλητή στη μορφή μια ολισθαίνουσας επαφής η οποία μπορούσε να κινείται πάνω-κάτω σε όλο το μήκος της αντίστασης.

Ένας άλλος τρόπος να αυξήσουμε το μήκος μιας αντίστασης είναι απλά να την τεντώσουμε (stretching). Ας δούμε τι συμβαίνει όταν το κάνουμε αυτό και αν αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αρχή λειτουργίας ενός μετατροπέα.

Όταν μια ορθογώνια ράβδος υλικού τεντώνεται με την εφαρμογή μιας εκτατικής δύναμης (tensile force) κατά μήκος του άξονά της, όχι μόνον αυξάνει σε μήκος αλλά, επίσης, μειώνεται σε εμβαδόν διατομής. Αυτό δείχνεται στην Εικ. 4.10.1



Εικ. 4.10.1

Το πόσο επιμηκύνεται η ράβδος σχετίζεται με το πόσο μειώνεται το φάρδος και το ύψος της μέσω ενός παραγόντα, γνωστού σαν Λόγος του Poisson (Poisson's Ratio)¹.

Ο λόγος του Poisson (μ) δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{\text{εγκάρσια συστολή ανά μονάδα φάρδους}}{\text{επιμήκυνση ανά μονάδα μήκους}}$$

Για υλικά, όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός και άλλα μέταλλα, ο λόγος του Poisson είναι μεταξύ 0.25 και 0.35.

Τώρα, καθώς η αντίσταση $= \frac{\rho \cdot l}{A}$ και εφόσον αυτή η μέθοδος τόσο αυξάνει το μήκος l όσο και μειώνει το εμβαδόν της διατομής A , η αντίσταση θα αλλάζει μαζί με αυτά.

Υπάρχει, επιπλέον, μια μεταβολή στην ειδική αντίσταση ρ του υλικού σαν αποτέλεσμα της μεταβολής στις φυσικές του ιδιότητες καθώς η ράβδος τεντώνεται. Το τέντωμα προκαλεί μια παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος του υλικού η οποία μεταβάλλει την τιμή του ρ .

¹ Poisson: προφέρεται Πουασόν

Εξετάστε το μετρητή μηχανικής τάσης, TK294E, που χρησιμοποιείται με τον εξοπλισμό για τη δοκιμή γραμμικών μετατροπών, TK294. Θα παρατηρήσετε ότι σε κάθε πλευρά της ορθογώνιας μεταλλικής ράβδου, που είναι στερεωμένη στο ένα άκρο της, είναι κολλημένος ένας αγωγός ζικ-ζακ πάνω σε μια κόκκινη βάση. Αυτός ο αγωγός είναι πολύ λεπτός σε πάχος και φάρδος αλλά, λόγω του σχήματος ζικ-ζακ, έχει αρκετό μήκος. Αυτό τον κάνει να έχει κάποια αντίσταση. Θα παρατηρήσετε, επίσης, ότι οι αγωγοί είναι τοποθετημένοι κατά μήκος του άξονα της ορθογώνιας ράβδου.

Ερώτηση 10.1 Αν σπρώξετε απαλά τον κυλινδρικό μοχλό, τι συμβαίνει στην ορθογώνια ράβδο;

Επειδή η ορθογώνια ράβδος είναι πακτωμένη στο ένα της άκρο, κάμπεται σε τόξο και παραμορφώνεται πολύ ελαφρά. Η μια πλευρά της ράβδου θα γίνει πολύ ελαφρά μακρύτερη και η άλλη της πλευρά πολύ ελαφρά κοντύτερη.

Κάθε μετρητής μηχανικής τάσης είναι γερά κολλημένος σε μια ορθογώνια ράβδο με ένα ειδικό τσιμέντο το οποίο ακολουθεί τις κινήσεις της ράβδου και μεταφέρει όλες τις αλλαγές του μήκους της ράβδου στο μετρητή.

Ερώτηση 10.2 Οι αγωγοί του μετρητή, που είναι από την πλευρά της ράβδου που είναι κοντύτερα στον κυλινδρικό μοχλό, γίνονται μακρύτεροι ή κοντύτεροι καθώς ο μοχλός πιέζεται;

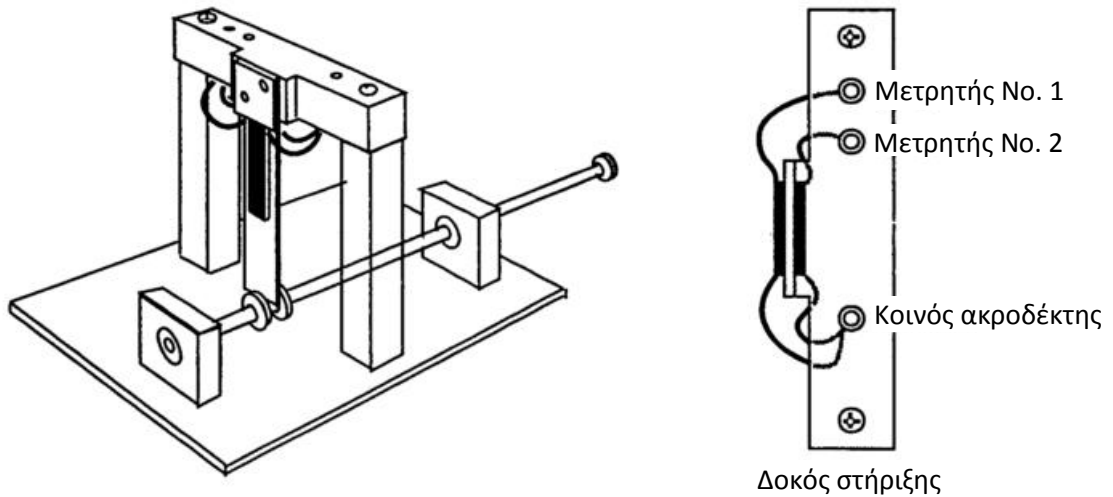
Ερώτηση 10.3 Τι άλλο συμβαίνει στις ιδιότητες των αγωγών του μετρητή;

Ερώτηση 10.4 Πως μεταβάλλει αυτό την αντίσταση των αγωγών;

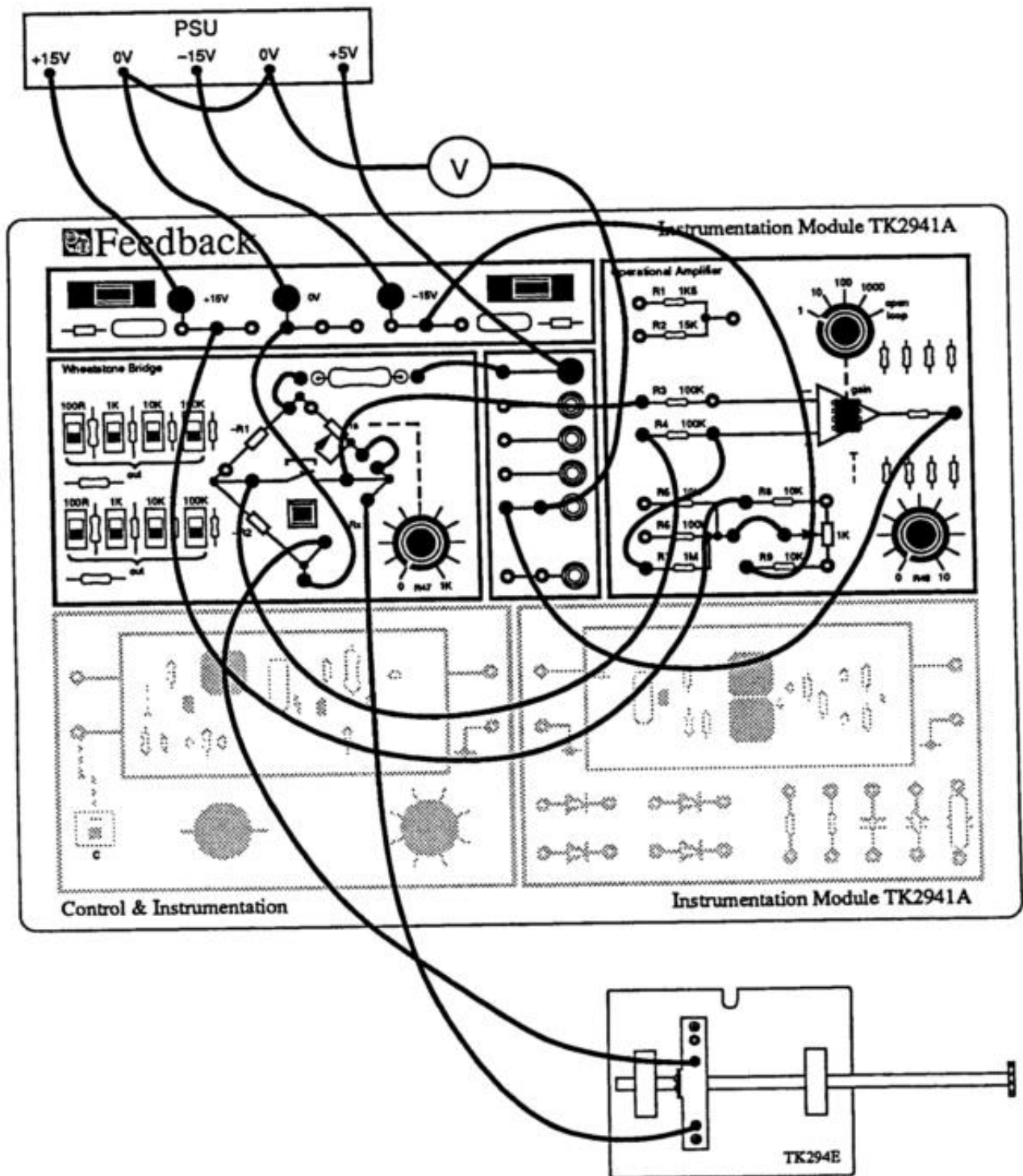
ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 10.1

Ο Βασικός Μετρητής Μηχανικής Τάσης

Ας συνδέσουμε το μετατροπέα και ας δούμε αν η απάντησή σας είναι σωστή. Συναρμολογήστε το TK294E με το TK294 και συνδέστε το μετρητή μηχανικής τάσης (strain gauge) No. 1, ο οποίος βρίσκεται από την πλευρά του κυλινδρικού μοχλού (για λεπτομέρειες, βλ. Εικ. 4.10.2), στο κύκλωμα που δείχνει η Εικ. 4.10.3.



Εικ. 4.10.2 Ο μετρητής μηχανικής τάσης (strain gauge) TK294E



Εκ. 4.10.3

Θα χρησιμοποιήσουμε αυτή τη διάταξη για να μετρήσουμε τη μεταβολή στην αντίσταση του μετρητή μηχανικής τάσης. Στην κανονική του κατάσταση, ο μετρητής έχει μια αντίσταση περίπου 120Ω την οποία μπορούμε να μετρήσουμε ισορροπώντας τη γέφυρα, όπως κάναμε στην Εργασία 9. Όταν κάμψουμε τη ράβδο, η μεταβολή του μετατροπέα θα είναι πολύ μικρή, τόσο που η αντίστασή του θα μεταβληθεί μόνο κατά 0.2Ω , περίπου. Θα ήταν πολύ δύσκολο να μετρήσουμε αυτή τη μεταβολή με την κανονική μέθοδο της γέφυρας, καθώς οι αντιστάσεις των επαφών των βυσμάτων, των διακοπών ή των ποτενσιόμετρων μπορεί να αλλάζουν κατά το ίδιο μικρό ποσό. Μια τέτοια μεταβολή, όμως, όσο μικρή και αν είναι, σημαίνει ότι η γέφυρα είναι οριακά εκτός ισορροπίας και, επομένως, μπορούμε να ενισχύσουμε αυτήν την εκτός ισορροπίας τάση, που εμφανίζεται στα άκρα του ανιχνευτή και να χρησιμοποιήσουμε για να τη δείξουμε στο όργανο (βολτόμετρο).

Είναι απαραίτητο, όμως, πρώτα να πάρουμε μια μηδενική έξοδο από τον ενισχυτή στην αρχική κατάσταση και, για να το πετύχουμε, θα χρησιμοποιήσουμε την πρότυπη μεταβαλλόμενη αντίσταση R_s πάνω στη μονάδα της γέφυρας Wheatstone. Επειδή η R_s είναι πολύ χοντροκομμένη για να δώσει με ακρίβεια μηδενική έξοδο, θα χρησιμοποιήσουμε μια διαφορετική μέθοδο για την ακριβή ρύθμιση. Θα αντισταθμίσουμε (offset) σκόπιμα τον ενισχυτή έτσι ώστε να βγάζει μηδενική έξοδο για μια μικρή μη-μηδενική είσοδο, αυτήν της παραμένουσας εκτός ισορροπίας τάσης της γέφυρας. Για αυτήν την αντιστάθμιση χρησιμοποιείται το ποτενσιόμετρο, R49, πάνω στον Τελεστικό Ενισχυτή (Operational Amplifier), όπως δείχνει η Εικ. 4.10.3.

Για να ετοιμάσετε το κύκλωμα της γέφυρας και του ενισχυτή, ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα:

- Βάλτε το μικρόμετρο στα 10mm (για τη ρύθμιση του μικρόμετρου, δείτε το Παράρτημα Β).
- Θα προσπαθήσουμε να βάλουμε τον μετρητή μηχανικής τάσης στο μέσο της συνολικής διαδρομής του. Χρησιμοποιήστε τον ολισθητήρα για να σπρώξετε τον κυλινδρικό μοχλό (με το ελατήριο) του μετρητή μηχανικής τάσης, μέχρι το αριστερό τέρμα του και σημειώστε την ένδειξη στην κλίμακα του ολισθητήρα (πχ. περίπου 37mm).
- Μετά, σύρτε τον ολισθητήρα προς τα δεξιά ως ότου να μην ασκείται καθόλου πίεση στο μοχλό και σημειώστε πάλι την ένδειξη της κλίμακας (ας πούμε 33mm)
- Βάλτε τον ολισθητήρα στο μέσο μεταξύ των δύο παραπάνω ενδείξεών σας (τυπικά 35mm) και κλειδώστε τον. Ο μετρητής μηχανικής τάσης θα πρέπει τώρα να είναι περίπου στο μέσο της κλίμακας λειτουργίας του.
- Στη γέφυρα Wheatstone βάλτε $R_1 = R_2 = 1k\Omega$ (sw2 και sw6). Η επιλογή της αντίστασης γίνεται με μετατόπιση στην πάνω θέση του αντίστοιχου διακόπτη (οι υπόλοιποι διακόπτες πρέπει να είναι στην κάτω θέση).
- Ανοίξτε το τροφοδοτικό.
- Επιλέξτε στο βολτόμετρο μια κλίμακα γύρω στο 10V (αν είναι αυτόματο, δεν χρειάζεται ρύθμιση) και βάλτε στον τελεστικό ενισχυτή, ενίσχυση 100. Βάλτε το ποτενσιόμετρο, R49, στο μέσο της κλίμακας και ρυθμίστε την R_s (R47) στη γέφυρα Wheatstone έως ότου το όργανο να δείξει όσο κοντύτερα μπορείτε στο μηδέν.
- Τώρα, ρυθμίστε την R49 ώστε να δώσει ακριβώς μηδέν, αυξάνοντας την ευαισθησία του οργάνου και επαναρυθμίζοντας την R49 εναλλάξ έως ότου να έχετε ένδειξη μηδέν στην πιο ευαίσθητη κλίμακα του βολτομέτρου. Περιμένετε πέντε λεπτά να σταθεροποιηθεί το σύστημα και ξαναρυθμίστε για τελευταία φορά το μηδέν με την R49.

Αν ακολουθήσατε όλη την παραπάνω διαδικασία ρύθμισης προσεκτικά ως το τέλος, θα πρέπει να βλέπετε ότι μικρές μετακινήσεις του μοχλού με το μικρόμετρο θα κάνουν την ένδειξη του οργάνου να αλλάζει σε μικρό βαθμό. Συγκεκριμένα, $\pm 1.5\text{mm}$ μετατόπιση θα πρέπει να δίνει κατά προσέγγιση $\pm 75\text{mV}$ έξοδο.

Πάρτε ένα σετ ενδείξεων της τάσης εξόδου για μετατοπίσεις με βήμα 0.5mm, ξεκινώντας από τα 10.0mm, αυξάνοντας ως τα 12.5mm, μειώνοντας ως τα 7.5mm και, τελικά, αυξάνοντας πάλι ως τα 10.0mm. Καταγράψτε τα αποτελέσματά σας σε ένα δικό σας αντίγραφο του πίνακα της Εικ. 4.10.4.

Ένδειξη Μικρομέτρου (mm)	Τάση Εξόδου (mV)
10.0	
10.5	
11.0	
11.5	
12.0	
12.5	
12.0	
11.5	
11.0	
10.5	
10.0	
9.5	
9.0	
8.5	
8.0	
7.5	
8.0	
8.5	
9.0	
9.5	
10.0	

Εικ. 4.10.4

Σχεδιάστε τα αποτελέσματά σας σε μια γραφική παράσταση της τάσης εξόδου ως προς τη θέση του μικρομέτρου.

Ερώτηση 10.5 Είναι η γραμμική η γραφική παράσταση; Αν ναι, ποιά είναι η κλίση της σε Volts/mm;

Ερώτηση 10.6 Τα αποτελέσματα κατά την αύξηση της μετατόπισης συμπίπτουν με εκείνα κατά τη μείωση της μετατόπισης;

Ερώτηση 10.7 Συγκεκριμένα, η τελευταία ένδειξη στα 10.0mm είναι ίδια με την αρχική ένδειξη στα 10.0mm (δηλαδή, περίπου μηδέν);

Αν η απάντηση στην Ερώτηση 10.6 ή 10.7 είναι όχι, αυτό οφείλεται πιθανότατα σε μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας που συνέβη κατά τη διάρκεια που εσείς παίρνατε τη μέτρηση. Αυτές οι θερμοκρασιακές αλλαγές μπορούν να μεταβάλλουν τις τιμές της αντίστασης του μετρητή και της αντίστασης ισορροπίας R_s της γέφυρας κατά διαφορετικά ποσά, αφού πρόκειται για διαφορετικούς τύπους αντιστάσεων τοποθετημένες σε διαφορετικά σημεία.

Ερώτηση 10.8 Μπορείτε να υποδείξετε πως μπορεί να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία ή να μειωθεί;

Στο Παράρτημα Ε δείχνεται ότι:

$$\frac{\delta R}{R} = G \cdot \varepsilon$$

όπου δR είναι η μεταβολή στην αντίσταση του μετρητή

G είναι ένας συντελεστής που ονομάζεται Συντελεστής Βαθμίδας του μετρητή

R είναι η ονομαστική τιμή της αντίστασης του μετρητή και

ε είναι η ανηγμένη τάση (strain) του υλικού του μετρητή.

Πρόβλημα 10.1 Γνωρίζοντας την ενίσχυση του τελεστικού ενισχυτή και την τάση τροφοδοσίας της γέφυρας και δεδομένου ότι ο συντελεστής $G = 2.2$ για το μετρητή που χρησιμοποιείτε και $R = 120\Omega$, υπολογίστε τον παράγοντα που συνδέει τη μεταβολή στην τάση εξόδου με τη μεταβολή στην ανηγμένη τάση ε (σε Volts εξόδου ανά μονάδα μεταβολής της ανηγμένης τάσης). Ίσως χρειαστεί να ανατρέξετε στην εξίσωση για το V_{oc} για μια γέφυρα Wheatstone στο Παράρτημα C.

Ίσως, σαν απάντηση στην Ερώτηση 10.8, να έχετε υποδείξει ότι αν ένας δεύτερος, ίδιος, μετρητής μηχανικής τάσης είχε προσαρμοστεί στην άλλη πλευρά της ορθογώνιας ράβδου και είχε χρησιμοποιηθεί στον κλάδο ισορροπίας της γέφυρας, στη θέση της R_s , οι θερμοκρασιακές μεταβολές θα είχαν επηρεάσει εξ'ίσου τους δύο μετρητές, αφήνοντας ανεπηρέαστη την ισορροπία της γέφυρας.

Ερώτηση 10.9 Μπορείτε να δείτε κάποιο άλλο πλεονέκτημα σε αυτή τη διάταξη;

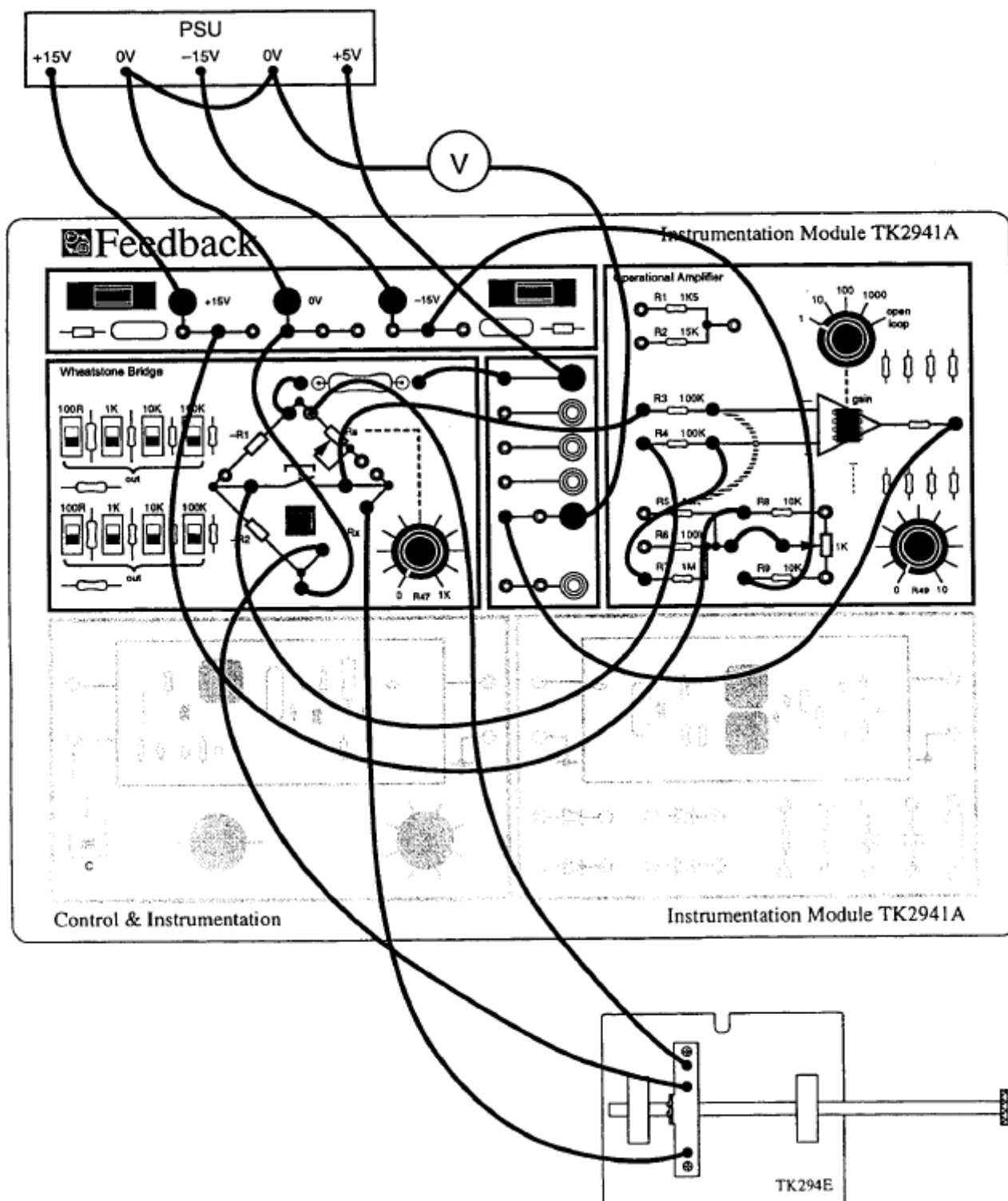
ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 10.2

Ο Διπλός Μετρητής Μηχανικής Τάσης

Πραγματοποιήστε τις συνδέσεις του κυκλώματος της Εικ. 4.10.5. Μολονότι οι δύο μετρητές μηχανικής τάσης έχουν τυπικά την ίδια αντίσταση, μπορεί να παραμένει κάποια μικρή εκτός ισορροπίας τάση στη γέφυρα, γι'αυτό διατηρούμε και σ'αυτό το κύκλωμα το ποτενσιόμετρο εξισορρόπησης R49.

Στη γέφυρα Wheatstone βάλτε $R_1 = R_2 = 1k\Omega$.

Βάλτε τον κυλινδρικό μοχλό λειτουργίας στην ίδια μέση θέση, όπως το είχατε στην Πρακτική Άσκηση 10.1 και ξαναρυθμίστε το R49 ώστε να πάρετε ακριβώς μηδέν, όπως πριν. Αν δείτε ότι δεν μπορείτε να επιτύχετε ισορροπία, μεταφέρετε το καλώδιο από την R7 στην άλλη είσοδο στον ενισχυτή, όπως δείχνεται με τη διακεκομμένη γραμμή στην Εικ. 4.10.5 και προσπαθήστε πάλι.



Τώρα, πάρτε μια σειρά ενδείξεων της τάσης εξόδου ως προς τις θέσεις του μικρόμετρου, όπως πριν (10.0 ως 12.5, κάτω στα 7.5 και πάλι πάνω ως τα 10.0mm) και καταγράψτε τις σε έναν όμοιο πίνακα.

Εικ. 4.10.5

Σχεδιάστε τα αποτελέσματά σας στην ίδια γραφική παράσταση που φτιάξατε πριν.

Ερώτηση 10.10 Είναι τα καινούργια σας αποτελέσματα απαλλαγμένα από τα αποτελέσματα της θερμικής μετατόπισης;

Ερώτηση 10.11 Ποιά είναι η κλίση της νέας γραφικής παράστασης;

Θα πρέπει να βρείτε ότι η κλίση είναι περίπου διπλάσια εκείνης της προηγούμενης γραφικής σας παράστασης λόγω της επιπλέον ευαισθησίας που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας δύο μετρητές οι οποίοι κάμπτονται σε αντίθετες διευθύνσεις.

Η κάμψη της ορθογώνιας ράβδου είναι ανάλογη προς τη μεταβολή του μήκους των δύο πλευρών της που είναι σε συμπίεση και σε επιμήκυνση. Καθώς οι μετρητές είναι προσαρμοσμένοι με τους αγωγούς τους παράλληλα προς τον άξονα της ράβδου, το μήκος αυτών των αγωγών θα αλλάζει ανάλογα. Μη ξεχνάτε ότι το εμβαδόν της διατομής και η ειδική αντίσταση των αγωγών αλλάζουν επίσης. Οποιοσδήποτε αλλαγές στο φάρδος στην κάθετη διεύθυνση δεν προστίθεται λόγω της διεύθυνσης στην οποία είναι τοποθετημένοι οι αγωγοί. Αυτό προκαλεί μια μεταβολή της αντίστασης που δίνεται από τον τύπο ο οποίος αποδεικνύεται στο Παράρτημα Ε:

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\delta l}{l}(1 - 2\mu) + \frac{\delta \rho}{\rho}$$

όπου, l είναι το ολικό μήκος των αγωγών του μετρητή μηχανικής τάσης, ρ είναι η ειδική τους αντίσταση και R είναι η ολική αντίσταση. Το δ δηλώνει τις μικρές μεταβολές (δηλαδή, δl , $\delta \rho$ και δR είναι μικρές μεταβολές του μήκους, της ειδικής αντίστασης και της αντίστασης των αγωγών, αντίστοιχα) και μ είναι ο Λόγος Poisson του αγωγού.

Αλλά το $\frac{\delta l}{l}$ είναι ένα μέτρο της μηχανικής τάσης (λέγεται και ανηγμένη επιμήκυνση) ε στο μετρητή. Αυτή είναι η ίδια με την μηχανική τάση ε της ράβδου στο σημείο που είναι προσαρμοσμένος ο μετρητής. Αυτός είναι ο λόγος που αυτός ο τύπος μετατροπεί ονομάζεται ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ (STRAIN GAUGE).

Η παραπάνω εξίσωση συχνά γράφεται σαν:

$$\frac{\delta R}{R} = G \cdot \varepsilon$$

όπου ο παράγων G ονομάζεται ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ (GAUGE FACTOR) και η τυπική του τιμή είναι γύρω στα 2.1 για ορισμένους τύπους μετρητών.

Ο G εξαρτάται από τις αλλαγές στο μήκος, το εμβαδόν και την ειδική αντίσταση και συζητιέται εκτενέστερα στο Παράρτημα Ε.

Όμως, από τη θεωρία της εκτός ισορροπίας γέφυρας Wheatstone (Παράρτημα Γ) για μικρές μεταβολές, το $\frac{\delta R}{R}$ είναι ανάλογο προς την έξοδο του οργάνου. Συνεπώς, η έξοδος του οργάνου είναι ανάλογη προς τη μηχανική τάση (την ανηγμένη επιμήκυνση), η οποία με τη σειρά της είναι ανάλογη προς τη θέση του ολισθητήρα (του μικρομέτρου, δηλαδή).

Και είναι αυτή η σχέση που έχουμε αποδείξει με τις γραφικές παραστάσεις σε αυτή την εργασία.

ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ

Αν και η γέφυρα Wheatstone δεν είναι ιδιαίτερα βολική μέθοδος για το συχνό προσδιορισμό των πραγματικών τιμών των αντιστάσεων, στην περίπτωση του μετρητή μηχανικής τάσης ενδιαφερόμαστε μόνο για τις αλλαγές των τιμών των αντιστάσεων και, άπαξ και έχουμε ισορροπίσει τη γέφυρα στη μέση θέση, είναι μια πολύ απλή μέθοδος για να παίρνουμε ένα σήμα ανάλογο προς την μηχανική τάση. Στην περίπτωση που χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν πολλοί μετρητές, όπως, για παράδειγμα, όταν θέλουμε να ελέγξουμε την κατανομή των μηχανικών τάσεων κατά μήκος μιας μεγάλης κατασκευής, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε εξοπλισμό ηλεκτρονικής καταγραφής του σήματος των μετρητών για να παίρνουμε και να καταγράψουμε τις μετρήσεις τους γρήγορα, εύκολα και να τις σώνουμε για να τις αναλύουμε κατόπιν.

Ο ιδανικός μετρητής έχει μεγάλο συντελεστή, αλλά, στην πράξη, τα περισσότερα υλικά, τα οποία έχουν μεγάλο G , έχουν άλλα χαρακτηριστικά που τα καθιστούν ακατάλληλα για χρήση σε μετρητές μηχανικής τάσης. Ιδανικά, η μεταβολή της αντίστασης θα πρέπει να είναι γραμμική, δηλαδή, το G θα πρέπει να είναι σταθερό. Αυτό σχεδόν ισχύει στους μετρητές σύρματος ή λεπτού ελάσματος (βλέπε παρακάτω) για μικρές μεταβολές. Επίσης, είναι πλεονέκτημα να έχουμε λογική τιμή της αντίστασης, έτσι ώστε η μεταβολή της με την μηχανική τάση να είναι σημαντική. Αυτό πετυχαίνεται σε μια μικρή επιφάνεια τυλίγοντας τον αγωγό σε σχήμα ζικ-ζακ. Οι μετρητές πρέπει να προστατεύονται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που μπορούν να αλλοιώσουν τον αγωγό, ενώ είναι απαραίτητη η προσεκτική τοποθέτησή του ώστε να αποφύγουμε φαινόμενα που οφείλονται στη διαφορετική θερμοκρασιακή διαστολή του μετρητή και του αντικειμένου πάνω στο οποίο τοποθετείται. Οπωσδήποτε, οι θερμοκρασιακές μεταβολές θα επηρεάζουν επίσης την αντίσταση του ίδιου του μετρητή.

Σε μια εργασία παρακάτω ασχολούμαστε με τις μεταβολές της αντίστασης με τη θερμοκρασία. Αυτές μπορούν να αντισταθμιστούν έχοντας έναν όμοιο μετρητή, από την ίδια παρτίδα μετρητών του ίδιου κατασκευαστή, τοποθετημένο σε ένα κομμάτι του ίδιου υλικού χωρίς μηχανική τάση με τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως ο ενεργός μετρητής. Αυτός ο ΨΕΥΤΙΚΟΣ ΜΕΤΡΗΤΗΣ (DUMMY GAUGE), όπως λέγεται, συνδέεται σε έναν άλλο κλάδο της γέφυρας Wheatstone, π.χ. την R_s , για να εξισορροπεί τον ενεργό μετρητή. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε αλλαγή της θερμοκρασίας θα επηρεάζει το ίδιο τον ενεργό και τον ψεύτικο μετρητή και η γέφυρα θα παραμένει σε ισορροπία.

Συχνά είναι δυνατόν να συνδέσουμε σε σειρά δύο ή περισσότερους μετρητές για να παίρνουμε μεγαλύτερη έξοδο. Στη ράβδο μας τοποθετήσαμε έναν όμοιο μετρητή στην άλλη πλευρά της έτσι ώστε ο ένας μετρητής να συμπιέζεται και ο άλλος να επιμηκύνεται. Καθώς τους συνδέσαμε σε απέναντι κλάδους της γέφυρας, τα αποτελέσματά τους προστίθενται. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διορθώσουμε για τις μηχανικές τάσεις σε μια διεύθυνση που δεν χρειάζεται. Για παράδειγμα, αν η ορθογώνια ράβδος μας υπόκειται σε μια άμεση επιμήκυνση καθώς και σε μια κάμψη, χρησιμοποιώντας δύο μετρητές, όπως παραπάνω, το αποτέλεσμα της επιμήκυνσης θα εξουδετερωνόταν. Οι μετρητές μηχανικής τάσης σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι ευαίσθητοι μόνο σε έναν άξονα. Υπάρχουν μέθοδοι, τις οποίες αναφέρουμε παρακάτω, για να μετράμε τις μηχανικές τάσεις σε περισσότερες από μια διευθύνσεις. Οι μετρητές μηχανικής τάσης έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να προσαρμοστούν σε οποιοδήποτε σημείο μιας κατασκευής, στο οποίο επιθυμούμε να μετρήσουμε τη μηχανική τάση.

Παρόμοιες μέθοδοι με μετρητές μηχανικής τάσης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να μετράμε δυναμικές μηχανικές τάσεις, δηλαδή, μηχανικές τάσεις σε σημεία που είναι σε κίνηση². Σ' αυτές τις περιπτώσεις, μαζί με τη γέφυρα, πρέπει να χρησιμοποιηθούν και ηλεκτρονικές μέθοδοι ενίσχυσης και ανίχνευσης. Συχνά, σ' αυτές τις δυναμικές περιπτώσεις, χρησιμοποιείται ac διαμόρφωση και η τάση εξόδου αποδιαμορφώνεται. Το σύστημα αυτό είναι γνωστό σαν του φέροντος κύματος (carrier wave).

² Ενός σημείου, που βρίσκεται σε κίνηση, η μηχανική τάση μεταβάλλεται γρήγορα. Δυναμική μηχανική τάση είναι η τάση που αλλάζει γρήγορα με το χρόνο. Μια μηχανική τάση που δεν μεταβάλλεται με το χρόνο (ή μεταβάλλεται πολύ αργά) ονομάζεται στατική.

Οι μετρητές μηχανικής τάσης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση φορτίου και ροπής. Αν η δύναμη μεταφέρεται σε ένα ελαστικά παραμορφωνόμενο μεταλλικό μπλοκ, πάνω στο οποίο έχουν προσαρμοστεί μετρητές μηχανικής τάσης, ή σε μια ελαστικά στρεφόμενη ράβδο, στην περίπτωση της ροπής, κάθε μεταβολή της δύναμης θα προκαλεί μια τάση εξόδου του μετρητή μηχανικής τάσης. Τέτοιες διατάξεις είναι γνωστές σαν ΚΥΨΕΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (LOAD CELLS) και σ'αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι παραπάνω τεχνικές μέτρησης.

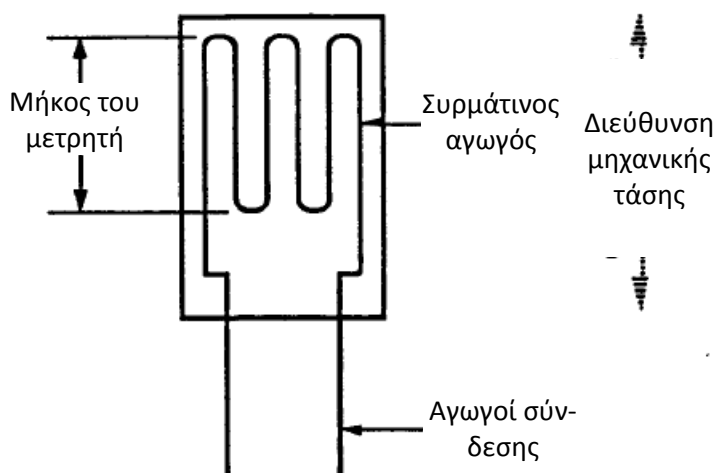
Τύποι Μετρητών Μηχανικής Τάσης

Η διάταξη που χρησιμοποιείται για τη συντριπτική πλειοψηφία των μετρήσεων μηχανικής τάσης είναι ο μετρητής μηχανικής τάσης. Αυτός αποτελείται ουσιαστικά από έναν αγωγό μεγάλου μήκους και πολύ μικρού εμβαδού διατομής. Όταν ο μετρητής προσαρμόζεται στην επιφάνεια του σώματος που είναι να μετρηθεί με τέτοιο τρόπο που να επιμηκύνεται και να συστέλλεται με την επιφάνεια, η παραμόρφωση προκαλεί μια μεταβολή της αντίστασης του αγωγού. Όπως έχουμε δει, ο λόγος της μεταβολής της αντίστασης προς την αντίσταση είναι ανάλογος προς το λόγο της μεταβολής του μήκους προς το αρχικό μήκος του. Αυτό, επομένως, δίνει ένα απ' ευθείας μέτρο της επιμήκυνσης πάνω στη μετρούμενη επιφάνεια.

Μετρητές Μηχανικής Τάσης Σύρματος (Wire Strain Gauges)

Ο πρώτος τύπος μετρητή μηχανικής τάσης, που αναπτύχθηκε, ήταν ο τύπος του μετρητή με μεταλλικό σύρμα που δεν ήταν κολλημένο (unbonded metal wire strain gauge). Αυτός ο τύπος δεν πολυχρησιμοποιείται στις μέρες μας και περιλαμβάνει ένα σύρμα τεντωμένο μεταξύ δύο τερματικών συνδέσεων και χωρίς να είναι κολλημένο πουθενά σε όλο του το μήκος.

Μια πιο συνηθισμένη μορφή μετρητή μηχανικής τάσης σύρματος δείχνεται στην Εικ. 4.10.6. Αυτός ο τύπος ονομάζεται μετρητής μηχανικής τάσης κολλημένου σύρματος (bonded wire strain gauge).



Ο λεπτός συρμάτινος αγωγός είναι κολλημένο πάνω σε μια βάση υλικού, όπως δείχνεται στην εικόνα. Το σύρμα διευθετείται σε αυτό το σχέδιο ζικ-ζακ έτσι ώστε να έχει τη μέγιστη παραμόρφωση κατά μήκος του άξονα του μετρητή (διεύθυνση μηχανικής τάσης) και την ελάχιστη κάθετα σ' αυτόν τον άξονα.

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή του υλικού για τον αγωγό ενός μετρητή μηχανικής τάσης με σύρμα. Προφανώς, η μεταβολή της αντίστασης με τη μεταβολή της μηχανικής τάσης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη και η ειδική αντίσταση του υλικού θα πρέπει να είναι, επίσης,

μεγάλη, ώστε να επιτρέπει να παίρνουμε μια σχετικά μεγάλη τιμή της αντίστασης σε μια μικρή περιοχή. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης του υλικού θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος, ώστε να ελαχιστοποιούνται σφάλματα οφειλόμενα στη θερμοκρασία. Το υλικό των αγωγών σύνδεσης θα πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά έτσι ώστε η επαφή με το συρμάτινο αγωγό να γεννά το μικρότερο δυνατό θερμοηλεκτρικό δυναμικό (θερμοηλεκτρικό φαινόμενο³). Εκτός από αυτές τις ηλεκτρικές απαιτήσεις, ο συρμάτινος αγωγός πρέπει να έχει υψηλή μηχανική αντοχή ώστε να μπορεί να αντέχει στην κλίμακα των μηχανικών τάσεων (επιμηκύνσεων) στις οποίες πρόκειται να υποβληθεί.

Ίσως, το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο υλικό για τον αγωγό είναι η Κονσταντάνη (Constantan), ένα κράμα χαλκού-νικελίου, το οποίο έχει έναν πολύ μικρό θερμικό συντελεστή αντίστασης, μεταξύ $\pm 0.4 \times 10^{-4}$ ανά $^{\circ}\text{C}$ μεταξύ 0°C και 100°C και ειδική αντίσταση $40\Omega\text{m}$ στους 0°C . Ο συντελεστής βαθμίδας ενός μετρητή μηχανικής τάσης με Κονσταντάνη είναι τυπικά μεταξύ 1.9 και 2.1.

Για ειδικές εφαρμογές, για παράδειγμα, σε υψηλές θερμοκρασίες, καμιά φορά χρησιμοποιούνται άλλα κράματα, για παράδειγμα: Nichrome ή πλατίνα-ιρίδιο ή κράματα όπως σίδηρος-νικέλιο-χρώμιο όταν απαιτείται υψηλότερος συντελεστής βαθμίδας (ως και 3.5). Οι διάμετροι των συρματινών αγωγών που χρησιμοποιούνται για μετρητές μηχανικής τάσης είναι γύρω στα 0.025mm.

Το υλικό της βάσης, πάνω στο οποίο είναι κολλημένοι αυτοί οι πολύ λεπτοί συρματινοί αγωγοί και κρατούνται στη θέση τους, μπορεί να είναι πλαστικό ή χαρτί. Συνηθισμένο υλικό βάσης είναι χαρτί νιτροκυτταρίνης (nitrocellulose paper) πάχους περίπου 50μm και είναι κατάλληλο για μετρητές για χρήση στη θερμοκρασιακή κλίμακα -70°C ως $+70^{\circ}\text{C}$. Μετρητές μηχανικής τάσης με βάση τον πολυεστέρα είναι πλέον πολύ συνηθισμένοι και πολύ τύποι απ'αυτούς είναι διαθέσιμοι για λειτουργία μεταξύ -100°C και $+150^{\circ}\text{C}$, ενώ για εργασίες σε υψηλή θερμοκρασία, στην κλίμακα από -100°C ως τους $+300^{\circ}\text{C}$, κατάλληλοι είναι οι μετρητές με βάση από πολυιμίδιο (polyimide). Εποξικά (epoxy) και κεραμικά (ceramic) υλικά είναι επίσης διαθέσιμα για ειδικές εφαρμογές.

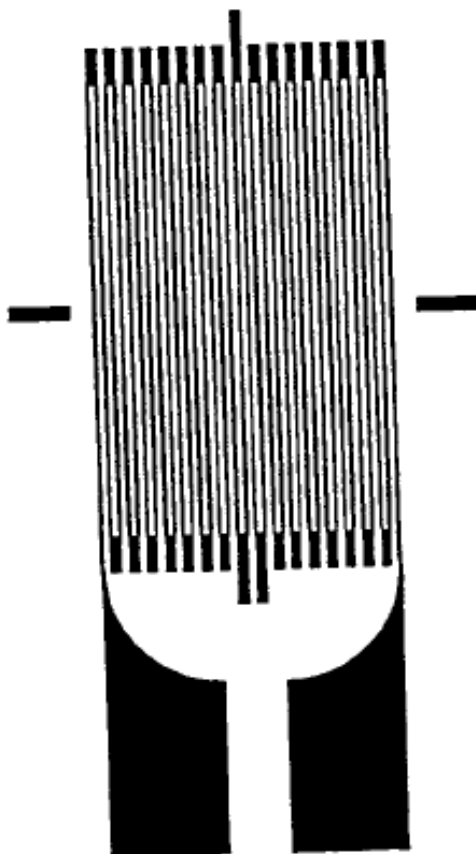
Η κύρια απαίτηση για το υλικό της βάσης είναι η μόνωσή του, καθώς κανονικά είναι πολύ λεπτό. Φυσικά, πρέπει να μονώνει τα ευθύγραμμα κομμάτια του σύρματος μεταξύ τους καθώς και το σύρμα από το αντικείμενο πάνω στο προσαρμόζεται ο μετρητής. Η βάση πρέπει, επίσης, να μην είναι υγροσκοπική, καθώς απορρόφηση νερού θα προκαλεί προβλήματα στη με την αντίσταση και πρέπει να έχει επαρκή μηχανική αντοχή ώστε να αντέχει τις μηχανικές τάσεις στις οποίες θα υποβάλλεται ο μετρητής. Πρέπει, επίσης, να είναι πολύ ισχυρότερη (η βάση) από τον αγωγό, έτσι ώστε όλη η μηχανική τάση να μεταφέρεται στον αγωγό χωρίς να καταπονείται η ίδια.

Μετρητές Μεταλλικής Ταινίας (Metal Foil Gauges)

Αντί να χρησιμοποιεί ένα λεπτό σύρμα για το στοιχείο αντίστασης του μετρητή, αυτός ο τύπος μετρητή μηχανικής τάσης χρησιμοποιεί μια πολύ λεπτή μεταλλική ταινία, η οποία είναι χαραγμένη έτσι ώστε να έχει το ζικ-ζακ σχήμα, όπως και πριν. Η Εικ. 4.10.7 δείχνει τη μορφή ενός τυπικού μετρητή μηχανικής τάσης μεταλλικής ταινίας.

Για ένα μετρητή μηχανικής τάσης μεταλλικής ταινίας συνήθως χρησιμοποιείται φύλλο Κονσταντάνης σε ρολό πάχους μεταξύ 2μm και 10μm. Το φύλλο κολλιέται στο υλικό της βάσης το οποίο μπορεί να είναι οποιοδήποτε από αυτά που περιγράψαμε προηγουμένως για τους μετρητές σύρματος. Με μια διαδικασία φωτολιθογραφίας (εγχάραξη του φύλλου με την επίδραση φωτός), παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τυπωμένων κυκλωμάτων, δημιουργείται η απαιτούμενη μορφή της ταινίας.

³ Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο (thermoelectric effect) είναι η δημιουργία ηλεκτρικού δυναμικού (τάσης) σε ένα αγωγό σαν αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας στα άκρα του ή το αντίστροφο.



Εικ. 4.10.7

Οι μετρητές ταινίας μπορούν να παραχθούν σε μεγάλες ποσότητες ευκολότερα από ότι οι μετρητές σύρματος και επιτρέπουν καλύτερη χρήση μιας ορισμένης επιφάνειας καθώς η διατομή τους είναι ορθογώνια γεγονός που τους δίνει καλύτερο λόγο διατομής/επιφάνεια. Το επάνω μέρος και το κάτω μέρος κάθε βρόγχου συχνά φτιάχνεται φαρδύτερο για να είναι λιγότερο ευαίσθητο στην εγκάρσια μηχανική τάση. Ο συντελεστής βαθμίδας G των μετρητών ταινίας είναι τυπικά μεταξύ 5% και 10%, υψηλότερος από τον αντίστοιχο ενός μετρητή σύρματος, γεγονός που επιτρέπει την κατασκευή μετρητών μικρότερων διαστάσεων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν υψηλότερες μεγαλύτερες μηχανικές τάσεις από ότι οι μετρητές σύρματος, ενώ είναι πολύ πιο ανθεκτικοί, γεγονός που τους κάνει όλο και πιο δημοφιλείς στην επιλογή μεταξύ των δύο τύπων.

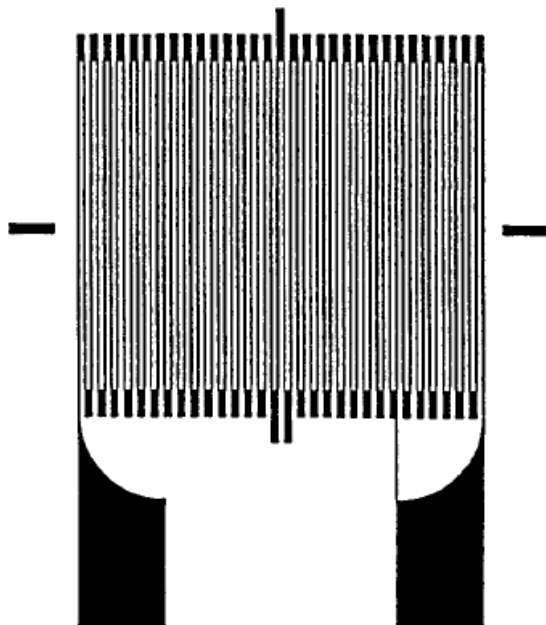
Ημιαγωγικοί Μετρητές Μηχανικής Τάσης (Semiconductor Strain Gauges)

Ένας κρύσταλλος πυριτίου συγκολλημένος σε μια βάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μετρητής μηχανικής τάσης. Ο συντελεστής βαθμίδας είναι μεγάλος, πλησιάζοντας το 100, αλλά είναι δέκα φορές πιο ευαίσθητος στη μεταβολή της θερμοκρασίας από ότι ο μετρητής σύρματος. Η γραμμικότητά του, επίσης, είναι πολύ μικρή, γεγονός που καθιστά τον τύπο αυτό μετρητών κατάλληλο μόνο για πολύ ειδικές εργασίες.

Μετρητές Μηχανικής Τάσης Ροζέτες (Strain Gauge Rosettes)

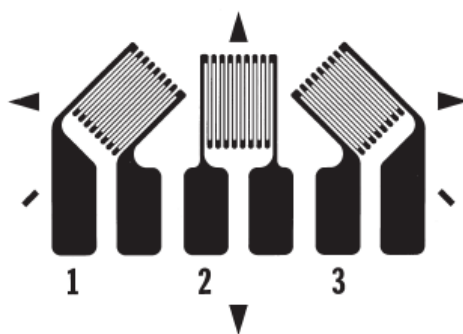
Οι μετρητές μηχανικής τάσης κατασκευάζονται μακρείς και λεπτοί, όπως δείχνεται στην Εικ. 4.10.7, έτσι ώστε μόνον η μηχανική τάση στη διεύθυνση των μακρών αγωγών να προκαλούν μεταβολές στην αντίσταση.

Όταν είναι γνωστό ότι οι μηχανικές τάσεις είναι μονοαξονικές (uniaxial), δηλαδή, όταν οι εγκάρσιες μηχανικές τάσεις μπορούν να αγνοηθούν, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν πιο φαρδύ μετρητή (βλ. Εικ. 4.10.8). Αυτός ο τύπος μπορεί να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια και, επομένως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε υψηλότερη τάση διέγερσης, οπότε να βγάξει μεγαλύτερη τάση εξόδου από τη γέφυρα.

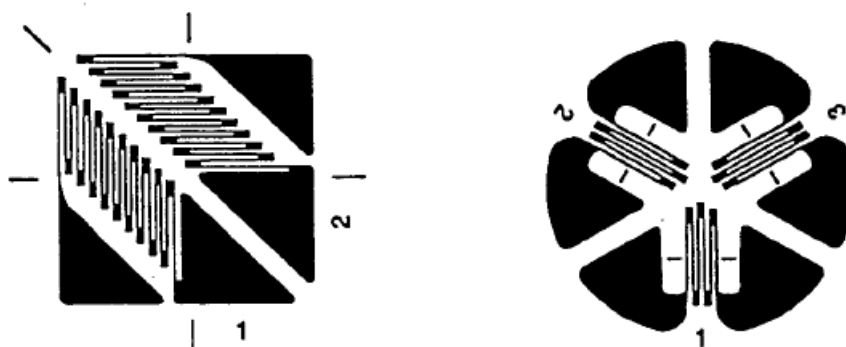


Εικ. 4.10.8

Αν η διεύθυνση της μηχανικής τάσης δεν είναι γνωστή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός μετρητών, όπως δείχνεται στην Εικ. 4.10.9. Εδώ, δύο από τους μετρητές είναι σε 45° γωνία ως προς τον τρίτο. Συνδυάζοντας τις μεταβολές της αντίστασης των τριών μετρητών μπορούμε να συμπεράνουμε τόσο για το μέτρο όσο και για τη διεύθυνση της μηχανικής τάσης. Η διευθέτηση δύο ή περισσότερων μετρητών στο ίδιο κομμάτι βάσης είναι γνωστή σαν **ροζέτα (rosette)**.

Εικ. 4.10.9 Ροζέτα 45°

Υπάρχουν πολλές άλλες μορφές ροζέτας, δύο από τις οποίες δείχνονται στην Εικ. 4.10.10. Η ροζέτα 60° είναι ένας άλλος τύπος που χρησιμοποιείται ευρέως όταν η διεύθυνση της μηχανικής τάσης είναι άγνωστη.



Εικ. 4.10.10 Άλλοι τύποι μετρητών μηχανικής τάσης ροζέτες

Στήριξη των Μετρητών Μηχανικής Τάσης

Οι μετρητές μηχανικής τάσης στις περισσότερες περιπτώσεις προσαρτώνται σταθερά στο εξάρτημα, που βρίσκεται υπό μηχανική τάση, με τη βοήθεια ενός συγκολλητικού ειδικού τσιμέντου. Η επιφάνεια, πάνω στην οποία πρόκειται να κολληθεί ο μετρητής, πρέπει πρώτα να καθαριστεί σχολαστικά και να απομακρυνθούν τυχόν γράσα ή άλλες λιπαντικές ουσίες και θα πρέπει, αν είναι απαραίτητο, να εκτραχυνθεί με τη βοήθεια λεπτού σμυριδόχαρτου. Τότε, ο μετρητής μπαίνει στη θέση του με τσιμέντο. Ο τύπος του τσιμέντου, που χρησιμοποιείται, εξαρτάται από το υλικό της βάσης του μετρητή και τις συνθήκες λειτουργίας του. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι τσιμέντου: με βάση την ακετόνη (acetone based), πολυμερισμού (polymerizing) και κεραμικοί τύποι. Τα τσιμέντα, που βασίζονται στην ακετόνη, δουλεύονται σε θερμοκρασίες δωματίου, ενώ τα τσιμέντα πολυμερισμού μπορούν να δουλεύουν σε θερμοκρασία δωματίου ή υψηλότερη. Αυτά που δουλεύονται σε υψηλότερη από τη θερμοκρασία δωματίου είναι κατάλληλα για μετέπειτα χρήση σε υψηλότερη θερμοκρασία, ως και 20°C υψηλότερη από την αρχική θερμοκρασία στην οποία φτιάχτηκαν. Τα κεραμικά τσιμέντα, τέλος, δουλεύονται με φλόγα και μπορούν να αντέξουν υψηλές θερμοκρασίες.

Με τα τσιμέντα με βάση την ακετόνη χρειάζεται λίγη ή καθόλου συμπίεση κατά το κόλλημα του μετρητή, αλλά τα πολυμερικά τσιμέντα απαιτούν συμπίεση μεταξύ 15×10^3 και $600 \times 10^3 \text{ N}$. Τα κεραμικά τσιμέντα δεν θέλουν συμπίεση. Όπως αναφέραμε παραπάνω, η επιφάνεια, πάνω στην οποία πρόκειται να κολληθεί ο μετρητής με τη βοήθεια του τσιμέντου, πρέπει να καθαρίζεται σχολαστικά και, αν είναι απαραίτητο, να εκτραχύνεται (να την “αγριεύουμε”) πριν τη συγκόλληση και μετά το στέγνωμα του τσιμέντου, συχνά γίνεται στο μετρητή μια προστατευτική επίστρωση ενάντια στην ατμοσφαιρική διάβρωση.