

## STUDIUL MĂRCII TENSOMETRICE (STRAIN GAGE)

### Scopul lucrării

- studiul mărcii tensometrice ca şi senzor
- studiul unor traductoare cu mărci tensometrice

### Consideraţii teoretice

Printre traductoarele pentru măsurarea deformaţiilor şi tensiunilor mecanice un loc important îl ocupă traductoarele rezistive de tip tensometru. Acestea sunt traductoare analogice directe care oferă informaţii despre starea de deformare a unui corp solid, reprezentând o soluţie standard, unanim acceptată pentru măsurarea deformaţiilor, a stărilor de tensiune mecanică, a forţelor şi a cuplurilor de forţe. Tensometrul cu fir metalic se obţine prin lipirea pe un suport izolant a unui fir metalic cu rezistivitate mare, fir care constituie elementul activ al tensometrului. El se aşează în zig-zag astfel încât o parte cât mai mare din lungimea sa să fie orientată în aceeaşi direcţie. Datorită aspectului şi dimensiunilor lor, aceste tipuri de traductoare mai poartă şi denumirea sugestivă de mărci tensometrice. La tensometrul cu fir metalic factorii principali care determină variaţia rezistenţei firului sunt dimensiunile geometrice care se modifică odată cu producerea deformării, iar dintre acestea o pondere determinantă o are variaţia lungimii firului deoarece dimensiunile transversale sunt foarte mici şi variaţiile lor sunt neglijabile.

Mărimile cele mai importante prin intermediul cărora sunt caracterizate performanţele tensometrelor sunt: **sensibilitatea, coeficientul de temperatură al rezistivităţii şi liniaritatea. Sensibilitatea,  $S$** , a unei mărci tensometrice se defineşte ca fiind raportul dintre variaţia relativă a rezistenţei şi variaţia relativă a lungimii firului sau benzii metalice:

$$S = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \frac{L_0}{\Delta L}$$

unde  $R_0$  şi  $L_0$  sunt valorile rezistenţei, respectiv lungimii pentru marca nedeformată,  $\varepsilon$  reprezintă elongaţia, iar  $\Delta R=R-R_0$  şi  $\Delta L=L-L_0$  reprezintă variaţia rezistenţei, respectiv lungimii.

### Materiale necesare

- computer
- programul Micro-cap 12
- programul Scidavis

### Metodologia efectuării lucrării

#### a) Studiul mărcii tensometrice ca şi senzor

În lucrarea de faţă vom studia următoarele mărci tensometrice:

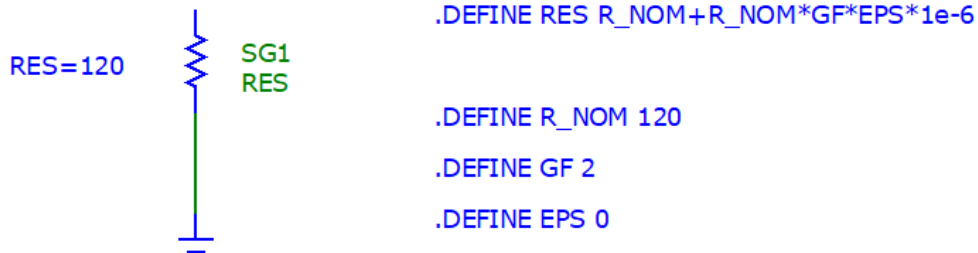
- SGD-6/120-LY13 (grupa 1).
- SGD-7/350-LY11 (grupa 2).
- SGD-7/1000-LY11 (grupa 3).
- SGD-150/240-LY40 (grupa 4).

Pentru modelarea mărcilor tensometrice în Micro-Cap va trebui să introducem nişte comenzi .DEFINE care determină variaţia rezistenţei mărcii în funcţie de ceilalţi parametri exteriori: forţă, elongaţie, deplasare.

- se notează datele de catalog ale mărcii, cu specificaţia semnificaţiei lor: materialul firului metalic, grosimea substratului, dimensiunile substratului, dimensiunile grilei metalice, rezistenţa

nominală ( $R_{nom}$ ), elongația maximă ( $\epsilon_{max}$ ), sensibilitatea (gage factor,  $GF$ ) și tensiunea maximă de alimentare ( $V_{exc}^{max}$ ).

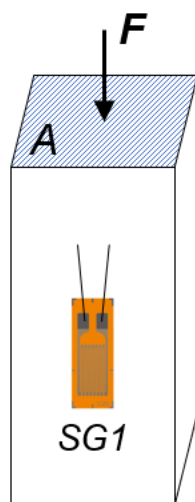
- se realizează montajul de mai jos în Micro-cap 12, SG1 reprezentând marca tensometrică. Rezistența nominală a mărcii se va alege conform datelor din catalog. În figură este reprezentată o marcă tensometrică având o rezistență nominală de 120  $\Omega$ .
- se realizează analiza DC a circuitului, variind parametrul  $EPS$  (elongația) între limitele maxime date în catalog,  $\pm\epsilon_{max}$ , cu pas de 100  $\mu\epsilon$ . Notați faptul că în comanda .DEFINE, elongația trebuie introdusă în unități de microstrain ( $\mu\epsilon$ ). De exemplu, o elongație de 0.01 este egală cu 10000  $\mu\epsilon$ .
- se reprezintă grafic dependența rezistența mărcii  $R(SG1)$  în funcție de elongația  $EPS$ .



- determinați sensibilitatea mărcii tensometrice studiate în  $\Omega/\mu\text{strain}$ , respectiv  $\Omega/\text{mstrain}$ .
- care este rezoluția mărcii dacă pentru măsurarea rezistenței acesteia folosim un ohmmetru cu precizie de 0.1  $\Omega$ ? Dar dacă folosim un ohmmetru cu precizie de 1  $\Omega$ ?
- comentați asupra liniarității caracteristicii rezistență-elongație. Este liniară? De ce? Folosiți-vă de cunoștințele dobândite până acum la curs/seminar.

### b) Traductor de forță cu marcă tensometrică

Dacă o marcă tensometrică este lipită de una din fețele laterale ale unui solid ca în figura de mai jos, putem determina valoarea forței care acționează asupra solidului. Forța  $F$  ce acționează asupra solidului va provoca o elongație  $\epsilon$  a materialului și va duce la apariția unei tensiuni mecanice  $\sigma$ . Dacă știm valoarea modului lui Young,  $E$ , și a ariei secțiunii transversale a corpului,  $A$ , măsurând elongația, putem să determinăm valoarea forței care acționează asupra corpului.

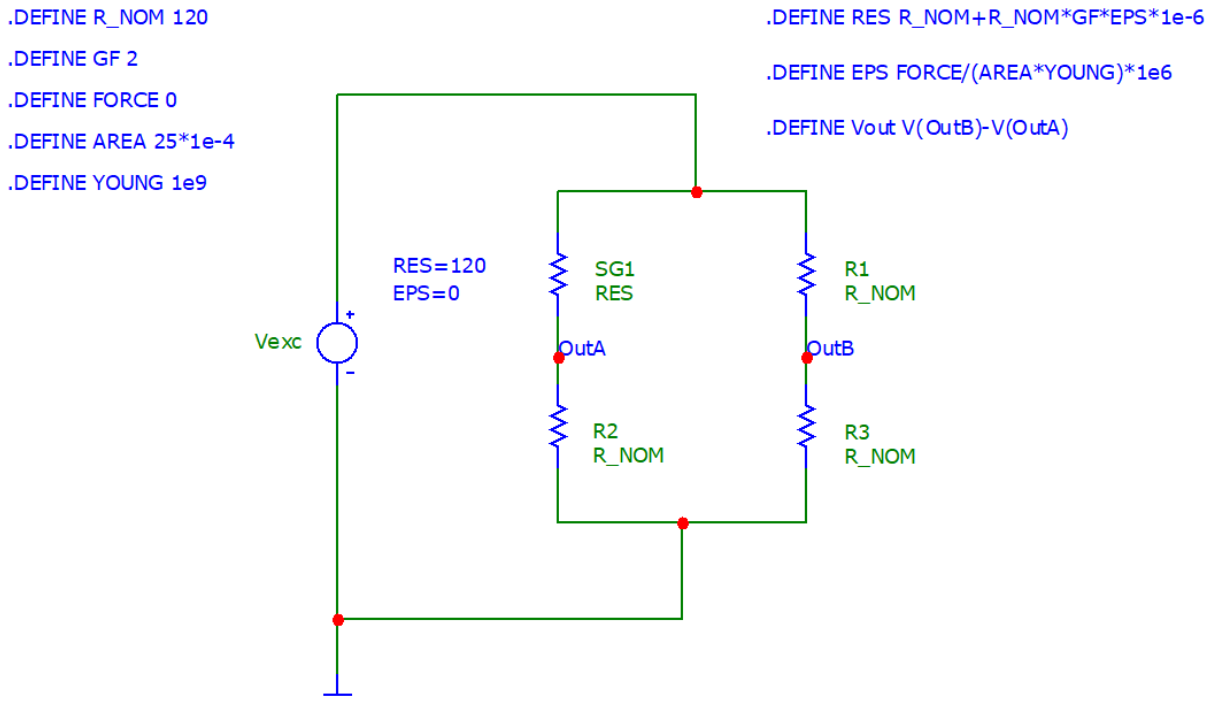


$$F = A\sigma$$

$$\sigma = E\epsilon$$

$$\epsilon = \frac{F}{AE}$$

- marca tensometrică studiată mai sus este lipită de faţa unui corp având aria secţiunii transversale  $A = 25 \text{ cm}^2$  şi modul de elasticitate  $E = 1 \text{ GPa}$ .
- se realizează montajul de mai jos în Micro-cap 12, SG1 reprezentând marca tensometrică. Rezistenţa nominală a mărcii se va alege conform datelor din catalog. Rezistenţele  $R_1$ ,  $R_2$  şi  $R_3$  sunt rezistenţe fixe egale cu valoarea nominală a rezistenţei mărcii. Observaţi faptul că au fost adăugaţi câţiva parametri noi:  $AREA$ ,  $FORCE$ , respectiv  $YOUNG$ , reprezentând aria secţiunii transversale a corpului, forţa aplicată, respectiv modulul lui Young. S-a mai adăugat şi parametrul  $V_{out}$ , reprezentând tensiunea de ieşire, acesta fiind definit ca diferenţa dintre tensiunile nodurilor OutB şi OutA.
- se realizează analiza DC a circuitului, menţinând  $V_{exc} = 5 \text{ V}$  şi variind parametrul  $FORCE$  între 0 şi 1000 N cu un pas de 1 N.
- se reprezintă grafic dependenţa tensiunii de ieşire  $V_{out}$  în funcţie de valoarea forţei aplicate,  $FORCE$ .
- determinaţi sensibilitatea traductorului în V/N.
- care este rezoluţia traductorului dacă pentru măsurarea tensiunii de ieşire folosim un milivoltmetru cu o precizie de 1 mV?

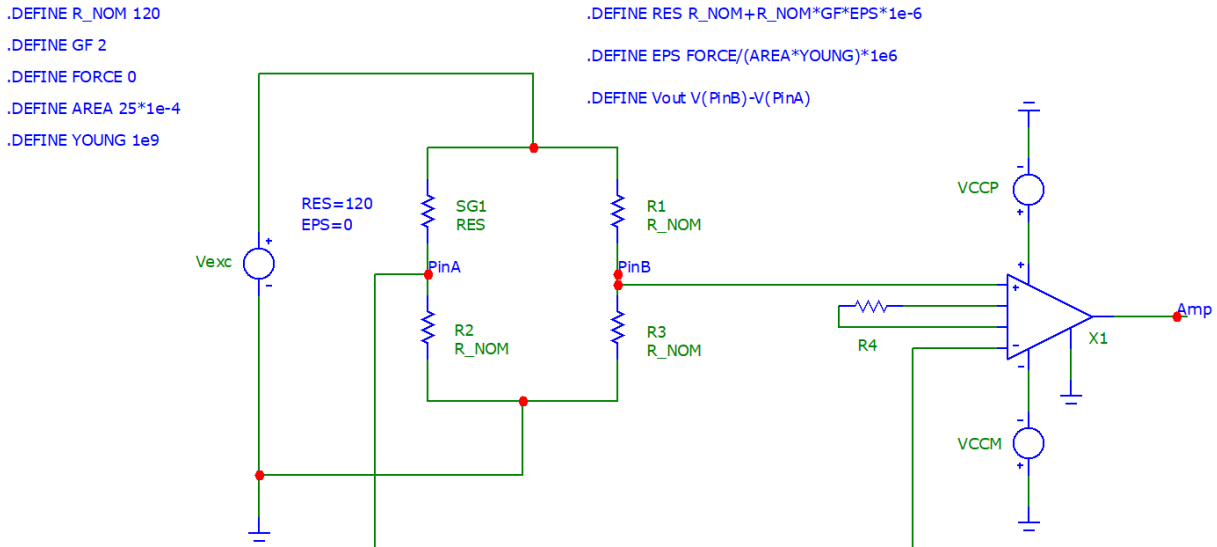


- se realizează analiza DC a circuitului de mai sus, variind în cadrul aceleiaşi analize  $V_{exc}$  între 1 V şi  $V_{exc}^{max}$  cu pas ales astfel încât să aveţi cel puţin 4 valori, respectiv parametrul  $FORCE$  între 0 şi 1000 N cu pas de 1 N.
- se reprezintă grafic dependenţa sensibilităţii de  $V_{exc}$ . Încercaţi să explicaţi această dependenţă folosind cunoştinţele dobândite la curs/seminar.

Să presupunem că dorim să măsurăm forţa cu o rezoluţie de 1 N folosind acest traductor, însă avem la dispoziţie numai un voltmetru cu o precizie de 0.01 V. Pentru a rezolva această problemă vom folosi un amplificator de instrumentaţie AD620 pe care îl vom alimenta simetric cu  $\pm 15 \text{ V}$ .

- se realizează montajul de mai jos în Micro-cap 12. Rezistenţa nominală a mărcii se va alege conform datelor din catalog.
- determinaţi valorile optime ale tensiunii de alimentare a punţii,  $V_{exc}$ , respectiv factorului de amplificare al amplificatorului de instrumentaţie pentru a obţine rezoluţia necesară.
- determinaţi valoarea rezistenţei de gain,  $R_4$ , pentru a obţine factorul de amplificare dorit. Dependenţa factorului de amplificare de rezistenţa de gain este dată în datasheet.

- se realizează analiza DC a circuitului de mai jos, variind parametrul *FORCE* între 0 și 1000 N cu pas de 1 N.
- reprezentați grafic dependența *V(Amp)* în funcție de parametrul *FORCE*.
- determinați sensibilitatea traductorului și rezoluția acestuia ținând cont că avem la dispoziție numai un voltmetru cu o precizie de 0.01 V.
- explicați rezultatele obținute folosindu-vă de cunoștințele dobândite la curs/seminar.

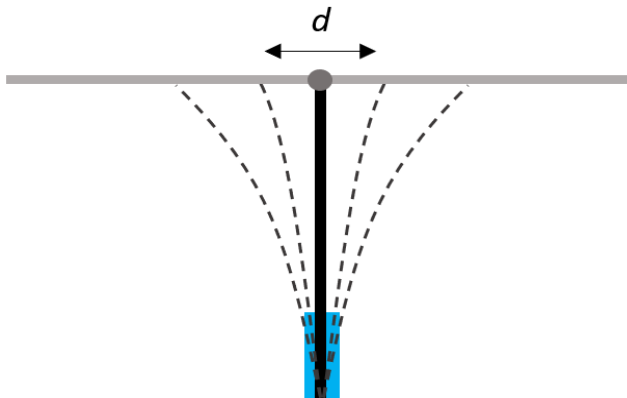


**Temă Bonus** (facultativă): Dorim să conectăm ieșirea acestui traductor la un sistem Arduino Uno pentru a putea face măsurători de forță asistate de calculator, care permit și achiziția automată a datelor. Sistemul Arduino Uno are un convertor analog-digital pe 10 biți (deci o precizie de 5 mV) ce poate citi o tensiune maximă de 5 V. Cum vor fi afectate limitele de măsură, respectiv rezoluția în acest caz? De ce?

### c) Traductor de deplasare cu mărci tensometrice

Mărcile tensometrice pot fi folosite și pentru măsurarea deplasărilor liniare dacă sistemul mecanic este construit corespunzător. În figura de mai jos este prezentată schema de principiu al traductorului de deplasare folosit în laborator. El este compus dintr-o lamelă metalică fixată la un capăt, iar capătul liber este legat de o tijă mobilă. De o parte și de alta a lamelei sunt lipite câte două mărci tensometrice, astfel încât pentru orice valoare nenulă a deplasării, *d*, datorită încovoierii lamelei, două mărci vor suferi compresie (elongație negativă), iar celelalte două vor suferi întindere (elongație pozitivă). Deplasarea tijei va provoca încovoierea lamelei cu o rază de curbură tot mai mică pe măsură ce valoarea deplasării crește. Dependența elongației,  $\epsilon$ , de raza de curbură, *r*, poate fi scrisă astfel:

$$\epsilon = \frac{t}{2r + t}$$



unde *t* reprezintă grosimea substratului mărcii. Pentru variații mici ale lui *r*, dependența elongației de raza de curbură poate fi considerată liniară. Pentru traductorul disponibil în laborator s-a determinat o variație de 100 με a elongației pentru o deplasare a tijei de 1 mm. Astfel, putem să notăm dependența elongației de deplasare ca:

$$\epsilon = kd$$

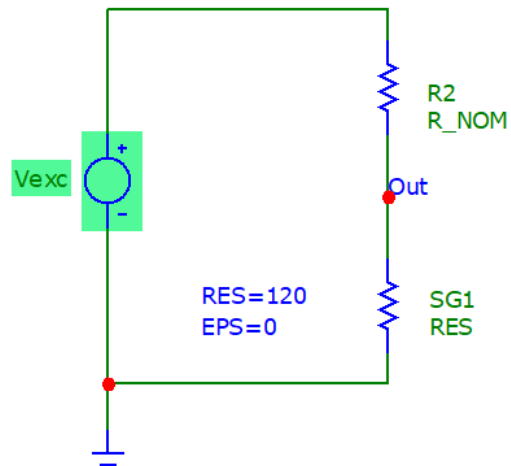
unde  $k = 100 \mu\epsilon/\text{mm}$ .

**c.1) Marca tensometrică într-un divizor de tensiune**

- se realizează montajul de mai jos în Micro-cap 12. Observaţi că a aparut un parametru nou, *DISPL*, ce reprezintă valoarea deplasării în mm. Rezistenţa nominală a mărcii se va alege conform datelor din catalog.
- se realizează analiza DC a circuitului, menţinând  $V_{exc} = 5\text{ V}$  şi variind parametrul *DISPL* între -5 şi 5 mm cu un pas de 0.1 mm.
- se reprezintă grafic dependenţa tensiunii de ieşire  $V(\text{Out})$  în funcţie de parametrul *DISPL*.
- determinaţi sensibilitatea traductorului în V/mm.
- care este rezoluţia traductorului dacă pentru măsurarea tensiunii de ieşire folosim un milivoltmetru cu o precizie de 1 mV?

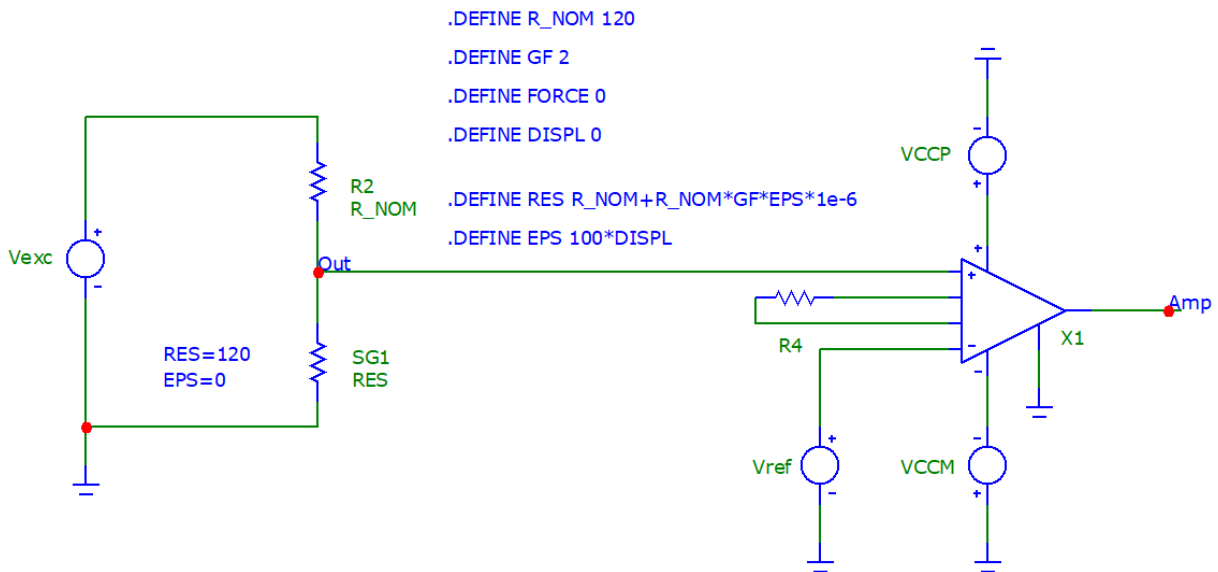
```
.DEFINE R_NOM 120
.DEFINE GF 2
.DEFINE FORCE 0
.DEFINE DISPL 0

.DEFINE RES R_NOM+R_NOM*GF*EPS*1e-6
.DEFINE EPS 100*DISPL
```



Pentru creşterea sensibilităţii şi implicit a rezoluţiei traductorului putem amplifica semnalul de ieşire al divizorului folosind un amplificator de instrumentaţie AD620 alimentat simetric cu  $\pm 15\text{ V}$ .

- se realizează montajul de mai jos în Micro-cap 12, alegând  $V_{exc} = 5\text{ V}$ . Rezistenţa nominală a mărcii se va alege conform datelor din catalog.



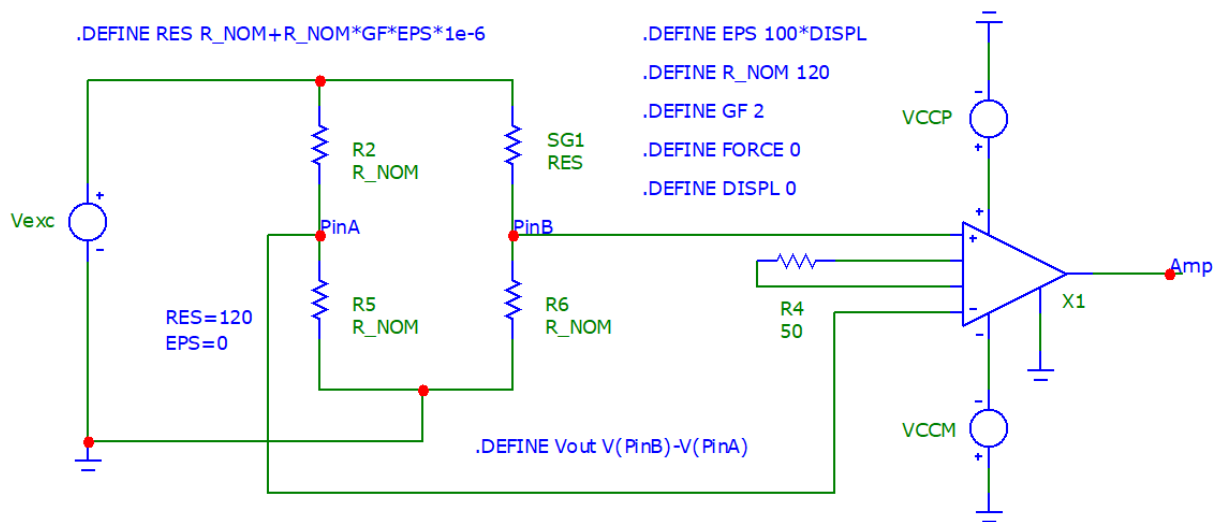
- determinaţi valoarea rezistenţei de gain,  $R4$ , pentru a obţine un factor de amplificare 1000. Dependenţa factorului de amplificare de rezistenţa de gain este dată în datasheet.
- se realizează analiza DC a circuitului, variind parametrul *DISPL* între -5 şi 5 mm cu pas de 0.1 mm.

- reprezentați grafic dependența  $V(\text{Amp})$  în funcție de parametrul  $DISPL$ .
- determinați sensibilitatea traductorului și rezoluția acestuia ținând cont că avem la dispoziție numai un voltmetru cu o precizie de 0.01 V.
- explicați rezultatele obținute folosindu-vă de cunoștințele dobândite la curs/seminar.

### c.2) Marca tensometrică într-o punte

Acest experiment reliefează performanțele sistemului de măsură cu marca tensometrică plasată în una din ramurile unei punți de curent continuu Wheatstone, comparativ cu sistemul de măsurare cu divizor de tensiune.

- se realizează montajul de mai jos în Micro-cap 12, alegând  $V_{exc} = 5$  V. Rezistența nominală a mărcii se va alege conform datelor din catalog.



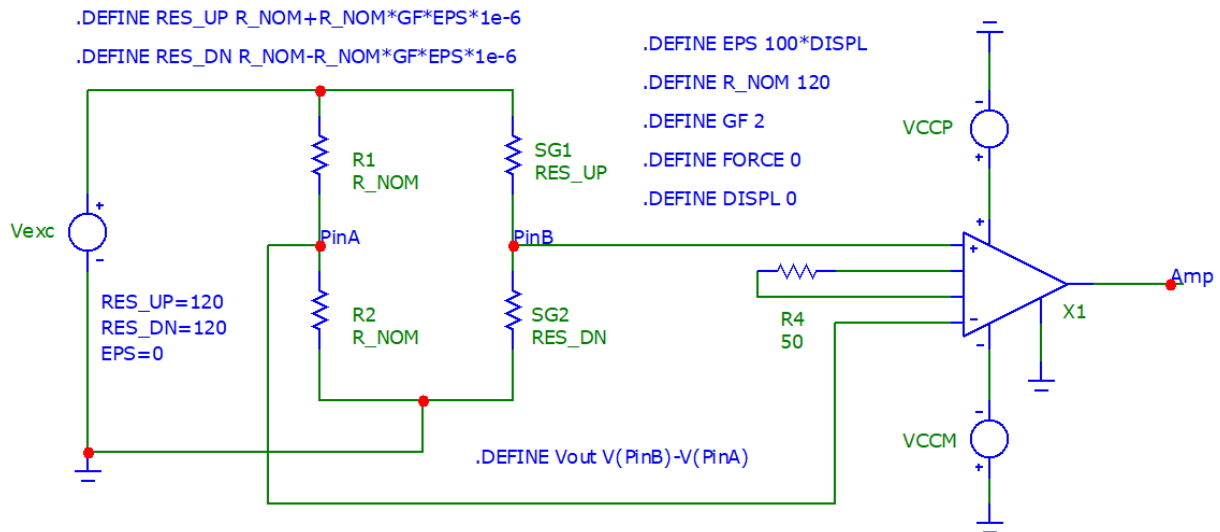
- se realizează analiza DC a circuitului, variind parametrul  $DISPL$  între -5 și 5 mm cu pas de 0.1 mm.
- reprezentați grafic dependența  $V(\text{Amp})$  în funcție de parametrul  $DISPL$ .
- determinați sensibilitatea traductorului și rezoluția acestuia ținând cont că avem la dispoziție numai un voltmetru cu o precizie de 0.01 V.
- comparați rezultatele obținute pentru puntea ce conține o marcă tensometrică cu rezultatele obținute în cazul punții tensometrice în divizor. Există diferențe? Dacă da, de ce? Dacă nu, de ce?

### c.3) Două mărci tensometrice în ramurile adiacente ale unei punți de curent continuu

Acest experiment determină performanțele sistemului de măsură în care, în două din ramurile punții de curent continuu sunt plasate mărci tensometrice: una care se contractă și una care se dilată odată cu deformarea lamei elastice pe care sunt lipite.

- se realizează montajul de mai jos în Micro-cap 12, alegând  $V_{exc} = 5$  V. Rezistența nominală a mărcii se va alege conform datelor din catalog. Observați că în această schemă avem două mărci tensometrice,  $SG1$  (întindere) și  $SG2$  (comprimare), ce au valori ale rezistenței  $RES_{UP}$ , respectiv  $RES_{DN}$ , care corespund creșterii sau scăderii rezistenței mărcii în cazul întinderii, respectiv comprimării.
- se realizează analiza DC a circuitului, variind parametrul  $DISPL$  între -5 și 5 mm cu pas de 0.1 mm.
- reprezentați grafic dependența  $V(\text{Amp})$  în funcție de parametrul  $DISPL$ .

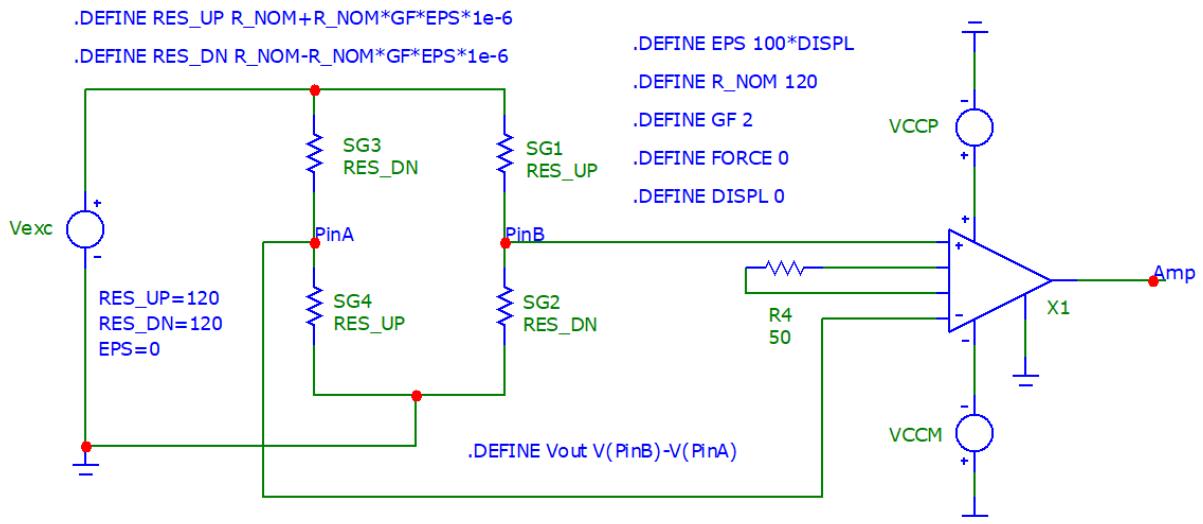
- determinați sensibilitatea traductorului și rezoluția acestuia ținând cont că avem la dispoziție numai un voltmetru cu o precizie de 0.01 V.
- comparați rezultatele obținute aici cu cele obținute în cazul utilizării unei singure mărci într-o punte de curent continuu. Există diferențe? De ce?



#### c.4) Puntea tensometrică

Acest experiment determină performanțele sistemului de măsură în care, în toate cele patru ramuri ale punții de curent continuu sunt plasate mărci tensometrice: două care se contractă și două care se dilată odată cu deformarea lamei elastice pe care sunt lipite.

- se realizează montajul de mai jos în Micro-cap 12, alegând  $V_{exc} = 5$  V. Rezistența nominală a mărcii se va alege conform datelor din catalog.



- se realizează analiza DC a circuitului, variind parametrul *DISPL* între -5 și 5 mm cu pas de 0.1 mm.
- reprezentați grafic dependența  $V(\text{Amp})$  în funcție de parametrul *DISPL*.
- determinați sensibilitatea traductorului și rezoluția acestuia ținând cont că avem la dispoziție numai un voltmetru cu o precizie de 0.01 V.
- comparați rezultatele obținute aici cu cele obținute în cazul utilizării unei singure mărci, respectiv în cazul utilizării a două punți într-o punte de curent continuu. Există diferențe? De ce?