جَامعة المَنارة
MANARA UNIVERSITY

حساسات ومجسات

المحاضرة السابعة

د.م. خولة حموي
khawla.hamwi@gmail.com

العام الدراسي: ٢٠٢٣-٢٠٢٤

عناوين المحاضرة

- حساسات العزم Torque sensors
  - الحساسات الكهروانضغاطية Piezoelectric Transducers
  - حساس العزم المعتمد على الانحراف المباشر Direct-Deflection Torque Sensor
  - حساس العزم ذو الممانعة المتغيرة Variable Reluctance Torque Sensor
  - حساسات العزم المعتمدة على قياس الالتواء Strain-Gage Torque Sensors
  - متطلبات التصميم Design Considerations

حساسات العزم Torque sensors

- يعتبر تحسس القوة والعزم أمراً ضرورياً ومفيداً في العديد من التطبيقات:

١. في التحكم بالحركات الدقيقة ومهام التجميع، حيث أن خطأ بسيط في الحركة ممكن أن يسبب قوى كبيرة مدمرة أو انخفاض في جودة المنتج

٢. في أنظمة التحكم غير السريعة بالشكل الكافي والتي تستخدم تغذية خلفية بالحركة فقط، يمكن استخدام تغذية عكسية أو أمامية بالقوة لتحسين الدقة

حساسات العزم Torque sensors

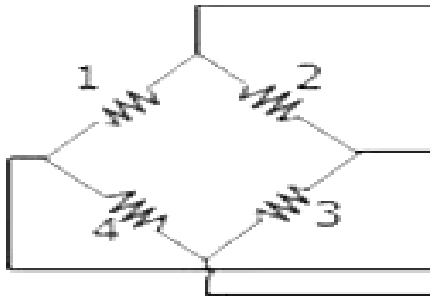
- تتضمن الطرق الشائعة لتحسس العزم:

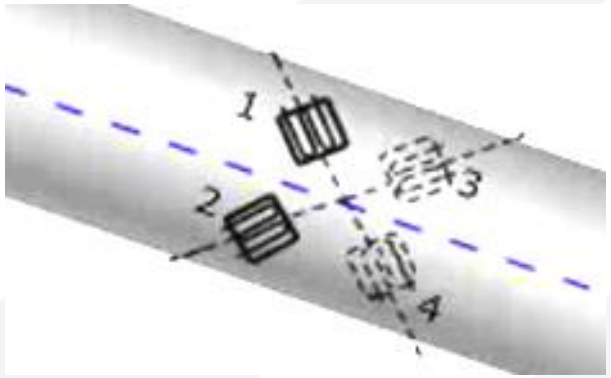
١. قياس مباشر للعزم باستخدام الحساسات الكهروانضغاطية

٢. قياس الالتواء في العنصر المتحرك من خلال الدارة الجسرية

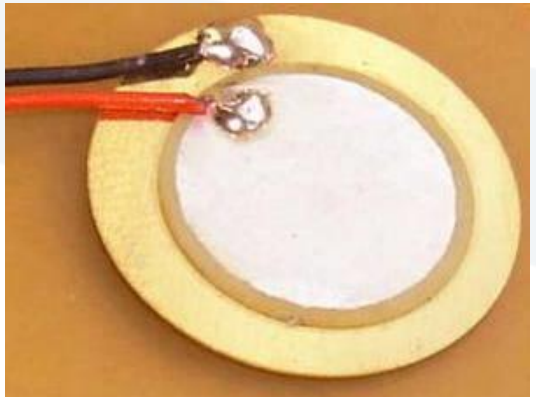
٣. في المحركات الكهربائية، قياس تيار الحقل الذي يولد عزم المحرك

٤. قياس التسارع الزاوي الناتج عن عزم غير معلوم في عنصر عطالة محدد



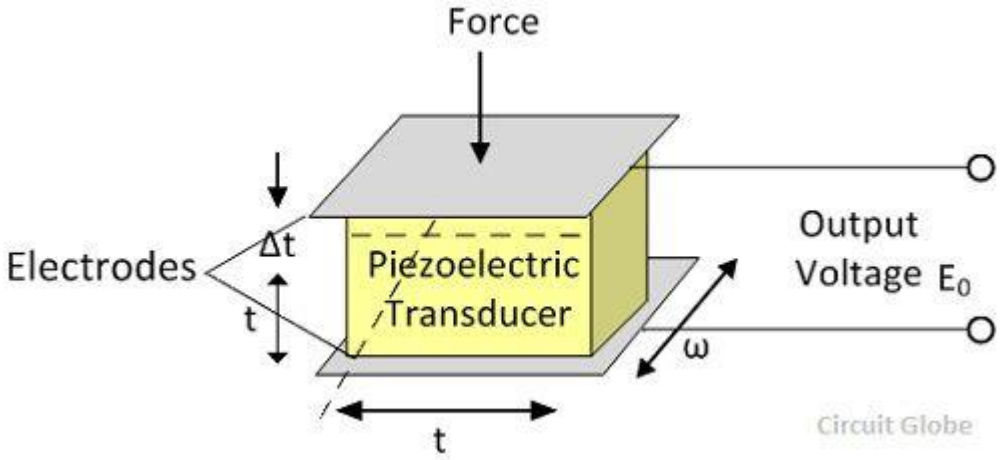


الحساسات الكهرو انضغاطية



- يمكن لبعض المواد كبلورة الكوارتز توليد شحنة كهربائية عند تعرضها لإجهاد ميكانيك أو التواء

- يُستخدَم التأثير الكهروانضغاطي في:
  ١. أجهزة قياس الضغط، الالتواء، القوة، العزم
  ٢. في شاشات اللمس



- تعتمد قطبية الشحنة على اتجاه القوة المطبقة

$$Charge\ Q = d \times F\ Coulomb$$

حيث:

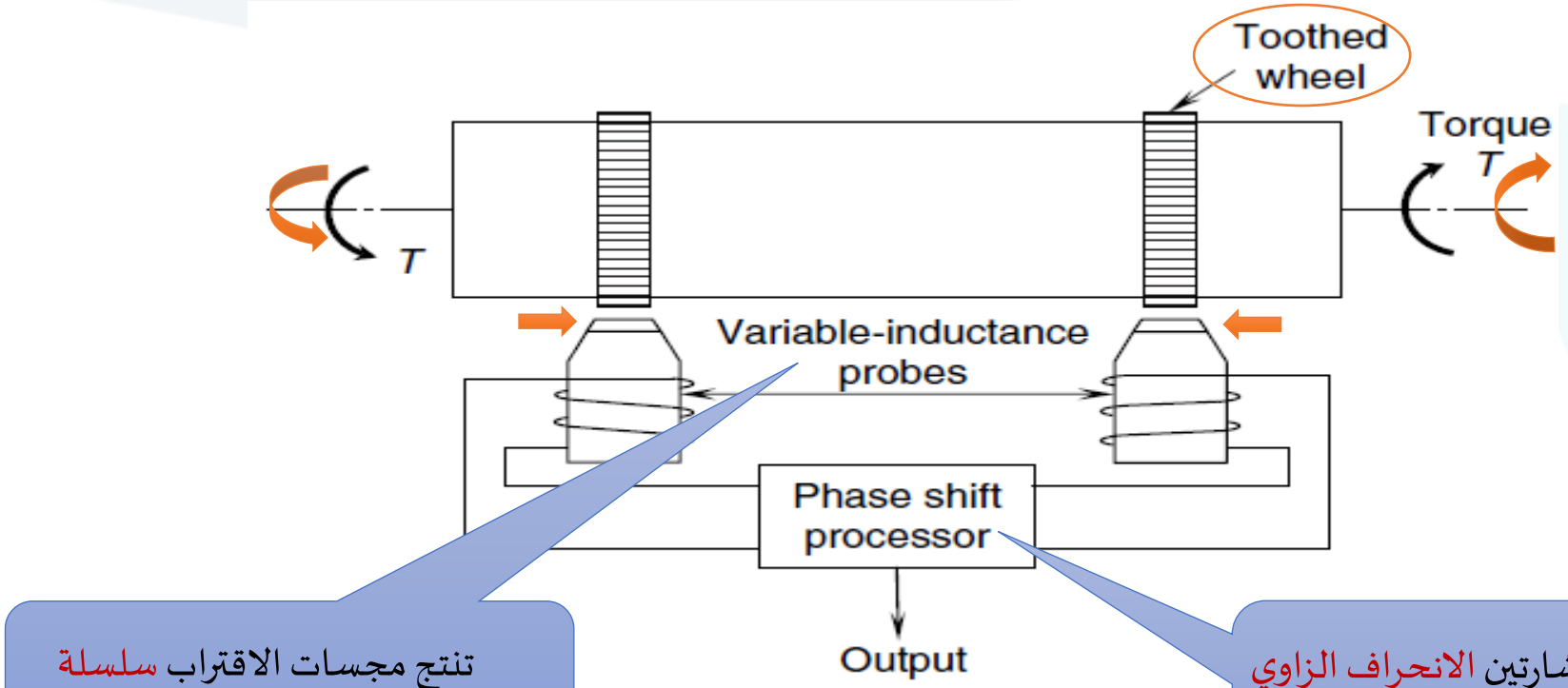
d: حساسية الشحنة للبلورة (الكريستال)

F: القوة المطبقة بالنيوتن

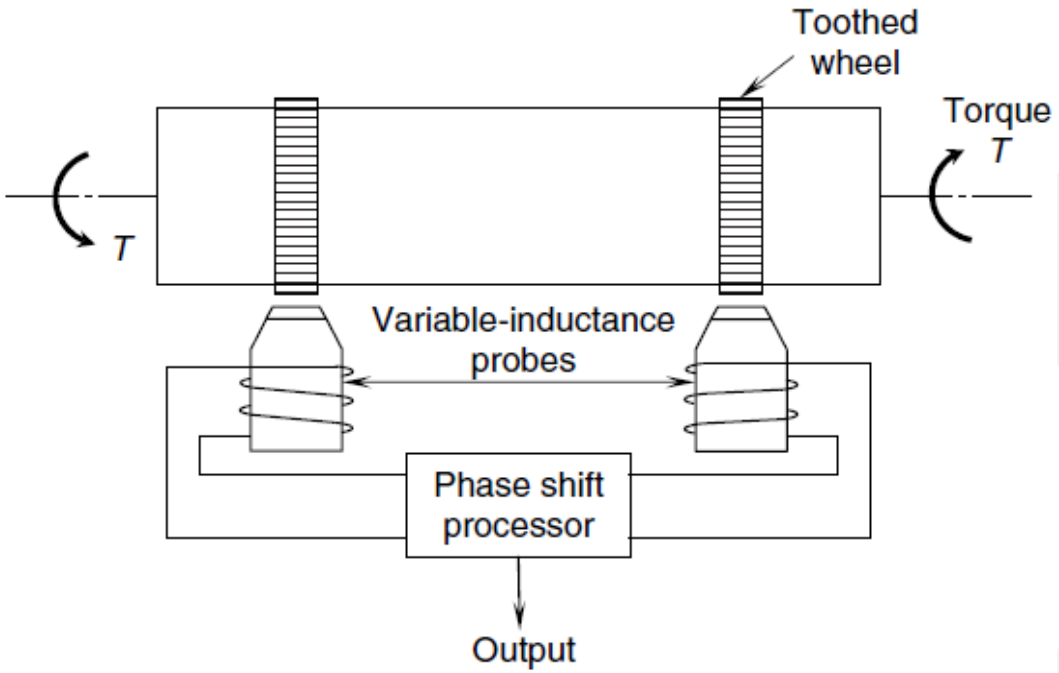
المعامل الكهروانضغاطي لبلورة الكوارتز يساوي $2.3 * 10^{-12}$ C/N

حساس العزم المعتمد على الانحراف المباشر

- يمكن استخدام القياس المباشر لزاوية الالتواء في حساب عزم الدوران



حساس العزم المعتمد على الانحراف المباشر



- يمكن قياس كل من قيمة واتجاه عزم الدوران

$$T = \frac{GJ\phi}{Ln}$$

حيث:

G : هو معامل القص لعنصر الالتواء

J: هو the polar moment لمنطقة عنصر الالتواء (يعبر عن الكمية المستخدمة لتوقع قدرة جسم ما على مقاومة الالتواء)

Φ: إنزياح الطور بين إشارتي مجسات الاقتراب

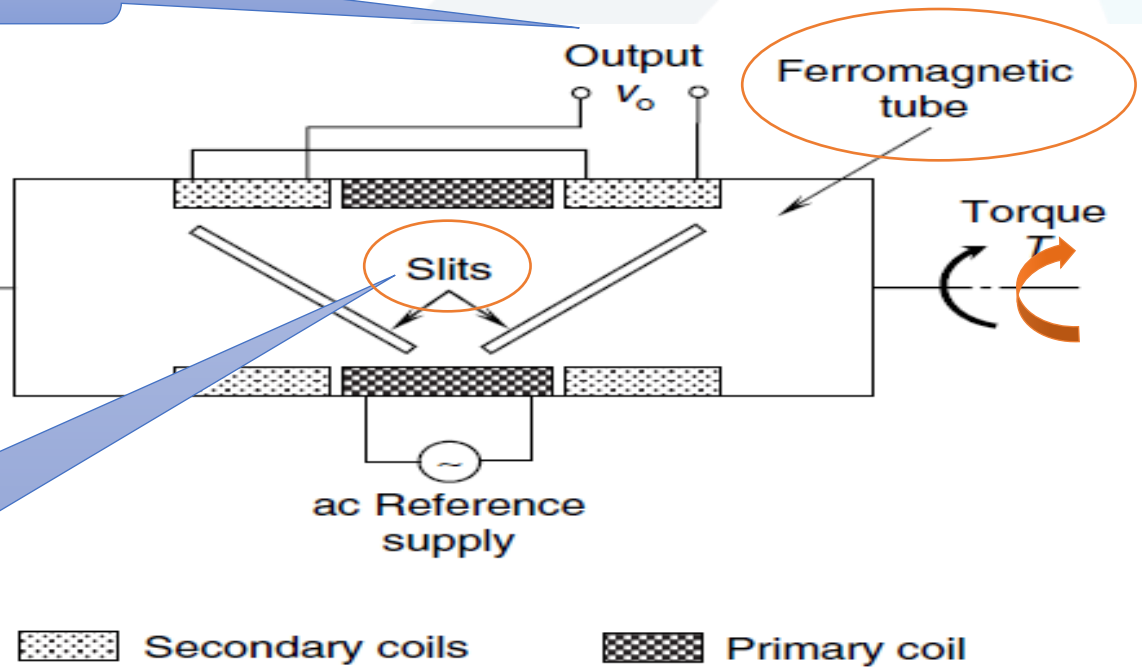
L: التباعد المحوري لمجسات الاقتراب

n: هو عدد الأسنان في كل مسنن

حساس العزم ذو الممانعة المتغيرة

- يعمل هذا الحساس كمحول تفاضلي
- عنصر تحسس العزم عبارة عن أنبوب مغناطيسي حديدي به شقان موضوعان في اتجاه الضغوط الأساسية

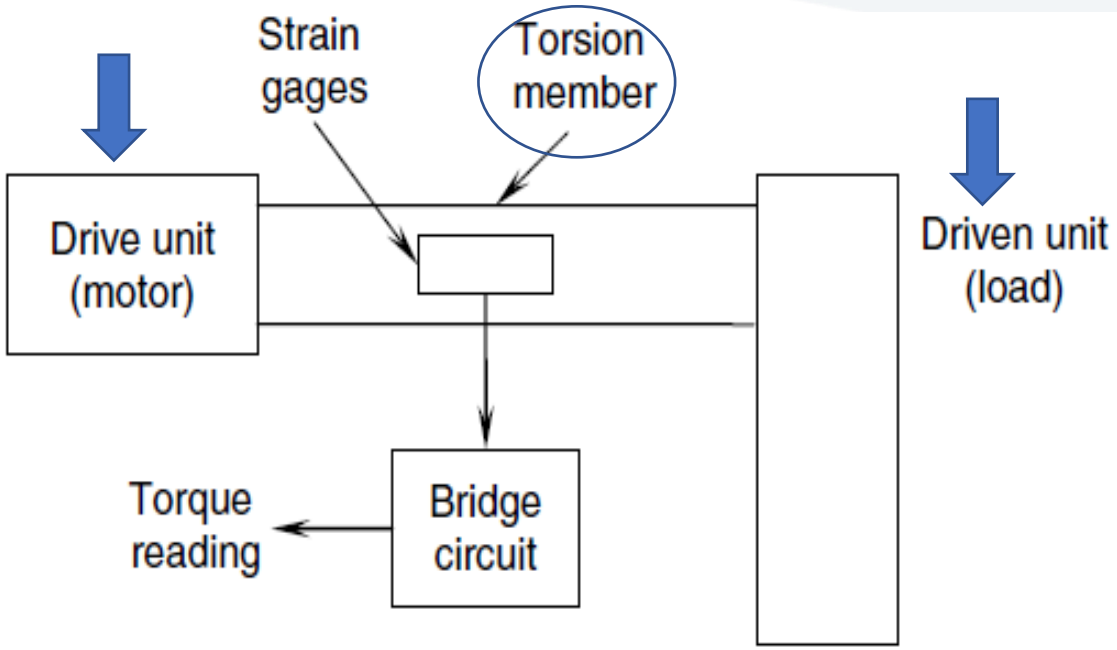
جهد الخرج هو مقياس لعزم الدوران المرسل



عندما يتم تطبيق عزم الدوران ، يتم فتح شق واحد وإغلاق آخر مما يؤدي إلى تغيير في الممانعة

حساسات العزم المعتمدة على قياس الالتواء

- الطريقة المباشرة لقياس العزم هي وصل عنصر الالتواء (torsion member) بين وحدة القيادة (المحرك) والحمل على التسلسل وقياس العزم فيه



Torque sensing using a torsion member

- من أجل محور دوار ، علاقة الالتواء بالعزم:

$$\varepsilon = \frac{r}{2GJ}T,$$

- وإجهاد القص τ عند نصف قطر r يساوي

$$\tau = \frac{Tr}{J}.$$

- T هو العزم المرسل خلال عنصر الالتواء
- ε الالتواء الأساسي عند نصف قطر r
- J هو polar moment
- G هو معامل القص للمادة

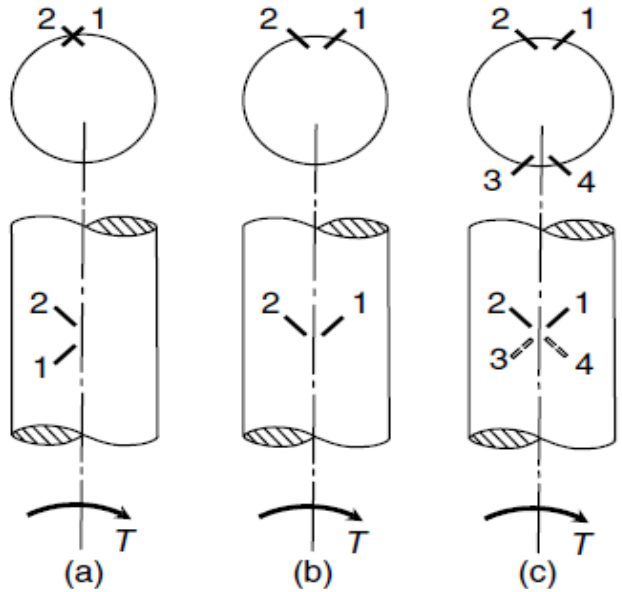
حساسات العزم المعتمدة على قياس الالتواء

- باستخدام معادلة الجسر العامة

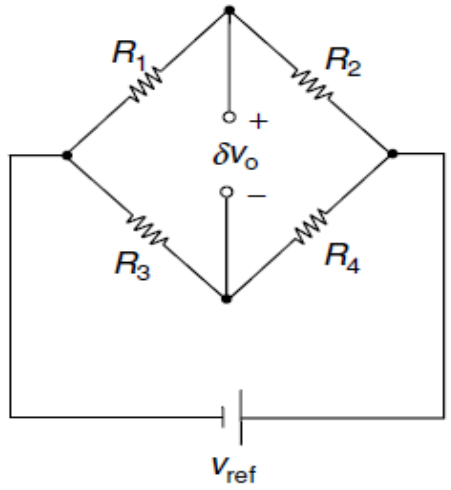
$$\frac{\delta v_o}{v_{\text{ref}}} = \frac{k}{4} S_s \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{r}{2GJ} T \Rightarrow \frac{\delta v_o}{v_{\text{ref}}} = \frac{krTS_s}{8GJ} \Rightarrow T = \frac{8GJ}{krS_s} \frac{\delta v_o}{v_{\text{ref}}}$$

Configuration	(a)		(b)		(c)
Bridge constant (k)	2		2		4



Strain gage configurations for a circular shaft torque sensor



Strain-gage bridge

متطلبات التصميم

١. سعة الالتواء:

الحد الأقصى للإجهاد الذي يتم التعامل معه بواسطة عنصر الالتواء يتعلق بعدة عوامل مثل المتانة أو القوة يجب عدم تجاوز حدود سعة الالتواء المحددة من قبل المُصَنّع

$$\frac{r}{2GJ}T_{max} < \varepsilon_{max}, \quad \Leftarrow \quad J > \frac{r}{2G}\frac{T_{max}}{\varepsilon_{max}},$$

حيث εmax و Tmax محددين

٢. حدود عدم خطية قياس الالتواء:

من أجل الالتواءات الكبيرة، تصبح معادلة مقياس الالتواء غير خطية بشكل متزايد من أجل لاخطية محددة يمكن تحديد حد أعلى للالتواء

$$\frac{r}{2GJ}T_{max} = \varepsilon_{max} \leq \frac{N_p S_1}{50 S_2}. \quad \Leftarrow \quad J \geq \frac{25S_2}{GS_1}\frac{T_{max}}{N_p},$$

حيث S1 يمثل معامل الالتواء الخطي، S2 يمثل درجة اللاخطية، Np النسبة المئوية للاخطية و Tmaxمحدد

متطلبات التصميم

٣. متطلبات الحساسية:

يتم وصل جسر قياس الالتواء إلى مضخم تفاضلي، يأخذ الفرق ويضخم الخرج

حساسية الحساس مقبولة بالنسبة إشارة خرج المضخم التفاضلي في الدارة الجسرية

$$v = K_a \delta v_o,$$

من الشريحة ١٠

$$T = \frac{8GJ}{krS_s}\frac{\delta v_o}{v_{ref}} \quad \Leftarrow \quad v_o \le \frac{K_a k S_s r v_{ref}}{8GJ} T_{max}, \quad \Leftarrow \quad J \le \frac{K_a k S_s r v_{ref}}{8G}\frac{T_{max}}{v_o},$$

حيث Ka ربح المضخم ، vo وTmax محددين

متطلبات التصميم

٤. متطلبات الصلابة:

من أجل محور طوله L ونصف قطره r ، زاوية الالتواء θ تطابق التواء قص يعطى بالعلاقة

$$\gamma = \frac{r\theta}{L}$$

وإجهاد قص يعطى بالعلاقة

$$\tau = \frac{Gr\theta}{L}.$$

من الشريحة ٩

$$\tau = \frac{Tr}{J}.$$

الصلابة

$$K_s = \frac{T}{\theta} = \frac{GJ}{L}.$$

$$J \geq \frac{L}{G}K,$$

حيث K محددة

Design Criteria for a Strain-Gage Torque-Sensing Element

Criterion	Specification	Governing Formula for Polar Moment of Area (*J*)
Strain capacity of strain-gage element	ε_{max} and T_{max}	$> \frac{r}{2G}.\frac{T_{max}}{\varepsilon_{max}}$
Strain-gage nonlinearity	N_p and T_{max}	$> \frac{25rS_2}{GS_1}.\frac{T_{max}}{N_p}$
Sensor sensitivity	v_o and T_{max}	$\leq \frac{K_a k S_s r v_{ref}}{8G}.\frac{T_{max}}{v_o}$
Sensor stiffness (system bandwidth and gain)	K	$\geq \frac{L}{G}.K$

متطلبات التصميم

مثال:

لدينا عنصر التواء أنبوبي بمواصفات كالتالي:

50Hz وعرض حزمة للنظام تبلغ ε_{max}= 3000 με ; Np= 5%; Vo=10V

يتم استخدام جسر به أربعة مقاييس ضغط فعالة لقياس عزم الدوران في عنصر الالتواء.

بفرض لديك البارامترات التالية:

1. For strain gages:
   $S_s = S_1 = 115, S_2 = 3500.$
2. For the torsion element:
   Outer radius $r = 2$ cm
   Shear modulus $G = 3 \times 10^{10}$ N/m^2
   Length $L = 2$ cm.
3. For the bridge circuitry:
   $v_{ref} = 20$ V and $K_a = 100.$

العزم الأعظمي المتوقع Tmax=10Nm

باستخدام هذه القيم صمم عنصر الالتواء للحساس

متطلبات التصميم

الحل: يمكن حساب J باستخدام العلاقات الأربعة المبينة في الجدول المذكور سابقاً:

1. For $\varepsilon_{max} = 3000\ \mu\varepsilon$:

$$J = \frac{0.02 \times 10}{2 \times 3 \times 10^{10} \times 3 \times 10^{-3}}\ \text{m}^4 = 1.11 \times 10^{-9}\ \text{m}^4. \qquad > \frac{r}{2G} \cdot \frac{T_{max}}{\varepsilon_{max}}$$

2. For $N_p = 5$:

$$J = \frac{25 \times 0.02 \times 3500 \times 10}{3 \times 10^{10} \times 115 \times 5}\ \text{m}^4 = 1.01 \times 10^{-9}\ \text{m}^4. \qquad > \frac{25 r S_2}{G S_1} \cdot \frac{T_{max}}{N_p}$$

3. For $v_o = 10$ V:

$$J = \frac{100 \times 4 \times 115 \times 0.02 \times 20 \times 10}{8 \times 3 \times 10^{10} \times 10}\ \text{m}^4 = 7.67 \times 10^{-8}\ \text{m}^4. \qquad \leq \frac{K_a k S_s r v_{ref}}{8G} \cdot \frac{T_{max}}{v_o}$$

4. For $K = 2.5 \times 10^3$ N m/rad:

$$J = \frac{0.02 \times 2.5 \times 10^3}{3 \times 10^{10}}\ \text{m}^4 = 1.67 \times 10^{-9}\ \text{m}^4. \qquad \geq \frac{L}{G} . K$$

من أجل حساس مقبول يجب أن تكون J محققة للعلاقات:

$$J \geq (1.11 \times 10^{-9}) \quad \text{and} \quad (1.01 \times 10^{-9}) \quad \text{and} \quad (1.67 \times 10^{-9}) \quad \text{and} \quad J \leq 7.67 \times 10^{-8}\ \text{m}^4.$$

نختار $J = 7.67 \times 10^{-8}\ \text{m}^4$ وبالتالي فإن ثخانة الأنبوب كبيرة بشكل كافٍ لإرسال الحمل.