

ETUDE DE LA CARACTERISTIQUE DU SYSTEME PNEUMATIQUE DE MESURE TYPE ETAMIC COMBINE AVEC UN CAPTEUR A INJECTION

Mohamed Bouaziz

Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Mécanique, laboratoire de recherche Génie Mécanique et Développement, 10, Avenue Hacén Badi, BP 182, El Harrach, 16200 Alger, Algérie

Abstract. In this paper, the study of the etamic characteristic with pneumatic sensor defined by B.N. Markow and E.I. Ped, is presented. The theoretical study shows that this system has a characteristic that the sensitivity increases with the dimension between the measurement sprinkler and the workpiece control, a result that can be obtained with measure ordinary sprinkler. The experiment is performed at high pressure (4 bars) by taking into account the characteristic parameters of the system. The paper also includes a calculation for determining the measurement sprinkler with which the measurement errors are reduced.

1 Introduction

A nos jours, les systèmes pneumatiques de mesure sont très utilisés dans l'industrie mécanique pour le contrôle dimensionnel des pièces mécaniques en raison de leurs avantages (mesure sans contact, autonettoyage des pièces à contrôler, entretien facile, possibilité d'obtenir des amplifications élevées, appareils robustes et fiables, etc.).

L'appareil étamic a une caractéristique théorique linéaire, ce qui lui confère une qualité métrologique intéressante, mais la zone linéaire de sa caractéristique expérimentale est réduite. En effet, on observe une résistance de l'écoulement de l'air à travers le gicleur de mesure aux faibles valeurs de la cote entre le gicleur et la pièce à mesurer, et un étranglement aux valeurs élevées de cette cote. Sa sensibilité est donc diminuée aux cotes élevées.

Le capteur pneumatique de mesure défini par B.N. Markow et E. I. Ped [1], que nous appelons capteur à injection, permet d'augmenter la zone linéaire par rapport à un gicleur de mesure ordinaire. Il peut même provoquer une dépression dans sa chambre de mesure.

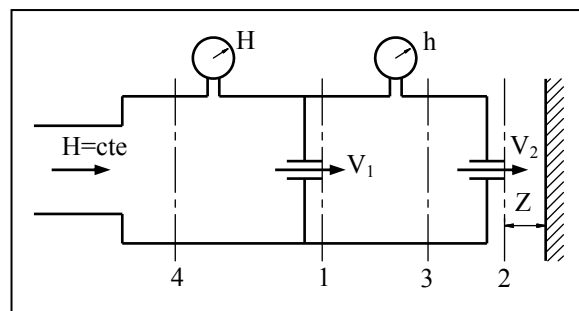
La combinaison de l'étamic avec ce capteur à injection pourrait alors donner une caractéristique métrologique exploitable avantageusement, particulièrement en contrôle actif (sur poste d'usinage automatisé par exemple).

L'étude du système repose sur la loi fondamentale des appareils pneumatiques classiques de mesure. Nous jugeons utile d'indiquer le fondement des formules générale et simplifiée régissant ces appareils.

2 Equation de base des systèmes pneumatiques classiques de mesure

La fig.1 illustre le principe de mesure avec ces systèmes.

Figure 1. Principe de base des systèmes pneumatiques de mesure [2]



En mesure pneumatique, on admettant que l'air est un gaz parfait et que l'écoulement est adiabatique, ce qui permet d'utiliser la relation :

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} = cte \quad (1)$$

γ désigne le coefficient adiabatique de l'air. P , ρ et V sont respectivement la pression absolue, la densité volumique, et la vitesse d'écoulement dans la section considérée.

Mohamed.bouaziz@enp.edu.dz ; mbouazizdz@yahoo.fr

En appliquant cette relation entre les sections 1 et 4, et entre 2 et 3, et compte tenu du principe de la conservation de masse :

$$\rho_2 S_2 V_2 = \rho_1 S_1 V_1 \quad (2)$$

on obtient l'équation suivante; l'effet de restriction de la section d'écoulement à travers les gicleurs n'étant pas pris en compte :

$$h = \frac{I}{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_3} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right]} \left\{ V_4^2 - \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 V_3^2 + \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\frac{H}{\rho_4} + P_{atm} \left(\frac{1}{\rho_4} - \frac{1}{\rho_1} \right) - \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \left(\frac{1}{\rho_3} - \frac{1}{\rho_2} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

En métrologie pneumatique, cette expression est inutilisable sous cette forme complexe. On se contente d'employer une autre forme plus simple moyennant certaine hypothèses simplificatrices :

- sections S_2 et S_1 de même ordre de grandeur et très faibles devant celles S_3 et S_4 qui, elles aussi, de même ordre de grandeur (en pratique, $d_2 \leq 2$ mm, $d_1 < 1,5$ mm, $d_3 \approx d_4 \geq 6$ mm)
- écoulement incompressible (en pratique $Z \leq 0,2$ mm permet d'admettre que l'écoulement est incompressible)

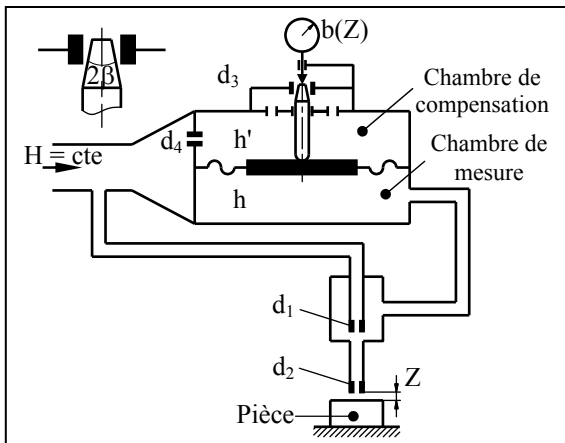
Compte tenu de ces hypothèses, la relation précédente prend la forme simplifiée suivante qui est l'équation fondamentale des systèmes pneumatiques de mesure :

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2} \quad (4)$$

3 Equation du système étamic-capteur à injection

La figure 2 illustre ce système de mesure.

Figure 2. Schéma de principe de l'étamic combiné avec un capteur à injection



La pression h dans la chambre de mesure est donnée par l'expression suivante [1, 2] :

$$h = \frac{2H \left(\frac{S_2}{S_1} - \varepsilon \right)}{2 \left(\frac{S_2}{S_1} - \varepsilon \right) - \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2} \quad (5)$$

avec : $\varepsilon = \frac{\rho_1}{\rho_2}$ (6)

La pression dans la chambre de compensation est obtenue en appliquant la relation fondamentale simplifiée, ce qui permet d'écrire :

$$h' = \frac{H}{1 + \left(\frac{S_3}{S_4} \right)^2} \quad (7)$$

A l'état d'équilibre de la membrane et en admettant qu'elle est parfaitement souple et en négligeant les actions mécanique (forces de frottement, action du ressort, poids du disque lié à la membrane, etc), on peut écrire, $h = h'$. Tous calculs faits, on obtient [3, 4] :

$$S_3 = \frac{S_2 S_4}{S_1 \sqrt{2 \left(\varepsilon - \frac{S_2}{S_1} \right)}} \quad (8)$$

S_1 et S_4 sont des sections circulaires de diamètres d_1 et d_4 respectivement. S_2 est la surface latérale d'écoulement de l'air entre la pièce et le gicleur de mesure de diamètre d_2 . S_3 est la surface d'écoulement de l'air entre l'orifice de diamètre d_3 et le pointeau. On a :

$$S_2 = \pi d_2 Z \quad (9)$$

$$S_3 = \pi b \sin \beta \left(d_3 - \frac{b}{2} \sin 2\beta \right) \quad (10)$$

La relation (8) devient :

$$\frac{\sin 2\beta}{2} b^2 - b d_3 + \frac{\left(\frac{d_4}{d_1} \right)^2 d_2 Z}{\sin \beta \sqrt{2 \left(\varepsilon - \frac{4d_2 Z}{d_1^2} \right)}} = 0 \quad (11)$$

Cette équation résolue par rapport à b et compte tenu de la condition $b = 0$ pour $Z = 0$, donne :

$$b = \frac{d_3}{\sin 2\beta} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \left(\frac{d_4}{d_1} \right)^2 d_2 Z \cos \beta}{d_3^2 \sqrt{2 \left(\varepsilon - \frac{4d_2 Z}{d_1^2} \right)}}} \right] \quad (12)$$

En utilisant l'approximation :

$$\sqrt{1-A} \cong 1 - \frac{1}{2}A \quad (13)$$

on aura finalement :

$$b = \frac{1}{\sin\beta} \cdot \left(\frac{d_4}{d_1}\right)^2 \cdot \frac{d_2}{d_3} \cdot \frac{Z}{\sqrt{2\left(\varepsilon - \frac{4d_2Z}{d_1^2}\right)}} \quad (14)$$

Cette relation montre que lorsque Z tend vers la quantité $\frac{\varepsilon d_1^2}{4d_2}$, $b(Z)$ tend vers une asymptote verticale

$Z_{\max} = \frac{\varepsilon d_1^2}{4d_2}$. La sensibilité $k_z = \frac{db}{dZ}$ augmente donc avec

l'augmentation de Z et prend des valeurs élevées à partir d'une cote proche de Z_{\max} .

La relation (14) montre aussi, comme pour l'appareil étamic seul, que la pression d'alimentation H n'intervient pas, mais, il est évident que son effet sur la caractéristique du système étudié n'est pas négligeable. En effet, on montre qu'à haute pression (écoulement sonore) [5], le débit est proportionnel à la cote Z dans un grand intervalle de variation de cette cote.

Dans nos travaux [3, 4], nous avons étudié le système combiné "étamic-captur à injection" à basse pression (1 à 2 bar) où l'on a utilisé les relations empiriques fournies par les références [1, 2] exprimant le rapport ε . L'étude expérimentale menée dans ce domaine des pressions a montré que ces relations ne sont pas adéquates pour ce système combiné étamic-captur à injection.

On propose la formulation suivante déduite d'une considération théorique [3, 4] :

$$\varepsilon(x) = e^{f(x)} \quad (15)$$

avec :
$$x = \frac{S_2}{S_1} = \frac{4d_2Z}{d_1^2} \quad (16)$$

et :
$$f(x) = [k \cdot x(x^2 - ax + c)]^p \quad (17)$$

Pour $d_2 \leq 2$ mm, on exprime :

$$k = 0,061 \left(\frac{d_2}{d_1}\right) - 0,006 \quad (18)$$

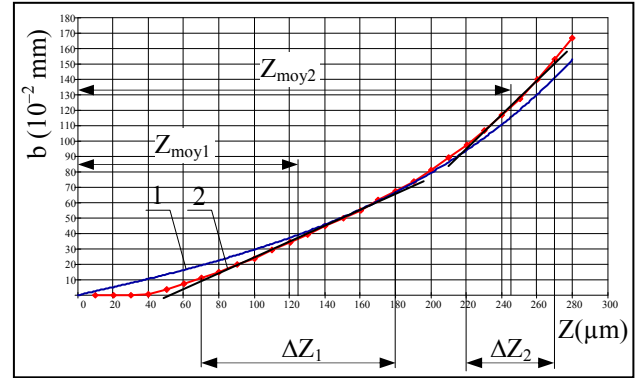
$$a = -2,5d_2 + 7,5 \quad (19)$$

$$c = -6,5d_2 + 16,75 \quad (20)$$

La figure 3 illustre un exemple de caractéristiques théorique (1) et expérimentale (2). La courbe (1) est tracée pour $p = 0,22$. Le capteur à injection a une chambre de mesure de 9 mm de diamètre et de 8,7 mm de hauteur.

On peut observer sur cette figure que la courbe expérimentale comporte deux zones linéaires, l'une $\Delta Z_1 = 110 \mu\text{m}$, et l'autre $\Delta Z_2 = 50 \mu\text{m}$. La sensibilité de la première est $k_{z1} \cong 5,1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$, celle de la seconde est $k_{z2} \cong 11,1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$.

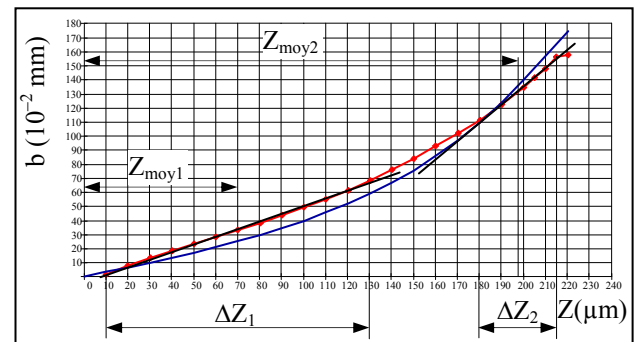
Figure 3. Exemple de caractéristique du système étamic-captur à injection pour pour $H = 4$ bar et $d_1 = 1$ mm, $d_2 = 2$ mm, $d_3 = 3$ mm, $d_4 = 0,7$ mm, $\beta = 4^\circ$.



Cette caractéristique à double sensibilité peut être utilisée à profit pour le contrôle passif où l'appareil sera réglé à Z_{moy1} , ou pour le contrôle actif (contrôle en cours d'usinage) où l'appareil sera réglé à Z_{moy2} .

La résistance à l'écoulement pour les faibles valeurs de Z (ici de 0 à 40 μm), maintient la pression dans la chambre de mesure de l'étamic pratiquement constante. La membrane reste donc en équilibre. Le comparateur indiquant son déplacement n'affiche alors aucune variation. Ce phénomène peut être évité en pratiquant une fuite constante dans la chambre de mesure. La figure 4 illustre les caractéristiques avec les mêmes données que précédemment et avec une fuite constante de diamètre de 0,83 mm (la courbe théorique est tracée pour $p = 0,6$).

Figure 4. Caractéristique du système étamic-captur à injection pour $H = 4$ bar et $d_1 = 1$ mm, $d_2 = 2$ mm, $d_3 = 3$ mm, $d_4 = 0,7$ mm, $\beta = 4^\circ$, diamètre de l'orifice de fuite = 0,83 mm.



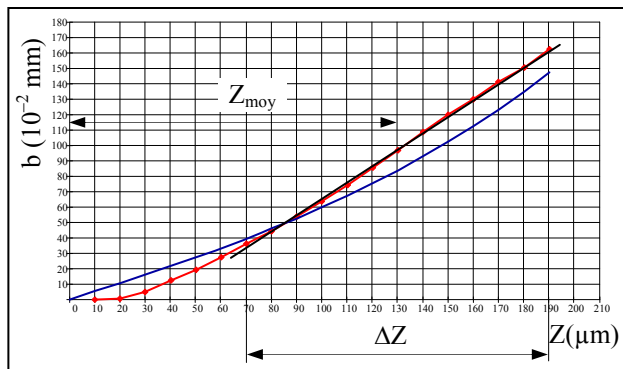
On relève :

- $\Delta Z_1 = 120 \mu\text{m}$, $k_{z1} = 5,5 \mu\text{m}/\mu\text{m}$
- $\Delta Z_2 = 35 \mu\text{m}$, $k_{z1} = 13,1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$

On constate que la fuite constante dans la chambre de mesure de l'étamic améliore légèrement les valeurs des sensibilités des zones linéaires.

Un choix judicieux des gicleurs d'entrée et de mesure pourrait donner une caractéristique intéressante à une zone linéaire. La figure 5 représente un tel cas.

Figure 5. : Caractéristique du système étamic-capteur à injection pour pour $H = 4$ bar et $d_1 = 1$ mm, $d_2 = 2$ mm, $d_3 = 3$ mm, $d_4 = 1$ mm, $\beta = 4^\circ$



Pour ce cas, la zone linéaire de la caractéristique expérimentale est de $120 \mu\text{m}$ et a une sensibilité $k_z \cong 10,6 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. La valeur de Z_{moy} est de $130 \mu\text{m}$.

4 Influence du volume de la chambre de mesure du capteur à injection

Les figures 6 et 7 illustrent les caractéristiques expérimentales obtenues avec deux capteurs à injection dont les dimensions de leurs chambres de mesure sont :

- pour la figure 6 : diamètre : 9 mm, hauteur 8,7 mm
- pour la figure 7 : diamètre : 16 mm, hauteur 17 mm

Les paramètres caractéristiques du système sont : $d_1 = 1.5$ mm, $d_2 = 2$ mm, $d_3 = 3$ mm, $d_4 = 0.7$ mm, $\beta = 4^\circ$, diamètre de l'orifice de fuite = 0.83 mm, $H = 4$ bar

Figure 6. Caractéristique expérimentale avec capteur à injection (chambre de mesure de diamètre 9 mm et de hauteur 8,7 mm)

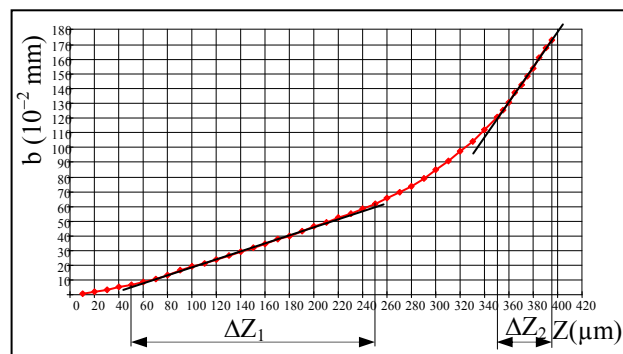
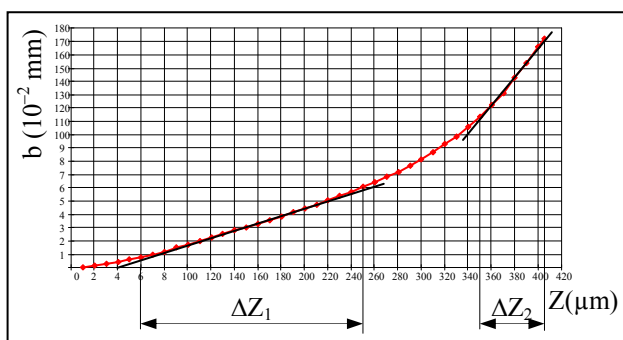


Figure 7. Caractéristique expérimentale avec capteur à injection (chambre de mesure de diamètre 16 mm et de hauteur 17 mm)



Le tableau I récapitule les valeurs des zones linéaires.

Tableau I : Caractéristiques des zones linéaires

Figure	ΔZ_1 (μm)	ΔZ_2 (μm)	Kz_1	Kz_2
6	200	45	2,7	11,9
7	190	55	2,8	10,9

De ces résultats, on en déduit que le volume de la chambre de mesure du capteur à injection n'influe pratiquement pas sur les caractéristiques des zones linéaires.

5 Intérêt de la caractéristique à double sensibilité

En contrôle actif à l'aide de systèmes pneumatiques, la distance entre le gicleur de mesure et la pièce doit être réglée à la cote Z_{moy} . Pour permettre le contrôle des pièces qui viennent généralement à la phase de finition avec une surépaisseur de 0,3 à 0,5 mm, il faut que Z_{moy} soit supérieur à cette surépaisseur. Avec l'utilisation des appareils pneumatiques classiques de mesure, il est impossible de satisfaire cette condition en même temps une forte sensibilité. L'emploi du système étamic-capteur à injection permet de satisfaire cette exigence. En effet, la première zone linéaire permet de suivre les variations de la cote à usiner. Dans cette zone, il n'est pas nécessaire d'avoir une grande sensibilité de l'appareil de mesure. Par contre, la deuxième zone linéaire est utilisée pour l'obtention du signal d'arrêt de la machine d'usinage. Dans ce cas, il est absolument nécessaire d'avoir une forte sensibilité de l'appareil afin de réduire les erreurs de fabrication des pièces, et par conséquent, le rebut.

La première zone linéaire remplit la même fonction qu'avec les systèmes pneumatiques classiques de mesure.

6 Choix du diamètre du gicleur de mesure en fonction du diamètre de la pièce à contrôler

La formule (14) est établie dans le cas de mesure des pièces présentant une face plane au gicleur de mesure. Or, en industrie, on mesure souvent des pièces cylindriques, coniques et sphériques. La surface d'écoulement de l'air entre le gicleur et la pièce est donc différente de $\pi d_2 Z$.

Elle vaut :

$$S = \pi d_2 Z + \Delta S \tag{21}$$

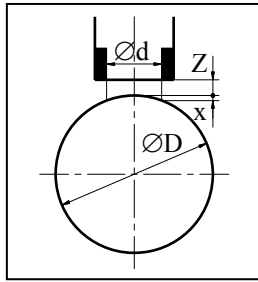
ΔS est la surface excédentaire.

Une erreur ΔS conduit donc à une erreur de mesure. Il est évident que cette erreur est importante si ΔS est important. ΔS est fonction de la forme géométrique de la pièce à contrôler. Considérons le cas de contrôle d'une sphère et d'un cylindre extérieur.

6.1 Cas du contrôle des pièces sphériques

Soient d et D respectivement les diamètres du gicleur de mesure et de la pièce à contrôler. On a (Figure 8) :

Figure 8. Surface latérale de l'écoulement de l'air dans le cas du contrôle d'une sphère



$$x = \frac{D}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2} \right] \quad (22)$$

La surface excédentaire d'écoulement de l'air est :

$$\Delta S = \pi \cdot d \cdot x \quad (23)$$

Soit ε_s l'erreur relative de surface : $\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{S}$

Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{D}{2} (1 - \varepsilon_s) \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2} = Z \varepsilon_s \quad (24)$$

La mesure pneumatique n'étant valable que dans le domaine de la cote Z telle que la surface latérale d'écoulement de l'air entre la pièce et le gicleur de mesure est égale ou inférieure à la section de ce gicleur, ce qui se traduit par la relation suivante pour un gicleur circulaire :

$$Z \leq \frac{d}{4} \quad (25)$$

Tous calculs faits, on obtient :

$$\frac{d}{D} \leq \frac{4\varepsilon_s(1 - \varepsilon_s)}{4(1 - \varepsilon_s)^2 + \varepsilon_s^2} \quad (26)$$

Pour ε très faible, on aura : $\frac{d}{D} \cong \varepsilon$

6.2 Cas du contrôle des pièces cylindriques

L'élément de surface latérale ΔS excédentaire peut s'écrire sous la forme (fig.9) :

$$\Delta S = \int du \cdot d\ell \quad (27)$$

En exprimant du et dℓ et en développant les calculs, on obtient :

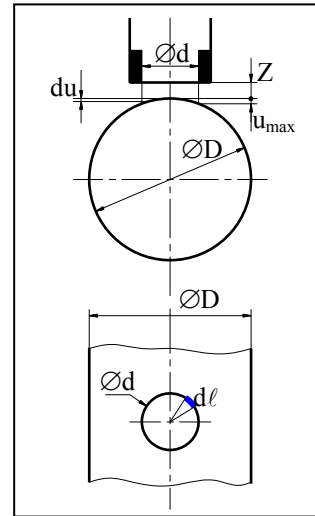
$$\Delta S = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{d^3}{D} \quad (28)$$

L'expression du rapport $\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{S}$ donne :

$$\frac{d}{D} = \frac{8Z\varepsilon_s}{(1 - \varepsilon_s)d} \leq \frac{2\varepsilon_s}{(1 - \varepsilon_s)} \quad (29)$$

Pour ε_s très faible, on aura : $\frac{d}{D} \cong 2\varepsilon_s$

Figure 9. Surface latérale d'écoulement de l'air dans le cas du contrôle d'un cylindre en mesure pneumatique



Conclusion

Contrairement aux appareils de mesure pneumatiques classiques, l'appareil étamic-captur à injection a une caractéristique dont la sensibilité augmente avec l'augmentation de la cote entre le gicleur et la pièce à contrôler. Il peut avoir une caractéristique à double sensibilité ou avec une seule zone linéaire élevée en choisissant convenablement ses paramètres caractéristiques, ce qui permet de satisfaire dans les deux cas le contrôle actif. La première zone linéaire peut être utilisée à profit comme avec les systèmes pneumatiques classiques.

Une formulation plus précise du rapport ε permet de contribuer à une meilleure description de ce système et d'obtenir une bonne correspondance entre les résultats théoriques et expérimentaux.

Ce capteur à injection reste à étudier du fait de la complexité de l'écoulement de l'air dans sa chambre de mesure (effet de dépression et de jet d'air à la sortie du gicleur d'entrée).

Références

1. B.N. Markow, E.I. Ped, Pneumatisches Längenmeßsystem mit Meßejektoren, Feingerätetechnik, volume 4 (1971), pp 160-161, Deutschland.
2. Д. Димитров et А. Семрджиев, Устройства за автоматичен контрол, (Техника, 1979), pp 75-122.
3. M. Bouaziz, Etude des systèmes pneumatiques de contrôle à compensation et à injection, Thèse de magister, (octobre 1982), Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
4. АТ. Семрджиев, М. Вуазиз, Изследване на компенсационен уред с инжекторен лребразу втел, Смангарм качесство, pp 30-33, (3.1985), софия (Sofia), Bulgaria.
5. A. Fortier et R. Molle, Solutions pneumatiques dans le contrôle d'usinage, Techniques de l'Ingénieur (R760, mai 1960).