

Линеаризация на характеристиката на кондензаторен преобразувател

Атанас Илиев

Linearization of the characteristic of the capacitive converter: Capacitive transducers (CP) are increasingly applied in measurements of various parameters in internal combustion engines (ICE). This is due to their relatively simple structure, ease of tuning in the process of work and their great sensitivity. From various CP most commonly used transducers by changing the distance between its plates.

Key words: Capacitive transducers

ВЪВЕДЕНИЕ

Кондензаторните преобразуватели (КП) намират все по-голямо приложение при измерванията на различни величини в двигателите с вътрешно горене (ДВГ). Това се дължи на относително опростената им конструкция, лесното донастройване в процеса на работа и голямата им чувствителност. От различните КП най-широко се използват преобразувателите с промяна на разстоянието между плочите му.

ИЗЛОЖЕНИЕ

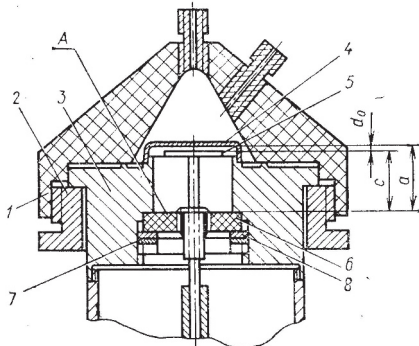
1. Общи сведения за кондензаторните преобразуватели.

Кондензаторните преобразуватели в по-голямата си част са плоски кондензатори. Те дават възможност да се измерват премествания на работната точка на еластичния елемент (мембрана) $\leq 1 \mu\text{m}$. Това ги прави особено предпочитани при индициране на процесите в ДВГ [1, 3].

Кондензаторът на плоския кондензатор се определя по известната формула:

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{\delta - x} = \frac{\epsilon \cdot S}{\delta \cdot \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)} = \frac{\epsilon \cdot S \cdot \left(1 + \frac{x}{\delta}\right)}{\left[\delta \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{\delta}\right)^2\right)\right]} \quad (1)$$

Конструктивно КП се строят по две схеми – в първия мембраната изпълнява функцията на подвижен електрод; във втория центърът на мембраната е свързан неподвижно с плосък електрод, разположен на равни разстояния между два неподвижни електрода; такава конструкция дава възможност да се включват електродите по диференциална схема, което повишава чувствителността на преобразувателя (П) два пъти и го прави практически нечувствителен към влиянието на околната среда.



Фиг.1. Кондензаторен преобразувател
1 – капак; 2,7 – гайка; 3 – корпус; 4 – мембрана; 5 – електрод; 6 – изолационна шайба; 8 – пружинна шайба

Основен проблем при използването на КП е тяхната повишена температурна грешка, породена от преместването на електродите поради различните коефициенти на линейно разширение на отделните части на П. Обикновено изолационната втулка на неподвижния електрод се прави с борд, който съчетан с неподвижното закрепване е и причина за повишената температурна грешка. При КП с един неподвижен електрод (фиг.1, [2]), намаляването на температурната грешка се постига чрез подходящи конструктивни решения. Тук

неподвижният електрод 5 е закрепен посредством изолационната шайба 6 без борд, едновременно изпълняваща роля на опорна и централизираща повърхнини. При такъв монтаж не се налага подбиране на съответни материали със съответни размери.

При изработване на мембраната, корпуса и неподвижния електрод от един и същ материал (напр. берилиев бронз), остатъчната температурна грешка, породена от въздушните междини, е от порядъка на 0,5–1 % на 10⁰С.

Намаляването на температурната грешка до стойност 0,05 %/°С е възможно чрез използване на материали с минимален температурен коефициент на линейно и обемно разширение. Такъв материал е кварцът, от който се изработват основите на електродите; самите електроди се напастяват във вакуум, обикновено с инвар.

В повечето случаи КП се включва в рамото на измервателен мост. Измервателната схема (включена в диагонала на моста) трябва да има голямо съпротивление, кабелите трябва да са екранирани, електродите да са добре изолирани. С увеличаване на честотата на захранващото напрежение реактивното съпротивление $X_c = \frac{1}{\omega C}$ на КП се намалява, с което се подобряват условията за работа на измервателната схема. Минималната честота на захранващото напрежение следва да е по-голяма от 1000 Hz.

Исходното напрежение на моста се определя по следната формула:

$$U = \frac{U_H}{2} \cdot \frac{\varepsilon \delta}{\sqrt{(1 - \varepsilon_\delta^2) \cdot \frac{1}{a^2} + 1}} \quad (2)$$

където U_H е захранващото напрежение;

$\varepsilon_\delta = \frac{\Delta \delta}{\delta}$ - относителното изменение на разстоянието между електродите;

$a = \frac{Z_r}{Z_{изк}}$ - отношение на съпротивлението на измервателната схема и на моста.

От формулата се вижда, че линейността на характеристиката на КП се определя от параметъра a – при $a=1$ нелинейността достига до 10%.

Предимствата на КП са голямата чувствителност и точност, стабилност във времето на характеристиките, технологичност на производството и взаимозаменяемост.

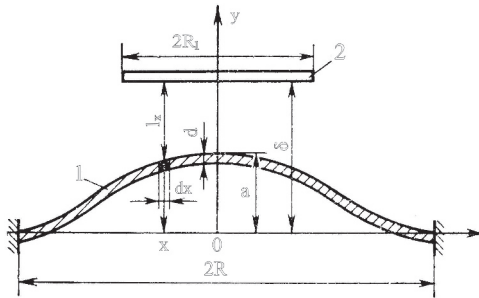
Недостатъците им са необходимостта от особено стабилни високочестотни захранващи източници, сложна компенсация на честотната зависимост на свързващите проводници и повишената температурна грешка.

2. Линеаризация на характеристиките на кондензаторите преобразуватели.

При малки провисвания (0,01-0,02 mm) на центъра на мембраната на КП линейността им е достатъчно голяма, но е малка реалната им чувствителност ($\Delta C = (1-3 \%) \cdot C_0$). При увеличаване на деформацията на мембраната до (0,1-0,3 mm) рязко нарастват и чувствителността и нелинейността. Установено е, че със специален избор на характеристиката на мембраната, работното разстояние между електродите и геометричните им размери, може да се осигури голяма чувствителност на КП при малки нелинейни изкривявания на характеристиката.

Известно е, че при големи деформации на неподвижно закрепена по периферията си мембрана, зависимостта между преместването на точки от повърхността ѝ и налягането, действащо върху нея, е съществено нелинейна. Капацитетът на КП също е нелинейна функция от разстоянието между електродите. При определени геометрични размери и съотношения е възможно да се линеаризира характеристиката на КП при запазване на голямата чувствителност на преобразуването.

На фиг. 2 [2] е показан кондензатор, образуван от плосък неподвижен електрод 2 с радиус R_1 и еластична мембрана 1 с радиус R . Началната хлабина е δ , а максималното провисване a .



Фиг.2. Схема на плосък кондензатор

При определяне на капацитета е необходимо да се отчете вида на еластичната линия на мембраната:

$$a_x = a \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right]^2, \quad (3)$$

Пренебрегвайки краевите ефекти поради малките стойности на хлабината по отношение на диаметъра на електрода, за капацитета се получава

$$C = \frac{\varepsilon}{4\pi} \cdot \int_0^{R_1} \frac{2\pi \cdot x \cdot dx}{\delta - a \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right]^2} = \frac{\varepsilon \cdot R^2}{8\delta \cdot \sqrt{\lambda}} \cdot \ln \frac{1 - \beta \cdot \lambda + (1 - \beta) \cdot \sqrt{\lambda}}{1 - \beta \cdot \lambda - (1 - \beta) \cdot \sqrt{\lambda}}, \quad (4)$$

където ε е диелектричната константа на средата;

$\lambda = \frac{a}{\delta}$ - относителна деформация на мембраната;

$\beta = 1 - \left(\frac{R_1}{R} \right)^2$ - параметър, отчитащ геометрията на кондензатора.

Началният капацитет на КП се определя от (4) при условието $\lambda \rightarrow 0$:

$$C_0 = \frac{\varepsilon \cdot R^2}{4 \cdot \delta} \cdot (1 - \beta) = \frac{\varepsilon \cdot R^2}{4 \cdot \delta} \quad (5)$$

Откъдето се получава и окончателният вид на формулата:

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon \cdot R^2}{4 \cdot \delta} \left[\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\lambda}} \cdot \ln \frac{1 - \beta \cdot \lambda + (1 - \beta) \cdot \sqrt{\lambda}}{1 - \beta \cdot \lambda - (1 - \beta) \cdot \sqrt{\lambda}} - 1 + \beta \right] = \frac{\varepsilon \cdot R^2}{4 \cdot \delta} \cdot N, \quad (6)$$

Уравнение (6) показва, че изменението на капацитета на КП е сложна функция на относителното деформиране на мембраната λ . Преместването на центъра на мембраната в зависимост от приложеното върху нея разпределено налягане се определя по формулата:

$$p \cdot \frac{1}{E} \cdot \left(\frac{R}{d} \right)^4 = 5,86 \cdot \left(\frac{a}{d} \right) + 3,58 \cdot \left(\frac{a}{d} \right)^3, \quad (7)$$

където E е модулът на еластичност на материала, МПа;
 d - дебелина на мембраната.

След заместване в (7) на $a = \delta \cdot \lambda$ и въвеждане на означението $K = \frac{\delta}{d}$ (K е относителна работна хлабина на КП) се получава следното:

$$p = E \cdot \left(\frac{d}{R} \right)^4 \cdot (5,86 \cdot K \cdot \lambda + 3,58 \cdot K^3 \cdot \lambda^3) = E \cdot \left(\frac{d}{R} \right)^4 \cdot M, \quad (8)$$

При сравнение на уравненията (6) и (8) може да се види, че линейна функция на преобразуване $\Delta C = \varphi(p)$ може да се получи само в случая, когато за целия диапазон на изменение на относителната деформация на мембраната λ_i се запазва равенството $\alpha \cdot N_i = M_i$:

$$\alpha \left[\frac{2}{2\sqrt{\lambda}} \cdot \ln \frac{1 - \beta \cdot \lambda + (1 - \beta) \cdot \sqrt{\lambda}}{1 - \beta \cdot \lambda - (1 - \beta) \cdot \sqrt{\lambda}} - 1 + \beta \right] = 5,86 \cdot K \cdot \lambda + 3,58 \cdot K^3 \cdot \lambda^3, \quad (9)$$

където α е безразмерен коефициент, зависещ от K и подлежащ на определяне. Линеиността на преобразуване зависи както от максималната стойност на деформиране на мембраната λ_{max} , така и от конструктивните параметри K и β .

Необходимо е да се намери линейна зависимост от вида

$$\alpha \cdot \Delta C_i = p_i \cdot A, \quad (10)$$

където A е коефициент, отчитащ конструктивните размери на КП и размерността им.

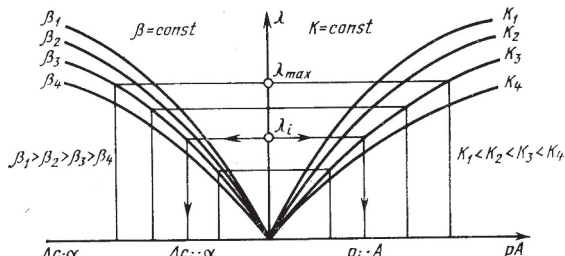
След заместване в (10) на (6) и (8) се получава:

$$\alpha \cdot N_i \cdot \frac{\varepsilon \cdot R^2}{4 \cdot B} = E \left(\frac{d}{R} \right)^4 \cdot M_i \cdot A, \quad (11)$$

Или при $A = \frac{\varepsilon \cdot R^2}{4 \cdot \delta \cdot E} \left(\frac{R}{d} \right)^4$

$$\alpha \cdot N_i(\lambda_i; \beta) = M_i(\lambda_i; K), \quad (12)$$

Определянето на стойностите на K и β може да се направи само

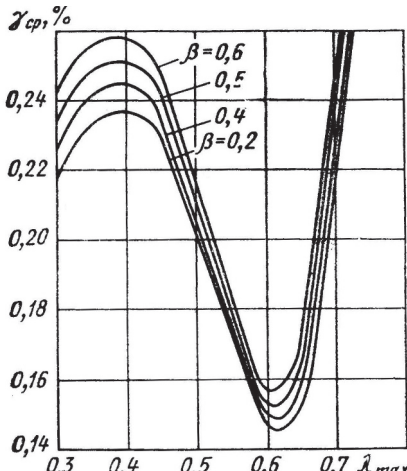


Фиг. 3. Зависимост между приложеното налягане p_i , деформацията на мембраната λ и промяната на capacitетата

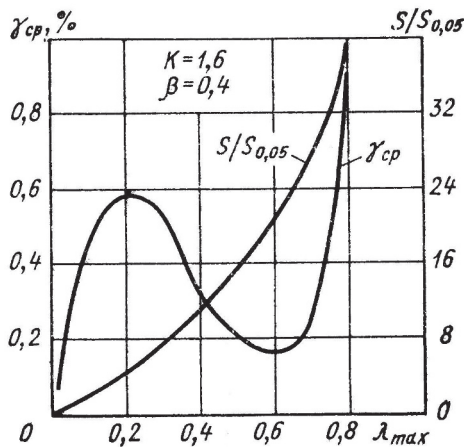
приблизително, тъй като функциите $N = f(\lambda)$ и $M = \varphi(\lambda)$ са твърде различни (фиг. 3).

Стойността на параметъра α се определя по метода на най-малките квадрати (МНК) по формулата:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i^2}, \quad (13)$$



Фиг. 4. Зависимост на нелинейността на КП γ_{cp} от максималната относителна деформация на мембраната λ_{max} при оптимально разстояние K_{opt}



Фиг.5. Зависимост на нелинейността на КП и чувствителността му от максималната относителна деформация на мембраната λ_{max}

Средноквадратичното отклонение на получената функция от линейната се определя по израза:

$$\gamma_{cp} = \frac{1}{n \cdot M_{\max}} \cdot \sum_{i=1}^n |\alpha \cdot N_i - M_i|, \quad (14)$$

където $M_{\max} = 5,86 \cdot K \cdot \lambda_{\max} + 3,58 \cdot K^3 \cdot \lambda_{\max}^3$

По уравнения (6, 8 13 и 14) е направено пресмятане на нелинейността на КП. Получените резултати са показани на фиг. 4 и 5.

От фиг. 4, се вижда, че минималната нелинейност на КП е около 0,15% при максимално относително деформиране на мембраната $\lambda_{\max} \approx 0,6$; стойността на относителното работно разстояние се избира по съответна номограма.

На фиг. 5. е показана зависимостта на средната нелинейност на КП от максималното относително деформиране на мембраната λ_{\max} за $\beta = 0,4$ и $K = 1,6$. От фигурата се вижда, че използването на КП с голямо деформиране на мембраната позволява да се увеличи чувствителността им 10-20 пъти при запазване на минимална нелинейност на характеристиката на преобразуване.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По предложената методика за линеаризиране на характеристиката на КП може да се увеличи чувствителността КП 10-20 пъти при запазване на нелинейността на преобразуване на допустимото ниво ($\leq 0,15$ %). Това дава възможност да се използва измервателна апаратура от по-нисък клас, което е предпоставка за намаляване на себестойността на експерименталното оборудване, без практически загуба на точност и качество на измерванията.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Логинов В. В. Электрические измерения механических величин. М., Энергия, 2010, 134 с.
- [2] Осипович Л. А. Датчики физических величин. М., Машиностроение, 1979, 159 с.
- [3] Генов Г. и др. Испитване на двигатели с вътрешно горене. С., Техника, 1979, 274 с.

За контакти:

Доц. д-р Атанас Илиев, Катедра "Двигатели и транспортна техника", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 272, e-mail: ailiev@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.