تأثير الاختلاف المركزي في تراوح السرعة في الكامات القرصية ذات التوابع الترددية

الدكتور المهندس اسكندر عمجة[١]

الملخص

إن المصدر الرئيسي لتراوح السرعة هو عدم التوافق بين خصائص التحميل و مميزات أداء وحدة تزويد القدرة و قوى العطالة المؤثرة في المجموعة الديناميكية, مما يسبب عدة مشكلات تكنولوجية, لعل أهمها الاهتزازات و ظهور الاجهادات.

إن موضوع هذا البحث هو إجراء دراسة تحليلية لتحديد القيمة المثلى للاختلاف المركزي في تركيبة الكامة التي توفر أقل قيمة ممكنة لمعامل تراوح السرعة لمحور الدوران.

و يعود ذلك إلى أن تغير الاختلاف المركزي يؤدي إلى تغيير القدرة الحركية و العزم المقاوم المحصل المؤثر في تركيبة الكامة مما ينتج تغير معامل تراوح سرعة عمود الدوران.

و تم توضيح ذلك من خلال اختيار حركة التابع و القوة المؤثرة فيه إضافة إلى اختيار ثوابت تركيبة الكامة مع كل من تابع دحر وجي ترددي و تابع مسطح ترددي، و من ثم تعيين معادلة حركة التركيبة باستخدام معادلة لاغرانج (Lagrange), و بالاستناد إلى برنامج حاسوبي يعتمد طريقة أولر(Euler) لحل معادلة حركة التابع عند قيم مختلفة للاختلاف المركزي تـم إنشـاء مجموعة منحنيات توضح تغير معامل تراوح السرعة بدلالة الاختلاف المركزي.

والنتيجة فإن الطريقة التي تم بحثها توفر تقانة فعالة في تخفيض قيم معامل تـراوح السـرعة لأعمدة الدوران في الكامات القرصية من خلال اختيار قيمة مثلى للاختلاف المركزي.

[١] كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية جامعة دمشق

١- مقدمة

يسبب تراوح سرعة أعمدة دوران الآلات عدة مشكلات تكنولوجية، لعل أهمها الاهتزازات التي تؤدي إلى ظهور إجهادات إضافية وحدوث تغيرات غير مرغوب فيها في تردد الشبكات الكهربائية. إلا أن معظم التطبيقات تستلزم أداء سلساً لأعمدة الدوران على الرغم من اختلاف نسبة التفاوت المسموح بها تبعاً لمجالات الاستعمال ونوعية الآلات.

إن المصدر الرئيسي لتراوح السرعة هو عدم التوافق بين خصائص التحميل، ومميزات أداء وحدة تزويد القدرة، وقوى العطالة المؤثرة في المجموعة الديناميكية. وتهدف طرائق تخفيض تراوح السرعة إلى الحفاظ على التوافق بين هذه العوامل الثلاثة عن طريق إضافة النوابض[١،٢] أو الوصلات الموازنة[٣] أو الحذّافات [٤]أو من خلال تحسين التوزع الكتلي لمكوناتها [٥]أو تعديل الشكل الهندسي للجملة الديناميكية[٦-٩].

ففي تركيبة الكامة تؤثر الكامة في التابع بقوة عمودية على سطح الكامة عند نقطة التماس، وتميل عن اتجاه حركة التابع بزاوية تدعى بزاوية الضغط التي تتأثر قيمتها بشكل جانبية الكامة، ومن ثَم بالأبعاد الأساسية للكامة وبنوع التابع وطبيعة حركته ونوعها.

وكلما كانت زاوية الضغط صغيرة كانت القوة المنقولة من الكامة إلى التابع صغيرة، والتي تنتج من تطبيق عزم معين على عمود دوران الكامة، مما يؤدي إلى تخفيض القدرة اللازمة لتدوير الكامة.

ومن طرائق تقليل زاوية الضغط زيادة نصف قطر الدائرة الأساسية للكامة والزاوية التي تدورها، إزاحة محور التابع(الاختلاف المركزي) ومقدار رفعه و تغيير نوع حركته.

فالسمة المميزة لتركيبة الكامة هي إزاحة محور التابع في مستوى حركة الكامة يميناً أو يساراً بالنسبة لمحور الدوران، بحيث يصبح كل من محور التابع ومحور دوران الكامة غير متقاطعين.

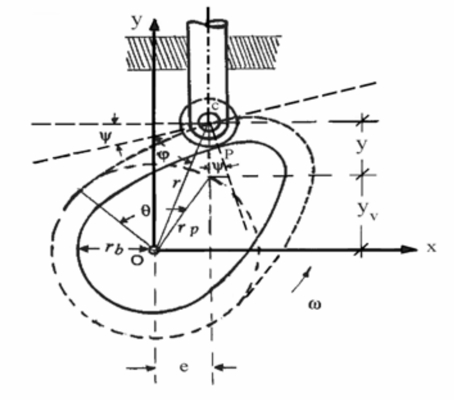
وفي أغلب التطبيقات يعتمد التصميم العملي للكامات، على إيجاد قيمة الاختلاف المركزي للتابع التي تسمح لكامة ذات أصغر نصف قطر دائرة أساسية ممكن، بأداء الحركة المطلوبة ضمن حدود زاوية الضغط المسموح بها، وتخفيض إجهادات ضغط التماس بين سطح الكامة والتابع.

وقد تطرقت عدة بحوث واردة في المراجع[١٣-١٠] إلى دراسة تأثير معظم هذه العوامل التصميمية في توفير أداء سلس لمجموعة الكامة، من دون التعرض لتأثير الاختلاف المركزي في معامل تراوح السرعة. ولذلك فإن موضوع هذا البحث هو إجراء دراسة تحليلية لتحديد القيمة المثلى للاختلاف المركزي التي توفر أقل قيمة ممكنة لمعامل تراوح السرعة.

٢ - معـادلات الحركـة

٢ – ١ - كامة قرصية ذات تابع دحروجي ترددي مجنب

يبين الشكل(١) تخطيطاً لتركيبة كامةٍ وتابعٍ دحروجي ترددي ذي اختلاف مركزي (e) موجب في مستوى الإحداثيات (Oxy)، حيث التابع مجنب باتجاه معاكس لاتجاه دوران الكامة. ويعد الاختلاف المركزي موجباً إذا تم قياسه من محور دوران الكامة المار من (O) بالاتجاه الموجب للمحور(x)، و يعد سالباً عند قياسه بالاتجاه السالب للمحور (x).



(الشكل - ١)
تركيبة كامة وتابع دحروجي ترددي ذي اختلاف مركزي موجب (e)

تمثل جانبية الكامة السطح المحيطي لها والذي يحقق الحركة المختارة للتابع، و إن أصغر بعد بين نقطة تماس التابع و مركز دوران الكامة (O)خلال كامل فترة الحركة يمثل نصف قطر الدائرة الأساسية (r_b) و هو ذو تأثير أساسي في شكل الكامة وأدائها.

ويعتمد تحديد جانبية الكامة إضافة إلى نصف قطر الدائرة الأساسية على نوع التابع وحركته التي تحدد بحركة نقطة الأثر (C)المنطبقة على مركز الدحروج الذي يتحرك على المسار الترددي للتابع. و المحل الهندسي لمواقع نقطة الأثر خلال دورة كاملة للكامة يمثل منحني الخطوة، الذي يعد الفقرة الأساسية لتحديد جانبية الكامة. وإن أصغر بعد لهذا المنحني عن مركز دوران الكامة يمثل نصف قطر الدائرة الأولية (r_p) والذي يساوي مجموع نصفي قطري الدائرة الأساسية(r_b) و الدحروج (r_f) أي:

$$r_p = r_b + r_f \qquad (١)$$

ومن الشكل (١) نلاحظ أن:

$$r_p^2 = (y_v^2 + e^2) \qquad (٢)$$

حيث (y_v): ثابت يمثل المسقط الشاقولي لنصف قطر الدائرة الأولية على المحور المار من نقطة الأثر(C).

و تعين نقاط منحني الخطوة بسهولة عند إجراء التحليل بوساطة الإحداثيات القطبيـة (r, θ) بعد اختيار نصف قطر الدائرة الأولية ومعادلة حركة التابع (y) :

$$r^2 = (r_p^2 + 2 . y_v . \; y \; + \; y^2) \qquad (٣)$$

$$tg\,\varphi = \frac{r}{dr / d\theta} \qquad (٤)$$

كما تعين زاوية ضغط الكامة (ψ) من الشكل (١) [١٤] بالعلاقة:

$$tg\,\psi = \frac{\frac{(y_v + y \;)^2}{\omega} . \frac{dy}{dt} - e . r^2}{(y_v + y \;)(\frac{e}{\omega} . \frac{dy}{dt} + r^2)} = \frac{(y_v + y \;)^2 . y' - e . r^2}{(y_v + y \;) (e . y' - r^2)} \qquad (5)$$

حيث يلاحظ أن قيمتها تتغير خلال دوران الكامة عند نقطة تماس أو أكثر.

كما يمكن استنتاج المعادلات الوسيطية(x_p , y_p) لجانبية الكامة بالنسبة لمستوى الإحداثيات(Oxy)التي تعطى وفقاً للتحليل الوارد في المرجع[١٥] بالعلاقات:

$$x_p = (y_v + y)\sin\theta + e\cos\theta - r_f . \frac{\left[(y_v + y)\sin\theta + (e - y')\cos\theta \right]}{\left[(y_v + y)^2 + (e - y')^2 \right]^{1/2}}$$

$$y_p = (y_v + y)\cos\theta - e\sin\theta - r_f . \frac{\left[(y_v + y)\cos\theta - (e - y')\sin\theta \right]}{\left[(y_v + y)^2 + (e - y')^2 \right]^{1/2}} \qquad (٦)$$

كما يبين الشكل (٢) كل من القوى ($N, \; R_1 , \; R_2 , \; F, \; W_c$) المؤثرة في تركيبة الكامة.

حيث W_c : وزن الكامة و يمكن تحديده عند الوضع $(\theta = 0)$ بإيجاد إحداثيات مركز ثقل الكامة $(\overline{x_G}, \overline{y_G})$ و سطح مقطعها.

F : القوة المحصلة المؤثرة في التابع و تساوي:

$$F = W_f + F_l + F_s + F_{in} \quad (٧)$$

حيث W_f : وزن التابع و ملحقاته.

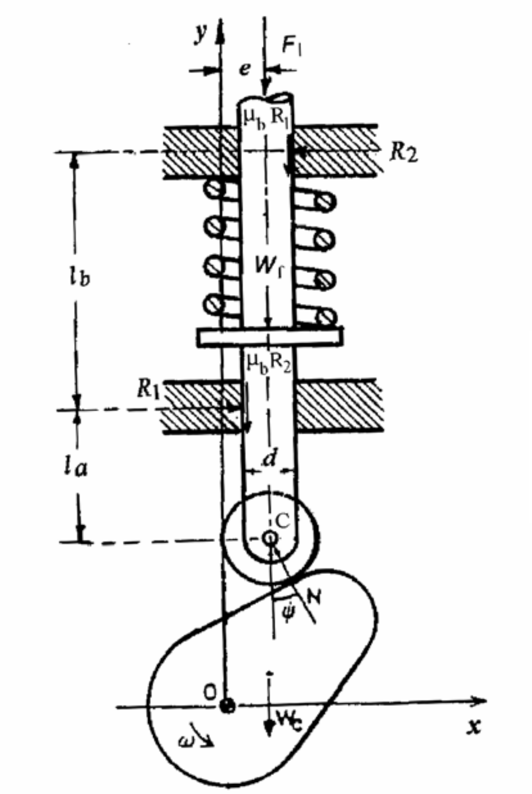
F_l : قوة خارجية مؤثرة في التابع من وصلة ما يقوم التابع بنقل الحركة إليها.

F_s : قوة النابض و تعين بالعلاقة:

$$F_s = k(\delta + y) \quad (٨)$$

F_{in} : قوة عطالة التابع و تعين بالعلاقة:

$$F_{in} = m . \ddot{y} \quad (٩)$$



(الشكل - ٢)
القوى المؤثرة في تركيبة كامة
و تابع دحروجي ترددي ذي
اختلاف مركزي موجب (e)

أما القوة (N) فإنها تمثل القوة الناظمية المؤثرة من الكامة في التابع, و تعتمد قيمتها على سرعة الكامة (ω) و على القوة (F), حيث مركبتها باتجاه مسار حركة التابع ($N.\cos\psi$) تعمل على تحريك التابع بالحركة المطلوبة و التغلب على المقاومات المطبقة عليه, أما مركبتها الناظمية على اتجاه حركة التابع ($N.\sin\psi$) فإنها تؤثر في التابع بدفع جانبي يحاول زنقه ضمن مجرى دليله مما يسبب اهتراء زائداً في المجرى.

و تحدد قيمة القوة (N) و قوتا رد الفعل (R_1, R_2) بين ساق التـابع و دليلـه مـن معادلات التوازن الاستاتيكي للتابع حيث نحصل على:

$$\alpha = \frac{N}{F} = \frac{l_b}{l_b.\cos\psi \mp \mu_b \sin\psi\,(2.l_a + l_b \mp \mu_b.d)}$$

$$\beta = \frac{R_1}{F} = \frac{l_a + l_b \mp \mu_b.\frac{d}{2}}{l_b.\cot g\psi \mp \mu_b(2.l_a + l_b \mp \mu_b.d)} \qquad (١٠)$$

$$\gamma = \frac{R_2}{F} = \frac{(l_a \mp \mu_b.\frac{d}{2})}{l_b.\cot g\psi \mp \mu_b(2.l_a + l_b \mp \mu_b.d)}$$

و تؤخذ الإشارة (-) لفترة صعود التابع, في حين تؤخذ الإشارة (+) لفترة هبوط التابع.

و يمكن تعيين معادلة حركة التركيبة باستخدام معادلة لاغرانج (Lagrange):

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}}\right) - \left(\frac{\partial E_k}{\partial \theta}\right) = T \qquad (١١)$$

حيث (E_k) تمثل القدرة الحركية لتركيبة الكامة, و تعطى بعد إهمال القدرة الحركية للدحروج بالعلاقة:

$$E_k = \frac{1}{2}.J_o.\omega^2 + \frac{1}{2}.m.\dot{y}^2 = \frac{1}{2}(J_o + m.y').\omega^2 \qquad (١٢)$$

حيث (J_o) :عزم العطالة الكتلي حول المحور المار من (O), و يساوي باعتبار الكامة صفيحة سماكتها (b) إلى:

$$J_o = \rho.b.I_o \qquad (١٣)$$

حيث (I_o) :عزم العطالة القطبي لسطح مقطع الكامة, و استناداً إلى التحليل الوارد في المرجع [١٦], باستخدام علاقة غرين(Green)و المعادلات الوسيطية (x_p , y_p) لجانبية الكامة يساوي:

$$I_O = \iint (x_p^2 + y_p^2)\, dx.dy = \frac{1}{3}\oint (x_p^3 . dx + y_p^3 . dy) \qquad (١٤)$$

أما (T) فإنها تمثل العزم الصافي المحرك لتركيبة الكامـة و يسـاوي المجمـوع الجبري لعزم الإدارة (T_m) المطبق على عمود الدخل و العزم المقـاوم (T_r) عند الدخل:

$$T = T_m - T_r \qquad (١٥)$$

حيث يؤثر (T_r) باتجاه معاكس لدوران الكامة و يساوي:

$$T_r = T_f + T_s + T_w + T_l \qquad (١٦)$$

حيث (T_f): عزم قوى الاحتكاك منسوباً لعمود الدخل و يعين بعد إهمال الاحتكاك بين سطح الكامة و الدحروج بالعلاقة:

$$T_f = \left[\left|\mu_b . R_1\right| + \left|\mu_b . R_2\right| \right] . y' = F \left[\left| \mu_b . \beta . y' \right| + \left| \mu_b . \gamma . y' \right| \right] = \eta . F \qquad (١٧)$$

حيث:

$$\eta = \left| \mu_b . \beta . y' \right| + \left| \mu_b . \gamma . y' \right| \qquad (١٨)$$

و (T_s) : عزم قوة النابض و يعين بالعلاقة:

$$T_S = k\,(\delta + y) . y' \qquad (١٩)$$

و (T_W): عزم وزن الكامة و التابع منسوباً لعمود الدخل و يعين بالعلاقة:

$$T_W = W_f . y' + W_C . x_G \qquad (٢٠)$$

و (T_l) : عزم الحمل المطبق منسوباً لعمود الدخل و يعين بالعلاقة:

$$T_l = F_l \cdot y' \quad (٢١)$$

و إذا فرضنا أن الكامة تدار بمحرك تيار متناوب ثلاثي الطور, فانه يمكن التعبير عن عزم الإدارة المطبق على الدخل بالعلاقة:

$$T_m = A - B \cdot \omega^2 \quad (٢٢)$$

بالتعويض في العلاقة (١٥) ينتج العزم الصافي المحرك لتركيبة الكامة:

$$T = A - W_C \cdot x_G - (\eta + y')\left[F_l + W_f + k(\delta + y)\right] - (B + \eta . m . y'')\omega^2 - \frac{1}{2} . \eta . m . y' . \frac{d\omega^2}{d\varphi}$$

(٢٣)

و من تعويض المعادلتين (١٢) و (٢٣) فـي معادلـة لاغـرانج (١١) يمكـن الحصول على معادلة الحركة لتركيبة كامة قرصية ذات تابع دحروجي ترددي:

$$C_1 . Z + C_2 \cdot \frac{dZ}{d\varphi} = C_3 \quad (٢٤)$$

حيث:

$$Z = \omega^2$$
$$C_1 = m . y''(\eta + y') + B$$
$$C_2 = \frac{1}{2}\left[J_o + m . y' . (\eta + y')\right] \quad (٢٥)$$
$$C_3 = A - W_c \cdot x_G - (\mu + y')\left[F_l + W_f + k(\delta + y)\right]$$

٢ - ٢ - كامة قرصية ذات تابع مسطح ترددي مجنب

يبينّ الشكل (٣) تركيبة كامة قرصية و تابع مسطح ترددي ذي اختلاف مركـزي سالب, و وجه التابع المسطح متعامداً مع مسار حركته مما يعدم زاوية الضغط (ψ) في هذه التركيبة, أما نقطة الأثر (C) فهي نقطة تقاطع محور مسـار التـابع مـع السطح المستوي لنهايته.

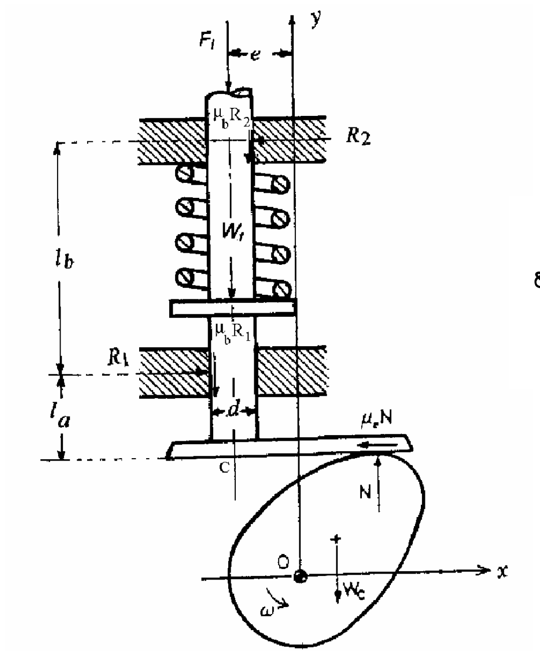
يمكن استنتاج المعادلات الوسيطية (x_p, y_p) لجانبية الكامـة بالنسـبة لمسـتوى الإحداثيات (Oxy) التي تعطى بالعلاقات:

$$x_p = (r_b + y)\ \sin\theta\ + y'.\cos\theta$$

(٢٦)

$$y_p = (r_b + y)\ \cos\theta\ - y'.\sin\theta$$

كما يبين الشكل (٣) القوى المؤثرة في تركيبة الكامـة, ($N,\ R_1,\ R_2, F,\ W_c$) بما فيها قوة الاحتكاك (μ_c , N) بين سطح الكامة و التابع التي لا يمكن إهمالها في هذه التركيبة.



(الشكل - ٣)
القوى المؤثرة في تركيبة كامة و تابع
مسطح ترددي ذي اختلاف مركزي
سالب (e)

من الواضح إنه يمكن بإتباع طريقة التحليل المذكورة في الفقرة السابقة, تعيين كل من (γ, β, α) من معادلات التوازن الاستاتيكي للتابع:

$$\alpha = \frac{N}{F} = \frac{l_b}{G}$$

$$\beta = \frac{R_1}{F} = \frac{(y' - e) - \mu_c (l_a + l_b \mp \mu_b . \frac{d}{2})}{G} \qquad (٢٧)$$

$$\gamma = \frac{R_2}{F} = \frac{(y' - e) - \mu_c (l_a \mp \mu_b . \frac{d}{2})}{G}$$

حيث:

$$G = l_b \mp 2\mu_b \left[(y' - e) - \mu_c (l_a + \frac{l_b}{2} \mp \mu_b . \frac{d}{2}) \right] \qquad (٢٨)$$

مع التنويه بأن تؤخذ الإشارة (-) لفترة صعود التابع و الإشارة (+) لفترة هبوطه.
و بسبب عدم إهمال الاحتكاك بين سطح الكامة و التابع ينتج أن:

$$\eta = \alpha . \mu_c (r_b + y) + \left| \mu_b . \beta . y' \right| + \left| \mu_b . \gamma . y' \right| \qquad (٢٩)$$

ومن ثَم يمكن الحصول من المعادلات (٢٤) و (٢٥) على معادلة الحركة للتركيبة المبينة في الشكل (٣).
إن معادلة الحركة (٢٤) التي تم الحصول عليها للتركيبتين هي معادلة غير خطيـة, و يمكن حلها إما بالطرائق العددية أو البيانية عند شروط ابتدائية معينة.
و يتم حساب معامل تراوح السرعة (Δ) في الحالة المستقرة من العلاقة:

$$\Delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega} \qquad (٣٠)$$

حيث تمثل ω_{max} : السرعة الزاوية العظمى خلال الفترة المدروسة.
ω_{min} : السرعة الزاوية الصغرى خلال الفترة المدروسة.
ω : السرعة الزاوية الوسطية و التي تساوي:

$$\omega = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2} \qquad (٣١)$$

ونظراً لأن تغيير الاختلاف المركزي يؤدي إلى تغيير القدرة الحركية و العزم المقاوم المحصل المؤثر في التركيبة الكامية, فإنه يمكن تخفيض معامل تراوح سرعة عمـود الـدوران المـار مـن (O) باختيـار قيمـة مثلـى للاخـتلاف المركـزي. و سنوضح ذلك من خلال المثال المبين أدناه .

٣ - مـثـال

المطلوب من التركيبة الكامية أن يحقق التابع الحركة التالية:

$$y = h(1-\cos\theta)$$

ففي حالة التابع الدحر وجي الترددي الموضح في الشكل (٢) و وفق المعطيات التالية:

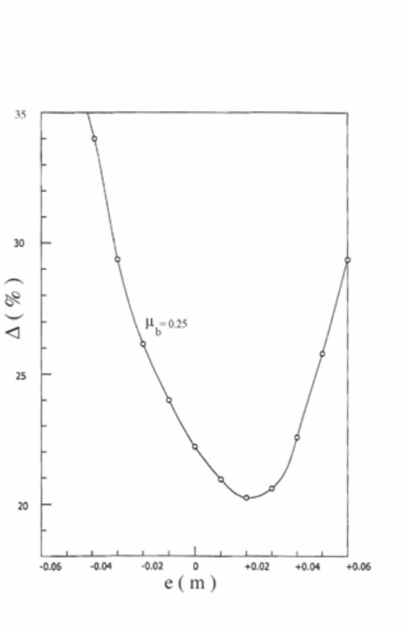
$$h = 0.06 \text{ m} \qquad A = 60 \text{ N.m}$$
$$r_b = 0.08 \text{ m} \qquad B = 0.0097 \text{ N.m.s}^2$$
$$r_f = 0.02 \text{ m} \qquad \rho = 7800 \text{ Kg/m}^3$$
$$l_a = 0.15 \text{ m} \qquad \mu_b = 0.25$$
$$l_b = 0.20 \text{ m} \qquad \delta = 0.01$$
$$d = 0.01 \text{ m} \qquad F_l = \begin{cases} 1500 \text{ N} \Rightarrow (0^0 \le \theta \le 180^0) \\ 0 \quad \text{N} \Rightarrow (180^0 \le \theta \le 360^0) \end{cases}$$

بالاستناد إلى برنامج حاسوبي يعتمد طريقة أولر (Euler) [١٨ , ١٧] لحل معادلـة الحركة (٢٤) عند قيم مختلفة للاختلاف المركزي تم الحصول على الشكل (٤).

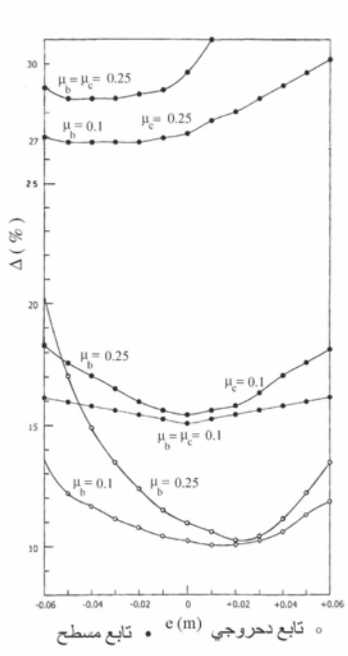
أما في حالة التابع المسطح الترددي الموضح في الشكل (٣) و مـع الحفـاظ علـى المعطيات السابقة اتضح أنه من أجل قيم مختلفـة لـ ـ (μ_c) و (μ_b) و لحمـل تشغيل معطى بـ ـ:

$$F_l = \begin{cases} 750 \text{ N} \Rightarrow (0^0 \le \theta \le 180^0) \\ 0 \quad \text{N} \Rightarrow (180^0 \le \theta \le 360^0) \end{cases}$$

تم إنشاء مجموعة المنحنيات (e, Δ) المبينة في الشكل (5).



(الشكل – ٤)



(الشكل – ٥)

٤ - الاستنتاجات

يلاحظ من الشكل (٤):

- أن معامل تراوح السرعة يصل إلى قيمة دنيـا ($\Delta_{min} = 20.3\%$) عنـد قيمة للاختلاف المركزي ($e = 0.02\,\text{m}$) في حالة كامة و تابع دحروجي.

ويلاحظ من الشكل (٥):

- أن القيمة الدنيا لمعامل تراوح السـرعة (Δ_{min}) للكامـات ذات التوابـع الدحروجية هي أصغر من تلك القيم في الكامات ذات التوابع المسطحة.
- إن تأثير الاحتكاك في الكامات ذات التوابـع الدحروجيـة فـي (Δ_{min}) صغير, إلا أن هذا التأثير هو أكثر وضـوحاً فـي الكامـات ذات التوابـع المسطحة و خاصة مع قيم (μ_c).
- إن قيمة (Δ) ثابتة تقريباً ضمن المجال ($-0.05\,\text{m} < e < -0.03\,\text{m}$) عند كون ($\mu_b = \mu_c = 0.25$) ويعود ذلك إلى أن الاختلاف المركزي في الكامات ذات التوابـع المسـطحة يـؤثر فقـط فـي العـزم المقـاوم المحصل (T_r), و في هذه الحالة, يمكن للمصـمم أن يختـار الاخـتلاف المركزي ضمن هذا المجال, بالاعتماد على مدلول إضافي مثـل تخفـيض إجهادات ضغط التماس إلى أقل حدود ممكنة.

يتضح مما سبق أن الطريقة التي تم بحثها توفر تقانة فعالة في تخفيض قـيم معامـل تراوح السرعة لأعمدة الدوران في الكامات القرصية من خلال اختيار قيمـة مثلـى للاختلاف المركزي.

❖ بيان الرموز

B, A	ثوابت عزم الإدارة	T_w	عزم وزن الكامة و التابع
b	سماكة الكامة	T_l	عزم الحمل المطبق
d	قطر ساق التابع	W_c	وزن الكامة
e	الاختلاف المركزي	W_f	وزن التابع و ساقه
E_k	القدرة الحركية لتركيبة الكامة	$\overline{x_G}, \overline{y_G}$	إحداثيات مركز ثقل الكامة من أجل $(\theta = 0)$
F	محصلة القوى المؤثرة في التابع	x_p, y_p	إحداثيات نقطة من جانبية الكامة
F_{in}	قوة عطالة التابع	y	إزاحة التابع
F_l	الحمل المطبق على التابع	y_v	الإزاحة الشاقولية للدائرة الأولية
F_s	قوة النابض	α, β, γ	$\left(\frac{N}{F}, \frac{R_1}{F}, \frac{R_2}{F}\right)$ على التتالي
h	انتقال التابع الأعظمي	δ	الانضغاط الابتدائي للنابض
I_o	عزم العطالة القطبي لسطح مقطع الكامة	Δ	معامل تراوح السرعة
J_o	عزم العطالة الكتلي للكامة	μ_b	معامل الاحتكاك بين التابع و دليله
k	ثابت صلابة النابض	μ_c	معامل الاحتكاك بين الكامة و التابع
l_a	الطول البارز من ساق التابع	ρ	كثافة معدن الكامة (الوزن النوعي)
l_b	الطول المفيد من ساق التابع	θ	زاوية دوران الكامة
m	كتلة التابع و ساقه	φ	الزاوية المتجه بن (r) و مماس منحني الخطوة
N	القوة المؤثرة بين الكامة و التابع	ψ	زاوية ضغط الكامة
r	نصف القطر الشعاعي لنقطة الأثر (C)	ω	السرعة الزاوية للكامة
r_b	نصف قطر الدائرة الأساسية للكامة	$(\,'\,)$	مشتق بدلالة الزاوية (θ)
r_f	نصف قطر دحروج التابع	$(\dot{\ })$	مشتق بدلالة الزمن (t)

r_p	نصف قطر الدائرة الأولية
R_1, R_2	قوتا رد الفعل بين ساق التابع و دليله
t	الزمن
T	العزم الصافي المحرك
T_m	عزم الإدارة
T_r	العزم المقاوم المحصل
T_f	عزم قوى الاحتكاك
T_s	عزم قوة النابض

المراجع

١- Genova, P. I., "Synthesis of Spring Equivalent to Flywheel for Minimal Coefficient of Fluctuation ", ASME Paper No. ٦٨-Mech-٦٥, ١٩٦٨.

٢- Skreiner, M.," Dynamic Analysis Used to Complete the Design of a Mechanism ", J. Mechanisms, Vol. ٥, ١٩٧٠, pp. ١٠٥-١١٩.

٣- Ogawa, K., and Funabashi, H., "On the Balancing of the Fluctuation In-put Torques Caused by Inertia Forces in the Crank-and-Roker Mechanism ", ASME J. Engng. Ind., Vol. ٩١, ١٩٦٩, pp. ٩٧-١٠٢.

٤- Paul, B.," Kinematics and Dynamics of Planar Machinery ", Prentice-Hall, NJ, ١٩٧٩.

٥- Hockey, B. A., "The Minimization of the Fluctuation of Input Shaft Torque in Plane Mechanisms ", Mechanism and Machine Theory ٧, ١٩٧٢, pp. ٣٣٥-٣٤٦.

٦- Mabie, H. H. & Reinholtz, C. F., " Mechanisms & Dynamics of Machinery ", John Wiley, ١٩٨٧.

٧- Shigley, J. E. & Uicker, J. J., " Theory of Machines & Mechanisms ", McGraw-Hill, ١٩٩٥.

٨- Norton, R. L., " Design of Machinery ", McGraw-Hill, ١٩٩٢.

٩- Tascan, S., " The Minimization of The Fluctuation of Input Shaft Speed in Cam Mechanisms ", Mechanism and Machine Theory ٢٠, ١٩٨٥, pp. ١٣٥-١٣٨.

١٠- Fenton, R. G., " Determining Minimum Cam Size ", Machine Design, Jan. ٢٠, ١٩٦٦, pp. ١٥٥-١٥٨.

١١- Mischke, C., "Optimal Offset on Translating Follower Plate Cams ", ASME J. Engng. Ind., Feb. ١٩٧٠, pp. ١٧٢-١٧٦.

١٢- Grosjean, J., " Kinematics & Dynamics of Mechanisms ", McGraw-Hill, ١٩٩١.

١٣- Kimbrell, J. T., " Kinematics Analysis & Synthesis ", McGraw-Hill, ١٩٩١.

١٤- DR. JAGDISH LAL, " Theory of Mechanisms & Machines ", Metropolitan Book Co. PVT. LTD. ١٩٩١.

١٥- Chen, F. Y., " Mechanics & Design of Cam Mechanisms", Pergamon Press, N.Y., ١٩٨٢.

١٦- Cowper, G. R., " A Computer Programme for calculating Shear Centres and Other Sections Properties ", National Establishment, Otawa, Canada, Lab. Memorandum ST-٦٨, ١٩٦٦

١٧- Buchanan, J. L., & Turner, P.R., "Numerical Methods & Analysis ", McGraw-Hill, ١٩٩٢.

١٨- Skeel, R. D. & Keiper, J.B., "Elementary Numerical Computing with Mathematica", McGraw-Hill, ١٩٩٣.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق٢٠٠٣/٤/١٦