دراسة الأداء الأمثل لنظام قيادة كهروميكانيكي مرن مزدوج الكتل باستخدام منظم سرعة تناسبي-تكاملي-تفاضلي (PID)

د. بديع زريفة*

الملخص

هَدَفَ هذا البحث إلى وضع طرائق هندسية لتحديد القيم التصميمية المثلى لبارامترات (*parameters*) نظام قيادة تعاقبي ذي كتل مزدوجة مع منظم تناسبي-تكاملي-تفاضلي *PID*، بحيث تؤدي إلى تحسين الخواص الديناميكية وتجعل التأرجح في النظام أقل ما يمكن، وذلك باستخدام طريقة البارامترات المتعددة المثلى التي ابتُكِرَتْ في البحث [2]. في هذا البحث وضعت معايير للتحكم الأمثل بنظم القيادة ثنائية المكاملة، إذْ إنَّ استخدام منظم *PID* في حلقة السرعة يجعل النظام ثنائي المكاملة – تكون سرعته ثابتة مع تغيير الحمل- مما يؤدي إلى تحسين دقة النظام. يبيّن هذا البحث أن استخدام منظم سرعة نوع *PID* يقضي على إمكانية ظهور طنين كهروميكانيكي بالنظام، وإن هذا الطنين يظهر لدى استخدام منظم سرعة تناسبي-تكاملي *PI* ومن أجل بارامترات محددة.

في هذا البحث جرى تحديد القيم المثلى للتردد والتأرجح ولمعامل نسبة الكتل فضلاً عن تحديد القيم المثلى لبارامترات المنظم *PID*. أظهرت نتائج البحث - ومن خلال مقارنة بارامترات الأداء الديناميكي للنظام- تفوق الطريقة المتبعة في هذا البحث على الطرائق السابقة.

الكلمات المفتاحية: أمثل، مزدوج الكتل، وصلة مرنة، منظم PID، قيادة كهربائية، الخواص الترددية للمطال، ثنائية المكاملة، دليل التأرجح.

* كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

1- المقدمة:

إن أغلب المنظومات الكهروميكانيكية هي منظومات متعددة الكتل تربط بينها وصلات ميكانيكية مرنة، لذلك فإن استخدام الطرائق التقليدية لضبط منظمات قيادتها- بوصفها كتلة واحدة- لن يجعلها مثلى.

إن وجود وصلات ميكانيكية مرنة يغير خواص نظام القيادة الآلية كلياً ويعدُّ سبباً أساسياً لتأرجح النظام في الحالة الديناميكية الأمر الذي يؤدي إلى عدم تلبية متطلبات العملية التكنولوجية، وإلى اهتراء عناصر النظام قبل أوانها [1].

يعدُّ نظام القيادة الكهربائية ثنائي الكتل من أكثر النظم الكهروميكانيكية انتشاراً (ويتألف من كتلة دائر المحرك الكهربائي والأجزاء المتعلقة به وكتلة الآلة الميكانيكية والأجزاء المتعلقة بها).

درس هذا النظام عدد كبير من الباحثين، وعلى سبيل المثال [1-7,5-10] وما تزال البحوث مستمرة، لدرجة أن لا تخلو أي مجلة متخصصة في هذا المجال من مقالات عن المنظومات ثنائية الكتل. إلا أن الأعمال المنشورة جميعها- باستثناء البحث [2] الذي لم يتطرق إلى موضوع الطنين الكهروميكانيكي أو إلى عملية ضبط المنظم PID- لا تُستخدم طريقة البارامترات المتعددة المثلى، التي تؤدي إلى حلول مثلى للمسألة المطروحة وإلى أعلى درجات الاستقرار مقارنة بالعديد من البحوث، التي جرت المقارنة بها في الأعمال [3,2].

ظهرت في السنوات الأخيرة طرائق عددية متقدمة، من بينها بناء منظمات عصبونية التي تمتلك كل ميزات جمل التحكم الرقمية، إلا أنها تحتاج إلى وقت كبير لتدريبها وتحديد قيم بارامتراتها (أوزانها)، كما أنها ومع إمكانية الحصول على معامل تضخيم عالٍ فلا يمكن التخلص من هبوط السرعة مع زيادة عزم الحمل M_L حتى قيمته الاسمية، بسبب عدم إمكانية إدخال عنصر مكاملة في بنية المنظم العصبوني [4]، وإذا أضفنا عنصر مكاملة بعد المنظم العصبوني مثلاً تصبح الجملة غير مثلى وقد تصبح غير مستقرة أحياناً.

هَدَفَ هذا البحث إلى وضع طريقة هندسية لتحديد البارامترات المثلى للنظام المدروس بحسب معايير تحكم رياضية علمية، وإلى بحث علاقة تأرجح المنظومة الكهروميكانيكية ببارامتراتها، وإظهار إمكانية ظهور طنين كهروميكانيكي في المنظومة ثنائية المكاملة ذات الكتل المزدوجة، وتقديم الحل المناسب لهذه المشكلة، وذلك باستخدام منظم نوع (PID) -Proportional-Integral-Derivative.

2 المخطط الصندوقي البنيوي لنظام القيادة الكهربائية ذي الكتل المزدوجة:

يبيّن الشكل 1 المخطط الصندوقي البنيوي النظامي لمنظومة القيادة الكهربائية مع منظم سرعة تناسبي-تكاملي-تفاضلي PID في حال وجود وصلة مرنة بين المحرك الكهربائي والآلة.

وقد اُستعملت في البحث الرموز الآتية:

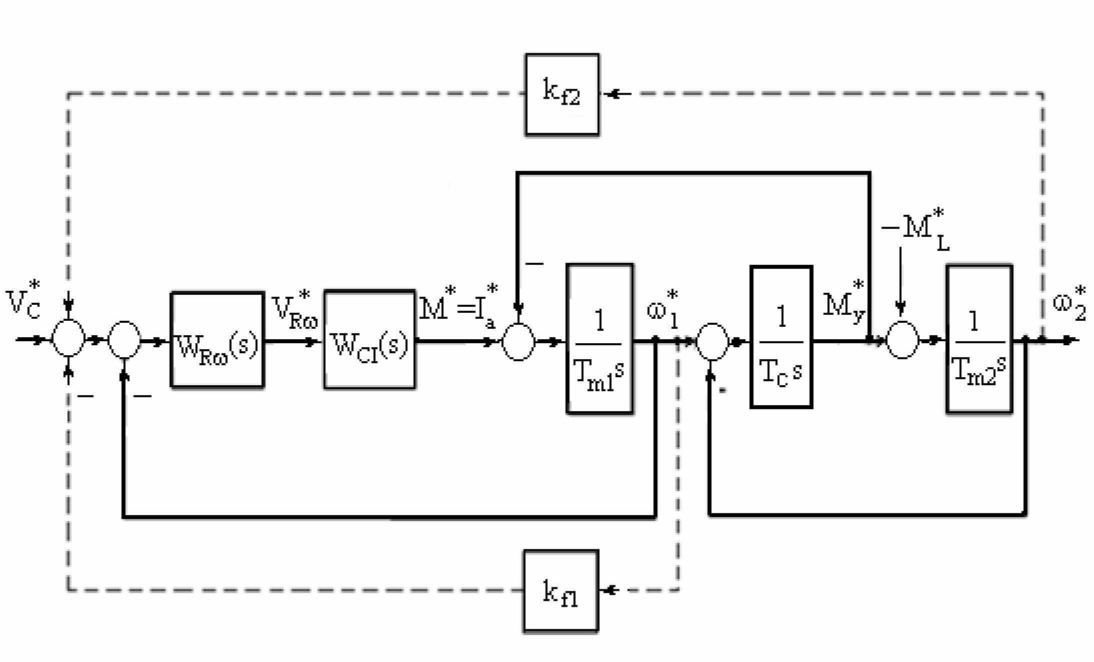
$T_{m2} = J_2 \dfrac{w_b}{M_b}, T_{m1} = J_1 \dfrac{w_b}{M_b}$ - الثابتان الزمنيان الميكانيكيان للكتلتين الأولى والثانية المتجمعتين.

w_b, M_b - القيم الأساسية المنسوب إليها كل من العزم والسرعة الزاوية، وقد عددنا في هذا العمل أنها تساوي القيم الاسمية للعزم والسرعة: $w_b = w_n, M_b = M_n$.

J_2, J_1 - عزما العطالة للكتلتين الأولى والثانية.

$T_C = \dfrac{M_b}{w_b C_{12}}$ - ثابت زمن القساوة للوصلة الكينوماتيكية المرنة.

C_{12} -معامل القساوة لعنصر المرونة في النظام.



الشكل 1. المخطط الصندوقي النظامي لنظام تحكم تعاقبي ذي كتل مزدوجة.

ندرج علاقات المتغيّرات بقواعدها الأساسية في الجدول 1.

الجدول 1. علاقات المتغيّرات بقواعدها.

V_C^*	V_{Rw}^*	I_a^*	w_1^*	M_y^*	M_L^*	w_2^*
$\frac{V_C}{V_Z}$	$\frac{V_{Rw}}{K_i I_n}$	$\frac{i_a}{I_n}$	$\frac{w_1}{w_n}$	$\frac{M_y}{M_n}$	$\frac{M_L}{M_n}$	$\frac{w_2}{w_n}$

إن المتغيّرات جميعها مبيّنة بواحدات نسبية: $w_2^*, M_L^*, M_y^*, w_1^*, I_a^*, V_{Rw}^*, V_C^*$ - بحسب التسلسل توتر الدخل (النسبي) أو إشارة التحكم، توتر خرج منظم السرعة، تيار المحرك، سرعة دوران المحرك الزاوية، العزم في العنصر المرن (عزم المرونة)، عزم الحمل المنقول إلى محور المحرك، والسرعة الزاوية للآلة.

إذْ V_Z - توتر الدخل المُعطى، K_i - معامل تحويل تجهيزات قياس التيار (معامل التغذية العكسية السالبة بالتيار).

يتألف نظام القيادة التعاقبي من حلقتين: حلقة داخلية تشكل حلقة التيار وحلقة خارجية تشكل حلقة السرعة.

في هذا العمل عُدّتْ حلقة التيار المغلقة منضبطة بحسب الطريقة التقليدية (بحسب المعيار النموذجي الأمثل [5]، الذي سيُشرَحُ في الفقرة 8-3) ولها تابع التحويل الآتي:

$$W_{CI}(s) = \frac{1}{2T_m^2 + 2T_m s + 1} \qquad (1)$$

وحيث إنَّ قيمة T_m تكون عادة صغيرة جداً فيمكن إهمال $2T_m^2$، وذلك بحسب معظم المراجع [10,5,1] لتصبح العلاقة (1) عندئذٍ على الشكل الآتي:

$$W_{CI}(s) = \frac{1}{2T_m s + 1} \qquad (2)$$

إلا أننا لن نقوم بهذا التقريب إلا بعد الدراسة والتأكد من أن ذلك ممكن.

ولمنظم السرعة تابع تحويل تناسبي-تكاملي- تفاضلي:

$$W_{Rw}(S) = \frac{k_{Rw}(t_C s + 1)(t_D s + 1)}{t_C s} \qquad (3)$$

3- الطنين في النظم الكهروميكانيكية ذات الكتل المزدوجة:

يظهر الطنين الكهروميكانيكي في النظام موضوع البحث -كما سنبيّن في هذه الفقرة- عند قيم محددة لثابت زمن حلقة التيار T_m، أي عندما يكون المنظم تناسبياً-تكاملياً، لذلك سنعدُّ في البداية بأن t_D في العلاقة (3) تساوي الصفر، ونجد توابع التحويل بواحدات نسبية (وذلك كي نقلل عدد بارامترات النظام)، ثم نحدد منها الخواص الترددية للمطال A للجملة المغلقة بالنسبة إلى إشارتي الدخل (التحكم V_C^*) و (الحمل M_L^*) ولمتغيّرات الخرج المراد بحثها وهي العزم في الوصلة المرنة والسرعة الزاوية للآلة:

-الخواص الترددية لمطال العزم في الوصلة المرنة عندما تكون إشارة التحكم V_C^* هي إشارة الدخل:

$$A_y=\frac{|M_y^*(jv)|}{|V_C^*(jv)|}=\frac{t_{m2}kv\sqrt{1+b^2v^2}}{|Q(jv)|} \quad (4)$$

-الخواص الترددية لمطال السرعة الزاوية للآلة الميكانيكية عندما تكون إشارة التحكم V_C^* هي إشارة الدخل:

$$A_2=\frac{|w_2^*(jv)|}{|V_C^*(jv)|}=\frac{k\sqrt{1+b^2v^2}}{|Q(jv)|} \quad (5)$$

-الخواص الترددية لمطال العزم في الوصلة المرنة عندما يكون عزم الحمل M_L^* هو إشارة الدخل:

$$A_y^M=\frac{|M_y^*(jv)|}{|M_L^*(jv)|}=\frac{|Q_y(jv)|}{|Q(jv)|} \quad (6)$$

إذْ:

$$|Q_y(jv)|=\sqrt{\left(k-\frac{1}{g}v^2+\frac{2t_m^2}{g}v^4\right)^2+\left(kbv-\frac{2t_m v^3}{g}\right)^2}$$

-الخواص الترددية لمطال السرعة الزاوية للآلة الميكانيكية عندما يكون عزم الحمل M_L^* هو إشارة الدخل:

$$A_2^M=\frac{|M_2^*(jv)|}{|M_L^*(jv)|}=\frac{|Q_2(jv)|}{|Q(jv)|} \quad (7)$$

إذْ:

$$|Q_2(jv)|=\frac{1}{t_{m2}}\sqrt{\begin{aligned}&\{[2t_m(1-\tfrac{1}{g})+kbg]v^2\\&-2t_m v^4\}^2\\&+\{(\tfrac{1}{g}-1-kg)v+\\&[2t_m^2(1-\tfrac{1}{g})\\&+1]v^3-2t_m^2v^5\}^2\end{aligned}}$$

يأخذ المقام في العلاقات (4) - (7) الشكل الآتي:

$$|Q(jv)|=\sqrt{\begin{aligned}&[k(1-gv^2)+\\&v^2(1-v^2)(2t_m^2v^2-1)]^2\\&+[bkv(1-gv^2)+\\&2t_m v^3(v^2-1)]^2\end{aligned}}$$

إذْ: $v=wT_y$ - التردد بالوحدات النسبية.

$T_y=\sqrt{T_{m1}T_{m2}T_C/T_m}$ - الثابت الزمني للاهتزازات المرنة في النظام الكهروميكانيكي ذي الكتل المزدوجة الذي أخذ كقاعدة للزمن.

$$g=\frac{T_{m1}+T_{m2}}{T_{m1}}=\frac{T_m}{T_{m1}}=\frac{J_1+J_2}{J_1}$$

-معامل نسبة الكتل.

وقد رمزنا إلى:

$$t_m=\frac{T_m}{T_y},b=\frac{t_C}{T_y},t_{m2}=\frac{T_{m2}}{T_y},$$

و $-k = KT_y^2 = \frac{k_{Rw}T_y^2}{T_m t_C} = \frac{k_{Rw}T_y}{T_m b}$ معامل التضخيم النسبي للجملة المفتوحة. كما أننا عوضنا متحول لابلاس النسبي $s = T_y p$ بالقيمة (jv).

إن علاقات الخواص الترددية للمطال (4) - (7) تمثل <u>النموذج الرياضي</u> للنظام ثنائي المكاملة ذي الكتل المزدوجة في المجال الترددي.

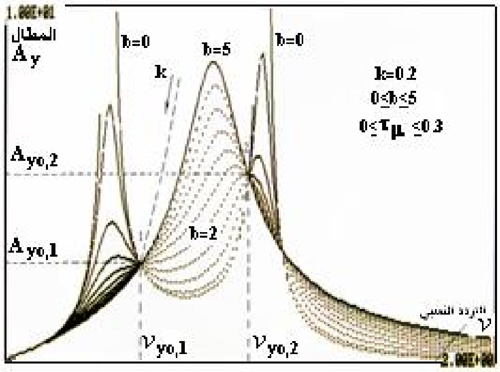
من أجل دراسة هذا النموذج الرياضي كُتِبَ برنامجان مخصصان أحدهما يقوم برسم الخواص الترددية للمطال، والآخر يحسب البارامترات المثلى لهذه الخواص في النهايات الحدية المثلى.

إن عزم الحمل M_L يشكل إشارة تشويش على جملة ثنائية المكاملة، لذلك فتأثيره في الجملة يكون محدوداً، لذلك سوف تتركز الدراسة في هذا البحث بشكل أساسي على العلاقتين (4) و (5).

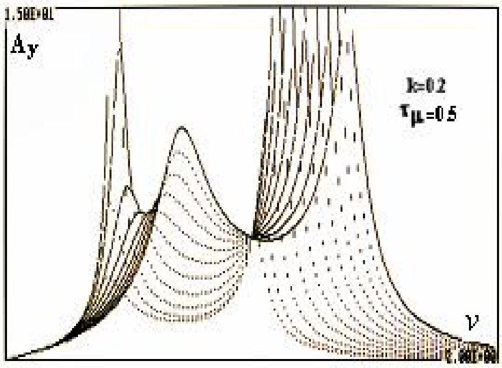
عند قيم معلومة لبارامترات النظام g, k, t_{m2}, t_m تصبح العلاقتان (4) - (5) تابعتين للتردد النسبي v وللثابت الزمني النسبي لمنظم السرعة b_i.

في فراغ هذين المتغيّرين رُسمت حزمة منحنيات الخواص الترددية لمطال العزم في الوصلة المرنة المبيّنة في الشكلين (2) و (3) وحزمة منحنيات الخواص الترددية لمطال السرعة الزاوية للآلة المبيّنة في الشكلين (4) و(5).

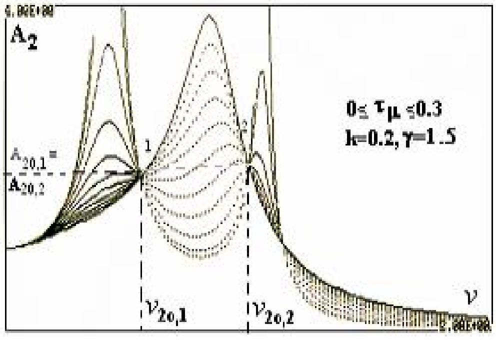
نلاحظ من الشكلين (2) و(4) أنه عندما يكون الثابت الزمني النسبي لحلقة التيار t_m $t_m < 0.3$، تتشكل في حزمة منحنيات الخواص الترددية للمطال نهايتان حديتان مثالتان $A_{yo,1}$ و $A_{yo,2}$ (انظر الشكل 2) تسمحان بتحديد بارامترات مثلى للنظام



الشكل 2. حزمة الخواص الترددية لمطال العزم في الوصلة المرنة لحالة $0 \le t_m < 0.3$ و $g = 1.5$.



الشكل 3. حزمة الخواص الترددية لمطال العزم في الوصلة المرنة لحالة $t_m = 0.5$ و $g = 1.5$.



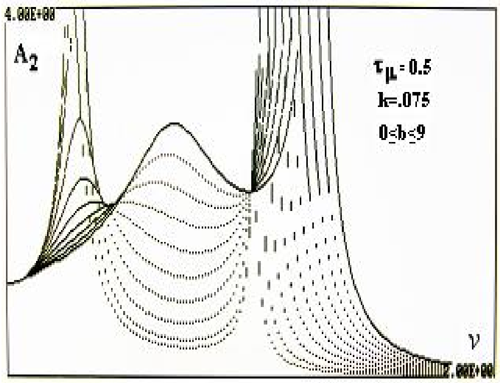
الشكل 4. حزمة الخواص الترددية لمطال سرعة الآلة عند $0 \le t_m < 0.3$ و $g = 1.5$.

(ولذلك عند استخدام منظم تناسبي- تكاملي يُشترط بأن لا تزيد $t_m = \frac{T_m}{T_y}$ على 0.3 [2])، أمّا عندما تصبح

$t_m \geq 0.3$، فيحصل في منطقة الترددات العالية تأرجح كبير (طنين كهروميكانيكي) لا يمكن السيطرة عليه بواسطة منظم PI (انظر الشكلين (3) و (5)).

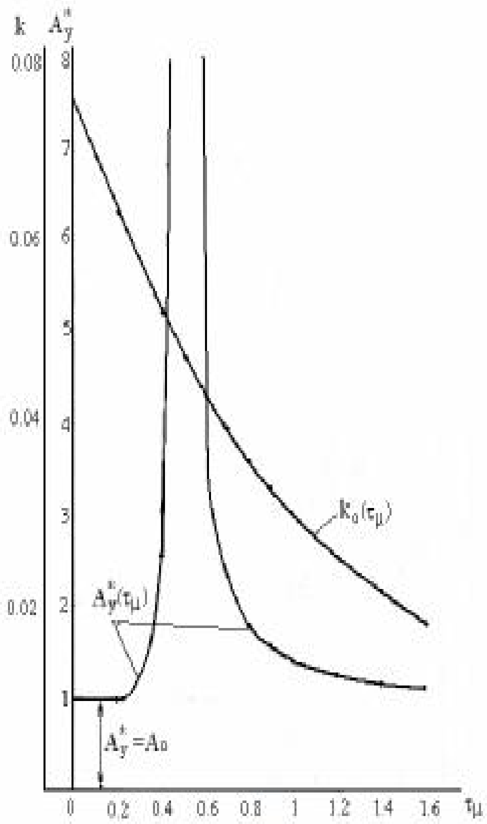
من أجل تحديد مجال الطنين الكهروميكانيكي دُرِسَتْ في هذا البحث علاقة التأرجح النسبي للوصلة المرنة $A_y^* = A_{y\max,2} / A_{yo,2}$ بالثابت الزمني النسبي لحلقة التيار t_m: $A_y^* = f(t_m)$، عند قيم مثلى لكل من معامل التضخيم k_o وللثابت الزمني النسبي لمنظم السرعة b_o، ولمختلف قيم g.

إِذْ: $A_{y\max,2}$ - أقل قيمة عظمى في حزمة منحنيات الخواص الترددية للمطال في مجال الترددات العالية، و $A_{yo,2} = A_y(\nu = 1)$ - القيمة المثلى لمطال الخواص الترددية في مجال الترددات العالية.

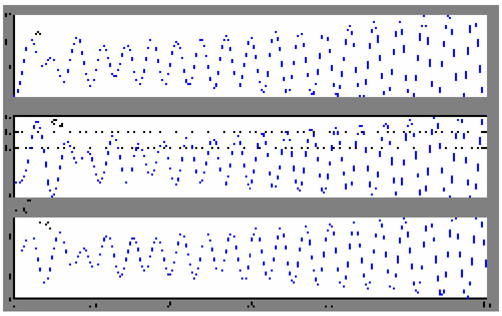


الشكل 5. حزمة الخواص الترددية لمطال سرعة الآلة لحالة $t_m = 0.5$ و $g = 1.5$.

يتبيّن من خلال تحليل النتائج، المبيّنة على مثال الشكل (6) لحالة $g = 3$ (الأشكال الحاصلة لمختلف قيم g متشابهة)، بأنه عندما تكون $t_m < 0.3$ يكون للتأرجح قيمة مثلى $A_y^* \cong 1$ أي إنَّ $A_{y\max,2} = A_{yo,2} = A_y(\nu = 1)$. أمَّا عندما تقع t_m ضمن، ما سنطلق عليها تسمية "المنطقة المحرمة" $0.65 > t_m \geq 0.3$، يصبح تأرجح الجملة كبيراً جداً لدرجة عدم استقرارها، وذلك عندما تقع t_m في وسط المنطقة المحرمة (انظر الحالة العابرة المبيّنة في الشكل 7 لحالة $t_m = 0.5$)،



الشكل 6. علاقة ذروة الخواص الترددية للمطال (ومعامل تضخيم النظام) بالثابت الزمني النسبي لحلقة التيار t_m.



الشكل 7. الحالة العابرة عندما تكون $t_m = 0.5$.

ثم تعود الجملة للاستقرار إذا أصبحت $t_m \geq 0.65$، ولكن للحصول على هذا الاستقرار يجب تخفيض قيمة معامل تضخيم الجملة بزهاء 3.5 مرة، مما يؤدي إلى

تخفيض دقة الجملة في الحالة الديناميكية، وتصبح الجملة بعيدة كل البعد عن الجملة المثلى.

مما تقدم وبعد التأكد من عدم استقرار الجملة من خلال رسم الحالة العابرة لحالة $t_m = 0.5$ كما هو مبيّن في الشكل 7، نجد أن استخدام منظم سرعة تناسبي-تكاملي مع المنظومة ثنائية الكتل قد يؤدي إلى ظهور تأرجح زائد قد يتسبب بتحطيم المنظومة بالكامل، ولذلك فمن الأنسب (بل ومن الضروري في حال كانت $t_m \geq 0.3$) استخدام منظم PID مع هذه المنظومة، لتحقيق تحكم أمثل بها (أي للتخلص من الطنين).

4- دراسة تأثير ثابت التفاضل الزمني t_D في تأرجح النظام وتحديد قيمه المثلى:

كما ذكرنا في الفقرة السابقة فإن الهدف من استخدام منظم PID هو التخلص من حالة عدم الاستقرار التي يمكن أن تحصل في نظم القيادة الكهروميكانيكية مع منظم PI بسبب الطنين الكهروميكانيكي، لذلك أُجريت هذه الدراسة لحالة $t_m = 0.5$، أي عندما تقع t_m في وسط المنطقة المحرمة (انظر الشكل 6).

إن الخواص الترددية لمطال سرعة الآلة- مع الأخذ بالحسبان العلاقتين (1) و (3) - لها الشكل الآتي:

$$A_2 = \frac{k\sqrt{(1-bdv^2)^2+(b+d)^2v^2}}{|Q(jv)|} \qquad (8)$$

يأخذ المقام في (8) الشكل الآتي:

$$|Q(jv)| = \sqrt{\begin{matrix}[k-(1+kg+kbd)v^2+ \\ (1+2t_m^2+kbdg)v^4- \\ 2t_m^2v^6]^2+[kv(d+b)- \\ (2t_m+kdg+kbg)v^3+ \\ 2t_mv^5]^2\end{matrix}}$$

إذْ: $d = \frac{t_D}{T_y}$ -ثابت تفاضل المنظم PID بوحدات نسبية.

باستخدام حزمة البرامج المخصصة لهذا البحث دُرِسَ التابع (8) لحالة $t_m = 0.5$.

يمكن تلخيص نتائج هذه الدراسة بما يأتي:

1- عند $t_D = 0$ تكون الجملة غير مستقرة وهذا يتطابق مع الحالة المبيّنة في الشكل 5.

2- إن مجال تغيّر t_D الذي يمكن أن يحقق قيمة مثلى لدليل التأرجح هو مجال واسع جداً:

$$6 > \frac{t_D}{2T_m} > 0.3$$

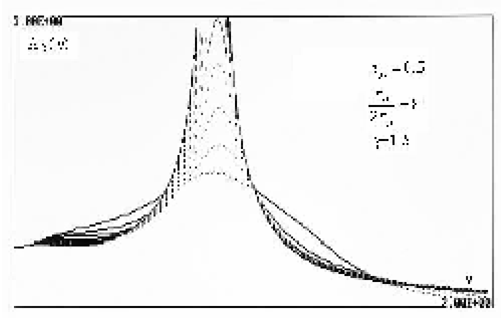
ويكون في هذا المجال شكل حزمة منحنيات الخواص الترددية للمطال مشابهاً تماماً لما هو مبيّن في الشكل 4.

3-عندما تصبح $\frac{t_D}{2T_m} > 6$ تفقد الخواص الترددية للمطال تدريجياً شكلها المألوف (مع نهايات حدية مثلى) كما هو مبيّن في الشكل 8. يمكن تعليل هذا الأمر بوضع $t_D s >> 1$ في (3) فيُختصر أحد عناصر التكامل وتصبح الجملة مشابهة للجملة أحادية المكاملة.

4- عندما تكون $0.3 \geq \frac{t_D}{2T_m} > 0.05$ يكون دليل التأرجح في مجال الترددات العالية أكبر من القيمة المثلى لدليل التأرجح كما هو مبيّن في الشكل 9.

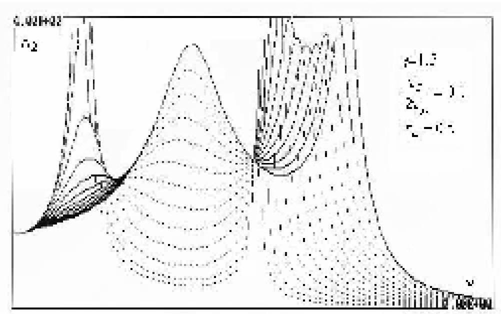
دليل التأرجح (Index of oscillation)-هو نسبة القيمة العظمى للخواص الترددية لمطال الجملة المغلقة إلى قيمتها عند التردد الصفري.

يبيّن الشكل 10 علاقة دليل التأرجح بثابت التفاضل النسبي. وهو يوضح مختلف حالات تغيّر t_D المذكورة سابقاً.



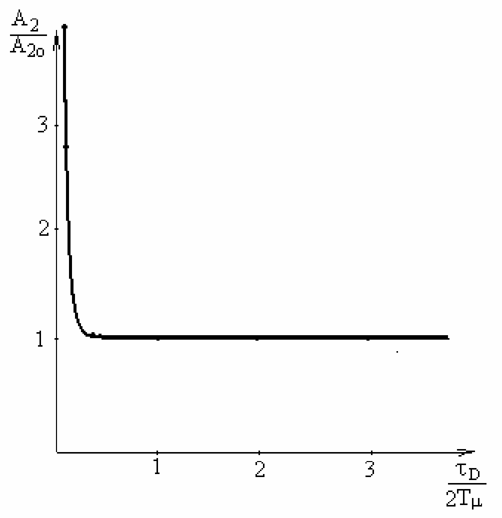
الشكل 8. حزمة الخواص الترددية لمطال سرعة الآلة لحالة

$t_m = 0.5$ و $\frac{t_D}{2t_m} = 8$.



الشكل 9. حزمة الخواص الترددية لمطال سرعة الآلة لحالة

$t_m = 0.5$ و $\frac{t_D}{2t_m} = 0.1$.



الشكل 10.علاقة دليل التأرجح بثابت التفاضل النسبي $\frac{t_D}{2T_m}$.

5-معايير التحكم الأمثل بالنظم الكهروميكانيكية ذات الكتل المزدوجة مع منظم تناسبي-تكاملي-تفاضلي (PID):

اتضح مما سبق أنَّ مجال تغيّر t_D الذي يحقق قيمة مثلى لدليل التأرجح هو المجال:

$$6 > \frac{t_D}{2T_m} > 0.3$$

هذا يعني أن بإمكاننا أخذ أي قيمة لثابت التفاضل t_D ضمن المجال المذكور.

لذلك وبهدف تبسيط الدراسة نضع في العلاقة (3) $t_D = 2T_m$، فنتخلص بذلك من تأثير t_m، ويصبح النموذج الرياضي للجملة على الشكل الآتي:

-الخواص الترددية لمطال العزم في الوصلة المرنة (عندما تكون V_C^* هي إشارة الدخل):

$$A_y = \frac{t_{m2} kv\sqrt{1+b^2v^2}}{|Q_1(jv)|} \qquad (9)$$

-الخواص الترددية لمطال السرعة الزاوية للآلة الميكانيكية (عندما تكون V_C^* هي إشارة الدخل):

$$A_2 = \frac{k\sqrt{1+b^2v^2}}{|Q_1(jv)|} \qquad (10)$$

إذْ:

$$|Q_1(jv)| = \sqrt{\begin{matrix}[k(1-gv^2)-v^2(1-v^2)]^2 + \\ [bkv(1-gv^2)]^2\end{matrix}}$$

تتصف منظومات القيادة الكهربائية ذات الكتل المزدوجة بالتأرجح الزائد، وبشكل خاص يظهر ذلك في العنصر المرن، وكذلك في الآلة الميكانيكية عندما تكون نسبة الكتل $g < 2$. ولذلك وضعت في هذا العمل مسألة تحديد أقل تأرجح ممكن للمنظومة الذي يمكن تقييمه بحسب القيمة العظمى للخواص الترددية للمطال.

من العلاقتين (9) و (10) رُسمت في فراغ التردد النسبي v، والثابت الزمني النسبي لمنظم السرعة b_i (عند قيم

معلومة لبارامترات الجملة الأخرى $(t_{m2}, k, g$ الأشكال (2) و(4) لحزمة منحنيات الخواص الترددية للمطال. ومن أجل قيم b نحصل على مقاطع كل منها عبارة عن الخاصة الترددية للمطال المعروفة للجملة ذات الكتل المزدوجة.

تُظهر هذه الأشكال الفرق بين ما هو وارد في المراجع العلمية حول نتائج التحكم الأمثل بالمنظومات ثنائية المكاملة ذات الكتلة الواحدة [6] والمنظومات ذوات الكتل المزدوجة التي لها خاصة جوهرية ملموسة، تكمن في الشكل المميز للخواص الترددية للمطال مع قيمتين عظمتين (ذروتين)، وعليه فإن قيمة هاتين الذروتين ومكانتهما تتعلق ببارامترات تصميم المنظومة وضبطها.

إن زيادة متطلبات الدقة والموثوقية لعمل جمل قيادة المنظومات الكهروميكانيكية تتطلب تحديد بارامترات المنظمات التي تحقق الحد الأدنى لهاتين القيمتين العظمتين، وهذا يحتم من الناحية الرياضية إيجاد النهايات الحدية المثلى في فراغ البارامترات المتغيّرة لحزمة الخواص الترددية للمطال.

أُجريَتْ في هذا العمل البحوث اللازمة، بمساعدة الحاسوب، لجعل الخواص الترددية لمطال الجمل التعاقبية ذات الكتل المزدوجة مع الوصلة المرنة بالشكل الأمثل مع استخدام المعايير التالية لتقييم أمثلية التحكم:

1- أخفض قيمة للذروة العمومية في منحنى حزمة الخواص الترددية لمطال عزم المرونة عند تغيير معامل التضخيم k_i، والثابت الزمني النسبي لمنظم السرعة b_i، الذي يحدد تردد الانكسار المنخفض في خواص التردد اللوغارتمية لمطال الجملة المفتوحة.

$$\min_{b_i, k_i}\left\{\max_{\nu} A_y(\nu)\right\}, \quad \nu \in (0, \nu_K) \quad (11)$$

(الذروة العمومية- هي الذروة العليا من بين الذروتين).

2-أخفض قيمة للذروة العمومية في منحني حزمة الخواص الترددية لمطال سرعة الآلة عند تغيير معامل التضخيم k_i، والثابت الزمني النسبي لمنظم السرعة b_i.

$$\min_{b_i, k_i}\left\{\max_{\nu} A_2(\nu)\right\}, \quad \nu \in (0, \nu_K) \quad (12)$$

إن العلاقتين (11) و (12) تعنيان بأنه يجب أن نغير البارامترات k, b حتى نحصل على أقل ذروة من بين ذروات الخواص الترددية للمطال (دليل التأرجح)، بتغيير التردد النسبي من الصفر حتى التردد النسبي النهائي ν_K.

3- أقل قيمة لدليل تأرجح الآلة عند إعطاء قيمة معامل التضخيم k_r وتغيير الثابت الزمني النسبي b_i.

$$\min_{b_i, k_i = k_r}\left\{\max_{\nu} A_2(\nu)\right\}, \nu \in (0, \nu_K) \quad (13)$$

العلاقة (13) تعني بأن نقوم بإعطاء معامل التضخيم نفسه المحسوب من خلال طرائق ضبط معروفة سابقاً للجملة ثم نغير البارامتر b، حتى نحصل على أقل دليل تأرجح. ومن أجل حساب كل دليل تأرجح يتم تغيير التردد النسبي من الصفر حتى التردد النسبي النهائي ν_K.

4- أكبر معامل تضخيم عند إعطاء قيمة دليل التأرجح للآلة وتغيير الثابت الزمني النسبي لمنظم السرعة b_i.

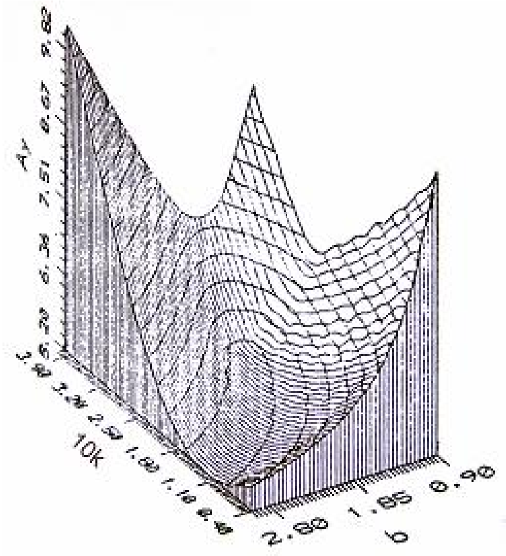
$$\max_{b_i, \nu} k \left| A_2 = A_{2OPT.}, \quad \nu \in (0, \nu_K) \right. \quad (14)$$

العلاقة (14) تعني بأن نقوم بإعطاء دليل التأرجح نفسه المحسوب من خلال طرائق ضبط معروفة سابقاً للجملة ثم نغير البارامتر b، حتى نحصل على أعلى معامل تضخيم ممكن. ومن أجل حساب كل معامل تضخيم يتم تغيير التردد النسبي من الصفر حتى التردد النسبي النهائي ν_K.

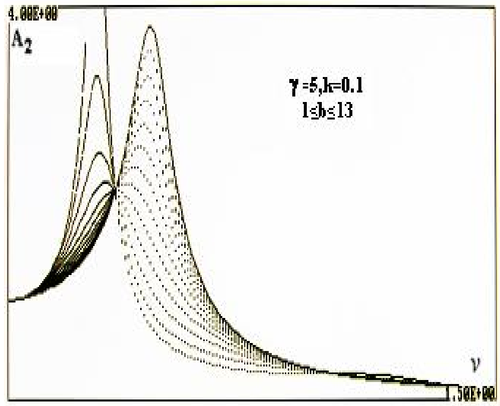
يتبيّن من خلال تحليل حزمة منحنيات الخواص الترددية للمطال بأن تغيير معامل التضخيم يؤثر في وضع النهاية الحدية الأولى (1)، فعند زيادة معامل التضخيم تنتقل هذه النهاية الحدية للأعلى وعند نقصانه - للأسفل بحسب المسار المرسوم على الشكل 2، أما وضع النهاية الحدية الثانية (2) فلا يتغيّر بتغيير معامل التضخيم.

في فراغ البارامترين b و k رُسمت مجسمات ثلاثية البعد لقيم الذروات العمومية في منحنى حزمة الخواص الترددية للمطال. يتضح بأن لهذه المجسمات (انظر الشكل 11) شكلاً مميزاً (وادٍ ضيق) له قعر يمثل مجموعة نقاط تُطابق القيمة الصغرى لذرى الخواص الترددية للمطال، ويظهر قيمة صغرى (min) غير صارمة، هذا يعطينا حرية اختيار أكبر معامل تضخيم من بين مجموعة قيمه (هذا يعطي أكبر دقة وأقل تأرجحاً للنظام) وتكون النهايتان الحديتان المثاليتان في حزمة الخواص الترددية للمطال على مستوٍ واحد. بهذا تكمن فكرة معياري التحكم الأمثل الأول والثاني.

المعياران الثالث والرابع للتحكم الأمثل يمكن أن ينسبا إلى حالة خاصة عندما يكون للخواص الترددية للمطال نهاية حدية مثلى واحدة، وهذا يظهر عندما يكون أحداثيا الخرج المقاد هو سرعة الآلة لحالة $g > 2$ (انظر الشكل 12). كما يمكن استخدام المعيارين الثالث والرابع في حال وجود نهايتين حديتين ولكن ارتفاع الأولى أعلى من ارتفاع الثانية.



الشكل 11. مجسم قيم الذروات العمومية الصغرى في حزم الخواص الترددية لمطال العزم في الوصلة المرنة لحالة $g = 1.5$.

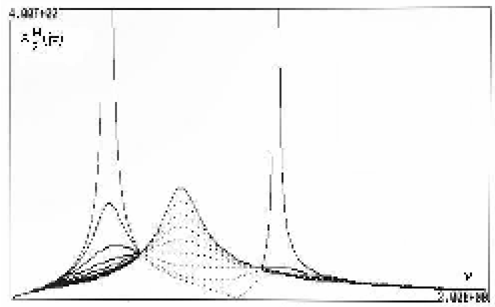


الشكل 12. حزمة الخواص الترددية لمطال سرعة الآلة عند $g = 5$.

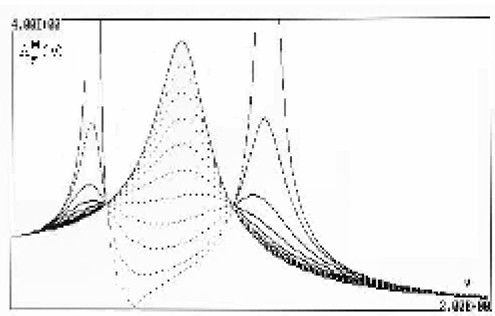
6- دراسة النظام بالنسبة إلى عزم الحمل:

دُرِسَ في هذه الفقرة النظام بحسب العلاقات (6) و(7)، أي عندما تكون إشارة الدخل هي عزم الحمل M_L^*.

يبيّن الشكلان (13) و (14) حزمتي الخواص الترددية لمطال سرعة الآلة وعزم المرونة عندما تكون إشارة الدخل هي عزم الحمل M_L^*.



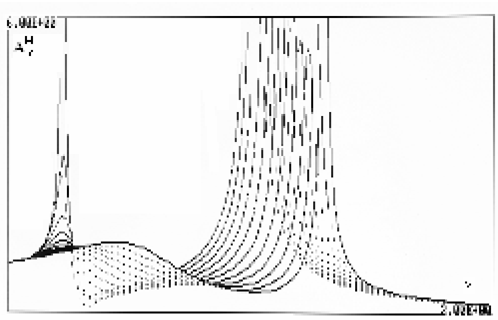
الشكل 13. حزمة الخواص الترددية لمطال سرعة الآلة بالنسبة إلى عزم الحمل عند $g = 2$.



الشكل 14. حزمة الخواص الترددية لمطال العزم في الوصلة المرنة بالنسبة لعزم الحمل لحالة $g = 2$.

إن دراسة النظام بالنسبة إلى عزم الحمل M_L^* أظهرت تشابهاً تاماً مع الدراسة التي تمت بالنسبة إلى إشارة التحكم V_C^*؛ وذلك من حيث:

- وجود نهايتين حديتين مثاليتين أو نهاية حدية واحدة في حزمة الخواص الترددية للمطال بحسب قيمة g. لذلك فمعايير التحكم الأمثل السابقة تبقى نفسها عند دراسة النظام بالنسبة إلى عزم الحمل (انظر الشكلين 13 و14).
- ظهور الطنين الكهروميكانيكي عند استخدام منظم نوع PI و $t_m \geq 0.3$ كما يبيّن الشكل 15. نلاحظ من هذا الشكل أيضاً عدم تقاطع المنحنيات في منطقة الترددات العالية واختفاء النهاية الحدية المثلى الثانية.



الشكل 15. حزمة الخواص الترددية لمطال العزم في الوصلة المرنة بالنسبة إلى عزم الحمل لحالة $t_m = 0.5$ و $g = 2$.

أمّا بالنسبة إلى أوجه التباين فهي بسيطة وبديهية فعندما يكون M_L^* إشارة دخل:

- يكون دليل تأرجح سرعة الآلة صغيراً.
- عند تردد يساوي الصفر، أي في الحالة المستقرة، يصبح الخطأ بالنسبة إلى السرعة يساوي الصفر، ويصبح للعزم قيمة معينة عند هذا التردد.

7- تحديد البارامترات المثلى للنظام:

لتحديد البارامترات المثلى للنظام نستخدم الشروط الكافية والوافية لوجود نهايات حدية مثلى:

$$\frac{\partial A}{\partial v} = 0, \quad \frac{\partial^2 A}{\partial v^2} < 0$$
$$\frac{\partial A}{db} = 0, \quad \frac{\partial^2 A}{\partial b^2} - (\frac{\partial^2 A}{\partial b^2})/(\frac{\partial^2 A}{\partial v^2}) > 0 \qquad (15)$$

هنا لم نكتب دلائل A (2) و (y) بهدف التعميم.

بمساعدة هذه الشروط نحدد مختلف البارامترات المثلى للنظام. فلتحديد القيمة المثلى لمعامل التضخيم- بحسب الشروط (15)- نُجري الاشتقاق الجزئي $\frac{\partial A_y}{\partial b}$ للعلاقة (9) ونساويه بالصفر:

$$\frac{\partial A_y}{\partial b}=\frac{2bv^3t_{m2}k}{2\sqrt{1+b^2v^2}}|Q_1(jv)|-\frac{2bk^3v^3t_{m2}(1-gv^2)^2\sqrt{1+b^2v^2}}{2|Q_1(jv)|}=0$$

نضرب بالمقدار $\sqrt{1+b^2v^2}\,|Q_1(jv)|$ فنحصل على:

$$[k(1-gv^2)-v^2(1-v^2)]^2+b^2k^2v^2(1-gv^2)^2-k^2(1-gv^2)^2(1+b^2v^2)=0$$

بفك الأقواس والاختصار نحصل على قيمة معامل التضخيم الأمثل:

$$k_o=\frac{v^2(1-v^2)}{2(1-gv^2)} \qquad (16)$$

تُظهر العلاقة (16) المعنى الفيزيائي لطريقة ضبط النظام المقترح التي تتميز عن طرائق الضبط التقليدية للجمل التعاقبية [5]، بأنها تعوض عن التأثير الاهتزازي لعنصر المرونة في الجزء الميكانيكي من النظام $(1+gT_y^2s)/(1+T_y^2s)$ في الجملة. كما أنَّنا قد وجدنا أن هذه العلاقة (16) مشتركة لإحداثيات الخرج المُقادة جميعها.

لإيجاد القيمة المثلى لبارامتر المنظم b نقوم بإجراء الاشتقاق الجزئي $\frac{\partial A_y}{\partial v}$ في النقطة $k_o(v)$ ونساويه بالصفر:

$$\frac{\partial A_y}{\partial v}=(kt_{m2}\sqrt{1+b^2v^2}+\frac{2b^2v^2t_{m2}k}{2\sqrt{1+b^2v^2}})|Q_1(jv)|-kt_{m2}v\sqrt{1+b^2v^2}\{[k(1-gv^2)-v^2(1-v^2)][2kgv-2v(1-2v^2)]+vbk(1-gv^2)[bk(1-gv^2)-2bkgv^2]\}/|Q_1(jv)|=0 \qquad (17)$$

نضرب بالمقدار $\sqrt{1+b^2v^2}\,|Q_1(jv)|$ فنحصل على:

$$(1+2b^2v^2)\{[k(1-gv^2)-v^2(1-v^2)]^2+b^2k^2v^2(1-gv^2)^2\}-v(1+b^2v^2)\{[k(1-gv^2)-v^2(1-v^2)][-2kgv-2v(1-2v^2)]+vb^2k^2(1-gv^2)(1-3gv^2)\}=0$$

نعوض k بقيمته المثلى من (16) ثم نختصر على المقدار $v^4(1-v^2)^2$ فينتج:

$$(1+2b^2v^2)(1-v^2)(1-gv^2)-2gv^2(1-v^2)-4(1-2v^2)(1-gv^2)-b^2v^2(1-3gv^2)(1-v^2)=0$$

ومنها نحصل على:

$$b^2v^2(1-v^2)(1+gv^2)=5gv^4+3-v^2(g+7)$$

إذاً فإن قيمة الثابت الزمني النسبي لمنظم السرعة في النهاية الحدية المثالية الأولى هي:

$$b_{yo,1}=\frac{1}{v}\sqrt{\frac{(5gv^4+3)-v^2(g+7)}{(1+gv^2)(1-v^2)}} \qquad (18)$$

إن النهايات الحدية المثلى هي نقاط تقاطع منحنيات الخواص الترددية للمطال، ويمكن إثبات ذلك من خلال العلاقة (9) بمساواة $A_y(b_1)=A_y(b_2)$ فنحصل على:

$$(1+b_1^2v^2)\{[k(1-gv^2)-v^2(1-v^2)]^2+b_2^2k^2v^2(1-gv^2)^2\}=(1+b_2^2v^2)\{[k(1-gv^2)-v^2(1-v^2)]^2+b_1^2k^2v^2(1-gv^2)^2\}$$

أو

$$k^2v^2(1-gv^2)^2(b_2^2-b_1^2)+[k(1-gv^2)-v^2(1-v^2)]^2(b_1^2-b_2^2)v^2=0$$

إذاً:

$$k(1-gv^2)-v^2(1-v^2)=\pm k(1-gv^2)$$

بأخذ إشارة الزائد (+)، ينتج:

$$v^2(1-v^2)=0 \Rightarrow v=0 \text{ و } v=\pm 1$$

بهذا الشكل نستنتج أن القيمة المثلى لتردد الذروة الواقعة في مجال الترددات العالية هي نقطة تقاطع منحنيات الخواص الترددية للمطال وتساوي:

$$v_{o2} = 1 \qquad (19)$$

وبأخذ إشارة ناقص (-) ينتج:

$$k = k_o = \frac{v^2(1-v^2)}{2(1-gv^2)} \qquad (20)$$

ومن العلاقة (20) يمكن إيجاد علاقة تردد النهاية الحدية المثلى الأولى بمعامل التضخيم:

$$v_{01} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1+2kg-\sqrt{(1+2kg)^2-8k}} \qquad (21)$$

بمقارنة العلاقة (16) مع (20) نستنتج أن نقطتي تقاطع منحنيات الخواص الترددية للمطال هما النهايتان الحديتان المثلتان.

نضع القيمة المثلى للتردد النسبي في النهاية الحدية الثانية من (19) في (17) فنحصل على الثابت الزمني النسبي الأمثل لمنظم السرعة في هذه النهاية:

$$k(1+2b^2)(1-g)+2kg -$$
$$2-b^2k(1-3g)=0$$

$$b_{yo,2} = \sqrt{\frac{2}{k(1+g)}-1} \qquad (22)$$

لتحديد القيمة العظمى للمطال في النهاية الحدية الثانية التي تمثل القيمة العظمى المثلى لمطال عزم المرونة في النظام، نضع $v = v_{o2} = 1$ في (9) فنحصل على:

$$A_{yo} = A_{yo,2} = \frac{t_{m2}}{g-1} \qquad (23)$$

وبوضع قيمة k_o من (20) في (9) نحصل على القيمة العظمى المثلى للمطال في النهاية الحدية الأولى:

$$A_{yo,1} = \frac{t_{m2}v}{1-gv^2} \qquad (24)$$

ومنه نحدد التردد في النهاية الحدية الأولى:

$$v_{yo,1} = \frac{-t_{m2}+\sqrt{t_{m2}^2+4gA_y^2}}{2gA_y} \qquad (25)$$

بوضع العلاقة (23) في (25) نجد بأن التردد النسبي في النهاية الحدية المثلى الأولى عندما تكون النهايتان الحديتان على المستوى نفسه:

$$v_{yo,1} = \frac{1}{g} \qquad (26)$$

بوضع قيمة التردد الأمثل من (26) في (16) و(18) ثم وضع قيمة k_{yo} الحاصلة (العلاقة (27) التالية) في (22) نحصل على علاقات تحديد بارامترات ضبط النظام بحسب المعيار الأمثل الأول:

$$k_{yo} = \frac{g+1}{2g^3} \qquad (27)$$

$$b_{yo,1} = \frac{g}{g+1}\sqrt{(g-1)(3g+5)} \qquad (28)$$

$$b_{yo,2} = \sqrt{\frac{2}{k(1+g)}-1} = \sqrt{\frac{4g^3}{(g+1)^2}-1} \qquad (29)$$

نختار القيمة الأعلى من بين قيمتي b وذلك من أجل الحصول على سرعة الاستجابة العليا، أي:

$$b_{yo} = b_{yo,1} \quad if \quad b_{yo,1} > b_{yo,2}$$
$$b_{yo} = b_{yo,2} \quad if \quad b_{yo,2} > b_{yo,1}$$

بشكل مشابه لما سبق نحدد البارامترات المثلى للنظام عندما يكون الإحداثي المُقاد هو سرعة الآلة. فمن أجل ضبط النظام بحسب معيار التحكم الأمثل الثاني، أي عندما تكون النهايتان الحديتان على المستوى نفسه فإنَّ:

$$k_{20} = \frac{2-g}{g^2} \qquad (30)$$

$$b_{20,1} = \frac{\sqrt{2g(g-1)}}{2-g} \qquad (31)$$

$$b_{20,2} = \sqrt{\frac{2}{k(1+g)}-1} \qquad (32)$$

نختار أيضاً القيمة العليا من بين قيمتي b وذلك من أجل الحصول على سرعة الاستجابة الأعلى، أي إنَّ:

$$b_{2o} = b_{2o,1} \quad if \quad b_{2o,1} > b_{2o,2}$$

$$b_{2o} = b_{2o,2} \quad if \quad b_{2o,2} > b_{2o,1}$$

نلاحظ من العلاقة (30) ومن الأشكال (12) و (4) أن هذه العلاقات صالحة لحالة $g < 2$ فقط.

ومن أجل ضبط النظام بحسب المعيارين الثالث والرابع حصلنا على العلاقات الآتية:

$$b_{2o,1} = \sqrt{\frac{A_2 g\{(A_2-1)[A_2(g-1)+1] + 2[A_2(g-2)+2]\}}{(A_2-1)^2[A_2(g-1)+1]}} \tag{33}$$

$$k_{2o} = \frac{(A_2-1)[A_2(g-1)+1]}{2gA_2^2} \tag{34}$$

$$A_{20,1} = \frac{2}{2-g[1+2kg-\sqrt{(1+2kg)^2-8k}]} \tag{35}$$

تُحسَبُ البارامترات المثلى من هذه العلاقات، وذلك بإعطاء دليل التأرجح المطلوب A_2 ويُحسَبُ عامل التضخيم النسبي k_{2o} من العلاقة (34) والثابت الزمني النسبي لمنظم السرعة b_{2o} من العلاقتين (33) و (32) ونأخذ القيمة الكبرى من بين القيمتين، أي الضبط بحسب المعيار الرابع أو أعطاء k ويُحسَبُ $A_{20,1}$ من (35) و b_{2o} من (32) أو (33)، أي الضبط بحسب المعيار الثالث.

فضلاً عن هذه العلاقات فقد استُنتِجَتْ علاقة تحديد دليل التأرجح الأمثل لسرعة الآلة في النهاية الحدية الثانية:

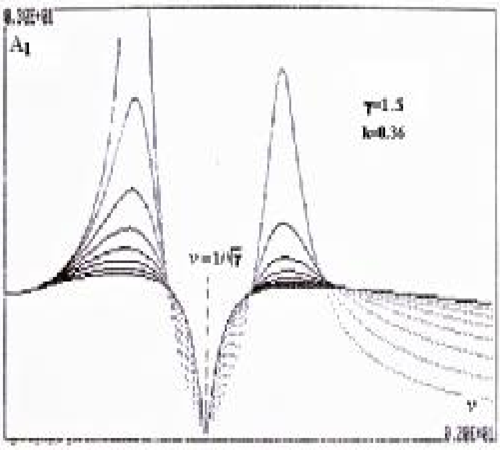
$$A_{2o,2} = \frac{1}{g-1} \tag{36}$$

لتحديد معامل نسبة الكتل (g) الأمثل نرسم حزمة الخواص الترددية لمطال سرعة المحرك المبيّنة في الشكل 16. فمن هذا الشكل نلاحظ أن الخواص الترددية للمطال تساوي الصفر عند التردد $v = \frac{1}{\sqrt{g}}$، أي إنَّ زمن الحالة العابرة للنظام يتناسب طرداً مع القيمة:

$$t_o = \sqrt{g} \tag{37}$$

أمَّا دليل التأرجح فيتناسب عكساً مع g (انظر العلاقة 36). بمساواة (36) و (37) نحصل على قيمة g التي تحقق سرعة استجابة مثلى ودليل تأرجح أمثل في وقت واحد وهي:

$$g_o = 1.755 \tag{38}$$



الشكل 16. حزمة منحنيات الخواص الترددية لمطال سرعة المحرك لحالة $0 \le t_m < 0.3$ و $g = 1.5$.

كما هو معلوم يُمكن تغيير قيمة g [1] والوصول من ثمَّ إلى قيمتها المثلى، وذلك بإضافة تغذية عكسية سالبة إلى الفرق بين سرعة المحرك وسرعة الآلة (انظر الخط المتقطع على الشكل 1 والشكل 18).

بعد تحديد القيم المثلى b_o, k_o بواحدات نسبية يجب الانتقال من القيم النسبية إلى القيم المطلقة للثابت الزمني لمنظم السرعة t_c ولعامل تضخيمه K_{Rw} كما يأتي:

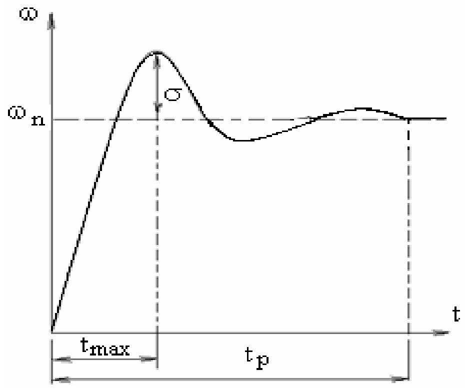
$$\begin{aligned} t_c &= b_o T_y \\ K &= \frac{k_o}{T_y^2} \\ k_{Rw} &= t_c T_m K \\ K_{Rw} &= k_{Rw} \frac{I_n K_i}{w_n K_w} \end{aligned} \tag{39}$$

إذْ: K_i, K_w -معاملا تحويل التغذيات العكسية بالسرعة والتيار على الترتيب.

8- المقارنة وتحليل النتائج:

قبل إجراء هذه المقارنة، لابد من تعرّف بعض بارامترات الأداء الديناميكي (Dynamic parameters of quality) لنظم القيادة الكهربائية الآلية.

8-1- بارامترات الأداء الديناميكي لنظم القيادة الكهربائية: (انظر الشكل 17)



الشكل 17. لتوضيح بعض بارامترات الأداء الديناميكي لنظم القيادة الكهربائية.

أ- زيادة التنظيم: وهي عبارة عن مقدار الخطأ الديناميكي الأعظم، وتُعبر عن مقدار انحراف الحالة العابرة عن القيمة المستقرة (w_n) عند الزمن $t_{\max}$. وتحسب عادة كنسبة مئوية:

$$s\ \% = \frac{s}{w_n}100 \qquad (40)$$

ب- زمن الحالة العابرة t_p: وهو الزمن الذي تتخامد خلاله جميع المركبات الحرة للحالة العابرة ويحسب من لحظة بدء الحالة العابرة t=0 وحتى استقرارها.

ج-الانحراف المعياري: وهو الجذر التربيعي لمتوسط مربع انحرافات الحالة العابرة عن القيمة المستقرة:

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(w_i - w_n)^2}{n}} \qquad (41)$$

أي إنَّ الانحراف المعياري يساوي لجذر خطأ مربع التكامل.

8-2- المعطيات الأساسية لنظام قيادة مدرفلة:

نُدرج في الجدول 2 أهم بارامترات نظام قيادة كهربائية لمدرفلة معادن مدينة كريفوي روغ، التي يقودها محرك تيار مستمر ذو استطاعة 6800kW.

الجدول 2. البارامترات الأساسية لنظام قيادة الاسطوانات العلوية لمدرفلة معادن.

المعطيات الاسمية لمحرك التيار المستمر		
عزم العطالة $J_1, kg\cdot m^2$	الاستطاعة P_n, kW	نوع المحرك
$8\cdot10^4$	6800	P24/160-6.8
تيار المتحرض الاسمي I_{an}, A	التوتر الاسمي V_n, V	السرعة الزاوية $w_n, \sec^{-1}$
8460	850	6.28
عامل التحريض الذاتي لمتحرض L_a, H	مقاومة المتحرض R_a,	تيار التهييج الاسمي I_{fn}, A
$5\cdot10^{-4}$	$6\cdot10^{-3}$	467
معطيات الجزء الميكانيكي والعنصر المرن		
العزم الاسمي $M_n = M_L$ $N\cdot m$	عزم العطالة $J_2, kg\cdot m^2$	معامل قساوة الوصلة المرنة $C_{12}, N.m$
$108\cdot10^4$	$1.5\cdot10^4$	$9.2336\cdot10^7$
الداخلي b_{12}, $N\cdot m\cdot\sec$ معامل الاحتكاك		
$7.5\cdot10^4$		
بارامترات المبدلة الثايرستورية والتغذيات الخلفية		
معامل التغذية الخلفية بالقوة المحركة الكهربائية kf	معامل تضخيم المبدلة k_{TC}	الثابت الزمني للمبدلة $T_m, \sec$
127.5	56.67	0.005
معامل التغذية الخلفية بالتيار k_i		معامل التغذية الخلفية بالسرعة k_w
0.00178		2.39

نحسب البارامترات الأُخرى اللازمة لمحاكاة النظام وندرجها- مع العلاقات التي حسبت منها- في الجدول .

الجدول 3.

$T_{m1}=J_1\dfrac{w_n}{M_n}$, sec	$g=\dfrac{J_1+J_2}{J_1}$
0.464	1.1875
$T_m=T_{m1}+T_{m2}$, sec	$T_{m2}=J_2\dfrac{w_n}{M_n}$, sec
0.55	0.087
$T_y=\sqrt{\dfrac{T_{m1}T_{m2}T_c}{T_m}}$, sec	$T_c=\dfrac{M_n}{C_{12}\cdot w_n}$, sec
0.0117	0.00186

3-8-ضبط حلقة التيار:

يتألف نظام القيادة الكهربائية للمدرفلة بشكل أساسي –كما هو مبيّن في الشكل 18- من حلقة داخلية لتنظيم التيار (أو العزم) وحلقة خارجية لتنظيم السرعة.

نضبط حلقة التيار الداخلية بحسب المعيار النموذجي (التكنيكي) الأمثل كما يأتي:

-نحدد من الشكل 18 تابع تحويل الحلقة المراد التحكم بها:

$$W_o(s)=\frac{k_{TC}k_i/R_a}{(T_m s+1)(T_a s+1)} \qquad (42)$$

-نكتب تابع التحويل المرغوب به المعروف لحلقة التيار المفتوحة:

$$W(s)=\frac{1}{2T_m s(T_m s+1)} \qquad (43)$$

-بقسمة (43) على (42) نحصل على تابع تحويل تناسبي-تكاملي لمنظم التيار:

$$W_{RI}(s)=\frac{R_a(T_a s+1)}{2T_m k_{TC}k_i s}=\frac{T_a}{T_i}+\frac{1}{T_i s} \quad (44)$$

إذْ: T_i -ثابت التكامل لمنظم التيار ويساوي:

$$T_i=\frac{2T_m k_{TC}k_i}{R_a}=0.168\sec$$

و $T_a=\dfrac{L_a}{R_a}=0.0833\sec$ - الثابت الزمني الكهرومغناطيسي للمحرك.

4-8-المقارنة:

في هذه الفقرة وبهدف المقارنة الصحيحة سنجري المقارنة عند معامل التضخيم k نفسه.

نعدُّ في هذه الفقرة أن التغذية الخلفية الإضافية (الخطان المتقطعان على الشكل 18) –التي تهدف إلى تغيير قيمة g- غير موجودة، هذا يعني عدم إجراء أي تغيير في بنية الجملة الأساسية $g=1.1875$.

نحسب بارامترات منظم السرعة PID بطريقتين:

أ- بحسب الطريقة الواردة في العمل [1]:

$$k_{Rw}=\frac{T_m}{T_y g^{3/4}}=41.32 \qquad (45)$$

$$K_{Rw}=k_{Rw}\frac{k_i I_{an}}{k_w w_n}=41.32$$

$$t_C=2g^{3/4}T_y=0.0266\sec \qquad (46)$$

$$K=\frac{k_{Rw}}{t_C T_m}=2824.33 \text{ ئ}$$

$$k=KT_y^2=0.3866 \qquad (47)$$

$$W_{Rw}(s)=K_{Rw}\left(\frac{t_D+t_C}{t_C}+\frac{1}{t_C s}+t_D s\right)$$

$$=56.854+\frac{1553.4}{s}+0.4132s$$

ب- بطريقة هذا البحث بحسب المعيار الأمثل الثالث.

-نحدد دليل التأرجح من العلاقة (35) ونضعه في العلاقة (33) عند معامل التضخيم السابق نفسه $k=0.3866$ فينتج:

$$A_{2O,1}=3.1656$$

$$b_{2o,1}=1.0782$$

-نحدد قيمة $b_{2o,2}$ في النهاية الحدية الثانية بحسب العلاقة (28) وهي علاقة مشتركة لإحداثيات الخرج جميعها:

$$b_{20,2}=\sqrt{\frac{2}{k(1+g)}-1}=1.168$$

-نلاحظ أن $b_{20,2}$ أكبر من $b_{2o,1}$ لذلك:

$$b_{2o}=b_{2o,2}=1.168$$

$$t_C=b_{2o}T_y=0.01367\sec$$

$$K_{Rw}=k_{Rw}\frac{k_i I_{an}}{k_w w_n}=t_C K T_m\frac{k_i I_{an}}{k_w w_n}$$

$$=21.23$$

$$W_{Rw}(s)=36.76+\frac{1553.4}{s}+0.2123s$$

يبيّن الشكل 19 دارة محاكاة نظام القيادة الكهربائية للمدرفلة باستخدام MATLAB SIMULINK.

إن الحالات العابرة الناتجة عن محاكاة النظام باستخدام MATLAB SIMULINK بحسب طريقة البحث [1] مبيّنة في الشكل 20، ويبيّن الشكل 21 الحالات العابرة الناتجة بحسب طريقة هذا البحث.

يبيّن الجدول 4 بارامترات الأداء الديناميكي للنظام عند ضبطه بحسب الطريقتين السابقتين وعند إقلاعه مع الحمل الاسمي الكامل.

الجدول 4. مقارنة بارامترات الأداء الديناميكي للنظام قبل تعديل قيمة g.

الأحداثي المُقاد / الطريقة المتبعة		طريقة البحث [1]	طريقة هذا البحث	نسبة التحسين $\Delta\%$
w_1	$s\,\%$	31.1	34.55	-11
	t_p	0.65	0.3	54
w_2	$s\,\%$	134	142	-6
	t_p	0.85	0.32	62.3
	e	6.54	5.88	10
M_y	$M_{y\max}10^6$	10	9.92	0.8
	t_p	0.87	0.31	65.5
	e	$6.5\cdot10^6$	$5.5\cdot10^6$	15.4

من الجدول 4 يتضح أن زمن الحالة العابرة t_p انخفض (أي تحسن) بمقدار يزيد على 54% لإحداثيات جميعها الخرج مقابل ارتفاع زيادة التنظيم $s\,\%$ بمقدار 6% فقط لسرعة الآلة و11% لسرعة المحرك مع تحسن طفيف 0.8% للعزم الأعظم في الوصلة المرنة.

عندما يتحسن أحد بارامترات الأداء ويسوء آخر يتم اللجوء إلى الانحراف المعياري (أو إلى خطأ تكامل التربيع)، الذي يعبّر -بشكل غير مباشر- عن مساحة الخطأ بين منحنى الحالة العابرة والقيمة المطلوبة (المستقرة) للسرعة أو العزم.

من الجدول 4 يتضح أن الانحراف المعياري e تحسن بمقدار 10% بالنسبة إلى سرعة الآلة و15% بالنسبة إلى العزم في الوصلة المرنة. لذلك نستنتج أن طريقة هذا البحث تتفوق على الطريقة السابقة.

نستنتج من خلال النظر إلى الشكلين 20 و 21 بأنه عندما تكون قيمة معامل نسبة الكتل g صغيرة يجب اللجوء إلى إجراءات إضافية من أجل تحسين الحالات العابرة، ومن بين هذه الإجراءات ما يسمى التصحيح التفرعي الذي يؤدي إلى تغيير قيمة g إلى القيمة المطلوبة.

9- الحالات العابرة عند جعل $g=g_o$:

توصلنا في هذا البحث إلى أنَّ قيمة g المثلى هي 1.755، أمَّا البحث [1] فيعدُّ أن $g=4$ هي قيمة مثلى، ويعدُّ البحث [10] أن قيمة g المثلى هي 5. لذلك سنجري في هذه الفقرة محاكاة لنظام القيادة السابق لحالتي $g=1.755$ و $g=5$ (بعد تعديل قيمة g بواسطة التصحيح التفرعي) لمحاولة معرفة الحقيقة.

نقوم بإدخال التغذية الخلفية السالبة الإضافية (الخطان المتقطعان في الشكل 18) للفرق بين سرعة المحرك

وسرعة الآلة ونحدد قيمة معامل التغذية الخلفية بحسب العلاقة الواردة في العمل [1]:

$$k_{f1} = k_{f2} = \frac{g_o - g}{g} = \frac{1.755 - 1.1875}{1.1875}$$
$$= 0.478$$

أ-نحدد بارامترات منظم السرعة بحسب المعيار الأمثل الثاني في هذا البحث:

$$k_{20} = \frac{2-g}{g^2} = \frac{2-1.755}{(1.755)^2} = 0.08$$

$$b_{20,1} = \frac{\sqrt{2g(g-1)}}{2-g} = 6.645$$

$$b_{20,2} = \sqrt{\frac{2}{k(1+g)} - 1} = 2.84$$

إذاً $b_{2o} = b_{2o,1} = 6.645$

دون إجراء أي تغيير على قيم المعطيات الأساسية (أي بقاء قيمة J_2 -في الدارة المبيّنة في الشكل 19- كما وردت في جدول المعطيات 2)، نغير قيمة g إلى $g = g_o$ فقط من أجل حساب بارامترات المنظم PID بقيم مطلقة:

$$T_{m2} = T_{m1}(g-1) = 0.464(1.755-1)$$
$$= 0.35\sec$$
$$T_m = T_{m1} + T_{m2} = 0.464 + 0.35$$
$$= 0.814\sec$$
$$T_y = \sqrt{\frac{T_{m1}T_{m2}T_c}{T_m}} = 0.0193\sec$$
$$t_C = b_{2o}T_y = 0.128\sec$$
$$K = \frac{k_{2o}}{T_y^2} = 214.8$$
$$k_{Rw} = t_C K T_m = 22.4$$
$$W_{Rw}(s) = 24.15 + \frac{175}{s} + 0.224s$$

يبيّن الشكل 22 الحالات العابرة الناتجة بحسب طريقة هذا البحث، إذْ نُزِّلَ الحمل الكامل M_L على النظام المصحح تفرعياً في اللحظة الزمنية 0.7 sec.

يمكن التخلص من زيادة التنظيم نهائياً دون تخفيض يذكر لسرعة الاستجابة، وذلك بإضافة عنصر تكامل $(\frac{1}{0.25s})$ إلى مدخل الجملة مع محدد لإشارة الدخل بحيث لاتتجاوز 15V (انظر الشكل 19) فتصبح الحالة العابرة كما في الشكل 23.

ب-يُحدد البحث [10] -كما ذكرنا- بأن قيمة g المثلى تساوي 5، ويعطي العلاقة التالية لتحديد عامل التضخيم للجمل أحادية المكاملة:

$$k_{Rw} = \frac{gT_{m1}}{2\sqrt{g-1}T_y} \tag{48}$$

فعند $g = 5$، نجد:

$$T_{m2} = T_{m1}(g-1) = 1.856\sec$$
$$T_m = T_{m1} + T_{m2} = 2.32\sec$$
$$T_y = \sqrt{\frac{T_{m1}T_{m2}T_c}{T_m}} = 0.0263\sec$$
$$k_{Rw} = \frac{gT_{m1}}{2\sqrt{g-1}T_y} = \frac{5 \cdot 0.464}{2 \cdot 2 \cdot 0.0263}$$
$$= 22.053$$

نحدد معامل التغذية العكسية الإضافية لهذه الحالة:

$$k_{f1} = k_{f2} = \frac{g_o - g}{g} = \frac{5 - 1.1875}{1.1875}$$
$$= 3.21$$

نعدُّ أن منظم السرعة تناسبي p، ونضع قيم K_{Rw} وk_{f1} وk_{f2} في دارة المحاكاة المبيّنة في الشكل 19.

يبيّن الشكل 24 الحالات العابرة بحسب طريقة البحث [10] .
إن مقارنة طريقة هذا البحث (لنظام ثنائي المكاملة وعند $g = 1.755$) بطريقة البحث [10] (لنظام أحادي المكاملة وعند $g = 5$) هي لصالح البحث [10]. فيكفي

أن نتذكر أن للنظام أحادي المكاملة ذي الكتلة الواحدة تكون $s\,\% = 4.3\%$ أمَّا للنظام ثنائي المكاملة ذي الكتلة الواحدة فتكون $s\,\% = 56\%$، أي إنَّ زيادة التنظيم تزداد 13 مرة [5].

من خلال مقارنة الشكل 22 بالشكل 23 تبيّن أن زمن الحالة العابرة انخفض من 0.5sec إلى 0.4sec أي تحسن بمقدار 20%، أمَّا زيادة التنظيم فقد ازدادت لسرعة الآلة وانخفضت لسرعة المحرك.

الجدول 5. مقارنة بين الشكلين 23 و24 (لبارامترات الأداء الديناميكي للنظام بعد تعديل قيمة g).

الطريقة المتبعة / الأحداثي المُقاد		طريقة البحث [10]	طريقة هذا البحث	نسبة التحسين $\Delta\%$
w_1	$s\,\%$	22.6	5.9	73.9
	t_p	0.55	0.5	9
w_2	$s\,\%$	17	8	52.9
	t_p	0.5	0.42	16
M_y	$M_{y\max}10^6$	3.7	0.47	87
	t_p	0.55	0.5	9

يبيّن الجدول 5 مقارنة بارامترات الأداء الديناميكي للشكلين 23 و24 للنظام عند ضبطه بحسب الطريقتين السابقتين.

مع أن تأرجح النظم ثنائية المكاملة –كما هو معلوم- يعدُّ كبيراً مقارنة بالنظم أحادية المكاملة، فمن خلال مقارنة الشكل 23 لحالة $g = g_o = 1.755$(بطريقة هذا البحث) بالشكل 24 لحالة $g = 5$(بطريقة البحث [10]) نلاحظ أن استخدام طريقة هذا البحث (مع عنصر تكامل على مدخل الجملة) تؤدي إلى تحسين جميع بارامترات الأداء الديناميكي المهمة للنظام، كما يبيّن الجدول5.

نلاحظ من الشكل 24 أيضاً أن استخدام منظم سرعة تناسبي يؤدي إلى هبوط واضح للسرعة عند تنزيل الحمل (في اللحظة الزمنية 0.7sec)، أمَّا عند استخدام المنظم PID فتبقى السرعة ثابتة بعد تنزيل الحمل، كما هو واضح من الشكل 23.

بمقارنة مختلف أشكال الحالات العابرة نستنتج أن إضافة تغذية خلفية سالبة إلى الفرق بين سرعة المحرك وسرعة الآلة يحسن الأداء الديناميكي للنظم ثنائية الكتل لدرجة عالية، وأن جعل $g = g_o = 1.755$ يحسن سرعة استجابتها مع بقاء زيادة التنظيم (والتأرجح) ضمن الحدود المقبولة. أمَّا القيمة $g = 5$ فهي مثلى من حيث التأرجح فقط (انظر الشكل 25 لحالة $g = 5$وعند ضبط النظام بحسب المعيار الأمثل الأول من هذا البحث).

يتضح أيضاً من خلال الحسابات التي أُجريت في هذه الفقرة أن $g = g_o$ هي حالة خاصة من حالات هذا البحث وليس هناك حاجة لتخصيص دراسة مستقلة لها، لأن العلاقات الناتجة في هذا البحث تصلح لهذه الحالة الخاصة أيضاً.

10-النتائج:

أُنجِزَ في هذا البحث مايأتي:

1- وضعت طريقة هندسية لتحقيق تصميم أمثل للنظم ذات الكتل المزدوجة مع منظم سرعة تناسبي-تكاملي-تفاضلي. وتجدر الإشارة إلى أن النهايات الحدية المثلى ستكون موجودة في أي نظام كهربائي أو إلكتروني أو ميكانيكي يحتوي على عنصري مكاملة أو أكثر الأمر الذي يفتح آفاقاً مستقبليةً لجعل هذه النظم مثلى بالطريقة التي عُرِضَتْ في هذا البحث.

2- اُستخرجت علاقات رياضية لتحديد البارامترات المثلى لمنظم السرعة PID لنظام ثنائي الكتل تتطابق مع أربعة معايير علمية مثلى. كما استُخرِجَتْ علاقات لتحديد دليل التأرجح الأمثل وعامل نسبة الكتل الأمثل والترددات المثلى.

3- بين البحث إمكانية ظهور طنين كهروميكانيكي في المنظومات ثنائية الكتل عند استخدام منظم سرعة تناسبي-تكاملي PI، وانعدام فرص ظهور هذا الطنين عند استخدام منظم سرعة نوع PID وهذه نقطة تفوق مهمة مقارنة بالعمل [2] كما أن العلاقات الناتجة في هذا البحث خالية من التقريب وليست صعبة الاستعمال مقارنة بالبحث المذكور.

4- أُثبِتَ أنَّ مجال تغيّر t_D الذي يمكن أن يحقق قيمة مثلى لدليل التأرجح هو مجال واسع جداً:

$$6 > \frac{t_D}{2T_m} > 0.3$$

النتائج العملية:

استعملت نتائج البحوث النظرية لمحاكاة نظام قيادة كهربائية لأسطوانات مدرفلة. وقد تبيّن من خلال مقارنة منحنيات الحالات العابرة وبارامترات الأداء الديناميكي لنظام قيادة المدرفلة أن الطريقة المقترحة في هذا البحث تتفوق على الطرائق الواردة في البحثين [10,1]. فعلى سبيل المثال تحسنت سرعة الاستجابة بمقدار يراوح بين 9% و65% وتحسن الانحراف المعياري بمقدار يزيد على 10%.

ونشير إلى أن في البحثين [3,2] قُدمت مقارنة لنتائج ضبط منظم تناسبي-تكاملي PI لقيادة منظومة ثنائية الكتل بمختلف طرائق الضبط الأمثل وتوصلا إلى أن طريقة البارامترات المتعددة المثلى المبتكرة في البحث [2] تتفوق بأدائها على الطرائق التقليدية وغير التقليدية السابقة جميعها، وتحقق أعلى درجات الاستقرار للنظم الكهروميكانيكية التي تصمم على أساسها.

11- التوصيات:

من خلال الدراسة السابقة نوصي بما يأتي:

1- من أجل الحصول على أعلى سرعة استجابة عند أقل تأرجح للنظام ثنائي الكتل يُفضل دراسة إمكانية إدخال تغذية عكسية سالبة إلى الفرق بين سرعة المحرك وسرعة الآلة بحيث تجعل g مثلى $g = g_o = 1.755$، ثم الضبط بحسب المعيار الأمثل الثاني بحسب العلاقات (30)- (32).

2- عند $g < 1.95$ يُفضل الضبط بحسب المعيار الأمثل الثاني أيضاً.

3- عندما تكون $g \geq 1.95$ يفضل ضبط النظام بحسب المعيار الأول. ولمقارنة عملية ضبط النظام بطرق سابقة عند عامل التضخيم نفسه، أو عند دليل التأرجح نفسه الناتج في طرائق سابقة يتم الضبط بحسب المعيارين الثالث والرابع.

4- إن النهايات الحدية المثلى في حزمة الخواص الترددية للمطال موجودة في نظم القيادة الكهربائية أحادية الكتل [6] (توجد نهاية حدية مثلى واحدة) وفي أي نظام كهروميكانيكي- كما ذكرنا- عندما يحتوي على عنصري مكاملة أو أكثر الأمر الذي قد يفتح الباب أمام الباحثين لجعل مختلف النظم ذات المكاملات الثنائية والمتعددة مثلى بطريقة البارامترات المتعددة المثلى المبتكرة وذلك باتباع التسلسل الآتي:

أ- وضع النموذج الرياضي للنظام موضوع البحث على شكل تابع تحويل عقدي (الخواص الترددية للمطال).

ب- التأكد من وجود نهايات حدية مثلى، وذلك برسم حزمة منحنيات الخواص الترددية للمطال.

ج- صياغة أو اختيار معايير الضبط الأمثل.

د- إجراء الاشتقاقات الجزئية اللازمة لإيجاد البارامترات المثلى.

هـــ- تطبيق النتائج.

5- من الممكن دراسة البحث باستخدام المتحكمات الحديثة Fuzzy Control و Neural Network.

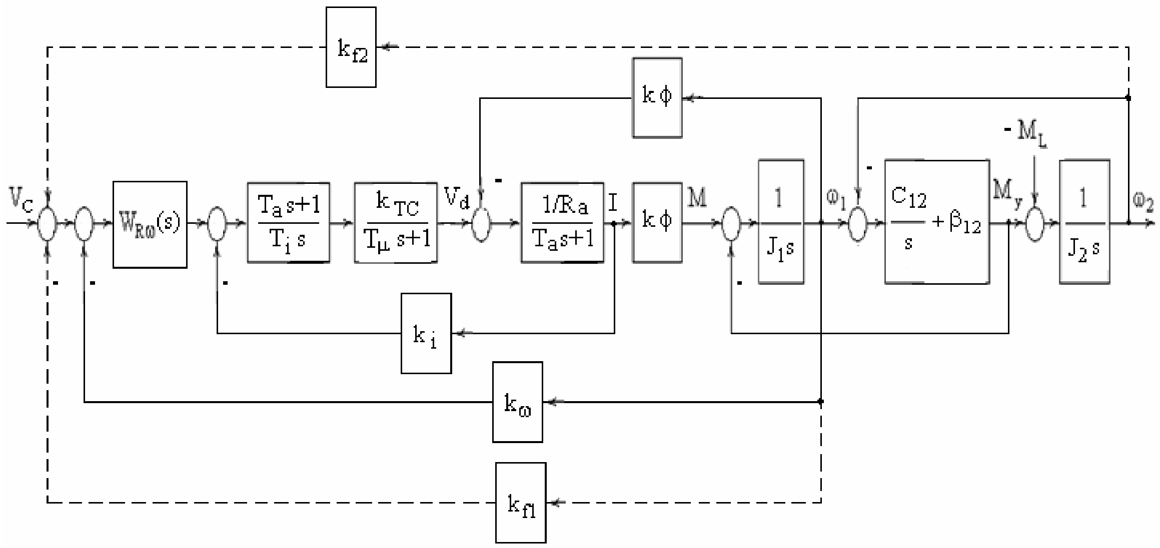
12- مساوئ طريقة هذا البحث:

من أهم مساوئ طريقة هذا البحث أنها قد تتطلب دراسة توابع تحويل الجملة جميعها. فللنظام ذي الكتل المزدوجة لدينا ستة توابع تحويل: ثلاثة بالنسبة إلى إشارة التحكم V_C وثلاثة بالنسبة إلى إشارة الحمل M_L. لذلك يتم اختيار توابع التحويل الأكثر أهمية، ففي هذا البحث اعتبرنا أن تابعي التحويل $\frac{w_2(s)}{V_C(s)}$ و $\frac{M_y(s)}{V_C(s)}$ هما الأهمان، لأن تحسين الخواص الديناميكية لسرعة الآلة ينعكس إيجابياً على كمية وجودة الإنتاج، كما أن تخفيض القيمة العظمى للعزم في الوصلة المرنة يقلل من احتمال اهتراء هذه الوصلة أو كسرها.

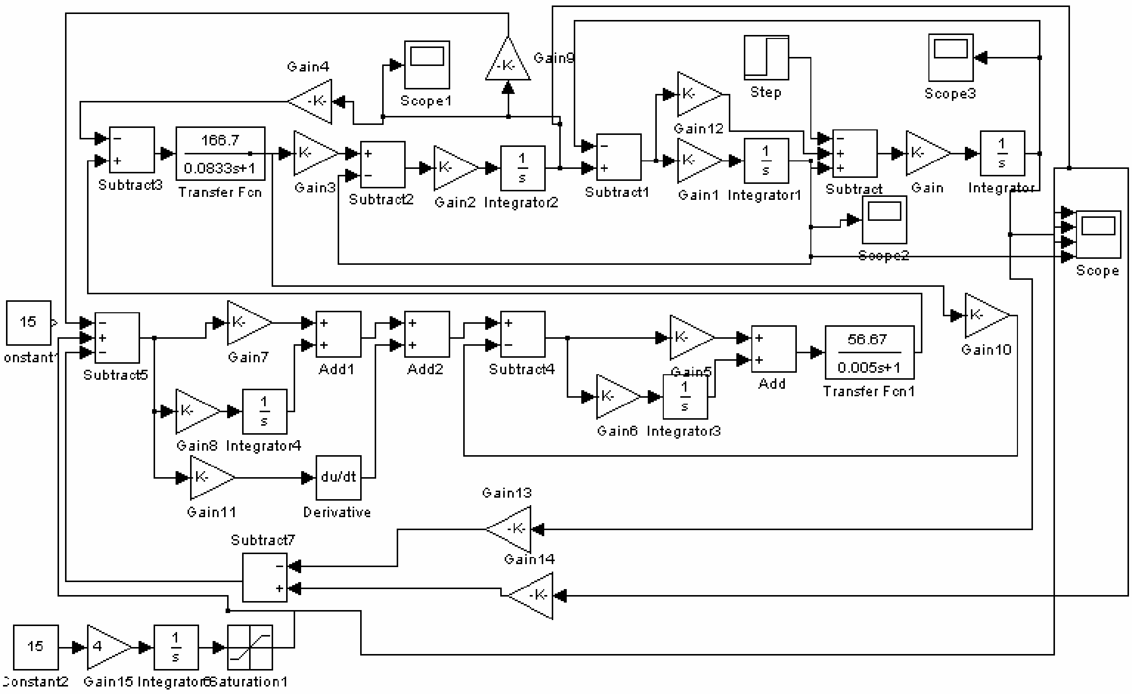
أمَّا بالنسبة إلى عزم الحمل M_L فهو يشكل إشارة تشويش على جملة ثنائية المكاملة كما ذكرنا سابقاً، لذلك فتأثيره في الجملة يكون محدوداً كما يبيّن الشكل 22. ولكن هذا لا يمنع من تخصيص بحث مستقل لدراسة هذا الموضوع بالتفصيل، فبعد أن بيّنا وجود النهايات الحدية المثلى في حزمة منحنيات الخواص الترددية للتابعين (6) و (7) يصبح نجاح هكذا دراسة شبه مضمون.

فضلاً عن ذلك فإن هذا النوع من البحوث يحتاج الكثير من الجهد والصبر والعمل.

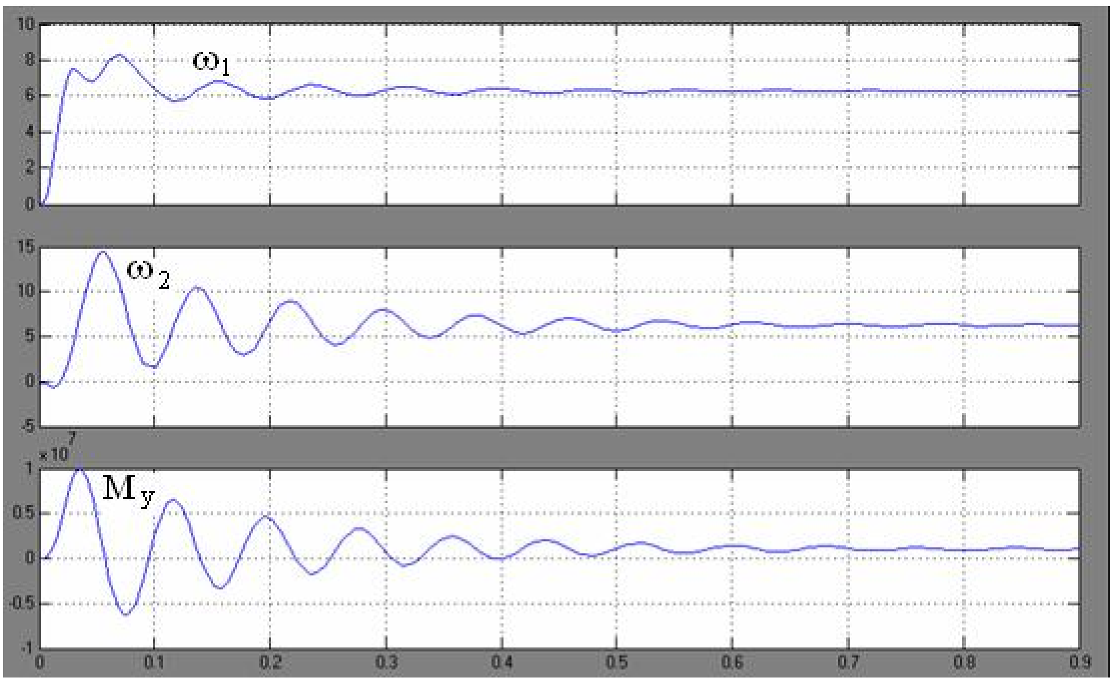
رغم ذلك فقد قُدِّمَتْ من خلال هذا البحث طريقة علمية تشكل إسهاما بحثياً للمهتمين في هذا المجال والراغبين في تطوير هذا الاتجاه العلمي وتطبيقه على نظم أكثر تطوراً. آملين التعاون.



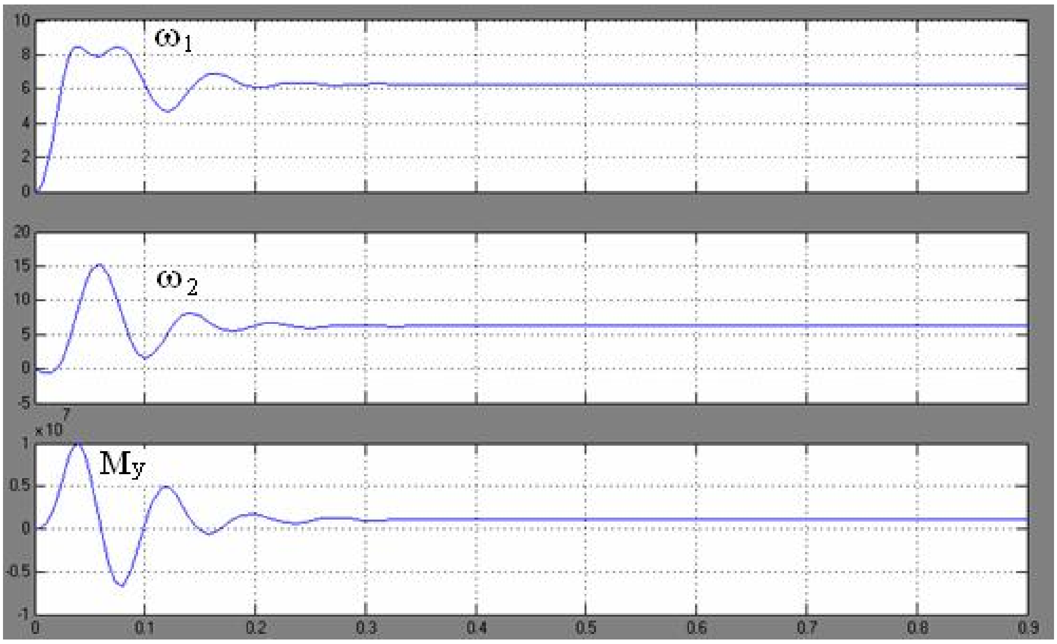
الشكل 18. المخطط الصندوقي البنيوي لنظام قيادة مدرفلة ثنائي الكتل.



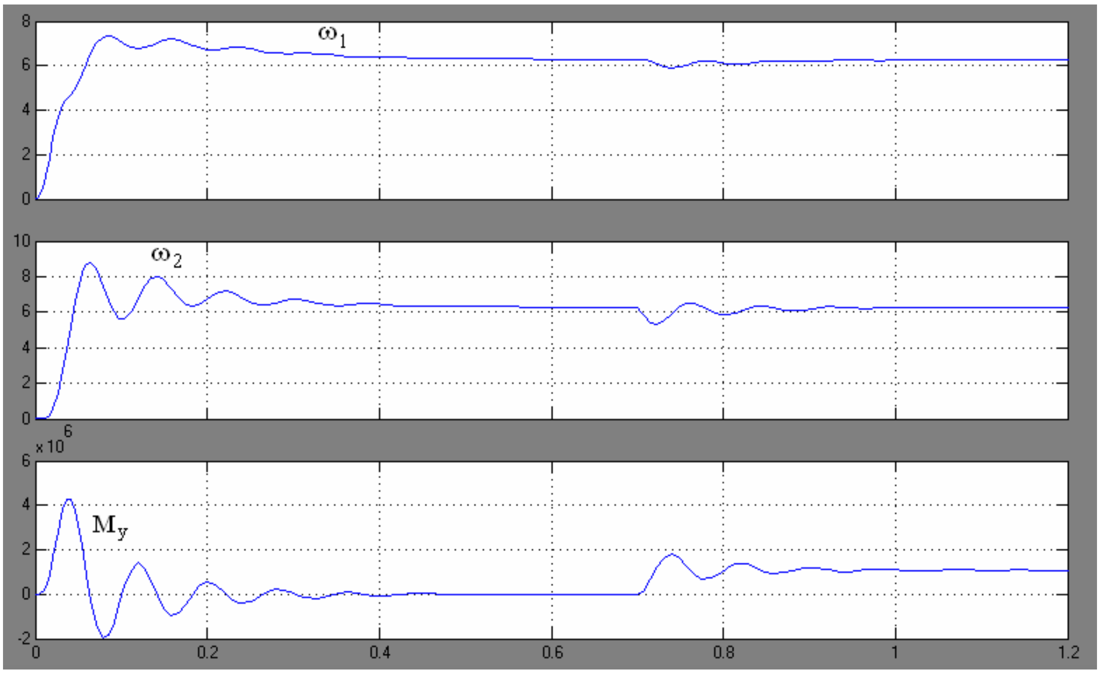
الشكل 19. دارة محاكاة نظام قيادة مدرفلة بواسطةMATLAB SIMULINK .



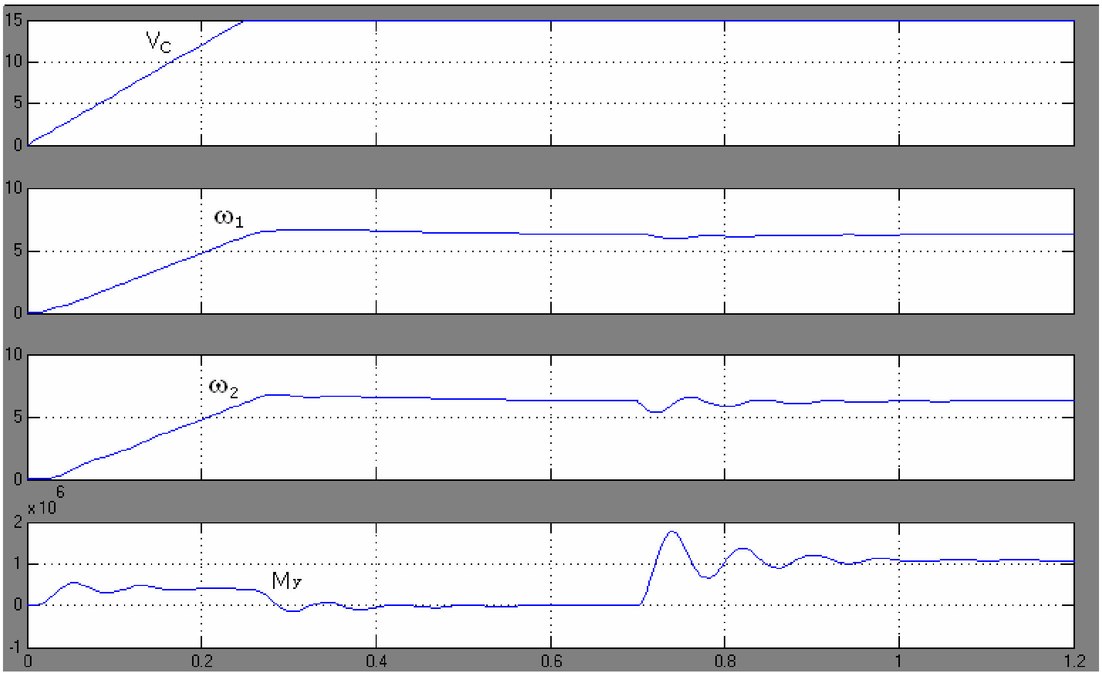
الشكل 20. الحالات العابرة لنظام قيادة كهربائية لمدرفلة عند ضبطه بحسب الطريقة الواردة في [1].



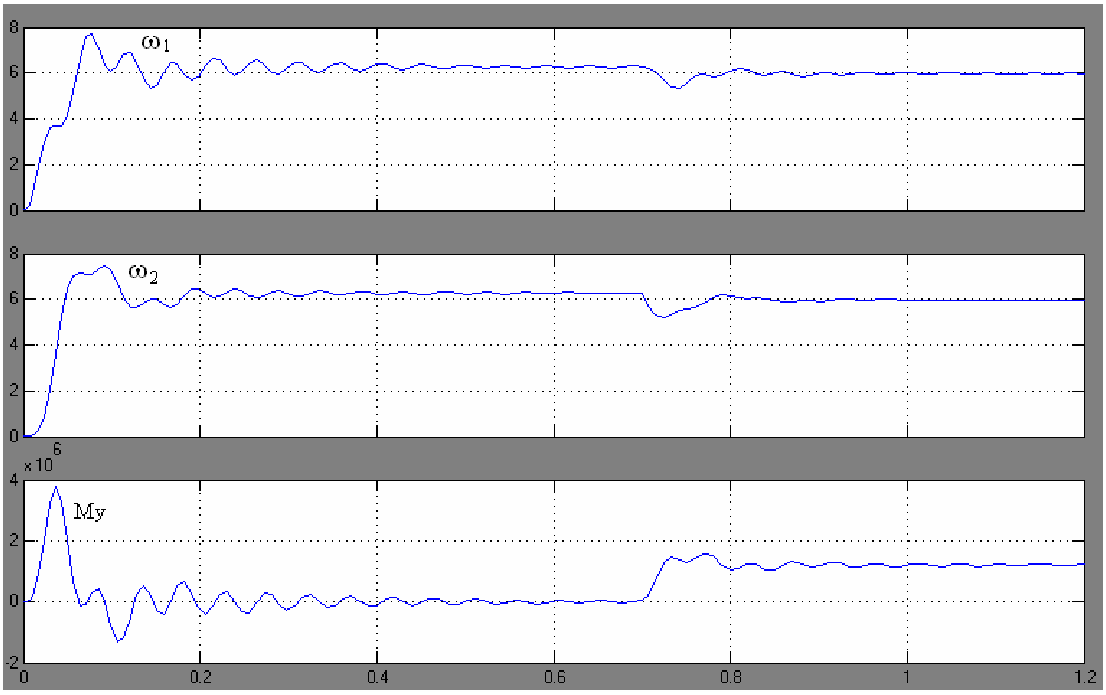
الشكل 21. الحالات العابرة لنظام قيادة مدرفلة عند ضبطه بحسب الطريقة الواردة في هذا البحث.



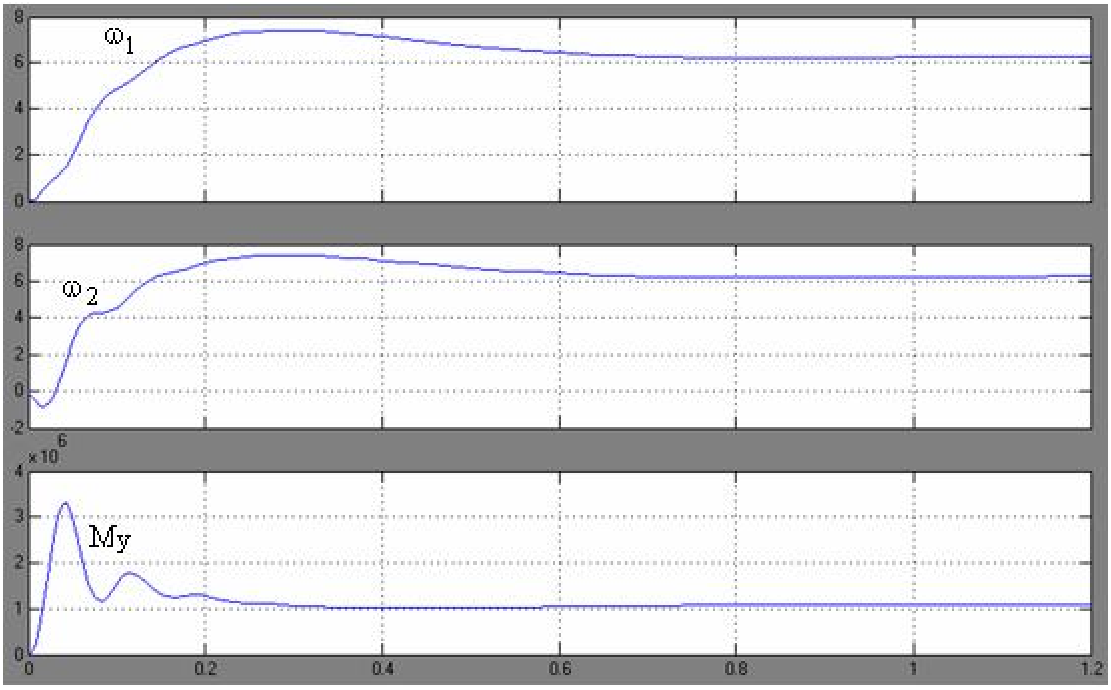
الشكل 22. الحالات العابرة لحالة $g = g_o$.



الشكل 23. الحالات العابرة لحالة $g = g_o$ مع تعديل شكل إشارة الدخل V_C.



الشكل 24. الحالات العابرة لنظام قيادة كهربائية لمدرفلة عند ضبطه بحسب الطريقة الواردة في البحث [10] عند $g = 5$.



الشكل 25. الحالات العبرة لنظام قيادة مدرفلة عند ضبطه بحسب المعيار الأمثل الأول من هذا البحث عند $g = 5$.

المراجع:

1-Bortsov U.A., Sokolovski G.G., Automated Electric Drive with
Resilient joint. Energoatomizdat, Sankt-Peterburg 1992.

2-Klepikov V. B., Zarifa Badeh , Bogdanova N.V., Optimizing PI speed regulator for Double Mass Electric Drive with resilient joint. Problems of automated electro drives. Theory and practice. Kharkov 1995.

3-Klepikov V. B., using unclassical adjust of subordinate loop regulator in Double-Mass Electromechanical System. Problems of automated electro drives. Theory and practice. Kharkov 1996.

4-Klepikov V. B., Polyanskaya I.S., Analytical Synthesis of Neuroregulator for an Electromechanical System.
Problems of automated electro drives. Theory and practice. Kharkov 2002

5-Kluchev V.I. Theory of electro drive. Energoatomizdat, Moscow 1985.

6-Gull A.I. Complex Performance Criterion for Automatic control. Problems of automated electro drives Theory and practice. Kharkov 2002.

7-Obruch I.V. Neural-Network Control of a Double-Mass Electromechanical System. Problems of automated electro drives Theory and practice. Kharkov 2002.

8-Kuznetsov B.I. and others. Neural-Network Control of a Double-Mass Electromechanical System. Problems of automated electro drives. Theory and practice. Kharkov 2008.

9-Akimov L.V.,Dolbnya V.T., Pirozhok A.V. Application of Chain Fractions to Synthesis of a Speed Regulator for a Double-Mass AC Electric Drive with Nonlinear Load. Problems of automated electro drives. Theory and practice. Kharkov 2002.

10-ZadorozhnyN. A., Zadorozhnyaya I.N., Optimization of Damping Effect of Springy Mechanical System with Parallel Correction. Problems of automated electro drives. Theory and practice. Kharkov 2003.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2011/10/9.