

Improving the Performance of the Touring Vehicle's Stability System in Order to Reduce Vibrations by Using an Appropriate Control Unit

Dr. Jihad Baddour*
Dr. Habeeb Mahmoud**
Kays Arabi***

(Received 18 / 7 / 2023. Accepted 6 / 9 / 2023)

□ ABSTRACT □

Through this research, the response of the four-wheel drive vehicle was studied and the dynamics of its suspension system analyzed according to different road conditions, whether flat or tilted, and the temporal and frequency response of the components of the suspension system was studied, with the aim of improving the ability to control the vehicle and its tilting system, and simulating the models and results via the Matlab platform.

A number of results were reached, the most important of which are:

- Reaching a damping constant value ranging between $3000 \div 2000$ N/m.
- Adding a new optimal and suitable control unit, which is adding the LQR controller.
- Reaching a value of passenger comfort factor of 0.4.
- Reaching a damping ratio located from 0.35 to 0.5

Keywords : Vibration in Automobiles - Vehicle Suspensions system - Vehicle Dynamic Systems- Time Response- Frequency Response - Stability - Tilting.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Professor , Department of Mechanical Power , Faculty of Mechanical and Electrical Engineering , Tishreen University Latakia, Syria.

** Professor, Department of Mechanical Power , Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University- Lattakia- Syria.

***Master Student - Department of Thermal Tools Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University - Lattakia- Syria. KaysArabi@gmail.com

تحسين أداء نظام استقرار السيارة السياحية بهدف تخفيض الاهتزازات باستخدام وحدة تحكم مناسبة

د. جهاد بدور*

د. حبيب محمود**

قيس عربي***

(تاريخ الإيداع 18 / 7 / 2023. قُبِلَ للنشر في 6 / 9 / 2023)

□ ملخص □

تم من خلال هذا البحث دراسة استجابة المركبة الرباعية وتحليل ديناميكيات نظام التعليق فيها تبعاً لأوضاع طريق مختلفة سواء مستوية أو تعاني من إمالة، و دراسة الاستجابة الزمنية والترددية لمكونات نظام التعليق، بهدف تحسين القدرة على التحكم بالمركبة وبنظام إمالتها، ومحاكاة النماذج والنتائج عبر منصة **Matlab**.

حيث تم التوصل إلى مجموعة من النتائج أهمها:

- التوصل لقيمة ثابت تخميد تتراوح بين 3000 ÷ 2000 نيوتن/م.

- إضافة وحدة تحكم جديدة مثلى ومناسبة وهي إضافة متحكم **LQR**.

- التوصل لقيمة عامل راحة للركاب بقيمة 0.4.

- التوصل إلى نسبة تخميد تقع من 0.35 إلى 0.5

الكلمات المفتاحية: الاهتزاز في العربات- نظام تعليق عربة - النظام الديناميكي للعربة- الاستجابة الزمنية - الاستجابة الترددية -الاستقرار - الإمالة.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* أستاذ - قسم القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** أستاذ - قسم القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
*** طالب ماجستير - هندسة الآلات الحرارية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

KaysArabi@gmail.com

مقدمة:

الاهتزاز الذي يحدث في معظم الآلات والهياكل والمكونات الميكانيكية، يمكن أن يكون مرغوباً أو غير مرغوب فيه، إن الاهتزاز في السيارة غير مرغوب فيه لأنه يسبب إزعاج لسائق السيارة و يسبب الحركة غير المتحكم بها والضوضاء والاجهادات الديناميكية وانخفاض الأداء، وخاصة عند اسقاط ذلك على طبيعة طرقات وعرة[1]، ولذلك توجب إجراء تحليل الاهتزاز كجزء لا يتجزأ من التصميم بسبب الآثار المدمرة التي يمكن أن تحدثها الاهتزازات غير المرغوبة فيه على الآلات والهياكل.

يمكن تقسيم الاهتزازات إلى:

الاهتزاز الحر

الاهتزاز القسري

الاهتزاز غير المخمد

الاهتزاز المخمد

الاهتزاز الخطي

الاهتزاز غير الخطي

إن ازدياد الطلب على السيارات المريحة والهادئة يتطلب تطوير دائم يتناسب مع التقدم الصناعي المتسارع الذي يشهده عالم السيارات وانطلاقاً من ذلك كانت أغلب الدراسات تستهدف حل مشكلة الاهتزازات ومشكلة التحكم بالسيارة على الطرق الوعرة[2]، وأغلب الدراسات كانت تستخدم طرق ميكانيكية و طرق التحكم الكلاسيكية التي أظهرت صعوبة كبيرة بتحسين أداء السيارة والتحكم بها.

ومن ذلك كان لابد من اتباع أساليب تحكم حديثة تؤمن حل مشاكل تحكمية أكبر وبوقت أقل واستجابة أسرع[3] ، ركز البحث على دراسة النموذج الرياضي لنظام التعليق Suspensions system والتحسين عليه بهدف التخلص من الاهتزاز، واستخدام تقنيات تحكم حديثة تقوم على استخدام وحدة تحكم تعتمد التحكم الأمثل للحصول على أفضل طريقة تحكم ممكنة بهدف التخلص من الاهتزازات.[3,4] ،

أهمية البحث وأهدافه:**أهمية البحث:**

إن سرعة التطور الصناعي الذي شمل مختلف نواحي الحياة ومختلف المجالات ومنها صناعة وسائل النقل الحديثة، يتطلب تطورات مرافقة في آليات تحقيق الاستقرار والتخلص من الاهتزازات وآليات التحكم بوسيلة النقل بظروف طرقات مختلفة . تأتي أهمية البحث من كونه يقدم تطويرات جديدة على الأنظمة التي يتم تصميم السيارات على أساسها، من حيث التحسين على النموذج الرياضي الخاص بنظام التعليق و تقديم طريقة تحكم جديدة بهدف تحقيق تحكم أمثل بنظام إمالة السيارة و يحقق بدوره استقرار على الطرقات الوعرة.

أهداف البحث:

- 1-مقارنة سرعة استجابة التصميم قبل وبعد تطبيق طريقة التحكم .
- 2-التحقق من تحسن ظروف راحة أكبر لمستخدمي المركبة .
- 3-تحسين أداء الميل مع الحفاظ على استقرار السيارة .

طرائق البحث ومواده:

تم في هذا البحث اعتماد الطريقة التحليلية باستخدام منصة **Matlab** لمناقشة النتائج و مقارنتها.

الاهتزاز في السيارات:

في السنوات الأخيرة، شجع الطلب التجاري على المركبات المريحة والهادئة التطوير الصناعي للطرق لاستيعاب توازن الأداء والكفاءة ومستويات الراحة في السيارات الجديدة. على وجه الخصوص، أصبحت خصائص الضوضاء والاهتزاز (NVH) للسيارات والشاحنات ذات أهمية متزايدة؛ كاييتاني وآخرون (2000)؛ and Hu، Claessens، Debeaux، (2000)؛ هافركامب (2000)؛ كاسلر (2000)؛ وولف وبورتال (2000).

تتكون السيارة من العديد من المكونات. تشمل هذه المكونات نظام التعليق والمحرك ومكوناته والشاسيه وناقل الحركة والمكابح وما إلى ذلك، وتمثل العديد من الأنظمة الفرعية في تحليل متعدد درجات الحرية.

يرتبط اهتزاز السيارة أيضًا بنظام تركيب محرك السيارة، بشكل عام، يتكون من محرك (أحد مصادر الاهتزاز الرئيسية)، والعديد من الحوامل المتصلة بهيكل السيارة. تم استخدام أنظمة تثبيت المحرك الحديثة لعزل السائق والركاب عن الضوضاء والاهتزازات الناتجة عن المحرك [5]. ومع ذلك، لا تزال هناك حاجة لتحسين أداء أنظمة تركيب المحرك للسببين التاليين: أحد الأسباب هو أن متطلبات الاهتزاز وعزل مستوى الضوضاء لسيارات الركاب، والسبب الثاني هو أن تصميمات السيارات الحديثة تتجه نحو هياكل السيارات الأخف وزناً والمحركات الأكثر كفاءة في استهلاك الطاقة [6].

استجابات النظام:

يمكن تصنيف جميع المدخلات بشكل أساسي إلى 3 أنواع من الاستجابة وهي :

(1) استجابة الخطوة (Step): الإدخال قيمة ثابتة.

(2) استجابة المنحدر (Ramp): الإدخال يتناسب مع الزمن (T).

(3) الاستجابة المكافئة: المدخلات متناسبة مع مربع الزمن.

يختلف سطح الطريق من مكان إلى آخر، ويكون سطح الطريق في بعض الأحيان وعراً فيحتوي على مطبات أو حفر، عندما تمر سيارة ركاب سياحية عبر هذه المطبات والحفر، يكون الدخل "Step Response" مما يؤدي إلى اهتزازات عمودية في السيارة و عندما تمر على طريق مائل بزاوية معينة يكون الدخل "Ramp Response"، يصمم المهندسون العديد من الأنظمة الماصة للصدمات والمخمدة للاهتزازات لاستعادة الوضع الثابت للسيارة في أقل زمن ممكن.

يُعرف الزمن الذي يستغرقه النظام للوصول إلى وضع توازن ثابت للحالة باسم "زمن التسوية"، هذا البارامتر مهم للغاية بغض النظر عن كون النظام ميكانيكياً أو كهربائياً أو كيميائياً، كلما كان وقت استقرار النظام أقصر، كان النظام أكثر استقراراً، إذا كان وقت استقرار السيارة في حدود 10 ثوانٍ، فلن يكون لها جودة قيادة جيدة.

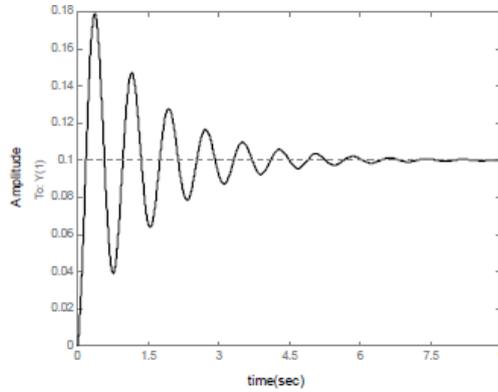
تمت دراسة استجابات "المطال-الزمن" و"السرعة-الزمن" واستجابات "التسارع-الزمن" لنماذج 2-DOF باستخدام برنامج Matlab حيث يتنوع تخميد التعليق (Cs) من أجل الحصول على الاستجابة الزمنية المثلى.

تم أخذ بيانات السيارة الحقيقية من العمل الذي قام به Jaitlee، 2008، طراز السيارة هو Nissan ZX-280 مع بيانات المحاكاة الموضحة في الجدول

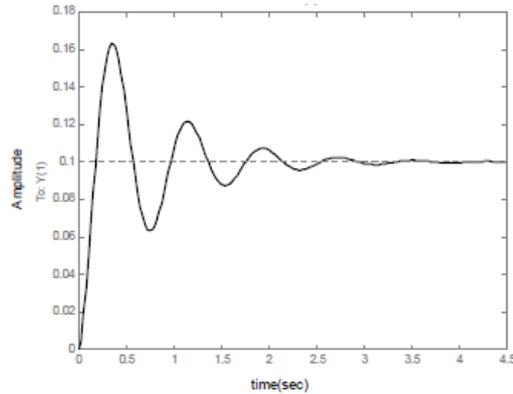
Sprung Mass	329 Kg
Unsprung Mass	31Kg
Coefficient of Suspension Stiffness	23622 N/m
Tyre Stiffness	212108 N/m
Tyre Damping	207 N.s/m

تقنية إمالة السيارة:

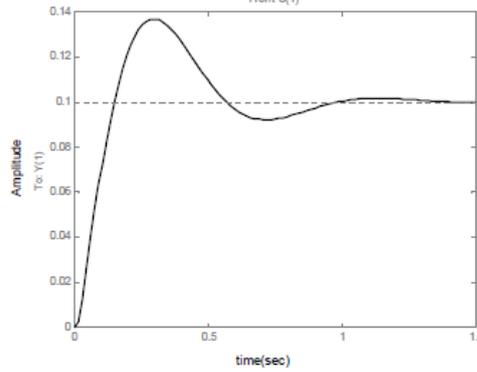
عندما تجتاز سيارة منحني بسرعة عالية، يعاني الركاب من قوة طرد مركزي، وتعمل قوى مماثلة على الجسم، ويتم تحديد هندسة التعليق والسرعة الأمامية للسيارة مقدار التدحرج داخل أو الخروج من المنحني بواسطة السيارة، فـقوة الطرد المركزي هي دالة لـ $\frac{V^2}{R}$ [6]. من أجل الحفاظ على مستوى قوة الطرد المركزي مع زيادة السرعة الأمامية للمركبة، يجب أيضاً زيادة نصف قطر المنحني بعامل معين وهذا غالباً ما يكون مستحيلاً لأسباب عملية (أي مضاعفة السرعة بمقدار ثلاثة أضعاف ويجب زيادة نصف قطر المنحني بمعامل تسعة). هذا هو السبب في أن المنحنيات اللطيفة ظاهرياً يمكن أن تكون مشكلة أكبر بكثير أثناء السير بسرعة عالية مما قد يعتقده السائق، نظراً لحقيقة أن القوة ترتفع مع مربع السرعة. مع كل الاقتراحات التي تؤدي لملائمة المركبات عالية السرعة مع المنحنيات بأمان بسرعات أعلى، على المسارات الحالية، مع الحفاظ على راحة الركاب عند مستويات مقبولة، فمن الضروري استخدام تقنية الإمالة [7].

نتائج البحث:

الاستجابة الزمنية لإزاحة الكتلة النابضية عند ثابت التخميد 500



الاستجابة الزمنية لإزاحة الكتلة النابضية عند ثابت التخميد 1500



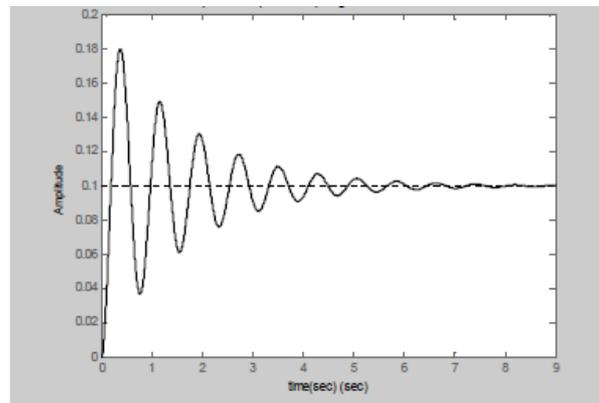
الاستجابة الزمنية لإزاحة الكتلة النابضية عند ثابت التخميد 2500

تحليل فضاء الحالة:

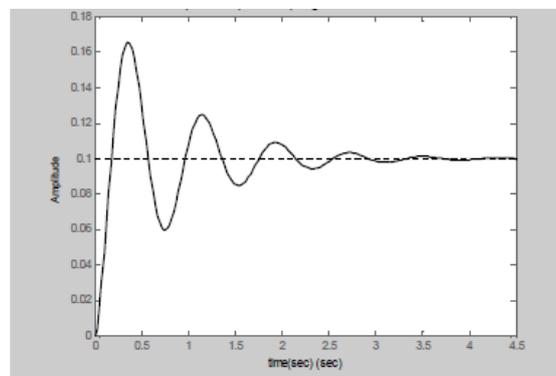
في هذا القسم الفرعي، يتم الحصول على استجابات الزمن باستخدام نمذجة فضاء الحالة. الاستجابة التي تم الحصول عليها في فضاء الحالة مماثلة لتلك التي تم الحصول عليها في لابلاس.

تم إرفاق رموز الرسوم البيانية الموضحة أدناه. هنا تم تحليل إزاحة الكتلة النابضة والسرعة مع انتقال التعليق ($Y1 = Xs - Xu$).

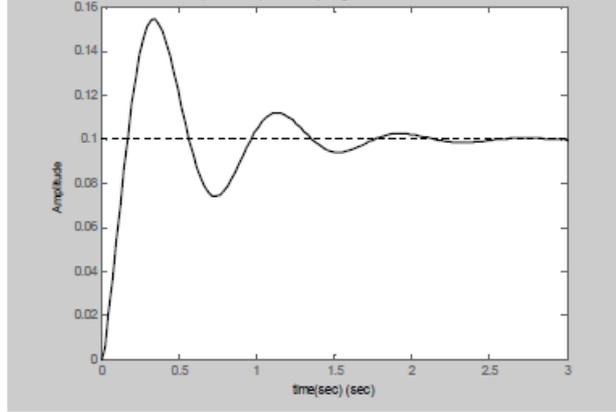
من الواضح أن الاستجابة للكتلة النابضية تشبه تمامًا تلك التي تم الحصول عليها باستخدام لابلاس. مع عدم وجود التخميد، يستمر مطال الاهتزاز في الزيادة ويستمر في الاهتزاز لفترة طويلة. يقل وقت الاستقرار وأقصى ذروة للمطال بشكل كبير مع زيادة التخميد، مما يجعل الركوب مريحًا.



الاستجابة الزمنية لإزاحة الكتلة النابضية عند ثابت التخميد 500



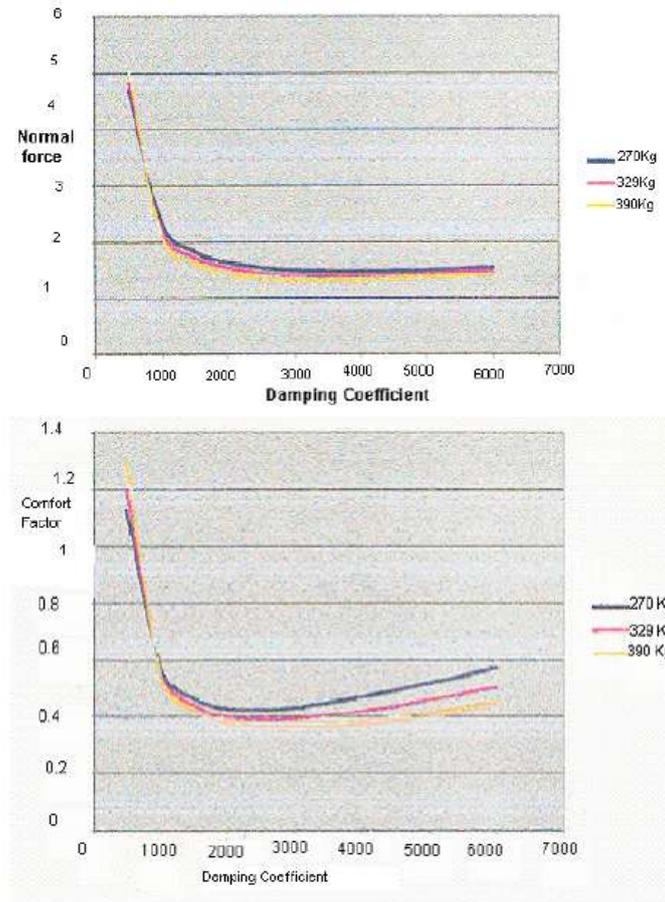
الاستجابة الزمنية لإزاحة الكتلة النابضية عند ثابت التخميد 1500



الاستجابة الزمنية لإزاحة الكتلة النابضية عند ثابت التخميد 2500

مقارنة تحليل الاستجابة الزمنية مع البيانات التجريبية

من أجل مقارنة الاستجابة الزمنية مع النتائج التجريبية ، تم استخدام البيانات التجريبية من (Jaitlee 2008). في دراسته التجريبية، قام بتحليل التسارع الرأسي لكل من الكتلة النابضة والكتلة غير النابضية باستخدام مقياسين للتسارع. تم وصل أول مقياس تسارع بالإطار الأيسر للسيارة ، والذي يتحرك في الاتجاه العمودي مع مجموعة التعليق. تم وصل مقياس التسارع الثاني بالجزء العلوي لمجموعة التعليق ، والذي يحمل مجموعة التعليق مع جسم السيارة. تم استخدام مقياس التسارع هذا لقياس كل من التسارع الرأسي للكتلة النابضية والكتلة غير النابضية للمركبة. Jaitlee درس تأثير التخميد مع قوى رد الفعل العادية وعامل الراحة. أوضحت الدراسة التجريبية ل Jaitlee أنه مع انخفاض الكتلة النابضية ، يزداد تأثير التخميد. كما وجد أنه مع زيادة معامل التخميد من 0 - 1000 نيوتن / م ، ينخفض عامل الراحة بشكل خطي تقريباً. بينما في نطاق 1000-2000 نيوتن / م قيمة التخميد ، ينخفض عامل الراحة بشكل موحد وبعد ذلك يزداد مع زيادة معامل التخميد. وأن قوى رد الفعل تسلك سلوك مماثل لاتجاه عامل الراحة. نظراً لعدم إمكانية إجراء أي تجارب لهذا البحث، تم استخدام نتائج (Jaitlee 2008) للتحقق من صحة نتائج المحاكاة لنموذج ربع السيارة، حيث أن بيانات المحاكاة هي نفسها للسيارة التي استخدمها (Jaitlee 2008). يمكن تعريف عامل الراحة على أنه جذر متوسط التربيع للتسارع الرأسي للسيارة. في دراسته التجريبية، استخدم (Jaitlee 2008) ثلاث كتل نابضية مختلفة (عن طريق زيادة عدد ركاب السيارة). تكون القوة العادية عالية جداً دون التخميد، ولكن مع زيادة التخميد ، تنخفض القوة العادية ثم تلامس أدنى نقطة عند قيم التخميد 2200 - 3200 نيوتن / م ، متبوعة باتجاه تصاعدي قليلاً بعد ذلك. يوضح الخط الأحمر الاستجابة للكتلة النابضية 329 kg ، وهو نفس ما تم اعتماده في هذا البحث. يمكن أيضاً ملاحظة أن الاستجابة أقل من 0.4 بين قيمة التخميد 2000-3000 نيوتن / م مما يشير إلى أن هذا النطاق هو نطاق التخميد الأمثل، والذي بدوره يتحقق من نتائج المحاكاة. يكون التسارع الرأسي عند أدنى حد له خلال نطاق التخميد هذا. هناك نقطة أخرى يمكن ملاحظتها وهي أنه مع زيادة الكتلة النابضية (وزن الركاب) يتناقص عامل الراحة وأيضاً عند قيم معامل التخميد العالية يتناقص عامل الراحة ، ويختلف عامل الراحة للكتل النابضية المختلفة.



تحليل الاستجابة الترددية

تحليل الاستجابة الترددية مهم لنا لسببين رئيسيين:

أولاً هو مطلوب من أجل معرفه الاستجابة الترددية ثم الاستجابة للدائرة التي يمكن تضمينها لأي مدخل، شكل الموجه الجيبية لديه خاصية تجعله ينتقل الى شكل موجي آخر (غير جيبى) فالاستجابة الترددية تسمح لنا بفهم استجابة الدائرة لمزيد من المدخلات المعقدة [8].

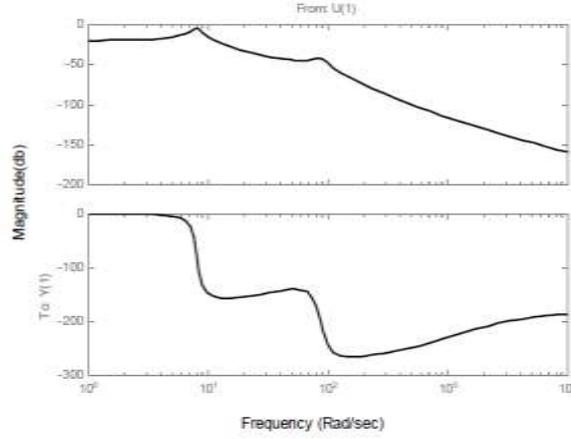
هيكل الجسم (هيكل السيارة) يحول الطاقة من نظام التعليق الى نظام المشغلات و النظام الداخلي.

إن كان هناك رنين "استجابات ذات مطال متزايد (عالي جدا) او استجابات في مجال ترددي سيء"، يمكن ان تكون في أحسن الأحوال رحلة غير مريحة ان لم تكن غير ممكنة.

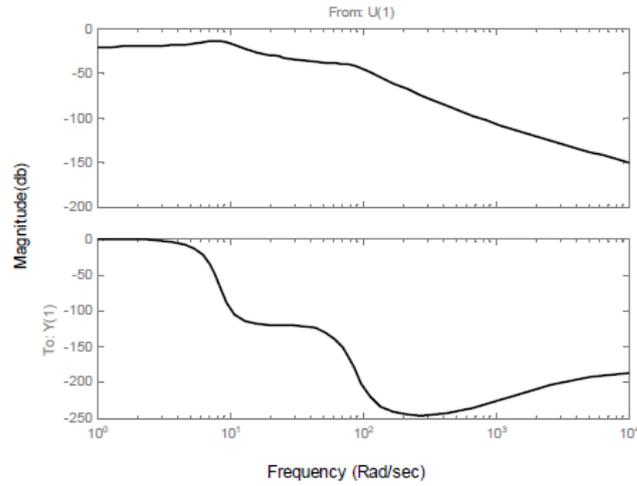
بالإضافة إلى ذلك، الرنين يؤثر على قدرة المثبتات داخل السيارة على أداء وظيفتها المتمثلة في حمل وتثبيت الأشياء معاً. هناك ثلاث طرق للاستجابة الترددية:

- (1) نهج الإزاحة Displacement
- (2) نهج السرعة Velocity
- (3) نهج التسارع Acceleration

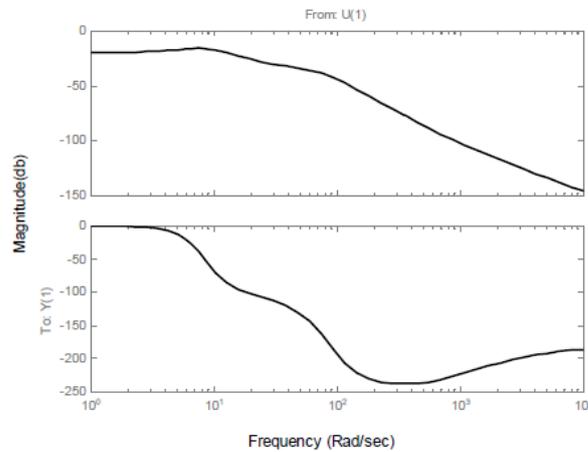
عادة ما يعتمد اختيار سرعة الإزاحة أو التسارع على مدى التردد المطلوب، تؤثر الاستجابة منخفضة التردد (عادةً من 1 إلى 40 هرتز) على المتانة والاهتزاز وراحة القيادة وما إلى ذلك، وهناك أيضًا بعض مشكلات الضجيج التي يمكن أن تسببها هذه الترددات المنخفضة كما أن الترددات الأعلى من 40 تعطي مشاكل الضجيج.



الاستجابة الترددية للكتلة النابضية عند ثابت التخميد 500



الاستجابة الترددية للكتلة النابضية عند ثابت التخميد 1500



الاستجابة الترددية للكتلة النابضية عند ثابت التخميد 2500

الترددات الطبيعية للكتل النابضية وغير النابضية :

للكتلة النابضية المعلقة بنابضين صلابة تعليق وصلابة إطارات ، ويمكن كتابة الصلابة المكافئة ك :

$$K_{eq} = \frac{K_s \times K_t}{K_s + K_t}$$

$$Or, f_{nu} = \frac{\sqrt{\frac{K_s \times K_t}{(K_s + K_t) M_s}}}{2\pi}$$

بالنسبة للسيارة المستخدمة في هذه البحث ، $M_s = 329\text{Kg}$ ، التردد الطبيعي لكتلة النوابض المستخدمة في بيانات المحاكاة على النحو التالي:

$$f_{nu} = 1.28\text{Hz}$$

للكتلة غير النابضية، الصلابة المكافئة لكتلة تتأرجح بنابضين يمكن الكتابة على النحو التالي:

$$K_{eq} = K_s + K_t$$

$$f_{nu} = \frac{\sqrt{\frac{K_{eq}}{m}}}{2\pi} \text{ with can be written as}$$

$$f_{nu} = \frac{\sqrt{\frac{K_s + K_t}{m}}}{2\pi}$$

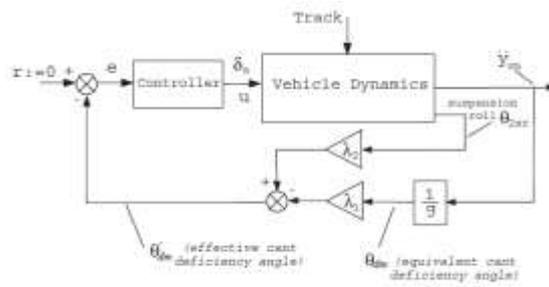
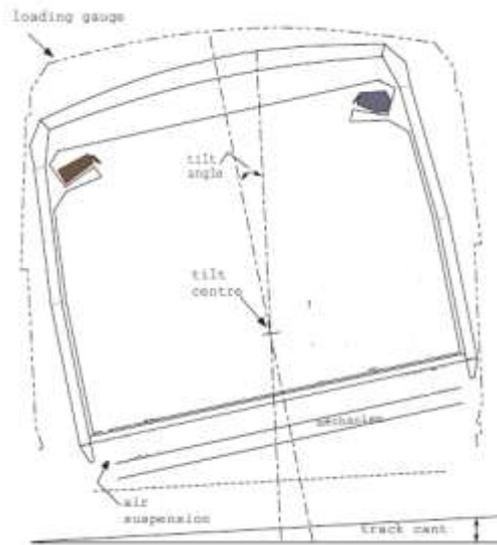
وباستخدام بيانات المحاكاة، يمكن معرفة تردد الكتلة غير النابضية حيث يتم الحصول عليها على النحو التالي:

$$f_{nu} = 13.88\text{Hz}$$

التحكم الأساسي في إلغاء الإمالة:

في استراتيجية التحكم الكلاسيكية المستخدمة للتحكم في ردود الفعل SISO، يتم الحصول على إشارة من مقياس التسارع الجانبي المركب على الجسم لتوفير قياس تسارع الانحناء الذي يعاني منه الركاب.

ستقود وحدة التحكم إشارة التغذية العكسية إلى الصفر، وبالتالي تعطي تعويضًا بنسبة 100% ، وبالتالي يتم تضمين جزء من زاوية لفة التعليق (أي "الإمالة الفعلية") في التغذية العكسية، التي تم اختيارها لتوفير تعويض محدد بنسبة 60%، يشار إلى هذا في الواقع باسم "الإلغاء الجزئي" [9].

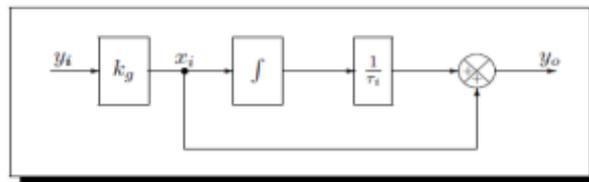


(b) Basic mulling tilt control scheme

تحكم PI في عملية إلغاء الإمالة الأساسية

كان من الضروري تضمين الجزء "التناسبي" للحد من تأخر الطور الذي تم إدخاله مع زيادة التردد (ليس من المرغوب بالنظام تقديم تأخر طور كبير خاصة عند الترددات الأعلى من 6.02 rads).
وتتم إضافة الإجراء التكاملية لضمان عدم وجود خطأ ثابت في الحالة الصفرية أي زاوية ميل في الحالة المستقرة الصفرية، أي لإزالة حالة الإزاحة المستقرة، فنحصل على متحكم تناسبي تكاملي PI، الشكل التالي، الموصوف بالتعبير التالي:

$$K_{pi}(s) = K_g \left(1 + \frac{1}{ST_i} \right)$$



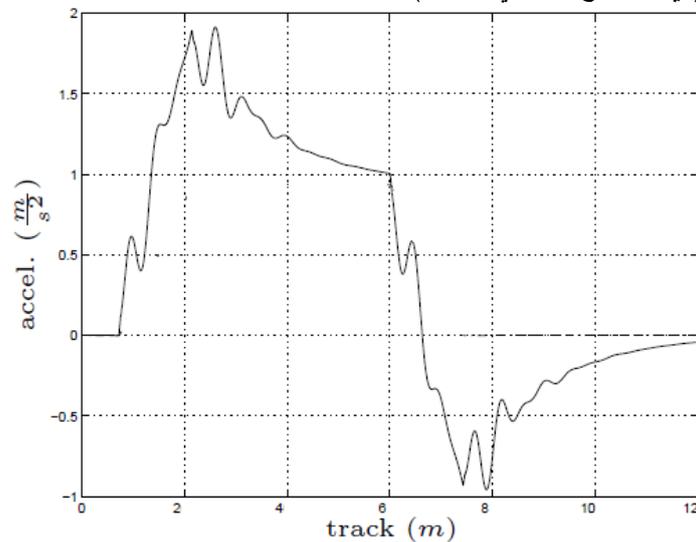
المخطط الصندوقي لـ متحكم تناسبي تكاملي PI

DETERMINISTIC		
Lateral accel.	- steady-state	n/a (%g)
(actual vs ideal)	- R.M.S. deviation error	5.555 (%g)
	- peak value	19.510 (%g)
STOCHASTIC		
Passenger comfort	- R.M.S. passive (equiv.)	3.778 (%g)
	- R.M.S. active	3.998 (%g)
	- degradation	5.802 (%)

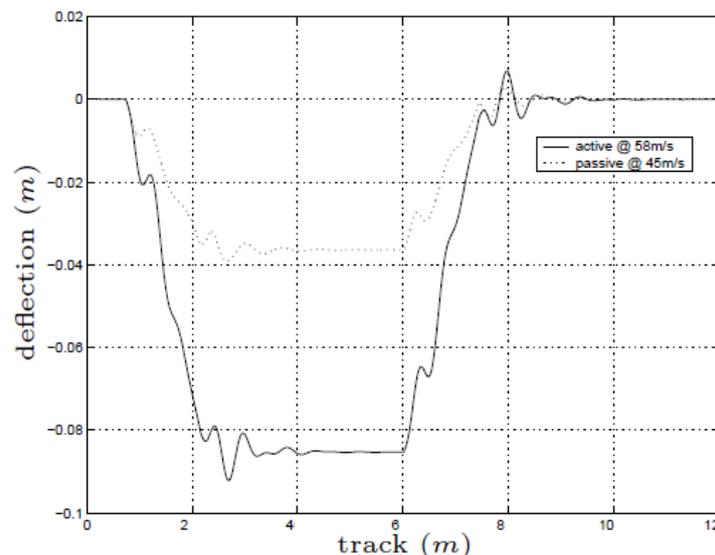
التقييم الشامل لوحددة التحكم

من الواضح أن الاستجابة بطيئة جداً مع عدم تلبية قيم الحالة الثابتة للتسارع وزاوية التدحرج وملاحم معدل الدوران. يلاحظ أنه بسبب القصور الذاتي لجسم السيارة في بداية ونهاية المنحنى، فإن زاوية انحناء الجسم لها في البداية استجابة عكسية ثم ترتفع ببطء إلى قيمة الحالة المستقرة المطلوبة.

التسارع الجانبي للسيارة (أي التسارع الجانبي للركاب) :



انحراف التعليق الثانوي:



نهج المرشح التكميلي لعملية إلغاء الإمالة الأساسية

تتمثل إحدى الطرق البديلة لتحسين أداء الإمالة ، والتي لا تزال تعتمد على نهج التحكم الكلاسيكي، في فصل التسارع المقاس (بشكل أساسي عيب الإمالة المقاس) إلى (1) مكون الإمالة و (2) مكون الإهتزازات الأقل. يمكن تحقيق ذلك باستخدام مرشحات تمرير منخفضة وعالية، وبالتالي التعامل مع كل مكون على حدة من خلال تصميم وحدة التحكم الخاصة به [10].

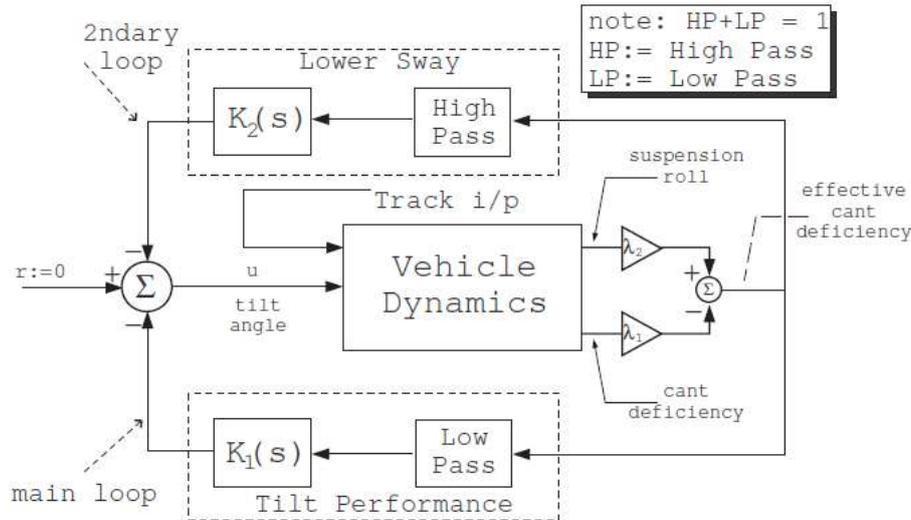
لاحظ أنه نظرًا لأن المرشحين يكملان بعضهما البعض (HP + LP = 1) ، فإن تأثيرهما الصافي يقدم كسبًا واحدًا وانزياحًا صفرًا في الطور في جميع أنحاء نطاق التردد، أي $H_{HP}(s) + H_{LP}(s) = 1$. تم اختيار المرشحات للحصول على "استجابة بترورث" من الدرجة الثانية ($\zeta = 0.707$)، مع تردد زاوية من $\omega_c = 0.3 \times 2\pi$ rads، بحيث يكون للتغذية العكسية الثانوية للميل المنخفض درجة معينة من التحكم في أوضاع جسم السيارة.

$$H_{LP}(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2}$$

$$H_{HP}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2}$$

الحلقة الرئيسية ، المتعلقة بأداء الإمالة ، تضمنت معوض (Phase Lead) + I + P مُعطى بواسطة :

$$K_1(s) = \frac{0.225(0.2s+1)}{0.2s} \times \frac{(s+1.68)}{(0.42s+1)} = \frac{(0.045s^2 + 0.30s + 0.378)}{s(0.084s + 0.2)}$$



نهج التحكم التكميلي في المرشح

بينما تضمنت الحلقة الثانوية، للتحكم الأقل بالإمالة، وحدة تحكم تدمج فيها (Phase Lag) + P معطى بواسطة:

$$K_2(s) = \frac{0.175(0.1s + 1.428)}{(0.1428s + 1)}$$

في هذه الحالة، يكون إجراء التحكم فعالاً على نطاق أوسع من الترددات مقارنة بالحالة الواردة في حالة متحكم PI فقط. قدم هذا النهج بعض التحسن في الأداء

DETERMINISTIC		
Lateral accel.	- steady-state	9.53 (%g)
(actual vs ideal)	- R.M.S. deviation error	2.97 (%g)
	- peak value	13.70 (%g)
STOCHASTIC		
Passenger comfort	- R.M.S. passive (equiv.)	3.778 (%g)
	- R.M.S. active	3.983 (%g)
	- degradation	5.417 (%)

حيث تحاول الحلقة الثانوية تقليل الحركات عالية التردد، ومع ذلك لا تزال القيود من مخطط الإلغاء الأساسي سارية فيما يتعلق بحلقة التغذية العكسية الرئيسية، يؤدي تأخر الطور المتأصل في إشارة التغذية العكسية للحلقة الرئيسية إلى هوامش استقرار غير كافية لاستجابة إمالة مقبولة.

دراسات تحكم متقدمة لـ ARB:

أثبت أسلوب التحكم الكلاسيكي من نوع "الإلغاء"، أنه من الصعب حل مشكلة التحكم في الإمالة بطريقة فعالة. تعني طبيعة هذا النوع من التحكم أنه سيكون من الصعب تحسين أداء الإمالة مع الحفاظ على جودة الركوب المقبولة. من الواضح أن هناك حاجة إلى طريقة للحفاظ على بساطة التحكم في "الإلغاء"، وتوفير أداء إمالة مشابه لنظام التحكم "الأسبقية". [11,12].

توفر طرق التحكم الحديثة نهجًا يمكن من خلاله معالجة عدد من أهداف مشكلة التحكم في وقت واحد. لا شك أن التحكم الكلاسيكي يمكن تطبيقه بشكل فعال على العديد من مشاكل تصميم التحكم في SISO، ولكن التحكم الحديث يعالج فئة أوسع من مشاكل التحكم بما في ذلك الهياكل الأكثر تعقيدًا وخاصة أنظمة MIMO. من المهم أن نتذكر أن السفر إلى الفضاء أصبح ممكنًا فقط بسبب ظهور نظرية التحكم الحديثة. تتطور النظرية باستمرار منذ الستينيات وتم تطبيقها في العديد من التطبيقات العملية، أي في صناعة الطيران. [13].

يتوفر عدد من طرق التحكم الحديثة، ولكن سنركز دراستنا على استخدام التقنية التالية: LQR الأمثل. تعتمد الطريقة الأولى على استخدام التحكم الأمثل لملاحظات الحالة لحل مشكلة المنظم التريبيعي الخطي كما هو معروف على نطاق واسع. كما أنه يوسع المفهوم إلى تصميم وحدة تحكم تناسبية + متكاملة.

المنظم الخطي التريبيعي (LQR) التحكم الأمثل:

يشكل التحكم الأمثل فرعًا معينًا من نظرية التحكم الحديثة، والذي يقدم حلاً تصميميًا يُفترض أن يكون أفضل ما يمكن لنوع نظام معين. يعد التحكم الخطي الأمثل نوعًا خاصًا من التحكم الأمثل، حيث يُفترض أن النظام خطي، بالإضافة إلى أن وحدة التحكم المراد تصميمها مقيدة لتكون ذات شكل خطي، يتم حل تصميمات وحدات التحكم هذه باستخدام مؤشرات الأداء التريبيعية، من حيث متغيرات التحكم والتنظيم و / أو تتبع الخطأ.

يملك التحكم الأمثل الخطي عمومًا عددًا من المزايا مقارنة بأشكال أخرى من التحكم الأمثل. يمكن في الواقع اعتبار العديد من الأنظمة الهندسية خطية وتنفيذ وحدات التحكم الخطية ماديًا مهمة بسيطة. أيضًا، فإن غالبية مشاكل التحكم الأمثل الخطي لها حلول قابلة للحساب بسهولة، والتي غالبًا ما يمكن نقلها إلى مشاكل التحكم المثلى غير الخطية [14].

7.1.1 مقدمات LQR - ملاحظات الحالة الكاملة

يتم إعطاء الوصف القياسي للنظام والمخرجات من خلال المعادلات التالية:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

حيث x هي $(n \times 1)$ ، u هي $(m \times 1)$ ، y هي $(q \times 1)$.

من المفترض أن يكون النظام خطياً وغير متغير مع الزمن (للبساطة) ويمكن التحكم فيه، من المرغوب فيه إيجاد قانون تحكم خطي مناسب كما يلي:

$$u = -K_r x$$

حيث K_r عبارة عن مصفوفة الريح، وينسق مؤشر الأداء التربيعي كما يلي:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \int_0^T [x^T Q x + u^T R_k u] dt \right\}$$

يجب أن تكون مصفوفات الترجيح Q (مصفوفة ترجيح الحالة) و R_k (مصفوفة الترجيح التحكمية) متناظرة (لأن J عددية)، أي $Q^T = Q$ و $R_k^T = R_k$.

لا توجد قيود محددة على الشكل الذي يجب أن يظهر به Q و R_k ، ولكن في معظم الحالات يكونان مصفوفات قطرية، ويجب التحكم في الناتج y ، فيجب ترتيب مؤشر الأداء التربيعي في:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \int_0^T [x^T Q_0 y + u^T R_k u] dt \right\}$$

حيث Q_0 هي مصفوفة ترجيح الخرج، ويمكن بسهولة إظهار أن $Q = C^T Q_0 C$ عن طريق تعيين $y = Cx$ لنظام مناسب تماماً.

مصفوفة الكسب K_r هي حل معادلة Riccati المختلفة لمصفوفة الشكل العام التالية:

$$A^T P_c + P_c A + \dot{P}_c + Q = P_c B R_k^{-1} B^T P_c$$

مع مراعاة المعطى A و B و C و Q و R_k ، تقييد أنفسنا في حالة الزمن الثابت، يجب أن تكون P_c ثابتة والتي تنص على أن $\dot{P}_c = 0$ ، ثم يتم تبسيط معادلة Riccati إلى:

$$A^T P_c + P_c A + Q - P_c B R_k^{-1} B^T P_c = 0$$

ويتم إعطاء حل مصفوفة الريح بواسطة:

$$K_r = R_k^{-1} B^T P_c$$

تخضع لكون (A, B) قابلة للاستقرار، $R_k > 0$ (محدد موجب، لطاقة تحكم محدودة)، $Q \geq 0$ (موجب شبه محدد)، وأن (A, Q) ليس لها أوضاع غير قابلة للرصد على المحور التخيلي.

7.1.2 الإلغاء الجزئي للتحكم الأمثل $P + I$ مع تنظيم الخرج:

بالنسبة للحالة الحالية لمشكلة الإزالة واستناداً إلى نهج التحكم في نوع "الإلغاء"، يتم وصف السيارة بفضاء الحالة التالي:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

يشمل متجه الحالة x حالات السيارة:

$$\begin{bmatrix} yv & \theta v & yb & \theta b & yb & \dot{\theta} b & \theta r \end{bmatrix}^T$$

و $u = [\delta a]$ يخضع النظام لاضطرابات خارجية مستمرة في المدخلات (المسار الثابت والعشوائي) وأيضاً إدخال مرجعي ثابت مفترض r (وهو في هذه الحالة مرجع صفري $r = 0$).

يعتمد التصميم على التغذية العكسية لمقدار الميل الفعال لتعويض 60%، كما في حالة "إلغاء" الميل الأساسي، θ_{dm} تعطى بالعلاقة:

$$\theta'_{dm} = \left(-0.615 \frac{\ddot{y}_{vm}}{g} - 0.385 \theta_{2sr} \right)$$

حيث yvm'' هو التسارع الجانبي المقدم من مقياس التسارع الجانبي لجسم السيارة (مقسوماً على g للتحويل إلى مقدار زاوية ميل)، و θ_{2sr} هي زاوية التعليق الثانوية.

ولرفض الاضطراب والتتبع المرجعي (وهو صفر في هذه الحالة)، يجب تحديد حالة جديدة وهي مكاملة مقدار زاوية الميل الفعالة θ_{dm} ، سينتج هذا النهج وحدة تحكم $P + I$ مثالية بدلاً من وحدة تحكم ردود فعل الحالة التناسبية، ومن ثم يتم زيادة النظام ليشمل θ'_{dm} كحالة:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ C' & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} u$$

حيث أن سرعة الاستجابة تعطى بالعلاقة: $x' = \int \theta'_{dm}$

C' هي المصفوفة المحددة للعمل المتكامل وهي موجودة من $\theta'_{dm} = C'x$ ، وإشارة التحكم تعطى:

$$u = - \begin{pmatrix} K_p & K_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}$$

ولتنظيم الخرج يكون مؤشر الأداء التربيعي:

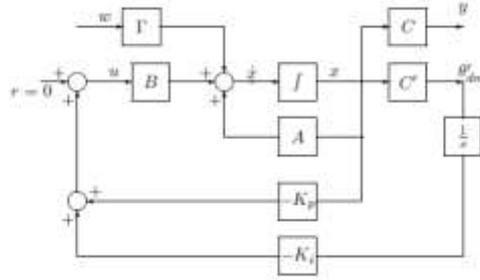
$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \int_0^T [y^T Q_0 y + u^T R_k u] dt \right\}$$

حيث $y = [(\theta' v, \int \theta'_{dm})]$ و $u = \delta a$.

في هذه الحالة، Q_0 هو الوزن الأكثر أهمية فيما يتعلق بسرعة الاستجابة $(\int \theta'_{dm})$ ، بينما R_k يهتم بالتذبذبات غير المرغوب فيها.

تم توضيح المخطط العام في الشكل أدناه.

إن اختيار الأوزان التربيعية Q_0 ، R_k صعب ويعتمد بشكل أساسي على خبرة المصمم، وغالباً ما يكون اختيار Q_0 ، R_k غير دقيق ونتيجة لذلك قد تكون الاختبارات الأولية غير مناسبة (عادةً ما يعتمد الاختيار النهائي على عملية التجربة والخطأ).



تم اختيار العناصر الموجودة في Q0 و Rk مبدئيًا لتمثيل مربع معكوس القيمة المتوقعة ، $\frac{1}{\text{المتوقعة القيمة}}$ ، لكل بارامتر .

وبالتالي يمكن ضبط وحدة التحكم عن طريق تغيير عوامل الترجيح والتحقق من الأداء ، حيث أن الكسب الأمثل هو

مع $K_r = [K_p \ K_i]$ ، حيث Pc هو حل معادلة Riccati الجبرية التالية:

$$A^T P_c + P_c A + C^T Q_o C - P_c B R_k^{-1} B^T P_c = 0$$

يجب ملاحظة أنه مع زيادة قيمة Q0 ($\int \theta' dm \rightarrow 0$ بشكل أسرع) ، مما يؤكد على إجراء متكامل إضافي ، تصبح استجابة النظام أسرع (تخضع ل Rk الثابت).

يعتمد اختيار قيم عوامل الترجيح في الواقع على الحالة المثالية ، إلا أنه يتيح استيعاب الجوانب المثالية والعشوائية.

- من الناحية المثالية ، يجب أن تكون قيمة Rk صغيرة قدر الإمكان ، ولكن القيم الصغيرة جدًا ستوفر مكاسب كبيرة للتغذية العكسية وتؤدي إلى عرض نطاق ترددي عالي للحلقة المغلقة.

تم اختيار قيمة Rk في هذه الحالة لتكون $\frac{1}{0.215^2}$ ، أي من المتوقع أن توفر مدخلات التحكم ما يصل إلى 0.215 زاوية راديان (المشار إليها في حالات التحكم الأساسية حيث يحتاج ARB للتغلب على قوى التعليق الإضافية).

- في الحالة العشوائية يعتبر ترجيح سرعة لفة الجسم Q0 مفيدًا جدًا حيث يقيد حركة لفة الجسم بسبب الدخل غير المنتظم ، تم اختيار قيمته $\frac{1}{5^2}$.

قيمة Q0 عالية تخفض أداء الانتقال ، لأنه لا توجد حرية لزيادة سرعة الدوران بسرعة تصل إلى القيمة المطلوبة أثناء انتقال المنحنى.

أخيرًا ، يتم ضبط الوزن على $\frac{1}{0.12}$. فيكون مؤشر الأداء التربيعي المقابل:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \int_0^T \left(\frac{1}{5^2} \dot{\theta}_v + \frac{1}{0.1^2} \int \theta'_{dm} + \frac{1}{0.215^2} u^2 \right) dT \right\}$$

ووجد أن الكسب الأمثل لهذا التكوين هو:

$$K_r = \begin{bmatrix} 0.38 & 0.07 - 0.1 - 0.04 & 0.23 & 0.09 - 0.0003 & 0.0020 & 0.07 & 2.15 \end{bmatrix}$$

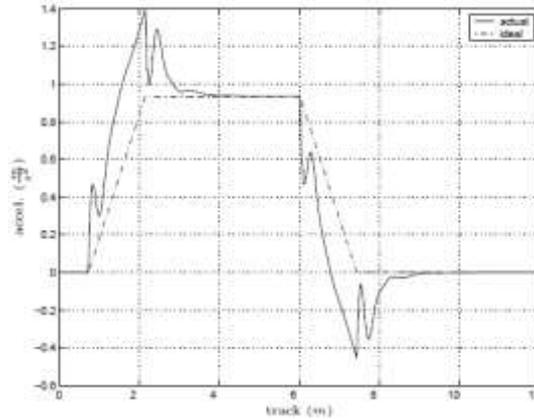
يتم تقديم تقييم وحدة التحكم للتصميم الحالي :

وحدة التحكم سريعة بما يكفي لاستيعاب جميع الأطوال الموجبة العشوائية الطويلة (التردد المنخفض) ، وبالتالي تحسين جودة الركوب.

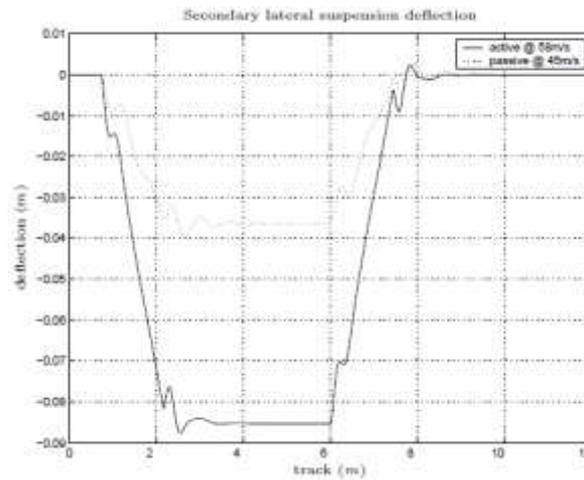
ومع ذلك ، فإن تصميمات وحدة التحكم الأسرع ستؤدي حتمًا إلى تدهور أداء انتقال المنحنى بسبب زيادة مستويات سرعة الاهتزاز واللف.

لاحظ أن زاوية انحناء الجسم مقيدة بطبيعتها من خلال ترجيح معدلها.

تسارع الركاب الجانبي (تسارع السيارة):



انحراف التعليق :

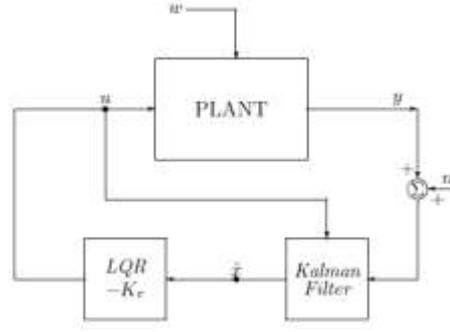


نفس مخططات الانحراف تقريبا بس غير مخططات عامل الراحة، وهذا يدل على أن lqr هو الانسب.

DETERMINISTIC		
Lateral accel.	- steady-state	9.53 (%g)
(actual vs ideal)	- R.M.S. deviation error	2.44 (%g)
	- peak value	14.18 (%g)
STOCHASTIC		
Passenger comfort	- R.M.S. passive (equiv.)	3.78 (%g)
	- R.M.S. active	3.19 (%g)
	- degradation	-15.66 (%)

التحسين العام الذي أدى إليه متحكم lqr :

في حالة عدم توفر جميع حالات النظام المطلوبة للتغذية العكسية ، والتي قد يكون من الصعب أو حتى من المستحيل قياسها، يمكن دمج مرشح كالمان مع وحدة التحكم المثلى لتوفير تقديرات الحالة اللازمة لتعليقات الحالة (ينتج عن هذا النهج نتائج مشابهة جداً لنظام LQR). يُعرف هذا باسم مشكلة جاوس التربيعية الخطية أو مشكلة LQG، ويتم تحديد حلها بواسطة مبدأ الفصل (أو مبدأ "معادلة اليقين") [15,16].



النظام مع مرشح كالمان

lqr حدود

كما تم النظر في مخرجات منظمة إضافية مثل السرعة الجانبية للجسم، والمعدل الجانبي لعربة الجسم، وزاوية لفة الجسم ، ولكنها لم تقدم تحسناً كبيراً في تصميم وحدة التحكم.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- كان الهدف بداية تطوير نظام تحكم قوي للغاية بحيث يمكن التعافي من إمالة كبيرة، عندما بدأت المشكلات والصعوبات في الظهور في البرمجة تقلصت التوقعات إلى مجرد توفير نظام تحكم يمكن من الحفاظ على الاستقرار .
- كما كان الهدف أيضا اختبار أكثر من خوارزمية تحكم ومقارنتهم وإجراء أكثر من تحسين محتمل عليها، إلا أنه لم يتم العمل إلا على خوارزمتين، وبناءً على ما تم دراسته يمكن القول: أن النتائج حققت جزءاً جيداً من التوقعات.

التوصيات:

- تحسين وحدات التحكم المقترحة لتقليل وقت الاستقرار ونطاق التجاوز لزاوية الإمالة.
- اختبار استجابة السيارة باستخدام برامج محاكاة مختلفة مثل automation studio، وتعميم النتائج على نموذج نصف سيارة وسيارة كاملة.

[1]Huang, C.J., and Lin, J.S.(2013), “Nonlinear Back Stepping Control Design of Half-Car Active Suspension Systems,” *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 33, No.4 , pp.332-350.

[2]Huang, C., J., and Lin, J., S. (2-14), “Nonlinear Active Suspension Control Design Applied to a Half-Car Model,” *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Taipei, Taiwan.

[3]Jaitlee, R. (2012), “Optimisation of Front-End Suspension of Nissan 280zx”, B. Mech. Eng Thesis, RMIT University, Melbourne, Australia .

[4]Moran, A. and Nagai, M. (2018), “Optimal Active Control of Nonlinear Vehicle Suspension using Neural Networks”, *JSME International Journal, Series C* 37 pp. 707–718 .

[5]Pollard, M. G. and Simons, N. J. (2020), “Passenger comfort--the role of active suspension,” *ImechE*, Vol. 198D, pp.161-175

[6]Smith, M.C., and Wang, F.C.(2015), “Controller Parameterization for Disturbance Response Decoupling: Application to Vehicle Active Suspension Control,” *IEEE Transactions. Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 10, No.3 .

- [7]Vetturi, D., Gadola, M., Cambiaghi, D. and Manzo, L. (19201696), “Semi-active strategies for racing car suspension control”, *SAE Technical Papers, No. 962553, II Motorsports Engineering Conference and Exposition*, Dearborn, USA.
- [8]Williams, R.A. (2017), “Automotive active suspensions, Part 1: Basic principles”, *Journal of Automobile Engineering*, Part D 211, pp. 415–426.
- [9]Yang, J., Suematsu Y., and Kang, Z. (2011) *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 9, pp. 295–317.
- [10]Jia, G.; Li, L.; Cao, D. Model-based estimation for vehicle dynamics states at the limit handling. *J. Dyn. Syst. Meas. Control* 2015, 137, 1–8.
- [11]Saglam, F.; Unlusoy, Y.S. Adaptive ride comfort and attitude control of vehicles equipped with active hydro-pneumatic suspension. *Int. J. Veh. Des.* 2016, 71, 31–51.
- [12]Basrah, M.S.; Siampis, E.; Velenis, E.; Cao, D.; Longo, S. Wheel slip control with torque blending using linear and nonlinear model predictive control. *Veh. Syst. Dyn.* 2017, 55, 1665–1685.
- [13]Zhang, J.; Li, X.; Liu, D. Mine car suspension parameter optimisation based on improved particle swarm optimisation and approximation model. *Int. J. Veh. Des.* 2019, 80, 23–40.
- [14]Hosseinian Ahangarnejad, A.; Melzi, S. Numerical analysis of the influence of an \
- [15]Shahein, A.H.; Ata, A.A.; Haraz, E.H.; El-Souhily, B.M. Vibration suppression of terrains irregularities using active aerodynamic surface for half-car model sport vehicles. *J. Vib. Control* 2020.
- [16]Mohammed Kaleemullah and Waleed F. Faris , Optimisation of robust and LQR control parameters for discrete car model using genetic algorithm , Published Online:November 6, 2022pp 40-63 , <https://doi.org/10.1504/IJVSMT.2022.126968>