

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 414 094**

51 Int. Cl.:

F16D 48/06 (2006.01)

F16D 48/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.06.2009 E 09290470 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.03.2013 EP 2141379**

54 Título: **Procedimiento para controlar la fase de cierre de un embrague de un sistema de transmisión robotizado en un automóvil**

30 Prioridad:

04.07.2008 FR 0803822

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

18.07.2013

73 Titular/es:

**IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)
1 & 4 AVENUE DE BOIS-PRÉAU
92852 RUEIL MALMAISON CEDEX, FR**

72 Inventor/es:

**TONA, PAOLINO;
AMARI, RACHID y
ALAMIR, MAZEN**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 414 094 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para controlar la fase de cierre de un embrague de un sistema de transmisión robotizado en un automóvil

5 La presente invención se refiere al dominio de los sistemas de control automático de un motor de un vehículo.
 En particular, la invención se refiere a un procedimiento para controlar la fase de cierre de un embrague de un sistema de transmisión robotizado en un automóvil.

10 Los sistemas de transmisión robotizados, o sistemas de transmisión manual automática (AMT "Automated Manual Transmissions"), constituyen una solución intermedia entre las transmisiones manuales clásicas y las transmisiones automáticas. A diferencia de estas últimas, caracterizadas por unos componentes mecánicos complejos tales como unos convertidores de par y unos trenes epicicloidales, las transmisiones robotizadas utilizan unos órganos
 15 (embrague, caja de velocidades) que tienen una mecánica tradicional, controlados, no por el conductor, sino por una o varias unidad(es) de control de a bordo. La figura 1 muestra un esquema genérico de transmisión robotizado. La figura 2 muestra un esquema conceptual de transmisión robotizada.

20 Todo sistema de control de una transmisión robotizada, incluida en una o varias ECU (Electronic Control Unit), debe generar unas consignas para:

- el regulador (eléctrico, neumático o hidráulico) de la posición del embrague (actuador del embrague);
- el regulador (eléctrico, neumático o hidráulico) de los engranajes de la caja de velocidades (actuadores de la
 25 caja de velocidades), que se traduce en el cambio de velocidad decidido por el conductor.

30 Así, en una transmisión robotizada, son las ECU dedicadas al control de la transmisión las que permite realizar las solicitudes del conductor (arranque y cambio de velocidades), a través de los actuadores mencionados anteriormente, y esto en colaboración con la ECU de control motor, que determina el par producido por el motor.

El arranque es la maniobra que consiste en poner en movimiento un vehículo en la parada, movimiento obtenido transmitiendo una fracción cada vez más importante del par motor al árbol primario de transmisión, y por tanto a las
 35 ruedas, a través de un cierre progresivo del embrague. El embrague acopla (progresivamente después integralmente) el volante motor al árbol primario, transmitiendo de ese modo el par producido en el motor (neto sin los rozamientos del conjunto de cigüeñal motor) al árbol primario. En este esquema, el embrague puede por lo tanto estar:

- completamente abierto (desacoplado, desembragado), con un par nulo transmitido al árbol primario;
- 40 - completamente cerrado (acoplado, embragado), con el par motor integralmente transmitido al árbol primario;
- deslizante, en el camino de cerrarse o de abrirse. Es en la fase de deslizamiento para el cierre cuando se tiene la transmisión progresiva del par motor hacia al árbol primario.

45 En el caso de una transmisión manual clásica, el conductor realiza el cierre progresivo del embrague dosificando al mismo tiempo la presión ejercida sobre el pedal del embrague y la presión ejercida sobre el pedal acelerador. Su experiencia de conductor determinará el éxito de la maniobra, o bien su fracaso (calado del motor, sobrevelocidad, fuertes oscilaciones). En el caso de una transmisión robotizada, el pedal de embrague está ausente, y es en el sistema de control de la transmisión donde se dosifica la acción del embrague, y donde se coordina con la
 50 producción del par del motor para garantizar el buen desarrollo de la maniobra de arranque.

El cierre progresivo del embrague, y su coordinación con la producción del par motor, es por tanto la fase clave para el control de la transmisión robotizada. Para comprender el funcionamiento del grupo motopropulsor en esta fase, es necesario considerar que el par transmitido por el embrague (fracción del par motor) se ve como un par negativo del
 55 lado del cigüeñal (se sustrae por tanto de un par neto proporcionado por el motor) y como un par positivo del lado de la transmisión aguas abajo del embrague. El resultado neto de las pérdidas transitorias y estáticas debidas a las elasticidades, a los rozamientos y a la eficacia de cada elemento mecánico. Es este par el que, desmultiplicado por la relación de la caja, se transmite a la ruedas. El estado del grupo motopropulsor se define entonces por unas variables medidas aguas arriba y abajo del embrague: típicamente, el régimen motor aguas arriba, siempre disponible en el vehículo, más (al menos) una medida de la velocidad aguas abajo del embrague: velocidad del árbol
 60 primario, del árbol secundario o velocidad de la ruedas. Estas variables no se miden sistemáticamente en un vehículo de serie, pero deben serlo en un vehículo equipado con una transmisión robotizada.

Estado de la técnica

5 Para realizar las dos funciones principales del sistema de transmisión robotizado, arranque y cambio de velocidades, los sistemas de control de los vehículos de serie calculan generalmente la consigna del actuador del embrague a partir de tablas (*cartografías*) previamente rellenas, en función del par solicitado por el conductor (posición del pedal acelerador), del régimen motor, del régimen del árbol primario (u otra velocidad del lado de la transmisión) y otros parámetros, tales como la relación de la caja (en el caso de cambio de velocidades).

10 Del lado del control motor, es necesario asegurar que el régimen motor permanece compatible con la maniobra considerada, a pesar del par negativo que actúa sobre el cigüeñal (es necesario por lo tanto que el control motor incremente el par motor en consecuencia). Desde un punto de vista sistemático, este tipo de estructura de control no es otra más que un caso particular de la estructura general de la figura 3. Este esquema subraya que en el control de la fase de deslizamiento del embrague, se dispone de dos "palancas": el par motor que actúa solamente sobre el cigüeñal, y el par transmitido por el embrague que actúa la vez sobre el cigüeñal (como par negativo) y sobre la parte aguas abajo de la transmisión hasta las ruedas. Se trata, para el sistema de control, y utilizando la terminología de los Automatismos, de dos *actuadores* que actúan en la *entrada* del *sistema* del grupo motopropulsor. Para conocer el estado del sistema, y actuar en consecuencia, es necesario medir al menos dos *salidas*, el régimen motor y una de las velocidades aguas abajo del embrague, por ejemplo, el régimen del árbol primario. Las entradas del sistema del grupo motopropulsor, es decir los pares motor y de embrague, no se miden jamás en un vehículo de serie, sino solamente se estiman, y con muchas imprecisiones.

25 Este control por cartografía, típico de los vehículos de serie, no permite traducir fácilmente las especificaciones a respetar durante el cierre del embrague: realización de las solicitudes del conductor, confort, mantenimiento del funcionamiento correcto del grupo motopropulsor. Además, requiere un largo trabajo de calibración para rellenar las cartografías.

30 Para superar unos métodos basados en unas cartografías, se conocen unas soluciones basadas en unas leyes de mando, o leyes de control, inspiradas en los principios de los Automatismos. Estas leyes no se basan solamente en unas tablas rellenas previamente. Estas soluciones se basan en unos algoritmos que calculan las entradas a enviar hacia el sistema del grupo motopropulsor, par motor y par de embrague, a partir de medidas del estado de este sistema (típicamente el régimen motor y el régimen del árbol primario), concebidos utilizando el principio de retroalimentación (*feedback*).

35 Para que sean utilizables en el marco del control del motor de un vehículo, estas leyes de mando por realimentación deben permitir satisfacer un cierto número de especificaciones: el respeto de las restricciones que garantizan un funcionamiento correcto del motor térmico, el respeto de las restricciones que garantizan el confort en el acoplamiento del embrague (ninguna oscilación), y el respeto de la voluntad del conductor. Un procedimiento de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1 se conoce por el documento EP-A-1 072 459.

40 O, estas técnicas no pueden gestionar explícitamente estas restricciones, es decir asegurarse que una o varias variables del sistema a controlar (entradas, salidas o estado), o sus derivadas, no sobrepasan ciertos límites fijados como especificaciones.

45 Así, el objetivo de la invención es un procedimiento alternativo para controlar en tiempo real un embrague de un automóvil en un sistema de transmisión robotizado, por medio de una ley de mando que permita superar los problemas de las técnicas anteriores. Para lograrlo, el procedimiento traduce la solicitud del conductor en términos de velocidad de deslizamiento ω_{sl} y de régimen motor ω_e , y utiliza una ley de mando CMPC para regular esta velocidad de deslizamiento y este régimen motor.

50 El procedimiento de acuerdo con la invención

El objetivo de la invención es un procedimiento para controlar un embrague de automóvil en un sistema de transmisión robotizado, en el seno de un vehículo que incluye un motor unido a un árbol primario a través de dicho embrague. El procedimiento comprende las etapas siguientes:

- 55
- se traduce una solicitud del conductor sobre el pedal del acelerador en términos de velocidad de deslizamiento ω_{sl} , definida por la diferencia entre un régimen del motor ω_e y un régimen del árbol primario ω_c .
 - 60 - se definen unas restricciones sobre los actuadores del motor y del embrague para respetar sus límites de funcionamiento;
 - se definen unas restricciones de confortabilidad para garantizar un confort durante la fase de acoplamiento del embrague;
 - 65 - para respetar dichas restricciones de confortabilidad, se define una trayectoria de referencia de dicha velocidad

de deslizamiento, definiendo para cada etapa del control, un valor de consigna ω_{sl}^{ref} para dicha velocidad de deslizamiento en función de un tiempo N_f^* de acoplamiento del embrague;

- 5 - a partir de la expresión de dicha trayectoria de referencia, se define una expresión analítica que permite calcular en tiempo real un conjunto de trayectorias de control de dicha velocidad de deslizamiento, por medio de una ley de control predictiva mediante un modelo con restricciones, denominado control CMPC;
- se selecciona entre el conjunto de dichas trayectorias de control, aquella que respeta las restricciones sobre los actuadores por medio de una técnica de búsqueda dicotómica; y
- 10 - se controla dicho embrague por medio de dicha trayectoria de control seleccionada.

De acuerdo con la invención se pueden definir las restricciones sobre los actuadores imponiendo unos valores mínimos y máximos al par motor y al par de embrague, así como unos valores mínimos y máximos a las derivadas de estos pares.

Se pueden definir las restricciones de la confortabilidad imponiendo que la velocidad de deslizamiento y su derivada sean nulas durante la fase de acoplamiento del embrague.

20 De acuerdo con la invención, la consigna ω_{sl}^{ref} se puede definir para cada etapa de control k mediante la relación siguiente:

$$\forall i \in \{1, \dots, N_p - 1\}$$

$$25 \quad \omega_{sl}^{ref}(k+1) = \frac{1 - i/N_f^*}{(1 + \lambda \cdot i/N_f^*)^2} \omega_{sl}^k$$

con:

- N_p es un entero que define un horizonte de predicción;
- 30 - λ es un parámetro a calibrar.

El parámetro λ se elige ventajosamente de manera que el acoplamiento tenga lugar con una derivada de la velocidad de deslizamiento casi nula.

35 Finalmente se puede generar una segunda consigna ω_{sl}^{ref} para el régimen motor definida mediante:

$$\omega_{sl}^{ref} = \max\left\{\omega_e^0, T^{-1}\left(T_e^d(X_{pedal}, \omega_e)\right)\right\}$$

en la que:

- 40 - ω_e^0 es una consigna constante de ralentí;
- T es un par máximo en función del régimen ω_e
- T_e^d es un par motor solicitado por el conductor.
- 45 - X_{pedal} es una posición del pedal del acelerador.

Otras características y ventajas de la invención, surgirán con la lectura de la descripción a continuación de ejemplos no limitativos de realizaciones, que se refieren a las figuras adjuntas y descritas a continuación.

50 **Sucinta presentación de las figuras**

- La figura 1 muestra un esquema genérico de transmisión robotizada.
- 55 - La figura 2 muestra un esquema conceptual de transmisión robotizada.
- La figura 3 ilustra una estructura general de un control para la fase de deslizamiento del embrague.
- La figura 4 ilustra el principio de la búsqueda dicotómica de las predicciones de la velocidad de deslizamiento

respetando las restricciones.

Descripción detallada del procedimiento

5 El cierre progresivo del embrague, y su coordinación con la producción de un par motor dado, es una frase clave del control de transmisión robotizado. En esta fase, se debe asegurar:

- el mantenimiento del funcionamiento correcto del grupo motopropulsor (el sistema): ni calado, ni sobrevelocidad del motor;
- 10 - el confort del conductor; minimización de las oscilaciones en el cierre del embrague;
- el respeto de la voluntad del conductor: por ejemplo, arranque más corto si se apoya más sobre el pedal del acelerador, abandono del arranque si se relaja el pedal.

15 De acuerdo con la invención, para tener en cuenta de manera transparente (para el conductor) estas especificaciones, se utiliza un enfoque basado en una ley de control capaz de optimizar un criterio, mientras genera unas restricciones. Para hacer esto, se utiliza la técnica denominada de “control predictivo mediante un modelo con restricciones” (Constrained Model Predictive Control, CMPC), descrito, entre otros, en: D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao, y P. O. Scokaert, “Constrained model predictive control: Stability and optimality”, Automatica, 36:789-814, 2000. La posibilidad de integrar unas restricciones en las entradas, las salidas y los estados del sistema (por ejemplo el régimen motor mínimo y máximo, rapidez de variación del par de embrague) hace a este tipo de control particularmente bien adaptado al problema técnico de la invención.

25 No obstante, esta técnica de control CMPC, en su formulación estándar, no es aplicable a unos grupos motopropulsores, que se caracterizan por unas dinámicas rápidas. En efecto, para ser eficaz, un sistema de control para el conjunto de motor-transmisión debe poder calcular un nuevo control con unos intervalos de tiempo relativamente pequeños (algunas decenas de milisegundos, como máximo). La formulación estándar de la optimización en el control CMPC no permite efectuar este cálculo en un tiempo tan corto. No es posible utilizar una ley de control CMPC clásica para efectuar una optimización en línea (en tiempo real).

30 De acuerdo con la invención, se construye un nuevo enfoque para la optimización del cálculo del control CMPC en unos retardos de tiempo compatibles con los mandatos de un sistema de control de automóvil. De ese modo es posible, mientras se integran las especificaciones necesarias para el buen desarrollo de un arranque desde el punto de vista de confortabilidad y consumo:

- calcular el control muy rápidamente en tiempo real, con unos períodos compatibles con las potencias de cálculo de las unidades de control de a bordo montadas sobre los vehículos de serie;
- 40 - producir de manera transparente la voluntad del conductor.

Ese procedimiento para controlar en tiempo real un embrague de automóvil en un sistema de transmisión robotizado, comprende las etapas siguientes:

- 45 - se traduce la solicitud del conductor en términos de velocidad de deslizamiento ω_{sl} , definida por la diferencia entre el régimen del motor ω_e y el régimen del árbol primario ω_c .
- se definen unas restricciones sobre unos actuadores del motor y del embrague para respetar sus límites de funcionamiento;
- 50 - se definen unas restricciones de confortabilidad para garantizar un confort durante una fase de acoplamiento del embrague;
- se define una trayectoria de referencia de la velocidad de deslizamiento;
- 55 - se calcula un conjunto de trayectorias de control por medio de una ley de control CMPC; y
- se selecciona de entre el conjunto de estas trayectorias de control aquella que respeta las restricciones sobre los actuadores por medio de una técnica de búsqueda dicotómica.

60 De ese modo, de acuerdo con la invención, se respetan las especificaciones de la manera siguiente:

- el mantenimiento del funcionamiento correcto del grupo motopropulsor aplicando unas restricciones sobre algunas variables medidas, tales como el régimen motor: régimen motor superior a un valor mínimo, para impedir el calado; régimen motor inferior a un valor máximo para evitar las sobrevelocidades;

- el respeto de la voluntad del conductor traduciendo la solicitud del conductor en términos de velocidad de deslizamiento ω_{sl} , definida por la diferencia entre el régimen del motor ω_e y el régimen del árbol primario ω_c .
 - el confort del conductor en el acoplamiento del embrague, aplicando unas restricciones sobre la velocidad de deslizamiento ω_{sl} , (denominada también régimen de deslizamiento).
 - la determinación de una ley de control para el embrague que respete estas especificaciones en tiempo real, utilizando la velocidad de deslizamiento ω_{sl} y el régimen motor ω_e como parámetros a regular.
- 10 Antes de describir en detalle las etapas del procedimiento, se recuerda que el sistema de control CMPC comprende:
- 1- Un modelo interno (modelo de control) capaz de simular el comportamiento del sistema a controlar más rápidamente que en tiempo real;
 - 15 2- Una trayectoria de referencia que define el comportamiento deseado en bucle cerrado;
 - 3- El principio de horizonte deslizante: se aplica solamente la primera componente de la trayectoria óptima de control, repitiendo todos los cálculos en la etapa de muestreo siguiente.
 - 20 4- La caracterización de la trayectoria de control mediante un número finito de “golpes” (u otros parámetros).
 - 5- La optimización en línea bajo restricciones, para determinar la estrategia futura de control.

1- Definición de un modelo que simule el comportamiento del grupo motopropulsor

25 Se trata de definir un modelo de control capaz de simular el comportamiento del sistema a controlar más rápidamente que en tiempo real. De acuerdo con un ejemplo, se utiliza como modelo de control un sistema no lineal bajo la forma de estado en tiempo discreto:

$$30 \quad \begin{cases} X_{k+1} = f(X_k, u_k) \\ y = g(X_k) \end{cases}$$

donde $X \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^q$ son respectivamente, el estado del sistema, los controles (entradas del sistema) y las salidas del sistema (variables controladas).

35 En el caso del control del embrague:

- Los controles del sistema (U_k) o entradas del sistema pueden ser:
 - 40 - la consigna del motor
 - la consigna del par de embrague
- Las salidas del sistema (Y_k) pueden ser:
 - 45 - el régimen motor ω_e
 - el régimen del árbol primario ω_c
 - otra velocidad de la transmisión directamente conectada al régimen del árbol primario
- El estado del sistema X_k puede ser:

50 El conjunto de las variables que indican el estado físico del grupo motopropulsor (velocidades o combinaciones lineales de las velocidades). Este estado se determina mediante la complejidad elegida para el modelo (toma en consideración de las torsiones, rozamientos, juegos mecánicos).

55 El control predictivo CMPC (estándar) consiste en calcular en cada período de control una secuencia de control óptima (de acuerdo con la invención, se tratará en cambio de un conjunto de secuencias de control en función de un parámetro que especifica una trayectoria de velocidad de deslizamiento), solución de un problema de optimización de restricciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_k(\cdot) = \sum_{i=k+1}^{k+N} \left((r_k - y_k)^T Q (r_k - y_k) + (u_{k-1} - u_{k-2})^T R (u_{k-1} - u_{k-2}) \right) \\ \text{BAJO LAS RESTRICCIONES} \\ X_{k+1} = f(X_k, u_k) \\ y = f(X_k) \\ u_k = u_{k-1} + du_k \\ X_{\min} \leq X_k \leq X_{\max} \\ \alpha_k \leq u_k \leq \beta_k \\ du_k^{\min} \leq du_k \leq du_k^{\max} \end{array} \right.$$

En la que e es el error entre la consigna y la medida real, N el horizonte de predicción, Q y R son unas matrices de ponderación asociadas respectivamente a los errores de consigna-medidas y a los controles.

5 Se puede elegir un modelo simple, despreciando ciertas dinámicas de la transmisión. En este caso, es preferible introducir unos términos de incertidumbre que se pueden reconstruir mediante estimación. El modelo más simple tiene la forma siguiente:

$$10 \quad J_e \dot{\omega}_e = T_e^{SP} - T_c^{SP} + \delta(\cdot)$$

$$[J_c + J_{eq}(i_g, i_d)] \dot{\omega}_c = \text{signo}(\omega_{sl}) T_c^{SP} - \delta_c(\cdot)$$

en la que:

- 15 J_e : es la inercia del motor, del cigüeñal y de la parte del embrague del lado del motor;
 J_c : es la inercia del árbol primario y del resto del embrague;
 $J_{eq}(i_g, i_d)$: es la inercia equivalente de la transmisión aguas abajo del embrague que depende de la relación acoplada de la caja i_g y de la relación del diferencial i_d ;
 ω_{sl} : es la velocidad de deslizamiento entre motor y árbol primario;
- 20 T_e^{SP} : es la consigna del par motor, que el sistema de control motor traducirá en un par neto T_e sobre el cigüeñal;
 T_c^{SP} : es la consigna del par de embrague, que el sistema de control de embrague traducirá en un par T_c transmitido por el embrague;

25 El término $\delta_e(\cdot)$ reagrupa todas las incertidumbres que afectan a la dinámica del cigüeñal: rozamientos en el motor, errores en los parámetros de los motores, errores en la curva de transmisibilidad del embrague, dinámicas despreciadas, etc.

30 El término $\delta_c(\cdot)$ reagrupa todas las incertidumbres que afectan a la dinámica de la transmisión aguas abajo del embrague: errores en la curva de transmisibilidad del par del embrague, errores en los parámetros de la transmisión, dinámicas despreciadas, etc.

Los términos $\delta_e(\cdot)$ y $\delta_c(\cdot)$ se reconstituyen mediante estimación dinámica, por ejemplo mediante unos estimadores del tipo Kalman.

35 Se pueden utilizar unos modelos más complejos, pero es preferible siempre integrar unos términos de incertidumbre a reconstruir en paralelo con el control, a través de las medias disponibles.

2- Definición de las restricciones

40 Se definen dos tipos de restricciones: las restricciones sobre los actuadores del motor y del embrague, indicadas mediante C_k^U , y las restricciones de confort, indicadas por C_k^G .

45 Las restricciones sobre los actuadores C_k^U permiten respetar los límites de funcionamiento del motor y del embrague. Por ejemplo, no es necesario que el embrague transmita más que x Nm del par durante el arranque, o no es necesario solicitar al motor un par adicional que no sea capaz de producir a un cierto régimen. Estas restricciones sobre los actuadores son típicamente unas limitaciones sobre los máximos y mínimos de los pares de los actuadores y de sus derivadas:

$$T_e \in [T_e^{\min}, T_e^{\max}(\omega_e)]$$

50

$$T_c \in [T_c^{\min}, T_c^{\min}(\omega_e)]$$

$$\dot{T}_e \in [\dot{T}_e^{\min}, \dot{T}_e^{\min}(\omega_e)]$$

$$5 \quad \dot{T}_c \in [\dot{T}_c^{\min}, \dot{T}_c^{\min}(\omega_e)]$$

Las restricciones de confort C_k^G deben asegurar en primer lugar que no hay oscilaciones en el acoplamiento, que tiene lugar en el instante t_f , condición asegurada por la igualdad de las velocidades y de las aceleraciones en el acoplamiento, es decir en el instante t_f :

$$10 \quad \omega_e(t_f) = \omega_c(t_f)$$

$$\dot{\omega}_e(t_f) = \dot{\omega}_c(t_f)$$

15 Esta condición de estabilidad se puede asegurar mediante unas restricciones sobre las velocidades de deslizamiento entre el motor y el árbol primario.

$$\omega_{sl}(t_f) = 0$$

$$20 \quad \dot{\omega}_{sl}(t_f) \cong 0$$

En la que ω_{sl} es la velocidad de deslizamiento entre el motor y el árbol primario. El mantenimiento de estas restricciones durante un tiempo suficiente permite igualmente asegurar la estabilidad en el resto de la transmisión (igualdad de las velocidades y de las aceleraciones entre árbol primario y ruedas).

25 3- Definición de la trayectoria de referencia para la velocidad de deslizamiento

Para respetar unas restricciones, se define una trayectoria de referencia de la velocidad de deslizamiento, definiendo para cada etapa de control k , un valor de consigna para esta velocidad de deslizamiento. Estas consignas son tales que las restricciones de confort se respetan durante y al final de la fase de acoplamiento del embrague.

Para hacer esto, se definen unas consignas para la velocidad de deslizamiento, haciéndolo de manera que se anula después del tiempo t_f . Se define en un primer tiempo un vector de datos exógenos:

$$35 \quad v \stackrel{\Delta}{=} \begin{pmatrix} \hat{\delta} \\ N_f^* \\ X_{pedal} \end{pmatrix} \in R^2 \times R \times R \quad (\stackrel{\Delta}{=} \text{significa "por definición"})$$

en la que $\hat{\delta} \stackrel{\Delta}{=} (\hat{\delta}_e, \hat{\delta}_c)$ son las salidas de los estimadores, N_f^* es la duración de la fase de cierre del embrague (que depende de la duración del arranque) en número de etapas de muestreo (por lo tanto $N_f^* = t_f / \tau_s$, donde τ_s es el periodo de muestreo), X_{pedal} es la posición del pedal del acelerador.

40 El criterio a minimizar se puede escribir entonces bajo la forma paramétrica equivalente:

$$\min_{U_k \in C_k^U} J_v(U_k, X_k, r_k, \dots)$$

45 N_f^* es un parámetro a optimizar para respetar las restricciones sobre los actuadores. Este tiempo está ligado a una trayectoria de la velocidad de deslizamiento ω_{sl} de la manera detallada a continuación.

Se asocian unas trayectorias (conjunto de consignas para cada etapa de control k) ω_{sl}^{ref} de la velocidad de deslizamiento a la posición del pedal del acelerador. Esta asociación permite tener una interactividad directa (transparencia) con los deseos del conductor (durante el arranque). La presión sobre el pedal del acelerador se traduce en un tiempo de acoplamiento del embrague t_f , y ese tiempo se utiliza para definir una consigna ω_{sl}^{ref} de velocidad de deslizamiento que permita asegurar la condición de estabilidad de la transmisión:

$$X_{pedal} \mapsto t_f = (X_{pedal}) \mapsto \omega_{sl}^{ref} = h(t, t_f)$$

Así, de acuerdo con la invención, la expresión de la trayectoria de referencia en el instante k , a lo largo del horizonte de predicción N es la siguiente:

5

$$\forall i \in \{1, \dots, N_p - 1\}$$

$$\omega_{sl}^{ref}(k+i) = \frac{1-i/N_f^*}{(1+\lambda \cdot i/N_f^*)^2} \omega_{sl}^k$$

10 En el instante $i = N_f^*$, la velocidad de deslizamiento será nula respetando también la primera restricción sobre la estabilidad de la transmisión. Se elige el parámetro λ suficientemente grande para que el acoplamiento tenga lugar con una derivada de la velocidad de deslizamiento muy próxima a cero. Se respeta así igualmente la segunda restricción sobre la velocidad de deslizamiento. En la práctica, es suficiente $\lambda=2$.

15 Mientras que la velocidad de deslizamiento siga la trayectoria indicada anteriormente, el régimen motor debe estar regulado con una consigna ω_e^{ref} que debe ser la más baja posible, para limitar el consumo, pero garantizar al mismo tiempo que el motor pueda producir el par solicitado por el conductor, resultante de la cartografía del par del pedal (función del par del pedal y de la posición del pedal acelerador), y limitado por el par máximo disponible a un régimen motor dado. Esta trayectoria de referencia se puede expresar como sigue:

20

$$\omega_e^{ref} = \max\{\omega_e^0, T^{-1}(T_e^d(X_{Pedal}, \omega_e))\}$$

en la que:

ω_e^0 es una consigna constante de ralentí;

25 T es el par máximo en función del régimen ω_e

T_e^d es un par motor solicitado por el conductor a través de la cartografía del par del pedal.

30 La ecuación anterior indica simplemente que el régimen motor debe estar regulado a ω_e^0 en el caso de una solicitud de par reducida, es decir de un par realizable por el motor en el régimen ω_e^0 . Por el contrario, cuando la solicitud de par es tal que no se puede realizar en el régimen ω_e^0 , la consigna ω_e^{ref} debe aumentarse hasta un nivel compatible con la solicitud.

35 4- Cálculo de las trayectorias de controles óptimos mediante el control CMPC

Se calcula un conjunto de trayectorias de control de la velocidad de deslizamiento por medio de una ley de control predictiva mediante un modelo con restricciones, denominado comando CMPC.

40 Se define un criterio de optimización cuadrático $J(\cdot)$ que depende del estado del grupo motor propulsor X_k , de los controles U_k , de las consignas r_k , de las restricciones sobre los actuadores C_k^U y de las restricciones del confort de conducción C_k^G :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min J(U_k, X_k, r_k, \dots) \\ \text{BAJO LAS RESTRICCIONES} \\ U_k \in C_k^U \\ g(X_k, U_k, \dots) \in C_k^G \end{array} \right.$$

45 El objetivo del sistema de control de acuerdo con la invención es regular la velocidad de deslizamiento ω_{sl} y el régimen motor ω_e , respectivamente, en las dos consignas ω_{sl}^{ref} y ω_e^{ref} definidas anteriormente. Este objetivo se puede formular bajo una forma más gráfica, utilizando la definición inicial del criterio paramétrico asociado al confort de conducción:

50

$$J_{v(k)}(U(k), \omega(k)) = \sum_{i=1}^N \left\| \begin{array}{l} \omega_{sl}(k+i) - \omega_{sl}^{ref}(k+i) \\ \omega_e(k+i) - \omega_e^{ref}(k+i) \end{array} \right\|_Q^2$$

en la que:

$$U(k) = [u^T(k), \dots, u^T(k+N-1)]^T \in C^U(k) \subset \mathbb{R}^{2N}$$

5 y N es el horizonte de predicción.

Las predicciones $\omega_{sl}(k + \cdot)$ y $\omega_e(k + \cdot)$ se basan en el estado inicial $\omega(k)$, la secuencia de los controles futuros U y el vector de datos exógenos v . Esta dinámica de predicción se obtiene a partir del modelo de control

$$J_e \dot{\omega}_e = T_e^{SP} - T_c^{SP} + \delta(\cdot)$$

$$[J_c + J_{eq}(i_g, i_d)] \dot{\omega}_c = \text{signo}(\omega_{sl}^{ec}) T_c^{SP} - \delta_c(\cdot)$$

15 haciendo aparecer la velocidad de deslizamiento y el régimen motor como se indica a continuación:

$$\dot{\omega}_{sl}(N_f^*, X_{Pedal}) = J_e^{-1}(u_1 - u_2 + \hat{\delta}_e) - J_{cw}^{-1}(i_g, i_d)^{-1} [\text{signo}(\omega_{sl}) u_2 - \hat{\delta}_c]$$

$$\dot{\omega}_e = J_e^{-1}(u_1 - u_2 + \hat{\delta}_e)$$

20 en la que $u_1 = T_e^{SP}$ y $u_2 = T_c^{SP}$

Escribiendo la predicción sobre un horizonte N_p de una manera compacta, se tiene:

$$25 A_p(J_e, J_{cw}(i_g, i_d)) \cdot U = S_p(\omega(k+i), \hat{\delta}(k+i), N_f^*, X_{Pedal})$$

con $i \in \{1, \dots, N_p\}$, $A_p \in \mathbb{R}^{2N_p \times 2N_p}$, $S_p \in \mathbb{R}^{2N_p \times 1}$

Este modelo de predicción se afina en el control, puesto que ω_{sl} no cambia de signo a lo largo de una predicción (y, más generalmente, a lo largo de todo el arranque).

30 El criterio cuadrático no limitativo introducido antes se puede escribir entonces

$$J_{v(k)}(U, \dots) = U^T \cdot H(J_e, J_{cw}(i_g, i_d)) \cdot U + 2[W(\hat{\delta}, N_f^*, X_{Pedal}, \omega^k)] \cdot U$$

35 con

$$H = A_p^T A_p \in \mathbb{R}^{2N_p \times 2N_p}, \quad W = S_p^T A_p \in \mathbb{R}^{1 \times 2N_p}$$

40 Las matrices A_p y S_p se pueden incrementar para tener en cuenta otras especificaciones para el sistema a controlar. Se puede, por ejemplo, incluir una restricción de igualdad sobre el par motor que se desea tener en el instante t_f de cierre del embrague, para imponer que sea igual al par del pedal solicitado por el conductor:

$$T_e(t_f) = T_e^d(t_f).$$

45 Para cada elección de la longitud del horizonte de predicción N , el control óptimo que minimiza el criterio cuadrático no limitativo es:

$$\left\{ \hat{U}_N \stackrel{\Delta}{=} -H^{-1} \cdot W(N, \hat{\delta}, X_{Pedal}, \omega_{sl}^k, \omega_e^k) \right\}_{N \in \{N_f, \dots\}}$$

50 5- Determinación de la trayectoria de control óptima respetando todas las restricciones

Se selecciona de entre el conjunto de las trayectorias de control obtenidas en la etapa anterior, aquella que respeta las restricciones para los actuadores, por medio de una técnica de búsqueda dicotómica.

55 Para diferentes valores de N , se calcula el control óptimo partiendo de un valor nominal $N_f = t_f(X_{Pedal})/\tau_s$ (τ_s es el período de muestreo del control) y utilizando una búsqueda dicotómica para encontrar una trayectoria de la velocidad de deslizamiento que respete las restricciones de saturación de los controles y la restricción de

conservación del signo de ω_{sl} : $signo(\omega_{sl}(k)) \cdot \omega_{sl}(k) \geq 0$. Esta restricción de conservación del signo permite conservar un modelo de predicción del control afinado, y por tanto obtener una solución analítica.

5 La búsqueda dicotómica es posible a la vista de que los valores elevados de N permiten tener menos velocidad, con una solicitud de par más reducida. Esta parametrización permite a ω_{sl} tender hacia cero sin cambio de signo.

La figura 4 ilustra el principio de la búsqueda dicotómica de las predicciones de la velocidad de deslizamiento respetando las restricciones. La referencia de velocidad de deslizamiento es la que se ha definido antes:

10
$$\forall i \in \{1, \dots, N_p - 1\}$$

$$\omega_{sl}^{ref}(k+i) = \frac{1 - i/N_f^*}{(1 + \lambda \cdot i/N_f^*)^2} \omega_{sl}^{ref}(k)$$

15 En la figura 4, se supone que la duración de la fase de deslizamiento del embrague, solicitada por el pedal del embrague es de 1 s, lo que da, con un periodo de muestreo de 50 ms, un valor de N_f^* igual a 21 muestras (Muestr) denominada N_{max} en la figura 4. Se efectúa la búsqueda dicotómica de un horizonte de predicción de deslizamiento fijo, de 5 muestras en este ejemplo. En este horizonte, se calcula un conjunto de trayectorias parametrizadas para un entero NN que se ha hecho variar entre un valor mínimo, N que identifica la trayectoria que acabaría por dar un tiempo de acoplamiento igual a N_f^* y un valor máximo muy grande, que satisfaga el cumplimiento de todas las

20 restricciones. En este conjunto de trayectorias, se encuentra, mediante búsqueda dicotómica, aquella que corresponde al valor NN más pequeño en tanto que se respetan las restricciones.

De ese modo, definiendo una consigna sobre la velocidad de deslizamiento, en función del tiempo de acoplamiento N_f^* del embrague, el modelo de definición se afina en el control, puesto que ω_{sl}^{ref} no cambia de signo a lo largo de

25 una predicción (y, más generalmente, a lo largo de todo el arranque). Debido a este hecho, se puede transformar el criterio inicial

$$J_{v(k)}(U(k), \omega(k)) = \sum_{i=1}^N \left\| \begin{bmatrix} \omega_{sl}(k+i) - \omega_{sl}^{ref}(k+i) \\ \omega_e(k+i) - \omega_e^{ref}(k+i) \end{bmatrix} \right\|_Q^2$$

30 que es necesario resolver bajo restricciones, en un criterio equivalente

$$J_{v(k)}(U, \dots) = U^T \cdot H(J_e, J_{cw}(j_g, j_d)) \cdot U + 2[W(\hat{\delta}, N_f^*, X_{Pedal}, \omega^k)] \cdot U$$

que es función del parámetro N_f^* .

35 Una solución se obtiene de manera analítica (por lo tanto mediante un cálculo que no supone ningún problema en tiempo real):

$$\left\{ \hat{U}_N \stackrel{\Delta}{=} -H^{-1} \cdot W(N, \hat{\delta}, X_{Pedal}, \omega_{sl}^k, \omega_e^k) \right\}_{N \in \{N_f, \dots\}}$$

40 Es suficiente entonces hacer variar el parámetro N_f^* para buscar la solución con un N_f^* mínimo que haga reintroducir los controles U_n en el espacio de las restricciones (solución admisible con N_f^* mínimo). Si se efectúa esta búsqueda mediante dicotomía, el coste en términos de cálculo permanece limitado, y por lo tanto compatible con el tiempo real (las restricciones de confort se respetan gracias a la "forma" de la trayectoria de velocidad de

45 deslizamiento).

La invención permite de ese modo realizar un control en tiempo real mientras utiliza un control CMPC.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para controlar un embrague de automóvil en un sistema de transmisión robotizado, en el seno de un vehículo que incluye un motor unido a un árbol primario a través de dicho embrague, en el que se traduce una solicitud del conductor sobre el pedal del acelerador en términos de velocidad de deslizamiento ω_{sl} , definida por la diferencia entre un régimen del motor ω_e y un régimen del árbol primario ω_c .
caracterizado por que:

- se definen unas restricciones sobre los actuadores del motor y del embrague para respetar sus límites de funcionamiento;
- se definen unas restricciones de confortabilidad para garantizar un confort durante la fase de acoplamiento del embrague;
- para respetar dichas restricciones de confortabilidad, se define una trayectoria de referencia de dicha velocidad de deslizamiento, definiendo para cada etapa del control, un valor de consigna ω_{sl}^{ref} para dicha velocidad de deslizamiento en función de un tiempo N_f^* de acoplamiento del embrague;
- a partir de la expresión de dicha trayectoria de referencia, se define una expresión analítica que permite calcular en tiempo real un conjunto de trayectorias de control de dicha velocidad de deslizamiento, por medio de una ley de control predictiva mediante un modelo con restricciones, denominado control CMPC;
- se selecciona entre el conjunto de dichas trayectorias de control, aquella que respeta las restricciones sobre los actuadores por medio de una técnica de búsqueda dicotómica; y
- se controla dicho embrague por medio de dicha trayectoria de control seleccionada.

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que se definen dichas restricciones sobre dichos actuadores imponiendo unos valores mínimos y máximos al par motor y al par de embrague, así como unos valores mínimos y máximos a las derivadas de estos pares.

3. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, en el que se definen dichas restricciones de la confortabilidad imponiendo que la velocidad de deslizamiento y su derivada sean nulas durante la fase de acoplamiento del embrague.

4. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, en el que la consigna ω_{sl}^{ref} se define para cada etapa de control k por:

$$\forall i \in \{1, \dots, N_p - 1\}$$

$$\omega_{sl}^{ref}(k+1) = \frac{1 - i/N_f^*}{(1 + \lambda \cdot i/N_f^*)^2} \omega_{sl}^k$$

con:

- N_p es un entero que define un horizonte de predicción;
- λ es un parámetro a calibrar.

5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, en el que el parámetro λ se elige de manera que el acoplamiento tenga lugar con una derivada de la velocidad de deslizamiento casi nula.

6. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, en el que se genera una segunda consigna ω_{sl}^{ref} para el régimen motor definida por:

$$\omega_{sl}^{ref} = \max\{\omega_e^0, T^{-1}(T_e^d(X_{pedal}, \omega_e))\}$$

en la que:

- ω_e^0 es una consigna constante de ralentí;
- T es un par máximo en función del régimen ω_e
- T_e^d es un par motor solicitado por el conductor.
- X_{pedal} es una posición del pedal del acelerador.

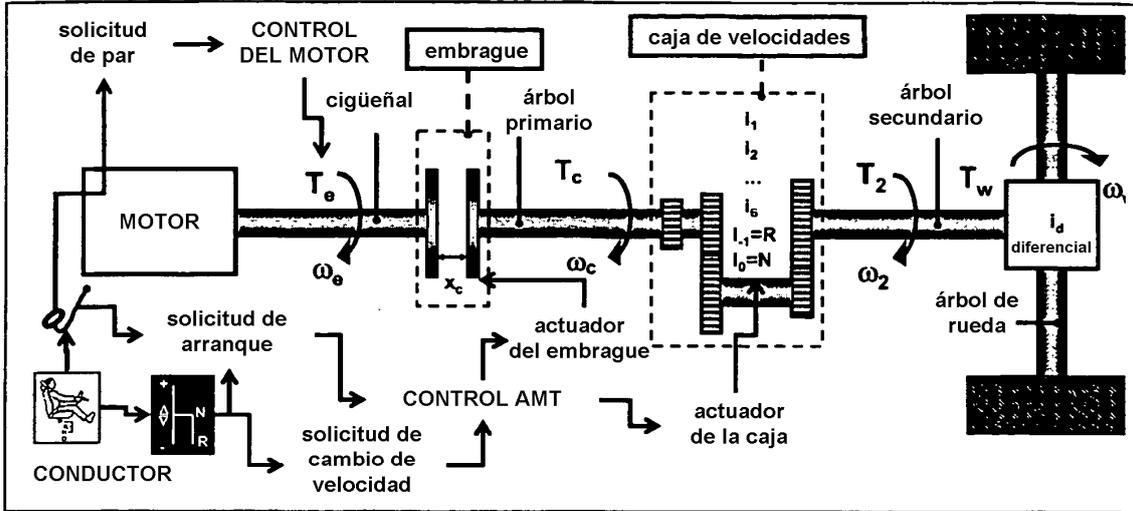


Fig. 1

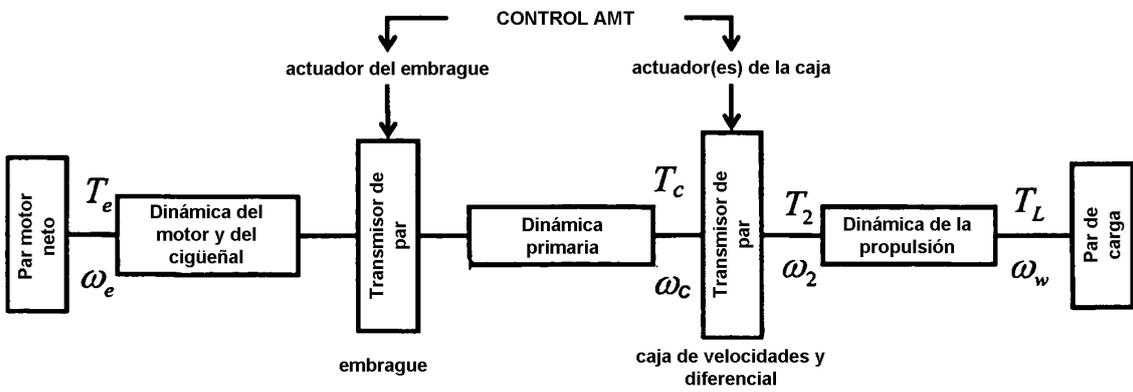


Fig. 2

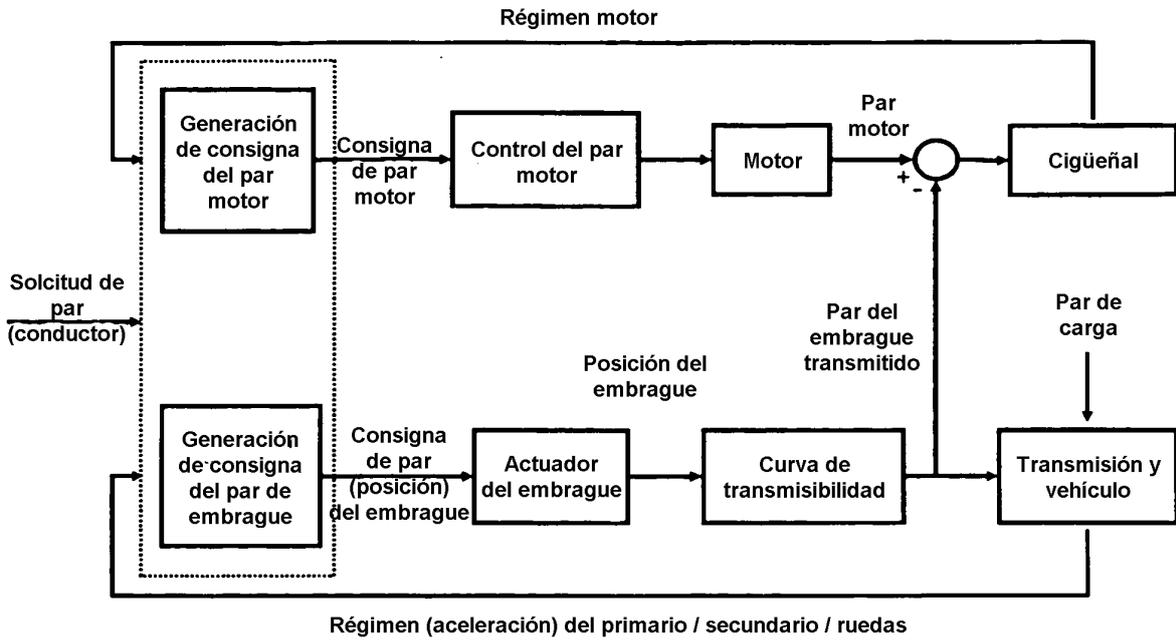


Fig. 3

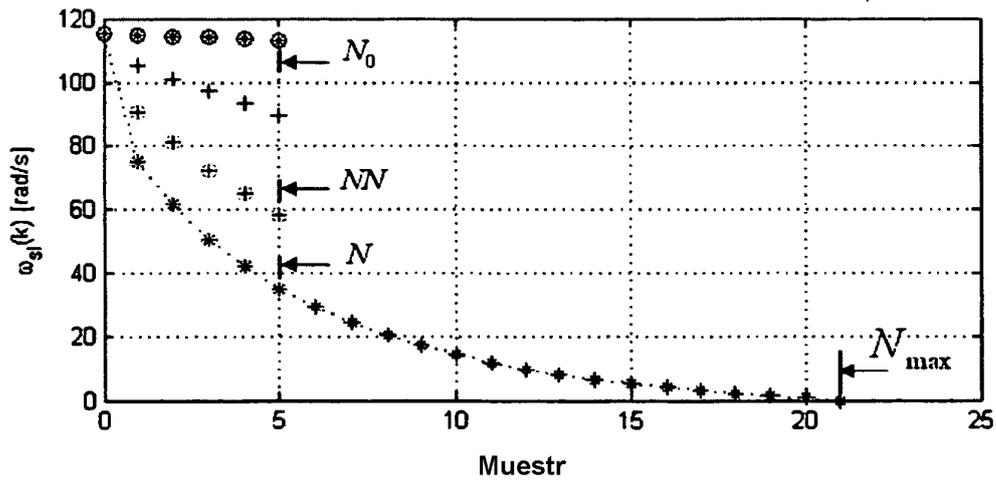


Fig. 4