

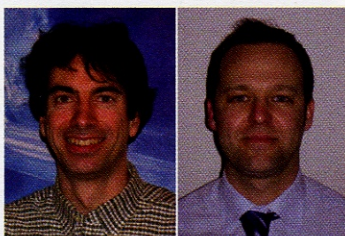
CIRCUITS INTÉGRÉS

Les moteurs pas à pas simplifient les systèmes de climatisation

Les actionneurs de volets de recyclage d'air à moteur pas à pas bipolaire offrent des avantages décisifs par rapport aux actionneurs utilisant d'autres types de moteur. Certaines technologies spécifiques à ce type de moteur permettent d'améliorer les performances, tout en réduisant le coût global.

Les systèmes HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning, ou systèmes de climatisation) automobiles constituent un marché mature, mais continuent de faire l'objet d'innovations majeures. Les économies de carburant, le confort et la sécurité sont les principaux moteurs de cette évolution. Dans les systèmes de climatisation simples, un apport continu d'air frais est « conditionné » et introduit dans l'habitacle. Cet air ressort de la voiture par des ouvertures de ventilation. Typiquement, le conducteur peut choisir, au moyen d'une commande, si l'arrivée d'air frais doit être bloquée (recyclage) ou non (air frais ouvert). En mode recyclage, les systèmes de climatisation haut de gamme supervisent plusieurs paramètres de l'air présent dans l'habitacle, recyclent cet air via le climatiseur et limitent au maximum l'admission d'air frais, tout en maintenant les paramètres spécifiés par le conducteur ou les spécifications système.

En théorie, un tel recyclage automatique peut réduire la consommation de carburant d'un système de climatisation de 35 %. Selon les conditions climatiques et l'utilisation, un système de climatisation peut consommer jusqu'à 3 litres aux 100 kilomètres. Par conséquent, les grosses voitures équipées d'un système de climatisation bas de gamme bénéficieront particulièrement de l'ajout d'une fonction de recyclage automatique. Cependant, les voitures petites ou moyennes dotées de moteurs sophistiqués à faibles émissions de CO₂ tireront aussi parti d'un volet de recyclage d'air intelligent, car dans ces véhicules, la contribution du système de climatisation à la consommation de carburant est relativement plus importante. Des études montrent que le pourcentage de voitures équipées d'un système de climatisation semi-automatique ou 100 % automatique augmente chaque année. En même temps, l'introduction de réfrigérants CO₂ nécessite l'installation de



BART DE COCK ET STEVEN DE PRETER (ON SEMICONDUCTOR)

Passé par Siemens, Melexis et AMIS, Bart De Cock est responsable Produits chez On Semiconductor Belgique, spécialisé en conception automobile. Steven De Preter est, lui, responsable des applications châssis/sécurité/habitacle au sein de la division Automobile d'On Semiconductor Belgique et travaille notamment sur les commandes de moteurs pas à pas et de Led pour les systèmes automobiles.

capteurs supplémentaires dans l'habitacle. Conséquence : les technologies de capteurs CO₂ et IAQ (Interior Air Quality, ou qualité d'air dans l'habitacle) déjà disponibles seront de plus en plus utilisées dans les petites voitures et dans celles équipées de systèmes de climatisation bas de gamme. Mais, si le sujet du capteur de la fonction de recyclage est plus ou moins traité, il reste encore à faire en matière de motorisation de volet.

Système de recyclage d'air

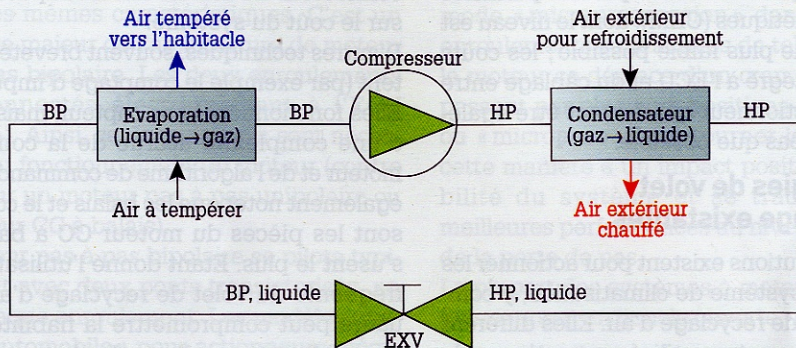
Les systèmes de climatisation sont l'une des premières sources de consommation des voitures modernes (figure 1). Le compresseur, en particulier, consomme plusieurs kilowatts lorsqu'il fonctionne. L'une des manières de réduire la consommation des systèmes de climatisation est d'améliorer le rendement de ce compresseur. Cependant, une meilleure méthode pour économiser l'énergie consiste à réduire son « temps d'activité ». Pour ce faire, nous devons regarder ce qui se passe en aval, au niveau du réfrigérant comprimé et vérifier ce qui se passe réellement pendant le fonctionnement du compresseur.

Le rendement d'un système de climatisation dépend en grande partie de la quantité de réfrigérant fournie à l'évaporateur. Remplacer la valve mécanique de détente par une valve électromécanique commandée par un moteur pas à pas linéaire pour un meilleur contrôle de l'écoulement du réfrigérant a déjà été proposé. Alternativement, la température moyenne du flux d'air qui passe dans l'évapo-

rateur peut être réduite (si l'évaporateur est exposé à un flux d'air plus frais, un plus faible débit de réfrigérant est nécessaire, ce qui signifie moins d'activité pour le compresseur). Une température plus basse de l'air passant dans l'évaporateur peut être obtenue en ayant recours à de l'air venant de l'habitacle, qui a déjà été refroidi, plutôt qu'à de l'air plus chaud venant de l'extérieur. Le mélange précis d'air frais et d'air de l'habitacle peut être assuré par la valve de recyclage automatique. Cette fonction de recyclage joue un rôle clé dans le rendement énergétique global du système de climatisation. Et un soin tout particulier est nécessaire pour assurer son fonctionnement optimum pendant toute la durée de vie de la voiture. Regardons maintenant les différents éléments du système, les paramètres et les contraintes importantes pour le recyclage.

Le système adaptatif de recyclage doit en permanence superviser la qualité de l'air dans l'habitacle. Un manque d'air frais peut provoquer de la gêne, des maux de tête ou de la somnolence et, dans la mesure où ceci n'est pas immédiatement identifié par le conducteur, peut être dangereux. L'un des meilleurs indicateurs de consommation d'air frais par des êtres humains est la diminution du taux d'O₂ et l'augmentation des taux de CO₂ et d'H₂O. De nos jours, la technologie des capteurs CO₂ est fournie par plusieurs fabricants de rang 1 et de rang 2, tandis que les capteurs O₂ ou H₂O peuvent aussi détecter l'évolution de la composition de l'air dans l'habitacle. Ces capteurs de qualité d'air intérieur sont diffé-

Figure 1.- Système de climatisation



L'une des manières de réduire la consommation des systèmes de climatisation est d'améliorer le rendement du compresseur.

rents des capteurs de qualité d'air extérieur qui sont spécialisés dans la détection de l'air pollué et visent à l'empêcher d'entrer dans l'habitacle. Un bon système adaptatif de recyclage d'air est donc une commande en boucle fermée, basée sur la qualité de l'air intérieur. Parallèlement à la réduction de la quantité d'air frais admis, on peut observer une légère augmentation de l'humidité. Ceci, néanmoins, dépend en grande partie des conditions intérieures et extérieures, des paramètres du système de climatisation, du volume de l'habitacle et du nombre de passagers. Dans tous les cas, dans la mesure où l'air intérieur est recyclé en permanence sans être asséché, celui-ci reste en permanence sec. A partir de là, il est peu probable que de la buée se forme à l'intérieur du pare-brise (par conséquent l'installation d'un capteur de buée additionnel n'est pas nécessaire).

L'eau condensée issue de l'évaporateur a besoin d'un drain performant, et doit être isolée de l'élément chauffant. Ceci empêche l'eau de s'évaporer de nouveau (ce qui augmenterait l'humidité dans l'habitacle). En outre, pour éviter le recyclage des germes et des mauvaises odeurs issues de l'évaporateur, un système de stérilisation actif (par exemple à lumière UV) est nécessaire au niveau de l'évaporateur. Noter que ceci s'applique également aux systèmes de climatisation sans recyclage automatique.

Aujourd'hui, l'interface utilisateur du volet de recyclage « On/Off » (tout ou rien) est typiquement un bouton-poussoir. A chaque pression sur le bouton, le volet de recyclage est ouvert ou fermé, tandis qu'une Led indique l'état du volet. En ajoutant une deuxième Led, on peut activer et indiquer un troisième état, appelé « recyclage automatique ». Cette deuxième Led ne nécessite qu'un espace minimum sur le tableau de bord et aucune autre modification matérielle.

Le boîtier de commande électronique (ECU) actionne la fonction de recyclage en fonction

des mesures du capteur et d'une valeur programmée. L'ECU régule l'air frais en boucle fermée et commande l'actionneur du volet de recyclage afin de maintenir le niveau de CO_2 nécessaire (figure 2). La fréquence de manœuvre du volet de recyclage dépend du nombre maximum d'occupants, du volume minimum d'air à l'intérieur de la voiture, et de la déviation maximum permise du niveau de CO_2 . On peut ainsi calculer facilement que cinq personnes dans un intérieur de 3m^3 augmentent la concentration en CO_2 de 100ppm toutes les 30 secondes.

La boucle d'asservissement du recyclage d'air nécessite principalement des interventions lentes pour compenser les variations de pression et de débit d'air, au niveau de « l'admission d'air frais ». Ceci se produit fréquemment quand la vitesse du véhicule varie, par exemple en approchant d'une agglomération. Le flux d'air au niveau de l'admission d'air frais change également quand la pression côté aspiration du ventilateur varie avec la vitesse du ventilateur. Pour une commande optimale, un ventilateur (silencieux) induit un courant d'air variable à travers l'évaporateur pour compenser les fluctuations du soleil (par exemple sur une route sinueuse ou en cas d'ensoleillement intermittent à cause de bâti-

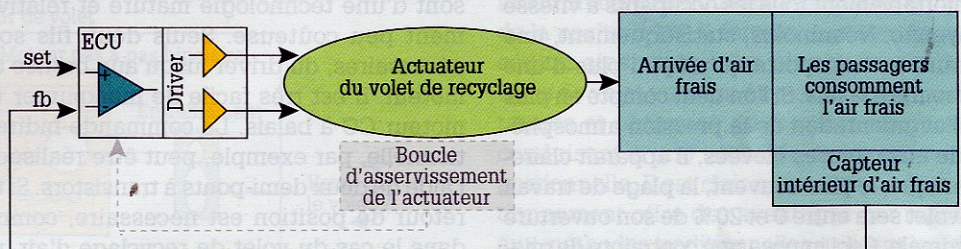
ments, d'arbres ou autres). Par conséquent, la quantité d'air provenant de l'admission d'air frais doit être adaptée à la production constante de CO_2 des occupants. L'ajustement permanent mais lent de la position du volet de recyclage peut facilement se faire pendant le temps d'exécution des cycles logiciels existants. Cependant, l'algorithme lui-même requiert une attention particulière, compte tenu de l'importance au niveau sécurité de fournir au conducteur la bonne quantité d'air frais en toutes circonstances.

L'actionneur de volet de recyclage d'air est une petite valve motorisée, commandée par un « driver » (circuit de pilotage) à l'intérieur de l'ECU. La fonction de ce volet est de contrôler la quantité d'air extérieur entrant dans l'habitacle. Doser cette quantité est relativement simple et se fait au moyen d'un amortisseur ou d'une vanne papillon. Pour assurer la stabilité des algorithmes de contrôle, la position du volet doit être connue en permanence, par conséquent un retour de l'information de position est nécessaire. Dans la mesure où le système de contrôle ajuste fréquemment la position de l'actionneur, un fonctionnement sans contact du moteur et un retour d'information de position sans encodeur s'avère souhaitable.

Cahier des charges de l'actionneur du volet de recyclage

L'actionneur de volet est situé dans le système de climatisation qui est déjà relativement encombrant à cause des conduits d'air. Comme dans la plupart des systèmes automobiles, le poids et la taille de l'actionneur constituent des paramètres importants. Typiquement, l'actionneur se compose d'un boîtier en plastique, d'un moteur électrique équipé d'un connecteur et d'un engrenage réducteur et, parfois, d'un capteur de position. Compte tenu des différents matériaux utilisés, il existe de nombreux facteurs influençant le poids et l'encombrement des actionneurs. Au cours du temps, les fabricants sont parvenus à optimiser le poids et les dimensions de l'actionneur en jouant sur le couple moteur et le rapport

Figure 2.- Système de recyclage automatique



Le boîtier de commande électronique régule l'air frais en boucle fermée et commande l'actionneur du volet de recyclage afin de maintenir le niveau de CO_2 nécessaire.

de réduction. Malgré cela, il existe encore des possibilités d'amélioration, notamment en éliminant les capteurs de position et en introduisant de nouvelles technologies de moteur. Le faible bruit acoustique est une autre considération importante, car l'actionneur fonctionne dans le flux d'air s'écoulant directement dans l'habitacle. En outre, le volet est très fréquemment actionné (de nouvelles consignes sont générées en permanence) et le bruit qu'il produit ne doit pas augmenter de manière significative au cours du temps. La fréquence d'ajustement de position dépend de la période d'itération du logiciel d'application qui peut être, par exemple, de quelques secondes. Entre deux mises à jour de position, l'actionneur doit conserver sa dernière position, malgré d'éventuelles contraintes externes s'appliquant sur le volet (par exemple si la voiture roule sur une bosse ou si le vent accroît la pression de l'air extérieur sur le volet). Cela signifie que l'actionneur doit pouvoir rester en position (couple de maintien) sous l'influence de forces externes, idéalement avec une consommation de courant minimum. Il faut également qu'il soit assez

tivement limitée, sans dégradation du moteur, des capteurs ou du réducteur. D'autres facteurs sont à prendre en compte : les parasites électromagnétiques (CEM), dont le niveau est tenu d'être le plus faible possible ; les coûts du driver intégré à l'ECU et du câblage entre l'ECU et l'actionneur qui doivent être également aussi bas que possible.

Technologies de volet de recyclage existantes

Plusieurs solutions existent pour actionner les volets d'un système de climatisation, y compris le volet de recyclage d'air. Elles diffèrent par le type de moteur utilisé pour actionner le volet et au niveau des détails de la commande du moteur.

Un moteur CC (à courant continu) à balais est un moteur électrique à commutation interne, qui tourne quand on applique une tension à ses deux bornes. Il n'a pas besoin de contrôleur pour commuter le courant dans les enroulements de moteur. La commutation des enroulements d'un moteur CC à balais se fait mécaniquement. Une douille de cuivre segmentée, appelée collecteur, est installée sur

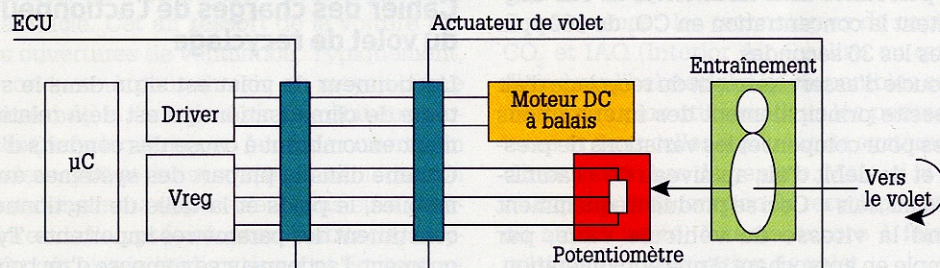
exemple un potentiomètre, figure 3), son câblage jusqu'à l'ECU ainsi que la taille du connecteur de liaison ont un impact majeur sur le coût du système.

D'autres techniques, souvent brevetées, existent (par exemple le comptage d'impulsions). Elles fonctionnent sans capteur, mais au prix d'une complexité accrue de la commande moteur et de l'algorithme de commande. Il faut également noter que les balais et le collecteur sont les pièces du moteur CC à balais qui s'usent le plus. Etant donné l'utilisation très fréquente du volet de recyclage d'air, cette usure peut compromettre la fiabilité mécanique à long terme d'un volet de recyclage. Le principe de ce type de moteur sous-entend aussi une commutation rapide en permanence de courants élevés dans une charge très inductive, ce qui peut provoquer des étincelles au niveau du collecteur. Les arcs électriques générés émettent alors un rayonnement électromagnétique sous forme de champ électrique dans une large bande du spectre. Par conséquent, une attention spéciale doit être portée au respect du cahier des charges CEM (compatibilité électromagnétique).

Un moteur pas à pas est un moteur électrique synchrone, dont chaque révolution est divisée en un certain nombre de « pas ». Ce type de moteur n'utilise pas de balais et n'est donc pas sujet à l'usure mécanique liée à leur commutation. Il dispose d'un nombre fixe de « phases », égal au nombre d'électroaimants « crantés » disposés autour d'une pièce en fer en forme de pignon. L'électroaimant est activé par un circuit externe commandant la tension ou le courant dans l'enroulement. En appliquant une certaine séquence d'activation des électroaimants, le moteur peut tourner d'un angle précis (égal à un certain nombre de pas).

Un moteur pas à pas unipolaire possède deux enroulements par phase, électriquement reliés à l'ECU et, comme avec la solution à moteur CC à balais (avec capteur de retour de position), il nécessite typiquement cinq fils (figure 4). Le choix d'utiliser des moteurs pas à pas unipolaires pour commander des valves motorisées est surtout dicté par la disponibilité de circuits de commande peu coûteux (exemple : quadruple circuit driver basse tension). Tout comme les moteurs CC à balais, souvent présents dans les systèmes de climatisation automatiques (ou semi-automatiques) que l'on trouve dans les voitures bas ou milieu de gamme. Un inconvénient de l'approche unipolaire est que seule la moitié des enroulements est alimentée à tout moment (fondamentalement un moteur pas à pas unipolaire porte deux fois plus de cuivre qu'il n'en faut pour faire tourner le moteur). Un moteur pas à pas bipolaire dispose, quant à lui, d'un seul enroulement par phase. Par rapport à un moteur unipolaire, ceci constitue

Figure 3.- Actuateur de moteur à balais



Les moteurs CC à balais sont d'une technologie mature, relativement peu coûteuse et très faciles à commander.

robuste pour pouvoir de temps en temps surmonter un point dur. In fine, le volet de recyclage fonctionne le plus souvent proche de sa position « fermée ».

Supposons un système climatisation conçu pour une voiture pouvant recevoir cinq occupants. L'admission d'air est alors conçue pour fournir assez d'air frais pour faire voyager confortablement tous les occupants à vitesse moyenne. Néanmoins, statistiquement, une voiture ne transporte qu'un peu plus d'une personne à la fois. Si l'on tient compte en plus de l'augmentation de la pression atmosphérique aux vitesses élevées, il apparaît clairement que, le plus souvent, la plage de travail du volet sera entre 0 et 20 % de son ouverture maximale. Ceci impose une contrainte de qualité sur la stabilité mécanique et électrique de l'actionneur : il doit être assez stable pour pouvoir se mouvoir de manière fiable pendant toute sa vie dans une plage de positions rela-

l'axe du moteur CC à balais. Quand le moteur tourne, les balais en charbon glissent sur le collecteur, assurant le contact avec les différents segments. Ces derniers sont reliés aux différents enroulements du rotor ; un champ magnétique dynamique est donc généré au sein du moteur quand on applique une tension sur ses balais. Les moteurs CC à balais sont d'une technologie mature et relativement peu coûteuse. Seuls deux fils sont nécessaires, du driver jusqu'aux bornes du moteur. Il est très facile de manœuvrer un moteur CC à balais. La commande bidirectionnelle, par exemple, peut être réalisée à l'aide de deux demi-ponts à transistors. Si un retour de position est nécessaire, comme dans le cas du volet de recyclage d'air, un capteur de position doit être ajouté. Un certain nombre de capteurs existent, dont les plus communs sont des capteurs à effet Hall ou des potentiomètres. Ce capteur (par

un avantage d'encombrement et de poids car la quantité de cuivre des enroulements est en gros la moitié de celle d'un moteur bipolaire ayant les mêmes caractéristiques. C'est un avantage majeur de l'architecture de moteur pas à pas bipolaire. Les deux enroulements sont connectés électriquement à l'ECU (figure 5). Ainsi, seuls quatre fils sont nécessaires au fonctionnement du moteur (contre cinq pour un moteur pas à pas unipolaire ou un moteur CC à balais).

Un moteur pas à pas bipolaire se pilote typiquement avec deux ponts transistorisés, un pour chaque enroulement. Les modèles qualifiés « automobile » pour actionneurs mécaniques de volets de recyclage existent depuis de nombreuses années dans les systèmes de climatisation haut de gamme. Ils peuvent désormais être utilisés pour des valves de recyclage d'air économiques (figure 5). Ici le driver du moteur pas à pas est situé à l'intérieur de l'ECU. Il est relié par seulement quatre fils à l'actionneur sans capteur.

Commande de moteur pas à pas

Des technologies avancées de pilotage de moteur pas à pas ont été développées pour optimiser le fonctionnement de l'actionneur en termes de niveau sonore, de parasites électriques et de fiabilité à long terme. Par rapport aux architectures traditionnelles, ces nouvelles technologies d'actionneurs à moteur pas à pas bipolaire offrent un bon compromis ; à savoir des avantages techniques (c'est-à-dire caractéristiques et qualité optimum) sans pénaliser le coût global.

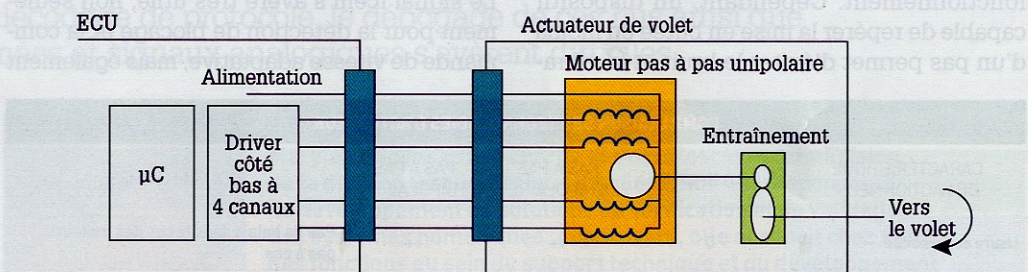
Le mouvement de base d'un moteur pas à pas est réalisé en commutant les enroulements, qui activent les électroaimants de manière alternative. On appelle cela un « pas » car le rotor s'aligne avec le stator « dent par dent » ou « pas à pas ». C'est un mode de fonctionnement saccadé qui peut faire vibrer le système et contribuer au niveau sonore en cours de fonctionnement. Un autre effet possible est la perte de pas (c'est-à-dire que des pas sont « sautés »). Sans une bonne conception, cela signifie que le système ne connaît plus

exactement la position de l'actionneur. Ces effets peuvent être évités ou au moins atténués en actionnant le moteur pas à pas en mode « microprogression » dans lequel les enroulements sont activés de telle sorte que le moteur se déplace d'un cran à l'autre, en passant par plusieurs positions secondaires ou « micropas ». Faire tourner le moteur de cette manière a un impact positif sur la stabilité du système et se traduit par de meilleures performances au niveau sonore et de la perte de pas.

La plupart des systèmes à moteur pas à pas fonctionnent en boucle ouverte. Ainsi, du fait

fcem. Un driver de moteur pas à pas exécutant un algorithme de détection de calage basé sur le signal fcem permet au système de détecter très exactement l'arrivée en butée du volet dans le canal d'admission d'air de climatisation. Typiquement, cette butée est atteinte volontairement lors d'un mouvement (par exemple quand le volet est actionné alors qu'il est presque fermé). Venir en butée peut également se produire du fait d'un mauvais fonctionnement ou à cause de petites tolérances mécaniques. Habituellement, plus de mille pas sont nécessaires pour passer d'un volet complètement ouvert à un volet com-

Figure 4.- Actuateur de moteur pas à pas unipolaire



Le choix d'utiliser des moteurs pas à pas unipolaires pour commander des valves motorisées est surtout dicté par la disponibilité de circuits de commande peu coûteux.

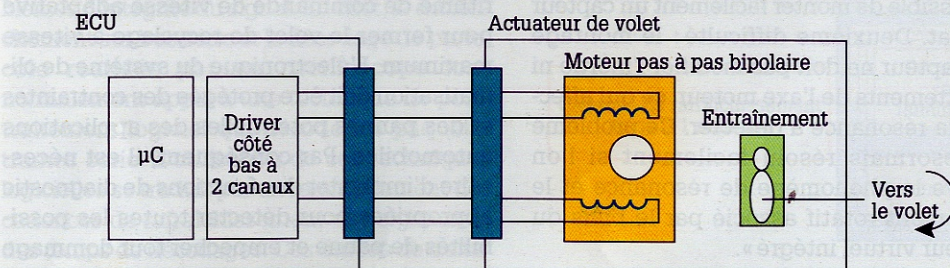
de l'absence de « feedback », le moteur pas à pas doit être surdimensionné pour éviter la perte de pas dans tous les cas (ces pertes étant notamment fonction de la charge du moteur). Le surdimensionnement peut être réduit grâce à une approche en boucle fermée, permettant de détecter la perte de pas sans utiliser de capteur. Les moteurs pas à pas intègrent par construction un « capteur virtuel » ; les modes de fonctionnement du moteur (rotation normale, état bloqué, etc.) peuvent ainsi être déduits en supervisant la force contre-électromotrice ou le signal fcem (bemf en anglais).

Les actionneurs de volet de climatisation peuvent aussi tirer parti de ce capteur virtuel

plètement fermé. En raison de la construction du réducteur, de la dilatation thermique des conduits d'air et des tolérances mécaniques autour du volet, la course totale d'un actionneur peut varier de plusieurs dizaines de pas. Maintenant, il faut tenir compte du fait que la quantité d'air passant est une fonction non linéaire de la position du volet. Par conséquent, lorsque le volet commande un petit flux d'air, l'incertitude sur la valeur du flux est d'autant plus grande. Aussi, pour contrôler précisément et de manière 100 % proportionnelle la quantité d'air traversant le conduit de climatisation, un algorithme adaptatif en boucle fermée est nécessaire. L'aspect boucle fermée (ou plutôt pseudo-boucle fermée) suppose d'amener délibérément l'actionneur en butée de temps en temps. La détection de butée permet alors l'enregistrement précis des nouvelles positions à partir de la position 100 % fermée du volet. En procédant ainsi, même les plus petites ouvertures de volet peuvent être exactement maintenues et obtenues de manière répétitive, conduisant à une véritable commande proportionnelle. Il est clair que ce mode de fonctionnement offre des avantages par rapport aux méthodes traditionnelles utilisant le positionnement absolu en boucle ouverte, basé sur le comptage des pas.

Etant donné que ces méthodes ne peuvent pas générer de position de référence, toute

Figure 5.- Actuateur de moteur pas à pas bipolaire



Un moteur pas à pas bipolaire se pilote typiquement avec deux ponts transistorisés, un pour chaque enroulement.

cause permanente de décalage de position (comme la perte de pas du fait d'une surcharge) doit être évitée, ce qui se traduit par un surdimensionnement, et, par conséquent, un système non optimal. D'autres méthodes (sans détection de blocage) sont relativement aveugles quand il s'agit de déterminer la position de butée. Ainsi, pour être sûr que le volet est bien amené en butée, on fait faire au moteur un grand nombre de pas au-delà de ce qu'il est théoriquement nécessaire pour l'y amener. Ce qui entraîne le blocage du moteur, avec le bruit et aussi l'usure mécanique qui en résulte. Pour garantir la fiabilité à long terme, un type spécial d'actionneur est nécessaire, capable de supporter les vibrations mécaniques inhérentes à ce mode de fonctionnement. Cependant, un dispositif capable de repérer la mise en butée en moins d'un pas permet d'éviter le bruit et la vibra-

grande vitesse grâce à des algorithmes de pilotage de moteur à vitesse adaptative. Les actionneurs à moteurs pas à pas peuvent ainsi rivaliser avec leurs homologues à moteurs CC à balais, en leur permettant de tourner aussi rapidement que l'autorisent la tension d'alimentation et la charge. Le moteur pas à pas tourne à sa vitesse maximum, en adaptant automatiquement sa rapidité aux caractéristiques de l'actionneur et du volet (c'est-à-dire à la charge). Pendant cette rotation à vitesse adaptative, la détection de blocage sans capteur est opérationnelle, garantissant un positionnement sans erreur. Ces algorithmes permettent d'atteindre des vitesses pouvant atteindre jusqu'à 1 000 pas par seconde.

Le signal *fcem* s'avère très utile, non seulement pour la détection de blocage et la commande de vitesse adaptative, mais également

polaire offrent des avantages, mais ont aussi chacun leurs points faibles. La technologie du moteur pas à pas bipolaire semble concilier le meilleur de deux mondes et reste compatible avec tous les besoins. C'est aux fabricants de rang 1 de systèmes de climatisation de bien pondérer ces différentes fonctions. Observation : le coût système des trois types d'actionneurs est comparable. Cependant, si l'on ne prend en compte que le coût du driver de moteur, on peut retenir une solution qui ne sera pas optimisée.

Les circuits intégrés de pilotage disponibles

Des circuits intégrés drivers de moteurs pas à pas bipolaires répondant aux impératifs décrits précédemment sont désormais disponibles. Ce circuit intégré se monte à l'intérieur de l'ECU et deux ponts en H pilotent les deux phases du moteur pas à pas bipolaire. Le microcontrôleur de l'ECU communique avec le circuit driver par l'intermédiaire d'une interface SPI et d'un jeu de signaux dédiés. Une table de correspondance de courant, intégrée au driver, applique le courant idéal aux enroulements. Le microcontrôleur doit seulement paramétrer une seule fois les registres SPI qui définissent la valeur de crête du courant d'enroulement, le mode de microprogression et le sens de rotation par défaut. Après cela, le microcontrôleur peut balayer la table de correspondance, simplement en envoyant des signaux « Next » (Suivant) au circuit. Le driver de moteur prend alors le contrôle et génère les signaux de courant nécessaires pour effectuer une rotation d'un pas complet, d'un demi-pas ou de plusieurs micropas sinusoïdaux. La vitesse à laquelle sont appliquées les impulsions « Next » définit la vitesse de rotation du moteur, tandis que l'état de la broche « Direction » définit le sens dans lequel le moteur tourne.

Un algorithme simple mais très efficace de détection de blocage peut être activé au moyen du bus SPI. Pour une commande plus évoluée, la fonction sans capteur fournit des échantillons de *fcem* moteur qui peuvent être lus par le biais de la communication SPI. Les échantillons collectés sont ensuite à même de servir, par exemple, à un algorithme de commande de vitesse adaptative pour fermer le volet de recyclage à vitesse maximum. L'électronique du système de climatisation doit être protégée des contraintes et des pannes potentielles des applications automobiles. Par conséquent, il est nécessaire d'implanter des fonctions de diagnostic appropriées pour détecter toutes les possibilités de panne et empêcher tout dommage au système ou au circuit intégré. En outre, le circuit dispose d'une broche de sortie d'interruption pour avertir le microcontrôleur en cas de panne.

COMPARAISON DES TECHNOLOGIES D'ACTUEUR

CARACTÉRISTIQUE DE L'ACTIONNEUR	CC À BALAIS	PAS À PAS UNIPOLAIRE	PAS À PAS BIPOLAIRE	COMMENTAIRES
Usure et durabilité	0	++	++	Pas de balais dans le cas des moteurs pas à pas
Bruit audible	0	+	++	Micropositionnement dans le cas du moteur pas à pas bipolaire
CEM	0	+	+	Étincelles dans le cas du moteur à balais
Couple de maintien	0	++	++	Courant de maintien dans le cas des moteurs pas à pas
Fonctionnement sans capteur	+	++	++	Le moteur CC à balais nécessite un compteur d'impulsions si pas de capteur
Coût du circuit de commande	+	++	0	Le pas à pas unipolaire nécessite 4 commutateurs basse tension
Coût du moteur	++	0	++	Le pas à pas unipolaire utilise 2 fois plus de cuivre que le bipolaire
Nombre de fils	2 à 5	5	4	
Détection de blocage	++	0	++	Développé récemment pour les moteurs pas à pas bipolaires
Fermeture rapide du volet	++	0	++	Développé récemment pour les moteurs pas à pas bipolaires

La technologie du moteur pas à pas bipolaire semble concilier le meilleur de deux mondes : elle reste compatible avec tous les besoins.

0 : point faible ; + : point fort ; ++ point très fort.

tion lors du blocage. La détection de blocage en un seul pas permet également aux champs magnétiques du rotor et du stator de rester synchronisés. Ce qui évite tout risque d'usure magnétique par démagnétisation du rotor du fait des champs magnétiques alternatifs du stator, et permet à l'actionneur de conserver un couple stable au cours du temps. La vitesse de positionnement est également importante dans le cas où le volet doit être fermé aussi rapidement que possible : par exemple, pour arrêter le volet de recyclage quand un capteur extérieur détecte la présence d'air pollué à l'extérieur. Le signal *fcem* permet aux moteurs pas à pas de tourner à

pour résoudre les problèmes de résonance. L'une des premières difficultés est qu'il n'est pas possible de monter facilement un capteur adéquat. Deuxième difficulté : le montage d'un capteur ne doit pas modifier l'inertie ni les frottements de l'axe moteur, ce qui affecterait la résonance à détecter. Ce problème est désormais résolu facilement si l'on observe le phénomène de résonance et le mouvement rotatif associé par le biais du « capteur virtuel intégré ».

Le tableau ci-dessus résume les avantages et inconvénients des différentes technologies d'actionneurs de volet abordées ici. Le moteur CC à balais comme le moteur pas à pas uni-