Le mode « Deep Sleep » ou la veille prolongée

De nouvelles techniques permettent de repousser les frontières de la consommation en mode veille en matière de gestion d'alimentation embarquée. Explications de Jason Tollefson de Microchip Technology Inc.

Les modes veille classiques n'étant plus capables d'assurer les économies d'énergie nécessaires à la nouvelle génération de produits dotés de batteries durant une dizaine d'années, non plus que de suivre l'allure croissante de la demande « verte », les fabricants de microcontrôleurs se tournent vers de nouvelles techniques pour repousser les limites du mode veille classique en matière de gestion d'alimentation embarquée.

Les fabricants de microcontrôleurs, par exemple, ont récemment commencé à utiliser des « interrupteurs » électroniques permettant de couper complètement l'alimentation de certains composants de la puce quand ils ne sont pas utilisés. Les superviseurs de tension se sont, eux aussi, améliorés et peuvent désormais assurer une surveillance continue tout en ayant une consommation réduite au minimum. En s'intéressant d'un peu plus près à ces technologies émergeantes, on se rend mieux compte des bénéfices que leur implémentation pourrait apporter.

Le mode veille classique a fait son temps

Traditionnellement, le mode veille des microcontrôleurs est l'outil de gestion d'alimentation le plus utile des ingénieurs systèmes embarqués. Malgré tout, le mode veille est tout de même utilisé depuis de nombreuses années et commence à montrer des signes de faiblesse : on ne peut désormais plus compter sur lui pour répondre aux exigences de réduction de la consommation énergétique, toujours plus importantes, et fondamentales pour les nouvelles générations d'applications embarquées.

L'une des causes de cette perte de compétitivité est que, au fil des années, les microcontrôleurs sont devenus plus complexes, en intégrant plus de fonctionnalités et de périphériques. En se complexifiant, le microcontrôleur doit aussi ajouter des noeuds de processus supplémentaires, contribuant aux pertes d'énergie du système. Ajoutez à cela l'émergence de produits exigeant des batteries à la durée de vie d'au moins 10 ans, pour des applications telles que les compteurs intelligents ou les détecteurs de fumée, ainsi qu'une législation de plus en plus contraignante en matière de surveillance de la consommation énergétique, et il devient évident que le mode veille classique ne peut plus assurer les économies d'énergie requises.

Un sommeil plus profond

Pour compenser les effets de cette complexité croissante et de géométries sans cesse plus denses, les fabricants de microcontrôleurs ont introduit de nouveaux modes pour réduire la consommation électrique. Ils s'appellent Standby, STOP2, LPM5 ou Deep Sleep suivant le fabricant, mais ils ont tous le même objectif : réduire les besoins en énergie des microcontrôleurs au-delà de ce que peut permettre le mode veille classique.



Figure 1 : Le PIC24F16KA XLP utilise le mode Deep Sleep pour réduire sa consommation.

Toutes les techniques de mise en veille profonde utilisent des interrupteurs contrôlés par logiciel pour couper l'alimentation de certaines zones du microcontrôleur. Le fait d'éteindre les transistors dans certaines zones de la puce élimine une partie des fuites des transistors et donc améliore significativement la durée de vie des batteries. En mode Deep Sleep ou veille profonde, les circuits en verts de la figure 2 continuent à être alimentés, tandis que l'alimentation des autres circuits est complètement coupée.

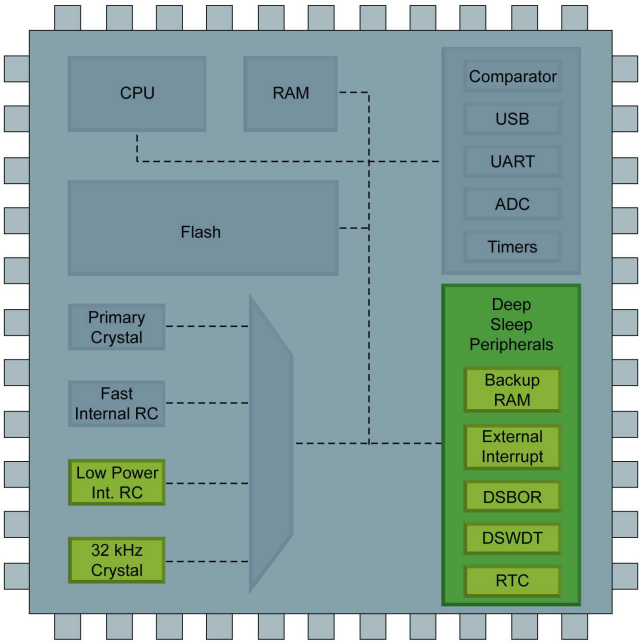


Figure 2 : Le mode Deep Sleep permet d'alimenter certains circuits et d'en désactiver d'autres.

Tous les fabricants n'obtiennent pas les mêmes niveaux d'économies d'énergie pour le mode veille profonde. En général, la plupart parviennent à réduire de 80 % la consommation en mode veille, mais certains microcontrôleurs atteignent aujourd'hui des consommations en mode veille profonde aussi faibles que 20 nA. L'association de faibles courants en mode veille profonde, à

des batteries affichant de faibles taux d'autodécharge, peut permettre d'allonger la durée de vie des batteries de plusieurs années.

Le revers de la médaille du mode veille profonde

Bien évidemment, chaque nouvelle avancée suppose un inconvénient. Dans le cas du mode veille profonde, il s'agit d'un temps de démarrage plus lent.

En général, il ne faut que 1 à 10 µs à un microcontrôleur pour se « réveiller » du mode veille conventionnel, alors que, selon les fabricants, un microcontrôleur peut mettre entre 300 µs et 3 ms à se réveiller d'un mode de veille profonde. Cette différence est due aux séquences de mise sous tension, plus longues, et à la stabilisation des régulateurs intégrés. Le temps nécessaire au réveil d'un mode de veille profonde est quasiment identique à celui d'une réinitialisation à la mise sous tension *(Power-on Reset)*.

Autre différence : la plupart des techniques de mise en veille profonde coupent l'alimentation de la RAM, des registres périphériques et des E/S, tandis qu'en mode veille classique, l'exécution redémarre exactement où elle s'est arrêtée. Après une mise en veille profonde, il faut que le contexte du programme en cours soit restauré depuis une source de mémoire non volatile, telle qu'une mémoire Flash ou une EEPROM, ou depuis de petites zones de sauvegarde de RAM, dont l'alimentation n'est pas coupée pendant la mise en veille profonde. Comme il faut du courant pour pouvoir exécuter le code servant à restaurer le microcontrôleur selon son état précédent le mode de veille profonde, c'est un mode qui induit une pénalité en puissance.

Cependant, malgré ces inconvénients, de nombreuses applications peuvent tirer parti d'un mode de veille profonde. La difficulté, évidemment, consiste à déterminer sur quelles applications il est judicieux de l'implémenter. La petite équation qui suit permet de répondre à cette question :

$$Tbe = ((Tinit*Idd)+(Tpor*Ipor))/(Ipdslp-Ipdds)$$

Où :

Tbe	= Seuil d'égalité *(Breakeven Time)* où la charge en mode veille égale la charge en mode veille profonde
Tinit	= Temps d'initialisation pour reprendre les opérations après une réinitialisation complète
Idd	= Courant consommé en fonctionnement
Tpor	= Temps requis pour une réinitialisation à la mise sous tension
Ipor	= Courant nécessaire pour la réinitialisation à la mise sous tension (y compris courant du condensateur de stabilisation du régulateur si présent)
Ipdslp	= Courant statique en mode veille
Ipdds	= Courant statique en mode veille profonde

(Équation reproduite avec l'aimable autorisation de Microchip : note d'application AN1267)

L'équation ci-dessus modélise la charge en veille classique et en veille profonde. Le seuil d'égalité *(Break-even Time)* Tbe est le point auquel la charge est identique pour chaque mode. La veille profonde est plus avantageuse au-delà du Tbe, comme le montre l'exemple ci-dessous.

Soit un microcontrôleur avec les caractéristiques suivantes en mode veille profonde :

Temps d'exécution à l'initialisation (Tinit)	= 200 µs
Courant pendant l'exécution (Idd)	= 400 µA
Temps de réinitialisation à la mise sous tension (Tpor)	= 600 µs
Courant de réinitialisation à la mise sous tension (Ipor)	= 30 mA*
Courant en mode veille (Ipdslp)	= 3,5 µA
Courant en mode veille profonde (Ipdds)	= 28 µA

*Les 30 mA incluent le courant pour le condensateur de stabilisation du régulateur

Alors :

$$Tbe = Tpd = ((Tinit*Idd)+(Tpor*Ipor))/(Ipdslp-Ipdds)$$

$$= ((200\ \mu s * 400\ \mu A)+(600\ \mu s * 30\ mA))/(3,5\ \mu A – 28\ nA)$$

$$= 5,2 \text{ secondes}$$

Donc, avec Tbe égale à 5,2 secondes, une application qui reste en veille profonde plus longtemps que 5,2 secondes sera avantagée.

Appel de réveil

Le réveil d'un microcontrôleur mis en veille profonde s'effectue différemment du réveil en mode veille classique.

Le mode veille classique permet différents modes de réveil du microcontrôleur, tels que des interruptions, des temporisateurs, la réception de communications, la fin d'une conversion CAN et des changements d'alimentation. Certaines de ces sources du réveil (mais pas toutes) sont intégrées par les fabricants de microcontrôleurs à leurs modes de veille profonde.

Les sources du réveil disponibles pour le mode de veille profonde peuvent inclure : des interruptions, des broches de réinitialisation, des réinitialisations à la mise sous tension (POR), des alarmes horloge temps réel (RTC), des temporisateurs de watchdogs et des détections de microcoupures. Les seules sources non disponibles sont la réception de communications et la fin d'une conversion CAN. En effet, puisque les parties correspondantes du composant ne sont pas alimentées, elles ne sont pas compatibles avec ces sources du réveil en mode de veille profonde. Comme les fabricants peuvent choisir d'implémenter ou non différentes techniques de réveil, il est important de connaître les possibilités de réveil qu'offrent les différentes familles de microcontrôleurs.

Certains fabricants, par exemple, ne prévoient de sortie du mode de veille profonde que par la broche de réinitialisation. C'est un procédé qui fonctionne pour les applications possédant un bouton « ON », et qui ne consomme pas de courant supplémentaire. Lorsque le bouton est enfoncé, l'application se réveille du mode de veille profonde, restaure son état initial, et le produit est de nouveau prêt à l'emploi. Cela fonctionne pour des applications telles que les thermomètres et les appareils portatifs et peut aussi être utilisé pour allonger la durée limite de stockage des produits alimentés par batterie, car ils peuvent ainsi être livrés en étant réglés sur le mode de veille profonde.

D'autres fabricants ont recours à un système d'implémentation plus complet qui implique une meilleure flexibilité grâce à l'ajout de fonctions horloge temps réel et de calendrier. L'application gagne ainsi en autonomie, tout en induisant une consommation en mode veille profonde très

faible, de 500 nA. Plutôt que d'attendre qu'un bouton soit enfoncé, c'est l'alarme de l'horloge qui réveille elle-même l'appareil. Cette fonctionnalité se révèle capitale pour des applications telles que les détecteurs de fumée, qui doivent s'éveiller à un rythme de 2 à 3 fois par minutes pour analyser la qualité de l'air, ou pour des capteurs alimentés par batterie, qui doivent s'éveiller plusieurs fois par jour pour transmettre des données.

On peut obtenir des durées de vie de batterie bien plus importantes en choisissant les fonctionnalités de réveil du mode de veille profonde adaptées aux spécificités d'une application donnée.

Fin de vie

Bien que le mode veille profonde augmente la durée de vie des batteries, il y aura forcément un moment où la batterie arrivera en fin de vie, où le risque de fonctionnement anormal est décuplé.

En général, les circuits de surveillance, tels que les circuits de réinitialisation en cas microcoupures (*BrownOut Reset* ou BOR) et les temporisateurs de watchdog (WDT), sont utilisés comme protection. Les circuits BOR peuvent détecter si la sortie de la batterie devient trop faible pour un fonctionnement sans risques, et forcer l'application à revenir à un état sûr. Les temporisateurs de watchdog offrent une protection similaire contre l'exécution de code erroné, si le microcontrôleur essaie de l'exécuter dans des conditions de fréquence ou de tension dangereuses. Le principal problème de ces circuits est leur consommation électrique, qui s'élève généralement à 5-50 µA. Sur un microcontrôleur qui prétend repousser les limites en matière de consommation énergétique en utilisant le mode de veille profonde, la consommation induite par ces solutions conventionnelles n'est pas acceptable.

Les tout derniers microcontrôleurs contournent le problème en intégrant un certain nombre de circuits BOR ou WDT, spécialement conçus pour le mode veille profonde.

Connus sous le nom de Deep Sleep BOR (DSBOR) ou Zero-Power BOR, ces circuits de détection des microcoupures perdent en précision ce qu'ils gagnent en consommation électrique, qui n'atteint que 45 nA. Le produit est non seulement protégé à la fin de la durée de vie des batteries, mais il est également protégé en cas de perte de puissance momentanée du câble souple du support des batteries, ce qui arrive assez souvent sur les systèmes alimentés ainsi. Selon les fabricants, la manière d'implémenter le BOR faible courant n'est pas la même : certains peuvent être désactivés, tandis que d'autres restes actifs en permanence. Comme tous les fabricants de microcontrôleurs n'intègrent pas de BOR pour le mode de veille profonde, il est important de vérifier que le microcontrôleur est bel est bien compatible pour chaque application.

Quelques fabricants ont aussi réduit les courants des temporisateurs de watchdogs sur les microcontrôleurs dotés du mode veille profonde, diminuant la consommation à quelques 400 nA.

Grâce à ces améliorations en matière de consommation électrique, les deux circuits superviseurs peuvent dorénavant rester alimentés en mode veille profonde, pour une consommation électrique totale de quelques 445 nA. Cette consommation électrique est 99 % inférieure à celle des microcontrôleurs de la génération précédente. Grâce à l'équation expliquée ci-dessus, on calcule que le seuil d'égalité Tbe avec les deux circuits superviseurs est de seulement 5,9 secondes. Grâce à la consommation électrique de ces nouveaux circuits de surveillance il est donc possible de faire fonctionner sans risque un grand nombre d'applications restant en veille pendant plus de 6 secondes.

Veille profonde

Tandis que les géométries internes se font plus denses dans les microcontrôleurs qui permettent une meilleure intégration et davantage de fonctionnalités, les modes veille classiques ne peuvent plus compenser les pertes de courant élevées induites par un nombre croissant de transistors.

Les fabricants de microcontrôleurs se tournent donc vers les modes de veille profonde qui permettent de couper complètement l'alimentation de certaines zones du circuit quand elles ne sont pas utilisées. Ce mode de veille profonde, associé à des circuits de réveil peu gourmands en énergie, permet d'atteindre des consommations en mode veille profonde 80 % moindres qu'avec les techniques de gestion d'alimentation antérieures.

Tandis que le mode de veille profonde permet d'augmenter significativement la durée de vie des batteries sur les applications à microcontrôleurs, il est important de prendre en compte le seuil d'égalité, où l'énergie économisée est plus importante que celle requise pour réveiller le circuit et le réalimenter. Grâce à la petite équation présentée plus haut, les ingénieurs systèmes embarqués peuvent se faire leur propre idée et créer une nouvelle génération de produits alimentés par batterie à la durée de vie incroyablement longue.