Rôle de la surveillance d'énergie dans les systèmes à courant continu

Adrian Lita - Microchip Technology Inc.

Les appareils alimentés par batterie existent depuis longtemps. Toutefois, avec l'avènement des téléphones portables, le nombre d'appareils alimentés par une batterie rechargeable a augmenté de manière exponentielle ces deux dernières décennies. Depuis 2018, des dizaines de milliers de modèles de téléphones, de tablettes, d'ordinateurs portables et de nombreux autres gadgets utilisent des batteries au lithium.

Un facteur très important pour tous ces appareils portables est la consommation d'énergie. Les concepteurs de matériel mettent de plus en plus l'accent sur les implémentations à faible consommation, tout en cherchant à augmenter les performances et à diminuer la taille et le coût. Les développeurs de logiciels cherchent également à réduire la consommation en adaptant d'anciens algorithmes pour mieux prendre en compte la consommation, que ce soit dans le domaine des systèmes d'exploitation (par exemple avec une planifications des tâches gérant l'aspect énergétique), que dans des domaines plus récents, comme l'apprentissage machine. La puissance correspond à la consommation instantanée d'énergie. Comme le décrit Équatio 1n, en électronique, la puissance est le produit de la tension instantanée par le courant instantané. Son unité de mesure est le Watt, qui correspond à 1 Joule par seconde.

$$P = V \times I \quad [W = {}^{J}/_{S}]$$

Équatio 1n - Équation de puissance

L'énergie (consommée pendant un temps donné) est le produit de la puissance par le temps. C'est ce que les circuits consomment et ce que les batteries stockent. Gérer l'énergie signifie en général gérer les courants et les tensions instantanés, pour satisfaire les capacités de transport d'énergie et les conditions de charge. La surveillance d'énergie fournit des informations sur la consommation d'énergie, et aide les concepteurs à gérer les batteries et à évaluer l'énergie globale. On parle de gestion active d'énergie quand l'énergie est surveillée par un logiciel spécialement conçu pour déclencher certaines actions en fonction de la charge.

La gestion active d'énergie peut se faire automatiquement, sur la base de paramètres prédéfinis, ou manuellement au démarrage du logiciel, pour faire certaines recommandations ou suggestions à l'utilisateur. Par exemple, quand un ordinateur portable fonctionne sur batterie plutôt que sur secteur, dans la plupart des cas les performances du processeur sont automatiquement réduites et les tâches graphiques sont confiées au processeur graphique intégré, qui consomme moins mais offre aussi moins de performances que le processeur dédié. Certains périphériques de l'ordinateur portable peuvent être éteints pour allonger la vie de la batterie, ou l'utilisateur peut être invité à réduire la luminosité de l'écran ou le rétroéclairage du clavier. La plupart des smartphones disposent d'un mode économie d'énergie, dont l'activation est suggérée par le logiciel de gestion active d'énergie dès que la batterie passe en dessous d'un certain niveau de charge. Ce mode peut notamment désactiver certaines connexions Internet actives, réduire la luminosité de l'écran, et autres.

Cependant, cela ne s'arrête pas aux seuls appareils alimentés par batterie. Les serveurs surveillent attentivement la consommation d'énergie et le niveau de charge, afin de pouvoir

décider si certains services peuvent être arrêtés ou suspendus. Dans le cas de serveurs virtuels où une application peut évoluer à la hausse ou à la baisse en fonction du niveau d'utilisation en cours et de prévisions d'utilisation basées sur des statistiques, les hyperviseurs peuvent même arrêter complètement certaines machines virtuelles. Une autre utilisation de la gestion active d'énergie est le débogage. La surveillance d'énergie peut fournir des informations précieuses pour déterminer si l'ensemble du système, ou certains de ces composants, fonctionnent bien dans les limites autorisées.

Circuits électroniques servant à mesurer la puissance et l'énergie en courant continu

Comme évoqué plus haut, la puissance électrique est le produit de la tension et du courant. Pour évaluer avec précision la puissance, il faut mesurer les tensions et les courants avec une grande précision. Une fois intégrée sur une certaine période de temps la puissance mesurée correspond à de l'énergie. Etant donné que la consommation d'énergie n'est pas constante dans la plupart des cas, les mesures de tension et de courant doivent être effectuées avec une certaine bande passante. Des exemples typiques de circuits de mesure de tension continue sont le diviseur de tension simple représenté en Figure 1 - à gauche, et le diviseur de tension bufferisé représenté àFigure 1 droite. Bien que ces deux circuits offrent une grande précision avec un étalonnage approprié, le diviseur de tension bufferisé, bien que coûtant plus cher que son homologue non-bufferisé, consomme en général moins d'énergie et on l'utilise surtout pour mesurer des signaux continus très faibles.

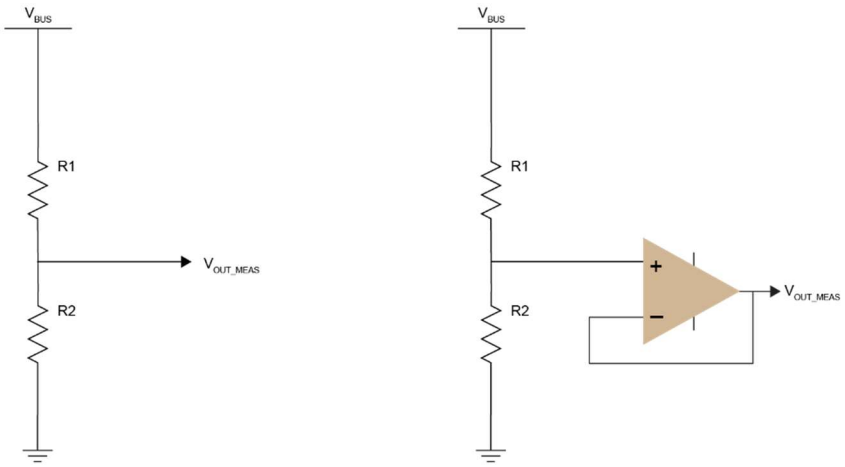

Figure 1 - Circuits diviseurs de tension

Bien que le courant (notamment le courant continu) puisse aussi être mesuré grâce à l'effet Hall, cet article se concentre sur la mesure de courant continu à l'aide de résistances shunt, plus couramment utilisées et moins chères. Une résistance shunt est une résistance de faible valeur, connectée en série avec le circuit. Lorsque le courant circule à travers, une petite tension apparaît aux bornes du shunt. La chute de tension est proportionnelle au courant, selon Equation 2 et en général on l'amplifie grâce à un amplificateur opérationnel.

$$V_{DROP} = R_{SHUNT} \times I$$

Equation 2 - Chute de tension aux bornes d'une résistance shunt

Comme la résistance shunt est en série avec le reste du circuit, elle peut être installée à deux endroits : côté haut, avec l'une de ses bornes directement reliée à la tension de bus ; ou côté bas, avec l'une de ses bornes reliée à la masse, comme illustré en Figure 2. Dans les deux cas, une faible chute de tension sera présente aux bornes du shunt, et la tension totale appliquée au circuit sera diminuée d'autant. Cependant, l'emplacement du shunt a plusieurs implications :

- Si le shunt est placé côté bas (Figure 2, à droite), l'une des es bornes est directement reliée à la terre. Etant donné que les résistances shunt sont de faible valeur, les chutes de tension à leurs bornes sont également faibles, ce qui permet au circuit de mesure de courant de faire appel à un ampli-op basse tension bon marché pour amplifier la chute de tension. Cela est préférable pour des raisons de coût. Cependant, l'inconvénient majeur des shunts côté bas est que l'ensemble du circuit n'est plus relié directement à la terre, mais à un point à un potentiel légèrement plus haut que la terre. Les chutes de tension dans les shunts sont en général de l'ordre du millivolt.
- Par contre, si le shunt est placé côté haut (Figure 2 à gauche), alors le circuit est directement relié à la terre, ce qui élimine tout effet de rebond de masse. Cela est particulièrement souhaitable si le circuit doit effectuer des mesures très précises, ou fournir une sortie très précise. Le seul inconvénient de cette méthode est qu'il faut utiliser un ampli-op différentiel de tension supérieure et, selon la largeur de bande de l'ampli-op, cela peut en augmenter le coût.

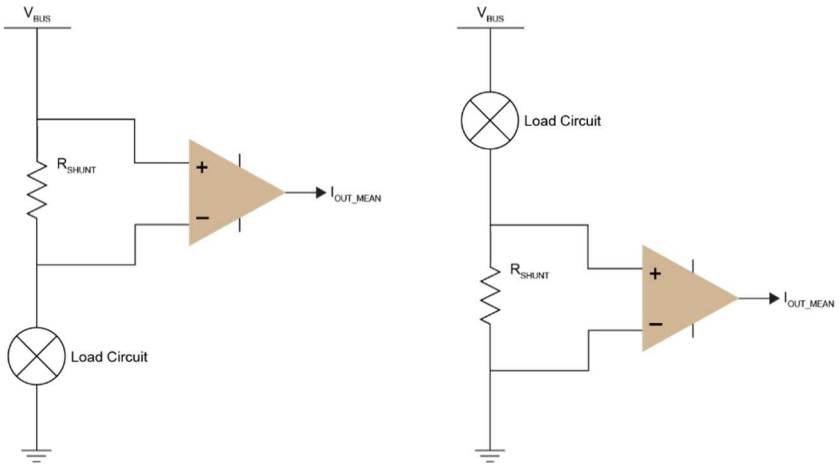

Figure 2 - Circuits de mesure de courant

Si la tension, le courant et même la puissance peuvent être mesurés avec des circuits analogiques assez facilement et à moindre coût, la mesure d'énergie nécessite un circuit plus complexe. L'approche classique pour mesurer l'énergie consiste à mesurer la tension et le courant à l'aide de circuits analogiques, puis à convertir les signaux en données numériques à l'aide d'un CAN (convertisseur analogique-numérique), qui transmet les données à un microcontrôleur. Le travail du microcontrôleur consiste à échantillonner la puissance cumulée du signal au cours du temps, ce qui fournit des mesures d'énergie. Un circuit typique de mesure d'énergie est illustré en Figure 3. L'ajout d'un microcontrôleur au circuit de mesure présente des avantages et des inconvénients. D'un côté, cela offre une grande souplesse au

niveau des algorithmes de calcul, du suivi des différents comportements et de la réalisation de rapports détaillés (par exemple : horaires, quotidiens, etc). Un autre avantage est qu'un microcontrôleur est capable de faire plus que des mesures d'énergie. Il peut déclencher des événements, faire tourner des mécanismes en fonction de tel ou tel état spécifique, ou faire pratiquement tout ce que le concepteur peut souhaiter. L'augmentation de coût et de nomenclature ne pose pas de problème si le système avait déjà besoin d'un microcontrôleur. D'un autre côté, les inconvénients que présente la surveillance d'énergie avec un microcontrôleur sont notamment l'augmentation de consommation globale du système de mesure, le développement du code nécessaire et la place qu'il occupe, et, selon la précision, l'ajout d'éventuels CAN externes si nécessaire.

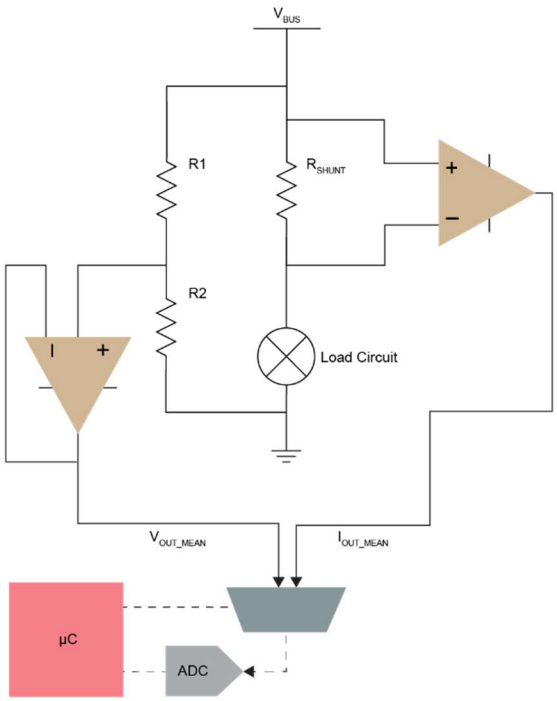

Figure 3 - Circuit typique de mesure d'énergie[1]

Etant donné que la demande de surveillance d'énergie CC a augmenté au fil des ans, plusieurs CI ont été développés pour cette application. Un exemple d'un tel CI est le PAC1934 de Microchip. Ce circuit peut facilement échantillonner jusqu'à 4 canaux simultanément, les seuls composants externes nécessaires étant les résistances de shunt. Le schéma de base du circuit est présenté en Figure 4. Il intègre des amplis-op, des CAN, une logique de calcul arithmétique, une mémoire et une interface standard permettant la connexion au système (généralement I^2C ou SPI). Les avantages de l'utilisation d'un CI par rapport à une approche classique sont évidents en termes de coût, car la nomenclature se réduit considérablement,

[1] Les parties bleues (MUX analogique et CAN) peuvent être soit externes comme ici, soit intégrés au microcontrôleur

et bien sûr en termes de surface de circuit imprimé, puisque tout ce qui est nécessaire à la mesure d'énergie est déjà intégré au CI.

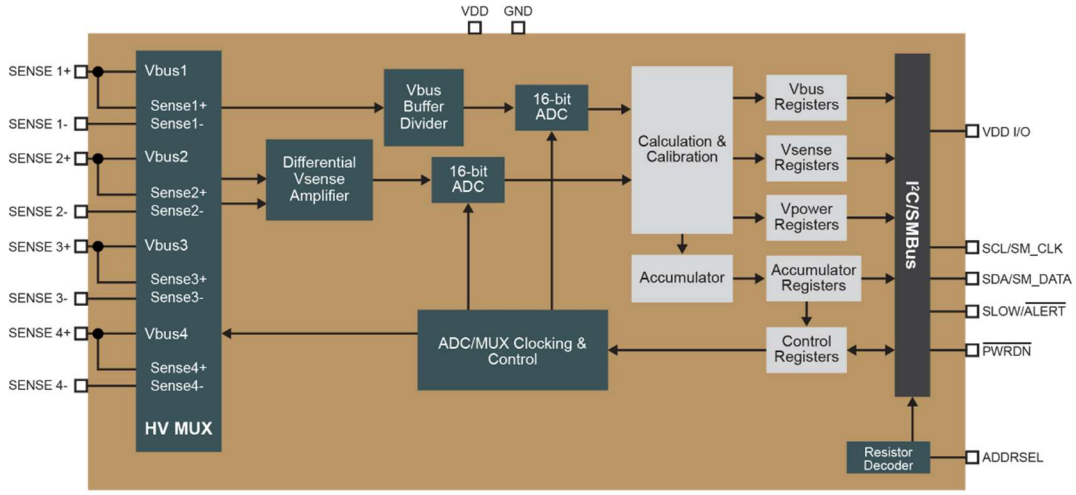

Figure 4 - Schéma fonctionnel du PAC1934 de Microchip, capable de mesurer 4 canaux simultanément

Avantages de la surveillance active d'énergie

Avec sa configuration très souple lui permettant de s'adapter à la plupart des cas d'utilisation, un CI spécialisé peut conserver les valeurs d'énergie cumulée sur de longues périodes de temps, au prix d'une très faible consommation. Habituellement, la fréquence d'échantillonnage de puissance varie de 8 éch/s à plus de 1 Kéch/s. Le PAC1934, par exemple, lorsqu'il fonctionne à 8 éch/s, peut accumuler des valeurs d'énergie pendant plus de 36 heures, pour des courant jusqu'à 16 µA, avec les 4 canaux actifs fonctionnant à 16 bits de résolution, sans solliciter le logiciel. En permettant des changements de fréquence d'échantillonnage à la volée, on peut étendre les cas d'utilisation. Un exemple est l'utilisation du CI pour surveiller les rails d'alimentation d'un ordinateur portable standard. La surveillance peut se faire à 1024 éch/s lorsque l'ordinateur est en marche et actif, puis chuter à 8 éch/s lorsque l'ordinateur est en mode veille parce qu'alors la puissance consommée ne fluctue pas trop. En outre, la réduction de la fréquence d'échantillonnage réduit la consommation nécessaire à la surveillance d'énergie, sans compromettre les performances.

L'une des utilisations les plus courantes de la surveillance active d'énergie est l'évaluation de l'autonomie restante de la batterie. Un CI spécialisé surveille la tension et le courant de la batterie, et connaît en permanence la quantité d'énergie restante. Certaines jauges de batterie plus perfectionnées peuvent aussi détecter d'éventuels problèmes de batterie. Par exemple, la jauge peut suivre la tension de la batterie en fonction du niveau de charge, et s'ils ne correspondent plus, cela signifie que la capacité globale de la batterie a diminué en raison de son âge ou d'autres facteurs. La surveillance active d'énergie est également au cœur d'un système BMS (Battery Management System, ou système de gestion de batterie) standard. Un BMS est un circuit utilisé dans packs de batteries multi-cellules, qui assure la charge et la décharge du pack en toute sécurité, en mesurant activement la tension et le courant pour s'assurer que chaque cellule du pack a les mêmes paramètres. Les fonctions d'un système BMS comprennent aussi la détection de cellules défectueuses, ou la déconnexion du pack lorsque la tension est trop élevée ou trop basse.

Une autre utilisation courante de la surveillance active d'énergie est de l'associer au système d'exploitation de smartphones ou de tablettes, ou à Linux ou Microsoft Windows

dans le cas d'ordinateurs portables, d'ordinateurs de bureau ou de serveurs. Dans le cas des smartphones et des tablettes, le système d'exploitation surveille l'énergie utilisée par les différents services et les différentes applications grâce à plusieurs méthodes. Au début, l'énergie n'était pas directement mesurée et le système l'estimait en fonction de l'utilisation du CPU, du GPU et de l'écran, grâce à des tables de consommation en divers points de fonctionnement. Les données de consommation d'énergie estimées étaient présentées sous forme de statistiques permettant à l'utilisateur de décider comment il souhaitait continuer d'utiliser l'appareil. Sur les ordinateurs portables et les ordinateurs de bureau, Microsoft a introduit le moteur E3 (Energy Estimation Engine, ou moteur d'estimation d'énergie) depuis Windows 8. Au début, E3 fonctionnait plus ou moins comme les algorithmes d'estimation des smartphones, avec la capacité de suivre la consommation de chaque tâche en l'estimant à partir de l'utilisation qu'elle faisait des différentes ressources (processeur, graphique, disque, mémoire, réseau, affichage et autres) E3 a également introduit l'interface de mesure d'énergie (EMI pour Energy Metering Interface en anglais), qui permet aux fabricants d'ordinateurs d'ajouter et de déclarer les différents capteurs de mesure d'énergie, physiquement présents dans le système. Si de tels capteurs sont présents, E3 les utilise pour mesurer avec précision la puissance et l'énergie, au lieu de se baser sur des estimations. Certains fabricants d'ordinateurs portables ont déjà mis en oeuvre ces fonctionnalités dans leurs produits. Par ailleurs, dans le passé, plusieurs initiatives ont vu le jour (par exemple, Sony Monitoring Power dans les ordinateurs portables Vaio), mais il n'y avait aucun support du système d'exploitation, et seules des applications propriétaires pouvaient accéder aux données. Linux n'a pas d'équivalent pour l'E3 de Microsoft, mais des travaux sont en cours. Le sous-système[2] d'E/S industrielles prend en charge l'ajout de différents capteurs au système d'exploitation, en fournissant une interface très simple et très puissante aux applications utilisateur (interface à base de fichier). Cependant, à l'heure où cet article est écrit, le sous-système d'E/S industrielles est encore une extension du noyau, qui par défaut ne fait pas partie des noyaux compilés Linux. Linux supporte aussi la planification[3] avec prise en compte de l'énergie et l'allocation intelligente d'énergie, un algorithme surtout conçu pour Linux embarqué, qui permet au système de décider comment planifier les différentes tâches, tout en tenant également compte de considérations thermiques (la consommation entraînant un échauffement du CPU et du GPU).

Un autre exemple intéressant d'utilisation de CI de mesure d'énergie est la surveillance de puissance et d'énergie USB pour différentes raisons[4] , et son utilisation dans des serveurs, comme évoqué dans la première partie de l'article. Etant donné que les serveurs ont vocation à fonctionner en permanence sans interruption, surveiller leur consommation présente de nombreux avantages, allant de l'augmentation du rendement énergétique global, grâce à un contrôle actif des services et au respect de normes[5] d'efficacité énergétique de plus en plus élevées ; à la possibilité pour les administrateurs système de réaliser une maintenance préventive lorsque certains éléments du serveur changent de comportement en termes de consommation (ce qui peut suggérer une panne à venir).

[2] https://www.kernel.org/doc/html/v4.16/driver-api/iio/index.html

[3] https://developer.arm.com/open-source/energy-aware-scheduling

[4] Exemple de puissancemètre : https://www.jeffgeerling.com/blog/2017/review-satechi-usb-type-c-inline-power-meter-st-tcpm

[5] https://www.energystar.gov

Résumé

Selon le besoin de surveillance d'énergie ou d'autres fonctions que le système doit exécuter, certaines approches peuvent mieux convenir que d'autres. L'approche classique peut s'avérer payante dans le cas où le système embarqué est construit avec un objectif particulier et qu'il a également besoin de connaître sa consommation ou d'avoir une estimation de l'énergie disponible. Il est aussi souhaitable que le microcontrôleur dispose d'un CAN interne, afin de minimiser le coût des fonctions de surveillance d'énergie. Dans ce cas, seuls les circuits analogiques externes servant à la détection de tension et de courant sont nécessaires. Les autres cas où l'approche classique convient mieux que l'approche intégrée sont ceux où une très grande précision est nécessaire, et où ni le coût de nomenclature ni la consommation ne sont un problème.

D'un autre côte, il existe de nombreux cas où l'approche intégrée est plus appropriée. Par exemple, si l'on veut intégrer la mesure d'énergie au système d'exploitation, parce qu'une solution intégrée est déjà prête pour cela, et qu'avec les bons pilotes, le système la reconnaît automatiquement et sait quoi faire. La solution intégrée a des avantages quand plusieurs bus doivent être surveillés simultanément, car les CI de mesure d'énergie disposent en général de plusieurs canaux (et peuvent donc surveiller plusieurs bus). En outre, plusieurs CI peuvent utiliser le même bus de communication (I^2C ou SPI par exemple). Un autre cas où la solution intégrée l'emporte est celui de la mesure d'énergie sur de longues périodes de temps, alors que le système est en mode veille avec une très faible consommation, voire complètement éteint. Cela tient au fait que les puces de surveillance d'énergie consomment très peu et sont capables d'effectuer des calculs et de conserver les valeurs d'énergie cumulées sur de longues périodes par elles-mêmes, sans aucune intervention du système.

Et bien sûr, lorsque l'encombrement est un critère, dans le cas de cartes très intégrées et très denses, comme les cartes-mères de smartphones, de tablettes ou d'ordinateurs portables, un CI occupe toujours moins de place que les composants discrets qu'il remplace. A titre d'exemple, un CI de mesure d'énergie capable de surveiller 4 canaux simultanément tient dans un boîtier WLCSP de seulement 2,225 x 2,17 mm.