



Détection de seuils par photocoupleur HCPL-3700 dans les systèmes de surveillance industrielle

INTRODUCTION

Les circuits logiques électroniques, utilisés dans un environnement difficile, mettent rapidement les ingénieurs en face d'incidents et dangers qu'implique la réalisation d'une interface entre la fonction logique et la fonction contrôlée. Ces problèmes, particulièrement aigus dans l'environnement industriel perturbé par les parasites transmis par le secteur ou produit par les moteurs ou la foudre, peuvent dissimuler le signal attendu et même dans certains cas détruire le système de surveillance logique lui-même. De telles situations amènent le concepteur à faire appel à des solutions qui permettent d'isoler la fonction logique de la fonction d'entrée ou de sortie. Les méthodes d'isolement traditionnelles consistent à faire appel à des éléments tels que condensateurs, relais, transformateurs ou photocoupleurs. Ces derniers offrent sans conteste les meilleures performances de vitesse, de réponse en courant continu, de forte réjection de mode commun et de faible capacité de couplage entrée-sortie.

Dans la mise en place d'une interface entre un système perturbé et un système logique, il est recommandé, sinon obligatoire, de réaliser des tests (sur des signaux de commutation ou niveaux de seuil) où le signal peut être considéré comme une référence valable. Le signal d'entrée ou de contre-réaction dans les systèmes de surveillance industriel, peut être continu, alternatif, de niveau compris entre 5 V et 110 ou 240 V. L'étude d'un tel système à commutation de seuil peut devenir plus qu'un problème banal. Ceci est particulièrement vrai avec les photocoupleurs lorsque l'on considère la gamme des rapports de transfert en courant de la plupart des dispositifs.

Ce problème peut être facilement résolu en utilisant le photocoupleur Hewlett-Packard HCPL 3700 qui combine, sur une seule puce à huit broches en boîtier plastique DIL, une fonction détection en courant et en tension alternatif ou continu et un photocoupleur à très forte tension d'isolement.

Le schéma simplifié de la figure 1 en donne le principe. Le HCPL-3700 est constitué d'un redresseur double alternatif, suivi d'un circuit de détection de seuil intégré,

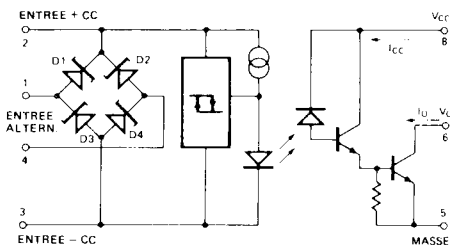


FIGURE 1 -- Schéma synoptique du HCPL-3700

d'une DEL et d'un circuit détecteur intégré à couplage optique. Ce dernier détecteur comporte une photodiode et un amplificateur Darlington à grand gain.

Le circuit d'entrée fonctionne en continu ou en alternatif et fournit un niveau de seuil avec hystérésis compensé en température et garanti. Le seuil de commutation peut être élevé par l'adjonction d'une simple résistance extérieure.

La détection du niveau de seuil se faisant dans les circuits d'entrée avant isolement et amplification par l'étage à grand gain, les variations du rapport de transfert de courant dans le temps ou entre dispositifs ont une influence moindre.

Outre la possibilité d'être attaqués par des signaux alternatifs ou continus, les diodes Zener du montage en pont fournissent un écrêtage de la tension d'entrée pour protéger le circuit de seuil ou les DEL lorsque se présentent une surtension ou un surcourant. La DEL est alimentée par une source de courant à découpage.

La sortie du photocoupleur est constituée par un Darlington à grand gain et à collecteur ouvert, elle est compatible TTL ou CMOS. Son pouvoir de réjection en mode commun et son immunité contre les transitoires de 600 V/ μ s permettent une excellente séparation entrée-sortie. Sa tension d'isolement atteint 3000 VCC. Il est recommandé de l'utiliser dans une plage de température comprise entre 0 et 70°C.

Le HCPL-3700 répond aux exigences d'environnement des systèmes de surveillance industrielle pour l'interface entre les signaux issus d'équipement alimentés en courant alternatif ou continu et les circuits logiques de commande. Le contrôle de la fermeture de contacts ou de la tension d'excitation de relais, la détection de défauts de fonctionnement des circuits de contacts de proximité ou de jauges, la surveillance des signaux issus de capteurs de température ou de pression peuvent être réalisés avec le HCPL-3700 lorsque de forts isollements sont nécessaires.

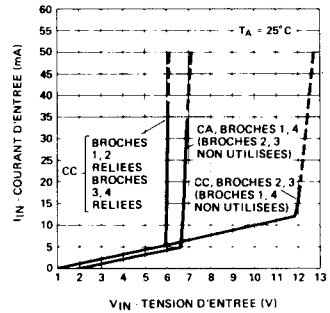
Caractéristiques

L'étude des caractéristiques tension-courant à l'entrée et de transfert entrée-sortie permet de mieux comprendre le fonctionnement du HCPL-3700. La figure 2 fournit les caractéristiques I_{IN}/V_{ENTREE} (mA et V) en courant continu et alternatif.

Le circuit d'entrée en CC est équivalent à une résistance de 1000 Ω en série avec une tension de déchet de 1 V. Si les broches CA (1 à 4) ne sont pas utilisées, la tension continue à l'entrée peut atteindre 12 V (2 fois la tension de Zener des diodes) avant que n'ait lieu l'écrêtage. Si l'on raccorde les broches 1, 4 (entrée CA), l'écrêtage du signal d'entrée aura lieu pour 6 V (1 fois la tension de Zener). Pendant l'écrêtage, il est important que le courant reste en deçà de certaines limites. D'autre part, pour éviter un débit trop important dans la diode substrat, la tension de polarisation en inverse à l'entrée CC ne doit pas dépasser -0,5 V. Le choix du niveau de seuil de la tension d'entrée est déterminée par les conditions de fonctionnement du système. L'avantage de la fixation des signaux d'entrée à de faibles niveaux limite le courant direct dans la DEL ainsi que la puissance à l'entrée du système sous l'action de fortes tensions parasites ou de transitoires courantes dans un environnement industriel. La limitation interne permet parfois de se passer d'éléments de protection additionnels.

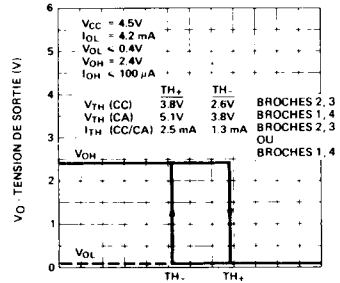
L'entrée alternative est assez semblable à l'entrée continue, elle possède en plus deux tensions directes de diode. Le niveau d'écrêtage de la tension d'entrée CA correspond à 6,7 V (une tension de Zener plus une tension de diode polarisée en direct), et présente une symétrie pour des polarisations positives ou négatives. Il n'est pas possible de modifier le niveau de seuil par combinaison de broches.

Les caractéristiques de transfert, illustrées figure 3, montrent comment la tension de sortie varie en fonction de la tension ou du courant d'entrée. L'hystérésis voulue améliore l'immunité au bruit et maintient un temps de réponse rapide (t_r , t_f) même pour les signaux d'entrée à variation lente.



NOTE : Tension alternative crête instantanée

FIGURE 2 — Caractéristiques d'entrée typiques I_{IN} en fonction de V_{IN}



NOTE : Tension alternative crête instantanée

FIGURE 3 — Caractéristiques de transfert typiques du HCPL-3700

L'hystérésis du système est définie :
 en tension par $V_{HYS} = V_{TH+} - V_{TH-}$, ou
 en courant par $I_{HYS} = I_{TH+} - I_{TH-}$.
 La sortie du photocoupleur se met à l'état bas dès que la tension (ou le courant) d'entrée dépasse V_{TH+} (ou I_{TH+}). Elle repasse à l'état haut dès que la tension (ou le courant) à l'entrée devient inférieure à V_{TH-} (ou I_{TH-}).

Le HCPL-3700 a des niveaux de commutation de seuil préprogrammés en continu comme en alternatif. D'autres niveaux peuvent être définis en utilisant une simple résistance en série dans le circuit d'entrée (voir équation 1). Il est parfois intéressant de répartir cette résistance par moitié sur chaque borne d'entrée pour améliorer la protection contre les transitoires et limiter la puissance dissipée par une seule résistance.

La figure 4 illustre quatre interfaces courantes lorsque l'on utilise un microprocesseur comme système de surveillance industriel. Les trois premières sont étudiées dans la présente note.

Exemple 1

La tension continue appliquée aux bornes d'un moteur permet de surveiller sa vitesse et ses conditions de charge.

Exemple 2

Un circuit de commande est constitué par un interrupteur de sécurité destiné à établir ou couper un circuit alimenté sous 115 V (ou 220 V) pour des raisons de commodité, et un HCPL-3700 pour améliorer son immunité au bruit.

Exemple 3

Un HCPL-3700 est utilisé pour surveiller l'alimentation secteur (baisse de tension ou coupure) d'un contrôleur. L'emploi d'une résistance shunt, pour améliorer la précision du seuil, est étudié à ce propos.

La figure montre de plus qu'il est possible d'employer deux HCPL-3700 pour définir les limites haute et basse entre lesquelles peut varier une température dans un processus industriel. Noter que dans ce cas, les niveaux de commutation du photocoupleur doivent être beaucoup plus précis que dans les autres exemples. Un quatrième exemple étudie l'utilisation d'une ligne téléphonique louée pour transmettre les informations au HCPL-3700.

Exemple 1 : Seuil de tension en continu

La surveillance du moteur à courant continu a pour but prioritaire de fournir l'indication de sa vitesse de rotation minimale avant de le faire travailler. Si la tension appliquée V_M est supérieure à 5 V, on suppose la vitesse voulue atteinte. La tension maximale appliquée est de 10 V. La figure 5 montre l'organisation du circuit pour cette application (les symboles sont définis dans l'appendice).

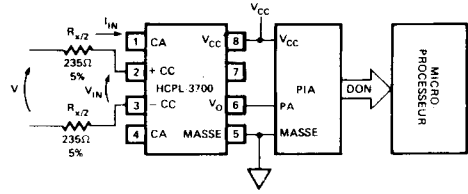


FIGURE 5 - Utilisation d'un HCPL-3700 en interface tension CC - microprocesseur

Le système fonctionne dans les conditions suivantes :

Niveaux des tensions extérieures (V_M)

$$V_+ = 5V_{CC} (50\%)$$

$$V_{crête} = 10V_{CC}$$

Niveaux d'entrée du HCPL-3700

$$V_{TH+} = 3,8V$$

$$V_{TH-} = 2,6V$$

$$V_{ICH3} = 12V$$

$$I_{TH+} = 2,5mA$$

$$I_{TH-} = 1,3mA$$

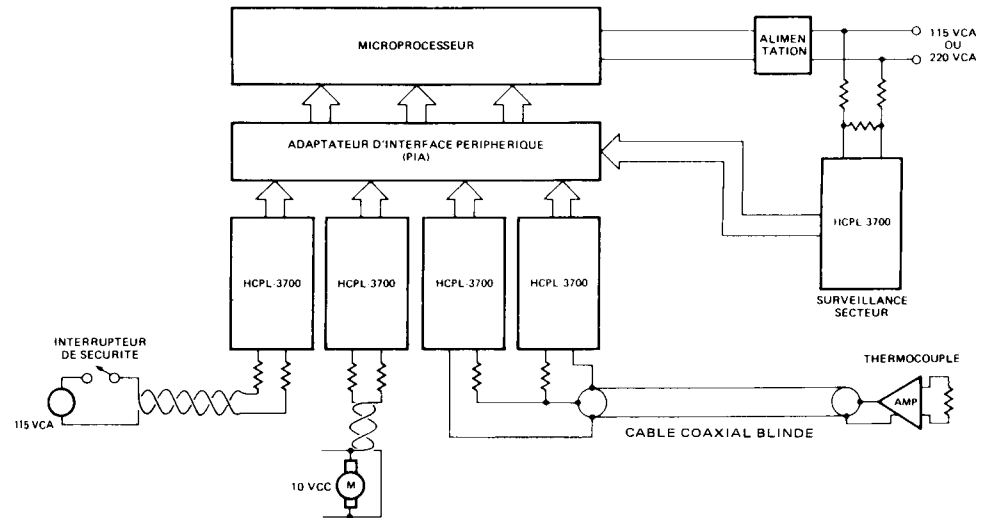


FIGURE 4 - Utilisation de HCPL-3700 comme interface CC ou CA - microprocesseur

Pour un seuil de 5 V, R_X est calculé de la façon suivante :

$$R_X = \frac{V_+ - V_{TH+}}{I_{TH+}} \quad (1)$$

$$= \frac{5V - 3,8V}{2,5mA}$$

$$R_X = 480\Omega \quad (470\Omega \pm 5\%)$$

Ce qui donne comme niveau de seuil inférieur :

$$V_- = I_{TH-} R_X + V_{TH-} \quad (2)$$

$$= (1,3mA) 470\Omega + 2,60V$$

$$V_- = 3,21V$$

En tenant compte des tolérances sur les caractéristiques du HCPL-3700 et sur la résistance R_X (5%), la variation de V_+ peut être comprise entre + 12,4% et - 15%, celle de V_- entre + 14% et - 23,5% (Nota : Pour une tension extérieure faible, le niveau de seuil V_+ , comparable en amplitude à V_{TH+} du photocoupleur ($V_+ \leq 10 V_{TH+}$), les tolérances ne sont pas améliorées avec une résistance R_X à 1%; par contre, si $V_+ > 10 V_{TH+}$, une résistance à 1% réduira les variations de V_+).

En réalisant un montage série-parallèle, il est possible de déterminer extérieurement V_+ et V_- . Se reporter à l'exemple 3.

La puissance dissipée par R_X dépend de la validité de l'une des deux inégalités suivantes :

$$\text{si } \frac{V_+}{V_{crête}} > \frac{V_{TH+}}{V_{IHC}} \quad (V_{IN} \text{ sans écrêtage}) \quad (3)$$

$$\text{si } \frac{V_+}{V_{crête}} < \frac{V_{TH+}}{V_{IHC}} \quad (V_{IN} \text{ écrêtée}) \quad (4)$$

V_{IHC} représentant la valeur particulière de la tension de seuil à l'entrée indiquée dans les caractéristiques relevées sur la fiche technique.

Dans ce cas, les broches 1 et 4 ne sont pas connectées en continu, il n'y aura pas de tension de seuil car :

$$\frac{V_+}{V_{crête}} > \frac{V_{TH+}}{V_{IHC3}}$$

$$\frac{5V}{10V} > \frac{3,8V}{12,0V}$$

Par suite, il est prudent de prévoir une résistance R_X de dissipation maximale aux conditions pour lesquelles la tension de seuil ne s'établit pas. Elle se calcule de la façon suivante :

$$P_{R_X} = \frac{\left[V_{crête} \left(\frac{R_X}{R_X + 1 \text{ k}\Omega} \right) \right]^2}{R_X} \quad (\text{Entrée sans écrêtage}) \quad (5)$$

$$= \frac{\left[10V \left(\frac{470\Omega}{1470\Omega} \right) \right]^2}{470\Omega}$$

$$P_{R_X} = 21,8mW$$

Si la condition $V_+/V_{crête} < V_{TH+}/V_{IHC}$ est réalisée (tension d'entrée écrêtée), la formule donnant la dissipation maximale de R_X devient :

$$P_{R_X} = \frac{(V_{crête} - V_{IHC})^2}{R_X} \quad (\text{Entrée écrêtée}) \quad (6)$$

Le courant d'entrée ou la puissance doivent être calculées pour être compatibles avec les possibilités du HCPL-3700. Dans les conditions d'écrêtage de la tension d'entrée, on obtient :

$$I_{IN} = \frac{V_{crête} - V_{IHC}}{R_X} < I_{IN}(\text{max}) \quad (7)$$

$$P_{IN} = V_{IHC} (I_{IN}) < P_{IN}(\text{max}) \quad (8)$$

Condition d'écrêtage

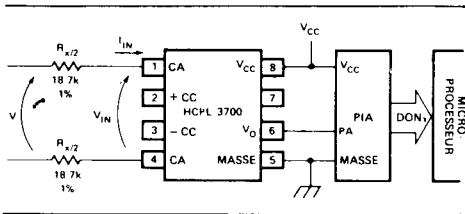


FIGURE 6 — Interface tension alternative - microprocesseur à l'aide d'un HCPL-3700

Dans les conditions de non écrêtage de la tension d'entrée, le courant maximal à l'entrée et la puissance admissibles ne seront pas dépassés, ceci ne se produisant que dans les conditions écrêtées.

La sortie n'a pas besoin d'être chargée, car l'adaptateur d'interface périphérique (PIA), un MC-6821, par exemple, possède une résistance de source interne raccordée à ses entrées.

Exemple 2 : Fonctionnement en alternatif

La figure 6 montre une application en alternatif. Elle concerne un système comportant un contact de sécurité coupant un circuit 115 V. Ce genre de circuit est communément alimenté en alternatif et le HCPL-3700 possède la cellule de redressement nécessaire. En se servant de ce photocoupleur comme interface avec l'adaptateur d'interface périphérique, il est possible soit de ne pas filtrer mais le programme doit prévoir un processus de détection. Le filtrage en sortie, méthode classique, peut présenter certains problèmes avec une logique TTL lorsque le temps d'établissement du signal à l'entrée est lent. Le filtrage à l'entrée élimine le problème de la constante de temps à l'établissement mais augmente le retard à l'entrée.

Fonctionnement sans filtrage

Dans cet exemple, on choisit une valeur de 98 V en se basant sur 60% de la valeur crête. Régler un contact de sécurité à 60% du niveau du signal procure une immunité suffisante contre le bruit sur une ligne ouverte en 115 V alternatif lorsque le HCPL-3700 est monté de façon à fonctionner pour des tensions secteur à - 15% de leur valeur nominale quand le contact de sécurité est fermé.

La valeur de R_X pour le niveau de détection de seuil sans la capacité de filtrage C, aux bornes d'entrée continu, est obtenue de la façon suivante :

$$R_X = \frac{V_+ - V_{TH+}}{I_{TH+}} \quad (9)$$

(Tension alternative instantanée)

$$I_{TH+} = 2,5 \text{ mA}$$

$$R_X = \frac{98 \text{ V} - 5,1 \text{ V}}{2,5 \text{ mA}}$$

$$R_X = 37,2 \text{ k}\Omega \quad (\text{Utiliser sur chaque conducteur d'entrée une résistance } R_X/2 = 18,7 \text{ k}\Omega, 1\%)$$

Le niveau de seuil inférieur sera de :

$$V_- = I_{TH-} R_X + V_{TH-} \quad (10)$$

$$= (1,3 \text{ mA})(37,4 \text{ k}\Omega) + 3,8 \text{ V}$$

$$V_- = 52,4 \text{ V}$$

(32% de la tension crête à l'entrée)

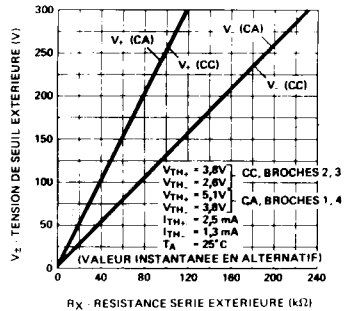


FIGURE 7 — Caractéristique typique de seuil extérieur

La figure 7 permet de sélectionner graphiquement la valeur de R_X pour une valeur particulière de la tension de seuil extérieure V_{\pm} .

La figure 8 indique, pour la valeur de R_X ci-dessus, la forme du signal en sortie du HCPL-3700 pour $V_+ = 98 \text{ V}$ (60% de la tension crête).

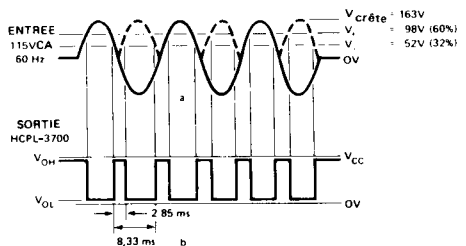


FIGURE 8 — Forme d'onde du signal en sortie du HCPL-3700 suivant montage de la figure 7 sans filtrage

Pour déterminer la durée de l'état haut, se reporter à la figure 9 et à l'équation (11).

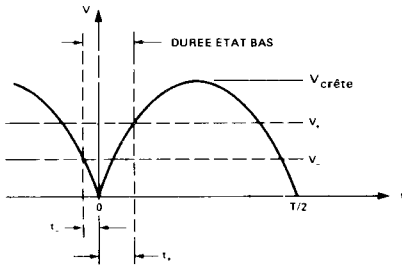


FIGURE 9 - Détermination de la durée état haut - état bas

A cause de la symétrie de l'onde sinusoïdale, l'état haut dure $t_- + t_+$, t_{\pm} étant calculé avec la formule suivante :

$$t_{\pm} = \frac{T}{360^\circ} \sin^{-1} \left(\frac{V_{\pm}}{V_{\text{crête}}} \right) \quad (11)$$

l'arc sinus étant exprimé en degrés, T étant la période du signal.

Sans filtrage, la forme d'onde doit être utilisée comme une information. Il faut créer un programme qui provoque l'examen à intervalle régulier du signal par le microprocesseur de façon à déterminer si la tension alternative est toujours présente à l'entrée du HCPL-3700. Ce montage évite les problèmes de filtrage et les retards qui en résultent, mais demande une programmation plus complexe du microprocesseur.

Fonctionnement en alternatif avec filtrage à l'entrée

Une méthode valable pour obtenir un état bas continu en sortie, en présence du signal alternatif à l'entrée, est de placer une capacité de filtrage entre les bornes 2 et 3 (entrée CC), le signal alternatif étant appliqué entre les bornes 2 et 3 (entrée CC), le signal alternatif étant appliqué entre les bornes 1 et 4 (redresseur double alternance). Ce filtrage à l'entrée permet une plus grande souplesse d'adaptation du HCPL-3700 à l'interface directe avec un circuit TTL ou CMOS, en éliminant le ralentissement du temps d'établissement provoqué par un filtrage en sortie, d'autant plus que cette capacité diminue à la fois la sensibilité aux

transitoires et aux rebonds du contact de sécurité. Le filtrage étant réalisé après R_X , la tension appliquée aux bornes de la capacité ne dépasse pas 6,7 V crête en CA, valeur de la tension de seuil $V_{IH}C2$. Son inconvénient est d'apporter un retard supplémentaire à la commutation de l'optocoupleur, dû à la charge et à la décharge du condensateur au démarrage. Ce mode de filtrage, illustré figure 10, est expliqué ci-après :

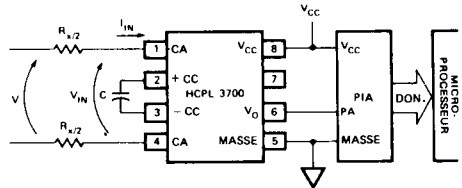


FIGURE 10 - Filtrage à l'entrée avec HCPL-3700

Le système est placé dans les mêmes conditions que dans l'exemple précédent (circuit 115 Vca).

La plus petite valeur de C qui assure un filtrage efficace est déterminée par les caractéristiques du photocoupleur. Aux faibles tensions alternatives, la capacité doit se charger au moins à V_{TH+} pour qu'il y ait fonctionnement mais ne doit pas atteindre V_{TH-} pendant la décharge. Une estimation valable de la valeur de C est donnée par la formule suivante :

$$V_{TH+} - V_{TH-} = V_{TH+} e^{-t/\tau}, \quad \tau = R_{IN} C_{\min} \quad (12)$$

R_{IN} représentant la résistance d'entrée du HCPL-3700.

$$C_{\min} = \frac{t}{R_{IN} \ln \left(\frac{V_{TH+}}{V_{TH+} - V_{TH-}} \right)} \quad (13)$$

avec $R_{IN} = 1 \text{ k}\Omega$, $V_{TH+} = 3,8 \text{ V}$, $V_{TH-} = 2,6 \text{ V}$ et $t = 8,33 \text{ ms}$ à 60 Hz ou $t = 10 \text{ ms}$ à 50 Hz.

$$C_{\min} = 7,23 \mu\text{F} \text{ à } 60 \text{ Hz}$$

$$C_{\min} = 8,68 \mu\text{F} \text{ à } 50 \text{ Hz}$$

Le filtrage n'est efficace que si C est supérieur à C_{min} : il faut donc tenir compte des tolérances de la capacité pour que cette condition soit toujours tenue. C doit quand même être maintenue aussi faible que possible pour limiter la durée du retard. La capacité de filtrage modifiant l'impédance d'entrée, la valeur de R_X doit être recalculée. Les courbes de la figure 11 donnent la valeur de R_X en fonction de la tension de seuil V_{\pm} pour différentes valeurs de C = 10 μF , 22 μF et 47 μF . Dans une application nécessitant une condition nominale de fonctionnement à 65% d'une tension secteur de 115 V eff., soit 75 V eff., une résistance R_X de 26,7 k Ω \pm 1% avec un condensateur de 10 μF fournira le seuil désiré. La dissipation de R_X se déduit des conditions d'écrêtage ($V_{+}/V_{Crête} < V_{TH+}/V_{ICH2}$), sa valeur est de 455 mW (voir figure 6). Une résistance $R_X/2$ de 0,5 W dans chaque branche résoudra le problème.

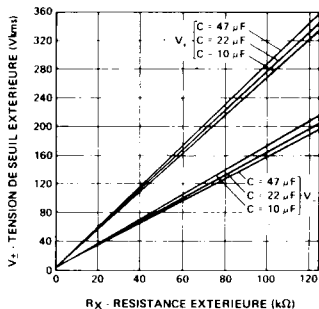


FIGURE 11 — Tension de seuil extérieure en fonction de R_X pour différentes valeurs de la capacité de filtrage C

Exemple 3 : Fonctionnement en alternatif avec amélioration de la précision et du contrôle du seuil

Certaines applications nécessitent des niveaux de seuil très précis. La possibilité de définir indépendamment le seuil supérieur et inférieur permettra à l'utilisateur de s'adapter à des nécessités particulières. La figure 12 donne le schéma de principe d'un montage permettant de détecter une disparition de la tension d'alimentation d'un ordinateur et d'éviter l'effacement des mémoires pendant le phénomène.

Dans ce montage, le photocoupleur HCPL-3700 est branché sur la ligne d'alimentation et sa sortie est couplée à une bascule de Schmitt à niveau TTL (7414).

Dans les exemples précédents, une seule résistance série R_X était utilisée pour déterminer l'un des niveaux de seuil. L'autre niveau était automatiquement déterminé par l'hystérésis du dispositif. Une solution serait de déterminer R_X pour un niveau de seuil inférieur fixé à 50% du niveau

nominal crête à l'entrée, uniquement pour trouver un niveau de seuil supérieur à 90% du niveau nominal crête.

En tablant sur une variation de secteur de + 10%, - 15%, il peut arriver que le photocoupleur n'atteigne jamais le seuil supérieur avec un secteur à - 15%. Une plus grande latitude dans la fixation des deux seuils s'obtient en combinant la résistance série R_X et une résistance parallèle R_p comme sur la figure 12.

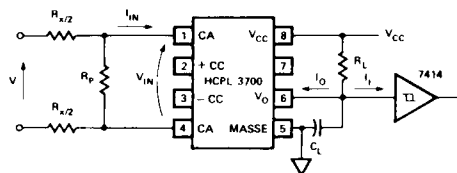


FIGURE 12 — Système de surveillance du secteur avec détermination simultanée des niveaux de seuil supérieur et inférieur, et filtrage en sortie

Chaque niveau peut être déterminé par une équation, ce niveau de seuil supérieur par l'équation :

$$V_{+} = R_X \left(I_{TH+} + \frac{V_{TH+}}{R_p} \right) + V_{TH+} \quad (14)$$

et le niveau de seuil inférieur par :

$$V_{-} = R_X \left(I_{TH-} + \frac{V_{TH-}}{R_p} \right) + V_{TH-} \quad (15)$$

En résolvant les équations en R_X et R_p , on obtient :

$$R_X = \frac{V_{TH-} (V_{+}) - V_{TH+} (V_{-})}{I_{TH+} (V_{TH-}) - I_{TH-} (V_{TH+})} \quad (16)$$

$$R_p = \frac{V_{TH-} (V_{+}) - V_{TH+} (V_{-})}{I_{TH+} (V_{-} - V_{TH-}) + I_{TH-} (V_{TH+} - V_{+})} \quad (17)$$

Les équations (16) et (17) ne sont valables que si les conditions (18) et (19) sont remplies. Les niveaux de seuil externes voulus V_{+} et V_{-} sont fixés d'avance et les valeurs

de $V_{TH\pm}$ et $I_{TH\pm}$ sont relevées dans le tableau des caractéristiques de la fiche technique. Ces valeurs trouvées, il faut déterminer si le dénominateur de R_X , équation (16), est positif ou négatif. S'il est positif, il faut remplir les conditions suivantes :

$$\frac{V_+}{V_-} \geq \frac{V_{TH+}}{V_{TH-}} \quad \text{et} \quad \frac{V_+ - V_{TH+}}{V_- - V_{TH-}} < \frac{I_{TH+}}{I_{TH-}} \quad (18)$$

Par contre, si le dénominateur est négatif, il faut remplir les conditions ci-dessous :

$$\frac{V_+}{V_-} \leq \frac{V_{TH+}}{V_{TH-}} \quad \text{et} \quad \frac{V_+ - V_{TH+}}{V_- - V_{TH-}} > \frac{I_{TH+}}{I_{TH-}} \quad (19)$$

Une ligne alimente un ordinateur sous 115 V eff., 60 Hz (163 V crête) : elle doit être surveillée pour détecter toute chute de tension supérieure à 50% et signaler son rétablissement à 75%. La tension peut varier entre 110% (179 V crête) et 85% (139 V crête) de sa valeur nominale.

Ceci suppose :

$$V_- = 81,5V \quad (50\%), \text{ seuil d'arrêt}$$

$$V_+ = 122,5V \quad (75\%), \text{ seuil de démarrage}$$

Sont données :

$$V_{TH+} = 5,1V \quad I_{TH+} = 2,5mA \quad V_{IHC2} = 6,7V$$

$$V_{TH-} = 3,8V \quad I_{TH-} = 1,3mA$$

En utilisant les équations (16) et (17) pour calculer R_X et R_p , et si les conditions (18) et (19) sont remplies :

$$R_X = 17,4 \text{ k}\Omega, \text{ utiliser une résistance de } 18\text{k}\Omega, 5\%$$

$$R_p = 1,2 \text{ k}\Omega, \text{ utiliser une résistance de } 1,2\text{k}\Omega, 5\%$$

Pour terminer le calcul du courant d'entrée maximal I_{IN} et la puissance des résistances R_X et R_p , il faut vérifier si la tension d'entrée provoquera un seuil à la tension crête appliquée. Les équations (3) et (4) permettent de s'assurer s'il y aura seuil ou non, elles donnent dans le cas présent :

$$0,75 = \frac{V_+}{V_{crête}} \approx \frac{V_{TH+}}{V_{IHC2}} = 0,76$$

ce qui indique que V_{IN} répond tout juste aux conditions nécessaires pour qu'il y ait seuil.

Dans cette application, le courant I_{IN} est donné approximativement par :

$$I_{IN} = \frac{V - \frac{V_{IHC2}}{\sqrt{2}}}{R_X} - \frac{\frac{V_{IHC2}}{\sqrt{2}}}{R_p} < I_{IN}(\text{max}) \quad (20)$$

$$= \frac{115V - \frac{6,7V}{\sqrt{2}}}{18 \text{ k}\Omega} - \frac{\frac{6,7V}{\sqrt{2}}}{1,2 \text{ k}\Omega}$$

$$I_{IN} = 2,18mA \text{ eff.} < 34,3mA$$

La dissipation de R_X est donnée par :

$$P_{R_X} = \frac{\left(V - \frac{V_{IHC2}}{\sqrt{2}} \right)^2}{R_X} \quad (21)$$

soit environ 675 mW.

Lorsque les conditions de seuil existent, la puissance maximale dissipée par R_p est de 18,7 mW, donnée par l'équation :

$$P_{R_p} = \frac{\left(\frac{V_{IHC2}}{\sqrt{2}} \right)^2}{R_p} \quad (22)$$

Filtrage en sortie

L'avantage du filtrage en sortie est qu'il est facile à mettre en oeuvre. Le signal en sortie n'introduit qu'un seul retard au moment du seuil d'arrêt alors que le filtrage à l'entrée introduit un retard aussi bien sur le seuil d'arrêt que sur le seuil de démarrage, à cause de la charge et de la décharge initiales du condensateur. Son inconvénient réside dans le fait que le long temps de transition t_r , amené par le filtre RC en sortie, nécessite une porte logique à bascule de Schmitt pour séparer le circuit de filtrage des circuits logiques qui le suivent et éliminer les instabilités. Le calcul de la résistance de charge et de la capacité est donnée ci-après.

Les données suivantes fixent les conditions d'interface :

HCPL-3700

$$V_{OL} = 0,4V$$

$$I_{OL} = 4,2mA$$

$$I_{OH} = 100\mu A \text{ max}$$

$$V_{CC} = 5V \pm 5\%$$

7414

$$V_{T+}(\text{min}) = 1,5V$$

$$V_{T+}(\text{max}) = 2V$$

$$I_{IH} = 40\mu A \text{ max}$$

$$I_{IL} = -1,2mA \text{ max}$$

Niveau supérieur de seuil de la bascule de Schmitt

Avec les conventions de courant de la figure 12, la valeur minimale de R_L qui garantit que le transistor de sortie reste saturé, est donnée par :

$$R_L(\text{min}) \geq \frac{V_{CC}(\text{max}) - V_{OL}}{I_{OL} + I_{IL}} \quad (23)$$

$$= \frac{5,25V - 0,4V}{4,2mA - 1,2mA} = 1,62 \text{ k}\Omega$$

La valeur maximale de R_L est calculée pour avoir une garde de 0,4 V sur le paramètre $V_{T+}(\text{max})$ ou $V_{IH} = V_{T+}(\text{max}) + 0,4V$.

$$R_L(\text{max}) \leq \frac{V_{CC}(\text{min}) - V_{IH}}{I_{OH} - I_{IH}} \quad (24)$$

$$= \frac{4,75V - 2,4V}{0,1mA + 0,04mA} = 16,8 \text{ k}\Omega$$

Prendre R_L égale à 1650 Ω .

C_L peut être déterminé de la façon suivante : en se reportant à la figure 8, la sortie du photocoupleur sera à l'état haut pendant un temps déterminé par le niveau choisi pour V_+ . Dans le présent exemple, $V_+ = 122,5V$ (75%) et $V_- = 81,5V$ (50%). En admettant une tension crête minimale de 138 V la durée du niveau haut (sans C_L) calculée à partir de l'équation (11) est de 4,58 ms. Avec la valeur de C_L appropriée, le signal filtré en sortie est indiqué en trait plein figure 13.

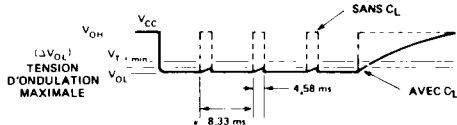


FIGURE 13 — Signal en sortie du HCPL-3700

L'amplitude d'ondulation maximale au-dessus de $V_{OL} + \Delta V_{OL} = 1V$, ce qui donne une marge de bruit de 0,5 V avant d'atteindre $V_{T+}(\text{min}) = 1,5V$. La forme exponentielle de l'ondulation est provoquée par la charge de C_L à travers R_L et la résistance d'entrée R_{INTTL} de la porte logique. La variation de V_{OL} admise est de la forme :

$$\Delta V_{OL} = (V_{OH} - V_{OL})(1 - e^{-t/\tau}) \quad (25)$$

avec $\tau = R'_L C_L$ et R'_L étant la résistance équivalente à R_L et R_{INTTL} montées en parallèle.

En dessous de $V_{T+} = 1,5V$ (min), R_{INTTL} est constante et égale à 6 k Ω . D'où :

$$R'_L = \frac{R_L R_{INTTL}}{R_L + R_{IN}} \quad (26)$$

$$= \frac{(1,65 \text{ k}\Omega)(6 \text{ k}\Omega)}{1,65 \text{ k}\Omega + 6 \text{ k}\Omega}$$

$$R'_L = 1,29 \text{ k}\Omega$$

L'équation (25) permet de calculer τ :

$$\tau = \frac{t}{\ln\left(\frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_{OH} - V_{OL} - \Delta V_{OL}}\right)} \quad (27)$$

En remplaçant les symboles par leur valeur déterminée plus haut et en utilisant la formule $V_{OH} = V_{CC} - (I_{OH} + I_{IH})R_L$:

$$\tau = \frac{4,58ms}{\ln\left(\frac{4,8V - 0,4V}{4,8V - 0,4V - 0,6V}\right)}$$

$$\tau = 31,24ms$$

C_L peut être calculée directement :

$$C_L = \frac{\tau}{R'_L} \quad (28)$$

$$= \frac{31,24 \text{ ms}}{1,29 \text{ k}\Omega} \quad \text{c'est-à-dire, un condensateur}$$

$$C_L = 24,2 \mu\text{F} \quad \text{de } 27 \mu\text{F} \pm 10\%$$

ou de $33 \mu\text{F} \pm 20\%$

Avec cette valeur de C_L , le temps d'établissement pour que le réseau $R'_L C_L$ permette d'atteindre V_{T+} de la porte TTL est donné par :

$$V_{OL} + (V_{OH} - V_{OL}) (1 - e^{-t/\tau}) = V_{T+} \quad (29)$$

En résolvant par rapport à t :

$$t = \tau \ln \left(\frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_{OH} - V_{T+}(\text{min})} \right) \quad (30)$$

et en remplaçant V_{OH} par 4,8 V, V_{OL} par 0,4 V, $V_{T+}(\text{min})$ par 1,5 V et τ par 31,24 ms :

$$t = 9 \text{ ms}$$

Cette valeur correspond au temps que met le système à répondre à une baisse de tension de la ligne en dessous du niveau de seuil 50% (V_-). En bref, le temps de réponse est légèrement plus long qu'un demi cycle à 60 Hz (8,33 ms) dans les cas les plus défavorables de variation du secteur. Ce retard est acceptable dans un système de protection secteur. Dans cette exemple, le cas le plus défavorable n'a pas été étudié. Il faudra faire cette analyse pour s'assurer du bon fonctionnement du circuit en fonction du secteur disponible pour toutes les variations possibles des différents paramètres, des tolérances des composants et de la température.

Amélioration de la précision des seuils

Dans les exemples précédents de filtrage en sortie, les deux niveaux de seuil extérieurs étaient définis pour des conditions de démarrage à $V_+ = 122,5 \text{ V}$ (75%) et d'arrêt à $V_- = 81,5 \text{ V}$ (50%). La valeur calculée de R_X était de 17,4 k Ω , celle de R_P de 1,2 k Ω . En utilisant des résistances de 18 k Ω et de 1,2 k Ω à 5%, le niveau de seuil supérieur atteint 126,6 V.

En étudiant la combinaison la plus défavorable des variations de V_{TH+} , I_{TH+} du photocoupleur, des tolérances à $\pm 5\%$ de R_X et R_P , on s'apercevra que la variation résultante dans le niveau de V_+ peut être comprise entre + 23% et - 25% du résultat escompté.

Si une précision supérieure du niveau est nécessaire, elle peut être obtenue en diminuant R_P pour que sa valeur domine par rapport aux variations de résistance d'entrée du photocoupleur. En utilisant une résistance à 1% de valeur suffisamment faible, les tolérances sur V_+ peuvent être nettement améliorées. Les calculs suivants donnent la marche à suivre pour obtenir des niveaux de seuils de précision presque maximale. Il est à noter que les HCPL-3700 sont très homogènes une fois les résistances extérieures déterminées pour un niveau et un HCPL-3700 donnés. Le seul compromis admis, dans la maîtrise supplémentaire de la précision, est que R_X et R_P aient une dissipation plus forte.

La figure 14 suppose que le circuit est au niveau supérieur de seuil. Pour V_{TH+} constant, on désire maintenir I_+ à moins de $\pm 5\%$ de sa valeur nominale alors que I_{P+} ne doit pas varier de $\pm 1\%$. Avec ces données, les équations (31) et (32) peuvent être posées et résolues en fonction de la grandeur de I_{P+} nécessaire au maintien des conditions de I_+ . I_+ est la somme de I_{P+} et de I_{TH+}

$$1,05 I_+ = 1,01 I_{P+} + I_{TH+}(\text{max}) \quad (31)$$

$$0,95 I_+ = 0,99 I_{P+} + I_{TH+}(\text{min}) \quad (32)$$

où

$$I_{TH+}(\text{max}) = 3,11 \text{ mA}$$

$$I_{TH+}(\text{min}) = 1,96 \text{ mA}$$

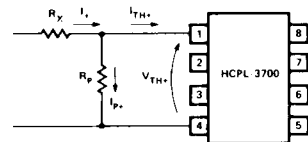


FIGURE 14 - Amélioration de la précision du seuil en utilisant les résistances extérieures R_X et R_P

En résolvant (31) et (32) par rapport à I_{P+} , on obtient :

$$I_{P+} = 11,2 \text{ mA},$$

et

$$R_P = \frac{V_{TH+}}{I_{P+}} \quad (33)$$

$$= \frac{5,1 \text{ V}}{11,2 \text{ mA}}$$

$$R_P = 433 \Omega, \text{ utiliser une résistance de } 453 \Omega, 1\%$$

R_x	T O L.	R_p	T O L.	TOLERANCE SUR I_+	TOLERANCE SUR V_+		PUISSANCE MAX DISSIPÉE DANS $R_x + R_p$ (eff.)
					+	-	
18 k Ω	5%	1,2 k Ω	5%	+17,5% -21,2%	+ 23%	- 25%	0,69 W
8,66 k Ω	1%	453 Ω	1%	$\pm 5\%$	+12,7%	-19,3%	1,45 W
4,32 k Ω	1%	205 Ω	1%	$\pm 3\%$	+11,2%	-18,9%	2,92 W
2,15 k Ω	1%	97,5 Ω	1%	$\pm 2\%$	+10,6%	-18,8%	5,89 W

TABLEAU 1 — Tolérances sur la précision du seuil en fonction des tolérances et de la dissipation de R_x et R_p à V_+ nominal = 122,5 V

Cette nouvelle valeur de R_p amène à calculer une nouvelle valeur pour R_x pour conserver le même niveau de seuil V_+ .

$$R_x = \frac{V_+ - V_{TH+}}{I_+} \quad \text{où} \quad I_+ = I_{p+} + I_{TH+} \quad (34)$$

$$= \frac{122,5V - 5,1V}{13,7mA}$$

$R_x = 8,57 \text{ k}\Omega$, utiliser une résistance de 8,66k Ω , 1%

Avec une variation de $\pm 1\%$ dans la valeur de R_p et R_x et pour les tolérances sur V_{TH+} et I_{TH+} du photocoupleur, le niveau de seuil supérieur variera nettement moins que dans le cas où l'on utilise des résistances à 5%. Les variations de V_+ , dont la valeur est donnée par $V_+ = R_x I_+ + V_{TH+}$ avec $I_+ = I_{p+} + I_{TH+}$ sont indiquées tableau 1.

Le tableau 1 résume l'amélioration apportée aux tolérances sur V_+ lorsque R_x et R_p sont ajustés pour limiter les variations du courant de seuil extérieur I_+ . Ce tableau est basé sur une tension de seuil extérieure à l'entrée V_+ de 122,5 V. C'est un compromis entre une faible dissipation et une grande précision du seuil.

Nota : La méthode de calcul de R_x et R_p peut être adaptée à toute application nécessitant des courants de régulation supérieurs.

Exemple 4 : Lignes spécialisées par commande à distance

Dans le cas où la distance entre la source de signal et la station réceptrice est importante, il peut être intéressant d'utiliser une ligne spécialisée pour surveiller le système. Le HCPL-3700 convient parfaitement comme interface de détection du seuil et de séparation entre la ligne et le système à distance. Il évite d'utiliser un modem compliqué et dispendieux sur la ligne téléphonique.

La figure 15 donne le principe d'un système de surveillance du niveau dans un réservoir.

Quelques précisions doivent être données quant aux lignes spécialisées. Leur utilisation amènent quelques restrictions. La ligne, dans notre exemple, est utilisée en mode coupure d'un circuit continu (durée de l'interruption toujours supérieure à 1 s). La différence de potentiel entre conducteurs, et, entre conducteurs et masse, ne doit pas dépasser 135 V. Le courant maximal est limité à 150 mA si le câble possède une bobine de compensation. L'usage d'une ligne symétrique est fortement recommandé pour limiter la diaphonie ou utiliser des signaux de plus grande amplitude. Des précautions doivent être prises pour protéger la ligne et les équipements. La ligne doit être équipée d'un fusible de protection contre les courants du court-circuit dans les équipements téléphoniques; de plus, il faut la protéger contre les transitoires dangereux par des éclateurs.

Dans la présente application, une source flottante 48 V fournit le signal sur la ligne. Le niveau de seuil supérieur du HCPL-3700 est fixé à $V_+ = 36 \text{ V}$ (75%). Le calcul nous donne comme valeur de R_x :

$$R_x = \frac{V_+ - V_{TH+}}{I_{TH+}} \quad (35)$$

$$= \frac{36V - 3,8V}{2,5mA}$$

$$= 12,9 \text{ k}\Omega$$

(Utiliser une résistance $R_x/2 = 6,49 \text{ k}\Omega$, 1% à chacun des niveaux d'entrée)

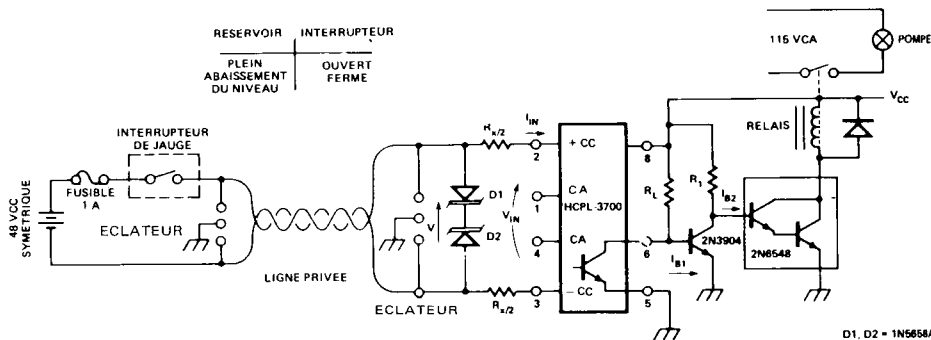
Le niveau de seuil inférieur résultant est de :

$$V_- = R_x I_{TH-} + V_{TH-} \quad (36)$$

$$= 13 \text{ k}\Omega (1,3mA) + 2,6V$$

$$V_- = 19,5V$$

d'où un V_{HYS} de 16,5 V. La tension alternative induite par les lignes électriques adjacentes, en général inférieure à 10 V, n'affecte pas le HCPL-3700.



D1, D2 = 1N5658A

FIGURE 15 — Adaptation d'un HCPL-3700 à une ligne téléphonique privée en commande à distance

En condition normale (réservoir plein), le photocoupleur est hors service. Lorsque le réservoir se vide, l'interrupteur est fermé, la sortie du photocoupleur doit être inversée par un transistor pour exciter le Darlington de puissance qui commande le relais d'excitation du moteur. Le relais applique de la puissance CA au système de la pompe. Si $V_{CC} = 10\text{ V}$, $I_{B2} = 0,5\text{ mA}$ et $I_{B1} = 0,5\text{ mA}$:

$$R_1 = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{I_{B2}} \quad (37)$$

$$= \frac{10\text{ V} - 1,4\text{ V}}{0,5\text{ mA}}$$

$$R_1 = 17,2\text{ k}\Omega$$

$$(R_1 = 18\text{ k}\Omega)$$

$$R_L = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_{B1}} \quad (38)$$

$$= \frac{10\text{ V} - 0,7\text{ V}}{0,5\text{ mA}}$$

$$R_L = 18,6\text{ k}\Omega$$

$$(R_L = 18\text{ k}\Omega)$$

En utilisant les entrées alternatives du HCPL-3700, les considérations de polarité à l'entrée sont éliminées.

Généralités sur la protection des HCPL-3700

Les photocoupleurs 3700 permettent à la fois de définir des seuils et d'isoler optiquement des signaux de commande du bruit et des parasites industriels. La protection contre les transitoires qui pourraient endommager les circuits de

détection de seuil et les DEL est fournie intérieurement par les diodes Zener du pont double alternance et une résistance externe. En examinant la figure 1, on observe que les conditions d'écrêtage de la tension de seuil sont atteintes à la tension de Zener maximale plus la tension directe d'une diode polarisée.

Aux conditions d'écrêtage normales, le pont de diodes limite la tension appliquée au système et dévie le courant superflu qui pourrait endommager les circuits de détection de seuil ou surcharger les DEL. Les photocoupleurs HCPL-3700 supportent des courants de transitoires importants à l'entrée. Le courant continu maximal sur n'importe quelle entrée ou sortie peut atteindre 50 mA. Le courant de surcharge admissible est de 140 mA pendant 3 ms sur impulsions à la cadence de 120 Hz et le courant de transitoire peut atteindre 500 mA pendant 10 s sur impulsions de 120 Hz. La résistance R_X extérieure limite le courant en présence d'une transitoire de forte tension, l'amplitude de la tension de transitoire acceptable est directement proportionnelle à la valeur de R_X .

Toutefois, pour protéger le HCPL-3700 lorsque la tension d'entrée est fixée à un seuil, le courant maximal ne doit pas être dépassé. Un moyen extérieur d'améliorer la protection contre les transitoires est fourni par la figure 16.

Le condensateur C_p du filtre $R_X C_p$ doit être choisi pour avoir un point de coupure suffisamment bas pour que le filtre passe bas réduise les transitoires haute fréquence, sans toutefois atténuer la fréquence du signal. En se reportant aux montages précédents sans filtrage, $R_X = 37,4\text{ k}\Omega$ et si la bande passante nécessaire au filtre de transitoires est de 600 Hz, le calcul donne :

$$C_p = \frac{1}{2\pi f R_X} \quad (39)$$

$$C_p = 0,0071\mu\text{F} \quad (\text{Utiliser un condensateur de } 0,0068\mu\text{F à } 50\text{ Vcc})$$

Si une protection supérieure est nécessaire, le moyen le plus efficace est d'utiliser un suppresseur de transitoires commercialisé ou une varistance à oxyde métallique à l'entrée du réseau de résistance. Le niveau de suppression des transitoires doit être supérieur au niveau crête du signal. Les éléments suppresseurs de transitoires peuvent être montés en série ou en parallèle suivant la tension et la puissance à dissiper. Dans certains cas difficiles, l'utilisateur peut être amené à engager la dépense d'un système de suppression de transitoires.

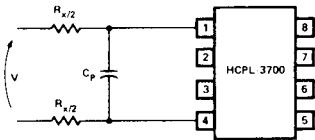


FIGURE 16 — Filtre de transitoires $R_X C_p$ pour HCPL-3700

Influence de la température

La température a peu d'influence sur le HCPL-3700. Le boîtier plastique DIP peut supporter de -25°C à $+85^{\circ}\text{C}$. Les caractéristiques limites sont valables à 70°C avec une certaine baisse des performances à 85°C . Jusqu'à 70°C , il n'est pas nécessaire de monter le HCPL-3700 sur radiateur. De 70°C à 85°C , les caractéristiques limites devront être réduites en fonction des données de la fiche technique.

Aspects mécaniques

Le HCPL-3700 en boîtier DIL 8 broches a été conçu pour servir d'interface entre des systèmes à puissance cc ou ca et des systèmes logiques. Il peut être soudé directement sur carte à la vague.

Aspects électriques

Certaines précautions doivent être prises dans le traçage des pistes de la carte, dont l'espacement doit répondre à certaines contraintes de sécurité (UL, VDE, IEC). Le

HCPL-3700 est agréé UL (n° de dossier E 55361) pour tous les essais de fonctionnement sous 220 V alternatif.

L'écartement des pistes dépend essentiellement de la différence de potentiel entre elles. Se reporter aux normes existantes. L'écartement dans le cas le plus défavorable et dans un environnement non défini, avec une source ayant une puissance maximale de 2000 V/A, est de 3,2 mm pour des tensions comprises entre 51 et 250 V eff. sur support (distance de grimper) ou 3 mm entre conducteurs dans l'air. Ces valeurs s'entendent entre éléments non isolés de polarités opposées ou entre élément et masse non isolée autre que châssis et partie métalliques accessibles.

Un environnement difficile est un environnement contaminé par vapeurs de produits chimiques, poussières ou toute substance pouvant produire des corrosions, réduire la résistance entre pistes du circuit imprimé et, en général, tout environnement malsain.

Entre 0 et 50 V, un espacement entre piste de 1,6 mm est suffisant.

Raccordement électrique

Le HCPL-3700 fournit l'isolement voulu entre l'environnement d'un signal de puissance et un système de commande logique. L'interconnexion entre ces deux environnements suppose l'observation de certaines règles physiques. Elle peut être réalisée avec des connecteurs encartables ou deux pièces, des barrettes à bornes qui permettent la jonction carte-fils. Ce type de connecteurs permet de retirer la carte sans difficulté en cas de réparation ou de remplacement. Ils doivent répondre aux normes de sécurité, en ce qui concerne l'écart entre contact et l'isolement. Le modèle de connecteur dépend de la carte de circuit imprimé : il est préférable d'utiliser un connecteur qui permette de retirer la carte sans toucher aux fils de liaison. Il est recommandé d'utiliser des connecteurs dont les contacts sont étanches aux gaz, les effets de la corrosion étant plus limités dans le temps.

APPENDICE

Abréviations et symboles

V	: Tension extérieure	V _O	: Tension de sortie du dispositif
V ₊	: Niveau de seuil extérieur supérieur	V _{OL}	: Tension niveau bas en sortie du dispositif
V ₋	: Niveau de seuil extérieur inférieur	V _{OH}	: Tension niveau haut en sortie du dispositif
V _{IHC1}	: Niveau d'écrêtage de la tension d'entrée des dispositifs* Tension inférieure en courant continu	I _{OH}	: Courant en sortie du dispositif à l'état haut
V _{IHC2}	: Tension inférieure en courant alternatif	I _{OL}	: Courant en sortie du dispositif à l'état bas
V _{IHC3}	: Tension supérieure en courant continu	I _{IH}	: Courant d'entrée niveau haut de la porte commandée
I _{IN}	: Courant d'entrée du dispositif	I _{IL}	: Courant d'entrée niveau bas de la porte commandée
V _{IN}	: Tension d'entrée du dispositif	V _{CC}	: Alimentation continue
V _{TH+}	: Niveau de seuil de la tension la plus haute du dispositif	R _{IN}	: Résistance d'entrée du HCPL-3700
V _{TH-}	: Niveau de seuil de la tension la plus basse du dispositif	V _{T+}	: Tension de seuil niveau haut de la bascule de Schmitt de la porte TTL (7414)
I _{TH+}	: Niveau de seuil du courant d'entrée supérieur du dispositif	R _L	: Résistance de charge en sortie
I _{TH-}	: Niveau de seuil du courant d'entrée inférieur du dispositif	C _L	: Capacité de filtrage en sortie
R _X	: Résistance série extérieure définissant le niveau de seuil extérieur	C	: Capacité de filtrage à l'entrée
R _p	: Résistance parallèle extérieure permettant simultanément le choix et l'amélioration de la précision des niveaux de seuil extérieurs	TH ₊	: Niveau de seuil supérieur
I _{p+}	: Courant dans R _p au niveau de seuil supérieur	TH ₋	: Niveau de seuil inférieur
I ₊	: Courant total d'entrée au niveau de seuil supérieur sur le réseau de résistances (R _X , R _p) et le dispositif	P _{R_X}	: Puissance dissipée dans R _X
V _{crête}	: Tension crête extérieure	P _{IN}	: Puissance dissipée par le circuit intégré du HCPL-3700
		PA	: Signal de porte à l'entrée du PIA
		t ₊	: Temps d'établissement
		t ₋	: Temps de coupure
		T	: Période de la forme d'onde
		C _p	: Condensateur de filtrage des transitoires

* Dispositif : HCPL-3700