

Les fiches techniques

36

Les machines tournantes Le moteur pas à pas



36 Moteur pas à pas

Un moteur pas à pas est un moteur qui comporte plusieurs bobinages au stator alimentés par une tension continue. Cette tension est commutée successivement sur les différents bobinages. Chaque commutation impose une position différente du rotor. La quantité élémentaire de déplacement du rotor est appelée « pas ».

Un nombre déterminé d'impulsions provoque un déplacement du rotor du même nombre de pas. Une suite d'impulsions à une fréquence déterminée permet d'imposer une vitesse constante.

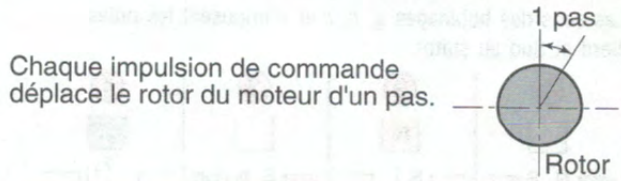
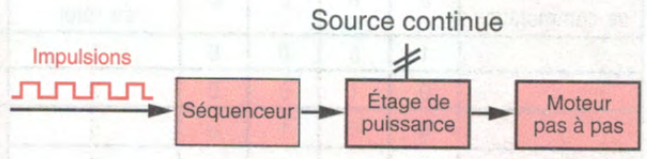
REMARQUE :

Le mode de commande du moteur pas à pas permet d'assurer un positionnement ou une vitesse précise sans boucle d'asservissement.

APPLICATION :

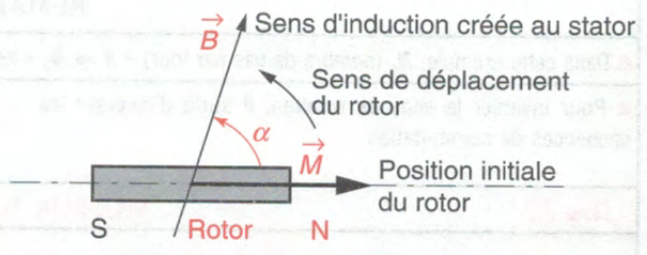
Photocopieurs, imprimantes, tables traçantes, instrumentation...

SYNOPTIQUE



MOTEUR À AIMANT PERMANENT

Principe de fonctionnement



$$T_{em} = \vec{M} \wedge \vec{B} \Rightarrow T_{em} = M \times B \times \sin \alpha$$

36.1 Différents types

Les moteurs pas à pas suivant leur technologie de base et leur construction se répartissent en trois groupes :

- les moteurs à aimant permanent ;
- les moteurs à reluctance variable ;
- les moteurs hybrides.

36.2 Moteur à aimant permanent

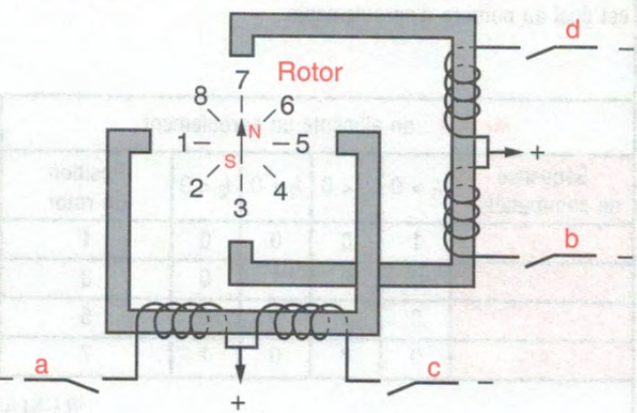
Il utilise le principe de l'action d'un champ magnétique (créé par les bobinages statoriques) sur un moment magnétique (aimant).

Le rotor aimanté présente un moment magnétique \vec{M} .

Un couple électromagnétique T_{em} tend à rendre les vecteurs \vec{M} et \vec{B} colinéaires en position d'équilibre stable en vertu du principe du flux maximal.

Avec une combinaison convenable des courants dans les bobinages statoriques, on impose la direction de l'induction \vec{B} , donc la position du rotor et le sens de rotation du moteur.

MOTEUR UNIPOLAIRE (À AIMANT PERMANENT)



EXEMPLE :

Moteur unipolaire à deux enroulements à point milieu (4 phases) et à deux pôles (N et S) au rotor.

36.21 Moteur unipolaire

Les enroulements à point milieu sont alimentés avec une polarité toujours de même signe. Le nombre de phases est égal au nombre de demi-enroulements.

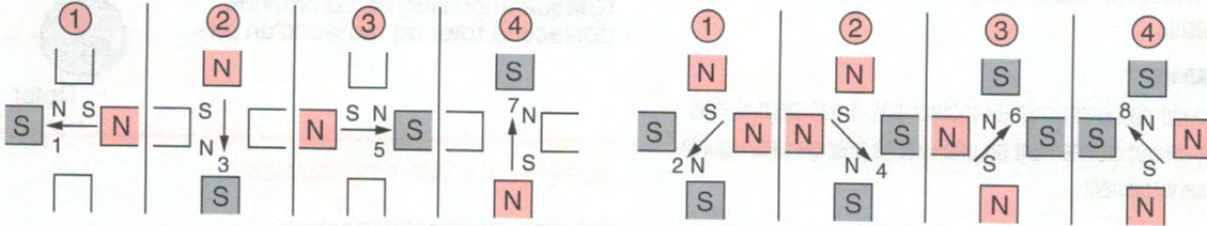
MODES D'ALIMENTATION DU MOTEUR UNIPOLAIRE

Mode 1 : on alimente successivement chaque demi-enroulement.

Mode 2 : on alimente successivement 2 demi-enroulements.

Séquence de commutation	a	b	c	d	Position du rotor	Séquence de commutation	a	b	c	d	Position du rotor
①	1	0	0	0	1	①	1	1	0	0	2
②	0	1	0	0	3	②	0	1	1	0	4
③	0	0	1	0	5	③	0	0	1	1	6
④	0	0	0	1	7	④	1	0	0	1	8

Les sens des bobinages a, b, c et d imposent les pôles Nord et Sud au stator.



REMARQUES

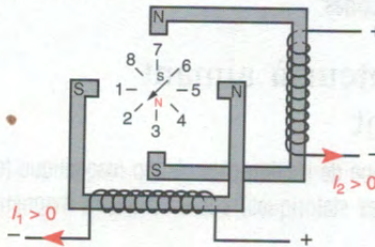
- Dans cet exemple, N_p (nombre de pas par tour) = 4 $\Rightarrow N_p =$ nombre de phases au stator x nombre de paires de pôles au rotor.
- Pour inverser le sens de rotation, il suffit d'inverser les séquences de commutation.
- En associant les modes 1 et 2, on obtient un fonctionnement en demi-pas, c'est-à-dire dans notre exemple 8 pas par tour.

36 ■ 22

MOTEUR BIPOLAIRE

Les enroulements au stator n'ont pas de point milieu. Chaque borne de chaque enroulement est alimentée successivement par une polarité positive puis négative (d'où le terme bipolaire). En inversant les polarités des enroulements statoriques, on inverse les pôles Nord et Sud au stator. Le nombre de phases est égal au nombre d'enroulements.

Moteur 2 phases, 2 pôles au rotor, alimentation bipolaire.



Mode 1 : on alimente un enroulement

Mode 2 : on alimente deux enroulements

Séquence de commutation	Mode 1				Position du rotor	Séquence de commutation	Mode 2				Position du rotor
	$i_1 > 0$	$i_1 < 0$	$i_2 > 0$	$i_2 < 0$			$i_1 > 0$	$i_1 < 0$	$i_2 > 0$	$i_2 < 0$	
①	1	0	0	0	1	①	1	0	1	0	2
②	0	0	1	0	3	②	0	1	1	0	4
③	0	1	0	0	5	③	0	1	0	1	6
④	0	0	0	1	7	④	1	0	0	1	8

REMARQUES

- Le principe de fonctionnement est identique à celui du moteur unipolaire.
- Le sens de rotation dépend du sens du courant et de l'ordre d'alimentation des bobinages.
- $N_p =$ nombre de phases au stator x nombre de pôles au rotor.

36.3 Moteur à reluctance variable

Circuit magnétique fermé

\mathcal{R} représente la reluctance du circuit magnétique.

La valeur de \mathcal{R} dépend des caractéristiques du circuit magnétique (longueur l , section S , perméabilité μ_r relative du matériau magnétique).

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0 \times \mu_r} \times \frac{l}{S} \quad (\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7})$$

Circuit avec entrefer ($\mu_r = 1$ dans l'air)

On démontre que :

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_{\text{circuit magnétique}} (\mathcal{R}_1) + \mathcal{R}_{\text{entrefer}} (\mathcal{R}_2).$$

$$\mathcal{R}_1 = \frac{1}{\mu_0 \times \mu_r} \times \frac{l - e}{S_1} \quad \mathcal{R}_2 = \frac{1}{\mu_0} \times \frac{e}{S_2}$$

S_2 : section du tube de champ au niveau de l'entrefer. Si l'on considère que le tube de champ a une section constante :

$S_1 = S_2$ alors \mathcal{R} avec entrefer $>$ \mathcal{R} sans entrefer.

Circuit avec entrefer variable

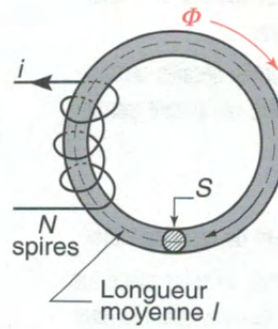
Dans un moteur, le rotor peut occuper 2 positions extrêmes remarquables.

Figure a : entrefer maximal, \mathcal{R} maximale.

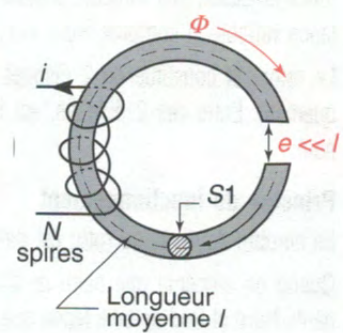
Figure b : entrefer minimal, \mathcal{R} minimale ($e_2 < e_1$).

Lorsque le rotor tourne, la reluctance \mathcal{R} du circuit magnétique varie, d'où le nom donné à ce type de moteur : moteur à reluctance variable.

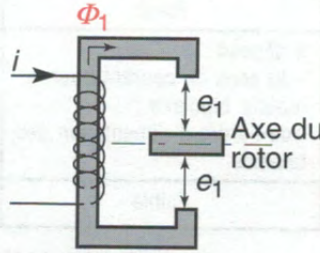
CIRCUIT MAGNÉTIQUE FERMÉ



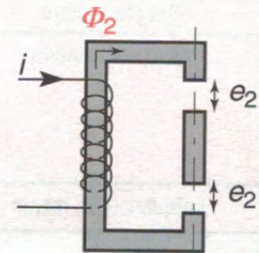
CIRCUIT AVEC ENTREFER



CIRCUIT AVEC ENTREFER VARIABLE



Entrefer maximal



Entrefer minimal

CONSTITUTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR À RELUCTANCE VARIABLE

Le rotor non aimanté est un cylindre en fer doux possédant un certain nombre de dents formant les pôles rotoriques.

Le stator formé d'un empilage de tôles possède des dents dans lesquelles sont logées les bobinages.

Le nombre de dents au rotor (n_r) et au stator (n_s) est différent.

Lorsqu'on alimente une paire de bobines, le rotor se place de façon que le flux qui le traverse soit maximal, donc reluctance \mathcal{R} minimale.

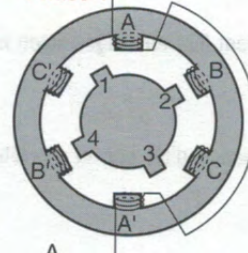
À chaque impulsion de courant sur une nouvelle paire de bobines, le rotor tourne d'un pas.

Nombre de pas par tour : $N_p = \frac{n_s \times n_r}{n_s - n_r}$.

Le sens de rotation ne dépend pas du sens du courant mais de l'ordre d'alimentation des bobines. On montre que pour imposer un sens de rotation, il faut au minimum 3 phases.

Considérons un moteur : 3 phases au stator ;
 $n_s = 6$ dents au stator ;
 $n_r = 4$ dents au rotor.

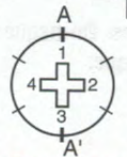
Phase 1



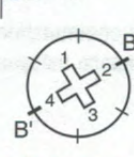
$N_p = 12$ pas/tour

Déplacement angulaire élémentaire :

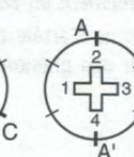
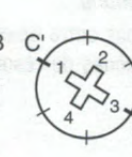
$\alpha_p = \frac{360^\circ}{12} = 30^\circ$



Bobines A et A' alimentées



Bobines B et B' alimentées



36.4 Moteur hybride

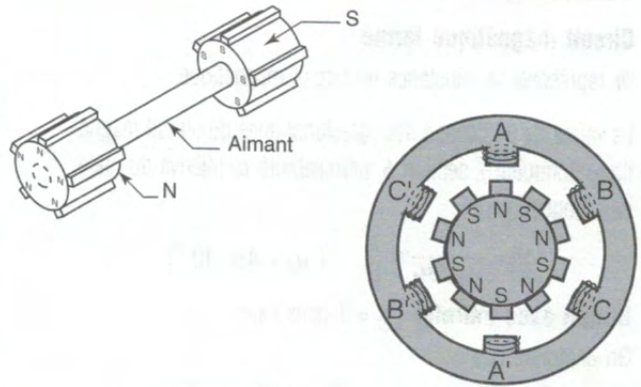
C'est un moteur reluctant polarisé. Il superpose le principe de fonctionnement des moteurs à aimant permanent et à reluctance variable et combine leurs avantages.

Le rotor est constitué de 2 disques dentés décalés mécaniquement. Entre ces 2 disques, est inséré un aimant permanent.

Principe de fonctionnement

Le nombre de dents au rotor est différent de celui du stator. Quand on alimente une paire de bobines, le rotor place les dents Nord et Sud de telle façon que le flux traversant le rotor soit maximal.

EXEMPLE : ROTOR À 2 PÔLES, 5 DENTS PAR PÔLE



36.5 COMPARAISON DES PERFORMANCES DES 3 TYPES DE MOTEURS PAS À PAS

Type de moteur	Moteur à aimant permanent	Moteur à reluctance variable	Moteur hybride
Résolution (nombre de pas/tour)	Moyenne	Bonne	Élevée
Couple moteur	Élevé	Faible	Élevé
Sens de rotation	Il dépend : - du sens du courant pour le moteur bipolaire ; - de l'ordre d'alimentation des bobines.	Il dépend uniquement de l'ordre d'alimentation des bobines.	Il dépend : - du sens du courant ; - de l'ordre d'alimentation des bobines.
Fréquence de travail	Faible	Grande	Grande

36.6 ÉTUDE DYNAMIQUE DU MOTEUR

MODES DE FONCTIONNEMENT

Chaque phase au stator reçoit des impulsions de courant d'une durée T .

La fréquence de travail est $f = 1/T$.

Deux modes de fonctionnement peuvent être envisagés selon la valeur de T .

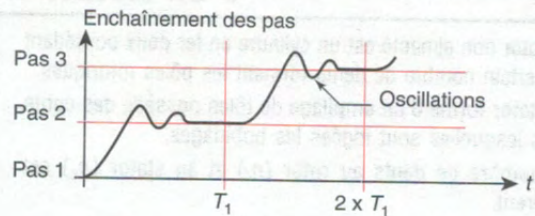
• **Fonctionnement par à-coups :**

Après une commutation, le rotor avance d'un pas et s'arrête avant la commutation suivante.

• **Fonctionnement en continu :**

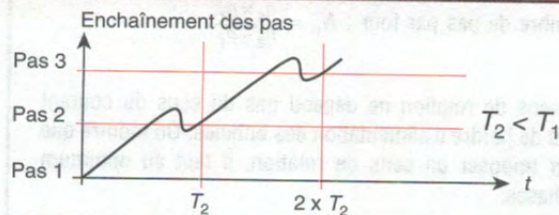
Le moteur ne s'arrête pas entre deux commutations. On risque d'observer des phénomènes de résonance mécanique.

Fonctionnement par à-coups



- Le rotor recherche sa position d'équilibre.
- Compte tenu de l'inertie et de l'accélération des masses en mouvement, il apparaît une série d'oscillations amorties.

Fonctionnement en continu



VITESSE LIMITE

Lors des commutations, le courant ne s'établit pas instantanément à cause de l'inductance des bobinages :

$$i_{\text{bobinage}} = I_c \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \text{ avec } I_c = I_{\text{consigne}} \cdot \tau$$

Si la fréquence de rotation augmente, le courant dans la bobine avant la commutation suivante n'a pas atteint sa valeur nominale. Le couple diminue et le moteur ne peut plus accélérer. Il existe donc une fréquence limite de rotation du moteur.

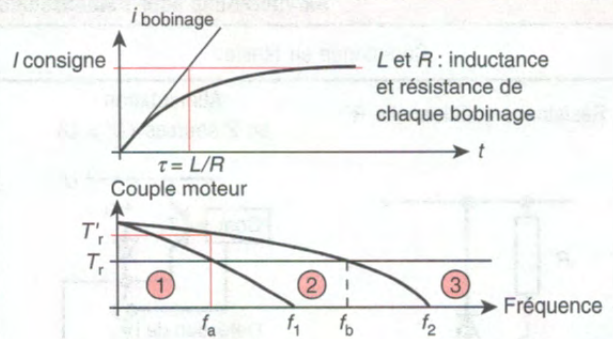
f_1 = fréquence limite de démarrage ou d'arrêt.

f_2 = fréquence limite d'entraînement.

Deux fonctionnements :

■ T_r fixe : Pour une charge imposant un couple T_r , le moteur démarre sans pertes de pas si $f < f_a$. Ensuite, il peut accélérer jusqu'à la fréquence f_b . L'arrêt sans pertes de pas doit se pratiquer par un retour à la fréquence f_a .

■ fréquence fixe f_a : Démarrage (f_a, T_r) ensuite on peut aller jusqu'à (f_a, T_r).



- ① Démarrage et arrêt du moteur sans perte de pas. Néanmoins, risque de résonance à basse fréquence.
- ② Vitesse trop grande pour obtenir l'arrêt sur le pas désiré. Le rotor dépasse la position imposée. Dans cette zone dite de survitesse, le fonctionnement est possible si le démarrage et l'arrêt du moteur se situent dans la zone 1.
- ③ Fonctionnement impossible, le moteur ne démarre pas.

36 ■ 7

ALIMENTATION DES MOTEURS PAS À PAS

Elle doit permettre d'établir, de maintenir et de couper le plus rapidement possible le courant imposé dans chaque bobinage.

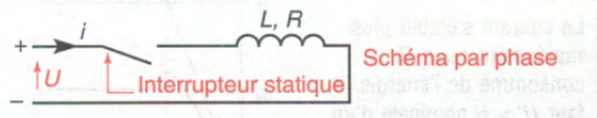
■ Pour que le courant atteigne rapidement sa valeur nominale, il faut :

- diminuer la constante de temps L/R en augmentant R ;
- augmenter la tension d'alimentation.

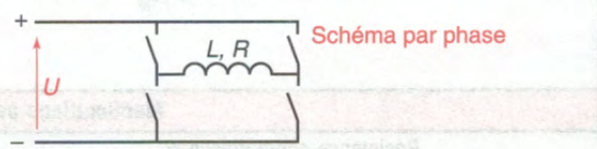
■ Pour que le courant s'annule rapidement, il faut dissiper l'énergie emmagasinée par la bobine en un temps très bref.

Le type de moteur impose la structure de l'alimentation (unipolaire ou bipolaire).

■ Moteur à reluctance ou moteur unipolaire à aimant permanent \Rightarrow alimentation unipolaire.



■ Moteur à aimant permanent bipolaire ou moteur hybride \Rightarrow alimentation bipolaire.



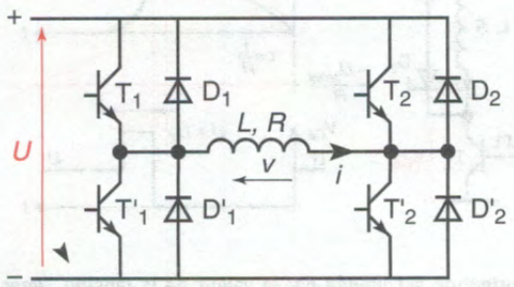
Ce montage nécessite 4 interrupteurs statiques.

36 ■ 71

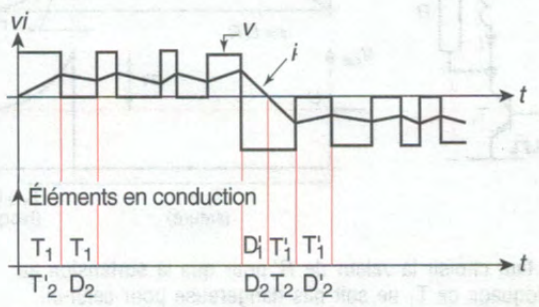
CIRCUIT D'ALIMENTATION BIPOLAIRE

Le pont complet est le plus utilisé.

Schéma pour une phase du moteur.



Exemple : Voir moteur bipolaire (mode ②) : séquences de commutation ① et ② : $i_1 > 0$ puis < 0 .



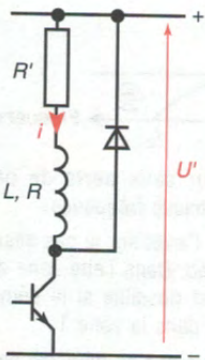
36 ■ 72

CIRCUIT D'ALIMENTATION UNIPOLAIRE

Améliorations pour l'établissement du courant (schéma par phase)

Commande en tension

Résistance additionnelle R'



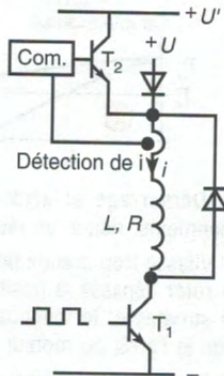
I = valeur de $i(t)$ en régime établi

$I = U' / (R + R') = U / R$
 $U = U$ nominale par enroulement

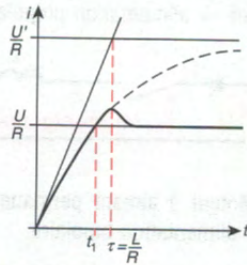
$\tau' = L / (R + R') < \tau$
 avec $\tau = L / R$

Le courant s'établit plus rapidement mais R' consomme de l'énergie. Il faut $U' > U$ nominale d'un enroulement du moteur.

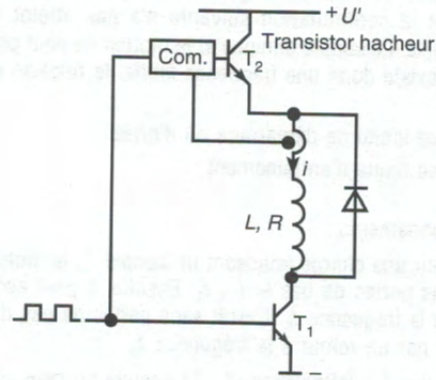
Alimentation en 2 sources ($U' > U$)



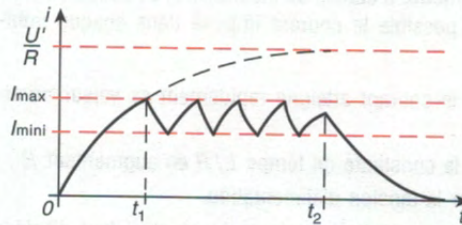
- $t = 0$, T_1 et T_2 passants.
- $t = t_1 < \tau$, i atteint la valeur I désirée, on remplace la source U' par $U \Rightarrow I = U / R$.



Commande en courant

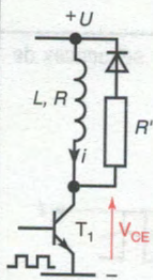


- $t = 0$: T_1 et T_2 saturés, le courant i croît.
- $i > I_{max}$: T_2 bloqué, T_1 saturé, i diminue.
- $i < I_{min}$: T_1 et T_2 saturés, i croît.
- entre les instants t_1 et t_2 , le transistor T_2 fonctionne en hacheur.
- $t = t_2$: T_1 et T_2 bloqués, i diminue puis s'annule.

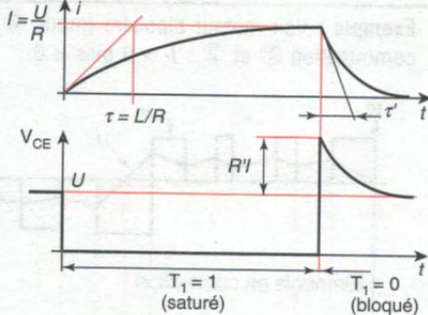


Améliorations pour la coupure du circuit

Résistance additionnelle R'

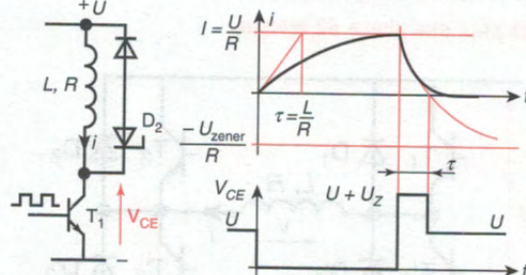


La constante de temps du circuit d'extinction est : $\tau' = L (R + R')$.



Il faut choisir la valeur de R' pour que la surtension au blocage de T_1 ne soit pas dangereuse pour celui-ci.

Diode Zéner D_2



La surtension est limitée par la valeur de la tension Zéner.

36.8 Circuits intégrés pour la commande de l'étage de puissance

De nombreux constructeurs proposent des circuits intégrés regroupant une logique de commande dont la fréquence détermine la fréquence de commutation des pas.

Ces circuits gèrent eux-mêmes l'ordre de succession des informations pour les différentes phases du moteur. Ils sont donc généralement spécifiques pour chaque type de moteur pas à pas, unipolaire, bipolaire, à aimant permanent, hybride. Une information logique supplémentaire impose le sens de rotation du moteur.

Parfois, l'étage de puissance (transistors et diodes de roue libre) est inséré dans ces circuits.

Fabricant	Référence	Commande	Tension maximum	Courant / Phase max.
MIETEC	MTC 6017 MTC 6018	Bipolaire	40 V 40 V	800 mA 800 mA
MOTOROLA	SAA 1042 SAA 1042 A	"	12 V 24 V	500 mA 500 mA
RIFA	PBL 3717 PBD 3517 PBA 3219	"	45 V 40 V 45 V	500/800 mA 350 mA 800 mA
SANKEN	SI 7230 E-WI/SI 7201A	"	50 V	1,5 A
SGS	L 293 L 295 L 298 PBL 3717 A	"	36 V 45 V 50 V 46 V	300 mA 2 A 2 A 1 A
TEXAS	TL 376 CNE	"	18 V	500 mA
SANTO	PHM 8713	Unipolaire	18 V	20 mA
SANKEN	SI 7115 B	"	30 V	1,5 mA
SIGNETICS/R TC	SAA 1027	"	18 V	500 mA

Application 1 : Commande d'un moteur pas à pas à aimant permanent (Moteur 4 phases unipolaire ID 28001 R.T.C.)

Circuit intégré utilisé : Circuit SAA 1027 R.T.C.

Table de vérité du circuit SAA 1027

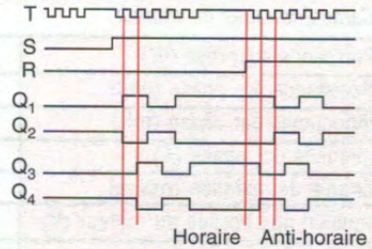
Déclenchement (T)

Le déclenchement se produit sur les fronts positifs des impulsions d'entrée selon la table de vérité ci-dessous.

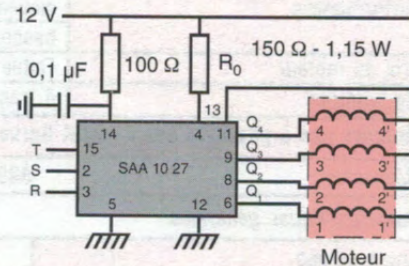
S = H

Sens horaire					Sens anti-horaire				
R = L					R = H				
T	Q1	Q2	Q3	Q4	T	Q1	Q2	Q3	Q4
0	L	H	L	H	0	L	H	L	H
1	H	L	L	H	1	L	H	H	L
2	H	L	H	L	2	H	L	H	L
3	L	H	H	L	3	H	L	L	H
4	L	H	L	H	4	L	H	L	H

Diagramme des impulsions



Montage d'application

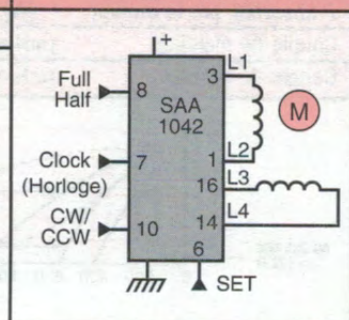
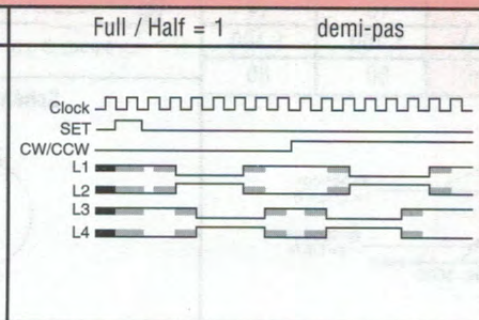
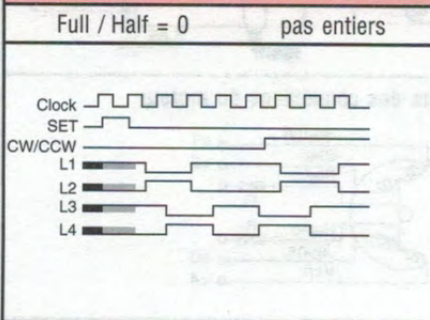


Application 2 : Commande d'un moteur pas à pas bipolaire 2 phases (Moteur 2 phases bipolaire à aimant permanent Crouzet)

Circuit intégré utilisé : Circuit SAA 1042 de Motorola

Diagramme des impulsions

Montage d'application



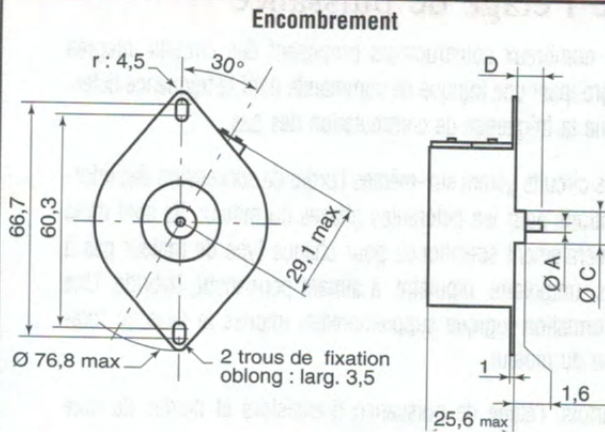
36.9

DOCUMENTATION TECHNIQUE

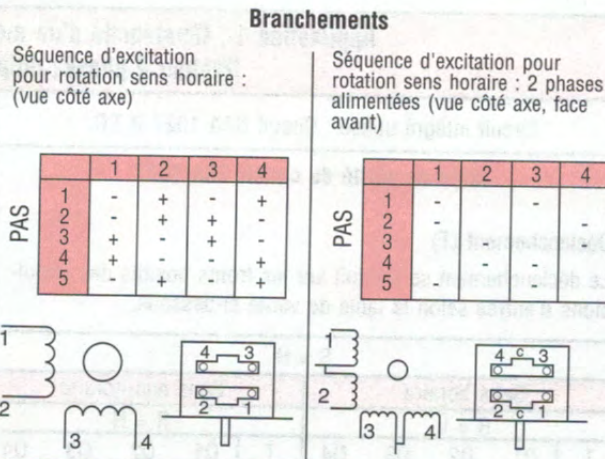
Moteurs pas à pas à aimant permanent - 48 pas/tour (7,5°)

Type 829200

Référence du moteur	82920001	82920019
Nombre de phases	2	2
Commande électronique utilisée	Bipolaire	Bipolaire
Caractéristiques du moteur		
Puissance absorbée (W)	7,5	7,5
Résistance par phase (ohm)	10,7	46
Inductance par phase (mH)	24	80
Intensité par phase (A)	0,59	0,287
Couple de maintien (mN.m)	70	70
Tension aux bornes du moteur (V)	6,3	12,9
Performances	élevées en B.F. basses en H.F.	
Prix du moteur	Faible	
Électronique	8 transistors	



Référence du moteur	82920002	82920012
Nombre de phases	4	4
Commande électronique utilisée	Unipolaire	Unipolaire
Caractéristiques du moteur		
Puissance absorbée (W)	7,5	7,5
Résistance par phase (ohm)	10,7	46
Inductance par phase (mH)	9	48
Intensité par phase (A)	0,59	0,28
Couple de maintien (mN.m)	57	57
Tension aux bornes du moteur (V)	6,3	12,9
Performances	élevées en B.F. basses en H.F.	
Prix du moteur	Faible	
Électronique	4 transistors	



Moteurs pas à pas hybrides Crouzet Servo

Références	89905001	89905003
Caractéristiques générales		
Angle de pas (°)	1,8	1,8
Nombre de phases	4	4
Tension moteur (V)	1,8	5,5
Résistance par phase (Ω)	0,4	4,4
Inductance par phase (mH)	1,4	20
Intensité par phase (A)	4,5	1,25
P absorbée par le moteur (W)	16	14
Couple de maintien (mN.m)	1 100	1 100
Couple de détente (mN.m)	80	80

