

L'essentiel sur les – moteurs maxon DC et maxon EC

Le moteur en tant que transformateur d'énergie

Le moteur électrique transforme la puissance électrique P_{el} (courant I et tension U) en puissance mécanique P_{mech} (vitesse n et couple M).

Les pertes produites lors de l'opération se répartissent en pertes par frottement, qui font partie de P_{mech} , et des pertes par effet Joule P_J dans le bobinage (résistance R). Les pertes fer ne se produisent pratiquement pas dans les moteurs maxon DC. Dans les moteurs maxon EC, ces pertes sont assimilées aux pertes par frottement. Le bilan des puissances peut ainsi être présenté de la manière suivante:

$$P_{el} = P_{mech} + P_J$$

En détail, il s'agit de

$$U \cdot I = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot I^2$$

Constantes électromécaniques du moteur

La disposition géométrique des circuits magnétiques et des bobinages définit en détail la transformation de la puissance électrique entrante (courant, tension) en puissance mécanique sortante (vitesse, couple). Deux chiffres caractéristiques de cette transformation d'énergie sont la constante de vitesse k_n et la constante de couple k_M . La constante de vitesse relie le nombre de tours n avec la tension induite dans le bobinage U_{ind} (FEM). U_{ind} est proportionnelle à la vitesse et elle se présente ainsi:

$$n = k_n \cdot U_{ind}$$

De manière analogue, la constante de couple relie le couple M avec le courant électrique I .

$$M = k_M \cdot I$$

Le principe de cette proportionnalité veut que les grandeurs physiques couple et courant soient équivalentes dans les moteurs maxon.

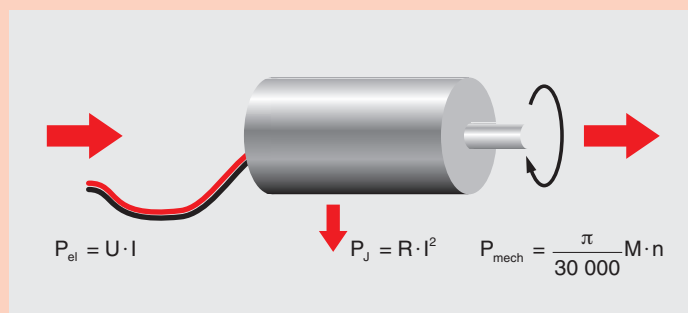
Voir aussi: Technique - sans détours, explications sur les données des moteurs

Unités

Dans toutes les formules, les grandeurs physiques figurent dans leur unité selon le catalogue (voir Grandeurs physiques et leurs unités, page 40).

Par exemple:

- Les couples sont exprimés en mNm
- Les courants en Ampères (y compris les courants à vide)
- Les vitesses de rotation en (tr / min) au lieu de vitesse angulaire (rad / s).



Constantes du moteur

La constante de vitesse k_n et la constante de couple k_M ne sont pas interdépendantes. D'où:

$$k_n \cdot k_M = \frac{30\,000}{\pi}$$

La constante de vitesse est également appelée vitesse spécifique. La tension spécifique, la constante génératrice spécifique ou constante de tension sont en principe l'inverse de la constante de vitesse et elles décrivent la tension induite en fonction de la vitesse.

La constante de couple est aussi appelée moment spécifique. L'inverse est appelé courant spécifique ou constante de courant.

Diagrammes du moteur

Pour chaque moteur maxon DC ou EC on peut dessiner un diagramme, dans lequel se trouvent toutes les caractéristiques utiles pour la plupart des applications. Bien que l'on ne tienne pas compte des tolérances et des influences de la température, les valeurs qu'il contient sont suffisantes pour en tirer les informations indispensables. Dans le diagramme, la vitesse n , le courant I , la puissance max. fournie P_2 et le rendement η sont représentés en fonction du couple M .

Courbe de vitesse

Cette courbe caractéristique illustre le comportement mécanique du moteur tournant à tension U constante:

- La vitesse décroît linéairement quand le couple augmente.
- Plus le moteur tourne vite, moins il peut fournir de couple.

Les deux points extrêmes, la vitesse à vide n_0 et le couple de démarrage M_H , servent à tracer la courbe caractéristique (cf. lignes 3 et 4 dans les caractéristiques moteur).

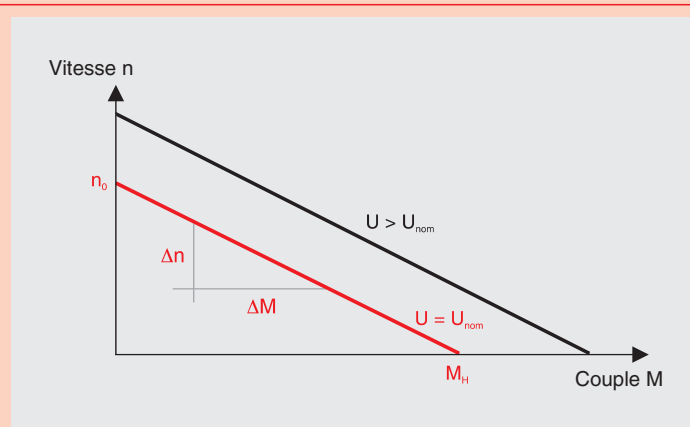
Les moteurs DC peuvent être alimentés sous diverses tensions. La vitesse à vide et le couple de démarrage varient en proportion de la tension appliquée, ce qui amène à déplacer parallèlement la courbe de vitesse dans le diagramme. Pour une bonne approximation on peut dire que la vitesse à vide et la tension appliquée sont proportionnelles.

$$n_0 \approx k_n \cdot U$$

k_n étant la constante de vitesse (ligne 15 des caractéristiques moteur).

Indépendante de la tension, la courbe est caractérisée par sa pente (ligne 5 des caractéristiques moteur).

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} = \frac{n_0}{M_H}$$



Dérivation de la courbe de vitesse

En remplaçant au moyen de la constante du couple le courant I par le couple M dans le bilan détaillé des puissances, on obtient:

$$U \cdot \frac{M}{k_M} = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot \left(\frac{M}{k_M} \right)^2$$

Transformée en tenant compte de l'interdépendance de k_M et de k_n , on obtient l'équation d'une droite entre la vitesse n et le couple M .

$$n = k_n \cdot U - \frac{30\,000}{\pi} \cdot \frac{R}{k_M^2} \cdot M$$

En considérant la pente de la courbe $\frac{\Delta n}{\Delta M}$ et de la vitesse à vide n_0 , on a:

$$n = n_0 - \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M$$

La pente de la courbe est une des caractéristiques probantes, permettant de comparer directement les différents moteurs. Plus la pente est faible, moins la vitesse est influencée par les variations de charge, donc plus le moteur est puissant. Pour un type de moteur donné (figurant sur la même page), la pente de la courbe reste pratiquement constante quel que soit le bobinage.

Courbe de courant

La courbe de courant exprime l'équivalence entre le courant et le couple. Le couple produit par le moteur augmente proportionnellement avec le courant. La courbe de courant peut être dessinée à partir des deux points terminaux : Le courant à vide I_0 et le courant de démarrage I_A (lignes 6 et 7 des caractéristiques moteur).

Le courant à vide correspond au couple de frottement M_R interne dû aux paliers et au système de commutation.

$$M_R = k_M \cdot I_0$$

Dans les moteurs maxon EC, les pertes par frottement dans le système de commutation sont remplacées par les pertes fer (dépendant de la vitesse) engendrées dans les tôles statoriques.

Le couple maximum est toujours développé par les moteurs à l'instant du démarrage. Il est de beaucoup supérieur au couple normal en service permanent. Par conséquent le courant de démarrage est le plus élevé.

Pour calculer le couple de démarrage M_H et le courant de démarrage I_A , on utilise :

$$M_H = k_M \cdot I_A$$

Courbe de la puissance en sortie

La puissance mécanique développée en sortie P_2 se calcule à partir de la vitesse n et du couple M .

$$P_2 = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M$$

Dans le diagramme couple-vitesse, la puissance produite correspond à la surface du rectangle en dessous de la courbe. Ce rectangle montre que la puissance produite est maximale à la moitié du couple de démarrage et à la moitié de la vitesse à vide. La courbe de la puissance présente un comportement parabolique dont la valeur maximale dépend quadratiquement de la tension appliquée (ligne 12 des caractéristiques moteur).

Courbe de rendement

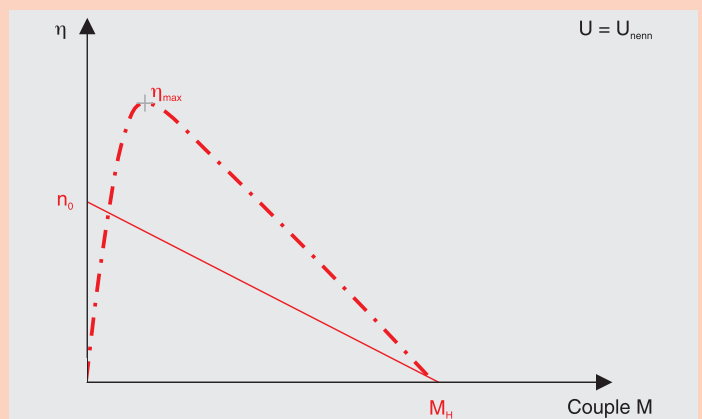
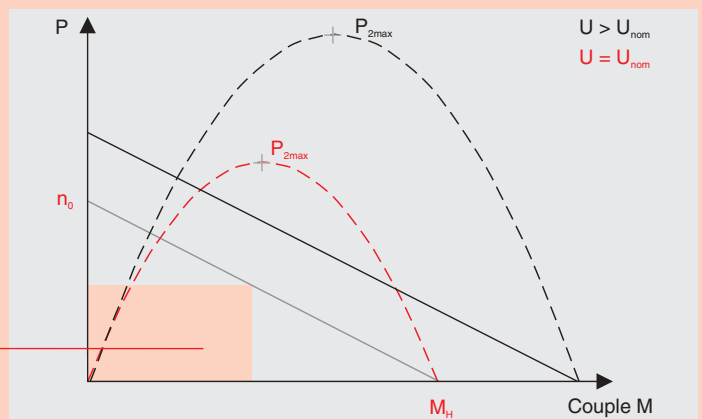
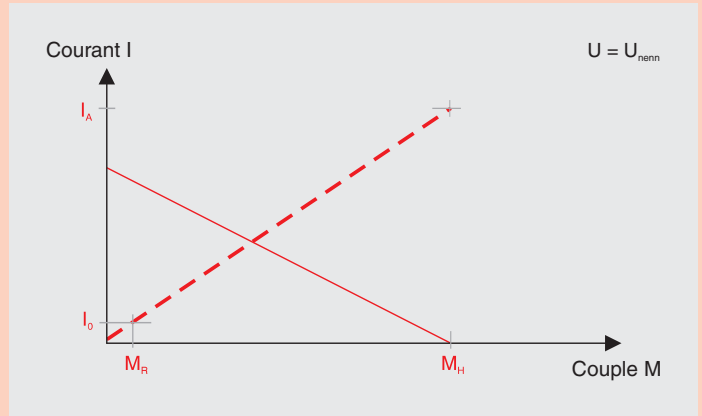
Le rendement η est constitué par le rapport entre la puissance mécanique produite et la puissance électrique d'entrée.

$$\eta = \frac{\pi}{30\,000} \cdot \frac{n \cdot M}{U \cdot I}$$

On peut y distinguer que pour une tension constante U et à cause de la proportionnalité entre le couple et le courant, le rendement augmente linéairement avec la vitesse (couple dégressif). Si le couple est faible, les pertes dues au frottement deviennent prépondérantes et le rendement tend alors rapidement vers zéro. Le rendement maximal (ligne 13 des caractéristiques moteur) dépend de la tension et il peut se calculer à partir du courant de démarrage et du courant à vide.

$$\eta_{\max} = \left(1 - \sqrt{\frac{I_0}{I_A}} \right)^2$$

Le rendement maximal se trouve environ à un septième du couple de démarrage. Le rendement maximum et la puissance maximale engendrée ne se produisent pas pour la même valeur du couple.



Domaines de fonctionnement: les limites du moteur

Dans le catalogue on trouve pour chaque type de moteur maxon DC et EC un diagramme qui résume la série des bobinages et les limites d'exploitation:

La vitesse maximale

est essentiellement conditionnée par le système de commutation. Si la vitesse est élevée le collecteur et les balais subissent une forte usure pour les raisons suivantes:

- Usure mécanique accélérée par le chemin parcouru par le collecteur
- Électroérosion aggravée par les vibrations des balais et la formation d'étincelles

Il faut aussi limiter la vitesse parce qu'elle diminue la durée de vie des paliers par le défaut d'équilibrage du rotor.

Une vitesse plus élevée que la vitesse limite n_{\max} (ligne 9) est possible, mais il faut s'attendre à une durée de vie réduite en conséquence.

Courant permanent max., couple permanent max.

A cause de la température maximale admissible par le bobinage, le courant permanent ne doit pas être dépassé lors d'un fonctionnement permanent. La chaleur produite doit pouvoir être dissipée et la température maximale du rotor ne doit pas être dépassée. Il en résulte un courant permanent max. I_{cont} (ligne 10 des caractéristiques moteur), pour lequel, dans les conditions standards (température ambiante de 25°C, pas de dissipation de chaleur par les flasques, libre circulation de l'air) la température maximale du bobinage est atteinte. Des courants plus élevés engendrent une température trop haute dans le bobinage. Le courant permanent max. dépend directement du type de bobinage. Si le fil est fin, le courant maximum toléré est plus faible que si le fil est épais. Dans les bobinages à basse résistance ohmique, la possibilité d'admission du courant peut être limitée par le système de commutation.

L'équivalence entre le courant du moteur et le couple fourni implique également une limite du couple permanent (ligne 11 des caractéristiques moteur). Ce couple permanent max. est pratiquement le même pour un type de moteur donné quel que soit la résistance et représente alors une valeur caractéristique du moteur.

Plage de fonctionnement permanent

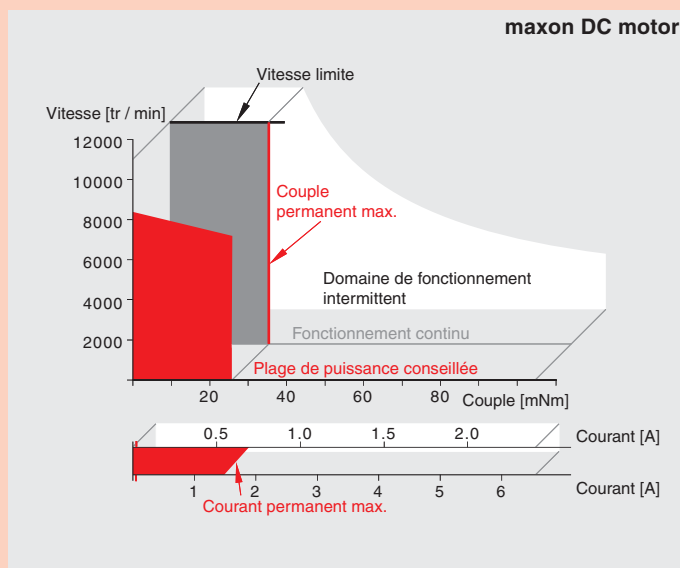
Les deux critères «couple permanent max.» et «vitesse limite» définissent la plage d'exploitation permanente. Tous les points situés à l'intérieur de ce domaine ne sont pas critiques thermiquement et ne causent pas d'usure trop élevée du système de commutation. Pour de nombreux moteurs DC, il est toutefois conseillé de ne pas trop s'approcher de ces valeurs limites afin de prolonger la durée de vie, en utilisant le moteur à une tension inférieure à la tension nominale. Cette zone d'activité est appelée plage de puissance conseillée.

Fonctionnement intermittent

Pour des raisons thermiques, le moteur ne doit être utilisé en service permanent qu'avec le courant permanent max. Mais pour quelques instants, des courants plus élevés sont tolérés (en surcharge). Tant que la température reste en dessous de la valeur critique, le bobinage ne peut pas être endommagé.

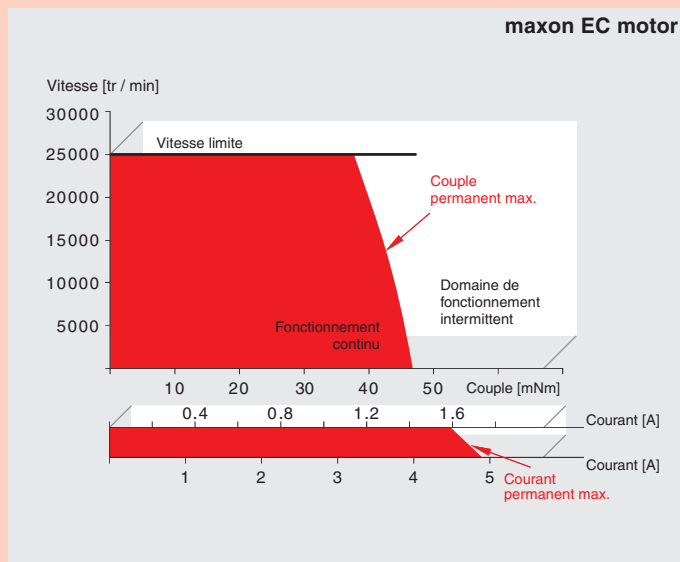
Les phases de surcharge restent cependant limitées dans le temps et une mesure de sa durée est donnée par la constante de temps thermique du bobinage (ligne 21 des caractéristiques moteur). Comme ordre de grandeur de durée de la surcharge on peut admettre quelques secondes pour les plus petits moteurs (10 à 13 mm de diamètre) jusqu'à environ une minute pour les plus grands (60 à 75 mm de diamètre). Le calcul exact de la durée de surcharge admissible dépend fortement du courant du moteur et de la température de départ du rotor.

Pour ne pas trop surcharger le système de commutation, nous conseillons de réduire la vitesse lors d'une grande surcharge. La limite supérieure du fonctionnement intermittent est alors représentée par une courbe hyperbolique de puissance mécanique constante.



Température max. du rotor

Le courant du moteur provoque un échauffement du bobinage à cause de sa résistance. Pour éviter un surchauffement du moteur, la chaleur produite doit être dissipée par le stator. La bobine auto-portante constitue l'élément thermique critique. La température maximale du rotor ne doit pas être dépassée, même un court instant. Dans les moteurs à balais en graphite supportant des courants plus élevés, elle peut atteindre 125°C (dans certains cas exceptionnels 155°C). Les moteurs à commutation en métaux précieux ne supportent que des courants plus faibles et la température du rotor ne peut pas dépasser 85°C. Certaines mesures constructives, telles que la bonne circulation d'air ou l'utilisation de tôles de refroidissement permettent de diminuer sensiblement les températures.



Plages de fonctionnement des moteurs maxon EC

La vitesse maximale est calculée à partir de la durée de vie attendue des roulements à billes (20 000 heures au moins) en tenant compte du défaut d'équilibrage du rotor.

La limite de la plage de fonctionnement permanent est liée à la température maximale du bobinage. Les pertes par courants de Foucault augmentant avec la vitesse contribuent aussi à l'échauffement. Ceci entraîne une diminution du courant permanent et du couple aux vitesses élevées.

L'accélération

Compte tenu des conditions électriques (alimentation, asservissement, batterie), il faut distinguer deux procédures de démarrage fondamentalement différentes:

- Démarrage à tension constante (sans limitation de courant)
- Démarrage à courant constant (avec limitation de courant)

Démarrage à tension constante aux bornes

Partant du couple de démarrage, la vitesse augmente en suivant sa courbe caractéristique. Le couple le plus élevée et donc l'accélération la plus forte est exercé lors du démarrage. Plus le moteur prend de la vitesse, plus l'accélération diminue. Cet accroissement diminue de façon exponentielle et il est caractérisé par la constante de temps mécanique τ_m (ligne 16 des caractéristiques moteur). Après le temps τ_m , le rotor, dont l'arbre est libre, atteint le 63 % de la vitesse à vide. Après environ trois fois la constante de temps mécanique, le rotor atteint sa vitesse à vide.

Le démarrage à courant constant

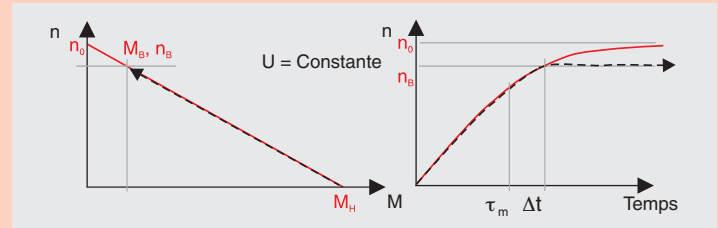
Une limitation de courant signifie toujours que le moteur ne peut fournir qu'un couple limité. Le diagramme vitesse-couple montre la croissance de la vitesse sur une ligne verticale si le couple reste constant.

L'accélération est alors constante, ce qui simplifie les calculs.

Le démarrage à courant constant se rencontre généralement dans les applications avec servoamplificateur, où le couple d'accélération est limité par le courant de pointe de l'amplificateur.

Quelques formules utiles pour calculer l'accélération

(toutes les grandeurs sont dans les mêmes unités que le catalogue)



A tension constante:

- Constante de temps mécanique τ_m (en ms) du moteur sans charge:

$$\tau_m = 100 \cdot \frac{J_R \cdot R}{k_M^2}$$

- Constante de temps mécanique τ_m' (en ms) lors de l'entraînement d'une masse inertielle supplémentaire J_L :

$$\tau_m' = 100 \cdot \frac{J_R \cdot R}{k_M^2} \left(1 + \frac{J_L}{J_R} \right)$$

- Accélération angulaire maximale α_{\max} (en rad / s²) du moteur sans charge:

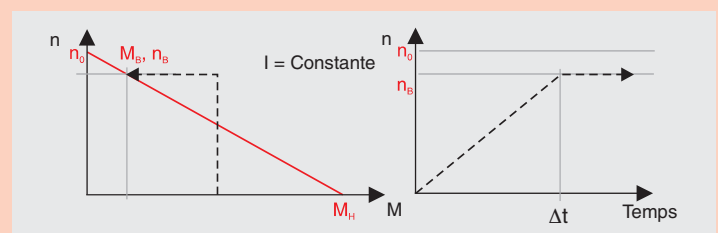
$$\alpha_{\max} = 10^4 \cdot \frac{M_H}{J_R}$$

- Accélération angulaire maximale α_{\max} (en rad / s²) lors de l'entraînement d'une masse inertielle supplémentaire J_L :

$$\alpha_{\max} = 10^4 \cdot \frac{M_H}{J_R + J_L}$$

- Temps de montée en vitesse (en ms) à tension constante jusqu'au point de fonctionnement normal (M_B, n_B):

$$\Delta t = \tau_m' \cdot \ln \left(\frac{\left(1 - \frac{M_B + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0}{\left(1 - \frac{M_B + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0 - n_B} \right)$$



A courant constant:

- Accélération angulaire α (en rad / s²) à courant constant I ou à couple constant M avec entraînement d'une masse inertielle supplémentaire J_L :

$$\alpha = 10^4 \cdot \frac{k_M \cdot I}{J_R + J_L} = 10^4 \cdot \frac{M}{J_R + J_L}$$

- Temps de montée en vitesse Δt (en ms) en cas de modification de la vitesse Δn avec entraînement d'une masse inertielle supplémentaire J_L :

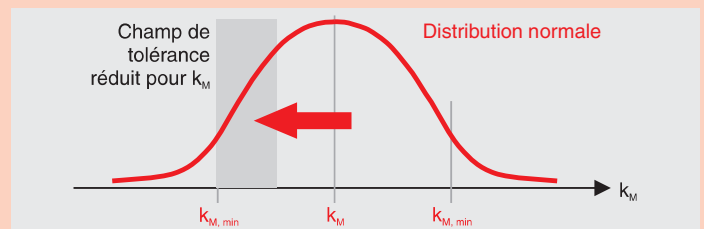
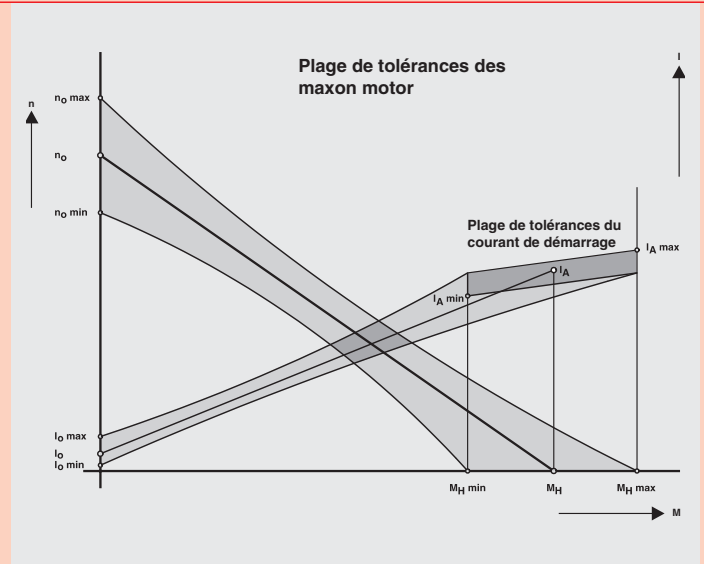
$$\Delta t = \frac{\pi}{300} \cdot \Delta n \cdot \frac{J_R + J_L}{k_M \cdot I}$$

Tolérances

Dans certains cas d'application, les tolérances ne sont pas toujours négligeables. Vous trouverez les écarts de tolérances mécaniques sur les plans d'encombrement moteur. Quant aux caractéristiques électriques des moteurs, seules les valeurs nominales sont indiquées. Sur le diagramme ci-contre, la plage de tolérances est la zone hachurée. Cette plage de tolérances est définie entre autre par la différence du champ magnétique et de la résistance du fil. Pour des raisons de compréhension cette plage a été exagérément agrandie. Vous constaterez que, au point de fonctionnement la plage est plus étroite qu'à vide ou au démarrage. Demandez nos fiches ordinateurs, vous y trouverez tous les détails.

Calibrage

Par une démagnétisation contrôlée des moteurs, les tolérances peuvent être restreintes. Les données des moteurs peuvent alors être spécifiées avec une exactitude de 1 à 3 %. De toutes façons, les caractéristiques moteur se situent dans la partie du bas de la plage de tolérance.



Comportement thermique

Les pertes par effet Joule P_J déterminent l'échauffement dans le bobinage du moteur. L'énergie thermique produite doit être dissipée par la surface du bobinage puis celle du moteur.

L'élévation ΔT_W de la température du bobinage T_W vis-à-vis de la température ambiante T_U est exprimée par les pertes par effet Joule P_J et les résistances thermiques R_{th1} et R_{th2} .

$$T_W - T_U = \Delta T_W = (R_{th1} + R_{th2}) \cdot P_J$$

La résistance thermique R_{th1} décrit la transmission de chaleur entre le bobinage et le stator (corps et aimant), alors que R_{th2} caractérise l'échange de chaleur entre le boîtier et l'environnement. Le montage du moteur sur un châssis absorbant la chaleur diminue fortement la résistance thermique R_{th2} . Les valeurs des résistances thermiques et du courant permanent max. figurant dans les caractéristiques moteur ont été obtenues par des séries d'essais en laboratoire, dans lesquels le moteur était monté frontalement sur une plaque verticale en matière plastique. Dans une application pratique, la résistance thermique R_{th2} doit être déterminée dans des conditions de montage et d'ambiance réelles.

L'échauffement se propage avec une rapidité différente entre le bobinage et le stator du fait de la différence des masses. Sitôt le courant enclenché, le bobinage s'échauffe en premier (avec une constante de temps de quelques secondes jusqu'à une demi-minute). Le stator réagit beaucoup plus lentement, car sa constante de temps est de 1 à 30 minutes selon la grandeur du moteur. Puis ensuite, l'équilibre thermique s'établit et la différence de température entre le bobinage et la température ambiante s'installe en service permanent en fonction du courant I (ou en fonctionnement cyclique de la valeur effective du courant $I = I_{RMS}$).

$$\Delta T_W = \frac{(R_{th1} + R_{th2}) \cdot R \cdot I^2}{1 - \alpha_{Cu} \cdot (R_{th1} + R_{th2}) \cdot R \cdot I^2}$$

Dans la formule la valeur de la résistance électrique R à température ambiante doit être insérée.

Influence de la température

Toute élévation de la température du moteur modifie la résistance du bobinage et les caractéristiques magnétiques.

La résistance du bobinage augmente linéairement avec le coefficient de résistance thermique du cuivre ($\alpha_{Cu} = 0.00392 \frac{1}{K}$):

$$R_T = R_{25} \cdot (1 + \alpha_{Cu} (T - 25^\circ C))$$

Exemple: Une température du bobinage de $75^\circ C$ provoque une élévation de la résistance du bobinage de près de 20 %.

L'aimant devient plus faible à haute température. Selon la matière magnétique utilisée, la perte varie de 1 à 10 % à une température de $75^\circ C$.

La conséquence essentielle de l'élévation de température du moteur est que la courbe de vitesse devient plus raide et que la valeur du couple de démarrage diminue. Ce couple peut être évalué en première estimation à partir de la tension et de la résistance plus élevée du bobinage.

$$M_{HT} = k_M \cdot I_{AT} = k_M \cdot \frac{U}{R_T}$$

Choix du moteur

Avant de choisir le moteur convenant, il faut définir exactement les exigences qui lui seront imposées.

- A quelle vitesse et avec quel couple la charge va-t-elle être déplacée?
- Quelle sera la durée de chacune des phases de charge?
- Quelles sont les valeurs des accélérations?
- Grandeur des moments d'inertie?

Très souvent, la traction est indirecte, car la puissance délivrée par le moteur subit une transformation mécanique, sous forme de courroie, d'engrenage, de vis sans fin ou autre. Les valeurs de traction doivent alors être converties au niveau de l'arbre du moteur. Les étapes pour calculer un réducteur se trouvent dans l'exemple de la page suivante.

Puis il faut définir les conditions de l'alimentation.

- Quelle tension maximale sera à disposition du moteur?
- Quelles sont les limites du courant?

En cas de fonctionnement sur piles ou à partir de cellules solaires, tant la tension que le courant sont soumis à des limites très strictes. Lors d'une alimentation de l'unité par un servoamplificateur, le courant maximum sera limité par celui-ci.

Sélection du type de moteur

Le choix du type de moteur s'effectue en fonction du couple nécessaire. D'une part il faut tenir compte du couple M_{\max} exigible en pointe, et d'autre part considérer le couple effectif M_{RMS} .

Le fonctionnement en permanence se caractérise par un point unique de fonctionnement (M_B , n_B). Les types de moteurs entrant en considération doivent alors fournir un couple permanent M_{cont} supérieur au couple d'exploitation M_B .

$$M_{\text{cont}} > M_B$$

Lors d'un fonctionnement cyclique (par ex. start-stop) le couple effectif doit être inférieur au couple permanent max. pour éviter de surchauffer le moteur.

$$M_{\text{cont}} > M_{\text{RMS}}$$

Dans la plupart des cas le couple de démarrage du moteur choisi devrait être supérieur au couple exigé en pointe.

$$M_H > M_{\max}$$

Sélection du bobinage: Exigences électriques

Lors du choix du bobinage, il faut s'assurer que la tension appliquée au moteur soit suffisante pour atteindre la vitesse désirée pour tous les points de fonctionnement.

Entraînement non-régulé

Dans les applications ne comportant qu'un seul point de fonctionnement, il suffit d'utiliser une tension fixe U . Il suffit alors de rechercher parmi les bobinages, celui qui atteint l'objectif à la tension imposée. Le calcul est simplifié par le fait que tous les moteurs du même type ont la même pente vitesse-couple.

En partant du point de fonctionnement (n_B , M_B), on calcule la vitesse à vide désirée ($n_{0, \text{theor}}$).

$$n_{0, \text{theor}} = n_B + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_B$$

Cette vitesse à vide théorique doit être atteinte avec la tension U , ce qui définit la constante de vitesse théorique $k_{n, \text{theor}}$.

$$k_{n, \text{theor}} = \frac{n_{0, \text{theor}}}{U}$$

Le bobinage dont la valeur k_n est la plus proche de la valeur théorique sera celui qui conviendra le mieux au point de fonctionnement désiré pour la tension imposée. Si la constante de vitesse est choisie plus grande, la vitesse sera plus élevée, si elle est plus petite, la vitesse sera plus basse. En faisant varier la tension d'alimentation, on peut ajuster la vitesse à la valeur exigée. Ce principe est également utilisé par les servoamplificateurs.

Le courant du moteur I se calcule à partir de la constante de couple k_M pour le bobinage choisi et le couple de service M_B .

$$I = \frac{M_B}{k_M}$$

Conseils pour l'évaluation des exigences:

Dans de nombreux cas, les points de charge (surtout les couples) sont inconnus ou difficilement mesurables. Si vous avez à disposition un laboratoire d'électronique voici ce qu'il faut savoir:

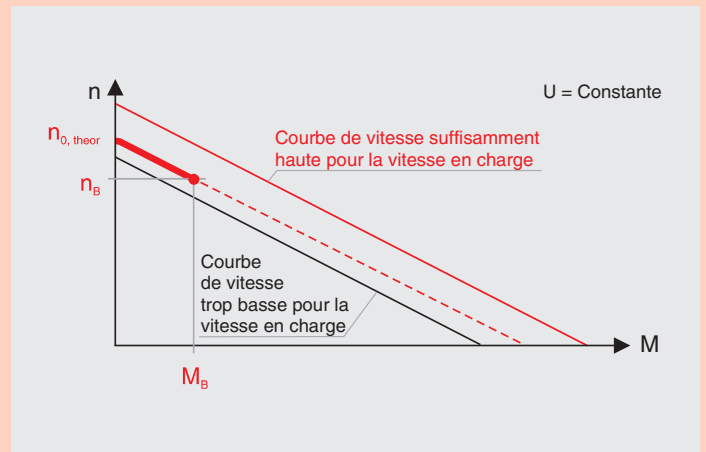
Nous avons remarqué que dans la pratique il était souvent difficile de solutionner un problème client uniquement par la théorie. Ainsi nous vous proposons ci-après une façon d'approcher d'une manière simple le type du moteur à employer. A l'aide d'un maxon DC motor que vous avez estimé selon son volume et sa puissance vous allez varier la tension jusqu'à l'obtention du point de fonctionnement. Notez ensuite la tension et le courant absorbé. A l'aide de ces valeurs ainsi que du type exact du moteur de mesuré, nos ingénieurs pourront vous orienter sur la version définitive adaptée au mieux à votre application.

Autres critères d'optimisation, comme par exemple:

- La masse à accélérer (genre, inertie)
- Fonctionnement (permanent, intermittent, réversible)
- Conditions environnementales (température, humidité, moyens de fixation et de refroidissement)
- Alimentations

Lors du choix du type du moteur, les conditions marginales jouent parfois un rôle très important:

- Longueur maximale du dispositif de traction, y compris réducteur et codeur
- Diamètre
- Durée de vie attendue du moteur, système de commutation
- Commutation par balais en métaux précieux pour service permanent sous faibles courants (estimation de la durée de vie, jusqu'à 50 % de I_{cont})
- Commutation par balais en graphite pour les courants élevés (estimation de 50 à 75 % de I_{cont}) et nombreuses pointes de courant (fonctionnement en Start-Stop, inversions du sens de marche, etc.).
- Commutation électronique pour hautes vitesses et longue durée de vie.
- Quelles sont les forces exercées sur l'arbre, faut-il utiliser des roulements à billes ou des paliers lisses sont-ils suffisants?

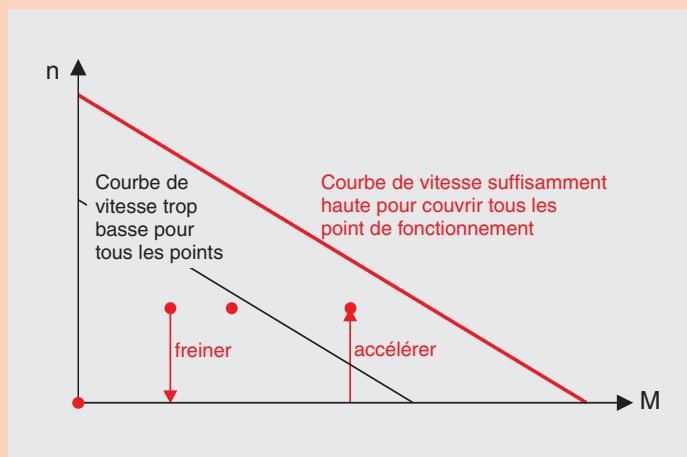


Servocommande régulée

Pour gérer les cycles de travail, tous les points de fonctionnement doivent se trouver en dessous de la courbe de vitesse à tension maximale U_{\max} . Mathématiquement, cela signifie que l'on doit vérifier pour chaque point de fonctionnement (n_B , M_B) que:

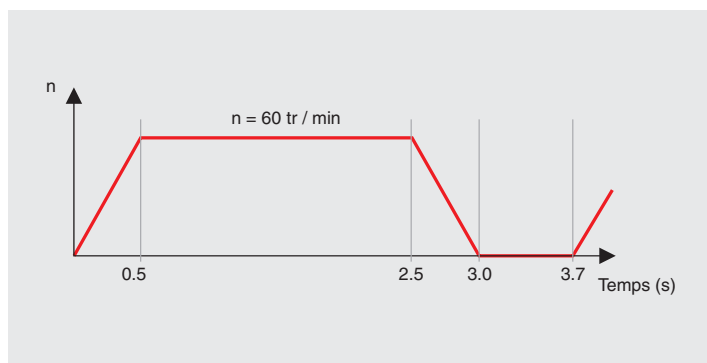
$$k_n \cdot U_{\max} = n_0 > n_B + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_B$$

Lors de l'utilisation de servoamplificateur, il se produit une faible chute de tension dans les transistors de puissance. La tension effective aux bornes du moteur est réduite d'autant. Il faut en tenir compte lors de la détermination de la tension d'alimentation U_{\max} . Il est recommandé de garder une réserve d'environ 20 %, afin que la régulation puisse être effectuée correctement, même en cas de tolérances défavorables du moteur, de la charge, de l'amplificateur et de la tension d'alimentation. Finalement il faut calculer le courant effectif et le courant de pointe et vérifier que le servoamplificateur peut délivrer ces courants. Cas échéant, il faut choisir un bobinage à résistance ohmique plus élevée pour diminuer les courants. Par conséquent la tension nécessaire sera plus élevée.



Exemple de choix d'un réducteur

Un entraînement doit effectuer un mouvement cyclique selon le diagramme ci-dessous.



L'inertie de la masse à déplacer J_L est de 120 000 gcm². Le couple de frottement est de 300 mNm. Le moteur doit être alimenté par un servoamplificateur 4-Q-linéaire de maxon (LSC). L'alimentation fournit un courant maximal de 5A sous 24V.

Calcul des données de la charge

Le couple nécessaire pour l'accélération et le freinage se calcule comme suit (en négligeant l'inertie du moteur et celle du réducteur).

$$M_\alpha = J_L \cdot \alpha = J_L \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} = 0.012 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{60}{0.5} = 0.15 \text{ Nm} = 150 \text{ mNm}$$

En tenant compte du couple de frottement, les couples suivants sont mis en oeuvre pour les diverses phases du mouvement:

– Phase d'accélération	(Durée 0.5 s)	450 mNm
– Vitesse constante	(Durée 2 s)	300 mNm
– Phase de freinage (le frottement contribue au freinage)	(Durée 0.5 s)	150 mNm
– Arrêt	(Durée 0.7 s)	0 mNm

Le couple de pointe doit être produit lors de l'accélération. Le couple effectif (RMS) applicable à l'ensemble du cycle de travail est alors de:

$$M_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{tot}}} (t_1 M_1^2 + t_2 M_2^2 + t_3 M_3^2 + t_4 M_4^2)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{3.7} (0.5 \cdot 450^2 + 2 \cdot 300^2 + 0.5 \cdot 150^2 + 0.7 \cdot 0^2)} \approx 280 \text{ mNm}$$

La vitesse maximale (60 tr / min) intervient en fin de la phase d'accélération lorsque le couple est maximum (450 mNm). La puissance mécanique de pointe prend ainsi la valeur suivante:

$$P_{\text{max}} = M_{\text{max}} \cdot n_{\text{max}} \cdot \frac{\pi}{30} = 0.45 \cdot 60 \cdot \frac{\pi}{30} \approx 2.8 \text{ W}$$

Grandeurs physiques

et leurs unités

	SI	catalogue
i	Rapport de réduction*	
I	Courant moteur	A, mA
I _A	Courant de démarrage*	A, mA
I ₀	Courant à vide*	mA
I _{RMS}	Courant effectif (RMS)	A, mA
I _{cont}	Courant permanent max.	A, mA
J _R	Inertie du rotor*	kgm ² , gcm ²
J _L	Moment d'inertie de la charge	kgm ² , gcm ²
k _M	Constante de couple*	Nm / A, mNm / A
k _n	Constante de vitesse*	tr / min / V
M	Couple	Nm, mNm
M _B	Couple de fonctionnement	Nm, mNm
M _H	Couple de démarrage*	Nm, mNm
M _{mot}	Couple du moteur	Nm, mNm
M _R	Couple de frottement	Nm, mNm
M _{RMS}	Courant effectif (RMS)	Nm, mNm
M _{cont}	Couple permanent max.*	Nm, mNm
M _{cont,g}	Couple permanent max. du réducteur*	Nm
n	Vitesse	tr / min
n _B	Vitesse de fonctionnement	tr / min
n _{max}	Vitesse limite du moteur*	tr / min
n _{max,g}	Vitesse limite du réducteur*	tr / min
n _{mot}	Vitesse du moteur	tr / min
n ₀	Vitesse à vide*	tr / min
P _{el}	Puissance électrique	W
P _J	Pertes Joule	W
P _{mech}	Puissance mécanique	W
R	Résistance aux borres	Ω
R ₂₅	Résistance à 25°C*	Ω
R _T	Résistance à température T	Ω
R _{th1}	Résistance thermique bobinage-carcasse	K / W
R _{th2}	Résistance thermique carcasse-air*	K / W
t	Temps	s
T	Température	°C
T _{max}	Temp. max. admissible du bobinage*	°C
T _U	Température ambiante	°C
T _W	Température du bobinage	°C
U	Tension appliquée au moteur	V
U _{ind}	Tension induite (FEM)	V
U _{max}	Tension max. d'alimentation	V
U _{nom}	Tension nominale*	V
α _{Cu}	Coefficient de résistance du Cu	
α _{max}	Accélération angulaire max.	rad / s ²
Δn/ΔM	Pente de la courbe vitesse / couple*	tr / min / mNm
ΔT _W	Diff. de temp. bobinage-environ.	K
Δt	Temps d'accélération	s, ms
η	Rendement du moteur	%
η _G	Rendement du réducteur*	%
η _{max}	Rendement maximum*	%
τ _m	Constante de temps mécanique*	s, ms
τ _S	Const. de temps therm. stator	s
τ _W	Const. de temps therm. bobinage*	s

(*indiquées dans les caractéristiques moteur ou réducteur)

Sélection du réducteur

Chercher un réducteur pour un couple permanent d'au moins 0.28 Nm et un couple intermittent d'au moins 0.45 Nm. Ces exigences peuvent être satisfaites par exemple à l'aide d'un réducteur planétaire d'un diamètre de 22 mm (en version métallique).

La vitesse maximale d'entrée est de 6000 tr / min et il permet une réduction maximale de

$$i_{\max} = \frac{n_{\max, G}}{n_B} = \frac{6000}{60} = 100 : 1$$

Choisissons un réducteur à trois étages, avec le rapport de réduction immédiatement inférieur 84 : 1 (programme stock). Le rendement maximum est de 59 %.

Choix du type de moteur

La vitesse et le couple au niveau de l'arbre du moteur doivent être recalculés.

$$n_{\text{mot}} = i \cdot n_B = 84 \cdot 60 = 5040 \text{ tr / min}$$

$$M_{\text{mot, RMS}} = \frac{M_{\text{RMS}}}{i \cdot \eta} = \frac{280}{84 \cdot 0.59} \approx 5.7 \text{ mNm}$$

$$M_{\text{mot, max}} = \frac{M_{\max}}{i \cdot \eta} = \frac{450}{84 \cdot 0.59} = 9.1 \text{ mNm}$$

Les moteurs possibles qui selon le système modulaire maxon conviennent au réducteur choisi ci-dessus figurent **dans la table ci-contre**.

Cette table ne contient que les moteurs avec balais en graphite, qui conviennent mieux pour le service en Start-Stop.

Le choix se porte sur un A-max 22, 6 W qui dispose d'un couple suffisant. Le moteur doit avoir une réserve de couple pour fonctionner même dans les cas de rendement défavorables du réducteur. Le besoin de couple lors de l'accélération peut être satisfaite sans problème par ce moteur. Le couple intermittent de pointe n'atteignant même pas le double du couple permanent max du moteur.

Choix du bobinage

Le moteur de type A-max 22, 6 W possède une pente de la courbe vitesse / couple d'environ 480 tr / min / mNm. Il faut toutefois noter que les deux bobinages de faible résistance ont une courbe de pente plus raide. La vitesse à vide se calcule ainsi:

$$n_{0, \text{théor}} = n_{\max} + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_{\max} = 5040 + 480 \cdot 9.1 = 9400 \text{ tr / min}$$

Dans le calcul, il faut tenir compte du point de fonctionnement extrême (vitesse maximale et couple maximum), car la courbe de vitesse doit surpasser tous les points de fonctionnement dans le diagramme vitesse-couple. La vitesse à vide désirée doit être atteinte avec la tension imposée par la commande: $U = 19$ volts (LSC: Chute de tension dans l'étage final 5 V). Ceci détermine la constante de vitesse minimale $k_{n, \text{théor}}$ du moteur.

$$k_{n, \text{théor}} = \frac{n_{0, \text{théor}}}{U} = \frac{9400}{19} = 495 \frac{\text{tr / min}}{\text{V}}$$

Le résultat du calcul incite à choisir le moteur 110162 dont le bobinage correspond à la constante de vitesse immédiatement supérieure (689 tr / min / V), avec un second bout d'arbre pour monter le codeur. Le choix du bobinage avec une constante de vitesse supérieure à la valeur désirée signifie que le moteur sous 19 V tourne plus vite que nécessaire ce qui sera compensé par la servocommande. Le choix opéré assure ainsi qu'une marge de manoeuvre de plus de 20 % sur la vitesse subsiste en cas de tolérances défavorables.

La constante de couple de ce bobinage est de 13.9 mNm / A. Le couple maximal correspond alors à un courant de pointe de

$$I_{\max} = \frac{M_{\max}}{k_M} = \frac{9.1}{13.9} < 0.7 \text{ A}$$

Ce courant est inférieur au courant maximal (2 A) du servoamplificateur (LSC).

On a ainsi trouvé un moteur avec réducteur qui remplit les conditions posées (couple et vitesse) et qui peut être commandé par le servoamplificateur prévu.

Moteur	M_{cont}	Aptitude
S2322, 6 W	13 mNm	un peu trop puissant, relativement long
A-max 22, 6 W	7.5 mNm	bon
A-max 19, 2.5 W	4.4 mNm	trop faible
RE-max 21, 6 W	8 mNm	bon

