

Thème de la problématique : Comment améliorer les performances du Pilote automatique de bateau (modèle TP32) afin de limiter sa consommation électrique et de permettre ainsi au skipper de bénéficier d'une plus grande autonomie d'énergie ?

Support de la démarche : Pilote automatique de bateau modèle TP32

Niveau : Fin PREMIERE – Début TERMINALE

Durée : Une séance de 2h



Pilote automatique TP32

Déroulé de la démarche expérimentale proposée dans le cadre de cette démarche d'amélioration de l'existant :

Durée estimée

| | | |
|--|--|---------|
| | Expression du besoin et spécification de l'exigence attendue du nouveau cahier des charges | 5 min. |
| | Détermination expérimentale du rendement global du pilote existant | 40 min. |
| | Modélisation multiphysique et simulation de la chaîne de puissance du pilote existant élaborée à partir de résultats expérimentaux fournis | 15 min. |
| | Analyse des écarts entre système réel et système modélisé et proposition de solution d'amélioration | 15 min. |
| | Modélisation multiphysique et simulation de la proposition d'amélioration de la chaîne de puissance en prédiction des performances du futur pilote | 10 min. |
| | Analyse des écarts de la solution d'amélioration proposée | 15 min. |
| | Validation des prédictions de performances et conclusion | 10 min. |



Expression du besoin et spécification de l'exigence attendue du nouveau cahier des charges

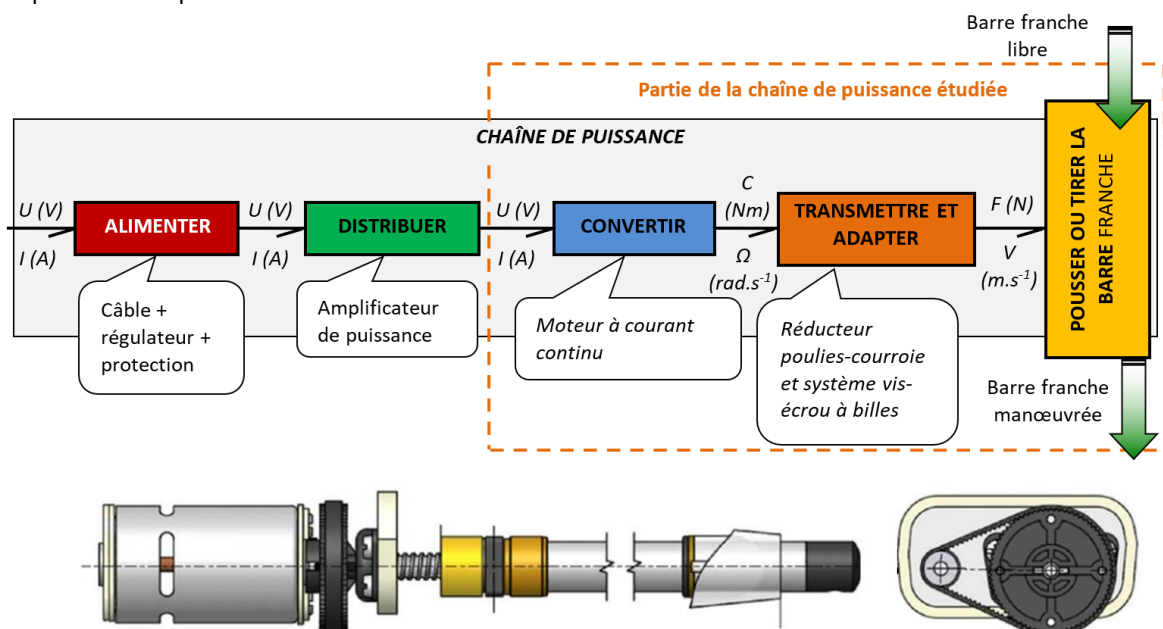
La société SIMRAD souhaite profiter du renouvellement de sa gamme de pilote automatique de bateau pour réduire de 15 %, à minima, la consommation électrique de son modèle TP32 sans nuire, pour autant, à ses autres performances.

| Exigence attendue | Critère | Niveau |
|--|--|---|
| Barrer automatiquement un bateau en consommant le moins possible d'énergie | Effort de poussée sur la barre | Jusqu'à : $F = 850 \text{ N}$ |
| | Course utile | $C_u = 250 \text{ mm}$ |
| | Temps pour effectuer la course à vide | Au plus 4 s |
| | Temps pour effectuer la course à 20 Kg | Au plus 4,7 s |
| | Temps pour effectuer la course à 40 Kg | Au plus 6 s |
| | Temps pour effectuer la course à 50 Kg | Au plus 8 s |
| | Puissance moyenne absorbée | Diminution minimum de 15 % par rapport au modèle TP32 existant |



Détermination expérimentale du rendement global du pilote existant.

La chaîne de puissance du pilote existant est la suivante :



Comment déterminer expérimentalement le rendement global de pilote existant lors de la montée d'une charge ?



Hypothèse simplificatrice : Les contraintes d'efforts subies par la barre et le safran associé se réduisent à un effort résultant ramené en bout de tige du vérin du pilote. Les pertes dans la poulie de renvoi du câble sont négligées.

→ Préparation de la démarche expérimentale

1- Rappeler l'expression de la puissance électrique à l'entrée de la chaîne en fonction de U_{alim} et I_{alim} en précisant les unités.

$$P_{\text{Electrique}} = ? \dots$$

2- Indiquer les appareils de mesure nécessaires pour déterminer $P_{\text{Electrique}}$.

3- Rappeler l'expression de la puissance mécanique en sortie de chaîne en fonction de F_{tige} et $V_{\text{rentrée tige}}$ en précisant les unités.

$$P_{\text{Mécanique}} = ? \dots$$

4- Indiquer les appareils de mesure nécessaires pour déterminer $P_{\text{Mécanique}}$.

→ Relevés de mesures APPELER LE PROFESSEUR et lui proposer oralement le protocole expérimental

Consignes d'utilisation du pilote automatique didactisé :

- Mettre l'alimentation 12V DC dédiée sous tension ;
- Appuyer sur « STBY AUTO » jusqu'à l'obtention du clignotement du voyant rouge ;
- Appuyer sur les poussoirs pour entrer ou sortir la tige.

ATTENTION : Ne pas maintenir les poussoirs enfoncés une fois la tige en butée !

5- Effectuer les mesures pour une montée de charge de 5 kg

$U_{\text{alim}} = ?$ $I_{\text{alim}} = ?$ Longueur de tige = ? Temps de montée = ?

→ Exploitation des relevés pour une montée de charge de 5 kg

6- Compléter le tableau suivant :

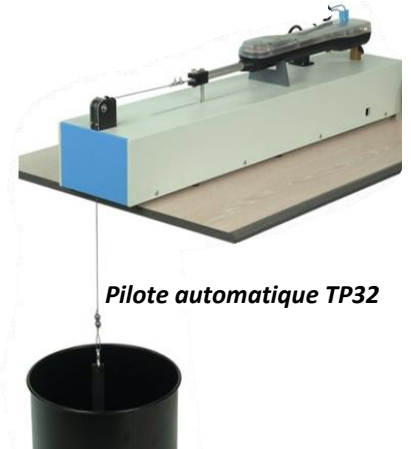
| Masse [kg] | U_{alim} [V] | I_{alim} [A] | $P_{\text{Electrique}}$ [W] | F_{tige} [N] | V_{tige} [m.s ⁻¹] | $P_{\text{Mécanique}}$ [W] | η_{global} (%) |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|--|----------------------------|----------------------------|
| 5 | | | | | | | |



Modélisation multiphysique et simulation de la chaîne de puissance du pilote existant élaborée à partir de résultats expérimentaux fournis

Des essais effectués sur le pilote TP32 en fonctionnement sur un voilier de taille intermédiaire (11 m) ont permis de déterminer un effort moyen appliqué par la barre franche sur la tige du pilote de $F_{\text{moy}} = 270 \text{ N}$.

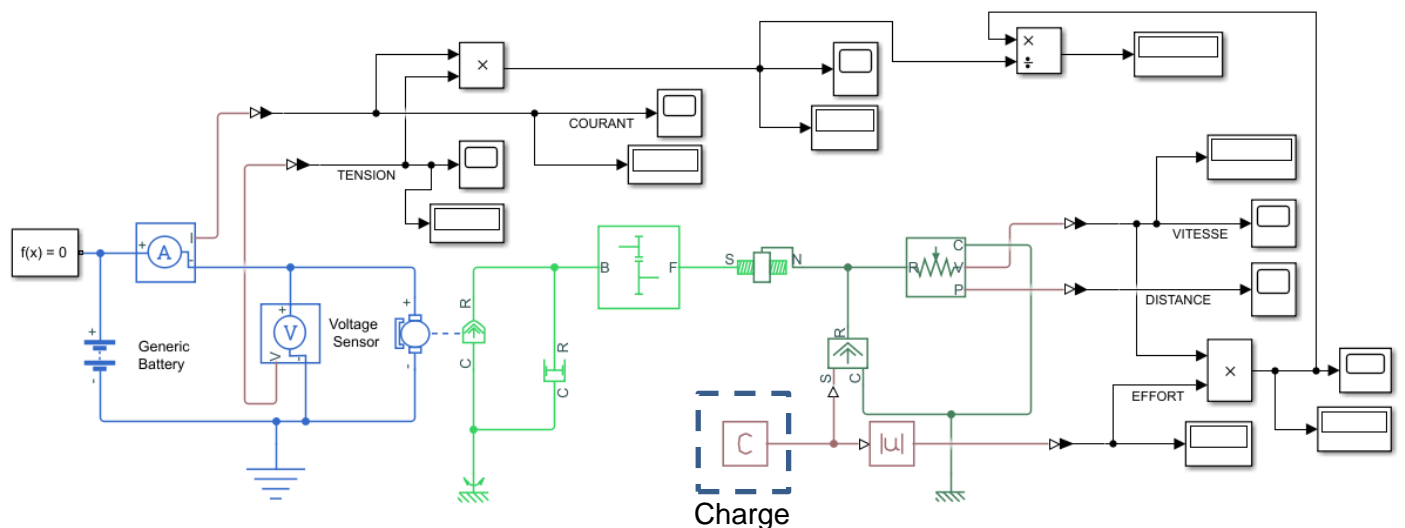
La ligne encadrée en rouge du tableau ci-après donne les relevés expérimentaux de grandeurs physiques caractéristiques obtenues sur la version didactisée du pilote lorsqu'il est soumis à cet effort moyen.



RELEVES DE REFERENCE

| Masse [Kg] | F _{tige} [N] | N _{moteur} [tr/min] | V _{tige} [m.s ⁻¹] | U _{moteur} [V] | I _{moteur} [A] | P _{absorbée} [W] par le moteur | P _{sortie tige} [W] | η _{moteurETtige} |
|------------|-----------------------|------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|--|------------------------------|---------------------------|
| 2.4 | 23.6 | 4430 | 0.062 | 11.2 | 1.5 | 16.8 | 1.5 | 0.09 |
| 7.4 | 72.6 | 4175 | 0.059 | 11.2 | 2 | 22.4 | 4.27 | 0.19 |
| 12.4 | 121.7 | 3920 | 0.055 | 11.1 | 2.4 | 26.6 | 6.72 | 0.252 |
| 17.4 | 170.7 | 3672 | 0.052 | 11 | 2.7 | 29.7 | 8.83 | 0.3 |
| 22.4 | 219.7 | 3415 | 0.048 | 10.9 | 3 | 32.7 | 10.56 | 0.323 |
| 27.4 | 268.8 | 3170 | 0.045 | 10.7 | 3.3 | 35.3 | 12 | 0.34 |
| 32.4 | 317.8 | 2895 | 0.041 | 10.5 | 3.7 | 38.9 | 12.95 | 0.333 |
| 37.4 | 366.9 | 2750 | 0.039 | 10.3 | 4.2 | 43.3 | 14.18 | 0.328 |

7- Ouvrir le fichier de MATLAB SIMULINK "PiloteRS755SH.slx" et encadrer le modèle du moteur.



→ SIMULATION de la chaine de puissance

8- Régler la charge à 270 N (affecter une valeur négative) puis lancer la simulation.

APPELER LE PROFESSEUR si besoin.

Visualiser la courbe d'évolution de la vitesse ainsi que celle du courant absorbé



Analyse des écarts entre système réel et système modélisé et proposition de solution d'amélioration

9- Compléter le tableau suivant pour F_{moy} = 270 N :

| Grandeur physique | Valeur réelle mesurée | Valeur simulée | Erreur absolue (réelle – simulée) | Erreur relative (%) |
|------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------------|---------------------|
| P _{absorbée} (W) | | | | |
| P _{sortie tige} (W) | | | | |
| η _{moteurETtige} | | | | |

Critère de validation d'un modèle multiphysique : Traditionnellement, un modèle est validé lorsque l'ensemble des grandeurs physiques simulées en régime établi ne s'écarte pas de plus de 5 % à 10 % des grandeurs données par le constructeur ou des grandeurs issues de relevés expérimentaux.

10- Selon ce critère de validation, conclure sur la crédibilité de notre modèle pour ce point de fonctionnement.

11- A des fins de synthèse de l'analyse de l'existant et d'orientation à donner pour la proposition d'amélioration qui suit, compléter le VRAI-FAUX suivant :

Synthèse de l'existant :

| | | |
|---|-------------|-------------|
| Le rendement de l'association des fonctions CONVERTIR et TRANSMETTRE + ADAPTER est suffisant. | VRAI | FAUX |
| Avec un rendement de 90% pour chacun des constituants de la fonction « Transmettre + Adapter », le rendement résultant de ces 2 fonctions est acceptable. | VRAI | FAUX |

Amélioration de l'existant proposée :

| | | |
|---|-------------|-------------|
| La décision de remplacer le moteur est légitime. | VRAI | FAUX |
| La diminution de la consommation énergétique du pilote sera alors amplement envisageable. | VRAI | FAUX |

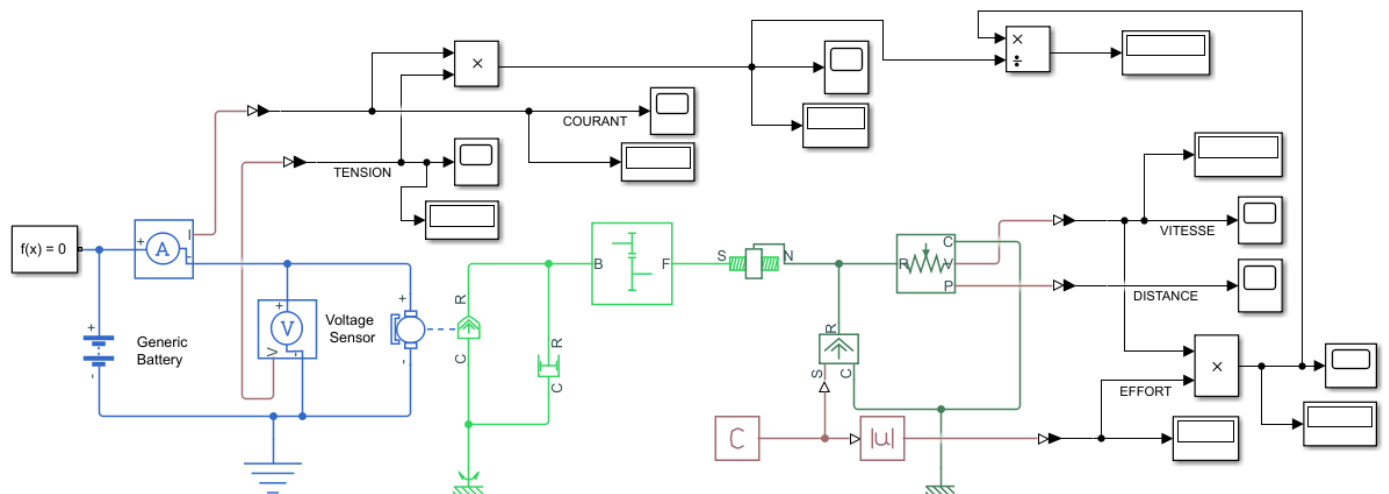


Modélisation multiphysique et simulation de la proposition d'amélioration de la chaîne de puissance en prédiction des performances du futur pilote

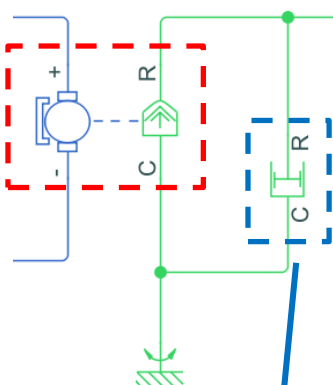
La proposition d'amélioration du Pilote existant cible le changement de moteur. Les prospections menées conduisent à la référence est la suivante : **Moteur MAXON DCX 26 L - 12V** (Voir document annexe 1)

Moteur MAXON DCX 26 L - 12V (Voir document annexe 1)

12- Ouvrir le fichier MATLAB SIMULINK " PiloteMAXON.slx ".



13- Compléter le paramétrage du moteur conformément au document constructeur MAXON (cf. annexe 1)



Settings

Electrical Torque

Mechanical

Model parameterization:

By stall torque & no-load speed

Armature inductance:

mH

Stall torque:

mN*m

No-load speed:

rpm

Rated DC supply voltage:

10.7

V

Rotor damping parameterization:

By no-load current

No-load current:

mA

DC supply voltage when measuring no-load current:

12

V

Settings

Electrical Torque

Mechanical

Rotor inertia:

g*cm^2

Initial rotor speed:

0

rpm

Settings

Parameters Variables

Damping coefficient: N*m/(rad/s) v

→ **SIMULATION de la chaîne de puissance du Pilote équipé du moteur MAXON**

14- Lancer la simulation pour une charge de $F_{t\grave{e}ge} = 270 \text{ N}$ (affecter une valeur négative). **APPELER LE PROFESSEUR si besoin.**



Analyse des écarts de la solution d'amélioration proposée

15- Compléter le tableau récapitulatif de résultats de modélisation pour un effort moyen $F_{moy} = 270 \text{ N}$ et commenter les écarts entre les 2 modèles.

| Grandeur physique | Avec Moteur RS 755 SH | Avec Moteur MAXON | Commentaires sur les écarts entre le modèle MAXON et la version RS 755 SH existante |
|------------------------------------|-----------------------|-------------------|---|
| $U_{moteur} \text{ (V)}$ | 10.7 | 10.7 | |
| $I_{moteur} \text{ (A)}$ | | | |
| $P_{absorb\acute{e}e} \text{ (W)}$ | | | |
| $F_{t\grave{e}ge} \text{ (N)}$ | 270 | 270 | |
| $V_{t\grave{e}ge} \text{ (mm/s)}$ | | | |
| $P_{sortie\ tige} \text{ (W)}$ | | | |
| $\eta_{moteurEtTige} \text{ (\%)}$ | | | |



Validation des prédictions de performances et conclusion

Notons que la puissance absorbée par la chaîne d'information du pilote est considérée comme identique et constante quel que soit le modèle considéré.

16- Calculer (en %) la diminution de puissance absorbée qui serait obtenue avec le nouveau modèle de pilote. Cette diminution de puissance absorbée est-elle conforme à l'exigence du nouveau cahier des charges ?

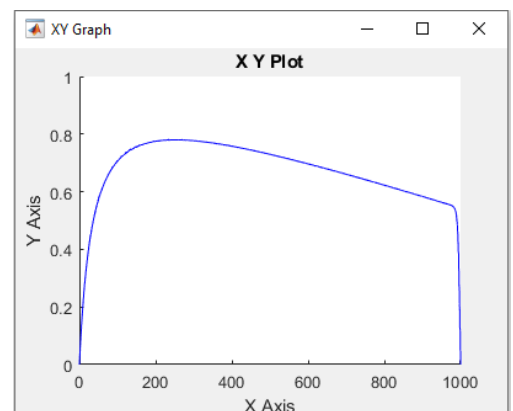
POUR ALLER PLUS LOIN DANS L'ANALYSE... (HORS TEMPS D'ACTIVITE EXPERIMENTALE)

Afin d'entériner définitivement le choix du modèle MAXON, il convient de se poser de nouvelles questions d'importance en lien, notamment, avec le régime de fonctionnement du moteur et les performances en vitesse de translation de la tige du vérin.

17- D'après les résultats de la simulation, la vitesse de translation du nouveau modèle donne-t-elle satisfaction ? Quel avantage présente une vitesse de translation plus rapide sur le plan de la consommation énergétique du bateau ?

Quelques aménagements du modèle multiphysique permettent d'observer l'évolution ci-contre de $\eta_{moteur} = f(F_{t\grave{e}ge})$ du modèle MAXON.

18- Le régime de fonctionnement du moteur est-il proche de régime nominal ? Autrement dit, le moteur est-il bien dimensionné ?



19- Conclure sur la faisabilité de choisir le modèle MAXON.

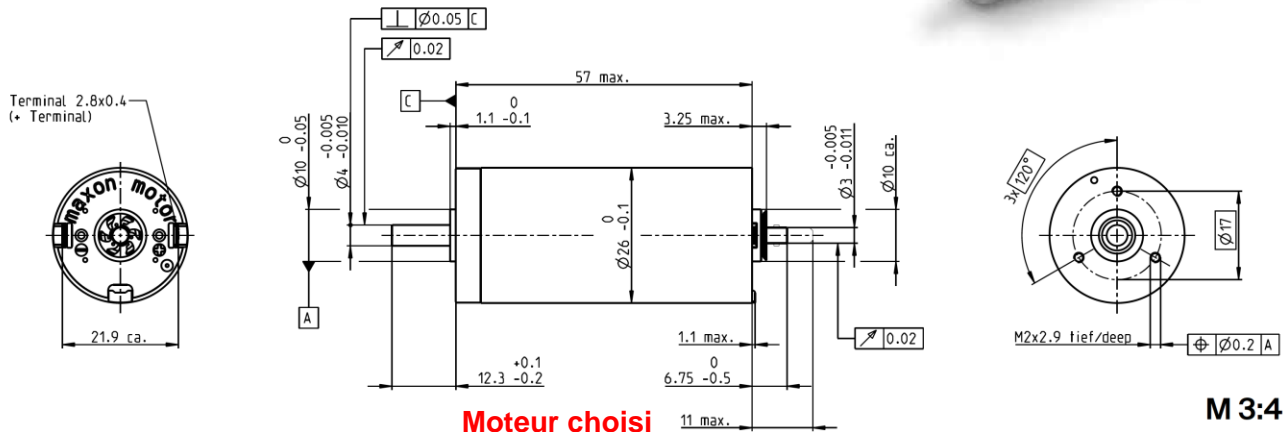
Annexe 1 – Document constructeur du Moteur MAXON DCX 26L-12V

DCX 26 L Ø26 mm, precious metal brushes, DC motor

Key Data: 18/29 W, 52.3 mNm, 5900 rpm



DCX



Moteur choisi

M 3:4

| Motor Data | | | 9 | 12 | 18 | 24 | 36 | 48 |
|--|------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1. Nominal voltage | V | | 9 | 12 | 18 | 24 | 36 | 48 |
| 2. No load speed | rpm | | 5530 | 5330 | 5530 | 5330 | 5430 | 5320 |
| 3. No load current | mA | | 80.5 | 56.8 | 40.2 | 28.4 | 19.5 | 14.2 |
| 4. Nominal speed | rpm | | 5060 | 4690 | 4770 | 4600 | 4680 | 4570 |
| 5. Nominal torque | mNm | | 32.9 | 46.1 | 49.8 | 52.3 | 50.8 | 50.3 |
| 6. Nominal current (max. continuous current) | A | | 2.2 | 2.2 | 1.64 | 1.25 | 0.822 | 0.599 |
| 7. Stall torque | mNm | | 384 | 384 | 362 | 384 | 370 | 355 |
| 8. Stall current | A | | 24.8 | 17.9 | 11.7 | 8.95 | 5.86 | 4.14 |
| 9. Max. efficiency | % | | 89 | 89 | 89 | 89 | 89 | 89 |
| 10. Terminal resistance | Ω | | 0.363 | 0.671 | 1.54 | 2.68 | 6.15 | 11.6 |
| 11. Terminal inductance | mH | | 0.067 | 0.129 | 0.268 | 0.514 | 1.11 | 2.06 |
| 12. Torque constant | mNm/A | | 15.5 | 21.4 | 31 | 42.9 | 63.2 | 85.8 |
| 13. Speed constant | rpm/V | | 616 | 445 | 308 | 223 | 151 | 111 |
| 14. Speed/torque gradient | rpm/mNm | | 1440 | 1390 | 1530 | 1390 | 1470 | 1500 |
| 15. Mechanical time constant | ms | | 3.23 | 3.13 | 3.11 | 3.09 | 3.1 | 3.11 |
| 16. Rotor inertia | gcm ² | | 21.3 | 21.4 | 19.4 | 21.2 | 20.1 | 19.7 |

| Thermal data | | | | Operating range |
|---|-----|--|-----------|----------------------|
| 17. Thermal resistance housing-ambient | K/W | | 10.2 | n [rpm] Winding 18 V |
| 18. Thermal resistance winding-housing | K/W | | 3.01 | |
| 19. Thermal time constant winding | s | | 24 | |
| 20. Thermal time constant motor | s | | 620 | |
| 21. Ambient temperature ball bearings | °C | | -40...+85 | 16000 |
| 21. Ambient temperature sleeve bearings | °C | | -30...+85 | 12000 |
| 22. Max. winding temperature | °C | | 100 | |

| Mechanical data ball bearings | | | | | |
|--|-----|--|----------|------|--|
| 23. Max. speed | rpm | | 5900 | 8000 | |
| 24. Axial play | mm | | 0...0.1 | | |
| 25. Preload | N | | 5.5 | | |
| 26. Radial play | mm | | 0.02 | | |
| 26. Max. axial load (dynamic) | N | | 5.5 | | |
| 27. Max. force for press fits (static) | N | | 40 | | |
| 27. (static, shaft supported) | N | | 500 | | |
| 28. Max. radial load [mm from flange] | N | | 20.5 [5] | | |

| Mechanical data sleeve bearings | | | | Modular System | | Details on catalog page 36 |
|--|-----|--|---------|------------------|---------------|----------------------------|
| 23. Max. speed | rpm | | 5900 | Gear | Stages [opt.] | Sensor |
| 24. Axial play | mm | | 0...0.2 | 380_GPX 26 A/C | 1-2 [3] | 473_ENX 10 EASY |
| 25. Preload | N | | 0 | 381_GPX 26 LN/LZ | 1-2 [3] | 473_ENX 10 QUAD |
| 26. Radial play | mm | | 0.02 | 382_GPX 26 HP | 2-3 [4] | 474_ENX 10 EASY XT |
| 26. Max. axial load (dynamic) | N | | 0.1 | 383_GPX 32 A/C | 3 | 475_ENX 16 EASY |
| 27. Max. force for press fits (static) | N | | 80 | 384_GPX 32 LN/LZ | 3 | 476_ENX 16 EASY XT |
| 27. (static, shaft supported) | N | | 500 | 385_GPX 32 HP | 4 | 477_ENX 16 EASY Abs. |
| 28. Max. radial load [mm from flange] | N | | 5.5 [5] | | | 478_ENX 16 EASY Abs. XT |

| Other specifications | | | | | | |
|-----------------------------------|-----|--|-----|--|--|--|
| 29. Number of pole pairs | | | 1 | | | |
| 30. Number of commutator segments | | | 11 | | | |
| 31. Weight of motor | g | | 170 | | | |
| 32. Typical noise level | dBA | | 48 | | | |

Configuration

Bearing: Ball bearings preloaded/sleeve bearings
Commutation: Precious metal brushes with CLL/
graphite brushes
Flange front/back: Standard flange/configurable flange/
no flange
Shaft front/back: Length/diameter/flat face
Electric connection: Terminals or cable/
alignment of connection/cable length/connector type