

EPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES A

EXOSQUELETTE d'ASSISTANCE du POIGNET (orthèse)

Durée : 5 heures

PRÉSENTATION DU SUJET

Le sujet se composait :

- d'une présentation du système étudié : 4 pages ;
- du travail demandé (parties A à E : 23 pages) + 9 pages d'annexes ;
- du cahier réponses à rendre, comprenant 48 questions : 27 pages.

Le sujet portait sur l'étude d'un exosquelette d'assistance du poignet permettant de limiter l'apparition de troubles musculo-squelettiques lors de tâches manuelles répétitives en milieu industriel. Le support est original dans la mesure où les actionneurs qui le composent sont des muscles pneumatiques. Ces derniers se contractent lorsque la pression interne augmente.

Après une étude mécanique permettant de caractériser le nécessaire recours à une assistance, le sujet permet d'étudier spécifiquement le montage agoniste/antagoniste des actionneurs pneumatiques d'un point de vue mécanique et la régulation d'efforts associée. Enfin une étude thermodynamique et séquentielle est conduite autour du compresseur fournissant l'énergie pneumatique au système. On note ainsi que :

- les Parties A et B abordaient l'aspect mécanique et géométrique lié à la compatibilité de mouvement entre la main de l'opérateur et l'exosquelette ;
- la Partie C concernait l'étude d'un actionneur pneumatique puis la combinaison de deux de ces actionneurs en montage agoniste/antagoniste ;
- la Partie D portait sur la modélisation et les performances de l'asservissement d'effort ;
- enfin, la Partie E, dissociée des parties précédentes, apportait un complément avec l'étude thermodynamique et séquentielle d'un compresseur.

COMMENTAIRES GÉNÉRAUX

Le support choisi permettait de couvrir la majeure partie du programme. Il apportait toutefois une approche complémentaire aux sujets précédents avec les muscles de McKibben, actionneurs pneumatiques dont l'élongation est fonction de la pression interne et du chargement. Si le support était original, les candidats ont cependant pu appliquer les méthodes et utiliser les connaissances acquises pendant les années de classes préparatoires. La plupart des questions de l'épreuve étaient des questions classiques des sujets SIA.

Les cinq parties étaient indépendantes et elles-mêmes composées de sous-parties indépendantes. Quelques résultats intermédiaires étaient donnés afin de permettre aux candidats de poursuivre. La plupart des candidats ont traité au moins une question dans toutes les parties du sujet.

Pour chacune des questions du sujet, au moins 83 candidats ont obtenu la totalité des points

attribués. Pour un candidat, il n'y qu'une question à laquelle il n'obtient pas de point et 5 autres pour lesquels ils n'obtiennent pas de points à 2 questions du sujet. On peut donc en déduire que toutes les questions du sujet étaient faisables et que ce dernier était de longueur adaptée à la durée de l'épreuve.

Le jury précise que les candidats qui n'utilisent pas les bases vectorielles adaptées à la présentation des vecteurs (résultats projetés dans une base non idoine, ou confusion entre expression vectorielle et projection dans une base) se retrouvent vite bloqués pour les questions de cinématique et de dynamique. De surcroît, de nombreux candidats ne maîtrisent pas les bases de la mécanique des solides rigides (calculer un moment cinétique, un moment dynamique, utiliser des formules adaptées), qui faisaient l'objet des premières questions du sujet.

Même s'il reste encore quelques copies avec mélanges d'expressions littérales et numériques, on note une nette amélioration sur ce point. De même, beaucoup de candidats pensent à comparer la valeur numérique obtenue par calcul à la valeur attendue par le cahier des charges. D'autres candidats donnent des résultats sous forme fractionnaire sans unités et sans ordre de grandeur. Une valeur décimale exacte ou approchée est quasiment toujours attendue.

Enfin, la moyenne et l'écart type semblent adaptés. L'épreuve est donc classante. Les résultats sont en adéquation avec les attentes du jury.

COMMENTAIRES SUR CHAQUE PARTIE DE L'ÉPREUVE

Partie A – Etude mécanique de l'ensemble main, poignet et avant-bras

Cette première partie avait pour objectif de justifier le recours à une assistance lors de tâches répétitives de découpe. Elle commence par une étude dynamique plutôt bien traitée par les candidats.

Lorsque les candidats utilisent des bases non adaptées, les calculs s'alourdissent et les candidats délaissent vite la partie. Environ un tiers des candidats commet une ou des fautes de signes lors du calcul des actions de pesanteur au point demandé.

En fin de partie, les candidats devaient conclure en déterminant la valeur du couple d'assistance requis. Beaucoup de candidats ont confondu le couple fourni par l'opérateur et le couple requis pour l'assistance. Cette question était pourtant celle qui permettait de justifier l'étude, on pourrait attendre de personnes s'engageant dans des filières de sciences de l'ingénieur qu'ils soient en mesure de répondre à ce type de question appliquée mais au combien importante dans un cadre industriel.

Partie B – Etude de la configuration mécanique de l'exosquelette

Partie B.2 – Réglage de l'orthèse par rapport au bras de l'opérateur

Cette première sous partie portait sur l'adaptabilité de l'exosquelette au bras de l'opérateur. En fonction du type de fixation sur le corps de l'opérateur et de la structure cinématique choisie pour l'exosquelette, l'étude devait permettre aux candidats de déterminer si l'opérateur pouvait accomplir sans gêne les mouvements nécessaires pour son travail.

Sur cette sous-partie, l'étude des liaisons équivalentes ainsi que des degrés d'hyperstatisme constituaient le cœur de la réflexion. Les candidats étaient libres de choisir la méthode de résolution ;

des approches cinématiques ou par les torseurs des actions transmissibles ont été choisies même si l'une était plus laborieuse dans son développement. Beaucoup de candidats ont apporté des hypothèses trop fortes pour l'étude géométrique ce qui revenait souvent à bloquer les mouvements de l'orthèse et par conséquent, également ceux de l'opérateur.

Partie B.3 – Etude des longueurs des muscles lors de l'orientation du gant vis-à-vis du brassard

Les muscles McKibben ont des plages de contraction et d'extension limitées. Afin de permettre à l'opérateur de réaliser les mouvements requis par son travail, il convenait de vérifier si les muscles choisis étaient compatibles.

Pour mener à bien l'étude, il convenait de procéder à une fermeture géométrique sur l'un des muscles d'une paire de muscles agoniste/antagoniste. Les expressions étant relativement lourdes, une solution était donnée pour un muscle de l'autre paire de muscles agoniste/antagoniste. Par un raisonnement simple basé sur les symétries du problème, il était demandé de trouver l'expression analytique associée au deuxième muscle de la deuxième paire. Seulement 30% des candidats ont identifié cette symétrie et de fait répondu simplement à la question.

La suite de la partie donnait place à une méthode numérique pour déterminer le modèle inverse, i.e. la longueur maximale des muscles pour une orientation du poignet donnée. Seulement 8% des candidats ont obtenu l'intégralité des points en proposant une méthode de Newton programmée en langage Python. Quelques candidats ont rédigé, avec succès, une version récursive de la fonction.

La fin de cette sous-partie donnait à exploiter les courbes et conclure quant aux valeurs requises par le cahier des charges. Beaucoup de candidats ont alors confondu périodicité et parité de la fonction cosinus. Heureusement, la plupart savent que la fonction cosinus est maximale en 0...

Partie C – Etude de l'actionnement mécanique d'une articulation

En début de cette partie une relation de comportement d'un muscle McKibben liant l'effort de traction, la pression interne et la contraction du muscle était donnée en fonction de nombreux paramètres. L'objectif était d'établir le couple généré lors d'une variation de la pression interne et des précontraintes par l'association de deux muscles en montage agoniste/antagoniste.

Après une simplification du modèle et quelques étapes intermédiaires, il était demandé de retrouver l'équation différentielle régissant le mouvement du poignet en présence d'un couple de muscles pneumatiques précontraints. S'il manquait un paramètre dimensionnel (R) dans la formule à retrouver, il est surprenant de constater que 2/3 des candidats ayant traité la question présentent un résultat identique à celui donné dans le sujet et que seulement 1/3 précisent la présence d'une erreur d'énoncé ou se contentent de donner la bonne version de la réponse. Cette erreur n'empêchait nullement la poursuite du sujet et le jury a tenu compte des différentes réponses possibles par la suite.

Une caractérisation du système était ensuite proposée à partir d'une courbe expérimentale présentant un offset en ordonnées et un échelon à $t > 0$. La plupart des candidats n'a pas tenu compte de l'offset se contentant de lire la valeur maximale atteinte et la valeur atteinte en régime permanent. Plus de candidats ont tenu compte du décalage temporel pour déterminer le temps de réponse à 5%.

Partie D – Etude de l’asservissement des mouvements de déviation radio-ulnaire

Partie D.1 – Chaîne fonctionnelle de l’asservissement d’effort

Pour amorcer l’étude de la régulation en effort de l’exosquelette, une présentation globale du système était donnée sous forme de diagramme ibd. Les candidats devaient simplement indiquer la nature des flux échangés entre les différents blocs. Le jury n’a pu octroyer que 31% des points disponibles pour cette question. De plus, bien que les fonctions génériques soient explicitement listées dans le programme de la filière PT (NOR : ESR52035781A arrêté du 5-1-2021 - JO du 7-2-2021), seulement 14% des points disponibles ont été obtenus par les candidats au moment de déterminer les éléments de la chaîne fonctionnelle et le nom générique associé.

Partie D.2.2 – Modélisation de l’asservissement du mouvement de déviation radio-ulnaire

La structure de l’asservissement est présentée en début de partie sous forme de schéma bloc fonctionnel. Le bloc lié à l’actionneur faisait l’objet de la partie C. Quelques blocs sont à déterminer parfois en simplifiant les expressions à l’aide d’un développement limité à l’ordre un qu’une partie non négligeable de candidats traite avec rigueur. La formule étant à démontrer les points n’ont pas été attribués aux démonstrations superficielles.

Partie D.2.3 – Performances de l’asservissement en effort

Comme l’objectif de l’asservissement est de maintenir un effort nul de la part de l’opérateur, l’asservissement porte principalement sur l’étude en régulation, i.e. l’influence de la perturbation en fonction du choix correcteur. Or trop de candidats se contentent de dire qu’avec un intégrateur l’erreur sera nulle. Encore faut-il connaître le nombre d’intégrateurs en amont de la perturbation et la nature de la perturbation.

Par ailleurs si l’expression de l’erreur statique en poursuite est connue en fonction de l’entrée, de la classe de la FTBO et de son gain statique, l’erreur en régulation est plus technique à obtenir. Les candidats sont invités à bien étudier les conditions d’applications des formules de cours et les hypothèses associées.

Partie E – Etude du groupe pneumatique

Enfin, la partie E se voulait être une ouverture du sujet en étudiant de façon connexe un compresseur associé à la chaîne fonctionnelle précédemment étudiée.

Un diagramme d’état associé à un scénario d’utilisation du compresseur permettait de mettre en évidence les problèmes de disponibilité de la ressource lors d’une utilisation intensive de l’exosquelette. 83 candidats ont obtenu la totalité des points en remplissant sans erreur le chronogramme donné.

Une approche thermodynamique permettait d’étudier les contraintes thermiques de remplissage du compresseur. La plupart des candidats ont réussi à déterminer la pression finale atteinte. De nombreuses valeurs aberrantes de température ont été trouvées sans pour autant être accompagnées de commentaires judicieux.

CONSEILS AUX FUTURS CANDIDATS

On conseille de nouveau aux candidats de prendre le temps de parcourir la totalité du sujet, des documents annexes et du document réponse. La durée indicative de 20 min donnée pour ce premier travail permet de répondre avec plus de pertinence aux questions et problématiques posées.

Il est conseillé de bien relire la question avant de passer à la suivante et vérifier que le résultat est valide, i.e. avec la bonne dimension pour son expression littérale et plausible pour sa valeur numérique.

Nous recommandons également aux candidats de détailler leurs réponses ainsi que leurs raisonnements. Une réponse fausse accompagnée d'un raisonnement juste permet souvent d'obtenir une partie des points.