

Sciences industrielles de l'ingénieur

Présentation du sujet

La mise en place, dans une pharmacie, d'un robot de stockage, de rangement, et de délivrance des ordonnances diminue le nombre d'aller-retours des collaborateurs entre le comptoir et les tiroirs de stockage de médicaments et augmente leur temps de conseils aux patients. Dans ce cadre, ce sujet propose l'étude de plusieurs modèles de simulation du robot trois axes SINTESI, de l'entreprise Pharmathek, afin d'apporter une aide décisionnelle aux pharmaciens sur l'implantation d'une tête simple (nommée SLIM) par rapport à une tête plus perfectionnée (nommée EUCLID3D). Il se divise en trois parties.

À travers une analyse structurelle, la première partie permet d'appréhender les performances cinématiques du robot trois axes (deux translations et une rotation) dont les exigences associées sont comparées à des mesures effectuées sur le robot. L'exploitation de ces mesures nécessite le recours à des méthodes numériques de filtrage et d'intégration. La mise en place d'un modèle de la chaîne de puissance d'un des axes détermine les caractéristiques d'une machine à courant continu équivalente à la machine synchrone. L'utilisation de cette modélisation permet de valider le dimensionnement de la machine choisie.

À l'aide des modèles élaborés dans la première partie, la seconde partie vise tout d'abord à valider les choix du constructeur quant aux performances énergétiques et à régler le correcteur de l'asservissement de position d'un des axes (translation). Dans un second temps, un modèle à événements discrets d'un cycle de déplacement type du robot permet de comparer les temps de délivrance et les consommations énergétiques associées, d'une même ordonnance, par la tête SLIM et par la tête EUCLID3D. Le choix d'une tête EUCLID3D est alors validé.

Pour terminer, la troisième partie s'intéresse aux performances cinématiques de l'axe en rotation et au couplage dynamique dû au mouvement de l'axe en translation sur les performances de l'axe en rotation. Cette partie suppose de prendre du recul par rapport à l'ensemble des études effectuées précédemment et permet de conclure sur les exigences de conception de la tête EUCLID3D en termes de répartition de masses.

Analyse globale des résultats

L'ensemble des questions couvre de nombreux points du programme de la filière TSI et les différentes parties de l'épreuve permettent à une majorité de candidats de s'exprimer. Toutes les questions du sujet ont été abordées, et certains candidats ont produit de très bonnes copies.

Si une grande majorité des candidats rédige avec soin leur copie en soignant l'écriture et les explications, le jury regrette de trouver encore des copies mal rédigées, où les questions, traitées dans le désordre, ne sont pas correctement identifiées et les résultats ne sont pas mis en évidence : ces copies ont été sanctionnées par le malus de présentation. Le jury rappelle à ce propos que la démarche d'étude proposée dans le sujet est cohérente et progressive, et que les candidats qui traitent les questions dans le désordre ne sont pas en mesure de s'approprier correctement la problématique.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Partie 1 : modélisation du robot SINTESI

Questions 1 à 3 : architecture du bras manipulateur 3 axes

À partir des mouvements fournis des trois classes d'équivalences cinématiques les unes par rapport aux autres (deux translations et une rotation), le sujet demande de faire un graphe des liaisons minimal et de

compléter l'épure d'un schéma cinématique spatial associé. Le jury regrette que les liaisons (glissières et pivot) ne soient pas correctement identifiées, que leurs caractéristiques (directions et axe) ne soient pas correctement formulées et que les schémas cinématiques soient parfois réalisés en deux dimensions sur l'épure spatiale fournie. Le robot étant un robot série trois axes, les graphes de structure comportant un cycle ont été sanctionnés.

Les rapports de réduction demandés étaient associés à des systèmes poulies/courroie basiques. Le jury s'étonne de la confusion entre certains rayons primitifs des poulies, sur la présence de moments d'inertie dans des rapports de réduction ou encore de masses conduisant dans tous les cas à des rapports non homogènes.

Questions 4 à 7 : analyse des déplacements programmés

Ces questions s'intéressaient à l'exploitation des mesures d'accélération effectuées sur le robot. Dans un premier temps, l'implantation d'un filtrage numérique de type passe-bas du premier ordre à partir d'un schéma de dérivation arrière (ou à gauche) était demandé. Ces questions ne sont pas suffisamment abordées par les candidats, le jury note une confusion entre les listes et les vecteurs Numpy, les schémas de dérivation arrière et avant, ainsi que des difficultés dans l'écriture des boucles « for » ; en effet, certains candidats utilisent à tort l'instruction $i+=1$ dans une telle boucle.

Il est proposé de réaliser le calcul des vitesses à partir des accélérations filtrées par intégration utilisant la méthode des rectangles. Cette méthode n'est pas correctement maîtrisée par le peu de candidats qui abordent cette question, et une confusion fréquente est à noter entre la valeur de l'intégrale sur l'ensemble de l'intervalle de temps et les valeurs prises à chaque instant par la vitesse.

Questions 8 à 15 : modélisations de l'axe X

Le profil de pilotage proposé reprenait une loi classique en triangle des vitesses déjà abordé les années passées. Même si certains proposent des réponses pertinentes, le jury s'étonne d'un nombre toujours important de profils de position erronés, avec notamment des décroissances de la courbe de position pour une vitesse pourtant positive ou des courbes de position non dérivables. Le jury rappelle que le calcul de la position finale doit être mené à partir de l'évaluation de l'aire sous la courbe de vitesse, et non à partir des équations temporelles de la position qui conduisent la plupart du temps à des expressions complexes fausses. La vitesse n'étant pas constante, les formules de type « $v=d/t$ » sont proscrites et le jury s'étonne de trouver de nombreuses expressions non homogènes du type « $v=a/t$ » notamment.

Questions 10 à 15 : élaboration d'un modèle de machine équivalente

Le questionnaire proposé permettait de déterminer les caractéristiques d'une machine à courant continu équivalente à la machine synchrone afin de l'intégrer dans un modèle simplifié de simulation. Certains candidats ne maîtrisent pas d'une part la loi des mailles et mélangent d'autre part les notations complexes et temporelles.

Si l'expression de la puissance électromagnétique est connue par la plupart des candidats (hormis l'oubli du rapport dû aux trois enroulements pour une machine triphasée), son exploitation pour obtenir le couple électromagnétique est très souvent hasardeuse. Les réponses observées montrent que beaucoup de candidats ne maîtrisent pas le bilan de puissance des machines électriques et confondent puissance absorbée et puissance électromagnétique. Bon nombre de candidats confondent également la résistance d'un enroulement avec la résistance vue entre deux bornes moteur couplé pour une machine triphasée. La notion de constante de couple n'est que partiellement maîtrisée.

Questions 16 à 20 : validation du dimensionnement de l'axe X

Si certains candidats évoquent que la vitesse est effectivement nulle au démarrage du moteur, très peu de candidats font alors le lien entre la valeur mesurée de l'intensité au démarrage et la relation $U=r \cdot I$ dans la mesure où l'inductance du moteur est négligée.

Les réponses proposées dans la plupart des copies pour la justification de la valeur de l'intensité du courant au démarrage sont très décevantes et témoignent parfois d'un manque de sens physique et de culture technologique à acquérir en travaux pratiques.

Le jury se réjouit de voir que la plupart des candidats parvient à exprimer l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée (vitesse angulaire/tension).

L'identification de la constante de temps à partir d'une réponse à un échelon d'un système du premier ordre doit être réalisée à partir du temps pour lequel la sortie est égale à 63 % de la valeur finale, ou encore par l'utilisation de la tangente à l'origine. Les méthodes d'identification à partir du temps à 95 % ou à 99 % sont à proscrire car particulièrement imprécises. L'instant initial étant décalé à la date $t=20$ ms, il était nécessaire de prendre en compte ces 20 ms dans l'identification de la constante de temps, ce que trop peu de candidats ont perçu. Nombreux sont les résultats proches de 22 ms au lieu de 2 ms, ce qui conduit alors à une valeur fautive pour le moment d'inertie, incomparable à celle fournie dans le tableau 2.

Le calcul de l'énergie cinétique de l'ensemble des pièces en mouvement pour obtenir l'expression littérale du moment d'inertie équivalent ramené sur l'arbre moteur nécessite l'analyse du mouvement de chaque pièce par rapport au bâti, ce qui explique la différenciation de la question en question ouverte. Le mouvement étudié ne comportait qu'une seule mobilité mais les solides 11 et 12 étaient en mouvement de rotation par rapport au solide 10, lui-même en translation par rapport au bâti. Ainsi, si la plupart des candidats formulent correctement l'expression de l'énergie cinétique du solide 10 dans son mouvement par rapport au bâti, les expressions des énergies cinétiques des solides 11 et 12 sont erronées. Enfin, les énergies cinétiques des solides 13, 20 et 30 ne sont que trop rarement prises en compte.

Si l'application du théorème de l'énergie cinétique est correctement proposée, l'évaluation des puissances des actions mécaniques intérieures et extérieures n'est pas correctement menée. En effet, la plupart du temps, le bilan des actions mécaniques extérieures n'est pas réalisé et le jury s'étonne de voir figurer la puissance de la pesanteur non nulle alors que le mouvement est un mouvement de direction horizontale.

Partie 2 : validation des performances du robot

Questions 21 et 22 : justification et dimensionnement des résistances de dissipation

L'obtention du tracé de l'allure de puissance découlant du produit du couple par la vitesse angulaire n'est que très rarement explicité et les valeurs extrêmes sont rarement précisées sur le graphe. Le produit de deux valeurs négatives donne pour beaucoup de candidats une valeur négative.

Le rôle du module de dissipation au niveau du variateur n'est pas compris par la plupart des candidats. Le lien entre puissance négative au niveau de la machine et non réversibilité de l'étage d'entrée du variateur n'est que très rarement évoqué.

La valeur de la puissance prise pour justifier la valeur crête de la résistance est trop souvent la valeur maximale positive et non la valeur négative.

Le calcul de la valeur moyenne, quand il est abordé, est très souvent fait avec l'ensemble de la puissance et non la partie négative, ce qui traduit que le rôle du module de dissipation n'est pas compris.

Questions 23 à 31 : réglage des asservissements de position

Les trois boucles d'asservissement classiques (courant, vitesse puis position) ne sont pas correctement repérées, la boucle de courant étant trop souvent qualifiée de boucle de puissance.

Le jury regrette que la grandeur mécanique associée au bloc de limitation de courant soit trop souvent l'intensité du courant au lieu du couple moteur. L'appropriation du schéma constructeur fait partie d'une compétence à acquérir à travers les travaux pratiques. L'identification d'un modèle de comportement de

type premier ordre de la boucle de vitesse suppose de choisir l'essai dans lequel le couple n'est pas saturé par la limitation de courant.

L'effet de la limitation de courant sur la saturation du couple et la conséquence sur le profil linéaire de la vitesse n'est pas correctement compris par la majorité des candidats. Nombreux sont les candidats qui confondent le bloc de limitation de courant et le bloc associé au régulateur de courant.

De nouveau, dans cette identification de la constante de temps d'un système du premier ordre, la plupart des candidats oublie de considérer le décalage par rapport à l'origine des temps de 20 ms. De plus, le terme « identification » n'est pas maîtrisé : le jury rappelle que l'identification d'un paramètre consiste à déterminer la valeur d'un paramètre à partir d'une réponse expérimentale, et ne consiste en aucun cas à donner le nom de ce paramètre.

La détermination de la valeur de l'adaptateur de consigne pour que l'écart de l'asservissement soit nul lorsque la sortie $x(t)$ est égale à la consigne $x_c(t)$ n'est pas assimilée.

Le jury s'étonne que l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte pour un système dont le retour n'est pas unitaire ne soit pas comprise et qu'elle soit confondue avec l'expression de la fonction de transfert en chaîne directe ou encore par l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée.

Le jury se réjouit de voir que la plupart des candidats parvient à identifier la marge de phase avant correction. La détermination du gain du correcteur proportionnel permettant de satisfaire l'exigence de marge de phase entraîne quant à elle des erreurs de jugement (augmentation du gain au lieu de diminution).

Le calcul de l'erreur en régime permanent pour une consigne en rampe n'est que rarement mené de manière satisfaisante par l'utilisation du théorème de la valeur finale. Ce résultat, qui était à justifier par calcul dans cette question, fait pourtant partie des résultats de cours classiques pour un système de classe 1.

Pour terminer, la validation des exigences de précision supposait de valider à la fois l'exigence pour une consigne en rampe mais aussi pour une consigne en échelon, ce que les candidats ont oublié pour une très grande majorité.

Questions 32 à 36 : validation du choix de la tête EUCLID3D

Cette partie est basée sur l'analyse du comportement du système à événements discrets lors de la délivrance d'une ordonnance, en comparant les performances du robot muni de la tête SLIM à celui muni de la tête EUCLID3D.

Le jury constate que l'analyse et l'interprétation des graphes, qui comportent des états orthogonaux, ne sont pas maîtrisées, ce qui était le cas de l'état E3 du graphe d'états.

La lecture globale du graphe d'états a posé d'importants soucis aux candidats qui ne sont pas parvenus à calculer la durée du cycle pour le robot muni de la tête EUCLID3D.

Le jury a néanmoins affecté des points aux réponses cohérentes, basées sur l'analyse des différences de comportement entre le cycle pour le robot muni de la tête SLIM et celui pour le robot muni de la tête EUCLID3D.

Cette comparaison se terminait par l'analyse du cycle énergétique du robot muni de la tête EUCLID3D.

La plupart des candidats n'ayant pas perçu correctement l'irréversibilité de la chaîne de puissance, les tracés énergétiques ne sont pas corrects ni suffisamment précis. À nouveau, le jury a néanmoins affecté des points aux réponses cohérentes, fournissant des comparaisons pertinentes entre les consommations énergétiques des robots munis de la tête SLIM et de la tête EUCLID3D.

Partie 3 : validation de la structure de correction de l'axe Thêta

Questions 37 à 39 : analyse du mouvement de l'axe Thêta

L'étude est étendue dans cette dernière partie à l'axe en rotation de la tête, car les questions précédentes se limitaient à celle de l'axe X qui, compte tenu de son déplacement important, impose la durée du cycle (les trois axes sont mis en mouvement simultanément).

Le jury est surpris du manque de recul des candidats quant à l'analyse de l'amplitude du mouvement de l'axe Thêta qui, pour atteindre les deux magasins, n'a besoin de ne faire qu'un seul demi-tour.

La problématique des dernières questions était d'analyser et de justifier un modèle de simulation permettant de mettre en évidence l'influence du mouvement de l'axe X sur les performances dynamiques de l'axe Thêta, et notamment la nécessité de chercher à rapprocher le centre de gravité de la tête de son axe de rotation afin de limiter ce couplage dynamique.

Le modèle dynamique étant fourni, le questionnement consistait à proposer le théorème ayant permis d'aboutir à une des équations du système dynamique. Le système comportant deux mobilités, le jury est surpris de voir que certains candidats évoquent l'utilisation du théorème de l'énergie cinétique. Par ailleurs, le jury rappelle que l'application du théorème du moment dynamique suppose de préciser le système isolé, et le point d'application ? et l'axe de projection. Le jury a sanctionné l'application du théorème du moment cinétique dans la mesure où le point d'application (le point C) est ici en mouvement par rapport au bâti.

L'implantation du modèle dynamique causal proposé dans un logiciel de simulation n'est pas maîtrisée. Le jury s'interroge à propos du lien effectué entre les modèles de connaissance obtenus par exemple en séance de travaux dirigés et leur implantation dans un logiciel de simulation en vue de leur résolution. Cette compétence fait pourtant partie d'une de celles à exercer en travaux pratiques.

Question 40 : synthèse

Cette dernière question supposait de prendre du recul par rapport à l'ensemble de l'étude menée et permettait d'analyser la nécessité de rapprocher le centre de gravité de la tête du robot de son axe de rotation afin de limiter le couplage dynamique et les dépassements qui pouvaient apparaître sur les réponses temporelles de l'axe Thêta. Le jury regrette que trop peu de candidats aient évoqué la position du centre de gravité par rapport à l'axe de rotation de la tête, ou encore la notion d'équilibrage.

Conclusion

L'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur est destinée à valider d'autres compétences que celles évaluées par les autres disciplines, en s'appuyant sur des réalisations industrielles qu'il faut appréhender dans leur complexité. Il est recommandé aux candidats de lire attentivement l'énoncé et de traiter les questions dans l'ordre pour appréhender correctement la problématique et la démarche de résolution proposée. Il est essentiel que les candidats s'attachent à répondre aux questions d'analyse, de critique, de validation des modèles et des solutions technologiques proposées. En dernier lieu, une bonne culture technologique est indispensable pour réussir cette épreuve.