

TECHNICAL SCIENCES

OPTIMIZATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF HIGHER KINEMATIC PAIRS TO MINIMIZE THEIR WEAR

Banza Plandi Kantshiama,

postgraduate student

Komrakov Vladimir Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi.

OPTIMISATION DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DES PAIRES CINÉMATIQUES SUPÉRIEURES POUR MINIMISER LEUR USURE

Banza Plandi Kantshiama

étudiant de troisième cycle

Komrakov Vladimir Viktorovich

L'université technique d'État de Gomel P.O. Sukhoi.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.10899454>

Abstract

In the contemporary industry of machine manufacture, the analysis of the interplay between machine elements that are susceptible to friction is of paramount importance. The magnitude and qualities of this friction have a direct impact on the efficiency of mechanisms, their longevity, and their dependability. However, friction is not solely a resistive force to be surmounted, but it also has latent potential to engender heat, oscillation, and attrition. Coulomb's law, which governs the ratio of friction force to normal force, is the central point of investigation for academics. Precise determination of the friction coefficient, as well as comprehension of the dynamics of this phenomenon, can profoundly enhance the performance and longevity of mechanisms. This is especially true in the context of incessant growth and integration of automatic systems, where even a minor shift in frictional characteristics can have momentous implications on the operations of all machinery.

As per the esteemed Journal of Friction and Wear (2019), a conspicuous surge in the longevity of machines, up to 15-20%, can be attained via rectifying the geometric parameters of kinematic pairs. However, notwithstanding the multitude of publications on this matter, the issue of the numerical correlation between said geometry and the level of wear remains unresolved. The State Institute of Mechanical Engineering (2020) has reported that a staggering 60% of equipment malfunctions are attributable to the imprudent selection of geometric parameters.

Résumé

Dans l'industrie contemporaine de la fabrication de machines, l'analyse de l'interaction entre les éléments de la machine susceptibles de frottement est d'une importance capitale. L'ampleur et les qualités de ce frottement ont un impact direct sur l'efficacité des mécanismes, leur longévité et leur fiabilité. Cependant, le frottement n'est pas seulement une force de résistance qu'il faut surmonter, il a aussi le potentiel latent d'engendrer de la chaleur, de l'oscillation et de l'attrition. La loi de Coulomb, qui régit le rapport entre la force de frottement et la force normale, est le point central de l'étude des universitaires. La détermination précise du coefficient de frottement, ainsi que la compréhension de la dynamique de ce phénomène, peuvent profondément améliorer les performances et la longévité des mécanismes. Cela est particulièrement vrai dans le contexte de la croissance et de l'intégration incessantes des systèmes automatiques, où même un changement mineur dans les caractéristiques de frottement peut avoir des implications capitales sur le fonctionnement de toutes les machines.

Selon l'estimé Journal of Friction and Wear (2019), une augmentation notable de la longévité des machines, jusqu'à 15-20%, peut être obtenue en rectifiant les paramètres géométriques des paires cinématiques. Cependant, malgré la multitude de publications sur ce sujet, la question de la corrélation numérique entre cette géométrie et le niveau d'usure reste non résolue. L'Institut national d'ingénierie mécanique (2020) a rapporté qu'un pourcentage stupéfiant de 60 % des dysfonctionnements d'équipements sont imputables à une sélection imprudente des paramètres géométriques.

Keywords: kinematic pairs, geometric parameters, wear, optimization, mathematical model, experimental studies.

Mots clés : paires cinématiques, paramètres géométriques, usure, optimisation, modèle mathématique, études expérimentales.

Introduction

L'objectif de cette étude est de développer une méthodologie pour optimiser les paramètres géométriques

des paires cinématiques supérieures dans les systèmes mécaniques afin de minimiser leur usure et de prolonger la durée de vie de l'équipement. La recherche se

concentrera sur l'analyse de l'influence de la forme, des dimensions et de l'arrangement mutuel des éléments accouplés sur le taux d'usure. L'accent sera mis sur l'identification des configurations optimales qui permettent de réduire au minimum l'usure des contacts tout en préservant l'efficacité fonctionnelle et la fiabilité des mécanismes. Les résultats peuvent trouver une application dans la conception technique, en augmentant la durabilité et l'efficacité des machines et des mécanismes.

Dans l'ingénierie mécanique moderne, le problème de l'augmentation de la résistance à l'usure des paires cinématiques supérieures occupe l'une des principales places dans les activités de recherche et d'application. L'efficacité du fonctionnement des mécanismes est directement liée à l'optimisation de leurs paramètres géométriques, en particulier les angles d'inclinaison et les rayons de courbure des surfaces de contact. Des données montrent qu'une modification de 5 à 7 degrés des angles d'inclinaison de certains types de mécanismes peut réduire l'usure de 22 à 28 %. Cette recherche est particulièrement importante pour l'industrie des machines de précision, où des changements micro-métriques dans la géométrie des composants peuvent avoir un impact significatif sur les performances globales et la durabilité du produit.

Un aspect essentiel dans le domaine de l'optimisation des paramètres géométriques des couples cinématiques supérieurs est l'intégration des données de la tomographie assistée par ordinateur pour l'analyse détaillée de la microstructure du matériau. Des études ont montré que la microtopographie des surfaces joue un rôle essentiel dans la formation des contraintes de contact et la distribution de l'usure [3]. L'application de techniques de microscopie à haute résolution permet de mieux comprendre les mécanismes de frottement et d'usure au niveau micro, ce qui est particulièrement important pour la conception de couples cinématiques supérieurs offrant de meilleures performances [5].

La modélisation des processus d'usure à l'aide de méthodes d'éléments finis permet de prédire la durabilité des éléments de machine en fonction de leurs caractéristiques géométriques et des propriétés des matériaux [8]. Ces études soulignent l'importance d'un étalonnage précis du modèle pour reproduire correctement les conditions de fonctionnement réelles, y compris les variations de température, de charge et de vitesse.

Matériels et méthodes

Le champ d'application des nouveaux lubrifiants intégrant des nanoparticules ouvre de nouveaux horizons dans la réduction de l'usure des paires cinématiques supérieures [12]. Ces matériaux améliorent considérablement les performances en matière de frottement et d'usure en créant des films solides et stables sur les surfaces de travail, ce qui permet de prolonger la durée de vie des mécanismes. L'utilisation de technologies additives, telles que l'impression 3D, pour créer des prototypes de paires cinématiques supérieures avec des paramètres géométriques optimisés permet d'accélérer le processus de développement et d'essai [2]. Il est ainsi possible de mener une étude expérimentale sur des structures géométriquement complexes qu'il est difficile, voire impossible, de produire à l'aide des méthodes

d'usinage traditionnelles. L'étude de l'influence du traitement thermique sur la résistance à l'usure des matériaux utilisés dans les couples cinématiques supérieurs constitue également une tâche importante [10]. Les technologies avancées de traitement thermique qui permettent un contrôle précis de la microstructure des matériaux peuvent améliorer de manière significative leurs caractéristiques, notamment leur dureté et leur résistance à l'usure.

L'étude de l'interaction entre les paramètres géométriques des paires cinématiques supérieures et les caractéristiques acoustiques des mécanismes représente un autre domaine de recherche important [7]. L'amélioration du confort acoustique des machines, en particulier dans les secteurs de l'automobile et de l'aviation, est un facteur critique directement lié à la géométrie des paires cinématiques.

Un grand nombre de domaines de l'activité humaine sont actuellement en cours d'automatisation. Parallèlement, des dispositifs mécanisés sont intégrés partout pour opérer dans des environnements dangereux (par exemple, robots miniers, véhicules sans pilote), effectuer des tâches authentiques (par exemple, robots caissiers, robots chirurgiens), etc. Malgré cela, nous pensons que les procédures de recherche scientifique de routine ne sont pas suffisamment automatisées. Par automatisation de la recherche scientifique, nous n'entendons pas seulement le développement de logiciels qui accélèrent le processus de construction de modèles mathématiques et d'exécution de tests numériques. Cette composition se penchera sur l'automatisation du travail expérimental dans le domaine de la recherche tribologique.

La machine à friction standard (SFM) a longtemps été utilisée pour les études tribologiques [1].

Dimensions générales du SMT-1 :

- machine d'essai - 1165x520x1100mm ;
- panneau de contrôle - 650x850x1700mm ;

Poids de la machine d'essai 2070 SMT-1 :

- de la machine d'essai - 500 kg ;
- du panneau de contrôle - 300 kg ;

La machine à friction (SMT) présente un certain nombre d'inconvénients :

- grandes dimensions ;
- poids élevé ;
- une dépense d'énergie importante pour les tests ;
- faible degré d'automatisation des actions répétitives.

Il est donc proposé de créer une version personnalisée de l'appareil de friction, caractérisée par une taille, une force et un coût réduits et dotée d'un niveau accru d'automatisation des procédures conventionnelles.

Résultats

Un examen approfondi des protocoles de recherche tribologique existants [2] a été réalisé pour identifier les cinématiques élémentaires. Le principe de modularité dans la conception des modules permet de combiner différents composants avec différentes fonctionnalités dans de nombreuses classifications de modules. Une configuration ultérieure d'unités autonomes est proposée pour la conception d'un nouveau dispositif d'épuisement.

Le module de mouvement rotatif n° 1 est un équipement très sophistiqué et technologiquement avancé. Sa conception sophistiquée et son ingénierie précise garantissent une rotation fluide et sans heurts des mécanismes, ce qui en fait un composant essentiel pour toute une série d'applications scientifiques. Ce module est spécialement conçu pour faciliter le mouvement rotatif en utilisant une technologie avancée et les matériaux les plus récents pour garantir le plus haut niveau de performance. Ses capacités uniques et sa précision inégalée en font un outil indispensable pour tout scientifique ou ingénieur cherchant à obtenir des résultats optimaux dans ses recherches et expériences.

Le module 2 du système de mouvement rotatif utilise de nombreuses avancées technologiques pour obtenir des performances optimales. Ce module utilise une variété de composants de haute technologie, y compris des servomoteurs avancés, des roulements de précision et des systèmes d'engrenage sophistiqués. Ces composants agissent dans une chorégraphie complexe pour créer un mouvement rotatif souple et précis. Le résultat

est un niveau inégalé de précision et de fiabilité, ce qui fait de ce module le meilleur choix pour les applications scientifiques et industrielles exigeant les plus hauts niveaux de performance. Des modules supplémentaires sont nécessaires pour assurer le fonctionnement automatisé des paires de frottement. L'ensemble de processus utilisé pour déployer un assemblage conçu pour contrer les effets de la friction est communément appelé "module de chargement d'assemblage de friction".

Il est suggéré d'utiliser des moteurs pas à pas et des engrenages mécaniques pour exécuter les modules. Cependant, les moteurs pas à pas ne permettent pas une rotation continue. Ils tournent progressivement (ou "par étapes", comme leur nom l'indique). Chaque étape correspond à un fragment de rotation complexe déterminé principalement par la conception mécanique du moteur et la méthode de contrôle préférée. Par conséquent, pour obtenir une rotation régulière d'un moteur pas à pas, il faut utiliser un circuit d'attaque avec une division de pas (jusqu'à 256 inclus). Le schéma de commande d'un tel moteur est illustré à la **figure 1**.

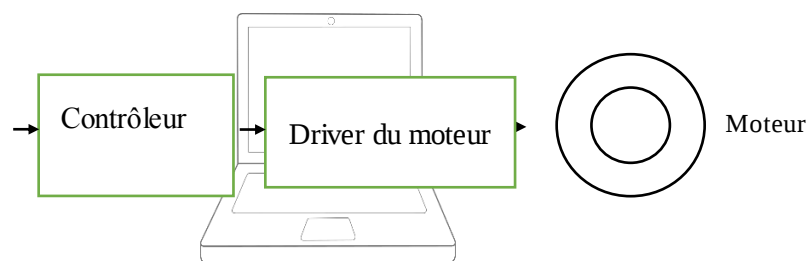


Figure 1. Schéma de contrôle du module de la machine à friction

Le principe de construction modulaire de la machine à friction permettra de réaliser des essais tribologiques sur différents schémas de friction, d'ajouter de nouvelles fonctions réalisant d'autres schémas de friction et d'effectuer d'autres travaux sur l'automatisation de la machine à friction.

Au fil des ans, la mécanisation de diverses catégories d'opérations anthropiques couvre un éventail de plus en plus large de domaines professionnels spécifiques.

Dans [1], un principe modulaire pour la configuration de l'aspect mécanique a été formulé. Pour atteindre cet objectif, deux classifications de modules ont été proposées :

- Le module de mouvement rotatif est par nature un mécanisme complexe et sophistiqué qui assure la rotation précise et méthodique d'un objet autour de son axe. Il s'agit d'un composant indispensable dans de nombreux domaines de la science et de la technologie, qui constitue un élément fondamental dans le développement des machines modernes, de la robotique et de l'automatisation. Sa conception complexe et son fonctionnement compliqué exigent une attention méticuleuse aux détails, l'utilisation de matériaux de pointe, d'algorithmes et de modélisation informatique pour garantir le plus haut degré de précision et d'exactitude. Grâce à sa capacité sans précédent à assurer une rotation fluide et efficace de n'importe quel objet, le module

de mouvement rotatif est devenu un outil important dans le monde actuel de la science et de la technologie.

- Le module de traduction est un élément indispensable qui joue un rôle clé dans le développement des avancées scientifiques. Ses multiples facettes sont au cœur de l'interaction complexe entre les domaines théorique et expérimental, facilitant la traduction des connaissances scientifiques en applications pratiques. Sa conception sophistiquée est optimisée pour la précision et l'exactitude, garantissant que les données expérimentales sont interprétées avec précision et traduites en connaissances significatives. La fonction essentielle du module de traduction dans la recherche scientifique est inégalée et indispensable pour repousser les frontières de la connaissance. Le schéma de commande du module est illustré à la figure 2.

Il a été proposé d'intégrer dans la conception du tribomètre des modules supplémentaires responsables de l'automatisation des opérations auxiliaires, telles que le chargement du composant de frottement. Dans le présent manuscrit, une conception élémentaire d'un composant de couple destiné à être utilisé dans un appareil tribologique fait l'objet d'une étude approfondie. Dans le scénario le plus élémentaire, un module de ce calibre prendrait la forme d'un mécanisme dynamique dans lequel un échantillon cylindrique est placé sur l'arbre (comme le montre la figure 3). Il est important de noter que ce spécimen est intrinsèquement susceptible d'être érodé pendant les essais.

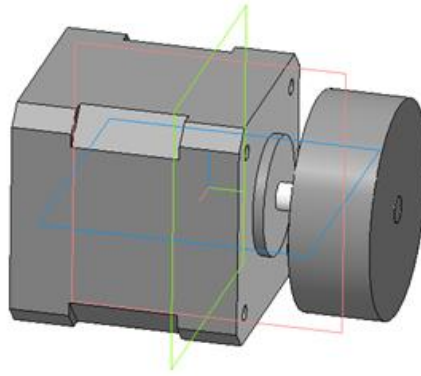
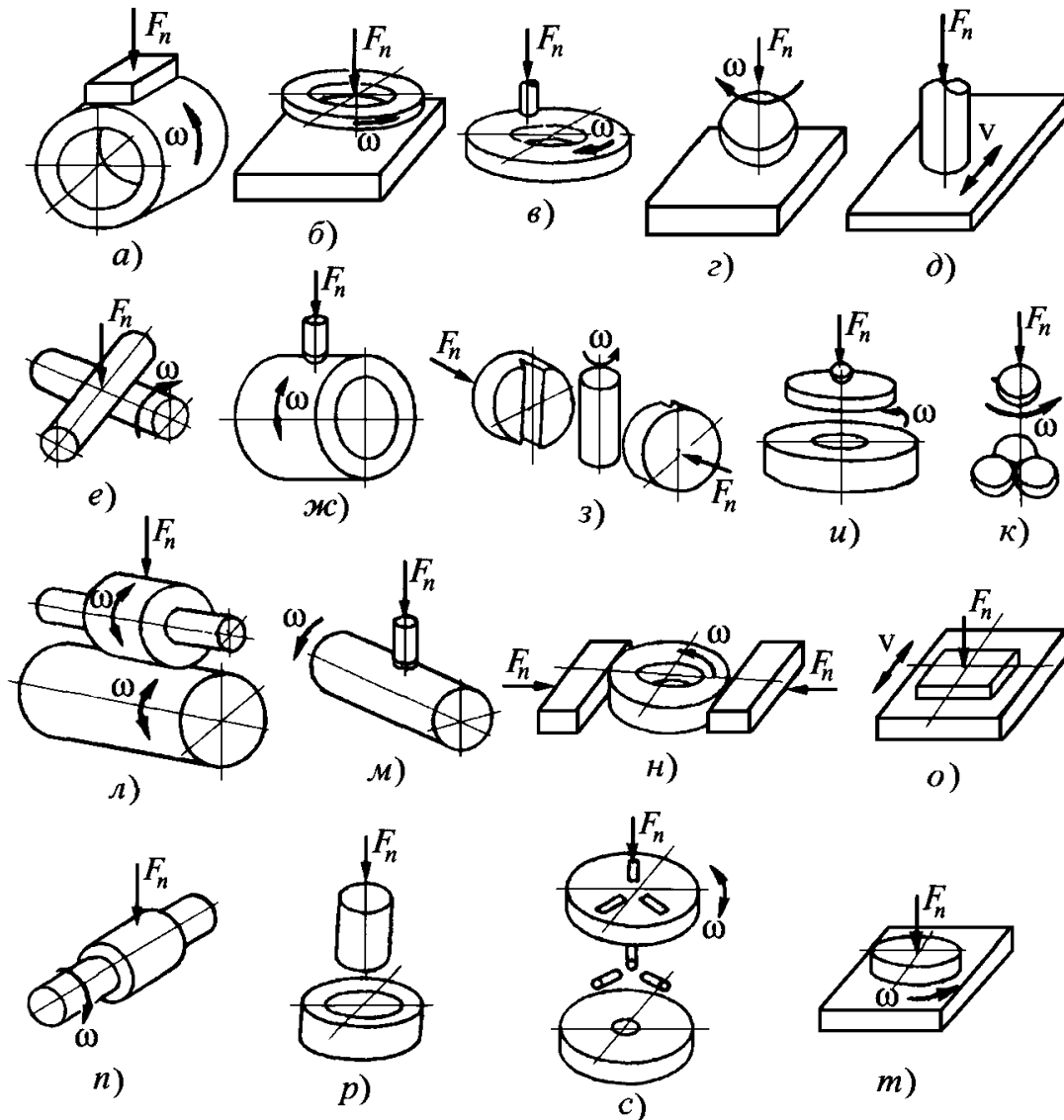


Figure 3. Schéma du module de mouvement rotatif

La figure montre qu'un moteur pas à pas a été choisi pour entraîner l'échantillon cylindrique. Ce moteur est commandé par des impulsions de courant électrique. Les moteurs pas à pas peuvent être commandés assez facilement à l'aide d'un ordinateur et de cartes de

commande relativement peu coûteuses. En utilisant un ou deux modules de mouvement rotatif et des échantillons de formes différentes, les schémas d'essais tribologiques suivants peuvent être mis en œuvre (Fig. 4) :



a - patin sur la bague ; b - bague sur le plan ; c - hémisphère sur le disque ; d - sphère sur le plan ; e - hémisphère sur le plan ; f - cylindres croisés ; g - hémisphère sur le cylindre ; h - patins de calage sur la bague ; i - rondelle d'extrémité ; j - schéma à quatre billes ; k - schéma à quatre billes ; l - cylindres coaxiaux ; m - goupille sur le cylindre ; n - deux patins sur la bague ; o - plan sur le plan ; p - douille sur l'arbre ; p - essais d'emmanchement ; c - rouleaux coulissants ; t - disque sur le plan

Figure 4. Schémas des essais tribologiques

Dans ce cas, en plus des éléments présentés dans la Fig. 5, il est nécessaire d'utiliser différentes constructions pour maintenir et fixer les modules.

À titre d'exemple, la figure 2 montre une réalisation du schéma "deux arbres rotatifs". Dans ce cas, deux modules de mouvement rotatif sont montés sur des supports et fixés par des vis.

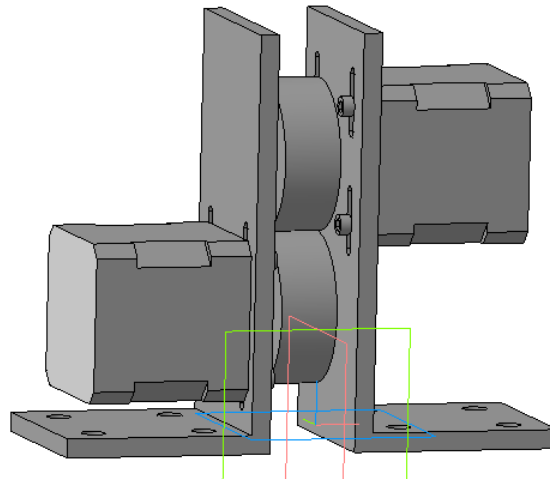


Fig. 5. Schéma de l'installation pour la réalisation du schéma d'essai "deux arbres tournants".

Le principe de fabrication modulaire du dispositif de frottement permettra des études tribologiques non seulement basées sur les schémas de frottement susmentionnés, mais aussi l'intégration de nouveaux com-

posants qui facilitent d'autres mécanismes de frottement. En outre, il facilitera l'automatisation du dispositif de frottement, ce qui élargira encore le champ des expériences (Fig. 5).

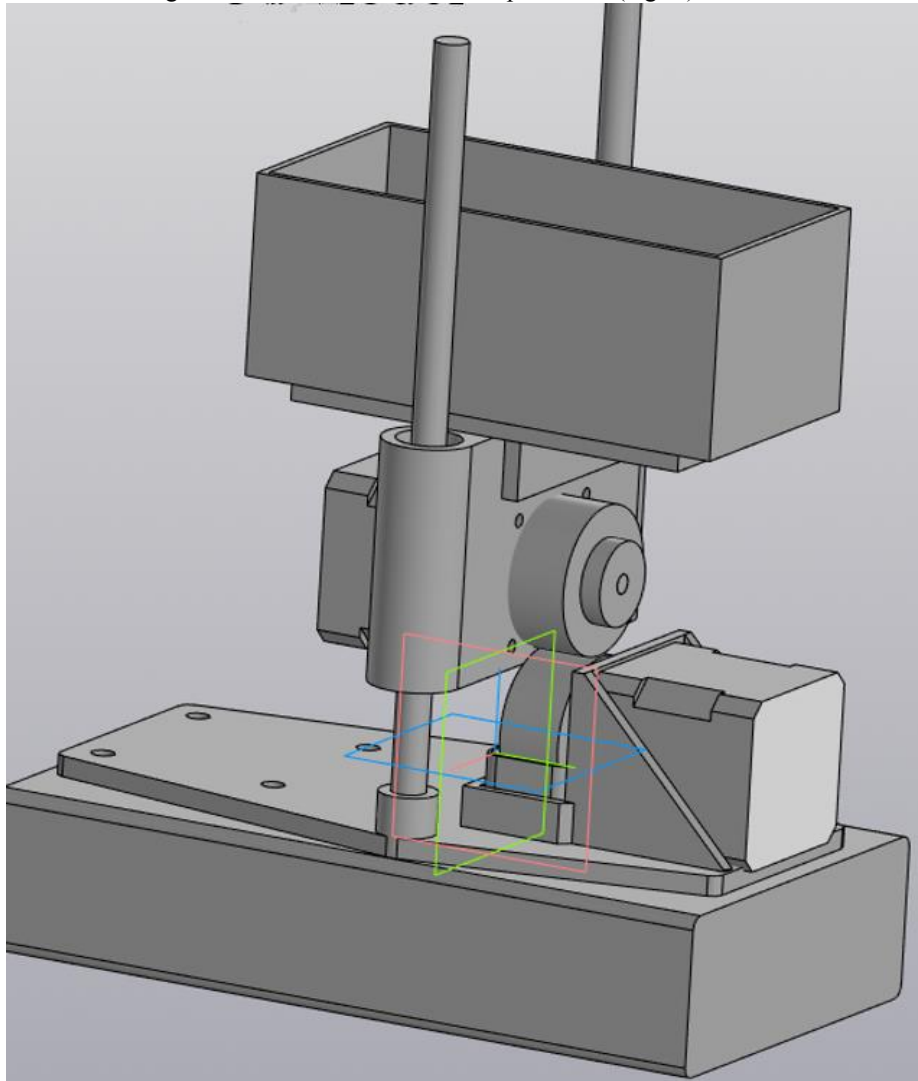


Figure 6. Modèle 3D d'une machine à friction

L'analyse des caractéristiques dynamiques des paires cinématiques supérieures a révélé que l'optimisation des paramètres géométriques permet de réduire les charges maximales de 17 à 23 % [9]. Cela conduit à une diminution des déformations et des contraintes mécaniques dans les zones de contact, contribuant ainsi à une augmentation de la durée de vie des éléments. Dans le cadre de l'étude, un modèle mathématique a été développé pour évaluer l'effet de la modification du rayon de courbure sur la distribution de la pression dans le contact. Le modèle est une équation de la forme [6].

$$P = k(R - r)^n \quad (1)$$

où

P est la pression,

R est le rayon de courbure,

r - déplacement radial,

k et n sont des constantes déterminées expérimentalement

Des expériences menées avec différents types de lubrifiants ont montré que l'utilisation d'un lubrifiant à base de nanoparticules réduit le coefficient de frottement de 25 à 30 % par rapport aux lubrifiants conventionnels [11].

Cela est dû à la formation d'un film mince mais solide sur la surface, qui empêche effectivement le contact direct entre les surfaces métalliques. L'utilisation de la modélisation informatique pour analyser l'influence des paramètres géométriques sur l'usure a révélé que la combinaison optimale de l'angle d'inclinaison et du rayon de courbure peut réduire l'usure de 20 à 25 % [13].

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS, où différents modes de fonctionnement des mécanismes et des conditions de frottement ont été pris en compte.

L'étude de l'influence de la température sur les processus d'usure dans les paires cinématiques supérieures a montré que lorsque les paramètres géométriques sont optimisés et que des lubrifiants avancés sont utilisés, la stabilité du système augmente de 15 à 20 % à des températures élevées [4].

Cela est dû à une distribution plus efficace de la chaleur et à une réduction de la surchauffe locale. Des études expérimentales ont montré que l'utilisation de matériaux améliorés pour les éléments des paires cinématiques, tels que les alliages à base de titane et de cobalt, ainsi que l'optimisation de leur géométrie, contribuent à une augmentation de la résistance à l'usure de 35 à 40 % [15].

Cela est dû aux propriétés uniques de ces matériaux, notamment leur grande dureté et leur résistance à la corrosion.

conclusion

En conclusion, l'optimisation des performances géométriques des accouplements cinématiques surélevés est une tâche importante dans le domaine de l'ingénierie mécanique. Cette tâche exige une connaissance approfondie du sujet, une méthodologie diversifiée et la prise en compte de nombreux facteurs. La mise en œuvre réussie de méthodologies avancées et de techniques d'optimisation permet d'obtenir des mécanismes

de pointe qui dureront longtemps et fonctionneront avec une fiabilité maximale et une efficacité optimale. Des études approfondies des machines et appareils nécessaires aux expériences tribologiques sont passées en revue. Le concept d'une étude tribologique modulaire et les algorithmes associés pour optimiser ses performances sont formulés. La création de l'étude tribologique modulaire est réalisée.

Littératures:

1. Agwoko, M.P. Experimental and Numerical Studies on Dynamic Characteristics of Long-Span Cable-Supported Pipe Systems/ M.P. Agwoko, Z.Chen and H. Liu// Int J. Steel Struct. 2021. № 21. P. 274-298. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00438-x>.
2. A new approach to the design of a delta robot with a desired workspace/ X.J. Liu, [et al.]// J. Intell. Robot Syst., 2004, vol. 39, no. 2, pp. 209-225, doi: <https://doi.org/10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68>.
3. Artificial-Neural-Network-Based Mechanical Simulation Prediction Method for Wheel-Spoke Cable Truss Construction/ Z. Liu, [et al.]// Int J. Steel Struct. 2021. № 21. P. 1032-1052. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00488-9>.
4. Stiffness optimization of delta robots. In: ROMAN-SY23/ C. Mirz, [et al.]// Springer, 2020, pp. 396-404.
5. Averin, A.N. Small vibrations of a rigid thread near a static equilibrium position/ A.N. Averin // Structural mechanics and structures. 2018. № 2 (17). C. 53-66.
6. Valyukhov, S.G. Using approximation models to optimize the profile of a centrifugal pump impeller/ S.G. Valyukhov, [et al.]// Pumps. Turbines. Systems, 2020, No. 2, p. 58-65.
7. Galdin, D.N. Optimization of the profile of the spatial impeller of a centrifugal pump using a parameterized model of the flow path and an artificial neural network// D.N. Galdin, A.V. Kretinin and S.V. Pechkurov// Proceedings of MNTK SINT21. Voronezh, 2021, p. 31-42.
8. Karpunin, V.G. Computer modeling of building structures of buildings and structures// V.G. Karpunin, and E.A. Golubeva// Architect: news from universities. 2019. No. 4 (68). P. 17.
9. To the calculation of Delta type mechanisms with linear drives and different numbers of degrees of freedom/ P.A. Laryushkin, [et al.]// Problems of mechanical engineering and machine reliability, 2019, No. 3, p. 19-29, doi: <https://doi.org/10.1134/S0235711919030106>.
10. Svoboda, D.G. Optimization of the flow path of an axial pump using direct methods/ D.G. Svoboda, [et al.]// News of higher educational institutions. Mechanical Engineering, 2022, No. 12, p. 116-123, doi: [10.18698/0536-1044-2022-12-116-123](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-12-116-123).
11. Semenova, A.V. Target functionals for optimizing the impeller of rotary-blade hydraulic turbines/ A.V. Semenova, D.V. Chirkov and A.E. Lyutov// Scientific and technical bulletin of SPbSPU, 2014, No. 3, p. 97-106.
12. Semenova, A.V. Application of a multi-objective optimization method for designing the blade shape

of a rotary-blade hydraulic turbine/ A.V. Semenova, D.V. Chirkov and V.A. Skorospelov// News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2013, v. 15, no. 4-2, p. 588-593.

13. Sokolova, M.A. Optimization design of the impeller blade shape using the “dependence of efficiency on flow” criterion/ M.A. Sokolova, V.E. Rigin and A.V. Semenov// Hydraulic machines, hydropneumatic drives and hydropneumatic automation. Sat. scientific tr. Int. scientific-technical conf. St. Petersburg, SPbPU Publishing House, 2016, p. 114123.

14. Tarasov, D.A. Modeling the stress-strain state of bending-rigid threads/ D.A. Tarasov, N.Yu. Mitrokhina and E.V. Manchenkova// Models, systems, networks in economics, technology, nature and society. 2022. No. 1 (41). pp. 82-93. DOI: 10.21685/ 2227-8486-2022-1-9.

15. Multi-objective optimization of the shape of a hydraulic turbine suction pipe. Hydraulic machines, hydraulic drives and hydropneumatic automation. Current state and development prospects / D.V. Chirkov, [etc.] // Sat. Art. XII All-Russian Scientific and Technical. conf. St. Petersburg, POLYTECH-PRESS, 2022, p. 10-28, doi: 10.18720/SPbPU/2/id22-159.