

УДК 621.317.77

DOI: 10.18372/2073-4751.76.18238

Квасніков В.П., д.т.н.,
orcid.org/0000-0002-6525-9721,**Шелуха О.О.**, к.т.н.,
orcid.org/0000-0002-6088-8262,**Квашук Д.М.**, к.е.н.,
orcid.org/0000-0002-4591-8881,**Копитов В.А.**,
orcid.org/0009-0009-0882-733X

СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО ЗОРУ

Національний авіаційний університет

dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua

Вступ

У сучасному світі електродвигуни відіграють вирішальну роль у багатьох промислових, транспортних та побутових застосуваннях. Надійність і ефективність цих двигунів безпосередньо залежать від точності та стабільності їх роботи, особливо. Традиційні методи вимірювання обертового моменту зазвичай залежать від фізичного контакту з двигуном, що може привести до збоїв у роботі або пошкодження обладнання. Це створює потребу у розробці більш ефективного, безконтактного методу вимірювання.

Останнім часом методи машинного зору демонструють величезний потенціал у різних областях, включаючи промислову автоматизацію та контроль якості. Проте, застосування цих методів для точного вимірювання обертового моменту електродвигунів залишається відносно не дослідженою областю. Існуючі методи або не забезпечують достатньої точності, або вимагають складних і дорогих установок.

Тому існує потреба у нових підходах до вимірювання обертових параметрів електродвигунів, що використовують нові інформативні параметри, зокрема методи машинного зору для безконтактного відстеження характеристик обертання валу та інших властивостей.

Не вирішеною проблемою на сьогоднішній день є інтеграція сенсорів та алгоритмів для обробки зображень для точного

та надійного вимірювання, мінімізуючи втручання у роботу двигуна та знижуючи ризики пошкодження. А також розробка приладів, які дозволять точно та економічно обґрунтовано проводити вимірювання, будуть легко інтегрованими до існуючих промислових систем та зможуть адаптуватися до змін умов, яких проводиться вимірювання.

Аналіз досліджень та публікацій

Основна ідея, що пов'язана з вимірюваннями обертових параметрів за допомогою методів машинного зору полягає у визначенні характеристик зміщення валу враховуючи швидкість, прискорення, періодичність та інші параметри. Так, дослідники в роботі [1] розробили методіку оцінки структурного зміщення шляхом поєднання вимірювань прискорення та комп'ютерного зору. Вони запровадили метод автоматичного обчислення масштабного коефіцієнта, який перетворює вимірювання (у пікселях) на переміщення (в одиницях довжини). Для кращого відстеження, розроблено вдосконалений алгоритм зіставлення функцій. Це запропонувати адаптивний багатошвидкісний фільтр Калмана для плавного поєднання асинхронного комп'ютерного зору та вимірювань прискорення з різними частотами дискретизації. Методика була підтверджена за допомогою випробувань, на стружучому столі.

Здатність точно оцінювати структурні зміщення в режимі реального часу дозволить визначити параметри обертання та скручування валу. Тому, такий метод може бути адаптований і до вимірювання кутових переміщень та прискорень.

Дослідження переміщень за допомогою машинного зору проведене в [2] на основі роботизованої руки, керованої мікроконтролером *Arduino Mega 2560* показало можливість виконувати такі завдання, як підйом, перенесення та розвантаження об'єктів у певних місцях. Це передбачало інтеграцію електродвигунів для точного керування рухами та експерименти з системою 3D-зору для розпізнавання об'єктів і просторової координації. Запропонована система дозволила розпізнавати деформацію об'єкта та просторові координати, тим самим контролюючи відхилення від початкового тренування.

Разом з тим, існують ряд обмежень, які, через високу швидкість рухомих об'єктів, недостатність освітлення та інших факторів обмежують точність обробки даних в реальному часі.

Зважаючи на те, що дослідження пов'язані із машинним розпізнаванням зміни положення об'єкта виконуються для управління об'єктами, визначення їх положення, а не швидкості переміщення, як наприклад в роботах [2-4], процеси збільшення обчислювальних потужностей наближають виникнення засобів вимірювання обертальних параметрів, що базуються на технології машинного зору.

Наприклад в роботі [5] запропоновано метод вимірювання швидкості переміщення робота та керування на його сонові обертальним моментом електродвигуна. Проте, методи запропоновані у статті не враховують ризик неточностей у вимірюваннях швидкості та обертального моменту, особливо в умовах змінних навантажень, або нестабільного живлення. В системах керування, особливо тих, що залежать від обчислювальних алгоритмів, може виникати затримка між вимірюванням швидкості та відповідним коригуванням обертального моменту, що може вплинути на плавність та точність руху робота.

Зважаючи на недосконалість таких методів, більш точними та швидкими є гіроскопічні методи, що також використовують візуальні особливості переміщення, але не орієнтуються на зображення.

Методи зондового сканування переміщення валу, як правило основні на вимірювання частотних характеристик, що задають різні оптичні сенсори, а також резистивні методи, які базуються на пропорційності кута скручування валу та освітленості тензOMETричного приймача, який фіксує рівень інтенсивності освітлення в результаті кутового зміщення динамометричного елемента.

Принцип дії таких методів описано в роботах [6-9].

Принцип вимірювання та частотна характеристика таких методів представлена на рис. 1 та рис. 2.

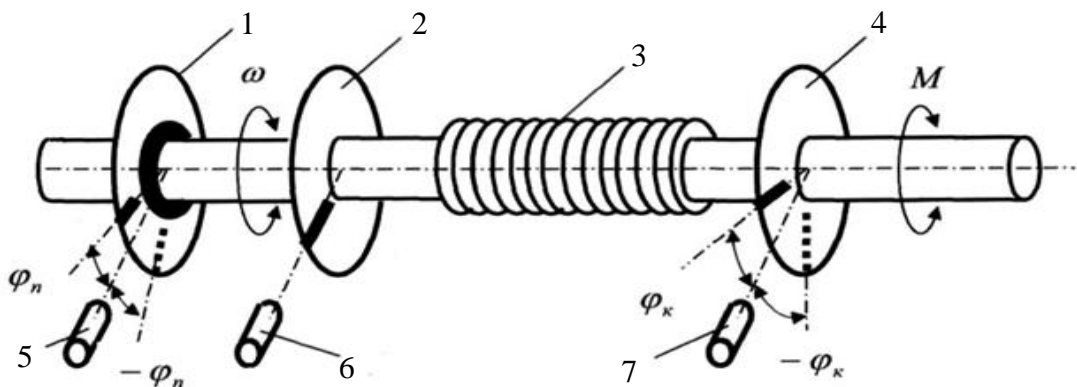


Рис. 1. Будова пристрою для вимірювання обертального моменту, швидкості обертання та прискорення [10]

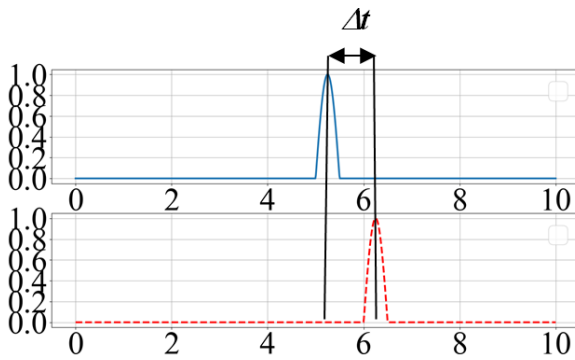


Рис. 2. Характеристика зсуву імпульсів отриманих від датчиків 6, 7, рис. 1

Базуючись на законі Гука, кут, скручування, пропорційний переданому моменту:

$$M = f(\phi_C) = \frac{10^6 \pi \phi_C G_p J}{180 L}, \quad (1)$$

де M – це обертальний момент, $f(\phi_C)$ – функція, що визначає обертальний момент як функцію від ϕ_C , ϕ_C – змінна, яка може представляти кутове положення, G_p – константа, що характеризує матеріал пружного елемента, J – момент інерції, L – довжина динамометричної пружини.

Деформації ϵ_1 та ϵ_2 пов'язані з деформаціями у напрямках X та Y наступними залежностями:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_1, \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_2, \quad (3)$$

де θ_1 та θ_2 – є кутами, які визначають орієнтацію осей відносно головних осей деформації пружного елемента.

Звідси зсувні деформації виражаються формулою:

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\epsilon_1 - \epsilon_2) - (\epsilon_x - \epsilon_y)(\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2)}{\cos 2\theta_2 - \sin 2\theta_2}.$$

Якщо $\cos 2\theta_1 \equiv \cos 2\theta_2$, то:

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2}, \quad (4)$$

При цьому:

$$\theta_1 + \alpha = -\pi/2, 0, \pi/2, \pi \dots \frac{n\pi}{2} = \theta_2 - \alpha, \quad (5)$$

Максимальне кутове скручування динамометричного елемента буде мати вираз:

$$\gamma_{MAX} = \sqrt{\gamma_A^2 + \gamma_B^2}, \quad (6)$$

Використовуючи діаграму Мора основні деформації можна обчислити наступним чином:

$$\epsilon_p, \epsilon_q = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}, \quad (7)$$

Разом з тим, застосування таких методів, може збільшувати складність системи, що вимагає додаткових ресурсів для розробки, налагодження та обслуговування, а також може збільшити вартість приладу. Тому, найбільш розповсюдженими є тензометричні та індуктивні методи вимірювання обертальних па метрів, які дозволяють отримати перетворення зміни опору та індуктивності у вихідний сигнал в залежності від деформації валу.

Виходячи із дослідженого, можна зазначити, що використання методів комп'ютерного зору для вимірювання обертальних параметрів електродвигунів, може надати значні переваги порівняно з традиційними методами, такими як: зондове сканування переміщення валу, фотометричні, індуктивні, резистивні та інші методи, оскільки комп'ютерний зір дозволяє вимірювати переміщення валу без впливу на роботу двигуна. Традиційні методи, як правило, вимагають фізичного контакту з об'єктом, що може впливати на його функціональність або викликати додаткове зношування.

Вимірювальні системи основані на технологія машинного зору можуть бути легко адаптовані для різних типів електродвигунів без потреби в зміні фізичного обладнання. На відміну від тензометричних або індуктивних методів, які можуть вимагати специфічного обладнання для кожного типу двигуна. Крім того, зважаючи на високу вартість таких систем, вони можуть зменшити експлуатаційні витрати.

Мета

Запропонувати спосіб вимірювання обертального моменту електродвигуна на основі машинного зору. Провести моделювання такого методу вимірювання.

Основна частина

Для створення приладу для вимірювання обертального моменту електродвигуна з використанням машинного зору

розроблено спеціалізовану муфту, що містить у своєму ядрі в'язку рідину (рис. 3). Принцип роботи заснований на тому, що під дією крутного моменту на поршень 4, 3, генерованого валом електродвигуна.

В'язка рідина буде створювати тиск, який в свою чергу змушуватиме поршень 2 переміщатися відносно мітки K на величину Δx .

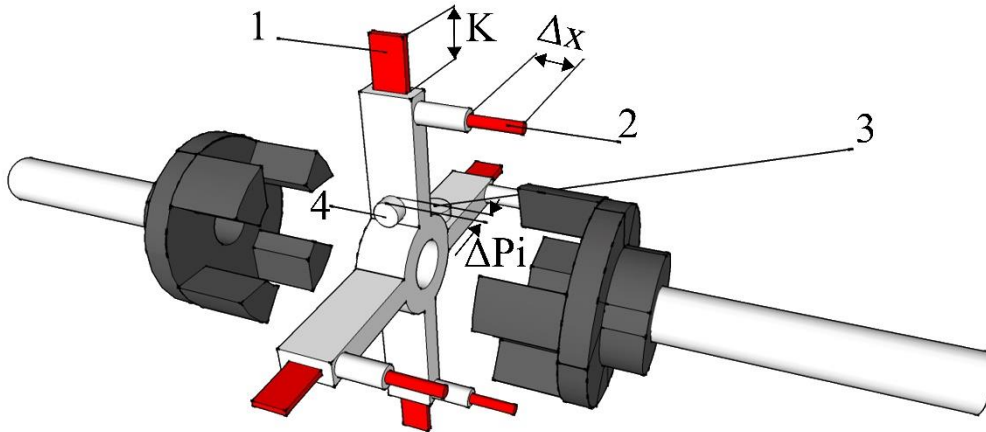


Рис. 3. Муфта для вимірювання обертового моменту з використанням машинного зору

Крутний момент, що діє на вал, можна виразити через залежність між дією рідини на поршень та переміщення поршня 2 на величину Δx .

Так, маючи залежність деформації валу від моменту, отримаємо залежність з урахуванням $M=k \times \Delta x$, яка передбачає визначення, як конкретні деформації у системі (наприклад, у валу під час скручування) впливають на загальну деформацію Δx .

Припустимо, що є лінійна залежність між крутним моментом і переміщенням поршня $M=k \times \Delta x$, де k – константа пропорційності, Δx – відстань, на яку висунувся поршень.

Якщо переміщення поршня Δx можна виміряти в пікселях за допомогою системи машинного зору, і, якщо один піксель еквівалентний відстані d , то $\Delta x=d \times p$, де p – розмірність пікселів на зображенні висунутого поршня.

Такий спосіб може бути інваріантним до відстані, якщо визначення d буде основане на порівнянні з K .

В свою чергу під час обертання валу елементи 1 та 2, рис. 3, будуть мати наступний вигляд (рис. 4), що зручно для виділення використовуючи відомі детектори. Таким чином, переміщення поршня стає

основним показником величини обертового моменту. Для вимірювання довжини висунутого поршня використовується система машинного зору, реалізована на базі бібліотеки *OpenCV*, яка дозволяє провести аналіз зображення, отримане з камери, що спрямована на поршень.

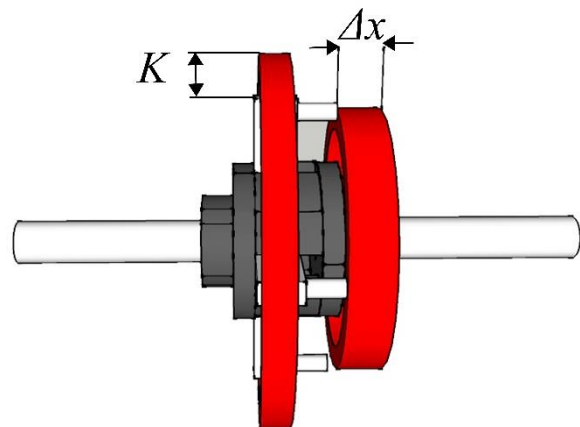


Рис. 4. Вигляд муфти для вимірювання обертового моменту під час обертання валу

Перед використанням система проходить калібровку, щоб визначити константу k та відношення d до K . При цьому $d_{max}=K$.

Для калібрування даного пристрою можна використати важільний силовимірювач (рис. 5), приєднавши його до валу.

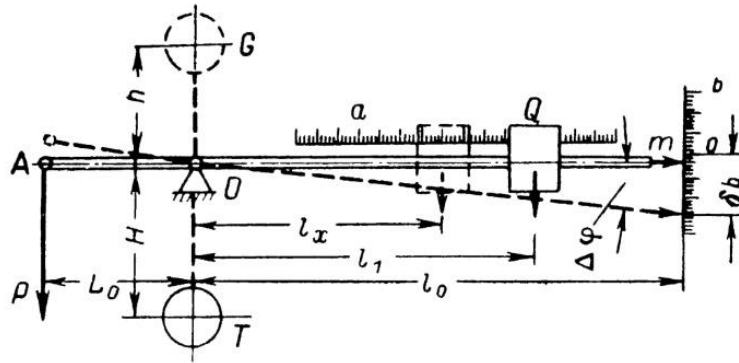


Рис. 5. Важільний сило-вимірювач [11]

Провівши моделювання на основі моделі розгону електродвигуна, що зазначена в [12], (рис. 6) було отримано перехідний процес для Δx , що дозволило отримати дані для моделювання. Так через вираз $\Delta x = \frac{M}{k}$, маючи M та k , отримаємо

перехідну характеристику для Δx (рис. 7), де видно, що чутливість такого приладу незначна. Відповідно, діапазон зміни ΔPi у порівнянні з Δx відрізняється. Разом з тим, рівняння $f(\Delta Pi) = f(\Delta x)$ потребує подальшого вирішення.

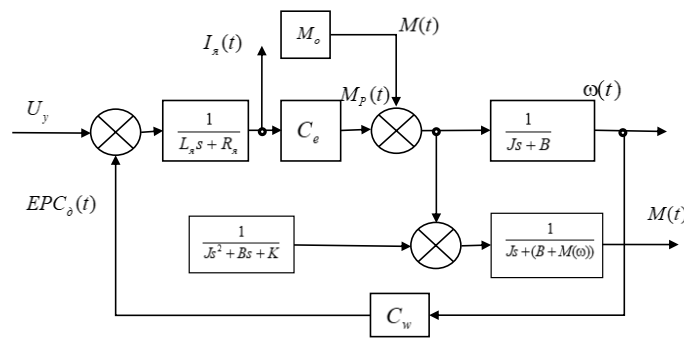


Рис. 6. Структурна схема колекторного двигуна постійного струму, де EPC_{δ} – зворотна ЕРС двигуна; M_o, M_p, M – момент опору, рушійний момент, загальний момент прикладений до валу ротора; B – коефіцієнт тертя

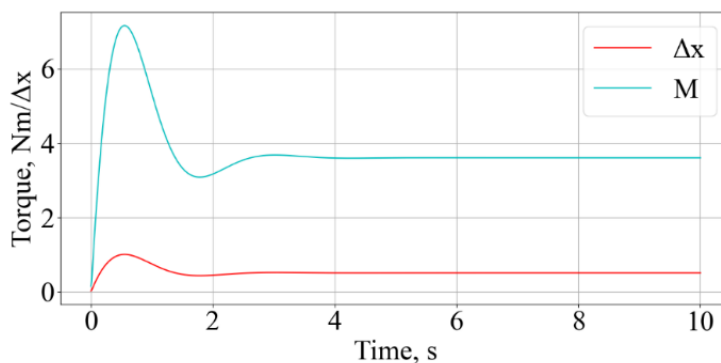


Рис. 7. Визначення зміни положення поршня 2, (рис. 3) в залежності від обертового моменту

Таким чином, ми отримали зміну положення поршня, що буде розпізнаний з використанням методів машинного зору, які дозволяють точно відслідковувати та аналізувати переміщення та крутні моменти в реальному часі. Подальші

дослідження будуть зосереджені на розробці та імплементації програмного забезпечення, яке використовуватиме алгоритми машинного зору для автоматизованого виявлення та квантифікації змін у положенні поршня. Це включатиме розробку

спеціалізованих алгоритмів обробки зображень та використання технік глибокого навчання для підвищення точності та надійності системи вимірювання в різних умовах експлуатації.

Таким чином, залежність між обертальним моментом та кутом скручування валу, визначена законом Гука, надає розуміння поведінки матеріалів та пружних елементів під навантаженням.

Висновки

Результати дослідження різних методів вимірювання обертальних моментів електродвигунів вказують на один загальний недолік: необхідність втручання в структуру роботи електродвигуна, або потребу дотримання стаціонарних умов експлуатації. Введення методу машинного зору з використанням динамометричної муфти, яка реагує на зміни обертального моменту, дозволяє здійснювати безконтактні вимірювання, за умови візуального контакту з муфтою.

Спеціалізована муфта, розроблена для вимірювання обертального моменту в електродвигунах, базується на тому, що під дією крутного моменту, генерованого валом електродвигуна, в'язка рідина створює тиск, що змушує поршень переміщатися відносно мітки K на величину Δx . Система машинного зору, дозволяє вимірювати переміщення поршня Δx у пікселях, при цьому один піксель еквівалентний відстані d , що забезпечує точність вимірювань незалежно від відстані, завдяки калібровці системи на основі порівняння з міткою K .

Моделювання на базі синхронного електродвигуна постійного струму показало, що візуальні зміни сигнального поршня муфти корелюють з обертальним моментом, проте чутливість цієї системи вимагає подальшого удосконалення. Це стосується, зокрема, розробки точної моделі залежності кута скручування валу від довжини висування поршня. Також актуальною залишається потреба в розробці відповідного програмного забезпечення, яке б враховувало необхідну швидкість реакції вимірювального пристрою.

Література

1. Ma Z., Choi J., Sohn H. Real-time structural displacement estimation by fusing asynchronous acceleration and computer vision measurements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2021. V. 37. Iss. 6. P. 688–703.
2. Kumar V., Wang Q., Minghua W., Rizwan S., Shaikh S.M., Liu X. Computer vision based object grasping 6DoF robotic arm using picamera. *2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR) / Auckland, New Zealand, 2018*. P. 111–115.
3. Secuianu D., Lupu C. Implementation of a home appliance mobile platform based on computer vision: self-charging and mapping. *2018 22nd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC) / Sinaia, Romania, 2018*. P. 464–468.
4. Gorakala A.C., Vuyyuri L., Jyothirmaie D., Muinuddin M.K., Chisti. Audio-Video Scrutinizing bot with Night Vision. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2021. V. 8. Iss. 5. P. 2144–2150.
5. Cubero S., Marco-Noales E., Aleixos N., Barbé S., Blasco J. RobHortic: A Field Robot to Detect Pests and Diseases in Horticultural Crops by Proximal Sensing. *Agriculture*. 2020. V. 10. No. 7. 276.
6. Sangdani M.H., Tavakolpour-Saleh A.R., Lotfavar A. Genetic algorithm-based optimal computed torque control of a visionbased tracker robot: Simulation and experiment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2018. V. 67. P. 24–38.
7. Zappalá D., Bezziccheri M., Crabtree C.J., Paone N. Non-intrusive torque measurement for rotating shafts using optical sensing of zebra-tapes. *Measurement Science and Technology*. 2018. V. 29. No. 6. 065207.
8. Alejandro Fabio Veyrat Durbex, Yaki Nachajon Schwartz, Hernán Tacca. Solutions for Torque and Speed Measurement on Electric Machine Controllers Test Benches. *Revista electron*. 2021. V. 5. No. 1. P. 20–31.

9. Sue P., Wilson D., Farr L., Kretschmar A. High precision torque measurement on a rotating load coupling for power generation operation. *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings / Graz, Austria*, 2012. P. 518–523.

10. Безконтактний вимірювач крутного моменту, частоти обертання вала та його прискорення: пат. 139522 Україна: G01L 3/00. № u201906456; заявл. 10.06.2019; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1/2020.

11. Main T.J., Brown T. The Indicator and Dynamometer (1864). Kessinger Publishing, 2010. 102 p.

12. Квасніков В.П., Братченко Г.Д., Квашук Д.М. Оцінювання невизначеності вимірювання обертальних моментів електродвигунів на базі теорії нечітких множин. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2023. В. 1(22). С. 23–34.

Квасніков В.П., Шелуха О.О., Квашук Д.М., Копитов В.А.

СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО ЗОРУ

Стаття представляє новий підхід до вимірювання обертального моменту електродвигунів, використовуючи технології машинного зору. Основна мета цього дослідження полягає у розробці методу вимірювання, що мінімізує втручання в роботу електродвигуна. Досліджено, як алгоритми обробки зображень та аналізу даних використовуються для інтерпретації візуальної інформації, отриманої з обертових елементів двигуна. В теоретичній частині статті розглядаються принципи машинного зору, а також аналізуються існуючі методи вимірювання обертального моменту, вказуючи на їхні обмеження та потенційні області покращення. Науковий внесок роботи полягає у використанні комбінованих методів обробки зображень та аналітичних алгоритмів для визначення параметрів обертання. Експериментальна частина включає в себе розробку моделювання залежності кута скручування динамометричної муфти та зміни візуального параметру, який визначається оптичними засобами, використовуючи машинний зір.

Ключові слова: обертальний момент, машинний зір, вимірювальний перетворювач, динамометрична муфта, чутливість приладу, точність.

Kvasnikov V.P., Shelukha O.O., Kvashuk D.M., Kopytov V.A.

THE METHOD OF MEASURING THE ROTARY MOMENT OF ELECTRODE-HUN USING METHODS OF MACHINE VISION

This article presents a new approach to measuring the torque of electric motors using machine vision technologies. The main goal of this study is to develop a measurement method that minimizes interference with the operation of the electric motor. It has been studied how image processing and data analysis algorithms are used to interpret visual information obtained from the rotating elements of the engine. In the theoretical part of the article, the principles of machine vision are considered, as well as the existing methods of torque measurement are analyzed, indicating their limitations and potential areas for improvement. The scientific contribution of the work consists in the use of combined methods of image processing and analytical algorithms to determine the rotation parameters. The experimental part includes the development of modeling of the dependence of the torsion angle of the dynamometric coupling and the change of the visual parameter, which is determined by optical means, using machine vision.

Keywords: torque, machine vision, measuring transducer, torque coupling, device sensitivity, accuracy.