

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-255-261](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-255-261)
УДК 004.9:621.317

О.О. Шелуха., к.т.н.
Державний університет «Житомирська політехніка»
К.В. Молчанова, к.т.н.
І.Г. Бабічев, аспірант
Національний авіаційний університет,

Використання машинного зору для визначення обертальних зусиль електродвигунів

У статті розглядається проблема вимірювання обертальних зусиль електродвигунів з використанням технологій машинного зору. Показано, що традиційні методи, засновані на встановленні силовимірювальних сенсорів на вал електродвигуна, вимагають складних технологічних рішень, і мають обмеження з приводу складності монтажу та експлуатаційних витрат. В статті обговорюється потреба у нових методах вимірювання обертальних зусиль, а також показано перспективність застосування технологій машинного зору для вирішення цієї проблеми. Представлено спосіб вимірювання обертальних зусиль електродвигунів для покращення надійності вимірювань, що може забезпечити оптимізацію в обслуговуванні вимірювальних систем.

Пропонується новий метод визначення обертальних навантажень на вал електродвигуна за допомогою машинного зору. Цей метод передбачає обробку зображень, що використовують спеціальні мітки, які розміщені на динамометричному елементі. Такий підхід дозволяє здійснювати вимірювання обертальних зусиль з використанням технологій обробки зображень. Запропоновано використання комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи, що використовує метод машинного зору для вимірювання обертальних зусиль електродвигунів. Система має інтерфейс користувача та дозволяє візуалізувати отримані дані.

Для підвищення динамічних характеристик системи запропоновано оптимізувати алгоритми обробки зображень, застосувати потужніші обчислювальні ресурси, впровадити апаратне прискорення та оптимізувати передачу відеопотоку.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система; машинний зір; електродвигун; обертальні навантаження.

Актуальність теми. У сучасному високотехнологічному промисловому середовищі точне та ефективне вимірювання обертальних зусиль електродвигунів відіграє вирішальну роль для забезпечення оптимальної продуктивності, безпеки та надійності технологічних процесів. Традиційні методи вимірювання, які базуються на встановленні датчиків безпосередньо на валу електродвигуна, часто стикаються з низкою технічних і фінансових викликів.

Використання силовимірювальних датчиків може бути складним, трудомістким та вартісним процесом, а їх експлуатаційні характеристики та вартість створюють додаткові обмеження для промислових підприємств. Крім того, встановлення таких пристроїв часто вимагає зупинки виробничого процесу, що призводить до додаткових витрат і простоїв.

З огляду на ці проблеми, виникає нагальна потреба в розробці нових, більш ефективних і економічних методів вимірювання обертальних зусиль електродвигунів. Застосування передових технологій машинного зору є перспективним та інноваційним рішенням цієї проблеми. За допомогою машинного зору є можливість отримувати точні дані про динамічні характеристики рухомих об'єктів, не вдаючись до складної інтеграції датчиків у виробничий процес.

Пропозиція використання машинного зору для вимірювання обертальних зусиль електродвигунів не лише вирішує проблему складності та витратності традиційних методів, але й відкриває нові можливості для покращення точності, надійності та безперервності вимірювань. Це досягається шляхом створення умов для розпізнавання динамометричних змін торсійних елементів і використання спеціальних алгоритмів для візуалізації та аналізу обертальних зусиль у режимі реального часу без втручання у виробничий процес.

Такий підхід дозволить значно скоротити витрати підприємств на обслуговування та підтримку складного силовимірювального обладнання, а також підвищити ефективність виробництва завдяки безперервному моніторингу і оптимізації технологічних процесів. Крім того, впровадження машинного зору для вимірювання обертальних зусиль електродвигунів відкриває нові перспективи для подальшого розвитку промислової автоматизації та цифрових технологій у виробництві.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Безконтактні методи вимірювання обертальних моментів стають все більш актуальними у промисловості, оскільки вони

дозволяють уникнути низки проблем, пов'язаних з традиційними методами, що вимагають встановлення датчиків безпосередньо на валу. Одним із таких підходів є використання імпульсних фотометричних методів.

Принцип дії імпульсних фотометричних методів полягає у застосуванні лічильника імпульсів на валу з спеціальною динамометричною вставкою. По обидва боки вставки розміщуються елементи для фіксації кута обертання. Отриманий кут дозволяє визначити крутний момент на основі оберальної жорсткості динамометричної вставки. Ефективність цього методу підтверджується експериментальними даними, які демонструють високий рівень кореляції між вимірюваним моментом та моделюванням пружності вала [1]. Такий підхід успішно застосовується не лише для вимірювання на окремих валах, а й для великих механічних приводів [2], що підтверджує його універсальність та точність.

Іншим варіантом імпульсних фотометричних методів є використання оптичних зондів замість напівпровідникових сенсорів для генерації імпульсів [3]. У цьому випадку зонди реагують на зміну кольору спеціальних міток, розташованих на валу. Зсув фаз між імпульсами, що генеруються зондами, дозволяє визначити кут скручування вала. Такий підхід тісно пов'язаний з технологіями машинного зору, оскільки вимірювання здійснюється шляхом ідентифікації змін у кольоровому зображенні елементів, розміщених на валу приводу.

Варто зазначити, що в [3] не повністю розглянуті обмеження щодо швидкості обертання вала для цього методу. Зокрема, експерименти проводилися лише в діапазоні швидкостей від 1600 до 1900 обертів за хвилину, тоді як для більш високих швидкостей, що перевищують 2000 обертів за хвилину, даних немає.

Імпульсні фотометричні методи, особливо у поєднанні з технологіями машинного зору, демонструють величезний потенціал для безконтактного вимірювання оберальних моментів у промислових умовах. Однак для їх широкого впровадження у виробництво необхідно провести додаткові дослідження з метою розширення діапазону вимірюваних швидкостей обертання та підвищення точності вимірювань.

При високих частотах обертання зростають вимоги до швидкодії вимірювальних пристроїв, оскільки необхідно визначити граничні швидкості, за яких сенсори можуть працювати без значних похибок. Точність вимірювання залежить від швидкодії оптичних зондів та методів обробки сигналу. Крім того, під час реалізації імпульсних методів вимірювання крутного моменту потрібно виконувати додаткову фільтрацію для усунення шумів, спричинених зовнішніми дестабілізуючими чинниками.

Існують також методи, що базуються на розпізнаванні візуальних особливостей обертання вала, наприклад, з використанням сенсорів, які отримують імпульсну характеристику обертання за допомогою відповідних прорізів у розміщених на валу дисках, що фіксуються фотоелементами [4, 5]. У цьому випадку точність вимірювання залежить від тактової частоти мікроконтролера, яка в свою чергу залежить від кількості імпульсів, отриманих за один оберт вала. Тому необхідно знайти баланс між потужністю мікроконтролера та частотними характеристиками генератора імпульсів. Схожий за принципом метод із застосуванням фотосенсорів використовувався і в роботі [6].

Технології машинного зору мають широкий спектр застосування для таких завдань і можуть бути інтегровані в комплексні рішення для реалізації функцій діагностики, моніторингу та оптимізації роботи різноманітних оберальних систем, зокрема електричних приводів.

Методи візуального контролю за рухомими об'єктами зазвичай реалізуються за допомогою спеціальних матричних детекторів. Наприклад, у дослідженні [7] автори використовували методи обробки зображень для визначення кутової швидкості лопатей вітряних турбін. Для підвищення точності фіксації руху на лопаті було встановлено спеціальні сигнальні мітки. Також було розроблено алгоритми для точного виявлення положення цих міток та відстеження лопатей у послідовних кадрах відеопотоку.

В інших сферах машинний зір часто використовується як основний інформативний параметр. Наприклад, у [8] розроблено систему автоматичного управління, яка використовує алгоритми для виявлення зростання рослин на основі аналізу змін форми та кольору об'єкта. Ця система визначає зміну кількості пікселів певного кольору, що дозволяє виконувати прості обчислення. Застосування окремих фільтрів та детекторів полегшує виділення контурів об'єкта та його кольорової гами на зображенні, спрощуючи процес. Однак для більш складних об'єктів або у випадку недостатньої якості освітлення може знадобитися використання окремих навчених моделей.

Таким чином, імпульсні фотометричні методи в поєднанні з технологіями машинного зору відкривають нові можливості для безконтактного високоточного вимірювання оберальних моментів у промисловості. Подальші дослідження в цій галузі дозволять розширити діапазон вимірюваних швидкостей та підвищити загальну точність вимірювань.

Підсумовуючи, засоби вимірювання оберальних параметрів на основі технологій машинного зору відкривають нові перспективи для безконтактного високоточного моніторингу роботи оберальних механізмів та електроприводів. Проте ключовим аспектом для забезпечення високої точності таких систем є вдосконалені методи обробки даних, що надходять з відеопотоку. Висока швидкодія обчислювальних алгоритмів є критично важливою для своєчасної фіксації дрібних кутових зміщень та деформацій вала під впливом торсійних навантажень.

Таким чином, існує нагальна потреба у розробці спеціалізованих рішень на основі машинного зору, які б повністю відстежували такі дрібні торсійні зміщення в режимі реального часу. Подальші дослідження та вдосконалення алгоритмів візуального аналізу та обробки даних дозволять підвищити точність безконтактного вимірювання обертальних моментів та динамічних характеристик валів і приводів з високою роздільною здатністю. Це в свою чергу сприятиме підвищенню ефективності та безпеки промислових процесів шляхом своєчасного виявлення аномалій та оптимізації режимів роботи обладнання.

Метою статті є вивчення можливості застосування системи комп'ютерного зору для безконтактного вимірювання обертальних моментів електродвигунів з використанням спеціальної динамометричної муфти, інтегрованої у вал електродвигуна, яка змінює свою форму пропорційно до прикладеного торсійного навантаження. Візуальний аналіз деформацій муфти дозволить визначити величину обертального моменту.

Викладення основного матеріалу. Для визначення обертальних зусиль, спрямованих на вал електродвигуна, потрібно отримати візуальні характеристики кута скручування вала. Для цього існує ряд динамометричних засобів [9]. Але для визначення кута скручування з використанням засобів отримання візуальної інформації необхідно створити сигнальні елементи. Такі елементи можуть бути представлені світловим потоком лазерного променя (рис. 1).

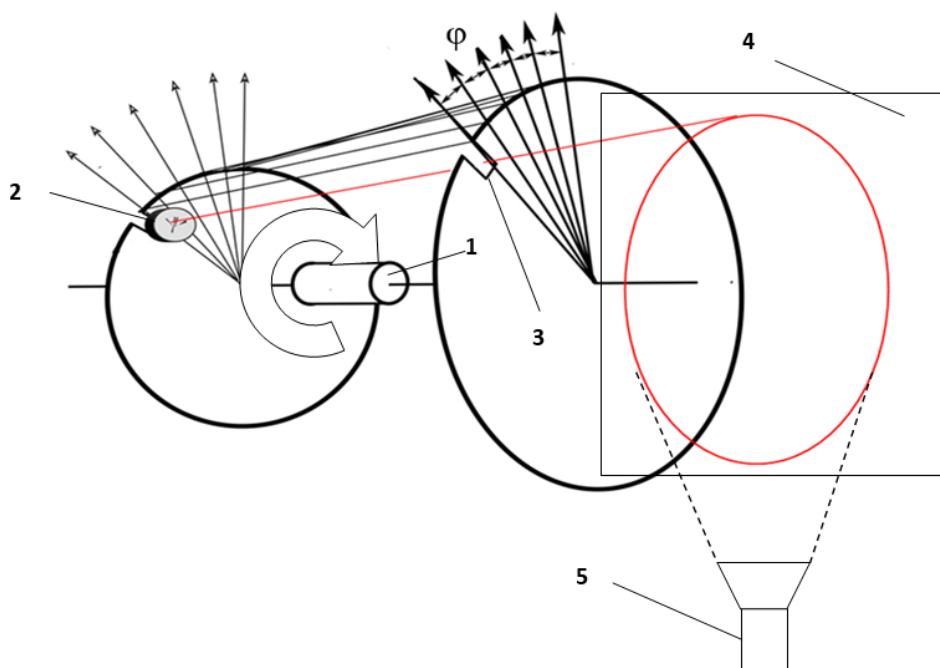


Рис. 1. Візуалізація кута скручування вала

Основна ідея полягає у використанні лазерного променя для визначення кута скручування вала, на якому розміщено динамометричний елемент 1. Цей елемент скручується пропорційно до прикладеного моменту. На одному з кінців вала встановлено диск з лазерним випромінювачем 2, який направляє промінь через проріз у другому диску 3, розміщеному на іншому кінці вала.

В міру скручування вала відносна позиція цих прорізів змінюється, що змінює інтенсивність світла, що доходить до приймача 4. Динамометричний елемент може бути виготовлений із матеріалу з високою механічною міцністю і низькою еластичністю, щоб забезпечити точність вимірювань при мінімальній деформації. Приймач може бути зроблений із відбиваючого матеріалу, де буде відбуватися розпізнавання інтенсивності освітлення шляхом підрахунку пікселів засобами машинного зору, використовуючи відеофіксатор 5.

Таким чином, з метою отримання візуальної інформації про стан інтенсивності випромінювання, можна розглянути використання алгоритмів для підрахунку пікселів, що дозволить визначити залежність кута скручування вала електродвигуна та крутного моменту методом машинного зору.

Нехай N – кількість пікселів, виявлених на зображенні приймача, а T – відповідний обертальний момент, прикладений до вала електродвигуна. Під час процедури калібрування необхідно встановити функціональну залежність $T = f(N)$, яка дозволить обчислювати значення обертального моменту за відомою кількістю пікселів.

Для визначення функції $f(N)$ потрібно виконати серію вимірювань за різних відомих значень обертального моменту T_i та зафіксувати кількості пікселів N_i . Таким чином, можна отримати набір експериментальних точок (N_i, T_i) . Припустимо, що залежність $T = f(N)$ є лінійною, тоді її можна апроксимувати рівнянням прямої: $T = aN + b$.

Коефіцієнти a та b можна визначити методом найменших квадратів, мінімізуючи суму квадратів відхилень між експериментальними точками та рівнянням прямої:

$$\sum_{i=1}^n (T_i - aN_i - b)^2 \rightarrow \min_{a,b}, \quad (1)$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, отримаємо:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})(T_i - \bar{T})}{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}, \quad (2)$$

$$b = \bar{T} - a\bar{N}, \quad (3)$$

де \bar{N} та \bar{T} – середні значення кількості пікселів та обертального моменту відповідно:

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad \bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (4)$$

Після знаходження коефіцієнтів a та b функція $f(N)$ матиме вигляд:

$$T = f(N) = aN + b. \quad (5)$$

Таким чином можна отримати лінійну залежність між кількістю пікселів на зображенні приймача та відповідним параметром.

Реалізація цього способу вимірювання може бути забезпечена комп'ютерною системою для вимірювання обертального моменту. Апаратна частина цієї системи наведена на рисунку 1. Програмна частина містить модуль машинного зору для аналізу інтенсивності освітлення відбиваючої поверхні 4 (рис. 1) шляхом підрахунку пікселів. Запропонована система має вебінтерфейс, який забезпечує графічне відображення поточного стану обертального моменту, де користувач може дистанційно відстежувати стан системи, калібрувати, налаштовувати параметри та отримувати детальні звіти.

Система використовує мову програмування Python та бібліотеку OpenCV для ефективної обробки графічних даних. Програмне забезпечення дозволяє виявляти ключові об'єкти на зображенні приймача. Наведений на рисунку 2 код дозволяє реалізувати алгоритм (рис. 3), який обчислює кількість червоних пікселів на зображенні приймача 4 (рис. 1).

```
import cv2
import numpy as np
lower_red = np.array([0, 0, 200])
upper_red = np.array([50, 50, 255])
cap = cv2.VideoCapture(0)
while True:
    ret, frame = cap.read()
    hsv = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)
    mask = cv2.inRange(hsv, lower_red, upper_red)
    red_pixels = cv2.countNonZero(mask)
    cv2.putText(frame, f"Red Pixels: {red_pixels}", (10, 30), cv2.
FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1, (0, 0, 255), 2)
    cv2.imshow('Red Pixel Counter', frame)
    if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
        break
cap.release()
cv2.destroyAllWindows()
```

Рис. 2. Програмний код для підрахунку кількості пікселів

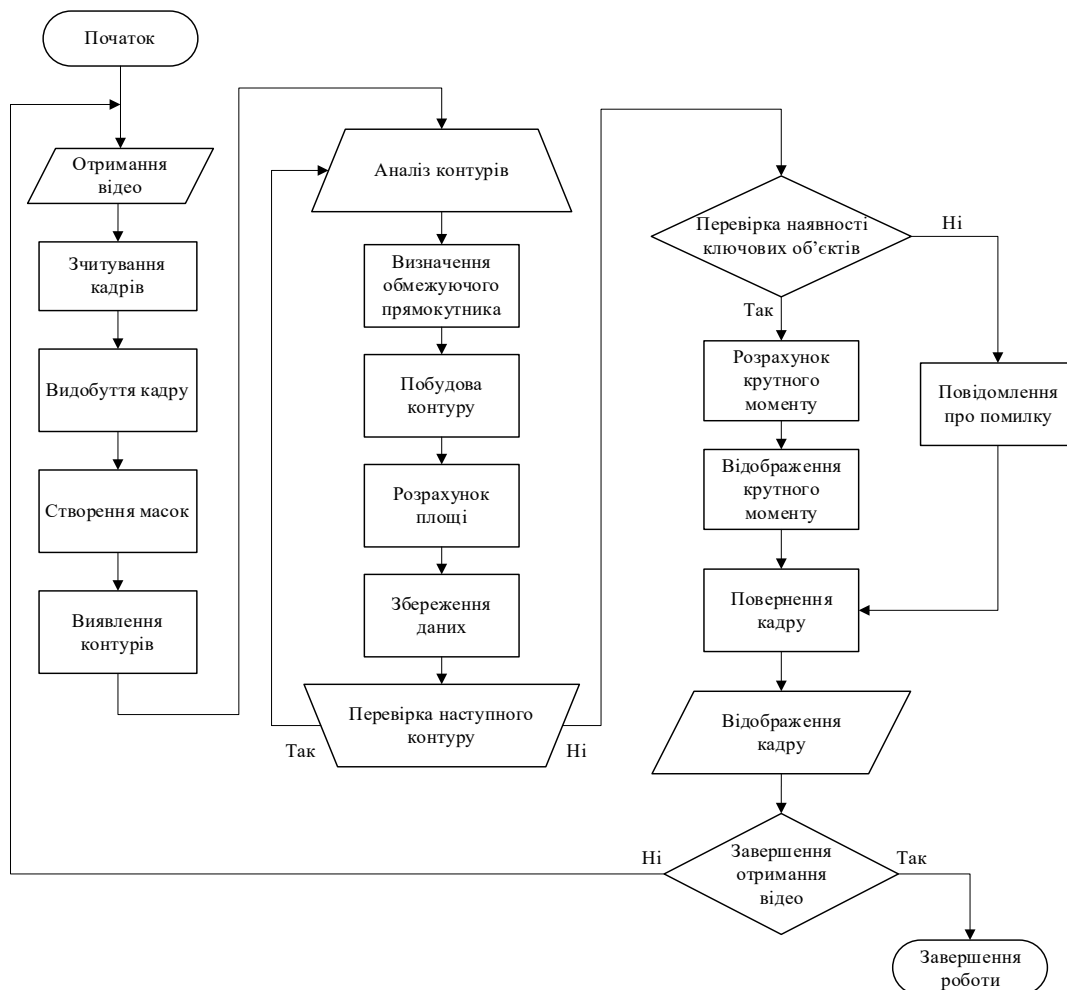


Рис. 3. Алгоритм виділення сигнальних міток динамометричної муфти на відео

З метою апробації цього способу вимірювання проведено моделювання параметрів роботи електродвигуна, використовуючи наступну модель [Ошибка! Значок не определен.], яка дозволяє отримати характеристики обертальних параметрів в ідеальних умовах. Разом з тим було проведено моделювання запропонованого способу вимірювання, використовуючи прототип засобу вимірювання (рис. 1).

Результати тестування показали динаміку зміни пружності динамометричного елемента, отриману шляхом перетворення кута скручування вала в обертальний момент з використанням запропонованого способу (рис. 4), де можна спостерігати значний час запізнення сигналу та нерівномірність його стабілізації особливо в режимі запуску електродвигуна. Це обумовлено значною інерційністю процесу вимірювального перетворення, оскільки обробка відеосигналу потребує значних обчислювальних потужностей.

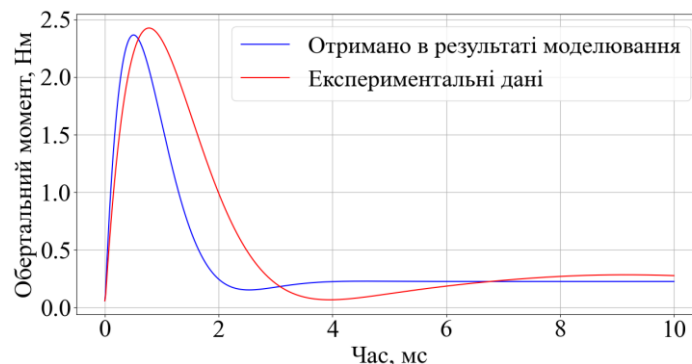


Рис. 4. Порівняння моделюючих та експериментальних даних у момент розгону електродвигуна

Видно, що поведінка запропонованої системи вимірювання обертального моменту шляхом перетворення кута скручування вала в обертальний момент демонструє певні особливості. Зокрема, спостерігається значне запізнення вихідного сигналу та нерівномірність його стабілізації, що є особливо помітним під час запуску електродвигуна. Це зумовлено значною інерційністю процесу вимірювального перетворення в системі.

Головною причиною виникнення інерційності є обчислювальна складність обробки відеосигналу. Таким чином, оскільки метод базується на аналізі зображень з відеофіксатора за допомогою алгоритмів машинного зору, необхідно виконувати складні операції з обробки та розпізнавання зображень у режимі реального часу. Ці операції, такі як перетворення кольорових просторів, виявлення та сегментація об'єктів, підрахунок пікселів, вимагають значних обчислювальних потужностей.

Затримка у відгуку системи та нерівномірна стабілізація сигналу можуть бути пов'язані з обмеженою швидкістю обчислювальних компонентів, які використовуються для виконання алгоритмів обробки зображень. Крім того, на динаміку системи може впливати також час, необхідний для передачі та буферизації відеопотоку між відеофіксатором та обчислювальним модулем.

Тому, для покращення динамічних характеристик системи та зменшення інерційності, можна розглянути кілька підходів. Зокрема, необхідна оптимізація алгоритмів обробки зображень для підвищення їх ефективності та швидкодії. Є необхідність впровадження технік апаратного прискорення, таких як використання спеціалізованих відеопроекторів або програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС), для прискорення критичних операцій з обробки зображень. Також необхідна оптимізація передачі та буферизації відеопотоку для зменшення затримок та втрат даних.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Застосування системи комп'ютерного зору для безконтактного вимірювання обертальних моментів електродвигунів дозволило реалізувати вимірювальне перетворення кута скручування вала в обертальний момент.

Експериментальне тестування запропонованої системи вимірювання обертального моменту на основі машинного зору виявило значну інерційність та затримку вихідного сигналу, особливо під час запуску електродвигуна. Це зумовлено обчислювальною складністю обробки відеосигналу в режимі реального часу. Для покращення динамічних характеристик системи необхідна оптимізація алгоритмів обробки зображень, використання потужніших обчислювальних ресурсів, впровадження апаратного прискорення та оптимізація передачі відеопотоку.

References:

1. Sue, P., Wilson, D., Farr, L. and Kretschmar, A. (2012), «High precision torque measurement on a rotating load coupling for power generation operations», *International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, IEEE, Graz, Austria, pp. 518–523, doi: 10.1109/I2MTC.2012.6229149.
2. Guy, B. (2015), «Measurement and traceability of torque on large mechanical drives», *In Proceedings SENSOR, AMA Conferences*, Nürnberg, Germany, pp. 44–45, doi: 10.5162/sensor2015/A1.3.
3. Zappalá, D., Bezziccheri, M., Crabtree, C.J. and Paone, N. (2018), «Non-intrusive torque measurement for rotating shafts using optical sensing of zebra-tapes», *Measurement Science and Technology*, Vol. 29, doi: 10.1088/1361-6501/aab74a.
4. Chen, W., Lan, C., Li, K. and Yuan, F. (2023), «Compensation and Control of Sinusoidal Torque Measurement Error», *42nd Chinese Control Conference (CCC)*, Tianjin, China, pp. 3086–3090, doi: 10.239CC58697.2023.10240311.
5. Kakaley, D.E., Altieri, R.E. and Buckner, G.D. (2020), «Non-contacting measurement of torque and axial translation in high-speed rotating shafts», *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 138, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106520.
6. Veyrat Durbex, A., Nachajon Schwartz, Y. and Tacca, H.E. (2021), «Solutions for Torque and Speed Measurement on Electric Machine Controllers Test Benches Soluciones para la medición de par y velocidad en bancos de ensayos de controladores de máquinas eléctricas», doi: 10.37537/rev.elektron.5.1.131.2021.
7. Bahaghighat, M., Abedini, F., Xin, Q. et al. (2021), «Using machine learning and computer vision to estimate the angular velocity of wind turbines in smart grids remotely», *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 8561–8576, doi: 10.1016/j.egy.2021.07.077.
8. Oleshko, T., Kvashuk, D., Heiets, I. (2023), «The Use of Machine Vision in the Diagnosis of Ripening Strawberries», *Artificial Intelligence*, IntechOpen, doi: 10.5772/intechopen.110894.
9. Kvasnikov, V., Kvashuk, D., Prygara, M. et al. (2024), «Devising a technique for measuring torque of electric motors using machine vision», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, No. 5 (127), pp. 16–32, doi: 10.15587/1729-4061.2024.298513.
10. Kvasnikov, V.P., Bratchenko, H.D. and Kvashuk, D.M. (2023), «Otsiniuvannia nevyznachenosti vymiriuvannia obertalnykh momentiv elektrodvyhuniv na bazi teorii nechitkykh mnozhyn», *Zbirnyk naukovykh prats Odeskoi derzhavnoi akademii tekhnichnoho rehuliuvannia ta yakosti*, Issue 1 (22), pp. 23–34, doi: 10.32684/2412-5288-2023-1-22-23-34.

Шелуха Олексій Олегович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-6088-8262>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані системи обробки даних;
 - системи машинного зору.
- E-mail: kkik_shoo@ztu.edu.ua.

Молчанова Катерина Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент Національного авіаційного університету.

<https://orcid.org/0009-0003-9229-9766>.

Наукові інтереси:

- електротехніка;
 - світлотехнічні установки.
- E-mail: ekaterinavk85@gmail.com.

Бабічев Іван Геннадійович – аспірант Національного авіаційного університету.

<https://orcid.org/0000-0002-2626-3226>.

Наукові інтереси:

- електроніка;
 - електродвигуни.
- E-mail: i.babichev@gmail.com.

Shelukha O.O., Molchanova K.V., Babichev I.H.

Using machine vision to determine the rotational forces of electric motors

The article considers the problem of measuring the torque of electric motors using machine vision technology. It is shown that traditional methods based on the installation of force-measuring sensors on the shaft of an electric motor require complex technological solutions and have limitations regarding the complexity of installation and operating costs. The article discusses the need for new methods of measuring the torque, and also shows the prospects of using machine vision technologies to solve this problem. A method of measuring the torque of electric motors is presented to improve the reliability of measurements, which can provide optimization in the maintenance of measurement systems.

A new method of determining rotational loads on the shaft of an electric motor using machine vision is proposed. This method involves image processing using special labels that are placed on the dynamometric element. This approach makes it possible to measure the torque using image processing technologies. The use of a computerized information and measurement system using the machine vision method for measuring the torque of electric motors is proposed. The system has a user interface and allows visualizing the received data.

To improve the dynamic characteristics of the system, it is proposed to optimize image processing algorithms, use more powerful computing resources, implement hardware acceleration, and optimize the transmission of the video stream.

Keywords: information and measurement system; machine vision; electric motor; rotational loads.

Стаття надійшла до редакції 01.05.2024.