

УДК 621.317.77

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.2.5>

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Дуднік А. С. – доктор технічних наук, доцент,
доцент кафедри мережевих та інтернет технологій
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ORCID ID: 0000-0003-1339-7820

Квашук Д. М. – кандидат економічних наук, доцент,
докторант кафедри електроенергетичних систем та технологій
Національного авіаційного університету
ORCID ID: 0000-0002-4591-8881

Жихарев С. М. – студент кафедри бізнес-аналітики та цифрової економіки
Національного авіаційного університету
ORCID ID: 0009-0003-1176-7418

Нейронні мережі, можуть використовуватися не лише в системах керування електродвигунами, з метою оптимізації їх роботи, а й в інформаційно-вимірювальних системах, які використовуються для контролю та діагностики обертальних параметрів електричних машин. Таке використання дозволить зменшити похибки, які пов'язані із рядом дестабілізуючих факторів. Особливо це стосується роботи вимірювальних приладів в умовах невизначеності. Традиційні методи діагностики та контролю, такі як аналіз гармонік та спектральний аналіз, часто є часозатратними. У цьому контексті, нейронні мережі відкривають нові горизонти, забезпечуючи швидку та ефективну альтернативу. У зв'язку з цим в статті досліджуються можливості нейронних мереж, які можна використати для аналізу та ідентифікації шаблонів на основі даних, отриманих від сенсорів напруги, струму, кутової швидкості, кутового прискорення та обертального моменту, які мають взаємозв'язок з конкретними станами та характеристиками обертального руху електродвигунів. Ця здатність нейронних мереж дозволяє прогнозувати обертальний момент електродвигуна, яку можна використовувати для корегування вихідних параметрів вимірювальних приладів. В результаті дослідження було представлено методику застосування нейронних мереж для оцінювання зворотного зв'язку сигналу від сенсору обертального моменту, в приводі постійного струму, з метою визначення параметрів обертального моменту. Запропоновано тришарову нейронну мережу, яка пройшовши інтенсивне навчання тестувалася на вимірювальному стенді, з метою визначення оптимальних режимів роботи. Застосування моделі, дозволило збільшити точність вимірювання обертального моменту за рахунок прогнозування окремих вихідних параметрів, що піддаються впливу вібрацій та температурних коливань, які змінюють пружність динамометричних вимірювальних елементів.

Ключові слова: обертальний момент, електродвигун, нейронна мережа, вимірювання, прилад, похибка, обертальні параметри.

Dudnik A. S., Kvashuk D. M., Zhikhariev S. M. Methods of measuring torques of electric motors using artificial neural networks

Neural networks can be used not only in electric motor control systems to optimize their operation, but also in information and measurement systems that are used to control and diagnose the rotational parameters of electric machines. Such use will allow to reduce the errors that are associated with a number of destabilizing factors. This especially applies to the operation of measuring devices in conditions of uncertainty. Traditional diagnostic and control methods, such as harmonic analysis and spectral analysis, are often time-consuming. In this context, neural networks open new horizons, providing a fast and efficient alternative. In this regard, the article explores the possibilities of neural networks that can be used to analyze and identify patterns

based on data obtained from voltage, current, angular velocity, angular acceleration, and torque sensors that are related to specific states and characteristics of rotary motion of electric motors. This ability of neural networks allows you to predict the torque of the electric motor, which can be used to adjust the output parameters of the measuring devices. As a result of the study, the method of using neural networks for evaluating the feedback signal from the torque sensor in the direct current drive was presented in order to determine the parameters of the torque. A three-layer neural network is proposed, which, after undergoing intensive training, was tested on a measuring bench in order to determine the optimal operating modes. Application of the model made it possible to increase the accuracy of torque measurement by predicting individual initial parameters that are affected by vibrations and temperature fluctuations that change the elasticity of dynamometric measuring elements.

Key words: torque, electric motor, neural network, measurement, device, error, rotational parameters.

Постановка проблеми. В процесі вимірювання обертальних параметрів електродвигунів можуть виникнути проблеми пов'язані з точністю, викликані рядом дестабілізуючих факторів, а також неможливістю безпосереднього вимірювання моменту на валу, нестабільністю робочого середовища, тощо. Особливо це стосується великих потужностей та високих швидкостей. В реальному середовищі сигнали часто спотворюються шумами та різними перешкодами, що можуть знизити якість вимірювань. Умови роботи електродвигунів можуть змінюватися, що створює додаткові виклики для точного вимірювання обертальних моментів.

Вирішити проблему точності та швидкодії за відсутності достатньої кількості інформативних параметрів та належної точності вимірювальних перетворювачів можна використовуючи засоби штучного інтелекту. Так, нейронні мережі можуть стати потужним інструментом для її вирішення, оскільки вони можуть навчатися на великих наборах даних, вивчаючи складні залежності між різними параметрами електродвигуна. Вони можуть бути ефективні в виявленні корисних сигналів серед шумів, оскільки можуть вивчити, які шаблони в отриманих даних є важливими. Використовуючи нейронні мережі можна адаптувати вимірювальні системи до нових режимів роботи електричних машин.

Аналіз літератури. В роботі [1] представлено зв'язки між змінними та параметрами двигуна постійного струму:

$$\begin{aligned} u(t) - e(t) &= Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \\ T_m(t) - T_l(t) &= fV(t) + J_m \frac{dV(t)}{dt}, \\ T_m(t) &= K_t V(t) \\ e(t) &= K_e V(t) \end{aligned} \quad (1)$$

де u – напруга, e – ЕРС; i – сила струму, T_m електромагнітний момент, T_l момент навантаження; V – швидкість обертання; R – опір котушок статора, L – індуктивність, J_m – момент інерції ротора, f – коефіцієнт тертя, K_e електрорушійна постійна, яка виникає при обертанні двигуна та відносить обертальну швидкість електродвигуна до вихідної електрорушійної сили; K_t – постійна обертального моменту, відома як константа обертального моменту, в даній формулі відіграє роль константи пропорційності між струмом, що протікає через двигун, і крутним моментом, який він генерує.

Ця формула застосовується до двигунів постійного струму, оскільки в двигунах постійного струму є пряма взаємодія між струмом і обертальним моментом, а також між швидкістю обертання та противо-ЕРС.

Однак, слід зазначити, що в інших типах двигунів, таких як асинхронні, або синхронні двигуни змінного струму, взаємозв'язки між цими змінними можуть бути значно складнішими і можуть вимагати додаткових розрахунків, або методів вимірювання для визначення обертового моменту.

Провівши моделювання за формулою (1) найбільш розповсюджених параметрів електродвигунів постійного струму (табл. 1), отримаємо графік перехідного процесу під час запуску електродвигуна, який характеризує зміну струму та кутової швидкості (рис. 1)

Таблиця 1

Вихідні параметри електродвигуна постійного струму

	Параметр	Значення
1	u – напруга	10 В
2	i – сила струму	1 А
3	V – швидкість обертання	1000 об/хв
4	R – опір котушок с	1.0 Ом
5	L – індуктивність	0.5 Гн
6	J_m – момент інерції ротора	0.01 кг·м ²
7	f – коефіцієнт тертя	0.1
8	K_e – електрорушійна постійна	0.01
9	K_t – постійна обертового моменту	0.01

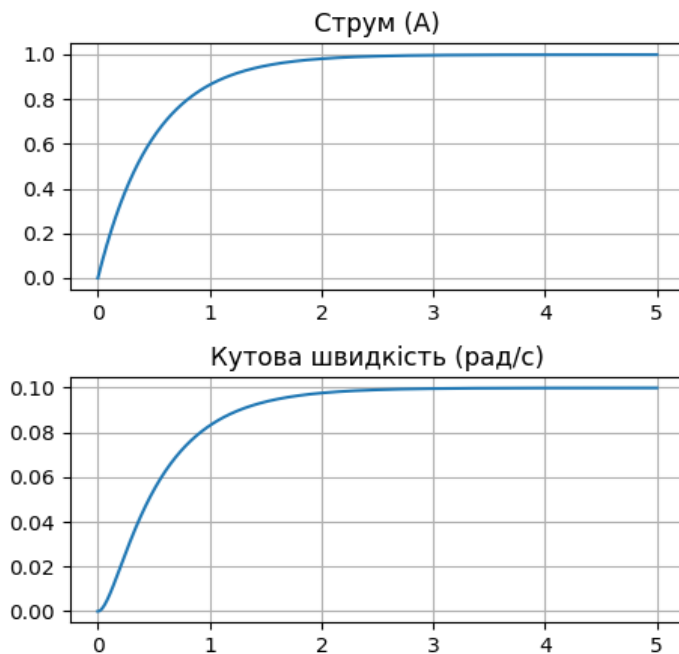


Рис. 1. Перехідна характеристика зміни струму та кутової швидкості електродвигуна постійного струму

Для визначення змін електромагнітних моментів та моментів навантаження можна побудувати диференційні рівняння, на основі формули (1):

$$\begin{aligned} \frac{dT_m(t)}{dt} &= K_t \cdot i(t) \\ \frac{dT_l(t)}{dt} &= f \cdot V(t) + J_m \cdot \frac{dV(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

Так, можна визначити зміни T_m та T_l в часі. Потім інтегрувавши ці рівняння можна отримати дійсні значення цих змінних, використовуючи нейронну мережу за допомогою якої, встановити залежність між вхідними та вихідними параметрами. Структурна модель динамічних характеристик, які описують зворотній зв'язок для підтримки режиму управління електродвигуном згідно [1], представлено на рис. 2.

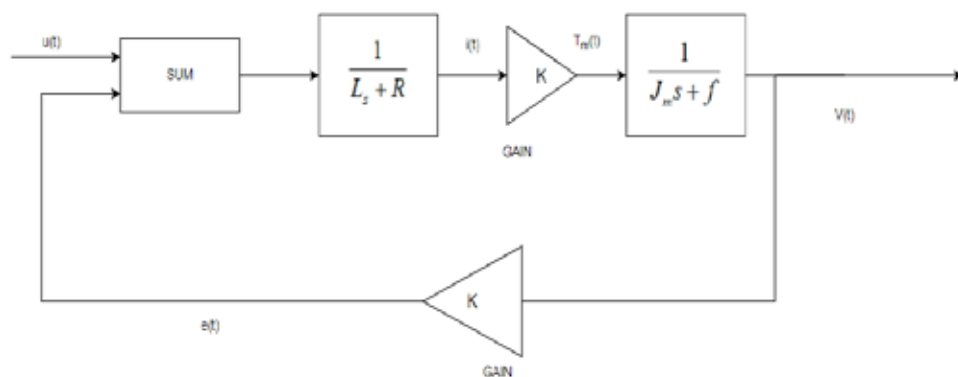


Рис. 2 Структурна модель динамічних характеристики електродвигуна постійного струму

Проте, зважаючи на вплив додаткових факторів під час вимірювання обертових параметрів електродвигунів слід враховувати нелінійність пружних властивостей валу в залежності від температури, вібрації, силу тертя підшипників, тощо. Для вирішення цієї проблеми в роботі [2] було запропоновано використання нейронних мереж для оцінювання сигналів зворотного зв'язку в приводах двигунів на основі цифрової обробки сигналу.

Автори використовують прямий нейронний мережевий прогон, який отримує сигнали на вході привода з прямим векторним управлінням та обчислює обертовий момент, потік та одиничні вектори на виході системи.

Так, було отримано результат, який показав ефективність використання нейронної мережі для оцінки швидкості та обертового моменту електродвигуна, порівняно з базовою оцінкою. Разом з тим, було доведено, що нейронна мережа може використовуватись в умовах впливу дестабілізуючих факторів.

Мета статті. Запропонувати методику вимірювання обертових моментів електродвигунів із застосуванням нейронних мереж на основі ряду інформаційних параметрів, які характеризують їх роботу в динаміці.

Виклад основного матеріалу. Основні сфери застосування нейронних мереж для вимірювання обертових параметрів електродвигунів представлено на рис. 3.

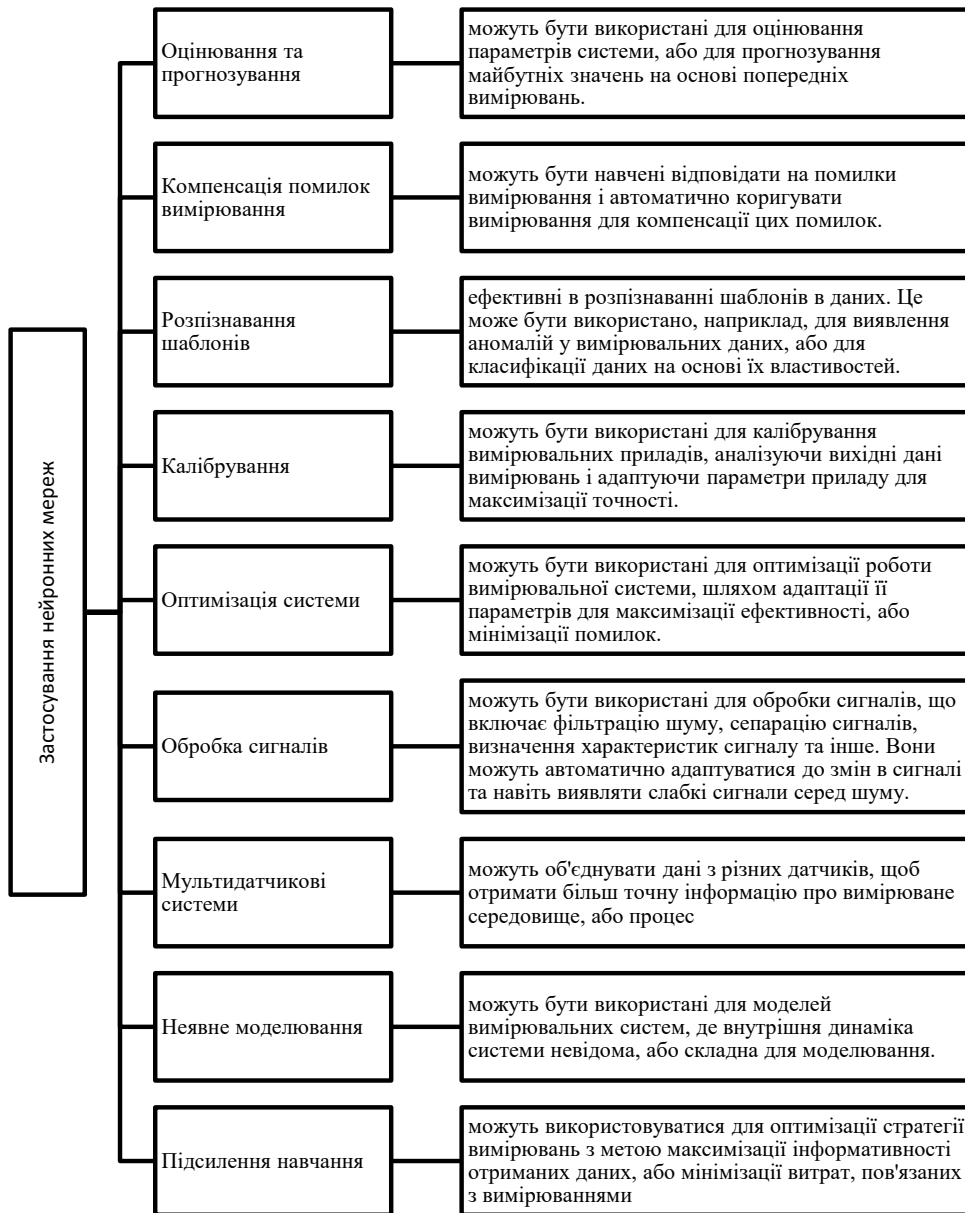


Рис. 3 Сфери застосування нейронних мереж для вимірювання обертальних параметрів електродвигунів

Виходячи із рис. 3, можна виділити ряд проблем, які можна вирішити з використанням нейронних мереж.

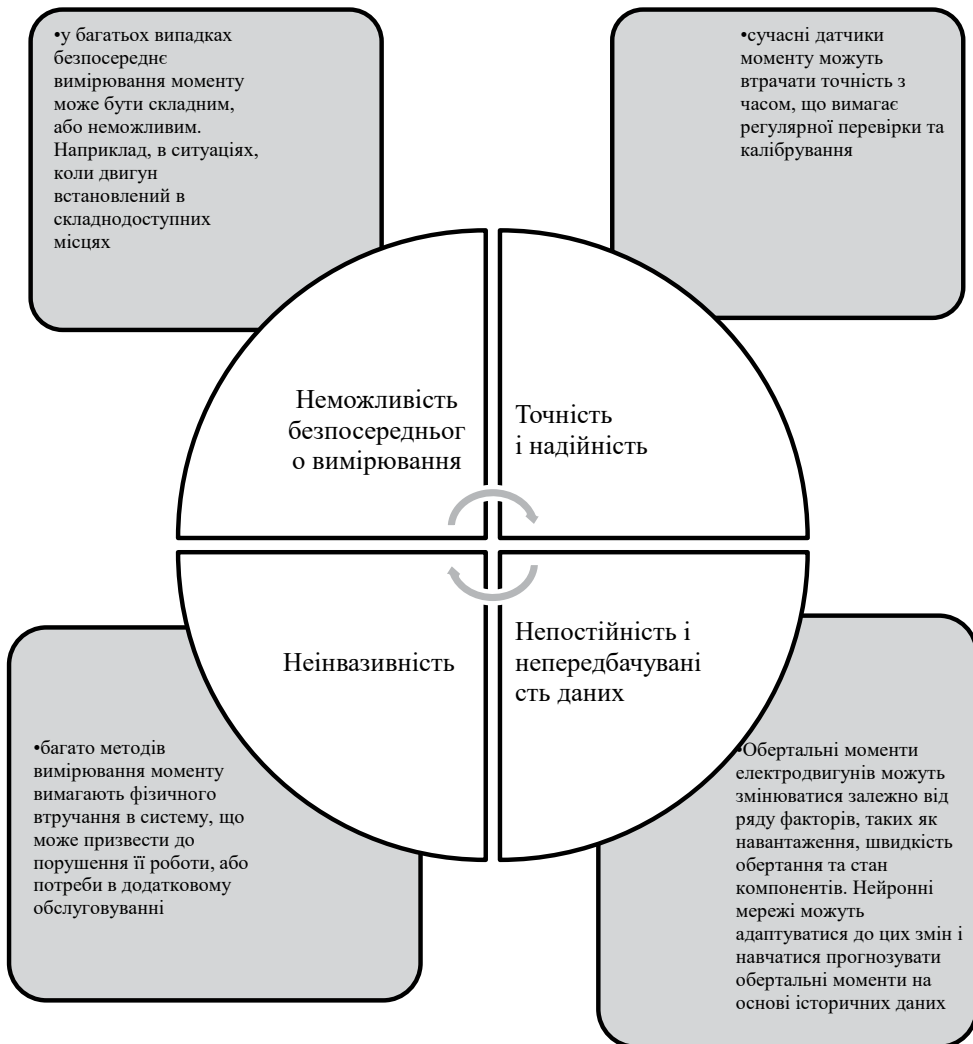


Рис. 4. Проблеми, які можна вирішити із застосуванням нейронних мереж у сфері вимірювань обертальних параметрів електродвигунів

Так, у умовах, коли існує потреба в розробці більш точних, надійних, економічних та менш інвазивних методів вимірювання обертального моменту, застосування нейронних мереж, для оцінки цього параметру на основі інших вимірюваних параметрів системи, таких як напруга, струм, швидкість обертання тощо, є найбільш перспективним.

Для прикладу вирішення такої задачі було отримано дані з розробленого випробувального стенду [3], який дозволяє визначити показники напруги, струму, потужності, частоти обертання ротора електродвигуна, обертального моменту (рис. 5, 6), які використовувались для навчання нейронної мережі.

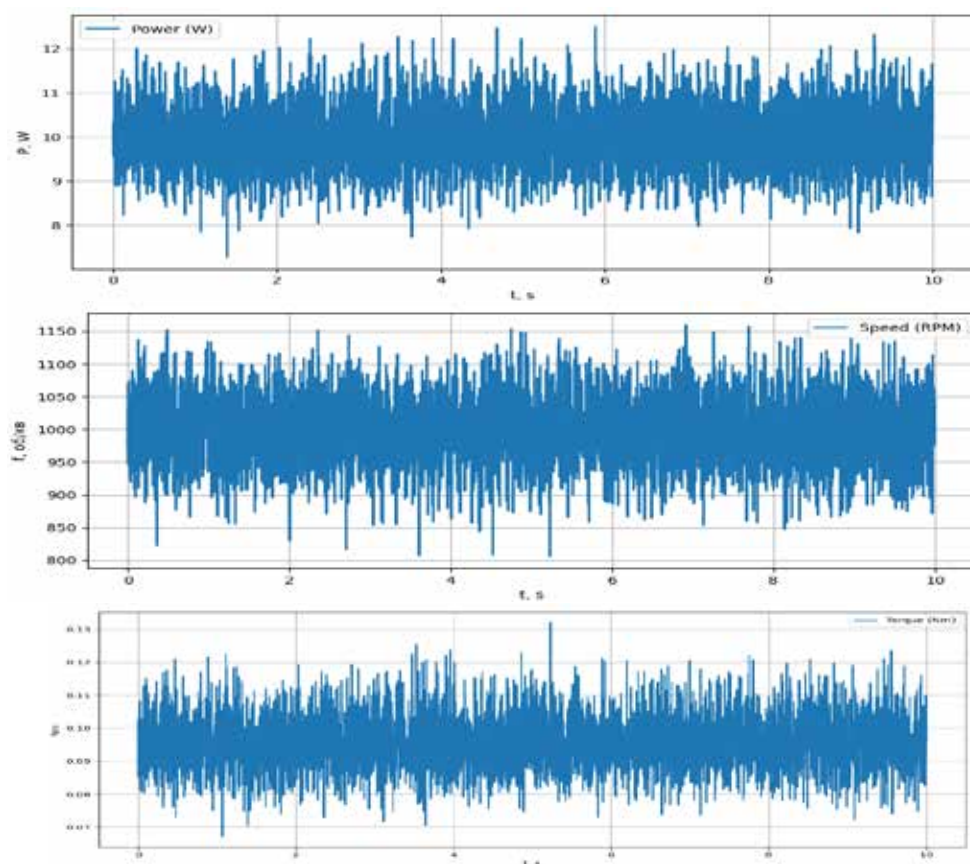


Рис. 5. Параметри електродвигуна постійного струму в сталому режимі роботи

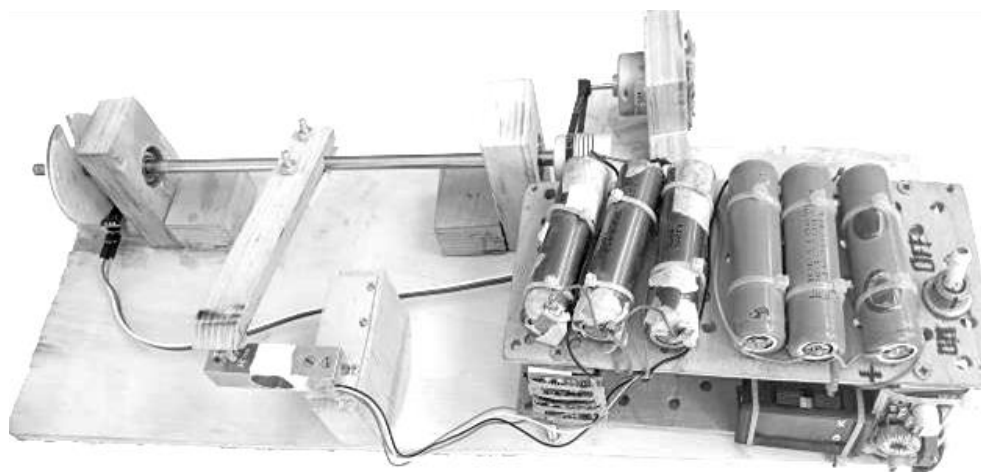


Рис. 6. Випробувальний стенд, [3]

Визначено вхідні та вихідні параметри моделі.

Вхідні параметри:

- напруга (I)
- струм (J)
- потужність (P)
- частота обертання ротора (f)

Вихідний параметр:

- обергальний момент (M)

Математичне представлення одного шару нейронної мережі може бути записане так:

$$a_i = \sigma \left(\sum_j \omega_{ji} x_j + b_i \right), \quad (3)$$

де a_i – активація i -го нейрона; σ – активаційна функція; ω_{ji} – вага, що з'єднує j -й вхід із i -м нейроном; x_j – j -й вхідний сигнал; b_i – зсув i -го нейрона.

Ця формула повторюється для кожного шару мережі. Для багатозарової мережі виходи одного шару стають входами наступного.

Отримані вхідні параметри для навчання моделі можуть бути використані для визначення обергального моменту (рис. 7).

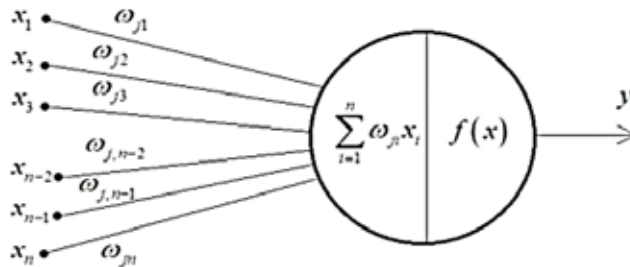


Рис. 7. Графічна модель обробки даних

В даному випадку можна застосувати базову модель нейронної мережі (ANN). Цей тип нейронної мережі називається «прямопроходним», тому що інформація проходить через мережу в одному напрямку: від входу, через приховані шари, до виходу.

В даній моделі є наступні складові: вхідний шар, що приймає вхідні дані. У нашому випадку ми використовуємо чотири вхідні змінні, а саме напругу, струм, частоту обертання і потужність; прихований шар: тут дані проходять через ваги, які навчаються під час процесу навчання мережі. вихідний шар: це результат, який ми отримуємо від мережі. У нашому випадку це прогнозований обергальний момент.

Так, модель має 1 прихований шар з 10 нейронами. На виході використовується лінійна функція активації, оскільки ми прогнозуємо континуальну змінну. Оптимізатор, що використовується для тренування мережі Adam (adaptive moment estimation), [4] поєднує в собі ідею накопичення руху та ідею слабшого оновлення ваг для типових ознак. Функція втрат використовує середньо квадратичну похибку, що є стандартною метрикою для задач прогнозування в неперервному просторі.

На основі отриманих тестових даних можна побудувати нейронну мережу використовуючи програмну бібліотеку KERAS, [5] та отримати значення обертового моменту при наступних показниках струму, рис. 8.

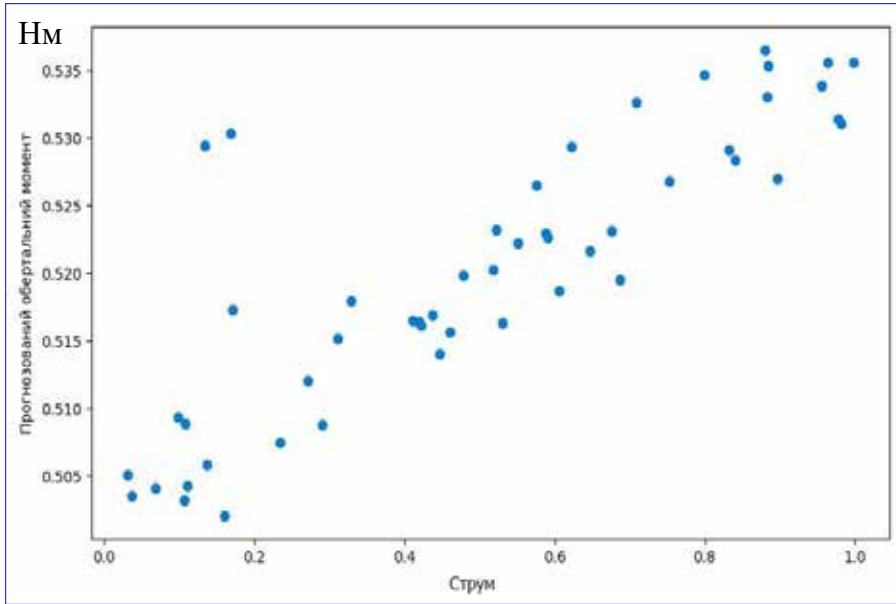


Рис. 8. Прогнозований обертовий момент в залежності від струму

З рис. 8 ми бачимо, що враховуючи стохастичність даних під час навчання, зокрема обертового моменту, що пов'язано із вібрацією в підшипниках валу вплинуло і на результат вимірювання. Тому для збільшення точності можна застосовувати окремі фільтри, як наприклад в роботі [6], рис. 9.

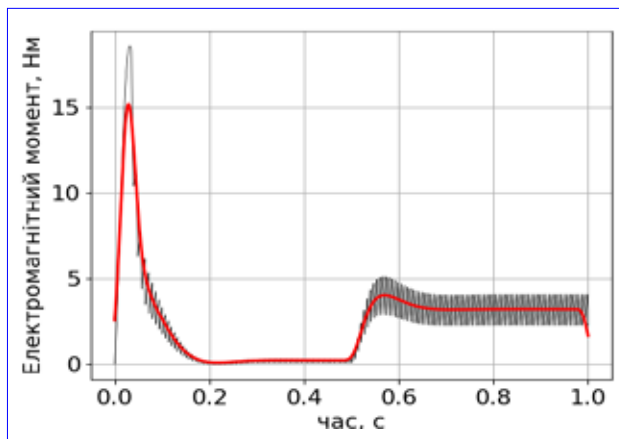


Рис. 9. Результати апроксимації кривої розгону електродвигуна, [6]

Застосувавши даний фільтр та внісши корективи у навчальну вибірку даних для нейронної мережі, отримаємо більш точні вихідні параметри (рис. 10).

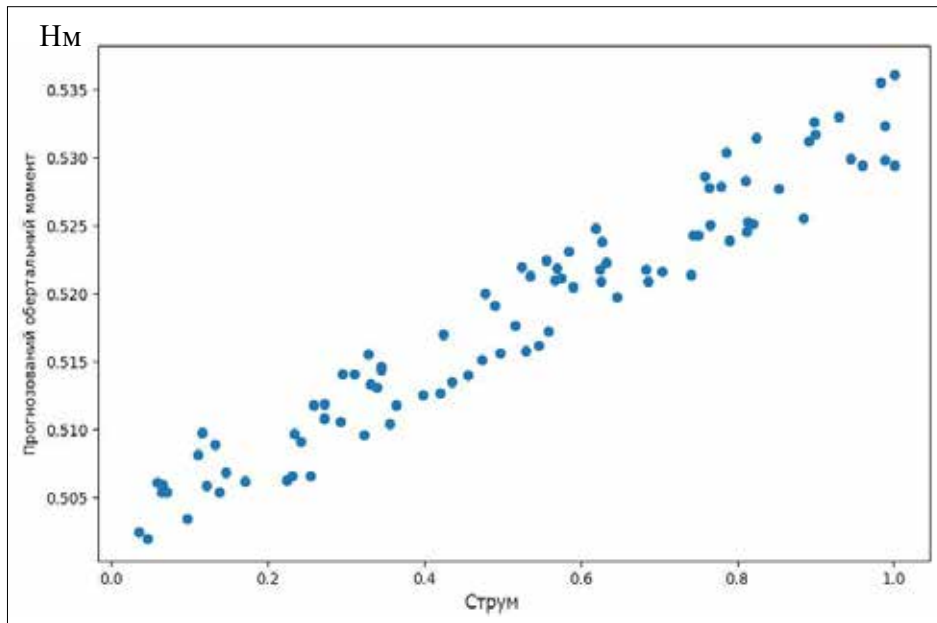


Рис. 10. Прогнозований обертальний момент в залежності від струму з урахуванням фільтру вібрацій валу

Разом з тим, використання нейронних мереж для вимірювання обертальних параметрів електродвигуна є складною задачею, оскільки вимагає певного набору даних для тренування мережі, точності отриманих даних, оптимального вибору моделі, великої кількості даних для навчання.

Висновки. Застосування нейронних мереж для вирішення задач пов'язаних із діагностикою обертальних параметрів електродвигунів створює широкі можливості вимірювання з урахуванням різних дестабілізаційних факторів впливу, таких як вібрації, температурні коливання, стрибки напруги, додаткові механічні навантаження, тощо.

Запропонований приклад показує, що результат навчання нейронної мережі залежить від якості отриманих даних та їх кількості. Практичне застосування такого методу, за умов збільшення навчальної вибірки даних та оптимізації моделі може бути реалізовано в умовах відсутності можливостей безпосереднього вимірювання обертального моменту на валу електродвигуна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Xavier Desforges, Abdallah Habbadi. A Neural Network for Parameter Estimation of a DC Motor for Feed-Drives. ICANN '97 7th International Conference. Oct 1997. Lausanne, Switzerland. P. 867–872.
2. Simoes M. G., Bose B. K. Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 3, P. 620–629, May-June 1995, doi: 10.1109/28.382124.

3. Квасніков В., Квашук Д., Катаєва М. Розробка стенду для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів. *Aerospace technic and technology*. 2021. P. 104–111. doi: 10.32620/akt.2021.4sup2.14.

4. Kingma, D.P., & Ba, J. (2014). Adam: A Method for Stochastic Optimization. CoRR, abs/1412.6980.

5. Wang, Junqi. (2021). Application of Keras neural network in the era of big data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2083. 042090. 10.1088/1742-6596/2083/4/042090.

6. Квасніков В. П., Квашук Д. М., Катаєва М. О. Розробка інформаційно-виміральної системи діагностики робочих характеристик електродвигунів. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. Вип. 1(18). С. 42–52.

REFERENCES:

1. Xavier Desforges, Abdallah Habbadi. A Neural Network for Parameter Estimation of a DC Motor for Feed-Drives. ICANN '97 7th International Conference, Oct 1997, Lausanne, Switzerland, pp. 867–872.

2. M. G. Simoes and B. K. Bose, “Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive”, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 3, pp. 620–629, May-June 1995, doi: 10.1109/28.382124.

3. Kvasnikov Volodymyr, Kvashuk Dmytro, Katayeva Mariya. (2021) Rozrobka stendy dlya vymiryuvannya metrolohichnykh kharakterystyk elektrodvyhuniv [Development of a stand for measuring metrological characteristics of electric motors] *Aerospace technic and technology*. 104–111. 10.32620/akt.2021.4sup2.14.

4. Kingma, D.P., & Ba, J. (2014). Adam: A Method for Stochastic Optimization. CoRR, abs/1412.6980.

5. Wang, Junqi. (2021). Application of Keras neural network in the era of big data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2083. 042090. 10.1088/1742-6596/2083/4/042090.

6. Kvasnikov V. P., Kvashuk D. M., Katayeva M. O. Rozrobka informatsiyno-vimiryval'noyi systemy diahnozyky robochykh kharakterystyk elektrodvyhuniv [Development of an information-measuring system for diagnostics of operating characteristics of electric motors], *Zbirnyk naukovykh prats Odeskoyi derzhavnoyi akademiyi tekhnichnoho rehulyuvannya ta yakosti*, vyp. 1(18), s. 42–52.