suspension. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). September 2020, 14(3), 1003-1013. https://doi.org/10.1007/s12008-020-00668-7.

## Список використаних джерел

1. Баженов В.А., Дащенко А. Ф., Коломієць Л. В., Оробей В. Ф. Будівельна механіка. Спеціальний курс. Застосування МГЕ. Одеса: Астропринт, 2001. 288 с.

2. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах. Том 3. Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановно. М.: Машиностроение, 1968. 567 с.

3. Александров А. В., Лащеников Б. Я., Шапошников Н. Н. Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы. 1983, 488 с.

4. Масленников А. М. Расчет строительных конструкций численными методами. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 225 с.

5. Orobej V., Kolomiets L., Limarenko A. Boundary element method in problem of plate elements bending of engineering structures. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 4. P. 295-302.

6. Kolomiets L., Orobey V., Lymarenko A. Method of boundary element in problems of stability of plane bending beams of rectangular cross section structures. Metallurgical and Mining Industry. 2016. № 3. P. 59-65.

7. Theander A. Design of a Suspension for a Formula Student Race Car. 2004.

8. William F. Milliken, Douglas L. Milliken. Race car vehicle dynamics. 1995.

9. Limarenko A. M., Khamray V. V., Dashchenko A. A. The methodology for calculating the steering using Solidworks software module. Materials of the international scientific-practical conference "*Modern research and development*", Bolgaria, Sofia 2015. Tom 16. P. 11-13.

10. Limarenko A. M., Khamray V. V., Dru-

zhynin A. A. The optimization of car engine pistonrod by numerical method. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2015, no. 60, 440-443.

11. Mihon L., Lontiş N., Deac S. The behaviour of a vehicle's suspension system on dynamic testing conditions. *International Conference on Applied Sciences (ICAS2017)*, IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 294 (2018) 012083 https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012083.

12. Faisal O. Mahroogi & Narayan S. Design and Analysis of Double Wishbone Suspension Systems for Automotive Applications. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD).* Vol. 9, Issue 4, Aug 2019, 1433–1442.

13. Vignesh B. S., Sufiyan Ahmed, Chandan V., Prashant Kumar Shrivastava. Double Wishbone Suspension System; A Research International. *Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. Volume 8, Issue 2, July 2019, 5033-5037. https://doi.org/10.35940/ijrte.B1084.078219.

14. Sun Li, Deng Zhao, Zhang Qing. Design and Strength Analysis of FSAE Suspension. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2014, 8, 414-418.

https://doi.org/10.2174/1874155X01408010414.

15. Abhishek Mahesh Sharma, Sidhant Konwar Roy, Anantha Krishnan, Nivedh Das Thaikoothattil. Structural analysis of bellcrank in a pullrod suspension system in an FSAE prototype. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*. Volume 23, Issue 10, October 2021, 236-246.

16. Wheatley Greg. On the design of racing car suspension. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. September 2020, 14(3), pp. 1003-1013. https://doi.org/10.1007/s12008-020-00668-7.

Надійшла до редакції 10.06.2021

# УДК 621.317

# Д. П. Орнатський, д.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н., М. О. Катаєва, к.т.н.

Національний авіаційний університет, м. Київ

# МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ

У статті вивчається залежність обертального моменту електрогенераторів та їх вихідних параметрів. На основі досліджень запропоновано метод вимірювання обертального моменту з використанням індуктивного сенсора, що дозволяє покращити метрологічні характеристики вимірювального каналу шляхом підвищення чутливості вимірювання. Таке підвищення досягається за рахунок того, що на котушки, які змінюють свою індуктивність під дією торсіонного навантаження на вал електродвигуна, не впливають електромагнітні перешкоди, що створюються електрогенератором під час роботи. Для обробки результатів вимірювань та дослідження похибок, використовувався моделюючий комплекс Matlab/Simulink, це дозволило візуалізувати перехідну характеристику вимірювального сигналу та оцінити можливу похибку.

*Ключові слова:* електрогенератор, обертальний момент, кутова швидкість, метод вимірювання, сенсор, електромагнітна індукція, інформаційна система.

#### Д. П. Орнатский, д.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н., М. А. Катаева, к.т.н.

#### МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

В статье изучается зависимость крутящих моментов электрогенераторов и их выходных параметров. На основе исследований предложен метод измерения крутящего момента с использованием индуктивного сенсора, позволяющего улучшить метрологические характеристики измерительного канала путем увеличения чувствительности измерения. Такое увеличение достигается за счет того, что на катушки, которые изменяют свою индуктивность под действием торсионной нагрузки, не влияют электромагнитные помехи, создаваемые электрогенератором во время работы. Для обработки результатов измерений и исследования погрешностей, использовался моделирующий комплекс Matlab/Simulink, что позволило визуализировать переходную характеристику измерительного сигнала и оценить погрешность.

*Ключевые слова:* электрогенератор, крутящий момент, угловая скорость, метод измерения, сенсор, электромагнитная индукция, информационная система.

#### D. P. Ornatskyi, DSc, D. M. Kvashuk, PhD, M. O. Kataieva, PhD,

## METHODS OF MEASUREMENT OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ELECTRIC GENERATORS

The article investigates the methods and means of measuring the operating characteristics of electric generators, namely the output voltage, resistance, frequency, current and torque. The analysis of literature sources that characterize the structural elements and the principle of operation of synchronous generators is carried out. Methods of measuring the operating characteristics of electric generators are studied. Mathematical models that describe the relationships between physical quantities that characterize the parameters of electric generators are considered. The estimation of modern directions of development of means of measurement of torques of electric generators is carried out. Methods of data processing and visualization obtained by primary devices are studied. The dependence of the torque of electric generators and their output parameters is studied. A block diagram of a digital measuring sensor is constructed, which shows the main components of a device for measuring torque using an inductive sensor.

Based on research, a method for measuring torque using an inductive sensor has been proposed, which allows increasing the sensitivity of the measurement by improving the metrological characteristics of the measuring channel. This improvement is that the coils that change their inductance under the action of torsional load on the motor shaft are not affected by electromagnetic interference created by the generator during operation. Simulation of the electrical circuit using the proposed method allowed to obtain the attenuation coefficient of the in-phase signal 80 dB at an input signal frequency of 10 kHz, thus providing high sensitivity. This model was tested, which made it possible to obtain errors in the simulation in the operating mode. The standard deviation and the absolute measurement error are determined. The Matlab / Simulink modeling complex was used to process the measurement results and study the errors, which allowed visualizing the transient characteristics of the measuring signal and obtain a possible error.

*Keywords*: electric generator, torque, angular velocity, measurement method, sensor, electromagnetic induction, information system.

## DOI 10.32684/2412-5288-2021-2-19-37-47

#### Вступ

Розвиток альтернативних видів енергетики вимагає оптимізації управління та вимірювання параметрів робочих характеристик електрогенераторів.

При високому рівні зносу та потребах у модернізації, а також для забезпечення економічності генераторів існує необхідність у вдосконаленні систем контролю та вимірювання параметрів їх роботи. Особливо це стосується визначення параметрів збудження, вихідної напруги, швидкості обертання та обертального моменту.

В сучасних умовах актуальним є пошук нових способів отримання потрібної напруги шляхом підбору оптимальних вхідних параметрів. Зважаючи на простоту в експлуатації, сфери застосування таких генераторів накладають серйозні вимоги щодо напруги джерела живлення, обертального моменту, швидкості обертання та інших вагомих параметрів, які мають задовольняти нормованим показникам якості та стабільності. Для цього потрібні точні вимірювання та прогнозування характеристик роботи таких генераторів, що є приводом до створення вимірювальних приладів з покращеними метрологічними характеристиками, за допомогою яких можна встановити оптимальні режими роботи таких електрогенераторів.

#### Аналіз публікацій та досліджень

Структуру синхронного генератора на постійних магнітах представлено на рис. 1, 2, де показано основні його конструктивні елементи та схему електричного з'єднання.



Рисунок 1 – Схема електричного з'єднання синхронного електрогенератора на постійних магнітах за типом (зірка)



Рисунок 2 – Схематичне представлення конструктивних елементів та принципу дії синхронного електрогенератора на постійних магнітах [1]

Досліджуючи генератори на постійних магнітах слід, звернути увагу на закон електромагнітної індукції Фарадея, згідно з яким напруга на виході кожної обмотки генератора може бути розрахована за формулою [1]:

$$E_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},\tag{1}$$

це 
$$E_i - \text{EPC}$$
 індукції в контурі

 $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  – швидкість зміни магнітного потоку;

де t – поточний час.

Слід враховувати, що магнітний потік, через одну обмотку змінюється по гармонічному закону

$$\Phi = \Phi_0 \sin \frac{p \cdot \omega \cdot t}{2}, \qquad (2)$$

де  $\Phi_0$  – максимальне значення магнітного потоку, яке може бути знайдено за формулою

$$\Phi_0 = B_s \cdot S, \tag{3}$$

де  $B_s$  – усереднене за площею полюса значення магнітної індукції в зазорі;

*S* – площа полюса магніту;

*p* – число полюсів генератора;

 $\omega$  – кутова частота обертання генератора, число коливань, що здійснюються за  $2\pi$  секун-

ди, 
$$\omega = \frac{2\pi}{T};$$

*t* – поточний час.

В такому випадку для поточного значення напруги однієї обмотки можна отримати наступний вираз

$$E_{D} = \frac{N \cdot B_{s} \cdot S \cdot p \cdot \omega}{2\sqrt{2}}, \qquad (4)$$

де N – кількість витків обмотки.

В роботах [2, 3] представлено математичну модель номінального струму, який забезпечує потреби його споживання, у вигляді рівняння електричної рівноваги

$$\begin{cases} 1,5ri_{d} + 1,5L_{d} \frac{di_{d}}{dt} + 1,5L_{q}i_{q}n_{G}p + u_{d} = 0; \\ 1,5ri_{q} + 1,5L_{q} \frac{di_{q}}{dt} + 1,5L_{d}i_{d}vp - 1,5\psi n_{G}p + u_{q} = 0, \end{cases}$$
(5)

де  $u_d, u_q, i_d, i_q$  – поздовжні та поперечні складові фазної напруги та струмів на виході синхронного генератора;

*L<sub>d</sub>*, *L<sub>q</sub>* – поздовжні та поперечні складові індуктивностей фазної обмотки статора синхронного генератора [4];

*n<sub>G</sub>* – швидкість обертання якоря синхронного генератора;

*p* – число полюсів генератора;

*r* – активний опір фазної обмотки статора;

 $\psi$  – загальний магнітний потік, зчеплений з усіма витками котушки, що чисельно дорівнює сумі магнітних потоків, які проходять через кожен виток котушки

$$\Psi = \sum_{i=1}^{N} \Phi_i, \tag{6}$$

де  $\Phi_m$  – магнітний потік одного витка;

*N*-число витків у котушці;

Електромагнітний момент синхронного генератора можна визначити наступним співвідношенням [5]:

$$E_m = \frac{P}{\omega},\tag{7}$$

де P – потужність генератора;

ω – кутова частота обертання генератора.

Є й інші підходи до його визначення [6]:

$$E_m = a_i \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot D_C^3 \cdot \lambda, \qquad (8)$$

де  $a_i \cong 0,72 \div 0,8$  – коефіцієнт полюсного перекриття;

 $A \cong (10 \div 12) \cdot 10^3$  – лінійне навантаження;

 $B_{s} \cong 0,29 \div 0,31$  – попереднє значення індукції в робочому зазорі;

 $D_{c}$  – діаметр статора;

 $\lambda \cong 0.5$  – відношення активної довжини тороїдального сердечника статора до його діаметра.

В роботі [7] представлено метод розрахунку потужності синхронних генераторів

$$P = 3U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi, \tag{9}$$

де  $I_{\Phi}$  – фазний струм;

 $\cos \phi \cong 0.8 \div 0.85$  – коефіцієнт потужності, відношення активної потужності до повної. Фізично він показує, яка частина повної потужності йде на виконання корисної роботи.

$$I_{\Phi} = \frac{P}{3U_{\Phi} \cdot \cos\phi},\tag{10}$$

При навантаженні, струм обмотки якоря синхронного генератора створює власне магнітне поле, яке називається полем реакції якоря. Через міжполюсний простір магнітний опір потоку, що діє у напрямку поперечної осі, значно більше магнітного опору потоку, що діє на повздовжню вісь. Таким чином, індуктор (ротор) має магнітну несиметрію. Тому, однакова за значенням магнітно-рушійна сила якоря при її дії на повздовжню вісь, створює більший магнітний потік, ніж при дії на поперечну вісь.

Дослідження характеристик обертального моменту електрогенераторів представлено в роботах [8-10], де визначено основні методи вимірювання цього параметру.

Так, можна розглянути рівняння Даламбера для синхронного електрогенератора на постійних магнітах, приймаючи до уваги кутову швидкість та обертальний момент сили, що діє на вал,

$$J_{\rm BT} \frac{d\omega}{dt} = M_{\rm pyx} - M_{\rm ran},$$

де  $J_{\rm BT}$  – момент інерції ротора;

*М*<sub>рух</sub> – рушійний момент електрогенератора;

M<sub>гал</sub> – гальмівний навантажувальний мо-

мент, обумовлений електромагнітним моментом генератора та механічними втратами.

Загалом, існує багато різноманітних методів вимірювання обертального моменту та пристроїв, які їх реалізують. Разом з тим, слід урахувати залежність обертального моменту електрогенератора від багатьох факторів. Так, слід звернути увагу на момент ковзання, який залежить від якості механізмів, швидкості обертання валу, потужності генератора, тощо. Загальновідомий вираз, яких характеризує обертальний момент електрогенератора та момент ковзання має наступний вигляд [10]

$$M = \frac{m \cdot p \cdot U^2}{\omega} = \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(\frac{R_1 + \frac{R'_2}{s}}{s}\right)^2 + \left(x_1 + x'_2\right)^2}, (11)$$

де *т* – число фаз;

*р* – число пар полюсів статора;

*U* – фазна напруга на обмотці статора;

 $R'_2$  – приведений активний опір обмотки ротора;

 $R_{1}$  – активний опір обмотки статора;

*s* – ковзання;

 $x_1$  – реактивний опір обмотки статора;

 $x'_{2}$  – приведений активний опір обмотки ротора.

Враховуючи ряд зазначених факторів, які впливають на процес вимірювання обертальних моментів електрогенераторів, слід відзначити, що умови їх експлуатації, вимоги до точності, потужність та багато інших параметрів, накладають ряд обмежень на застосування вимірювальних приладів.

Серед найбільш поширених методів та засобів вимірювання обертальних моментів електрогенераторів, можна вважати такі:

вимірювання моменту обертання за допомогою тензометричних датчиків;

вимірювання обертального моменту за допомогою кутових датчиків обертання;

вимірювання обертального моменту з використанням нового покоління індуктивних датчиків.

Останній метод вимірювання набув широкої популярності через можливість проводити вимірювання на високих швидкостях (20000 об/хв та більше), надійність та простоту в експлуатації. Основною його перевагою у порівнянні із тензометричними методами є відсутність електронних компонентів на обертальних частинах сенсора. Показники знімаються індуктивним способом.

Застосування індуктивних методів вимірювання обертальних моментів представлено в роботах [11, 12]:

$$e = \frac{j\omega\Phi_m W_u}{2\pi R_{\mu u}} \sqrt{\frac{j\gamma\omega}{M_e}} \ln \cdot \frac{\left[\lambda + 1 + \sqrt{2(\lambda - 1)}\sin(\frac{\pi}{4} - 2\varphi)\right]^2 + 4\lambda}{\left[\lambda + 1 + \sqrt{2(\lambda - 1)}\sin(\frac{\pi}{4} + 2\varphi)\right]^2 + 4\lambda} \cdot e^{i\alpha x},$$
(12)

де *j* – уявна одиниця;

γ – електрична провідність матеріалу вала;

 $λ = \frac{\mu_y}{\mu_z}$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu_x$  – значення магнітних

проникностей матеріалу валу вздовж дії головних нормальних напруг;

 $M_e = \sqrt{\mu_y \mu_x}$  – еквівалентне значення магні-

тної проникності;

 $\phi$  – кут між координатними осями  $X_1, Y_1,$  пов'язаними з магнітопроводом перетворювача і головними осями анізотропії Х, Ү, що збігаються з напрямком головних нормальних напруг;

Ф<sub>*m*</sub> – амплітудне значення магнітного потоку, що входить до контрольованої частини валу через полюси обмотки збудження;

Наведена залежність змінюється за періодичним законом функції кута та має екстремальні значення при  $\phi = \pi/4 \pm n\pi/2$ , де n = 0, 1, 2, 3, ...

Проведений експеримент із застосуванням виразу (12), де були задіяні індуктивні сенсори, показав, що взаємний вплив обертального моменту та опорних конструкцій вимірювального приладу, що використовувався в експерименті, був відсутній [11]. В той же час точність роботи індуктивних сенсорів обертального моменту залежність від стабільності напруги, що зумовлюється якістю електричного живлення.

Вимірювання параметрів роботи та управління роботою електрогенераторів здійснюється з використанням контролерів керування, які включають в себе набір компонентів для обробки сигналів, зокрема сигналів від сенсорів для вимірювання обертального моменту, вихідної напруги, струму та потужності. У зв'язку з цим існує потреба у розробці вимірювальних систем, які призначені для обробки та візуалізації параметрів роботи електрогенераторів, що сприятиме підвищенню їх надійності та зменшенню експлуатаційних витрат.

Метою роботи є аналіз методів та моделей, які використовуються для вимірювання робочих характеристик електрогенераторів, та розробка практичних рекомендацій щодо вимірювання обертального моменту електрогенератора. Розробка методу вимірювання обертального моменту з використанням індуктивного сенсора.

#### Основна частина

3 метою вивчення метрологічних характеристик вимірювального каналу приладів для вимірювання обертальних моментів електрогенераторів, первинний сигнал яких отримується з використанням індуктивних сенсорів, побудовано модель такого приладу В середовищі Matlab/Simulink. За основу було взято модель індуктивного датчика обертального моменту серії ТМ [13] (рис. 3). Розроблено функціональну схему вимірювального каналу з використанням датчика цієї серії (рис. 4).

У відповідності до рис. 4, змінний струм передається на котушку 2. Котушки 3, 4 реагують на зміну струму, яка виникає в результаті переміщення феромагнітного стержня між ними, що спричиняє відмінність струмів. Співвідношення, або різниця цих сигналів використовується для розрахунку абсолютного положення стержня. Так, за допомогою котушок індуктивності 3, 4 диференціального трансформатора LVDT (Linear Variable Differential Transformer, диференціальний трансформатор для вимірювання лінійних переміщень), він передається до перетворювача 6. Схематично принцип дії індуктивного LVDT перетворювача представлено на рис. 5.



Рисунок 3 – Схематичне представлення конструктивних елементів та принципу дії перетворювача обертального моменту серії ТМ



Рисунок 4 – Блок-схема цифрової передачі вимірювального сигналу 1 – накопичувач сигналу; ~ – генератор; 2, 3, 4 – котушки індуктивності; 5 – датчик кута повороту/частоти обертання; 6 – перетворювач; 7 – фільтр сигналів; 8 – підсилювач сигналу; 9 – АЦП; 10 – мікроконтролер





Основні переваги датчиків з LVDT: простота конструкції первинного та електронного перетворювачів, висока роздільна здатність, лінійність та відтворюваність, широкий діапазон робочих температур, відсутність рухомих електричних контактів і, як наслідок, довговічність.

Відхилення торсіонного валу, на який закріплено феромагнітний стержень є пропорційним моменту сили, яка створюється електродвигуном. Таким чином, перетворювач 6 має бути дуже чутливим до зміни напруги, забезпечуючи при цьому лінійність перетворення сигналу. Вирішити таку задачу можна за допомогою схеми на операційних підсилювачах, що дозволяє зменшити вплив обмеження синфазних сигналів із зростанням частоти (рис. 6).



Рисунок 6 – Електрична схема вимірювального каналу приладу індукційного типу на операційних підсилювачах для вимірювання обертального моменту Розроблено з використанням Electronics Workbench

В даному випадку (рис. 5), резистори  $R_3$  та  $R_4$  діють, як дільник напруги для входу не інвертуючого операційного підсилювача. Завдяки зворотному зв'язку через резистори  $R_3$  та  $R_4$  і великому внутрішньому коефіцієнту підсилення, напруга на інвертуючому вході підсилювача буде рівною напрузі на не інвертуючому вході. Відношення  $R_2/R_1$  визначає коефіцієнт передачі підсилювача. Коли  $R_1/R_2 = R_3/R_4$ , підсилення диференціального сигналу, і коефіцієнт послаблення синфазного сигналу, і коефіцієнт послаблення синфазної напруги буде максимальним. Диференціальний коефіцієнт підсилення можна виразити наступним виразом

$$DK_{p} = \frac{U_{BHX}}{U_{BX1} - U_{BX2}} = \frac{R_{2}}{R_{1}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R_{2}}{R_{1}} \cdot \frac{1}{k_{p}}\right)}, \quad (13)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача.

Коефіцієнт підсилення синфазного сигналу, обумовлений розузгодженням резисторів буде рівний:

$$K_{\rm CC1} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 - R_4)}.$$
 (14)

Коефіцієнт підсилення синфазного сигналу, що обумовлений кінцевим значенням коефіцієнту ослаблення синфазного сигналу операційного підсилювача буде дорівнювати

$$K_{\rm CC2} = \frac{R_2}{R_1 \times Kocc_{\rm OII}},\tag{15}$$

де *К*осс<sub>оп</sub> – коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу операційного підсилювача.

Коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу усієї схеми буде дорівнювати

$$K_{\rm occ} = \frac{R_2}{R_1 \times K {\rm occ}_{\rm OII}};$$
(16)

Диференційний вхідний опір можна виразити наступним чином

$$R_{_{\rm BX, ZH\phi.}} = R_1 + R_3. \tag{17}$$

Вхідний опір для синфазного сигналу (при  $K_{occ} = \infty$ ), визначається виразом

$$R_{\text{вх,диф.}} = (R_1 + R_2) || (R_3 + R_4).$$
(18)

Вихідний сигнал, тобто вихідна напруга зсуву (при  $R_1 + R_3$  та  $R_1 + R_4$ ) буде мати такий вираз:

$$U_{\rm BHX} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{\rm BX} + \Delta I_{\rm BX} R_2.$$
(19)

де  $U_{\rm BX}$  – приведена до входу напруга зсуву операційного підсилювача;

 $\Delta I_{_{\rm BX}}$  – різниця вхідних струмів зсуву опера-

ційного підсилювача (по інвертуючому та не інвертую чому входах).

Отримати лінійну залежність між зміною моменту сили, що спричиняє переміщення феромагнітного елемента розміщеного на валу електрогенератора, та вихідною напругою перетворювача 6 (рис. 4) можна, поєднавши вирази (11) та (19):

$$M = \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(x_1 + x'_2\right)^2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{\text{BX}} + \Delta I_{\text{BX}}R_2.$$
(20)

Такий підхід дозволить збільшити чутливість вимірювального каналу за рахунок оптимального підбору опорів (рис. 5). Крім того, індуктивний сенсор  $\epsilon$  стійким до електромагнітних завад.

Моделювання вимірювального каналу з використанням отриманого виразу (19) було проведено в середовищі Matlab Simulink, розробивши блок-схему моделюючого комплексу (рис. 7), який дозволяє моделювати переміщення феромагнітного елементу вздовж котушок індуктивності. В результаті моделювання отримано вихідний сигнал, який змінюється пропорційно до переміщення стержня під дією моменту сили (рис. 7).

Разом з тим, враховуючи, що момент сили створює переміщення феромагнітного стержня, умовно таке переміщення було встановлено в межах  $\pm 10$  мм. Тому, вхідним параметром моделі є переміщення стержня, а вихідним напруга. Так, при поступальному збільшенні навантаження на вал залежність між переміщенням стержня та вихідною напругою перетворювача буде лінійною.



Рисунок 7 – Моделювання вимірювального каналу індуктивного перетворювача, основаного на операційних підсилювачах з інвертуючими каскадами

Збірник наукових праць ОДАТРЯ № 2(19) 2021

В результаті проведення моделювання отримані показники зміни напруги при поступальному переміщенні стержня лінійного перетворювача (0...10 мм) за період 20 с, в режимі розгону електрогенератора, показали наступну характеристику (рис. 8).

$$M = \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(x_1 + x'_2\right)^2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{\text{BX}} + \Delta I_{\text{BX}}R_2.$$
 (20)

Такий підхід дозволить збільшити чутливість вимірювального каналу за рахунок оптимального підбору опорів (рис. 5). Крім того, індуктивний сенсор  $\epsilon$  стійким до електромагнітних завад. Моделювання вимірювального каналу з використанням отриманого виразу (19) було проведено в середовищі Matlab Simulink, розробивши блок-схему моделюючого комплексу (рис. 7), який дозволяє моделювати переміщення феромагнітного елементу вздовж котушок індуктивності. В результаті моделювання отримано вихідний сигнал, який змінюється пропорційно до переміщення стержня під дією моменту сили (рис. 7).

Разом з тим, враховуючи, що момент сили створює переміщення феромагнітного стержня, умовно таке переміщення було встановлено в межах  $\pm 10$  мм. Тому, вхідним параметром моделі є переміщення стержня, а вихідним напруга. Так, при поступальному збільшенні навантаження на вал залежність між переміщенням стержня та вихідною напругою перетворювача буде лінійною.



Рисунок 7 – Моделювання вимірювального каналу індуктивного перетворювача, основаного на операційних підсилювачах з інвертуючими каскадами та вихідної напруги. Побудовано з використанням Matplotlib

В результаті проведення моделювання отримані показники зміни напруги при поступальному переміщенні стержня лінійного перетворювача (0...10 мм) за період 20 с, в режимі розгону електрогенератора, показали наступну характеристику (рис. 8).

Після проведення лінійного градуювання, залежність між обертальним моментом та переміщенням стержня може бути описана наступним чином:

$$M = W_{e}\omega\Phi = f(\delta), \tag{21}$$

де  $W_{e}$  – число витків вимірювальної обмотки:

 $\omega$  – частота напруги живлення;

Ф – амплітуда магнітного потоку;

 $\delta-$  зазор між вихідним положенням сердечника та його поточним положенням.

Така залежність представлена на рис. 8.



Рисунок 8 – Часові характеристики залежності переміщення стержня лінійного перетворювача Так, попри лінійну залежність між зазначеними величинами, на рис. 9 показано змодельований вплив вібрацій, що присутні при обертанні валу електрогенератора, де спостерігається адитивна похибка.

Процес перетворення обертального моменту у вихідну напругу в режимі розгону валу електрогенератора, представлено на рис. 10.

В сталому режимі роботи, враховуючи змодельовану вібрацію, динаміка має наступні характеристики (рис. 11).

Отримані результати моделювання (рис. 11), були використані для визначення абсолютної похибки та середньоквадратичного відхилення.

Так, під час декількох спостережень, де здійснювалось 457 вимірювань обертального моменту, середньоквадратичне відхилення кривої, що характеризує часові характеристики зміни моменту сили, склало 0,77.



Рисунок 9 – Залежність між обертальним моментом та лінійним переміщенням стержня Побудовано з використанням Matplotlib









Середньоквадратичне відхилення кривої, що характеризує часові характеристики зміни обертального моменту, отримане за виразом:

$$S = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n} (a_i - \overline{a})^2}{n - 1}}, (\mathbf{H} \cdot \mathbf{M})$$
(22)  
$$\overline{a} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} a_i}{n},$$
(23)

де: *a<sub>i</sub>* – поточне значення обертального моменту;

 $\overline{a}$  – середнє значення обертального моменту;

*n* – кількість спостережень проведених за один період часу (457 вимірювань).

Абсолютна похибка  $\Delta A$  запропонованого вимірювального перетворювача з використанням LVDT лінійного трансформатора обчислена шляхом розрахунку похибок безпосередніх вимірювань з використанням коефіцієнта Стьюдента при довірчій ймовірності 0,95.

Абсолютна похибка  $\Delta A = 0,003$ , визначена за наступним виразом:

$$\Delta A = t_{\gamma}, n - 1 \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n} \left(a_i - \overline{a}\right)^2}{\frac{n(n-1)}{\sqrt{n}}}}, \qquad (24)$$

де  $t_{\gamma} = 0,95$  – довірчий інтервал;

*a<sub>i</sub>* – поточне значення результату вимірювання:

 $\overline{a}$  – середнє значення результатів вимірювань:

#### Збірник наукових праць ОДАТРЯ № 2(19) 2021

*n* – кількість вимірювань за один період.

В результаті, обертальний момент лежить в інтервалі від 0,020 до 0,026 з довірчою ймовірністю 95 %.  $M = 0,023 \pm 0,003$  Н·м, в сталому режимі роботи.

Зважаючи на те, що отримані результати моделювання не враховують впливу тертя та температурних характеристик, дану модель можна вдосконалювати. Разом з тим, її застосування показало лінійну залежність зміни індуктивності LVDT під впливом моменту сили, яка діє на вал електрогенератора, що в подальшому дозволить проводити вимірювання обертального моменту з більш високою точністю.

## Висновок

Запропонована модель вимірювального перетворювача у відповідності до електричної схеми (рис. 5) та математичної моделі (20), дозволила отримати лінійну залежність між обертальним моментом валу електрогенератора та вихідною напругою перетворювача, використовуючи параметри лінійного трансформатора та операційні підсилювачі.

Її тестування в сталому режимі, в програмному середовищі Matlab Simulink, дозволило отримати абсолютну похибку, яка знаходиться в інтервалі ±0,003 Н·м з довірчим інтервалом 95 %. Середнє значення вимірювальних результатів склало 0,023 Н·м.

Разом з цим, запропонована схема має недоліки, які обумовлені проблемою точності підбору її компонентів, що може суттєво вплинути на похибки результатів вимірювань.

Запропонований метод полягає у вимірюванні обертального моменту шляхом лінійного перетворення моменту сили, яка діє на феромагнітний стержень лінійного трансформатора, у вихідну напругу. Зразкова величина такої сили може бути регульована та доводиться до рівності з величиною, що вимірюється. При цьому вимірювальний прилад, який може бути побудований по такому принципу, буде мати високу чутливість, що закладена в індуктивних сенсорах відповідного типу.

#### Список використаних джерел

1. Кацман М. М. Электрические машины: Учеб. для студентов сред. проф. учебных заведений. 3-е изд., испр. М.: Высш. шк.; Издательский центр «Академия», 2001. 463 с.

2. Олейников А. М., Матвеев Ю. В., Канов Л. Н. Моделирование режима ветроэлектрической установки малой мощности. Электротехника и электромеханика. 2010. № 2. С. 16-20.

3. Олейников А. М., Матвеев Ю. В., Канов Л. Н., Зарицкая Е. И. Математическая модель автономной безредукторной ветроэлектрической установки на генераторе с постоянными магнитами. Електротехніка і електроенергетика. 2010. № 2. С. 62-67.

4. Войтенко В. А. Метод измерения индуктивности обмотки статора явнополюсного синхронного двигателя по продольной и поперечной осям обмотки возбуждения. Электротехнические и компьютерные системы. 2012. № 6. С. 121-124.

5. Перминов Ю. Н., Монахов Е. А. Сравнение вариантов конструкций синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для ветроустановок. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 2 (57). С. 54-60. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).54-60.

6. Перминов Ю. Н., Коханевич В. П., Зинченко Т. В. Алгоритм расчета синхронных генераторов торцевой конструкции с двумя магнитными системами, расположенными по торцам статора, для ветроэнергетических установок. Відновлювана енергетика. 2016. № 2 (45). С. 45-49. URL:

https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/121.

7. Фатеев Е. М. Ветродвигатели и ветроустановки. М: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1948. 544 с.

8. Jian L. N., Chau K. T., Zhang D., Jiang J. Z. and Wang Z. A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind. Power Generation. *Proceedings of 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, New Orleans, LA, 2007, pp. 573-580.

9. Dobzhanskyi O., Hossain Eklas, Amiri Ebrahim, Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Pryjmak M., Gamaliia R. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7, pp. 44813-44822. DOI:

https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908348

10. Яковлев А. И., Затучная М. А., Меркушев В. Н., Пашков В. Н. Расчет и проектирование ветроэлектрических установок с горизонтально-осевой ветротурбиной и синхронным генератором на постоянных магнитах. Учеб. пособие по курсовому проектированию. Харьков: Нац. аэрокосм, ун-т «Харьк. авиац. ин-т». 2003. 125 с.

11. Жадобин Н. Е. Магнитоупругие преобразователи в судовой автоматике. Л.: Судостроение, 1985. 36 с.

12. Жадобин Н. Е., Крылов А. П., Малышев В. А. Элементы и функциональные устройства

судовой автоматики: учебное пособие [2-е изд., перераб. и доп.]. СПб.: Элмор, 1998. 440 с.

13. Раянов Т. А. Обзор новых типов датчиков крутящего момента. *Транспортные системы и технологии*. 2020. № 1. С. 5-14.

## References

1. Kacman M. M. E'lektricheskie mashiny [Electric machines]: Ucheb. dlya studentov sred. prof. uchebnyx zavedenij. 3-e izd., ispr. M.: Vyssh. shk.; Izdatel'skij centr «Akademiya», 2001. 463 s.

2. Olejnikov A. M., Matveev Yu. V., Kanov L. N. Modelirovanie rezhima vetroe'lektricheskoj ustanovki maloj moshhnosti [Modeling of the regime of a low-power wind power plant]. *E'lektrotexnika i e'lektromexanika*. 2010. № 2. S. 16-20.

3. Olejnikov A. M., Matveev Yu. V., Kanov L. N., Zarickaya E. I. Matematicheskaya model' avtonomnoj bezreduktornoj vetroe'lektricheskoj ustanovki na generatore s postoyannymi magnitami [Mathematical model of an autonomous gearless wind power plant based on a generator with permanent magnets]. *Elektrotekhnika i elektroenerhetyka*. 2010. No 2. S. 62-67.

4. Vojtenko V. A. Metod izmereniya indukyavnopolyusnogo obmotki statora tivnosti sinxronnogo dvigatelya po prodol'noj i poperechnoj osyam obmotki vozbuzhdeniya [Method for measuring the inductance of the stator winding of a salient-pole synchronous along motor the longitudinal and transverse axes of the excitation winding]. E'lektrotexnicheskie i komp'yuternye sistemy. 2012. № 6. S. 121-124.

5. Perminov Yu. N., Monaxov E. A. Sravnenie variantov konstrukcij sinxronnyx genera-torov s vozbuzhdeniem ot postoyannyx magnitov dlya vetroustanovok [Comparison of design options for synchronous generators with excitation from permanent magnets for wind turbines]. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2019. № 2 (57). S. 54-60. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-

8058.2019.2(57).54-60.

6. Perminov Yu. N., Koxanevich V. P., Zinchenko T. V. Algoritm rascheta sinxronnyx generatorov torcevoj konstrukcii s dvumya magnitnymi sistemami, raspolozhennymi po torcam sta-tora, dlya vetroe'nergeticheskix ustanovok [Algorithm for calculation of synchronous generators of end structure with two magnetic systems located at the ends of the stator for wind power plants]. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2016. № 2 (45). S. 45-49. URL:

https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/121.

7. Fateev E. M. Vetrodvigateli i vetroustanovki. [Wind motors and wind power plants] M: Gosudarstvennoe izdatel'stvo sel'skoxozyajstvennoj literatury, 1948. 544 s.

8 Jian L. N., Chau K. T., Zhang D., Jiang J. Z. and Wang Z. A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind. Power Generation. *Proceedings of 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, New Orleans, LA, 2007, pp. 573-580.

9. Dobzhanskyi O., Hossain Eklas, Amiri Ebrahim, Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Pryjmak M., Gamaliia R. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7, pp. 44813-44822. DOI:

https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908348.

10. Yakovlev A. I., Zatuchnaya M. A., Merkushev V. N., Pashkov V. N. Raschet i proektirovanie vetroe'lektricheskix ustanovok s gorizontal'no-osevoj vetroturbinoj i sinxronnym generatorom na postoyannyx magnitax. [Calculation and design of wind power plants with a horizontal axis wind turbine and a permanent magnet synchronous generator]. Ucheb. posobie po kursovomu proektirovaniyu. Xar'kov: Nac. ae'rokosm, un-t «Xar'k. aviac. in-t». 2003. 125 s.

11. Zhadobin N. E. Magnitouprugie preobrazovateli v sudovoj avtomatike [Magnetoelastic converters in ship automation]. L.: Sudostroenie, 1985. 36 s.

12. Zhadobin N. E., Krylov A. P., Malyshev V. A. E'lementy i funkcional'nye ustrojstva sudovoj avtomatiki: uchebnoe posobie [Elements and functional devices of ship automation]. SPb.: E'lmor, 1998. 440 s.

13. Rayanov T. A. Obzor novyx tipov datchikov krutyashhego momenta. [Review of new types of torque sensors]. *Transportnye sistemy i texnologii*. 2020. № 1. S. 5-14.

Надійшла до редакції 10.06.2021