

М. В. БУРШТИНСЬКИЙ, М. В. ХАЙ, Б. М. ХАРЧИШИН

НЕПРЯМЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Розглядається спосіб визначення обертового моменту електродвигуна за допомогою некаліброваного навантажувального генератора постійного струму без стабілізації магнітного потоку. Обґрунтовується спосіб непрямого визначення електрорушійної сили для визначення обертового моменту. Пропонується методика розрахунку потужності на валу досліджуваного двигуна. Підвищена точність вимірювання обертового моменту на валу.

Ключові слова: обертовий момент, навантажувальний генератор, стабілізація магнітного потоку, електрорушійна сила, потужність на валу.

Рассматривается способ определения вращающего момента электродвигателя с помощью некалиброванного нагрузочного генератора постоянного тока без стабилизации магнитного потока. Обосновывается способ косвенного определения электродвижущей силы для определения вращающего момента. Предлагается методика расчета мощности на валу исследуемого двигателя. Повышена точность измерения вращающего момента.

Ключевые слова: вращающий момент, нагрузочный генератор, стабилизация магнитного потока, электродвижущая сила, мощность на валу.

Formulation of the problem. The absence of method in determining the torque using a load generator, while magnitude of the magnetic flux of the latter is neither defined nor crucial in terms of stability. **The aim.** The development of a relatively inexpensive method for determining the torque on a shaft that will allow to increase the accuracy of measurements. **Practical value.** Increases accuracy of determining the torque value of the researched electric motor using a load generator without stabilization of the magnetic flux. **Originality.** Implementing an indirect determination of the electromotive force by the voltage drop across the load and in the circle of an anchor in the constant current generator.

Keywords: torque, load generator, stabilization of magnetic flux, electromotive force, shaft power.

Вступ. Відомі різні за точністю та вартістю методи вимірювання обертового моменту досліджуваного двигуна. Хороші та точні але дорогими є прямі методи вимірювання моменту, до яких відносять вимірювання за допомогою торсійних моментомірів, побудованих переважно на тензометричних елементах [1] у вигляді спеціальних муфт, та за допомогою динамометра, прикладеного до статора навантажувального генератора, що закріплений на стоякових підшипниках – так званої балансувальної машини [2, 3]. Однак такі вимірювання є невиправдано дорогими, коли йдеться про одиничні випробування.

Існують також непрямі методи вимірювання моменту, які розділяють на динамічні [4] та статичні. Для електродвигунів малої та середньої потужності доцільно застосовувати саме статичні методи (у деякій літературі – квазістатичні) з безпосереднім навантаженням без повернення енергії в мережу [2, 5]. Це пояснюється малими значеннями моментів інерції махових мас і значним впливом перехідних процесів на швидкість обертання. Особливо це стосується випробування асинхронних двигунів. Повернення енергії в мережу, пов'язане з необхідністю збільшення потужності навантажувального генератора, є економічно недоцільним.

У будь-якому випадку випробування передбачає створення стенда для визначення параметрів електродвигунів під навантаженням, де гальмівне навантаження створює найчастіше генератор постійного струму з незалежним збудженням, що працює на електричну навантажу [6].

Доволі точним методом є застосування як навантажувального генератора тарованої машини пос-

тійного струму, в якій наперед відомі всі види втрат за будь-яких режимів роботи (напругах, швидкостях, навантаженнях). Однак процедура тарування машини постійного струму є доволі складною і дорогою.

Значно дешевшим є розрахунковий метод визначення обертового моменту шляхом гальмування звичайним генератором постійного струму з незалежним збудженням з компенсаційною обмоткою [7, 8].

Вважається, що гальмівний момент M_g , що розвивається таким генератором, пропорційний добутку струму в якорі I на потік Φ . Потік Φ у першому наближенні вважається залежним тільки від струму збудження. При роботі з незалежним збудженням на незмінний навантажувальний опір струм I пропорційний електрорушійній силі в якорі. Оскільки вона пропорційна потоку Φ та частоті обертання n , то

$$M_g = kn\Phi^2, \quad (1)$$

де k – конструктивний коефіцієнт.

Таким чином, $M_g = f(n)$ для кожного значення потоку виражається прямою лінією, що проходить через початок координат. Крива обертового моменту досліджуваного двигуна перетинається у точках, що характеризують рівність обертового моменту двигуна та гальмівного моменту генератора [8].

При застосуванні цього методу слід мати на увазі умови стійкої роботи пари двигун – навантажувальний генератор. Умовою стійкості роботи системи є виконання нерівності

$$\frac{dM_g}{dt} > \frac{dM_d}{dt},$$

де M_d – момент випробовуваного двигуна.

© М.В. Бурштинський, М.В. Хай, Б.М. Харчишин, 2018

Зона нестійкої роботи може проявитися при дослідженні асинхронних двигунів, зокрема при знятті механічних характеристик двигунів великої потужності.

Однак сучасні асинхронні двигуни малої та середньої потужності мають високі значення кратностей пускового, мінімального та максимального моментів [9], тому умова стійкості роботи при випробуванні виконується.

Цей метод передбачає стабільність магнітного потоку, який через реакцію якоря навіть у скомпенсованій машині є далеко не сталим. Зважаючи на те, що гальмівний момент M_2 генератора залежить від магнітного потоку у квадраті, то навіть при незначній нестабільності магнітного потоку похибка зростає у квадрат разів. Відомо, що розмагнічувальна дія реакції якоря у добре спроектованій машині постійного струму є ідеально скомпенсованою тільки при номінальній навантазі, тому цей спосіб є недостатньо точним для інженерної практики і може використовуватись тільки з навчальною метою.

Постановка задачі. Під час досліджень асинхронних двигунів на відповідність заводським показникам перед дослідниками постало завдання розроблення чи удосконалення існуючого методу визначення обертового моменту, для якого величина магнітного потоку не визначається і не є критичною з точки зору її стабільності.

Об'єктом дослідження є метод визначення обертового моменту за допомогою навантажувального генератора постійного струму.

Мета дослідження: розробити відносно недорогий метод визначення обертового моменту на валу, що дозволить підвищити точність вимірювань.

Виклад основного матеріалу. Обертальний момент на валу двигуна дорівнює вхідному моменту генератора постійного струму M_T , що складається з моменту втрат M_0 та електромагнітного моменту M_{em} :

$$M_T = M_0 + M_{em} = \frac{P_0}{\omega} + \frac{P_{em}}{\omega}, \quad (2)$$

де P_0 та P_{em} – втрати потужності та електромагнітна потужність відповідно;

ω – кутова частота обертання.

Рівняння напруг генератора має вигляд:

$$E = U_n + \Delta U_a, \quad (3)$$

де E – електрорушійна сила генератора;

U_n – спад напруги на опорі навантаження;

$\Delta U_a = I_a R_a$ – внутрішній спад напруги на всіх опорах якорного кола R_a (обмотки якоря, додаткових полюсів, щіток, перехідних контактів тощо);

I_a – струм якоря, що дорівнює струму навантаження.

Залежність $\Delta U_a = f(I_a)$ не є ідеально лінійною через вплив нестабільного опору щітково-колекторного вузла.

Потужність на валу досліджуваного двигуна P_2 визначається непрямым способом через електричну потужність, яка виділяється у зовнішньому та внутрішньому колі якоря генератора, через магнітні втрати в активному залізі ротора та механічні (в тому числі аеродинамічні) втрати.

Електрична потужність, яку розвиває генератор P_{el} , дорівнює електромагнітній і визначається як

$$P_{el} = E \cdot I_a = (U_n + \Delta U_a(I_a)) \cdot I_a. \quad (4)$$

Величини U_n та I_a визначаються безпосереднім вимірюванням, а для визначення $\Delta U_a = f(I_a)$ належить здійснити окреме визначення спаду напруги у внутрішньому електричному колі при вимкненому струмові збудження за нерухомого ротора генератора. Особливість такого підходу полягає в тому, що електрорушійна сила E , яка утворюється в генераторі, залежить лише від потоку збудження Φ та частоти обертання ротора n

$$E = c_e \cdot \Phi \cdot n. \quad (5)$$

Такий підхід усуває проблему зменшення потоку Φ внаслідок впливу реакції якоря при сталому струмові збудження $i_{36} = \text{const}$.

Перед експериментальним визначенням залежності $\Delta U_a = f(I_a)$ належить нагріти внутрішнє коло двигуна номінальним струмом до усталеної температури.

Для визначення механічних та магнітних втрат потужності в навантажувальному генераторі перед його з'єднанням з досліджуванним двигуном проводять дослід його неробочого ходу. Сутність такого визначення механічних та магнітних втрат полягає в наступному. Оскільки прикладена до двигуна напруга

$$U = E + \Delta U_a,$$

то споживана при цьому потужність визначається за формулою:

$$U \cdot I_0 = E \cdot I_0 + \Delta U_a \cdot I_0. \quad (6)$$

Ця потужність є не що інше як втрати електричні ($\Delta U_a \cdot I_0$) та механічні плюс магнітні ($E \cdot I_0$). Отож для визначення останніх необхідно знати ЕРС E та струм неробочого ходу I_0 для різних частот обертання ротора. Досягається це зміною напруги живлення U за сталого струму збудження $i_{36} = \text{const}$, який підтримуватиметься таким, яким він буде в режимі навантаження генератора, що працює у парі з досліджуванним двигуном. Дослід належить провести зразу за визначенням $\Delta U_a = f(I_a)$, не очікуючи охолодження генератора.

Вираз для визначення електричної, механічної та магнітної потужностей буде наступним:

$$P_{el} = E \cdot I_a + E \cdot I_0(n) = E \cdot (I_a + I_0(n)) = (U_n + \Delta U_a(I_a)) \cdot (I_a + I_0(n)). \quad (7)$$

Кінцевий вираз для обчислення потужності на валу досліджуваного двигуна P_2 отримаємо, враховуючи додаткові втрати в навантажувальному генераторі без стабілізації магнітного потоку $\Delta P_{\text{дод}}$, а саме:

$$\Delta P_{\text{дод}} = 0,01 P_n \left(\frac{I_a}{I_n} \right)^2, \quad (8)$$

де P_n , I_n – номінальні потужність та струм генератора.

Остаточний вираз для обчислення потужності на валу досліджуваного двигуна

$$P_2 = (U_n + \Delta U_a(I_a)) \cdot (I_a + I_0(n)) + 0,01 P_n \left(\frac{I_a}{I_n} \right)^2. \quad (9)$$

Для випадку дослідження асинхронного двигуна потужність P_2 на валу згідно зі стандартом є аргументом робочих характеристик за поданої напруги живлення, схеми з'єднань обмотки статора Δ/Y та кількості пар полюсів p

$$P_1, I, \eta, \cos \phi, n = f(P_2),$$

де P_1 – активна споживана потужність;
 I – споживаний струм;

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ – коефіцієнт корисної дії;}$$

$$\cos \phi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \text{ – коефіцієнт потужності;}$$

n – частота обертання.

Потужність P_1 та струм I вимірюються безпосередньо вимірювальними приладами, а частота обертання безпосередньо або з використанням тахогенератора.

Зібрана установка у складі асинхронного двигуна, генератора постійного струму і тахогенератора дає змогу зняти механічну характеристику двигуна шляхом його навантаження і подальшим обчисленням обертового моменту за виразом

$$M_d = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P_2}{n}.$$

Висновки. Запропонований метод дозволяє визначити потужність на валу двигуна, а, відтак і обертовий момент за допомогою некаліброваного навантажувального генератора постійного струму без стабілізації магнітного потоку. Він ґрунтується на непрямому визначенні електрорушійної сили, що пропорційна магнітному потоку, завдяки чому відпадає необхідність його стабілізації, що здешевлює та підвищує точність випробування. Цим методом перевірено чотири асинхронних двигуни, що дозволило підтвердити їх відповідність заявленим виробником характеристикам.

Список літератури

1. Гуринов А.С. Измерение крутящего момента на вращающихся валах / А.С. Гуринов, В.В. Дудник, В.Л. Гапонов,

В.В. Калашников – Режим доступу: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/798>. Дата звертання 21 лютого 2018 р.

2. Коварский Е.М. Испытание электрических машин / Е.М. Коварский, Ю.И. Янко – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
3. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учеб. для вузов по спец. "Электромеханика" / О.Д. Гольдберг. – М.: Высш. шк., 1990. – 255 с.
4. Бурштинский М.В. Элементна база систем електропостачання та електроприводу: Навчальний посібник. – 2-ге вид. випр. і доповн. / М.В. Бурштинський, М.В. Хай, Б.М. Харчишин – Львів, 2010. – 240 с.
5. Котеленец Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. пособие для вузов по спец. "Электромеханика" / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
6. Третьяков М.Н. Испытание электродвигателей малой мощности / М.Н. Третьяков – М.–Л.: Гос.энергетич.изд-во, 1960. – 174 с.
7. Николаев С.А. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам. Изд. 2-е, переработ. и доп. Учебное пособие для техникумов / Николаев С.А. – М.: Энергия, 1969. – 208 с.
8. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – 4-е изд., сокр. и перераб. / Г.К. Жерве – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 408 с.
9. http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp. Дата звертання 21 лютого 2018 р.

References (transliterated)

1. Gurinov A. S. Izmerenie krutjashhego momenta na vrashhajushhihsja valah [Measuring of twisting moment on the revolved billows] / A. S. Gurinov, V. V. Dudnik, V. L. Gaponov, V. V. Kalashnikov – Rezhim dostupa: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/798>. Data zvertannya 21 lyutoho 2018 r.
2. Kovarskij E. M. Ispytanie jelektricheskij mashin [Tests of electric machines] / E. M. Kovarskij, Ju. I. Janko – M.: Jenergoatomizdat, 1990. – 320 s.
3. Gol'dberg O. D. Ispytanija jelektricheskij mashin. Ucheb. dlja vuzov po spec. "Jelektromehanika" [Tests of electric machines] / O. D. Gol'dberg. – M.: Vyssh. shk., 1990. – 255 s.
4. Burshtynskyy M. V. Elementna baza system elektropostachannya ta elektropryvodu: Navchal'nyy posibnyk [Element base of the systems of power supply and electromechanic : the Train aid.] – 2-he vyd. vypr. i dopovn. / M. V. Burshtynskyy, M. V. Khay, B. M. Kharchyshyn – L'viv, 2010. – 240 s.
5. Kotelenec N. F. Ispytanija i nadezhnost' jelektricheskij mashin: Ucheb. posobie dlja vuzov po spec. "Jelektromehanika" [Tests and reliability of electric machines : Studies. manual for the institutes of higher on special. "Electromechanics"] / N. F. Kotelenec, N. L. Kuznecov – M.: Vyssh. shk., 1988. – 232 s.
6. Tret'jakov M. N. Ispytanie jelektrodvigatetej maloj moshhnosti [Test of electric motors of small-yield] / M. N. Tret'jakov – M.–L.: Gos.jenergetich.izd-vo, 1960. – 174 s.
7. Nikolaev S. A. Rukovodstvo k laboratornym rabotam po jelektricheskim mashinam. Izd. 2-e, pererabot. i dop. Uchebnoe posobie dlja tehnikumov [Guidance to laboratory works on electric machines] / Nikolaev S. A. – M.: Jenergija, 1969. – 208 s.
8. Zherve G. K. Promyshlennye ispytanija jelektricheskij mashin. – 4-e izd., sokr. i pererab [Industrial tests of electric machines] / G. K. Zherve – L.: Jenergoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1984. – 408 s.
9. http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp. Data zvertannya 21 lyutoho 2018 r.

Надійшла (received) 04.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Непряме визначення обертового моменту досліджуваного електродвигуна / М. В. Бурштинський, М. В. Хай, Б. М. Харчишин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні ма-

шини та електромеханічне перетворення енергії". – X. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 75-78. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Косвенное определение вращающего момента испытуемого электродвигателя / М. В. Бурштынський, М. В. Хай, Б. М. Харчишин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – X. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 75-78. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

An indirect determination of the torque of the researched electric motor / M. V. Burshtynskiy, M. V. Khai, B. M. Kharchyshyn // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 75-78. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бурштинський Мирон Васильович, Національний університет «Львівська політехніка», інженер кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, тел. (093)690-32-93; e-mail: bursht@polynet.lviv.ua.

Бурштынський Мирон Васильевич, Национальный университет «Львовская политехника», инженер кафедры электромехатроники и компьютеризированных электромеханических систем, тел. (093)690-32-93; e-mail: bursht@polynet.lviv.ua.

Burshtynskiy Myron Vasylovych, National University «Lvivska Polytechnica», engineer at the Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems, tel. (093)690-32-93; e-mail: bursht@polynet.lviv.ua.

Хай Михайло Васильович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, тел. (093)346-00-32; e-mail: mxaishk@gmail.com.

Хай Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент, Национальный университет «Львовская политехника», доцент кафедры электромехатроники и компьютеризированных электромеханических систем, тел. (093)346-00-32; e-mail: mxaishk@gmail.com.

Khai Mykhailo Vasylovych, Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), Associate Professor, National University «Lvivska Polytechnica», Associate Professor at the Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems, tel. (093)346-00-32; e-mail: mxaishk@gmail.com.

Харчишин Богдан Михайлович, кандидат технічних наук, с.н.с., Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, тел. (095)105-14-71; e-mail: xbohndan@gmail.com.

Харчишин Богдан Михайлович, кандидат технических наук, с.н.с., Национальный университет «Львовская политехника», доцент кафедры электромехатроники и компьютеризированных электромеханических систем, тел. (095)105-14-71; e-mail: xbohndan@gmail.com.

Kharchyshyn Bohdan Mykhailovych, Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), Senior Research Fellow, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems, tel. (095)105-14-71; e-mail: xbohndan@gmail.com.