Дакі О.А.

Державний університет інфраструктури та технологій

Якусевич Ю.Г.

Державний університет інфраструктури та технологій

Урум Н.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

Тришин В.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

ОЦІНКА ВПЛИВУ ВИЩИХ ГАРМОНІК У СИГНАЛАХ НАПРУГИ І СТРУМУ НА ТОЧНІСТЬ КОРЕЛЯЦІЙНОГО МЕТОДУ ВІМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНІВ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті продемонстровано, що надійність і ефективність функціонування системи енергозабезпечення засобів водного транспорту залежить від технічної справності електродвигунів – двигунів, які забезпечують генерування електричної напруги (струму) на судні. Вихід із ладу таких двигунів призведе до повної відсутності роботи систем зв'язку, навігації тощо, що може бути причиною катастрофи. Обґрунтовано, що одним із методів підтримання електродвигунів у справному стані є контроль потужності. Запропонований метод оцінки впливу вищих гармонік у сигналах напруги і струму на точність кореляційного методу вимірювання потужності двигунів засобів водного транспорту. Наявність вищих гармонік у кривих напруги і струму призводить до методичної похибки вимірювання потужності. Це зумовлено тим, що за наявності вищих гармонік моменти переходів через нуль кривих напруги і струму не збігаються з моментами переходів через нуль перших гармонік кривих струму та напруги відповідно. Таке часове зміщення призводить до похибки у вимірюванні потужності, яка має ту ж природу, що й методична похибка вимірювання фазового зсуву між несинусоїдальними сигналами. Також наявність вищих гармонік у кривих напруги і струму призводить до появи додаткових членів у функції розкладу несинусоїдального сигналу. За результатами дослідження встановлено, що найбільший внесок у похибку вимірювання потужності запропонованим кореляційним методом надає третя гармоніка в сигналах струму або напруги. У цьому разі відносні похибки вимірювання потужності кореляційним методом дорівнює парціальному коефіцієнту третьої гармоніки. Якщо ж у сигналах напруги і струму відсутня третя гармоніка, то відповідна похибка квадратична за коефіцієнтом гармонік i , отже, за малих значень коефіцієнтів гармонік буде величиною другого порядку малості, якою можна знехтувати.

Ключові слова: засоби водного транспорту, двигун, потужність, кореляційний метод, напруга, струм

Постановка проблеми. Двигуни засобів водного транспорту (залежно від призначення) мають у своєму складі різноманітні механічні та електронні складники (механізми), вихід із ладу яких може призвести до катастрофи або неспроможності засобу закінчити своєчасно рейс, тобто до економічних збитків [1; 2]. Таким чином, своєчасне виявлення відмов двигунів засобів водного транспорту дозволить підвищити ефективність експлуатації таких засобів [3].

Забезпечення надійної та безпечної експлуатації двигунів (ходових і системи енергозабезпечення) засобів водного транспорту досягається за

рахунок застосування системи контролю та діагностування технічного стану. До такої системи зараховують сукупність методів і засобів контролю та діагностування. Система технічного діагностування при цьому повинна включати періодичний контроль технічного стану двигунів, пошук дефектів і несправностей у роботі, визначення ступеня небезпеки дефектів й оцінку остаточного ресурсу обладнання [4; 5].

Одним з етапів під час виконання технічного обслуговування та ремонтних робіт є моніторинг

і оцінка фактичного стану обладнання для визначення обсягів і строків необхідних регламентних робіт [5; 6]. Отже, від точності та ефективності проведення діагностики залежить якість і вартість робіт, тобто фінансово-економічні результати обслуговування двигунів [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питаннями вимірювання потужності двигунів внутрішнього згоряння займалися Л.Я. Волчок, М.І. Корчагін, В.К. Чистяков, М.М. Фомін, М.М. Свистунов, С.О. Головінов та ін. У своїх роботах учені виділяють кореляційний метод вимірювання потужності двигунів. До основних вимог сучасних методів діагностування технічного стану двигунів засобів водного транспорту пропонується зарахувати [7; 8]:

- потрібний рівень достовірності та точності виявлення несправностей і пошкоджень двигунів;
- можливість своєчасного виявлення основних електричних і механічних дефектів двигунів;
- проведення необхідних операцій вимірювання дистанційно;
- низьку трудомісткість і простоту технічного обслуговування (проведення вимірювань необхідних параметрів);
- можливість проведення аналітичного оброблення отриманих результатів вимірювань за короткий час (застосування інформаційно-вимірювальних систем і комплексів).

Постановка завдання. Для виявлення несправностей двигунів (наприклад системи енергозабезпечення засобів водного транспорту) виділяють характерні частоти напруги або струму. Характер і ступінь несправності виділяють шляхом порівняння значень амплітуд U_m на характерних частотах із значеннями амплітуд U_0 на частоті 0 Гц.

Діагностування основних несправностей електродвигунів засобів водного транспорту здійснюється на характерних частотах:

- наявність міжвиткових замикань в обмотках статора та несправності ротора – на частоті мережі живлення (50 Гц; 400 Гц);
- відсутність співвісності валів електродвигунів і зв'язаних з електродвигуном механічних пристроїв – на частотах, які кратні основній частоті обертання електродвигуна;
- дефекти ремінцевого передання навантаження – на частотах, які кратні частоті биття ременя;
- пошкодження підшипника – на частотах, кратних частоті обертання ротора;

– пошкодження механічного обладнання з групи двигуна (насос, вентилятор, компресор) – на лопатковій частоті.

Висновок про наявність несправності електродвигуна робиться на основі порівняння значень амплітуд U_m на частотах, характерних для несправностей (дефектів), із рівнем сигналу на частоті, яка дорівнює нулю. Якщо амплітуди U_m на характерних частотах нижче амплітуди модуля U_0 на частоті 0 Гц на задану величину, то робиться висновок про справний технічний стан двигуна та пов'язаних із ним механічних пристроїв. Якщо така різниця між амплітудами більше заданої величини, то робиться висновок про наявність несправності, яка характерна для цієї частоти.

Спектральний аналіз отриманого сигналу та порівняння амплітуд U_m проводяться переважно у частотній області від мінус 100 дБ до 0 дБ шляхом виділення характерних рис (значень) появи несправності (наприклад у вигляді стрибків амплітуди U_m на характерних частотах).

Для зниження ефекту розтікання спектра під час виконання спектрального аналізу за допомогою алгоритму швидкісного перетворення Фур'є використовують функції вікна [10; 11].

Надійність і ефективність функціонування системи енергозабезпечення засобів водного транспорту залежить від технічної справності електродвигунів – двигунів, які забезпечують генерування електричної напруги (струму) на судні. Так, вихід із ладу таких двигунів (генераторів) призведе до повної відсутності роботи систем зв'язку, навігації тощо, що може бути причиною катастрофи.

Одним із методів підтримання електродвигунів у справному стані є контроль потужності, яку забезпечує такий двигун.

У статті запропоновано метод оцінки впливу вищих гармонік у сигналах напруги і струму на точність кореляційного методу вимірювання потужності двигунів засобів водного транспорту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Наявність вищих гармонік у кривих напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ призводить до методичної похибки вимірювання потужності кореляційним методом. По-перше, через наявність вищих гармонік моменти переходів через нуль кривих напруги і струму не збігаються з моментами переходів через нуль перших гармонік кривих струму та напруги відповідно. Таке часове зміщення призводить до похибки у вимірюванні потужності, яка має ту ж природу, що й методична похибка вимірювання

фазового зсуву між несинусоїдальними сигналами [12]. По-друге, наявність вищих гармонік у кривих напруги і струму призводить до появи додаткових членів у функції розкладу несинусоїдального сигналу [13].

Представимо рядами Фур'є несинусоїдальні функції напруги $u(t)$ і струму $i(t)$, взявши за початок відліку кривих момент переходу через нуль першої гармоніки напруги:

$$u(t) = U_0 + U_{m1} \sin \omega t + \sum_{k=2}^{\infty} U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_{uk}); \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + I_{m1} \sin(\omega t + \phi) + \sum_{k'=2}^{\infty} I_{mk'} \sin(k'\omega t + \psi_{ik'}), \quad (2)$$

де U_0 , I_0 – постійні складники в кривих напруги і струму відповідно;

U_{m1} , I_{m1} – амплітуди перших (основних) гармонік напруги і струму відповідно;

ω – кругова частота перших гармонік напруги і струму;

ϕ – фазовий зсув між першими (основними) гармоніками напруги і струму;

k , k' – поточний номер гармоніки напруги і струму відповідно;

U_{mk} , $\psi_{ik'}$ – початкові фази k -ї гармоніки напруги і k' -ї гармоніки струму відповідно;

U_{mk} , $I_{mk'}$ – амплітуди k -ї гармоніки напруги і k' -ї гармоніки струму відповідно.

Для скорочення таких записів співвідношення (1) і (2) позначимо однаково:

$$u(t) = \sum_{k=0}^{\infty} U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_{uk}); \quad (3)$$

$$i(t) = \sum_{k'=0}^{\infty} I_{mk'} \sin(k'\omega t + \psi_{ik'}), \quad (4)$$

де за формулами (1) і (2) відповідно візьмемо такі рівності:

$$U_{m0} = U_0, \quad I_{m0} = I_0; \quad (5)$$

$$\psi_{u0} = \psi_{i0} = \frac{\pi}{2}; \quad (6)$$

$$\psi_{u1} = 0, \quad \psi_{i1} = \phi. \quad (7)$$

Для результату вимірювання активної потужності запишемо

$$\tilde{N} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n u(t_q) i(t_q) \sin(2\omega t_q + \beta),$$

або з урахуванням співвідношень (3), (4)

$$\tilde{N} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \sum_{k,k'=0}^{\infty} U_{mk} I_{mk'} \sin(k\omega t_q + \psi_{uk}) \times \sin(k'\omega t_q + \psi_{ik'}) \sin(2\omega t_q + \beta). \quad (8)$$

У цьому виразі перетворимо добуток синусів [14]:

$$\begin{aligned} & \sin(k\omega t_q + \psi_{uk}) \sin(k'\omega t_q + \psi_{ik'}) \sin(2\omega t_q + \beta) = \\ & = \frac{1}{4} \left\{ \sin[(k' - k + 2)\omega t_q + \beta + \psi_{ik'} - \psi_{uk}] + \right. \\ & \quad + \sin[(k - k' + 2)\omega t_q + \beta + \psi_{uk} - \psi_{ik'}] + \\ & \quad + \sin[(k + k' - 2)\omega t_q - \beta + \psi_{uk} + \psi_{ik'}] - \\ & \quad \left. - \sin[(k + k' + 2)\omega t_q + \beta + \psi_{uk} + \psi_{ik'}] \right\}. \quad (9) \end{aligned}$$

Якщо в співвідношенні (8) знехтувати похибкою від заміни інтеграла сумою (за умови, що криві напруги і струму не містять гармонік вище n -ї), то, підставляючи рівність (9), під час підсумовування за моментами дискретизації t_q звернуться в нуль усі суми, за винятком тих, у яких $k' = k - 2$, $k' = k + 2$ і $k' = k = 1$.

Тому вираз (8) запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{N} = & \frac{1}{4} \left\{ U_{m1} I_{m1} \sin(\psi_{u1} + \psi_{i1} - \beta) + \right. \\ & + \sum_{k=2}^{\infty} U_{mk} I_{m(k-2)} \sin[\psi_{i(k-2)} - \psi_{uk} + \beta] + \\ & \left. + \sum_{k=0}^{\infty} U_{mk} I_{m(k+2)} \sin[\psi_{uk} - \psi_{i(k+2)} + \beta] \right\}. \end{aligned}$$

Зважаючи на рівності (5) – (7), маємо

$$\begin{aligned} \tilde{N} = & \frac{1}{2} U_1 I_1 \sin(\phi - \beta) + \frac{1}{2\sqrt{2}} \left[U_2 I_0 \cos(\psi_{u2} - \beta) + \right. \\ & \left. + U_0 I_2 \cos(\psi_{i2} - \beta) \right] + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left[U_k I_{k+2} \sin(\psi_{uk} - \psi_{i(k+2)} + \beta) + \right. \\ & \left. + U_{k+2} I_k \sin(\psi_{ik} - \psi_{u(k+2)} + \beta) \right], \end{aligned}$$

або

$$\tilde{N} = N + \Delta N_e, \quad (10)$$

де

$$N = \frac{1}{2} U_1 I_1 \sin(\phi - \beta) \quad (11)$$

– результат вимірювання потужності;

$$\begin{aligned} \Delta N_e = & \frac{1}{2\sqrt{2}} \left[U_2 I_0 \cos(\psi_{u2} - \beta) + U_0 I_2 \cos(\psi_{i2} - \beta) \right] + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left[U_k I_{k+2} \sin(\psi_{uk} - \psi_{i(k+2)} + \beta) + \right. \\ & \left. + U_{k+2} I_k \sin(\psi_{ik} - \psi_{u(k+2)} + \beta) \right] \quad (12) \end{aligned}$$

– похибка вимірювання потужності, яка вноситься вищими гармоніками в кривих напруги і струму.

Із виразу (12) випливає, що можливі випадки, коли, незважаючи на присутність вищих гармонік у кривих напруги і струму, похибка ΔN_e дорівнює нулю. Це має місце тоді, коли в кривій струму немає гармонік, що відрізняються від гармонік у

кривій напруги на 2ω . Наприклад, якщо в кривих напруги і струму відсутня друга гармоніка, то наявність у них постійного складника не призводить до похибки вимірювання потужності.

Визначимо внесок у похибку ΔN_z , який уносить присутність у кривій струму k -ї гармоніки, а в кривій напруги $(k+2)$ -ї або $(k-2)$ -ї гармоніки. Із виразу (12) отримаємо:

$$\Delta N_{zk} = \frac{1}{2} U_{k+2} I_k \sin(\psi_{ik} - \psi_{u(k+2)} + \beta).$$

Для найбільш несприятливого поєднання фаз, за якого $\sin(\psi_{ik} - \psi_{u(k+2)} + \beta) = \pm 1$, максимальна абсолютна похибка вимірювання потужності

$$(\Delta N_{zk})_{\max} = \frac{1}{2} U_{k+2} I_k,$$

а максимальна відносна похибка вимірювання потужності

$$\frac{(\Delta N_{zk})_{\max}}{N} = \frac{U_{k+2} I_k}{U_1 I_1}. \quad (13)$$

Так, за $k \neq 1$

$$\frac{\Delta N_{zk}}{N} = k_{ik} k_{u(k+2)},$$

за $k = 1$

$$\frac{\Delta N_{z3}}{N} = k_{u3}, \quad (14)$$

Як видно з виразів (13) і (14), найбільший внесок у похибку вимірювання потужності

запропонованим кореляційним методом надає третя гармоніка в сигналах струму або напруги. У цьому разі відносні похибки вимірювання потужності кореляційним методом (згідно з виразом (14)) дорівнює парціальному коефіцієнту третьої гармоніки.

Якщо ж у сигналах напруги і струму відсутня третя гармоніка, то відповідна похибка квадратична за коефіцієнтом гармонік і, отже, за малих значень коефіцієнтів гармонік буде величиною другого порядку малості, якою можна знехтувати.

Висновки. У статті показано, що завдання визначення технічного стану двигунів засобів водного транспорту (особливо двигунів зі складу системи енергопостачання засобів водного транспорту) може бути розв'язане за рахунок використання методу вимірювання потужності. Обґрунтовано, що поява вищих гармонік у сигналах напруги (струму), яка свідчить про наявність несправностей у системі енергопостачання засобів водного транспорту, впливає на загальну потужність двигуна. У статті запропоновано метод оцінки впливу вищих гармонік у сигналах напруги і струму на точність кореляційного методу вимірювання потужності двигунів засобів водного транспорту. Також зроблено пропозиції щодо врахування вищих гармонік під час оцінки потужності двигунів (як параметра, який впливає на технічний стан) засобів водного транспорту.

Список літератури:

1. Дакі О.А., Трофіменко А.О., Штрибець В.В. Аналіз методів формування вимірювальних сигналів для контролю систем навігації. *Наукоємні технології*. 2019. № 1 (41). С. 88–94.
2. Штрибець В.В. Контроль технічного стану двигунів засобів водного транспорту методом спектрального аналізу випадкових сигналів. *Новітні технології*. 2019. Вип.1(8). С. 59–69.
3. Герасимов С., Шапран Ю., Стахова М. Measures of efficiency of dimensional control under technical state designation of radio-technical facilities. *Системи обробки інформації*. 2018. Вип. 1 (152). С. 148–154.
4. Герасимов С.В., Шапран Ю.Є., Кірвас В.В. Розробка та дослідження методу розрахунку достовірності вимірювального контролю параметрів радіотехнічних систем морського транспорту. *Системи озброєння та військова техніка*. 2017. № 4 (52). С. 5–10.
5. Герасимов С.В., Грідіна В.В. Методика обґрунтування номенклатури параметрів контролю радіотехнічних систем і призначення їх допустимих відхилень. *Системи обробки інформації*. 2018. Вип. 2 (153). С. 159–164.
6. Васильевич Ф.А. Двигатели внутреннего сгорания. Теория, эксплуатация, обслуживание. Новоросийск, МГА, 2009. 266 с.
7. Admiralty list of radio signals. Global maritime distress and safety system (GMDSS). Vol 5. NP 285, 2000. 338 p.
8. Griffiths B.E. Optimal control of jump-linear gaussian systems. *Int. J. of control*. Vol. 42, N. 4. 1985. P. 791–819.
9. Возницкий И.В. Современные судовые среднеоборотные двигатели. Санкт-Петербург : Моркнига, 2006. 140 с.
10. Захаров Г.В. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок. Москва : Транслит, 2009. 256 с.
11. Борисенко М.В. Development of optimum navigation information processing algorithm. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 3(32). С. 38–44.

12. Герасимов С.В., Яковлев М.Ю., Дакі О.А. Синтез полігармонійного вимірювального сигналу з будь-якою кількістю точок перемикання. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2018. № 79 (2). С. 73–76.
13. Соловьев И. Морская радиоэлектроника. Санкт-Петербург : Политехника, 2003. 185 с.
14. Алешин Б.С., Веремко К.К. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. Москва : Наука, 2006. 424 с.

**Daki O.A., Yakusevich Yu.H., Urum N.S., Trishin V.V. ASSESSMENT
OF THE INFLUENCE OF HIGH HARMONICS IN VOLTAGE AND CURRENT SIGNALS
ON THE ACCURACY OF THE CORRELATION METHOD
OF POWER MEASUREMENT ENGINES OF WATER VEHICLES**

It is shown that the reliability and efficiency of the power supply system of water transport depends on the technical serviceability of electric motors – motors that generate electric voltage (current) on the vessel. Failure of such engines will result in complete failure of communication, navigation, etc., which can cause accidents. It is substantiated that the power control is one of the methods of maintenance of electric engines in good condition. A method for estimating the influence of higher harmonics in voltage and current signals on the accuracy of the correlation method for measuring the power of water transport engines is proposed. The presence of higher harmonics in the voltage and current curves leads to a methodological error in power measurement. This is due to the fact that in the presence of higher harmonics, the moments of transitions through zero of the voltage and current curves do not coincide with the moments of transitions through zero of the first harmonics of the current and voltage curves, respectively. This time offset leads to an error in the measurement of power, which has the same nature as the methodological error in measuring the phase shift between non-sinusoidal signals. Also, the presence of higher harmonics in the voltage and current curves leads to the appearance of additional members in the decomposition function of the non-sinusoidal signal. According to the results of the study it is established that the largest contribution to the error of power measurement by the proposed correlation method is given by the third harmonic in the signals of current or voltage. In this case, the relative errors of power measurement by the correlation method are equal to the partial coefficient of the third harmonic. If there is no third harmonic in the voltage and current signals, then the corresponding error is quadratic by the harmonic coefficient and, therefore, at small values of the harmonic coefficients will be the value of the second order of smallness, which can be neglected.

Key words: means of water transport, engine, power, correlation method, voltage, current.