Судовые энергетические установки

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-10>
УДК 621.791.14:62-97

В.Н. Стаценко, В.В. Петросьянц, А.Е. Сухорада

СТАЦЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, e-mail: vladsta@mail.ru

СУХОРАДА АЛЕКСЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – аспирант, e-mail: alexeyman_09@mail.ru

Кафедра сварочного производства Инженерной школы

ПЕТРОСЬЯНЦ ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., профессор,

e-mail: petrosyantsvv@gmail.com

Кафедра электроники и средств связи Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

Фотоэлектрический торсиометр для измерения и контроля эффективности судовых энергетических установок

Аннотация: Представлен разработанный авторами статьи торсиометр, где для измерения угла закручивания использованы фотоэлектрические диоды, которые позволяют измерять время задержки между отраженными оптическими сигналами скручиваемого вала при подведении крутящего момента (или мощности). Для увеличения деформации (угла скручивания) вал выполняется не круглого сечения, а в виде пластины (плоский вал). В настоящей работе приведена авторская схема фотоэлектрического торсиометра, а также результаты расчета зависимостей: времени задержки – от скорости вращения и угла закручивания вала; передаваемой мощности – от угла закручивания и скорости вращения вала. Представленные результаты показывают относительно небольшой разброс полученных измерений, особенно в области больших значений углов закручивания. Эксперименты, проведенные нами на модели представленного фотоэлектрического торсиометра, подтвердили возможность использования этого метода измерения мощности и показали его преимущества. Разработанная схема торсиометра также позволяет определять скорость вращения вала по частоте пульсации отраженного оптического сигнала от одного из датчиков. Возможно применение данной схемы на судовых валопроводах большой длины и измерения крутящего момента и мощности судовых энергетических установок в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: фотоэлектрический торсиометр, зеркала, время задержки, оптические сигналы, плоский вал, угол закручивания.

Введение

Судовые энергетические установки имеют высокие показатели энергопотребления на пропульсивные (движение судна) и на общесудовые нужды. Мощность двигателя определяется по зависимости [2, 3]

$$N_e = Q_n \cdot G_T \cdot \eta_i \cdot \eta_m, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где Q_n – теплотворная способность топлива, кДж/кг; G_T – расход топлива, кг/с; η_i , η_m – индикаторный и механический КПД двигателя.

В процессе эксплуатации двигателя происходит изменение его технического состояния (износ втулок, поршневых колец, деталей топливной аппаратуры – насоса высокого давления, форсунок и др.), возможны ненадлежащая настройка двигателя, нарушение правил эксплуатации, при этом снижается эффективность, т.е. индикаторный КПД двигателя. В этом случае необходимая мощность двигателя обеспечивается перерасходом топлива, что было отмечено в [1, 8]. Так, для судового двигателя фирмы МАК с эффективной мощностью 4 МВт при снижении КПД на 1% перерасход топлива может составлять до 20 кг/ч=480 кг/сут. Соответственно увеличиваются выбросы в атмосферу углеводородов C_nH_m , окислов углерода CO , альдегидов, сажистых частиц и т.п.

Цель настоящей статьи – представить разработку устройства для регулярного измерения и контроля эффективной мощности двигателя в процессе эксплуатации.

Описание технического решения

Измерение эффективной мощности N_e (Вт) связано с определенными сложностями, обычно ее определяют по крутящему моменту $M_{кр}$ (Н·м) и угловой скорости вращения вала ω (рад/с) [11]:

$$N_e = M_{кр} \cdot \omega. \quad (2)$$

Частота вращения вала ω легко измеряется с помощью тахометра, а для измерения крутящего момента $M_{кр}$ используются существующие методики, основанные на измерении угла скручивания вала при приложении к нему мощности.

Крутящий момент определяется по зависимости [3, 11]:

$$M_{кр} = \pi d^4 E \theta / 32 l, \quad (3)$$

где θ – угол закручивания, рад; l – расстояние на валу в пределах скручивания, м; d – диаметр вала, м; E – модуль упругости материала, Па.

В настоящее время разработаны устройства для измерения угла скручивания – торсиометры. Их работа основана на использовании стробоскопического эффекта, емкостного и тензометрического преобразователей угла закручивания [11], а также на применении схем фазочувствительного и магнитоупругого измерителей крутящего момента [4, 10]. Недостатком известных фотоэлектрических торсиометров [5, 7], применяемых для определения крутящего момента вала, является чувствительность прибора к изменению интенсивности излучения источника света вследствие изменения напряжения источника питания, а также влияние на результаты измерения светового потока теней, полутеней и засвета, которые изменяются при увеличении скорости вращения вала [2]. Но эти методики сложны, ненадежны и практически не применяются на практике.

В настоящей работе для измерения угла закручивания вала предлагается использовать авторский фотоэлектрический метод с измерением не интенсивности освещения, а времени задержки между отраженными от зеркал оптических сигналов, которые закреплены на концах рабочего вала, скручиваемого при подведении крутящего момента (или мощности) [9, 12–14].

Для увеличения деформации (угла закручивания) вал выполняется не круглого сечения, а в виде пластины (плоский вал). На концах вала на расстоянии l закреплены зеркала, напротив них, на корпусе, закрепляются два датчика, каждый из которых состоит из излучающего оптического элемента (например, светодиода) и фотоэлектрического приемника (например, фоторезистора). Оптические излучатели и датчики крепятся в корпусе на одной линии с осью вала. При подведении крутящего момента к валу происходит его закручивание, угол закручивания вала θ определяется по формуле

$$\theta = (\tau_2 - \tau_1) / T * 360^\circ, \quad (4)$$

где τ_1 и τ_2 – время фиксации сигналов от фотоприемников первого и второго датчиков, с; T – время полного оборота вала вокруг своей оси, с.

Для плоского вала крутящий момент определяется по зависимости

$$M_{кр} = GI_x \theta / l, \quad (5)$$

где G – модуль сдвига, Па; $I_x = bh^3/12$ – полярный момент инерции сечения, m^4 ; b, h – размеры сечения, м.

Предлагаемый нами торсиометр содержит плоский вал 1 с втулками 2 для закрепления концов рабочей пластины во входном 3 и выходном 4 валах, которые с помощью подшипников 5 устанавливаются в корпусе 6. Корпус закрыт с торцов заглушками 7. На корпусе размещены источники оптического излучения – светодиоды 8, от которых оптический сигнал направляется на зеркала 9 и 10, отраженный от них сигнал попадает на фотоэлементы 11 (датчик 1) и 12 (датчик 2) (схему общего вида торсиометра см. на рис. 1).

**Рис. 1. Схема фотоэлектрического торсиометра: 1 – плоский вал; 2 – втулки; 3 – входной вал; 4 – выходной вал; 5 – подшипник; 6 – корпус; 7 – заглушка; 8 – светодиоды; 9, 10 – зеркала; 11 – фотоэлемент (датчик 1); 12 – фотоэлемент (датчик 2).
Здесь и далее рисунки авторов.**

Методика измерения параметров и обработки результатов

При подведении к вращающемуся выходному валу 3 крутящего момента $M_{кр}$ происходит пропорциональное закручивание плоского вала 1 на величину угла закручивания θ . При направлении светового пучка от светодиодов 8 на зеркала 9 и 10 отраженные лучи попадают на фотоэлементы 11 и 12. В связи с закручиванием плоского вала 1 отраженный от зеркала 10 луч попадает на фотоэлемент 12 с запозданием по времени (времени задержки), которое зависит от угла закручивания θ , угловой скорости вращения вала ω и его длины l . Результаты расчета зависимости этого времени задержки для вала длиной 250 мм представлены на рис. 2.

Электронная схема торсиометра также позволяет определять скорость вращения вала по измерению частоты пульсации отраженного оптического сигнала от одного из датчиков. Результаты расчета этой зависимости представлены на рис. 3.

Результаты расчета мощности, передаваемой через предлагаемый фотоэлектрический торсиометр, с размерами сечения плоского вала 5×20 мм и его длиной 0,25 м из стали рессорно-пружинной 50ХФА, в зависимости от времени задержки и скорости вращения вала представлены на рис. 4.

Рис. 2. Зависимость времени задержки от угловой скорости вращения и угла закручивания вала ($l = 0,25$ м): 1 – $\theta = 1^\circ$; 2 – 2° ; 3 – 3° ; 4 – $\theta = 4^\circ$.

Рис. 3. Зависимость угловой скорости вращения вала от частоты пульсации отраженного оптического сигнала.

Рис. 4. Зависимость мощности от угла закручивания и угловой скорости вращения вала ($l = 0,25$ м): 1 – $\omega = 41,8$ с⁻¹; 2 – $62,8$ с⁻¹; 3 – $83,7$ с⁻¹; 4 – $104,6$ с⁻¹.

Результаты эксперимента

При проведении экспериментов измерялись углы закручивания вала при разных скоростях его вращения с помощью фотоэлектрических датчиков.

Для проверки работоспособности предлагаемой схемы торсиометра был создан экспериментальный стенд (рис. 5). Основным элементом этого стенда является плоский вал, имеющий два зеркала на концах и разъем в центральной части. Вал торсиометра вращается через гибкий вал от ручной дрели в вертикальных стойках, в верхней их части установлена горизонтальная пластина, в двух отверстиях которой в плоскости вращения зеркал помещены два датчика, каждый состоит из светодиода типа LED (АЛ-106А) и фотоэлемента (фотодиод типа ФД-265А). Сигналы от этих датчиков (фотодиодов) поступают в измерительный модуль, собранный на базе микроконтроллера типа ATMEGA. Хотя у этого микроконтроллера тактовая частота сравнительно низкая (16 МГц), она, тем не менее, позволяет работать внутреннему таймеру с шагом 1 мкс.

Рассчитанные в микроконтроллере значения угла скручивания вала и угловая скорость его вращения по последовательному интерфейсу передаются на монитор персонального компьютера.

Предварительная установка угла закручивания задавалась с помощью устройства разъема в центре вала. Установка этого угла производилась с помощью насаживаемых на вал двух штанг длиной 250 мм и измерения расстояния между их концами, после этого разъем закреплялся винтовым зажимом.

Рис. 5. Внешний вид экспериментального торсионметра.

Результаты измерений угла закручивания вала с помощью фотоэлектрических датчиков представлены на рис. 6. Эти данные показывают относительно небольшой разброс полученных измерений, особенно в области больших значений углов закручивания.

Достоинством данного метода является высокая точность измерения угла закручивания, так как электронный сигнал представлен не в аналоговом, а в цифровом виде. Это определяется только точностью засечки времени оптического сигнала фотоэлементом.

Относительную погрешность засечки времени можно оценить по зависимости

$$\delta = 1/N * 100\%, \quad (6)$$

где N – количество импульсов, прошедших за время запаздывания сигнала $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ от второго датчика относительно первого.

Так, при времени дискретизации $\Delta\tau_d = 10$ мкс и частоте вращения вала $\omega = 10$ Гц = 62,8 рад/с и, соответственно, времени оборота вала $\tau_o = 0,1$ с количество импульсов составит:

$$N_0 = \tau_o / \Delta\tau_d = 0,1 / 10^{-5} = 10^4. \quad (7)$$

Рис. 6. Результаты измерений угла закручивания вала.

За минимальное время запаздывания сигнала от второго датчика относительно первого $\Delta\tau_3 = 0,2$ мс (рис. 4) количество импульсов:

$$N_1 = \Delta\tau_3 / \Delta\tau_d = 0,2 * 10^{-3} / 10^{-5} = 20. \quad (8)$$

Тогда погрешность измерения скорости вращения:

$$\tilde{\delta}_0 = 1/10^4 * 100\% = 0,01\%, \quad (9)$$

а максимальная погрешность измерения времени запаздывания сигнала

$$\tilde{\delta}_{31} = 1/20 * 100\% = 5\%. \quad (10)$$

При максимальном времени запаздывания сигнала $\Delta\tau_3=1,2$ мс (рис. 4) количество импульсов

$$N_2 = \Delta\tau_3 / \Delta\tau_d = 1,2 * 10^{-3} / 10^{-5} = 120, \quad (11)$$

и минимальная погрешность этого измерения составит

$$\tilde{\delta}_{32} = 1/120 * 100\% = 0,85\%. \quad (12)$$

Точность измерения можно повысить за счет уменьшения времени дискретизации сигнала $\Delta\tau_d$.

Заключение

Таким образом, представленная схема торсиометра обладает рядом преимуществ:

- высокая точность измерения угла закручивания: при максимальном запаздывании сигнала погрешность составляет 0,85%;
- электронная схема торсиометра позволяет определять частоту вращения вала;
- простота исполнения и надежность конструкции;
- возможность компактного исполнения: варьируя размеры профиля вала, можно увеличивать или уменьшать угол закручивания, что сказывается на размерах самого устройства;
- возможно применение данной схемы на судовых валопроводах большой длины и измерения крутящего момента и мощности судовых энергетических установок в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варбанец Р.А., Кучеренко Ю.Н., Кырнац В.И., Жолтиков Е.И. Технологические карты научных исследований в задачах мониторинга и параметрической диагностики судовых дизелей // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Сер. Морская техника и технология. 2016. № 1. С. 47–59.
2. Воронцов А.В. Аналитический обзор датчиков крутящего момента // Казанская наука. 2011. № 2. С. 30–31.
3. Гапонов В.Л., Гуринов А.С., Дудник В.В. Измерение крутящего момента на вращающихся валах // Вестник Донского гос. техн. ун-та. 2012. № 1. С. 25–32.
4. Гармаш С.А. Влияние эксплуатационных факторов на мощность и экономичность паротурбинной установки морского газовоза: автореф. ... дис. канд. техн. наук / МГУ им. адм. Г.И. Невельского. Владивосток, 2012. 23 с.
5. Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Степаненко Т.И. Установка для стендовых испытаний автомобильных ДВС на неустановившихся режимах работы // Вісник СевНТУ. 2014. № 152. С. 119–122.
6. Кирюха В.В., Горбенко Ю.М., Яблокова В.С. Методы контроля и измерения скручивания вала // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана: материалы междунар. науч.-техн. конф. Владивосток, 2018. С. 256–258.
7. Корганова О.Г., Кузнецова В.А. Метод измерения вязкости по скорости вращения электродвигателя // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2015. № 1(45). С. 198–201.
8. Маслов И.З. Диагностирование судовых технических средств и пути совершенствования методов диагностирования // Worldscience. 2018(1);2:41–54.

9. Милосердов Е.Г., Клейманов Р.В., Коршунов А.В., Киселев И.Н., Ситкин П.К. Создание измерителя мощности для малоразмерного центробежного компрессора // Неделя науки СПбПУ: материалы науч. конф. СПб., 2016. С. 184–186.
10. Росляков А.Д., Бурлий В.В., Бит-Зая А.В. Применение устройств измерения крутящего момента при бурении нефтяных и газовых скважин // Расходометрия. Мир измерений. 2007. № 5. С. 9–13.
11. Шарапов В.М., Полищук Е.С., Кошевой Н.Д., Ишанин Г.Г., Минаев И.Г., Совлуков А.С. Мир электроники. Датчики. М.: Техносфера, 2012. 624 с.
12. Konovalov M.D., Rikhter V.A., Tarapin V.N. A photoelectric instrument for measuring torques. *Measurement Techniques*. 1959(2);2:113–114.
13. Sakalinis S., Udris D. Improvement of Precise Angle Control System. *Solid State Phenomena*. 2010(164):91–94.
14. Samuel C. The photoelectric measurement of rotation angles – The autocollimator and the torsionmeter. *Revue Francaise de Mecanique*, 2nd Quarter. 1979, p. 5–7.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2019. N 2/39

Ship Power Plants

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-10>

Statsenko V., Petrosyants V., Sukhorada A.

VLADIMIR STATSENKO, Doctor of Engineering Science, Professor,

e-mail: vladsta@mail.ru

ALEXEY SUKHORADA, Postgraduate, e-mail: alexeyman_09@mail.ru

Department of Welding, School of Engineering

VICTOR PETROSYANTS, Candidate of Engineering Science, Professor, Department

of Electronics and Communications, School of Engineering,

e-mail: petrosyantsvv@gmail.com

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Photoelectric torsionmeter for measuring and monitoring the efficiency of the ship power plants

Abstract: The authors designed and presented a torsionmeter circuit, in which they proposed to use the photoelectric method to measure the shaft twist angle, measuring the delay time between optical signals reflected from mirrors that are attached to the ends of the working shaft twisted when torque (or power) is applied. To increase the deformation (torsion angle), the shaft is made not of circular cross section, but in the form of a plate (flat shaft). This paper presents a photoelectric torsionmeter circuit, the calculated dependences of the delay time on the rotation speed and the shaft twist angle, the transmitted power from the twist angle and the shaft rotation speed. The purpose of the experimental studies was to measure the angle of twist of the shaft at different speeds of its rotation using photoelectric sensors. The results of measurements of the shaft twist angle by using photoelectric sensors presented in the article show a relatively small scatter of the measurements obtained, especially in the area of large values of the twist angles. Experiments conducted on the model of the presented photoelectric torsion meter confirmed the possibility of using this method of power measurement. The presented torsionmeter circuit also allows determining the speed of rotation of the shaft by measuring the pulsation frequency of the reflected optical signal from one of the sensors. It is possible to use this scheme on ship shafting of long length and to measure the torque and power of ship power plants during operation.

Keywords: photoelectric torsionmeter, mirrors, delay time, optical signals, flat shaft, shaft twist angle.

REFERENCES

1. Varbanets R.A., Kucherenko Yu.N., Kyrnats V.I., Zholtikov E.I. Technological maps of scientific research in the tasks of monitoring and parametric diagnostics of ship diesel engines. *Bulletin of Astrakhan State Technical Univ. Series Marine Technology and Technology*. 2016;1:47–59.
2. Vorontsov A.V. Analytical review of torque sensors. *Kazan science*. 2011;2:30–31.
3. Gaponov V.L., Gurinov A.S., Dudnik V.V. Measurement of torque on rotating shafts. *Bulletin of the Don State.Tech. Univ*. 2012;1:25–32.
4. Garmash S.A. Influence of operational factors on the power and efficiency of a steam turbine installation of a marine gas carrier. Abstract of diss. ...Candidate of Technical Sciences. Vladivostok, 2012, 23 p.
5. Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Stepanenko T.I. Installation for bench tests of automotive ICE on unsteady operation modes. *Visnik SevNTU*. 2014;152:119–122.
6. Kiryukha V.V., Gorbenko Yu.M., Yablokova V.S. Methods of control and measurement of shaft twisting. Actual problems of the development of the biological resources of the oceans. Proc. of Intern. scientific and technical conf. Vladivostok, 2018, p. 256–258.
7. Korganova O.G., Kuznetsova V.A. Method of measuring the viscosity of the rotational speed of the electric motor. *Bulletin of the Samara State Technical Univ. Series Engineering*. 2015;1:198–201.
8. Maslov I.Z. Diagnostics of ship technical equipment and ways to improve diagnostic methods. *World science*. 2018(1);2:41–54.
9. Miloserdov E.G., Kleimanov R.V., Korshunov A.V., Kiselev I.N., Sitkin P.K. Creating a power meter for a small-sized centrifugal compressor. *Science Week SPbPU. Proceedings of the scientific conf*. 2016, p. 184–186.
10. Roslyakov A.D., Burliy V.V., Bit-Zaya A.V. The use of torque measurement devices for drilling oil and gas wells. *Flow Measurement. The World of Measurement*. 2007;5:9–13.
11. Sharapov V.M., Polishchuk E.S., Koshevoi N.D., Ishanin G.G., Minaev I.G., Sovlukov A.S. The world of electronics. *Sensors. M., Technosphere*, 2012. 624 p.
12. Konovalov M.D., Rikhter V.A., Tarapin V.N. A photoelectric instrument for measuring torques. *Measurement Techniques*. 1959(2);2:113–114.
13. Sakalini S., Udriş D. Improvement of Precise Angle Control System. *Solid State Phenomena*. 2010(164):91–94.
14. Samuel C. The photoelectric measurement of rotation angles – The autocollimator and the torsionmeter. *Revue Francaise de Mecanique*, 2nd Quarter. 1979, p. 5–7.