

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОВОЛОКОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ВАЛА

А. С. Бордюг

*Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Российская Федерация*

Контроль крутящего момента применяют в различных отраслях промышленности с множеством конструктивных особенностей. Задачи определения усилий крутящего момента на валу и мощности в судовой энергетике решают посредством использования прибороторсиометров с датчиками крутящего момента. Наибольшее применение получили датчики крутящего момента емкостного, индукционного, тензометрического и фотоэлектрического типа. Отмечено, что в связи с восприимчивостью систем к электромагнитным помехам, отсутствием высокой степени защиты электрооборудования и необходимой повторной калибровки в промежутках времени в процессе контроля крутящего момента существуют ограничения. В системах измерения крутящего момента в нефтегазовой и аэрокосмической отраслях получили применение оптоволоконные системы. Применение такого рода систем на судах является более дорогостоящим по сравнению с используемыми в настоящее время технологиями, например на основе тензодатчиков. Предлагается применение недорогой оптической измерительной системы, основанной на методе Паунда – Древер – Холла, с использованием фольгированного тензодатчика и алюминиевого торсионного стержня. Проиллюстрирована система контроля крутящего момента, представлены фазовые графики для резонатора Фабри – Перо и график спектра пропускания резонатора, приведена величина коэффициента отражения. Рассматривается способ измерения фазы отраженного луча от резонатора Фабри – Перо, смодулирован инжекционный ток лазера посредством генератора электрических колебаний для генерации боковых полос в электрическом поле лазерного луча. Проведенные исследования и вычисления способствуют повышению надежности береговой энергетической системы; доказана возможность применения их в морских электрических системах.

Ключевые слова: измерения, крутящий момент, электрические системы, частота лазера, метод Паунда – Древер – Холла, оптоволокно.

Для цитирования: Бордюг А. С. Применение оптоволоконной оптической системы для контроля крутящего момента вала // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-101-106.

Введение

Для применения оптической системы на судах необходимо выполнить следующие требования: низкая стоимость, высокая точность (обнаружение небольшого сдвига длины волны) и широкий диапазон измерения. При обзоре литературы [1–4] были выявлены исследования, проводимые для контроля деформации с помощью метода лазерной синхронизации Паунда – Древер – Холла (метода улучшения стабильности длины волны лазера с течением времени). Используя этот метод, можно разработать высокоточную измерительную систему, применяющую оптоволоконный датчик в системах контроля крутящего момента.

Метод синхронизации Паунда – Древер – Холла при измерении крутящего момента

Для стабилизации частоты лазера при применении оптоволоконной системы контроля крутящего момента можно использовать метод синхронизации Паунда – Древер – Холла, который приводит в соответствие центральную частоту лазера с частотой внешнего высокоточного резонатора Фабри – Перо и фиксируется на краю внутри этого резонатора. Резонатор Фабри – Перо действует как фильтр, позволяя использовать только частоты света, которые являются целыми кратными свободному спектральному диапазону (ССД) полости, определяемый по формуле

$$\Delta\nu_{\text{ССД}} = \frac{c}{2L},$$

где c – скорость света в вакууме; L – длина полости.

Спектр пропускания на выходе резонатора Фабри – Перо представлен на рис. 1 с минимальной точностью для облегчения понимания.

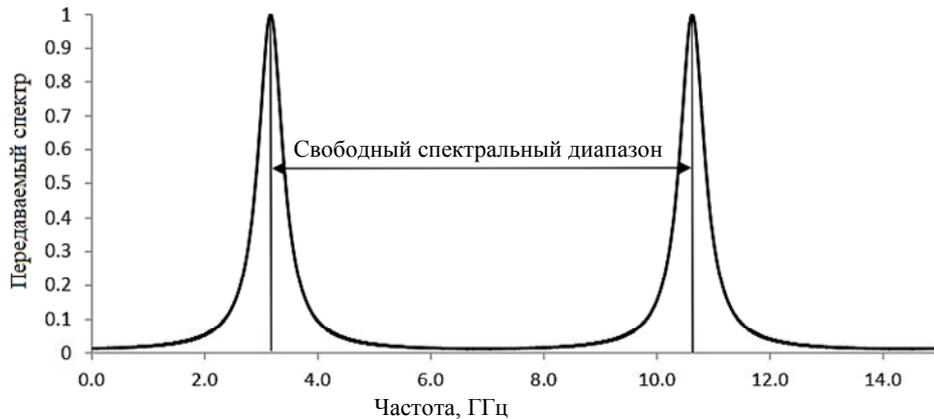


Рис. 1. Спектр пропускания резонатора Фабри – Перо

Поскольку спектральная ширина пиков пропускания уменьшается с увеличением четкости, пик этой полосы также становится уже. Поскольку пик полосы пропускает 100 % падающего света, интенсивность отраженного света достигает 0 % на этой частоте. Данный процесс ограничивает применение резонатора, т. к. отраженный сигнал симметричен относительно резонанса на пике, и если лазер сместится в сторону от резонанса, отраженный сигнал не укажет на необходимое изменение частоты лазера для возвращения его к резонансу.

Чтобы создать асимметричный сигнал в резонаторе, метод Паунда – Древер – Холла модулирует частоту лазера и определяет производную отраженной интенсивности. Пример типовой установки, использующей метод Паунда – Древер – Холла, в которой лазерный диод модулируется по току, представлен на рис. 2.

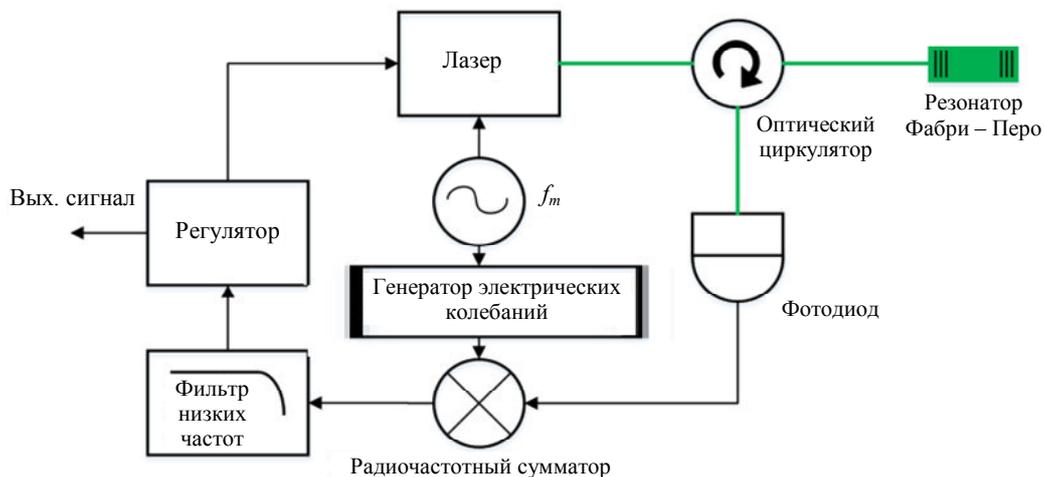


Рис. 2. Система контроля крутящего момента, основанная на методе Паунда – Древер – Холла

В схеме (рис. 2) генератор сигналов (f_m) непосредственно модулирует частоту лазера, а отраженный сигнал от резонатора Фабри – Перо контролируется высокочастотным скоростным фотодиодом. Сигнал генератора электрических колебаний и выходной сигнал фотодиода проходят через радиочастотный сумматор, который представляет собой пассивное устройство, выводящее произведение двух входных сигналов. Таким образом, выходной сигнал сумматора будет содержать компоненты переменного и постоянного тока, из которых нас интересует только сигнал постоянного тока, поскольку это производная отраженного сигнала. Чтобы изолиро-

вать составляющую постоянного тока, выходной сигнал сумматора проходит через фильтр нижних частот, а затем в регулятор, который активно отслеживает сигнал и выдает выходной сигнал на лазер, тем самым поддерживает фиксированный резонанс резонаторов.

Для идеального резонатора (т. е. без потерь) коэффициент отражения имеет выражение

$$F(\omega) = \frac{E_{\text{зад}}}{E_{\text{вх}}} = \frac{r \left(\exp \left(i \frac{\omega}{\Delta\nu_{\text{ССД}}} \right) - 1 \right)}{1 - r^2 \left(\exp \left(i \frac{\omega}{\Delta\nu_{\text{ССД}}} \right) \right)},$$

где $E_{\text{зад}}$ – электрическое поле отраженного луча; $E_{\text{вх}}$ – электрическое поле падающего луча; r – амплитудный коэффициент отражения каждого зеркала.

Отраженный луч состоит из двух компонентов: первый луч отражается от первого зеркала и никогда не входит в полость, а второй луч просачивается через зеркало, выходящее из полости.

Поскольку падающий луч лазера имеет частоту, совпадающую с частотой резонанса резонаторов, их интенсивности одинаковы. Если частота лазера точно совпадает с частотой свободного спектрального диапазона резонатора, два луча будут иметь одинаковую амплитуду, но будут сдвинуты по фазе на 180° друг к другу (рис. 3). Если частота лазера немного вышла за пределы свободного спектрального диапазона резонатора, но не так далеко, чтобы отраженная интенсивность составляла 100 %, фаза между двумя лучами не будет составлять 180° . Эта разница в фазе позволяет нам определить, на какой стороне резонанса находится частота лазера.

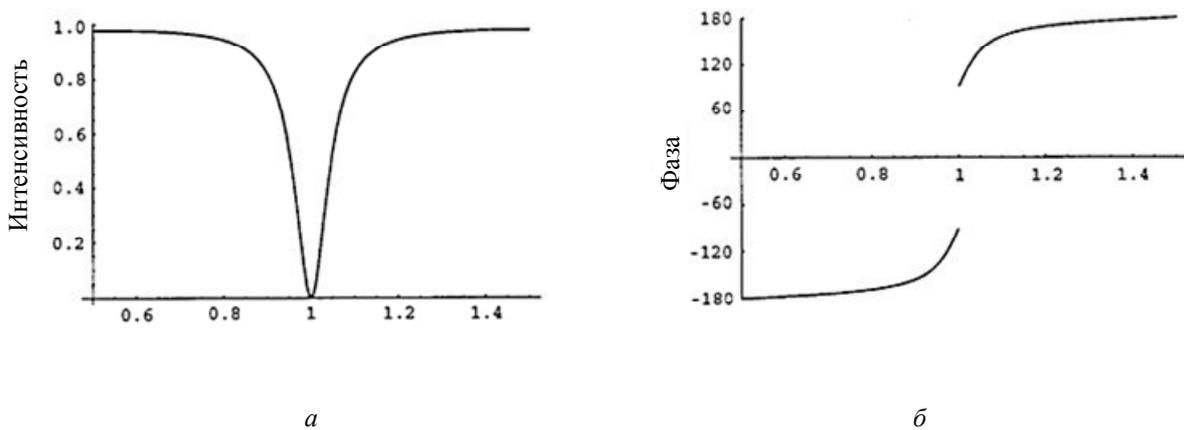


Рис. 3. Величина коэффициента отражения и фазовые графики для резонатора Фабри – Перо:
 а – интенсивность; б – фаза

Необходимо определить способ измерения фазы отраженного луча от резонатора Фабри – Перо, что невозможно выполнить прямым измерением. Вместо этого мы можем модулировать инжекционный ток лазера с помощью генератора электрических колебаний для генерации боковых полос в электрическом поле лазерного луча:

$$E_{\text{инж}} = E_0 e^{i(\omega t + \beta \sin \Omega t)},$$

где β – глубина модуляции; Ω – частота модуляции. Эта функция может быть расширена с помощью функций Бесселя:

$$E_{\text{инж}} = E_0 \left[J_0(\beta) e^{i\omega t} + J_1(\beta) e^{i(\omega + \Omega)t} - J_1(\beta) e^{i(\omega - \Omega)t} \right]. \quad (1)$$

Согласно уравнению (1) падающее поле состоит из несущей частоты ω и двух боковых полос – Ω . Мощность отраженного луча от резонатора измеряется высокоскоростным фотодиодом и отображается в уравнении

$$P_{\text{зад}} = |E_{\text{зад}}|^2 = |E_{\text{инж}} F(\omega)|^2,$$

откуда

$$P_{\text{зад}} = P_{\text{нес}} |F(\omega)|^2 + P_{\text{бок}} |F(\omega - \Omega)|^2 + 2\sqrt{P_{\text{нес}} P_{\text{бок}}} \times \\ \times \left\{ \begin{aligned} &\text{Re}(F(\omega)F(\omega + \Omega) - F(\omega)F(\omega - \Omega))\cos\Omega t + \\ &+ \text{Im}(F(\omega)F(\omega + \Omega) - F(\omega)F(\omega - \Omega))\sin\Omega t \end{aligned} \right\} + 2(2\Omega),$$

где $P_{\text{нес}}$ и $P_{\text{бок}}$ – мощность несущей и мощность боковых полос соответственно; Im – сигнал модуляции. Компонент уравнения, который содержит информацию о частоте лазера и, следовательно, является компонентом, который мы хотим измерить, это $F(\omega)F(\omega + \Omega) - F(\omega)F(\omega - \Omega)$. Данный компонент может быть извлечен путем произведения обнаруженного сигнала на начальную частоту модуляции, которая подавалась на лазер через генератор электрических сигналов. Произведение выполняется сумматором, который генерирует сигнал.

Необходимо убедиться в правильности фазы сигнала генератора электрических сигналов, чтобы произведение двух сигналов генерировало не зависящий от сумматора сигнал, который после прохождения фильтра нижних частот будет генерировать желаемый, не зависящий от времени сигнал ошибки:

$$I_{\text{ош}} = \sqrt{P_{\text{нес}} P_{\text{бок}}} \{ (F(\omega)F(\omega + \Omega) - F(\omega)F(\omega - \Omega)) \}.$$

Сигнал ошибки, математически описанный выше, проиллюстрирован на рис. 4.

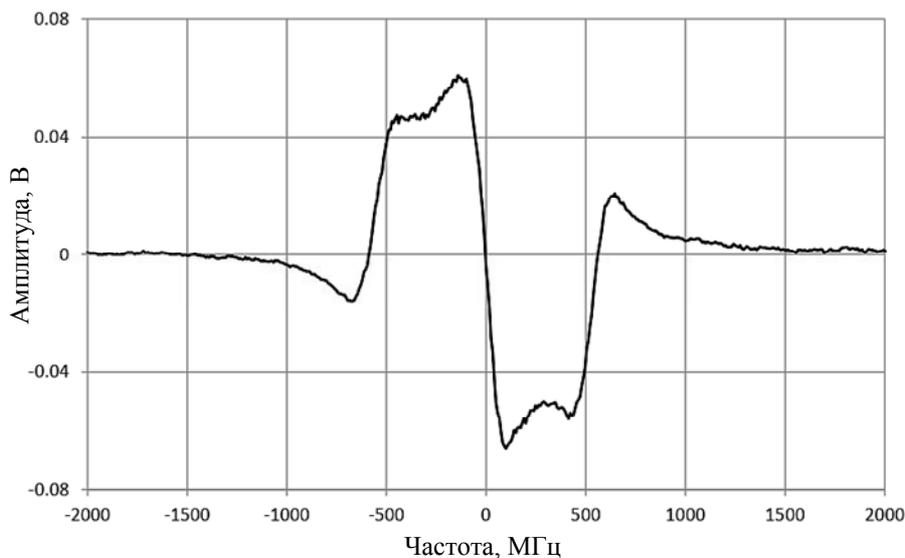


Рис. 4. Сигнал ошибки (частота модуляции – около 130 МГц)

Наклон сигнала ошибки определяет чувствительность системы, применяющей метод синхронизации Паунда – Древер – Холла, и для точного измерения небольших сдвигов длины волны желательно иметь этот наклон как можно более высоким. Добиться этого можно, оптимизировав несколько параметров. Во-первых, отражательная способность зеркал, составляющих резонатор Фабри – Перо: чем выше коэффициент отражения, тем уже спектральная ширина полосы резонатора. Во-вторых, увеличение расстояния между зеркалами, поскольку спектральная ширина полосы резонатора будет уменьшаться с увеличением длины резонатора. В-третьих, оптимизация отношения между мощностями несущей частоты и боковых полос, при этом оптимальное соотношение между несущей и одной боковой полосой составляет 1/2.

Заключение

В данной статье рассмотрена информационно-измерительная система контроля крутящего момента, применяющая метод синхронизации Паунда – Древер – Холла. Достоинством данной системы является снижение различных рисков, улучшение реакции системы на сбои в электрических системах. Все эти функции способствуют повышению надежности и безопасности судна. Надежность системы возможно улучшить за счет введения избыточности в виде дублирующих датчиков, дублирующих устройств опроса, опроса датчиков с обоих «концов» оптоволоконка. Предложенная технология в настоящее время ориентирована на береговые энергетические системы, однако ее применимость к морским электрическим системам обоснована.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доровской В. А., Черный С. Г., Бордюг А. С. Компараторная идентификация частотных характеристик систем автоматического управления судовой энергетической установки // Вестн. Поволж. гос. технолог. ун-та. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2020. № 1 (45). С. 47–57.
2. *Catastrophic failure of a capacitor and explosion in an 11 kV harmonic filter on board the passenger cruise vessel RMS Queen Mary 2*: Marine Accident Investigation Board Safety Bulletin 4/2010. Marine Accident Investigation Branch. 6 p.
3. Варжель С. В. Волоконные брэгговские решетки. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2015. 65 с.
4. Chernyi S. G., Bordug A. S., Kozachenko L. N., Erofeev P. A., Zhukov V. A. The reliability assessment of functioning of autonomous power system of drilling rigs // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020 (Moscow, Saint-Petersburg, January 27–30, 2020). Saint-Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 259–263.

Статья поступила в редакцию 25.02.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Александр Сергеевич Бордюг – канд. техн. наук; доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; Россия, 298309, Керчь; alexander.bordug@mail.ru.



APPLYING FIBER-OPTIC SYSTEM TO CONTROL SHAFT TORQUE

A. S. Bordug

*Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, Russian Federation*

Abstract. The article considers the procedure of torque control, which is very popular in a wide variety of industries with many design features. In marine power engineering the problems of determining the forces, torque on the shaft and power are solved by means of torsimeters with torque sensors. The most widely used torque sensors are of capacitive, induction, strain gauge and photoelectric types. It has been stated that there are limitations in the process of torque control due to the susceptibility of systems to the electromagnetic interference, lack of a high degree of protection for electrical equipment and necessary recalibration. Fiber optic systems have found application in torque measurement systems in the oil and gas and aerospace industries. The use of such systems on ships is more expensive in comparison with the technologies used today, for example, the systems based on strain gauges. It has been proposed to use an inexpensive optical measuring system based on the Pound-Drever-Hall technique with using a foil-clad strain gauge and an aluminum tor-

sion rod. There has been illustrated the system of torque control, the phase graphs for the Fabry-Perot resonator and the graph of the resonator transmission spectrum are presented, the reflection coefficient value is given. A method for measuring the phase of a reflected beam from a Fabry-Perot resonator is being considered, the injection current of a laser is modulated by means of an electric oscillator to generate side stripes in the electric field of a laser beam. The carried out studies and calculations contribute to improving the reliability of the coastal power system; the possibility of their use in marine electrical systems has been proved.

Key words: measurements, torque, electrical systems, laser frequency, Pound-Drever-Hall technique, optic fiber.

For citation: Bordyug A. S. Applying fiber-optic system to control shaft torque. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;3: 101-106. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-101-106.

REFERENCES

1. Dorovskoi V. A., Chernyi S. G., Bordiug A. S. Komparatornaia identifikatsiia chastotnykh kharakteristik sistem avtomaticheskogo upravleniia sudovoi energeticheskoi ustanovki [Comparative identification of frequency characteristics of automatic control systems of ship's power plant]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2020, no. 1 (45), pp. 47-57.
2. *Catastrophic failure of a capacitor and explosion in an 11 kV harmonic filter on board the passenger cruise vessel RMS Queen Mary 2: Marine Accident Investigation Board Safety Bulletin 4/2010*. Marine Accident Investigation Branch. 6 p.
3. Varzhel' S. V. *Volokonnye breggovskie reshetki* [Fiber Bragg gratings]. Saint-Petersburg, Izd-vo Un-ta ITMO, 2015. 65 p.
4. Chernyi S. G., Bordug A. S., Kozachenko L. N., Erofeev P. A., Zhukov V. A. The reliability assessment of functioning of autonomous power system of drilling rigs. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020 (Moscow, Saint-Petersburg, January 27–30, 2020)*. Saint-Petersburg, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. Pp. 259-263.

The article submitted to the editors 25.02.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexander S. Bordyug – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Ship Power Supply and Automation; Kerch State Maritime Technological University; Russia, 298309, Kerch; alexander.bordyug@mail.ru.

