

УДК 531.789.1

EDN GDUSNM

Е.С. Шишов, С.Н. Зеленов
ОБЗОР ТИПОВ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА
В СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлен обзор зарубежных устройств для измерения крутящего момента в судовых пропульсивных комплексах. Кратко описаны: работа тензометрических датчиков, магнитоупругие датчики, временные и фазовые способы измерения.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, измерение крутящего момента, тензометрические датчики, сдвиг фаз, бесконтактное измерение, магнитоупругий эффект.

Введение

Эксплуатация судовой энергетической установки (СЭУ) требует ведения постоянного наблюдения за текущей нагрузкой на движитель и главный двигатель. Устройством, способным предоставлять такую информацию, является динамометр или датчик крутящего момента. Его основная функция – непрерывное измерение и сигнализация о превышении крутящего момента допустимых значений. На сегодняшний день в СЭУ в основном применяются тензометрические датчики, струнные динамометры, устройства, измеряющие фазовое смещение, а также магнитоупругие датчики.

Совершенствование и усложнение пропульсивных комплексов требует и создания более совершенной измерительной аппаратуры. Определение эффективной мощности двигателя связано с измерением крутящего момента на его валу; в свою очередь, повышение точности измерения крутящего момента позволяет более точно определять КПД комплексов, улучшает качество эксперимента и тем самым позволяет выявлять влияние малозаметных факторов на технико-экономические показатели СЭУ [1].

Устройства измерения крутящего момента – трансмиссионные динамометры (рис. 1), измеряющие момент по величине касательного усилия, они обладают невысокой точностью и вытесняются более прогрессивными методами измерения крутящего момента [1].

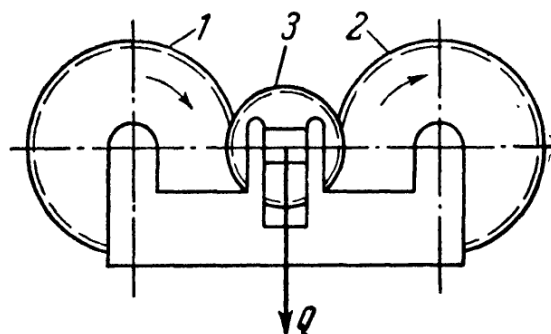


Рис. 1. Трансмиссионный динамометр Гашетта: [1]
1, 2 – рабочие колеса; 3 – подвижная шестерня

Балансирные динамометры включают в себя различные механические и гидравлические тормоза, приводные электрические двигатели – это все измерительные устройства, пре-

образующие механическую энергию в тепловую или электрическую, и наоборот. Вследствие этого возникают потери энергии, зависящие от многих факторов, что негативно сказывается на точности измерения. Установка таких динамометров на валах требует разработки конструктивных решений по минимизации вибраций и колебаний измерительного комплекса. Из-за всех этих факторов конструкция таких устройств оказывается достаточно сложной и дорогостоящей. Использование данных устройств оправдано лишь при экспериментальных исследованиях двигательных установок, и они неприменимы при непосредственной эксплуатации приводных машин во время их работы [1].

Тензометрический метод измерения крутящего момента

Тензометрический метод широко известен и часто применяется для измерения крутящего момента. Активная часть тензометрических датчиков обычно составляет около 2...10 мм. Они имеют эластичную изоляционную основу, на которую нанесена металлическая фольга. Датчик крепится к валу с помощью клея. Применяется мостовая схема с четырьмя тензометрическими датчиками, которые устанавливаются на вал под углом 45° к оси. Когда вал скручивается (на очень небольшую величину), это приводит к растяжению материала вала в направлении под углом 45° к оси вала, а в противоположном направлении происходит сжатие материала. Соответственно, расположенные тензорезисторы меняют свое сопротивление в зависимости от растяжения или сжатия материала вала. Из недостатков такого расположения тензорезисторов можно отметить, что на их сопротивление также влияют изгибные деформации вала [1-3].

Binsfeld Engineering, известная компания по разработке систем измерения крутящего момента и мощности, предлагает целый ряд систем на основе тензометрических датчиков. На рис. 2 представлена простейшая система измерения крутящего момента с использованием тензометрического датчика. Такая система может применяться во время ходовых испытаний судов в силу малой автономности работы (до 24 час) и испытаний, где не требуется повышенная точность измерений из-за относительно малого разрешения аналого-цифрового преобразователя (14 бит) в сравнении с другими системами (24 бит).

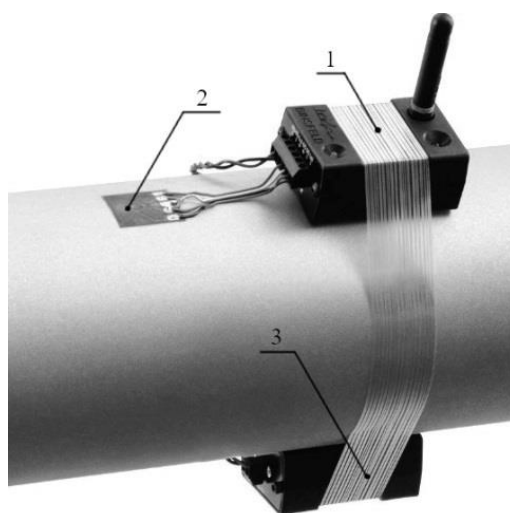


Рис. 2. Измерительная система *TorqueTrak 10K* компании *Binsfeld Engineering*[4]:

1 – корпус для микроконтроллера с АЦП и модуля радиопередачи;
2 – тензометрический датчик; 3 – источник питания-противовес

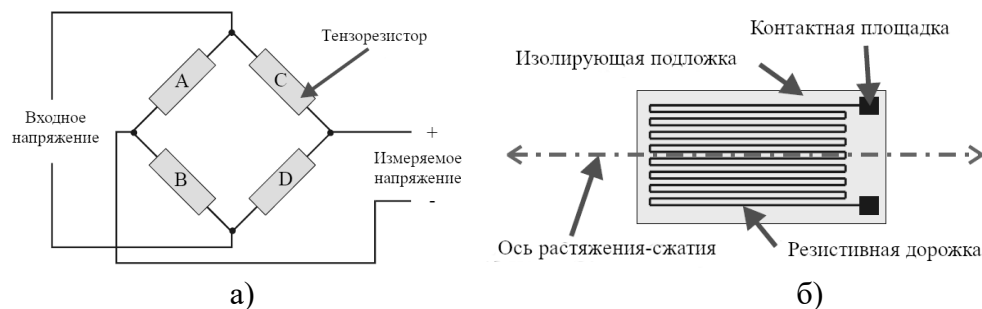


Рис. 3. Устройство тензометрического датчика [3]:
 а – схема моста Уитстона; б – схема тензорезистора

На рис. 3 представлено, как четыре тензорезистора соединены в мост Уитстона, благодаря которому возможно измерение малого изменения падения напряжения на резисторах, пропорциональное изменению сопротивления между противоположными элементами вследствие их растяжения или сжатия [3].

Измеряемое напряжение масштабируется при помощи операционного усилителя для согласования с диапазоном измеряемых напряжений аналого-цифрового преобразователя (АЦП), затем оцифровывается при помощи высоко разрядного АЦП. Далее через шину данных (наиболее распространены последовательные шины SPI и I²C) оцифрованный сигнал передается в микроконтроллер. Микроконтроллер, в свою очередь, обрабатывает показания и передает измеренное значение крутящего момента с вращающегося вала через систему передачи данных, которая может быть выполнена в виде токосъемных колец со скользящими контактами, радио протокола, индуктивной или оптической передачи. После получения сигнала с вращающегося вала значение крутящего момента передается через распространенные сетевые интерфейсы и протоколы *RS-485*, *RS-232*, *Modbus*, *Ethernet* для других микроконтроллеров, компьютеров операторов, систем мониторинга и т.д. [5, 6].

На рис. 4 изображена тензометрическая система измерения крутящего момента на судовых пропульсивных установках *TorqueTrak SPM-iON*, представляющая собой модульную конструкцию, состоящую из «модульных звеньев», охватывающих вал. Минимальный диаметр вала для измерения составляет 127 мм, для больших диаметров включаются дополнительные звенья. Заявленная продолжительность работы встроенных источников питания до 2 лет. Максимальная частота вращения вала до 3000 об/мин [4].



Рис. 4. Измерительная система *TorqueTrak SPM-iON* компании *Binsfeld Engineering* [4]:
 а – внешний вид системы; б – установленная на вал система

На рис. 5 изображена автономная система без использования автономных источников питания и радиопередатчиков. Передача напряжения и питание тензодатчика происходит

при помощи электромагнитной индукции. Диаметр вала от 19 до 1220 мм, максимальная частота вращения до 6900 об/мин [4].

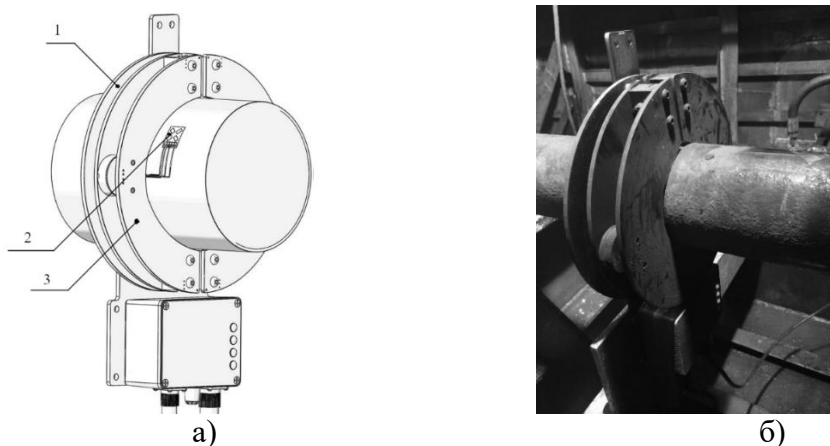


Рис. 5. Измерительная система *TorqueTrak TPM2* компании *Binsfeld Engineering* [4]:

- а – внешний вид системы; б – установленная на вал система;
1 – стационарное приемное кольцо; 2 – тензометрический датчик;
3 – вращающееся кольцо с катушками индуктивности*

Основным недостатком систем с тензометрическими датчиками является сложность передачи данных с вращающегося вала, применение скользящих контактов – простая и относительно габаритная конструкция, которой свойственен износ контактов. Применение радиосвязи или оптической передачи требует расположения отдельного источника питания на валу, что создает смещения центра тяжести относительно оси, вызывающие лишние вибрации, которые особенно заметны на валах, работающих при высокой частоте вращения. Передача сигнала и питающего напряжения через электромагнитную индукцию (рис. 4) наиболее перспективно, но дополнительно усложняет конструкцию и увеличивает стоимость и габариты измерительной системы.

В связи с этим, применение тензометрических датчиков ограничено невысокой частотой вращения контролируемого вала из-за крепления тензорезистивной «наклейки» и расположенной на самом валу измерительно-вычислительной электроники. Для систем, передающих значение крутящего момента при помощи скользящих контактов, характерно изнашивание контактов и, как следствие, ограниченный срок службы.

Временные и фазовые методы измерения крутящего момента

Установки, измеряющие крутящий момент временным методом, состоят из упругого элемента, на концах которого расположены измерительные диски с метками, равномерно распределенными по периферии дисков. Рядом с дисками расположены неподвижные индуктивные, емкостные, фотоэлектрические или другие бесконтактные датчики. При вращении дисков происходит считывание меток датчиками и в последствии появляются электрические сигналы, которые обрабатываются аналогичным способом что и описанным для тензометрических датчиков, исключая применения токосъемников и устройств передачи информации. Крутящий момент определяется при помощи косвенного измерения временного соотношения между последовательностью сигналов одного датчика относительно сигналов второго от угла закручивания упругого элемента и частоты вращения, т.е. по величине задержки и известной частоте вращения вала определяется угол закручивания и, следовательно, величина крутящего момента [1].

Фазовый метод, схожий с временным, отличается тем, что измеряется не величина задержки, зависящая от частоты вращения вала, а отношение временного сдвига к периоду

вращения, которое зависит лишь от угла закручивания упругого элемента. Конструкция таких измерительных приборов аналогична временным. При вращении вала происходит генерация импульсов двумя неподвижно установленными датчиками. Временной сдвиг t , с, между импульсами одного датчика и импульсами другого пропорционален углу закручивания упругого элемента и периоду вращения вала [1].

На рис. 6 представлена система *TORXmeter* от компании *TX Marine* для измерения крутящего момента на валах крупных морских судов. Она представляет собой две особым образом намагниченные полосы, огибающие вал и, соответственно, два датчика, регистрирующие изменение магнитного поля. При вращении вала создаются импульсы от датчиков, сигналы от которых обрабатываются микроконтроллером. Диаметр вала от 150 до 30 000 мм, максимальная частота вращения 1 200 об/мин [7].

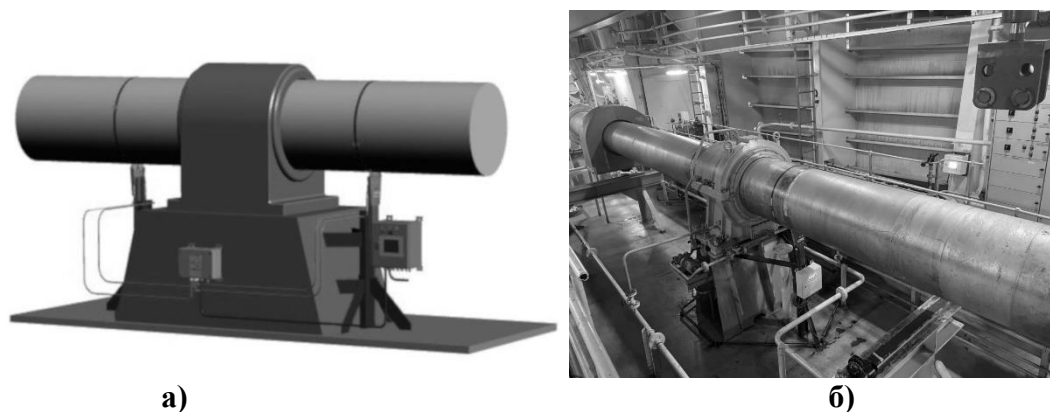


Рис. 6. Измерительная система *TORXmeter* компании *TX Marine* [7]:

а – внешний вид системы; б – установленная на вал система

На рис. 7 представлена аналогичная схема более простой конструкции *Shaft Power Meter (SPM)* от компании *Aquametro*. Диаметр вала от 200 до 1200 мм, максимальная частота вращения 800 об/мин [8].

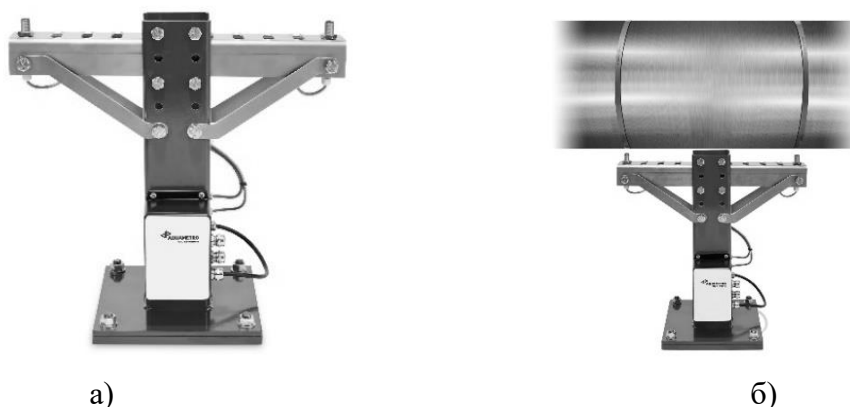


Рис. 7. Измерительная система *Shaft Power Meter (SPM)* компании *Aquametro* [8]:

а – внешний вид системы; б – установленная на вал система

Магнитоупругие датчики крутящего момента

В магнитоупругих датчиках используется измерение магнитной проницаемости или потока ферромагнитных тел в зависимости от механических напряжений, возникающих под действием приложенных сил. В качестве чувствительного элемента для измерения крутяще-

го момента используется участок вала из обычной мягкой стали. Такие датчики можно разделить на две отдельные группы: первая группа измеряет изменение магнитной проницаемости вала или специального покрытия (рис. 8, а), при кручении; вторая группа измеряет изменение магнитного потока намагниченного элемента (рис. 8, б) под нагрузкой [1, 9].

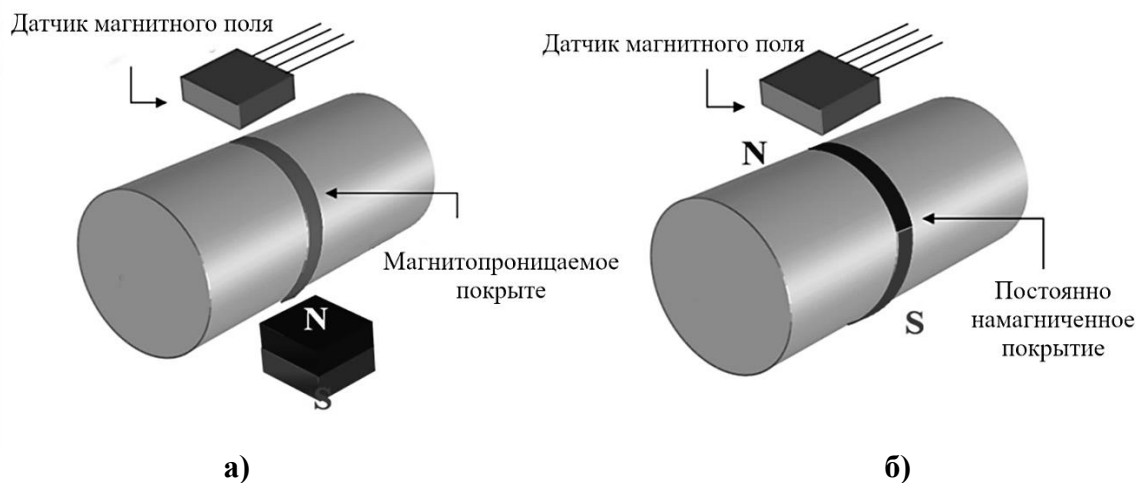


Рис. 8. Типы магнитоупругих датчиков:

а – с внешним источником магнитного поля; б – с намагниченным покрытием на валу

Измерение магнитной проницаемости может быть произведено при помощи простейшего динамометра перекрестного типа (рис. 9). Данная схема схожа с мостовой схемой тензочетрических датчиков, магнитные сопротивления выполнены в виде катушек индуктивности, находящихся в симметричном магнитном поле, создаваемого первой парой катушек. С появлением крутящего момента симметрия поля нарушается, в результате через вторую пару катушек появляется напряжение в обмотках, пропорциональное величине крутящего момента.

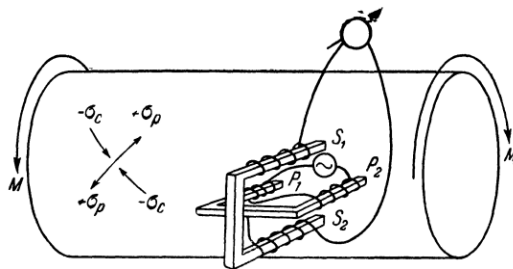


Рис. 9. Схема магнитоупругого динамометра перекрестного типа [1]

На рис. 10 представлен магнитоупругий датчик А3 от компании *Torque And More*, работающий по принципу, аналогичному схеме перекрестного типа [10].

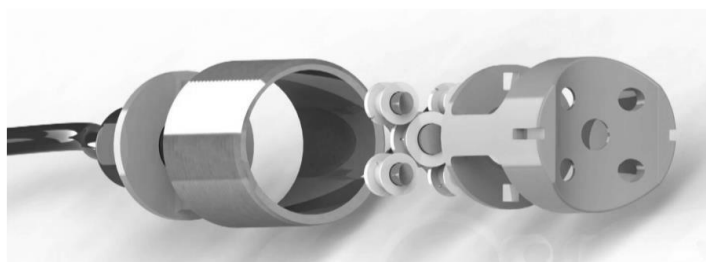


Рис. 10. Магнитоупругий датчик А3 компании *Torque And More* [10]

Основными недостатками перекрестных динамометров является большое влияние внешних факторов на результаты измерения: зависимости от величины воздушных зазоров, внутренней неоднородности материала, вызванной местными внутренними напряжениями, ограниченности частоты вращения как снизу – неоднородностью материала, так и сверху – возникновением вихревых токов, воздействием остаточной намагниченности. Если отбросить перечисленные недостатки, то применение такой конструкции оправдывается ее крайней простотой и возможностью полностью бесконтактной работы.

Магнитоупругие датчики кольцевого типа (рис. 11) являются дальнейшим развитием перекрестной измерительной схемы и состоят из трех колец: на центральном кольце расположены обмотки, создающие магнитное поле, на крайних кольцах – измерительные обмотки.



Рис. 11. Магнитоупругий датчик кольцевого типа *ABB Torductor 500* [11]

Основным преимуществом такой конструкции является измерение механического напряжения одновременно по всей окружности вала, в отличие от перекрестной конструкции. Показания при повышении частоты вращения вала меняются значительно меньше.

Применение магнитоупругих датчиков, измеряющих изменение магнитного потока намагниченного элемента, на судах не нашло широкого распространения на данный момент. Данные системы представлены в качестве единичных экземпляров и прототипов.

Заключение

В современных судовых пропульсивных установках в настоящее время применяются различные виды датчиков крутящего момента, начиная от классических тензометрических и заканчивая прототипами новых магнитоупругих датчиков. Независимо от применяемого вида датчика в системе измерения, сам факт непрерывного контроля помогает отслеживать износ компонентов установки, давать текущую оценку ее КПД, тем самым избегая увеличения затрат на ремонт и излишнего потребления топлива, контролировать соотношение между расчетным расходом топлива и реальным.

Использование современных систем измерения крутящего момента в сочетании с компьютерным управлением пропульсивной установкой позволит осуществлять выбор наиболее выгодных режимов работы СЭУ в реальных условиях эксплуатации.

Библиографический список

1. **Фролов, Л.Б.** Измерение крутящего момента / Л.Б. Фролов. – М.: Энергия, 1967. – 120 с.
2. **Bakalov, I.** Methods and instruments for measuring torque and speed of marine diesel engines. Scientific proceedings XXII international scientific-technical conference «trans & MOTAUTO». 2014. № 1. Pp. 77-79.
3. Измерение крутящего момента [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.datum-electronics.ru/how-to-measure-torque.aspx.htm> (дата обращения 20.11.2024).

4. Marine shaft power meters [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://binsfeld.com/torquetrak/markets/marine-shaft-power-meter/> (дата обращения 20.11.2024).
5. **Lim, S.** Torque Measurment / S. Lim. – Australia: University of Tasmania, 1995. – 94 p.
6. **Раянов, Т.А.** Обзор новых типов датчиков крутящего момента // Транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6. № 1. С. 5-14. doi: 10.17816/transsyst2020615-14.
7. Система измерения крутящего момента TORXmeter [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://txmarine.com/en/produkt/shaft-power/#tab-id-5/> (дата обращения 20.11.2024).
8. Система измерения крутящего момента Shaft Power Meter (SPM) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.aquametro-oil-marine.com/en/products/shaft-power-meter-spm.html> (дата обращения 20.11.2024).
9. Magneto-elastic torque sensors explained [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.pmw-magazine.com/features/wec-magneto-elastic-torque-sensors-explained.html> (дата обращения 20.11.2024).
10. **Wahlberg, R.** Torque Measurement – A Study on Different Measurement Methods for IC Engines. – Finland.: Yrkeshögskolan Novia. 2018. – 32 p.
11. Магнитоупругий датчик кольцевого типа Torductor 500 [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://new.abb.com/products/measurement-products/marine-solutions> (дата обращения 20.11.2024).