



УДК 629.1.05

Новосельцев Михаил Николаевич, ст. преподаватель

Самарский филиал Волжского государственного университета водного транспорта
443099, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 62-64.

Шураев Олег Петрович, доцент, к.т.н., доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок

Волжский государственный университет водного транспорта
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

Чичурин Александр Геннадьевич, доцент, к.т.н., доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок

Волжский государственный университет водного транспорта
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

Ильичев Алексей Юрьевич, инженер

ООО «Темп+»

443047, г. Самара, ул. Уральская, 34

Фирсов Алексей Александрович, начальник механического цеха

ООО «ВолгаФлотСервис»

443042, г. Самара, ул. Белорусская, 131.

КОНСТРУКЦИИ ОСНАСТКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Аннотация. Известна и общепризнана целесообразность проведения регулярного мониторинга крутящего момента главных и вспомогательных судовых двигателей. С этой целью, особенно в последние годы, проводится ряд организационных и технических мероприятий, направленных на внедрение различных измерительных технологий, предусматривающих как эпизодический выездной контроль, так и дооснащение действующих единиц флота соответствующей контрольно-измерительной аппаратурой. В результате работ, выполненных коллективом авторов в рамках обозначенной проблемы, удалось выявить ряд первоочередных задач и частично систематизировать полученный опыт в целях создания как реально действующих образцов измерительного оборудования, так и технологий его применения.

Ключевые слова: крутящий момент двигателя, измерение и мониторинг, испытания двигателей, конструкции оснастки

Изначально перед авторами была поставлена задача разработки оснастки, предназначенной для выполнения измерений в рамках требований Правил Российского Речного Регистра (РРР) [1], касающихся освидетельствования СЭУ после выполнения капитального ремонта и в некоторых иных случаях. В результате предварительного анализа для дальнейшей проработки была выбрана конструкция разъемной накладной оснастки с возможностью монтажа на гребные валы диаметром от 120 до 250 мм, что соответствует валам на судах наиболее распространенных проектов.

В качестве испытательного оборудования использовался нагрузочный стенд на базе судового дизеля «Шкода» 6L160PNS мощностью 139 кВт при частоте вращения 750 об/мин с гидротормозным устройством, предназначенным для создания тормозного

момента величиной до 1800 Н·м. Главный вал станда, предназначенный для закрепления испытуемой оснастки, имеет диаметр 120 мм при длине свободного участка 750 мм, изготовлен из стали 40Х. Модуль упругости материала вала на кручение G составляет 82 ГПа.

Первый этап опытно-конструкторских работ (ОКР) заключался в предварительном определении минимально приемлемой измерительной базы между контрольными сечениями вала, позволяющей, с одной стороны, добиться необходимой величины угловых перемещений, а, с другой, максимально облегчить и упростить конструкцию съемной оснастки. Оптимизация выполнялась посредством испытаний ряда моделей, имевших неразъемную конструкцию в виде тонкостенной проточенной гильзы (обечайки), закрепляемой на валу при помощи хомутов: жесткого, являющегося элементом собственно гильзы, и центрующего, имеющего посадочный диаметр под ответную часть, находящуюся на её противоположном конце. Наружный диаметр обечайки равнялся 137 мм, толщина стенки варьировалась от 1,2 до 2,5 мм. Контроль угловых перемещений в процессе нагружения осуществлялся механическим (часовым) профилометром по изменению зазора между фиксированными метками путем пересчета на имеющийся диаметр.

По результатам предварительных испытаний был сделан ряд необходимых выводов, относящихся как к геометрии и конструкции окончательного варианта оснастки, так и к выбору вида измерительного модуля. Основные из них следующие:

1. Минимально приемлемая измерительная база накладной оснастки с учетом требуемой точности должна составлять не менее 500 мм. С другой стороны, увеличение её также нежелательно по причине потери жёсткости гильзы, либо других, функционально идентичных ей, конструктивных элементов.
2. Применение тонкостенных гильз возможно лишь при условии гашения неизбежно возникающих вибраций, реализуемого за счёт свойств применяемого материала. В то же время конструкция не может быть и чрезмерно пластичной, ибо возникает опасность возникновения резонансных крутильных колебаний оснастки. С этой точки зрения наиболее перспективными, на наш взгляд, являются некоторые композиты, в частности металлополимерные, что и получило подтверждение в ходе дальнейших экспериментов.
3. С целью упрощения отстройки от резонансных колебаний целесообразно в конструкции накладной оснастки избегать наличия жестких замкнутых силовых контуров, ибо варьирование соответствующих параметров подобных объектов в заданных условиях связано с определёнными сложностями. Более рациональным вариантом представляется, на наш взгляд, применение стержневых передаточных элементов прямоугольного сечения. Подобный конструктивный приём особенно эффективен применительно к разъемной оснастке, т.к. позволяет локализовать основные колеблющиеся массы в линейных областях плоскостей разъемов с последующим гашением колебаний за счёт эластичных демпферов в виде, к примеру, шнура или ленты, размещаемых по стыку.
4. В реально существующем диапазоне углов скручивания гребных валов с целью достижения необходимой точности измерений чрезмерное повышение чувствительности считывающего модуля крайне нежелательно, ибо соотношение «сигнал/шум» весьма значительно и практически неустранимо. В связи с этим предпочтительно использование ходоувеличителей.

На этапе первоначальных испытаний были изготовлены и апробированы несколько вариантов подобных устройств, основанных как на механическом, так и на гидравлическом принципе преобразования. Наиболее перспективной, на наш взгляд, является схема одноэлементного ходоувеличителя с деформируемым упругим звеном.

5. Сочленение левой и правой части посредством скользящей посадки на значительных диаметрах при малых угловых перемещениях не обеспечивает требуемой точности, а также минимизации трения. Таким образом, представляется необходимым введение в конструкцию промежуточных шарнирных, либо деформируе-

мых элементов, при этом важным условием является создание в них предварительных напряжений уже на стадии монтажа оснастки на вал. При этом не только ликвидируются возможные зазоры, но и снижаются вибрации в данном узле. Помимо того, в этом случае конструктивно просто реализуется схема промежуточного рычажного ходовувеличителя, применённого в последующем опытном образце.

6. В ряде случаев, особенно при создании простейших конструкций накладных измерителей крутящего момента (ИКМ), целесообразно отказаться от применения электроники в пользу устройства светолучевой индикации. Данное устройство, изготовленное на базе серийных элементов, было также неоднократно испытано в ходе ОКР, и, на наш взгляд, показало себя практически применимым с условием выполнения некоторых доработок.
7. Базирование и фиксацию оснастки в контрольных сечениях вала следует выполнять посредством нескольких элементов, обеспечивающих точечный контакт с высокой удельной нагрузкой. Подобное сочленение, в отличие от применённого изначально варианта на основе зажимных хомутов, обеспечивает не только относительную простоту настройки оснастки под заданный диаметр вала, но и более точное позиционирование. Примером такого узла может служить конструктивная схема, включающая не менее 3-х радиальных болтов с конусными законцовками на каждое сечение.

На втором этапе проектирования с учётом полученного опыта была разработана и изготовлена лабораторная модель разъемной оснастки (рис. 1, 2 и 3), в которой и были реализованы основные из приведённых выше положений.

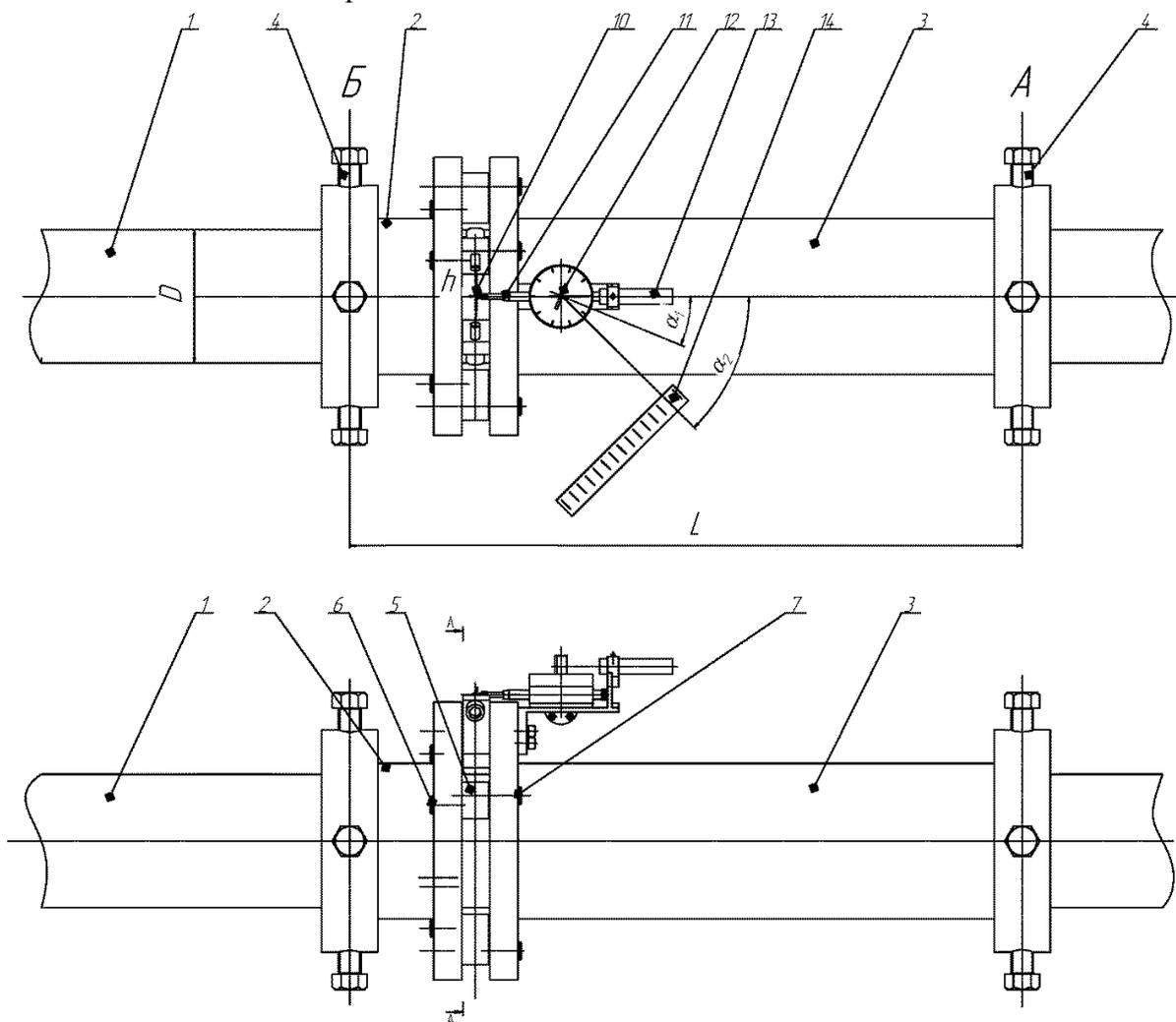


Рис.1. Устройство для измерения крутящего момента

A - A

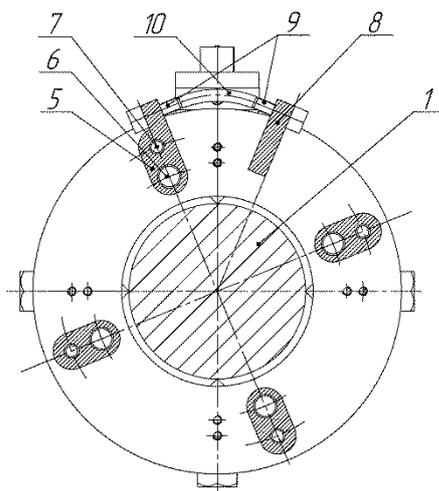


Рис.2. Устройство для измерения крутящего момента. Поперечный разрез



Рис.3. Устройство для измерения крутящего момента. Трехмерная модель

Устройство для измерения крутящего момента судового валопровода 1 включает в себя оснастку, обеспечивающую фиксацию и передачу величины угла скручивания вала, и измерительную часть, служащую для измерения этого угла.

Оснастка состоит из левой 2 и правой 3 корпусных деталей, закрепленных в контрольных сечениях А и Б посредством фиксирующих болтов 4. Между собой левая часть 2 и правая часть 3 соединены при помощи четырех узлов шарнирной подвески, каждый из которых состоит из коромысла 5, а также осей 6 и 7, обеспечивающих взаимное перемещение левой и правой части в пределах угла скручивания контрольных сечений А и Б вала 1. На правой корпусной детали 3 имеется упор 8. В коромысло 5 и упор 8 ввернуты регулировочные винты 9, между которыми установлен упругий одноэлементный преобразователь 10.

Упругий одноэлементный преобразователь 10 является чувствительным элементом измерительной части. В его середину упирается шток индикатора часового типа 11, закрепленного на правой корпусной детали 3. На оси индикатора 11 закреплен отражатель 12, на который ориентирован луч источника когерентного излучения 13. Для приема отраженного луча служит линейная шкала 14, отградуированная в единицах измерения крутящего момента.

Устройство ИКМ работает следующим образом.

При приложении нагрузки к вращающемуся валу 1 его контрольные сечения А и Б получают взаимное угловое смещение, в результате левая корпусная деталь 2 и правая корпусная деталь 3 закручиваются относительно друг друга на некоторый угол. Подвижный элемент шарнирной подвески 8 поворачивается на осях 6, изменяя при этом расстояние 1 между точками закрепления упругого одноэлементного ходоувеличителя 9. Его стрела прогиба изменяется на величину Δh . Линейное перемещение штока индикатора 10 приводит к повороту его оси с закрепленным на ней отражателем 12 на угол α_1 . Угол отражения α_2 луча когерентного источника 13 определяет положение световой отметки на неподвижной линейной измерительной шкале 14. Вследствие того, что угол падения луча равен углу его отражения, угол α_2 будет равен двукратной величине α_1 . Данное условие увеличивает точность определения искомой величины крутящего момента за счет удвоения линейного перемещения световой отметки по шкале 14.

На данное устройство получен патент на полезную модель [2].

К сожалению, провести испытания полученного образца в полном объёме до настоящего времени по ряду причин не удалось. Тем не менее, в ходе первой серии экспериментов были отработаны ключевые аспекты как конструкционно-технологического, так и эксплуатационного характера. Вместе с тем, следует признать, что необходимость продолжения работ по совершенствованию и доводке опытного образца в рамках заданной концепции может быть обоснована лишь с научно-практической точки зрения. Подобный вывод следует уже из оценки уровня предполагаемой эффективности проведения эпизодического контроля как такового.

Интенсивная эксплуатация производственных единиц флота в период навигации уже сама по себе определяет высокодинамичную и, что немаловажно, вариативную и далеко не всегда прогнозируемую картину изменения технического состояния узлов и агрегатов. Подобные обстоятельства ставят под сомнения целесообразность разовых процедур, тем самым обосновывая выбор в пользу дооснащения судов ранних проектов стационарными комплексами ИКМ.

Такие же выводы можно сделать исходя из опыта, полученного авторами в ходе второго этапа ОКР:

1. Реализация выездных мероприятий по обслуживанию судов различных типов потребует создания либо сложной адаптируемой оснастки, либо комплекса таковых - более простых, индивидуальных для каждого проекта. Как по экономическим, так и по эксплуатационным показателям оба варианта не могут быть признаны эффективными. Вне зависимости от выбора, монтаж оснастки на валу, настройка и калибровка её представляют собой достаточно сложную, дорогостоящую и длительную процедуру, требующую вывода судна из эксплуатационного режима и участия специалистов высокой квалификации. Несмотря на тщательность выполнения подготовительных операций ожидаемая точность измерений по сравнению с таковой стационарного комплекса существенно ниже.
2. Как показывает практика, частое повторение монтажных операций, неизбежное в условиях эксплуатации мобильных ИКМ, с течением времени приводит к снижению точности измерений, обусловленное быстрым накоплением внутренних дефектов оснастки. Таким образом, становится необходимым дополнительное профилактическое обслуживание и калибровка оборудования перед каждым измерением.

С учётом обозначенных предпосылок был разработан следующий вариант оснастки, предполагаемый для использования в качестве базы для создания стационарного измерительного комплекса. Концепция изделия прорабатывалась, исходя из условия изготовления подвижных элементов ИКМ непосредственно на гребном валу судна без вывода его из эксплуатации - либо в межнавигационный период, либо при стоянке в период навигации силами выездной бригады.

На основании опыта, полученного на первом этапе ОКР, была определена технология изготовления тонкостенной гильзы, а также прочих элементов оснастки методом намотки. С целью подбора материала на предмет соответствия рабочим условиям проведён ряд опытов по формованию композитов на основе различных компонентов. К примеру, использовались угле- и стекловолокно на эпоксидном связующем, различные однокомпонентные высокопрочные полимеры, а также ряд материалов на основе тонколистового металла и эпоксидных связующих. По совокупности полученных механических характеристик, технологических и экономических факторов был выбран материал, основой которого является алюминиевая фольга на эпоксидном связующем ЭД-20.

Принципиальная схема оснастки представлена на рис. 4. Измерение скручивания вала диаметром D производится на базе L между двумя контрольными сечениями А и Б, в которых наматываемый материал приклеивается к поверхности вала. На остальной части базы L между валом 1 и формируемой методом намотки гильзой 3 образуется зазор δ . Тем самым обеспечивается передача угла скручивания от сечения Б к сечению А.

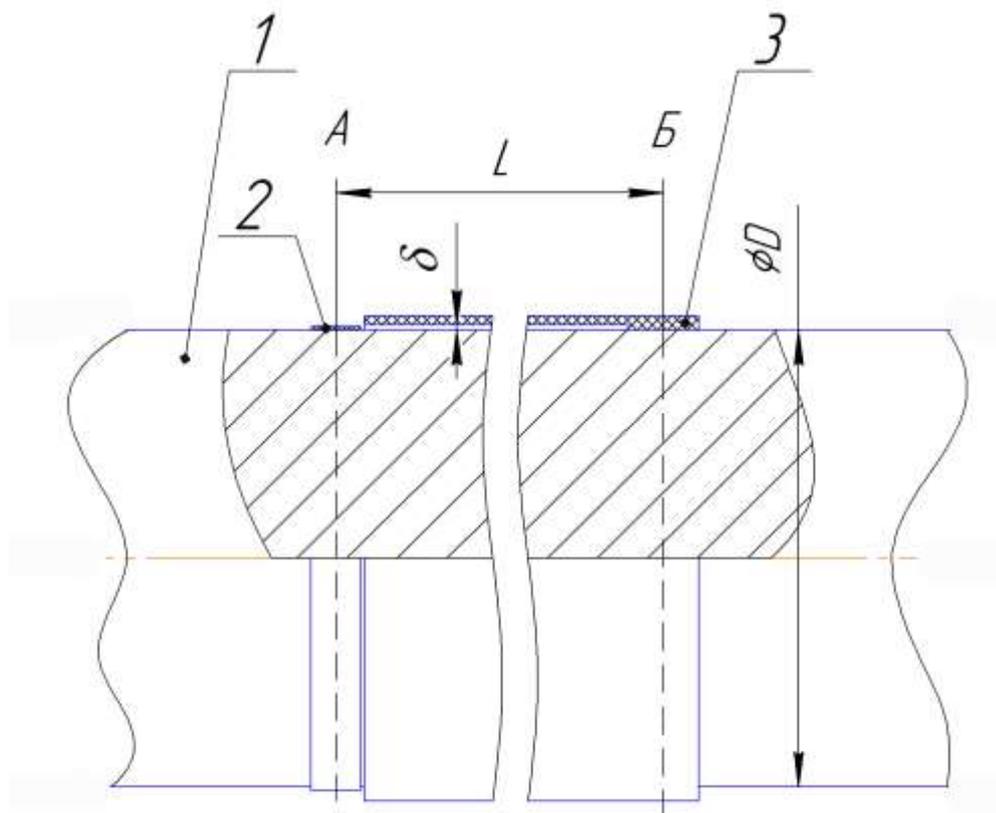


Рис.4. Вал с оснасткой для измерения крутящего момента, изготовленной методом намотки

В ходе экспериментов разработаны и апробированы технологические и конструктивные приёмы формования как отдельных элементов, так и оснастки в целом, определены режимы и некоторые параметры технологических операций. Проведённые испытания показали общую работоспособность конструкции, а также перспективность данного концептуального направления. В настоящее время выполняются работы по созданию и доводке измерительного модуля, позволяющего контролировать не только параметры крутящего момента, но и осуществлять постоянный комплексный мониторинг мощностных показателей судовых двигателей.

Список литературы:

1. Российский речной регистр. Правила. Режим доступа <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rules2019.pdf>
2. Устройство для измерения крутящего момента судовых валопроводов. Патент на полезную модель №197018 /Новосельцев М.Н., Шураев О.П., Чичурин А. Г., Герасимов И.Н., Ильичев А.Ю., Четыркин Н.Н., Фирсов А.А. // Россия, МПК G01L 3/06 (2006.01) - Заявка № 2019 135359. Заявл. 05.11.2019; Опубл. 25.03.2020, Бюл. № 9.

DESIGN THE FIXTURE TO MEASURE TORQUE

Mikhail N. Novoseltsev, Oleg P. Shurayev, Alexandr G. Chichurin,
Aleksei W. Ilchev, Aleksei A. Firsov

It is known and generally recognized that it is advisable to regularly monitor the torque of the main and auxiliary marine engines. For this purpose, especially in recent years, a number of organizational and technical measures have been taken to introduce various measuring technolo-

gies that provide both occasional field control and retrofitting existing fleet units with appropriate monitoring and measuring equipment. As a result of the work carried out by the team of authors within the framework of this problem, it was possible to identify a number of priority tasks and partially systematize the experience obtained in order to create both actual samples of measuring equipment and technologies for its application.

Keywords: engine torque, measurement and monitoring, engine testing, fixture design.