

СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

А.И. Мельников

melantosha@yandex.ru

SPIN-код: 3194-9880

И.А. Дрогайцев

igor_drogaitsev@inbox.ru

SPIN-код: 4877-5453

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Разработан стенд для испытания гребных винтов малогабаритных подводных аппаратов. Стенд позволяет снимать характеристики гребных винтов и электродвигателей, а также наблюдать за кавитационными явлениями, возникающими при работе гребных винтов. Предложена рычажная схема измерения осевой силы (упора) винта, обеспечивающая высокую скорость реакции датчика. Разработана зубчатая ременная передача для привода гребного винта от электродвигателя, находящегося в надводном положении. Передача обеспечивает широкий диапазон передаточных чисел (от 1 до 10) благодаря сменному промежуточному шкиву. На основе микропроцессора Arduino UNO разработана система датчиков, позволяющая регистрировать такие параметры, как упор гребного винта, момент на валу электродвигателя, частоту вращения вала электродвигателя, ток и напряжение в обмотках электродвигателя. Написана компьютерная программа для визуализации процесса испытаний гребных винтов. Основная часть деталей стенда произведена методом 3D-печати по технологиям SLS и FDM. Главными преимуществами разработанного стенда является возможность его применения в акватории любого размера и простота конструкции, что вместе с компактностью дает возможность применять стенд практически в любых лабораторных условиях.

Ключевые слова

Испытательный стенд, испытания гребных винтов, измерение крутящего момента, измерение упора винта, датчик, гребной винт, подводный аппарат, электродвигатель, микроконтроллер Arduino

Поступила в редакцию 24.05.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Рассматриваемый испытательный стенд разработан для УНМЦ «Гидронавтика». Данный проект дает возможность студентам МГТУ им. Н.Э. Баумана самостоятельно разрабатывать и производить эффективные гребные винты и винтомоторные агрегаты. Техническое задание на выполнение проекта было выдано капитаном команды УНМЦ «Гидронавтика» студентом кафедры СМ11 «Подводные аппараты и роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана А.А. Некра-

совым. Согласно техническому заданию было необходимо спроектировать испытательный стенд, удовлетворяющий следующим требованиям:

- возможность испытания винтов на электродвигателях постоянного тока (коллекторных и синхронных), которые будут входить в состав будущих винтомоторов, в частности, на электродвигателях Махон;
- получение таких данных, как частота вращения винта n (об/мин), осевая сила (упор) винта F (Н), момент на валу винта M (Н м), напряжение на электродвигателе U (В), сила тока питания двигателя I (А);
- минимальное влияние конструкции стенда на работу винта;
- возможность проверки винта на кавитацию;
- возможность изменять передаточное число в диапазоне от 1 до 10;
- возможность проведения испытаний одним оператором;
- съемная и компактная конструкция;
- возможность реализации проекта на технологической базе УНМЦ «Гидронавтика»;
- простота и дешевизна конструкции.

На выполнение проекта ушло менее года. Реализация проекта осуществлялась в несколько этапов:

- 1) составление технического задания — 1,5 месяца;
- 2) разработка принципиальной схемы — 2 месяца;
- 3) разработка конструкции — 9,5 месяцев;
- 4) проектирование и отладка системы электроники — 4 месяца;
- 5) разработка компьютерной программы визуализации процесса испытаний — 0,5 месяца;
- 6) закупка стандартных деталей, производство разработанных деталей и сборка — 4 месяца;
- 7) наладка — 3 месяца;

Конструкторскую часть проекта и разработку компьютерной программы выполнял А.И. Мельников, систему электроники разрабатывал И.А. Дрогайцев, производство и сборка осуществлялись совместными усилиями с использованием технологической базы УНМЦ «Гидронавтика».

В ходе выполнения проекта разработана принципиальная схема стенда, сконструировано более 10 уникальных деталей и узлов, спроектирована система электроники, состоящая из пяти датчиков и управляющей платы, разработана компьютерная программа для визуализации работы со стендом и удобства снятия экспериментальных данных. После закупки стандартных составляющих стенда и изготовления разработанных деталей выполнена его сборка и наладка.

При проектировании применяли различные системы автоматизированного проектирования и специальные программные среды: NX, КОМПАС-3D, Mathcad, Visual Studio, Arduino IDE, Polygon.

При создании стенда использовали элементы теории судовых электроприводов [1], деталей машин [2] и опыт кафедры СМ11, МГТУ им. Н.Э. Баумана[3].

В результате проведены прочностные расчеты деталей стенда и расчет зубчатой ременной передачи [4] и проанализированы существующие конструкции стендов для испытания гребных винтов, например [5].

Принцип действия и конструкция стенда. Идея по обеспечению основной функции стенда (измерения упора винта) заключается в применении рычажной схемы. Принципиальная схема стенда, разработанная на начальном этапе проектирования, изображена на рис. 1.

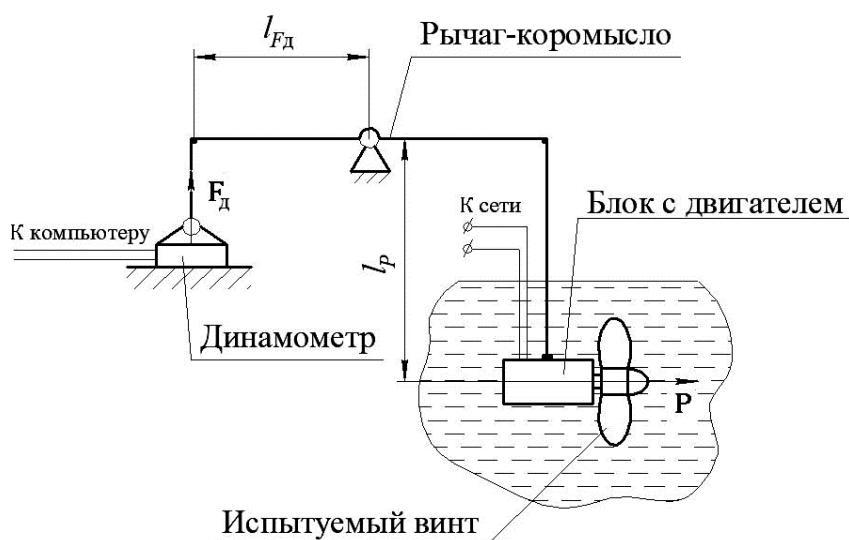


Рис. 1. Схема стенда для испытания гребных винтов, предложенная на начальном этапе проектирования

Упор винта P можно определить из уравнения моментов

$$P = F_d \frac{l_{Fd}}{l_p},$$

где F_d — модуль силы реакции динамометра; l_{Fd} — плечо силы F_d ; l_p — плечо силы P .

При условии достаточной жесткости системы рычажная схема позволяет быстро и точно снимать значения упора винта.

После проведения конструкторской работы получена конструкция стенда, представленная на рис. 2.

В действующей конструкции упор, создаваемый испытуемым гребным винтом 8, передается на тензометрический датчик 15 с помощью вертикального рычага 9, вала 3 и горизонтального рычага 2. Рычаги 2 и 9 жестко соединены с валом 3 соединителями 5. Вал 3 с напрессованными шарикоподшипниками установлен в опорах 4, которые, в свою очередь, закреплены шурупами на доске 1. Испытуемый винт 8 приводится во вращение электродвигателем 13 посредством зубчатой ременной передачи. Электродвигатель 13 устанавливается в шарикоподшипниках на опоре, закрепленной на держателе 6, и при ра-

боте через специальный упор передает силу на тензометрический датчик 14 для измерения момента на валу. Зубчатая ременная передача состоит из горизонтального зубчатого приводного ремня 12, вертикального зубчатого приводного ремня, расположенного в вертикальном рычаге 9, и четырех шкивов. Ведущий шкив консольно закреплен на валу электродвигателя 13, два других шкива — на промежуточном валу, установленном в опоре 10. Четвертый ведомый шкив закреплен на валу гребного винта 8 в подводном корпусе 7. Требуемое передаточное число зубчатой ременной передачи обеспечивается установкой шкивов с соответствующим отношением чисел зубьев на консоли промежуточного вала и вала электродвигателя. Натяжение горизонтального ремня 12 определяется положением держателя 6 на валу 3. Для натяжения вертикального ремня опора промежуточного вала 10 притягивают винтами к крышке 11, которая опирается на рычаг 9.

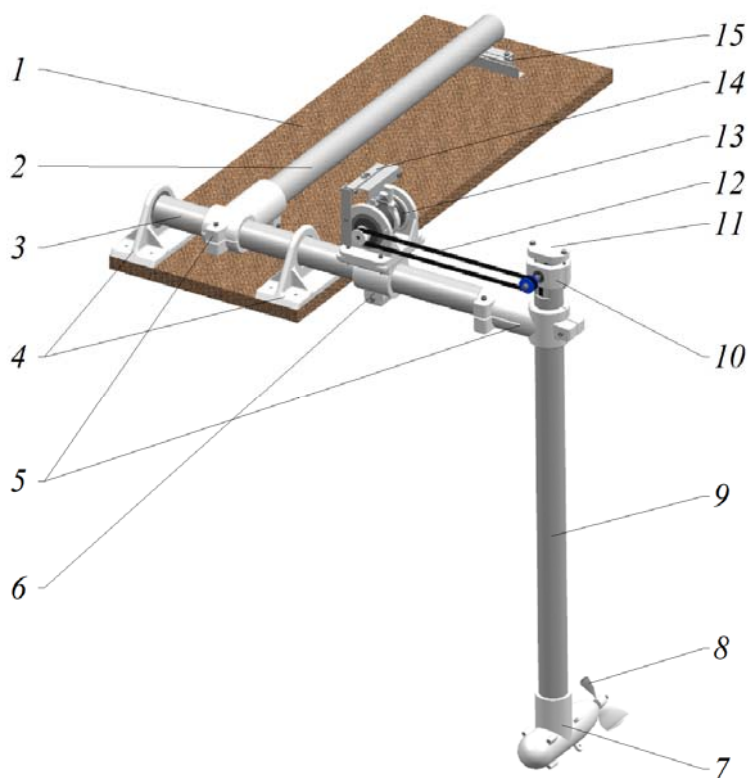


Рис. 2. Стенд для испытания гребных винтов малогабаритных подводных аппаратов:

1 — доска; 2 — горизонтальный рычаг; 3 — вал; 4 — опоры вала; 5 — соединители; 6 — держатель опоры электродвигателя; 7 — подводный корпус; 8 — испытуемый гребной винт; 9 — вертикальный рычаг; 10 — опора промежуточного вала; 11 — крышка системы натяжения вертикального ремня; 12 — горизонтальный зубчатый приводной ремень; 13 — электродвигатель; 14 — тензометрический датчик момента; 15 — тензометрический датчик упора

Габаритные размеры стенда показаны на рис. 3.

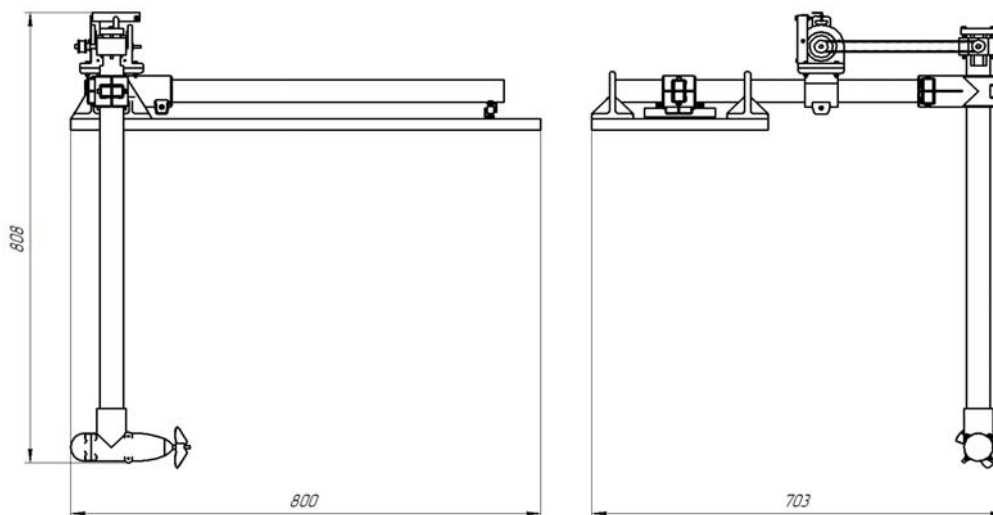


Рис. 3. Габаритные размеры стенда

Материалы и технологии. Основная часть деталей стенда изготовлена методом 3D-печати по технологиям SLS (*Selective laser sintering* — селективное лазерное спекание) и FDM (*Fused deposition modeling* — моделирование методом наплавления). Печать по технологии SLS осуществлялась на 3D-принтере Formiga, по технологии FDM — на 3D-принтере PICASO 3D Designer. При этом использовался полиамид и пластик ABS соответственно. По технологии SLS были изготовлены соединители 5, опоры 4, держатель опоры электродвигателя 6, опора промежуточного вала 10, крышка 11, шкивы, корпус 7 и его детали. По технологии FDM изготовлены опора электродвигателя, специальный упор для передачи усилия с корпуса электродвигателя 13 на тензометрический датчик 14, а также часть шкивов.

Отметим, что технология SLS в отличие от FDM позволяет изготавливать качественные детали любой сложности, в том числе детали с отверстиями и открытыми полостями сложной формы. Кроме того, детали, изготовленные методом лазерного спекания, имеют более высокие прочностные свойства, чем детали, изготовленные методом наплавления. Их стенки не пропускают воду, что важно для деталей подводной части. Детали, выполненные по технологии FDM, имеют свойство впитывать воду, что обусловлено наличием пор в структуре материала. Для обеспечения герметичности таких деталей необходимо производить нанесение специальных герметизирующих покрытий, что несколько усложняет технологический процесс. К недостаткам технологии SLS можно отнести высокую стоимость (в 2–6 раз дороже, чем FDM [6]) и необходимость очистки деталей от порошка.

Обеспечению герметичности подводного корпуса уделено особое внимание. Применены резиновые кольца по ГОСТ 9833–73 и манжетное уплотнение вала гребного винта ТС 8×22×7 WLK [7]. Рычаги 2 и 9, а также вал 3 (см. рис. 2) изготовлены из труб 40×3 из сплава АД31 по ГОСТ 18482–79. Промежуточный вал

и вал гребного винта изготовлены методом токарной обработки заготовок из углеродистой стали с последующим кислотным воронением. Для изготовления систем крепления датчиков использовался Г-образный алюминиевый профиль.

Эксплуатация стенда. Рабочим положением испытательного стенда является положение, когда испытуемый гребной винт полностью погружен в воду, а доска установлена над поверхностью воды. Для уменьшения влияния на результаты эксперимента геометрии лабораторного резервуара, в котором испытывается винт, необходимо располагать стенд так, чтобы винт находился как можно дальше от ограничителей резервуара (стенок, дна, поверхности) и подводных объектов. Доску стенда можно крепить к бортикам лабораторного резервуара с помощью болтов, шурупов, если есть такая возможность, или просто устанавливать на ровную поверхность и прижимать грузами для придания устойчивого положения. При изменении конструкции основания стенда (доски в реализованном исполнении) возможна установка стенда на любой поверхности и в любом резервуаре или водоеме. При наличии в стенках лабораторного резервуара окна (например, как в бассейне УНМЦ «Гидронавтика») появляется возможность вести наблюдения за кавитационными явлениями, возникающими при работе гребного винта. На рис. 4 изображен стенд на этапе наладки, установленный в бассейне УНМЦ «Гидронавтика».



Рис. 4. Стенд для испытания гребных винтов, установленный в бассейне УНМЦ «Гидронавтика», на этапе наладки

При работе стенда в ременной передаче и манжетном уплотнении возникает трение, которое проявляется в возникновении дополнительного крутящего

момента на валу электродвигателя $M_{тр}$. Это момент необходимо учитывать при расчете крутящего момента на валу гребного винта:

$$M_{в} = (M_{э.д} - M_{тр}) \frac{z_2}{z_1},$$

где $M_{э.д}$ — реальный момент на валу электродвигателя; z_1 — число зубьев ведущего шкива; z_2 — число зубьев консольно-закрепленного шкива промежуточного вала.

При выводе результатов измерений удобно сразу получать разность $M = M_{э.д} - M_{тр}$. Для этого необходимо учитывать момент трения на этапе проведения измерений.

Учитывать момент трения $M_{тр}$ можно двумя способами:

1) включать питание электроники после включения стенда на холостом ходу (винт на воздухе, датчики обнуляются автоматически при включении);

2) вычитать момент $M_{тр}$ программно, в коде микроконтроллера (обнуление происходит с учетом $M_{тр}$, вычисленным на холостом ходу заблаговременно).

Первый способ является более надежным, поскольку обнуление датчиков происходит при текущем значении момента трения, которое может измениться, например, при замене манжеты, ремня или шкива. Однако данный способ требует от оператора стенда дополнительных действий.

Второй способ учета момента трения позволяет запускать стенд в любом состоянии, так как $M_{тр}$ вычитается программно. Однако данный способ позволяет получать достоверные результаты лишь при условии постоянства момента трения. Если момент трения по каким-то причинам изменился, необходимо его заново измерять и вносить изменения в программный код микроконтроллера. При проведении серии измерений без замены деталей стенда второй способ является предпочтительным, так как экономит время.

Частота вращения гребного винта $n_{в}$ связана с частотой вращения вала электродвигателя n соотношением

$$n_{в} = n \frac{z_1}{z_2}.$$

Электроника. В рамках данного проекта в техническом задании требовалось получить рабочие характеристики винта. Первоначально рассматривали идею приобретения комплекта аналоговых датчиков и компоновки панели приборов, но впоследствии было принято решение отказаться от данной идеи. Для повышения привлекательности и перспективности разработки был выбран вектор развития в сторону цифровых приборов.

Идея заключается в том, чтобы, установив комплект цифровых датчиков, связать их с помощью программируемого контроллера Arduino UNO на базе 8-битного процессора ATmega 328 с тактовой частотой 16 МГц и памятью 32 кБ, а его, в свою очередь, связать с компьютером через USB-порт и программу обработки данных, написанную на языке C# [8].

Платформа Arduino UNO имеет 14 цифровых вводов/выводов (6 из которых с широтно-импульсной модуляцией), 6 аналоговых входов, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB или подать питание с помощью адаптера постоянного/переменного тока или аккумуляторной батареи [9].

Для контроллера Arduino UNO написана управляющая программа на языке С. Для некоторых датчиков применяются специальные библиотеки. Итогом работы программы служит серия сигналов, подаваемая на SerialPort компьютера, в которых и заключены измеряемые параметры. Далее сигналы обрабатываются в программе на компьютере.

Как уже упоминалось выше, измеряемыми параметрами являются упор, момент двигателя, сила тока в обмотках двигателя и частота вращения вала двигателя. Для измерения каждого параметра был подобран соответствующий датчик [10].

Измерение упора винта и момента на валу электродвигателя. Для измерения упора и момента были применены два одинаковых тензодатчика, рассчитанные на 50 Н. Для преобразования аналоговых сигналов тензодатчиков используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) НХ711. В основе тензодатчиков лежит классическая мостовая схема. Подобная схема применяется для измерения упора гребного винта, например, в [11]. При изменении сопротивления проводника вследствие его деформации изменяется напряжение, по которому с учетом масштабного коэффициента определяется сила давления на датчик. Принципиальная схема установки тензодатчиков упора и момента представлена на рис. 5.



Рис. 5. Установка тензодатчиков упора и момента на стенде:

a — конструктивная схема; *б* — силовая схема

Для корректной работы тензодатчика необходимо, чтобы эпюра изгибающего момента была кососимметричной относительно его оси, т. е. сила давления F должна лежать на оси датчика, при этом изгибающий момент в центре тензодатчика $M_{изг} = 0$ (см. рис. 5, б).

Особое внимание необходимо уделять качеству разъемов, используемых для подключения датчиков и преобразователей к контроллеру. Некачественные разъемы могут создавать помехи, препятствующие получению корректных данных. Также помехи возрастают при увеличении длины соединительных проводов, поэтому длину проводов необходимо сводить к минимуму.

В основе кода считывания данных с тензодатчиков лежит подключаемая библиотека для АЦП НХ711.

Измерение тока. В качестве датчика используется разведенная плата из микросхемы ACS712, предел измерения тока которой равен 5 А. Датчик подключается в схему питания электродвигателя последовательно с источником питания.

Измерение частоты вращения вала двигателя. Первоначально планировалось установить датчик на основе считывания прерывания луча RKP-MWES-LM393, но в процессе калибровки выяснилось, что датчик не способен выдавать точные значения из-за непредсказуемых оптических эффектов на границе прерывателя излучения, выполненного из пластика ABS. Поэтому вместо него был применен датчик Холла KY-024. При работе этот датчик считывает уровень магнитного поля между датчиком и магнитом, закрепленным на колесике вала. Его особенностью является то, что помимо дискретных значений 0 и 1 датчик может передавать и уровень напряженности создаваемого магнитного поля через аналоговый выход. В данном случае используется дискретный счет, по числу перекрытий в секунду рассчитывается число оборотов вала в минуту.

Схема подключения всех датчиков показана на рис. 6.

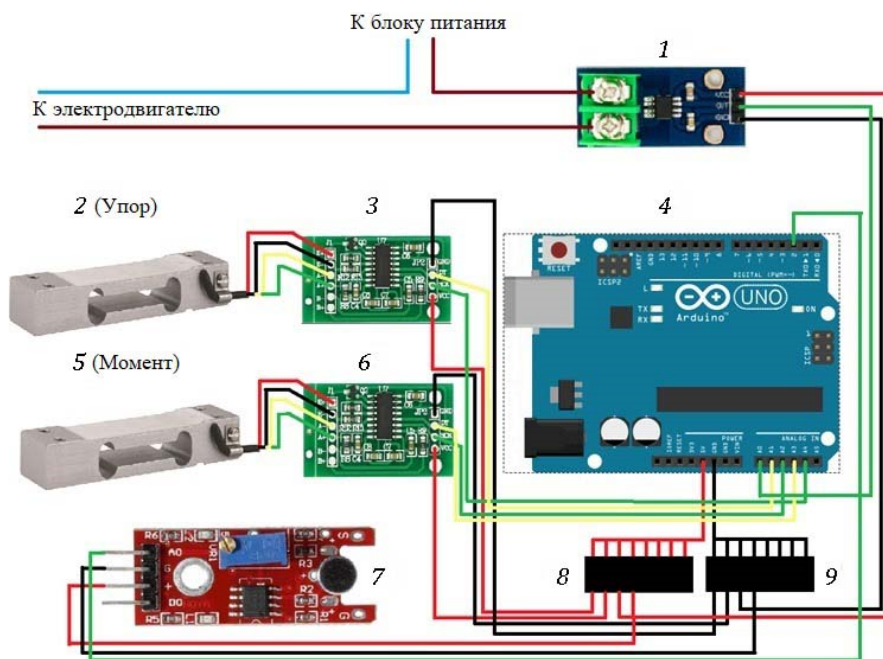


Рис. 6. Схема подключения датчиков:

1 — датчик тока ACS712; 2 — тензодатчик на 50 Н, измеряющий упор; 3 — АЦП HX711 тензодатчика, измеряющего упор; 4 — контроллер Arduino UNO; 5 — тензодатчик на 50 Н, измеряющий момент; 6 — АЦП HX711 тензодатчика, измеряющего момент; 7 — датчик Холла KY-024; 8 — разветвитель питания; 9 — разветвитель заземления

Интерфейс. Для визуализации процесса испытания и связи стенда с ПК была написана программа Stend. Программа написана на языке C#. Программа позволяет записывать данные с датчиков испытательного стенда в txt-файл, а также экспортировать эти данные в документ Excel. В графическом окне программы осу-

ществляется визуализация снимаемых экспериментальных данных в виде графиков, с возможностью масштабирования и выбора откладываемых по осям величин.

Возможность экспорта результатов эксперимента в таблицу Excel и txt-файл — это важная функция программы Stend, которая позволяет обрабатывать полученные результаты в любой программе, предназначенной для обработки числовых данных и проведения математических расчетов (Excel, Mathcad, MatLAB и др.).

Окно программы Stend представлено на рис. 7.



Рис. 7. Интерфейс программы Stend

Выводы. Разработан и сконструирован стенд для испытания гребных винтов малогабаритных подводных аппаратов. На рис. 8 изображен стенд на начальном и конечном этапах разработки.

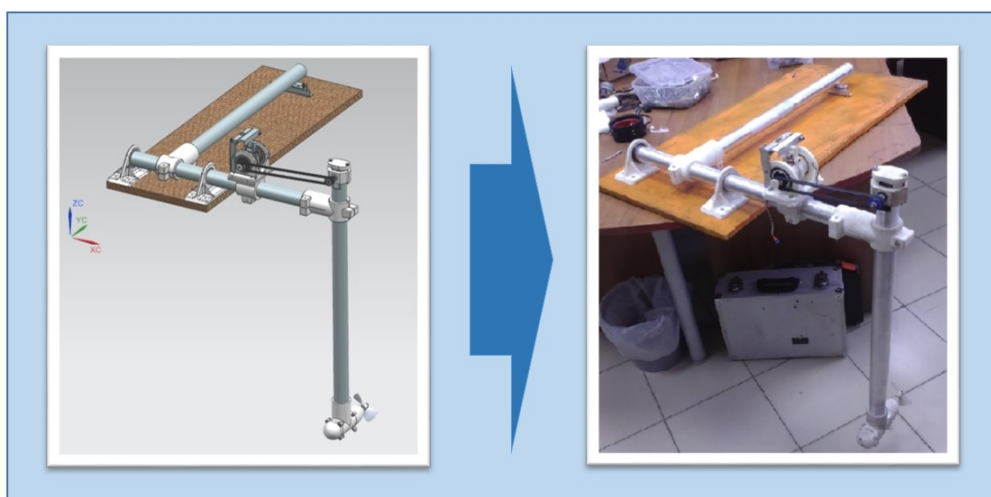


Рис. 8. Стенд для испытания гребных винтов на начальном и конечном этапах разработки

Разработанный испытательный стенд дает возможность строить рабочие характеристики винтов и электродвигателей, что позволяет разрабатывать винты и винтомоторы с наиболее оптимальными параметрами, уточнять характеристики уже имеющихся электродвигателей, а также наблюдать за кавитационными явлениями, возникающими при работе гребных винтов.

Достоинства стенда:

- возможность применения в акватории любого размера;
- простота конструкции, сборки и разборки;
- высокая компактность в разобранном состоянии;
- возможность установки в любом месте, на любой поверхности путем применения оснований различных конструкций;
- возможность и испытания различных электродвигателей путем применения переходников;
- относительно малый вес и габариты;
- большой диапазон передаточных чисел ременной передачи (от 1 до 10).

Недостатки стенда:

- низкое качество электроники, обусловленное ограниченностью бюджета;
- высокая стоимость печатных деталей;
- коррозия вала винта из-за применения углеродистой стали с некачественной поверхностной обработкой;
- применение манжетного уплотнения вала винта;
- необходимость компенсации погрешности крутящего момента, возникающей из-за трения в манжетном уплотнении вала винта и ременной передаче.

Литература

- [1] Чекунов К.А. *Судовые электроприводы и электродвижение судов*. Санкт-Петербург, Судостроение, 1969, 464 с.
- [2] Колесников К.С., ред. *Машиностроение. Т. IV-1. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка*. Москва, Машиностроение, 1995, 864 с.
- [3] Северов С.П., Констанди И.М. Проектирование и испытание активных движительных комплексов подводных аппаратов. *Инженерный вестник*, 2013, № 1. URL: <http://engsi.ru/doc/536074.html>.
- [4] Мельников А.И. Расчет и регулирование современных зубчатых ременных передач. *Молодежный научно-технический вестник*, 2017, № 7. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/860316.html>.
- [5] Лакиза Р.И., Вавилкин В.Н., Кондратов В.И., Щербаков К.И. *Стенд для испытания гребных винтов и крылаток осевых насосов*. Патент 211838 СССР. Заявл. 14.11.1967, опубл. 24.04.1968.
- [6] Технологии 3D-печати. URL: <http://3dprogress.ru/tech/> (дата обращения 30.03.2018).
- [7] Сальник (армированная манжета) TC 8x 22x 7 WLK. URL: https://sf2v.ru/catalog/manzheta/tc_8kh_22kh_7_wlk.html (дата обращения 08.06.2017).

- [8] Петин В.А. *Проекты с использованием контроллера Arduino*. Санкт-Петербург, БВХ-Петербург, 2014, 400 с.
- [9] Блум Дж. *Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2015, 336 с.
- [10] Михеев В.П. *Датчики и детекторы*. Москва, МИФИ, 2007, 172 с.
- [11] Беззубик О.Н. *Способ измерения осевого усилия и крутящего момента гребного винта*. Патент 542921 СССР. Заявл. 19.02.1974, опубл. 15.01.1977.

Мельников Антон Игоревич — студент кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Дрогайцев Игорь Александрович — студент кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

A TEST-BENCH FOR THE PROPELLING SCREWS OF SMALL-SIZE SUBMERSIBLES

A.I. Melnikov

melantosha@yandex.ru

SPIN-code: 3194-9880

I.A. Drogaitsev

igor_drogaitsev@inbox.ru

SPIN-code: 4877-5453

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We have developed a test-bench for testing the propelling screws of small-size submersibles. This test-bench allows taking the characteristics of propelling screws and electric motors as well as monitoring over the cavitation phenomena occurring during the operation of propelling screws. The article proposes a lever circuit of measuring the axial force (thrust) of the screw, ensuring the high speed of the sensor response. We have designed a gear belt drive for the propelling screw gear from the electric motor placed above the water. The gear ensures a wide range of gear ratios (from 1 to 10) due to the removable idler pulley. On the basis of microprocessor Arduino UNO we have developed a system of sensors, allowing us to register such parameters as the screw thrust, the torque on the motor shaft, electric motor shaft speed, current and voltage in the electric motor winding. A computer program for the propelling screws testing process visualization has been written. We produced the essential portion of the stand parts by means of the 3D-print method using the SLS and FDM technologies. The primary benefits of the test-bench designed are the possibility to use it in any water area and the simplicity of design, which along with the compactness allows for using the test-bench in nearly all the laboratory conditions.

Keywords

Test-bench, testing the propelling screws, torque measurement, screw thrust measurement, sensor, propeller screw, submersible, electric motor, microcontroller Arduino

Received 24.05.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Chekunov K.A. Sudovye elektroprivody i elektrodvizenie sudov [Ship electrodrives and electric propulsion]. Sankt-Petersburg, Sudostroenie publ., 1969, 464 p.
- [2] Kolesnikov K.S., ed. Mashinostroenie. T. IV-1. Detali mashin. Konstruktsionnaya prochnost'. Trenie, iznos, smazka [Mechanical engineering. Vol. IV-1. Structural strength. Friction, wear, lubrication]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1995, 864 p.
- [3] Severov S.P., Konstandi I.M. Engineering and testing of submersible active propulsion systems. *Inzhenernyy vestnik*, 2013, no. 1. Available at: <http://engsi.ru/doc/536074.html>.
- [4] Mel'nikov A.I. Calculation and regulation of modern belt drive gears. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskyy vestnik*, 2017, no. 7. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/860316.html>.
- [5] Lakiza R.I., Vavilkin V.N., Kondratov V.I., Shcherbakov K.I. Stend dlya ispytaniya grebnykh vintov i krylatok osevykh nasosov [Test bench for testing of screw shafts and axial pump wing nuts]. Patent 211838 USSR. Appl. 14.11.1967, publ. 24.04.1968.

- [6] Tekhnologii 3D-pechati [3D printing technology]. URL: <http://3dprogress.ru/tech/> (accessed 30 March 2018).
- [7] Sal'nik (armirovannaya manzheta) TC 8kh 22kh 7 WLK [Gasket (armored collar) TC 8kh 22kh 7 WLK]. Available at: https://sf2v.ru/catalog/manzheta/tc_8kh_22kh_7_wlk.html (accessed 08 June 2017).
- [8] Petin V.A. Proekty s ispol'zovaniem kontrollera Arduino [Project using Arduino controller]. Sankt-Petersburg, BVKh-Peterburg publ., 2014, 400 p.
- [9] Blum J. Exploring Arduino: tools and techniques for engineering wizardry. Wiley, 2013, 384 p. (Russ. ed.: Izuchaem Arduino: instrumenty i metody tekhnicheskogo volshebstva. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg publ., 2015, 336 p.)
- [10] Mikheev V.P. Datchiki i detektory [Sensors and detectors]. Moscow, MePhI publ., 2007, 172 p.
- [11] Bezzubik O.N. Sposob izmereniya oseвого usiliya i krutyashchego momenta grebnogo vinta [Method for measuring axial force and twisting moment of screw shaft]. Patent 542921 USSR. Appl. 19.02.1974, publ. 15.01.1977.

Melnikov A.I. — student, Department of Gas Turbine Power Plants and Renewable Energy, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Drogaytsev I.A. — student, Department of Gas Turbine Power Plants and Renewable Energy, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.