

УДК 534.013

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЯ
КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВАЛОВОЙ ЛИНИИ СУДНА**

Смолин Никита Николаевич¹, аспирант

e-mail: n.n.smolin@nsawt.ru

Глушков Сергей Павлович¹, профессор, доктор технических наук

e-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru

Рубан Александр Анатольевич², инженер

e-mail: a.a.ruban@inp.nsk.su

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье с теоретической точки зрения рассмотрена возможность реализации измерения крутильных колебаний, предоставлен анализ методов измерения крутильных колебаний на основе научной литературы и реального опыта. Также представлено описание стендовых исследований возможности реализации, описан стенд, на базе которого проводились исследования.

Ключевые слова: гражданский флот, судовая валовая линия, крутильные колебания, твердотельный гироскоп, лабораторные исследования.

**INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF IMPLEMENTING A TORSIONAL
VIBRATION METER BASED ON SOLID-STATE GYROSCOPES FOR DIAGNOSTICS
OF THE SHIP'S SHAFT LINE**

Nikita N. Smolin¹, Doctoral Student

e-mail: n.n.smolin@nsawt.ru

Sergey P. Glushkov¹, Professor, Doctor of Technical Sciences

e-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru

Alexsander A. Ruban², Engineer

e-mail: a.a.ruban@inp.nsk.su

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

² Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS), Novosibirsk, Russia

Abstract. The article from the theoretical point of view considers the possibility of implementing the measuring torsional vibrations, provides an analysis of methods for measuring torsional vibrations based on scientific literature and real-world experience. It also provides a description

of the poster studies of the possibility of implementation, describes the stand on the basis of which the research was conducted.

Keywords: civilian fleet, ship gross line, torsional vibrations, solid-state gyroscope, laboratory research.

Введение

Крутильные колебания являются одной из проблем при создании механических систем передачи энергии, в первую очередь, на транспорте, при передаче вращающего момента от двигателя к движителю. Требования на минимизацию габаритов, массы и стоимости трансмиссии обуславливают значительные упругие деформации одних элементов и значительные массы других, следствием чего является наличие механических колебательных систем, склонных входить в резонанс, что угрожает разрушением системы.

Таким образом, исследование крутильных колебаний является важной задачей в различных областях, таких как судостроение, авиация, энергетика и машиностроение. В своей исследовательской работе я хочу рассмотреть получение численных значений характеристик крутильных колебаний валовой линии судовой энергетической установки, в том числе экспериментальные измерения на валопроводах.

Результат

Для решения задачи измерения крутильных колебаний на судах используются различные методы и устройства, среди которых наиболее распространёнными на данный момент являются оптические торсиографы и торсиографы с тензодатчиками. Оба метода имеют свои преимущества и недостатки, в настоящее время используются для сертификационных испытаний, однако их инструментальная точность оставляет желать лучшего.

Теоретическое обоснование

Оптические торсиографы основаны на использовании лазерных технологий для измерения угловых смещений вала. Принцип работы заключается в регистрации изменений положения лазерного луча, отражённого от специальной ленты или меток, наклеенных на вал. К неоспоримым преимуществам данного метода относятся высокая точность измерений, широкий диапазон измеряемых частот и бесконтактность метода. Но на практике высокой точности измерений данный метод может добиться только при стендовых испытаниях судовых двигателей, или при проведении капитального ремонта. В условиях машинного отделения существует очень много специфических факторов, которые могут повлиять на конечный результат измерений, такие как вибрация, пыль, масляная взвесь, загрязняющие отражающую полосу. Что уж говорить о том, что в большинстве своём, находясь в машинном отделении судна, очень часто наклеивание отражающей полосы на вал может быть очень трудоёмкой задачей, и ещё труднее добиться точной настройки лазерной системы. В свою очередь, приборы, принцип работы которых основан на использовании тензодатчиков, тоже крепятся непосредственно на сам вал, но из-за конструктивных особенностей любого рода внешние загрязнения не повлияют на конечные измерения.

Тензодатчики измеряют деформации вала, вызванные крутильными колебаниями, с помощью тензорезисторов, которые изменяют своё сопротивление при механическом напряжении. Как уже было отмечено выше, к преимуществам такого типа измерителей относится простота установки и устойчивость к внешним условиям в плане загрязнения. Но в свою очередь непосредственный механический контакт с валом сильно влияет на динамику системы, а сигнал имеет малую амплитуду, из-за чего результаты измерений



могут быть искажены. В приведённой ниже сводной таблице 1 представлено сравнение двух методов измерений на основе опубликованных результатов измерений, технической литературы и опроса реального опыта работы с данными измерителями на речных и морских судах.

Таблица 1. Сводная таблица анализа методов измерения крутильных колебаний

Характеристика	Оптические торсиографы	Тензометрические торсиографы
Точность	Высокая (до 0,001 градуса)	Средняя (погрешность до 10% от заявленной точности прибора)
Частотный диапазон	Широкий (средние и высокие частоты)	Ограниченный (лучше для низких частот)
Сложность установки	Высокая	Низкая
Стоимость	Высокая	Низкая
Устойчивость к внешним условиям	Низкая (чувствительность к пыли, вибрациям)	Высокая

Оба метода имеют свои преимущества и недостатки, что делает их пригодными для разных задач. Оптические торсиографы предпочтительны в случаях, где требуется относительно высокая точность, широкий частотный диапазон, а влияние внешних факторов на измерения сведены к минимуму, например в стендовых исследованиях изготавливаемых двигателей. Тензодатчики, в свою очередь, являются более доступным и простым решением для применений непосредственно на судах в ходе эксплуатации судна или при плановом техническом обслуживании валовой линии без разбора и снятия двигателя, где важна устойчивость к внешним условиям машинного отделения. Но всё ещё остаётся проблема низкой точности измерений на средних и высоких частотах.

В настоящее время полупроводниковая промышленность производит недорогие твердотельные устройства, способные измерять как линейные ускорения, так и вращательные. Они широко используются даже в бытовой электронике. Соответственно, они позиционируются на рынке как акселерометры и гироскопы.

По сравнению с тензодатчиками, гироскоп не ограничен со стороны низких частот и не вносит соответствующих амплитудно-фазовых искажений. Поскольку сигнал гироскопа даёт информацию об изменении положения в двух осях, то он позволяет фиксировать не только неравномерность вращения, но и, например, неплоскостность вращения вала, или изгибные колебания вала, которые могут возникать при потере длинным валом устойчивости вблизи частот резонанса.

К сожалению, серийно производимые гироскопы на основе тел вращения являются крайне сложным и дорогостоящим изделием, требующим мягких условий применения, и не могут быть установлены на вал судовых энергетических установок.

Однако сейчас интенсивно развиваются так называемые твердотельные гироскопы, не содержащие тел вращения. В настоящее время полупроводниковая промышленность производит недорогие твердотельные устройства, способные измерять как линейные ускорения, так и вращательные. Они широко используются даже в бытовой электронике. Соответственно, они позиционируются на рынке как акселерометры и гироскопы. Основой твердотельного гироскопа является упругий элемент, выполняющий роль маятника. Маятник, также, как и вращающееся тело, подчиняется законам сохранения тензора момента импульса и сохраняет постоянной плоскость колебаний.

Благодаря достижениям технологии твердотельной полупроводниковой индустрии и её подраздела микромеханики современные гироскопы выдерживают ударные нагрузки свыше 200G, и выполнены в корпусах стандартных микросхем с габаритами порядка 7х6х1мм, имеют низкое энергопотребление, что позволяет монтировать их

непосредственно на вращающийся вал. Внешний вид демонстрационной печатной платы с современным твердотельным гироскопом представлен на рисунке 1.

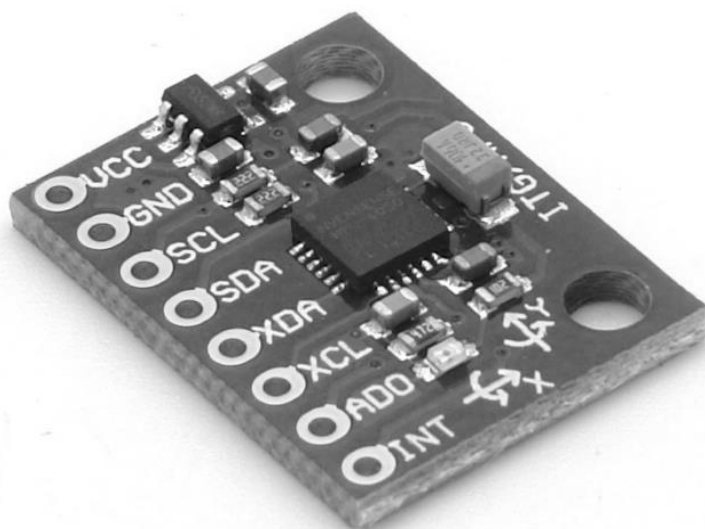


Рисунок 1 – Современный твердотельный гироскоп, смонтированный на демонстрационной печатной плате

Современные твердотельные гироскопы выполняются на основе колеблющихся мембран, вытравленных в объеме полупроводника. Данное решение позволило существенно поднять добротность колебаний такого маятника, а также существенно уменьшить паразитную связь между электродами возбуждения колебаний и считывания сигналов.

Благодаря тому, что сигнал гироскопа даёт сведения об изменениях положения в трёх осях, он позволяет фиксировать не только неравномерность вращения, но и, к примеру, неплоскостность вращения вала или его изгибные колебания, которые могут возникать при потере устойчивости вблизи частот резонанса. На основе этих данных можно построить геограмму рабочего процесса валовой линии, анализ которой позволит локализовать повреждения части валовой линии, или места с наибольшей опасностью их возникновения.

В работе [2] описано использование MEMS-гироскопов для измерения крутильных колебаний в авиационных двигателях, где была достигнута точность до 0,01 градуса. В исследовании [1] гироскопы использовались для анализа высокочастотных колебаний в турбинах. Результат исследований показал, что гироскопы эффективны как на низких, так и на высоких частотах, что делает их универсальными для различных задач. Исходя из этого следует логичный вопрос: почему бы не использовать твердотельные гироскопы в измерителях крутильных колебаний судовой валовой линии?

В ходе исследования этого вопроса мной были изучены публикации и научные материалы, включающие в себя опыт использования твердотельных гироскопов в авиатехнике, ракетостроении. Кроме того, совместно с научными руководителями, мной были проведены диагностические мероприятия, направленные на исследование крутильных колебаний судовой валовой линии прогулочного речного теплохода.

Экспериментальные исследования

В процессе измерения крутильных колебаний мной был использован стенд из исследовательской лаборатории Сибирского государственного университета водного транспорта, имитирующий воздействие среды на движитель судна (рис. 2) Разработанный специально под данный стенд программный интерфейс позволял за счёт изменения вращения частотным преобразователем одного из соединённых муфтой электродвигателей

имитировать разного рода рабочие режимы, вплоть до аварийных ситуаций, при которых повреждённый вал может скрутить.



Рисунок 2 – Стенд имитации работы валовой линии

После проведения исследовательских работ на данном стенде передо мной возникла методическая проблема - заранее не известны его колебательные характеристики, из-за чего откалибровать отклик датчиков на таком стенде не представлялось возможным. Поэтому возникла задача по разработке и конструированию стенда для проверки и калибровки датчиков, генерирующего крутильные колебания со следующими заранее заданными характеристиками: амплитуда по углу, частота изменения угла, фиксированная точка «ноля» фазы колебаний. Дополнительно дело осложняется тем, что в реальных условиях на судне датчик может быть размещён только на внешней образующей валов и маховиков, где кроме угловых присутствуют тангенциальные и центростремительные ускорения. Внешний вид комплекта кинематики и электроники этого стенда представлен на рисунке 3.

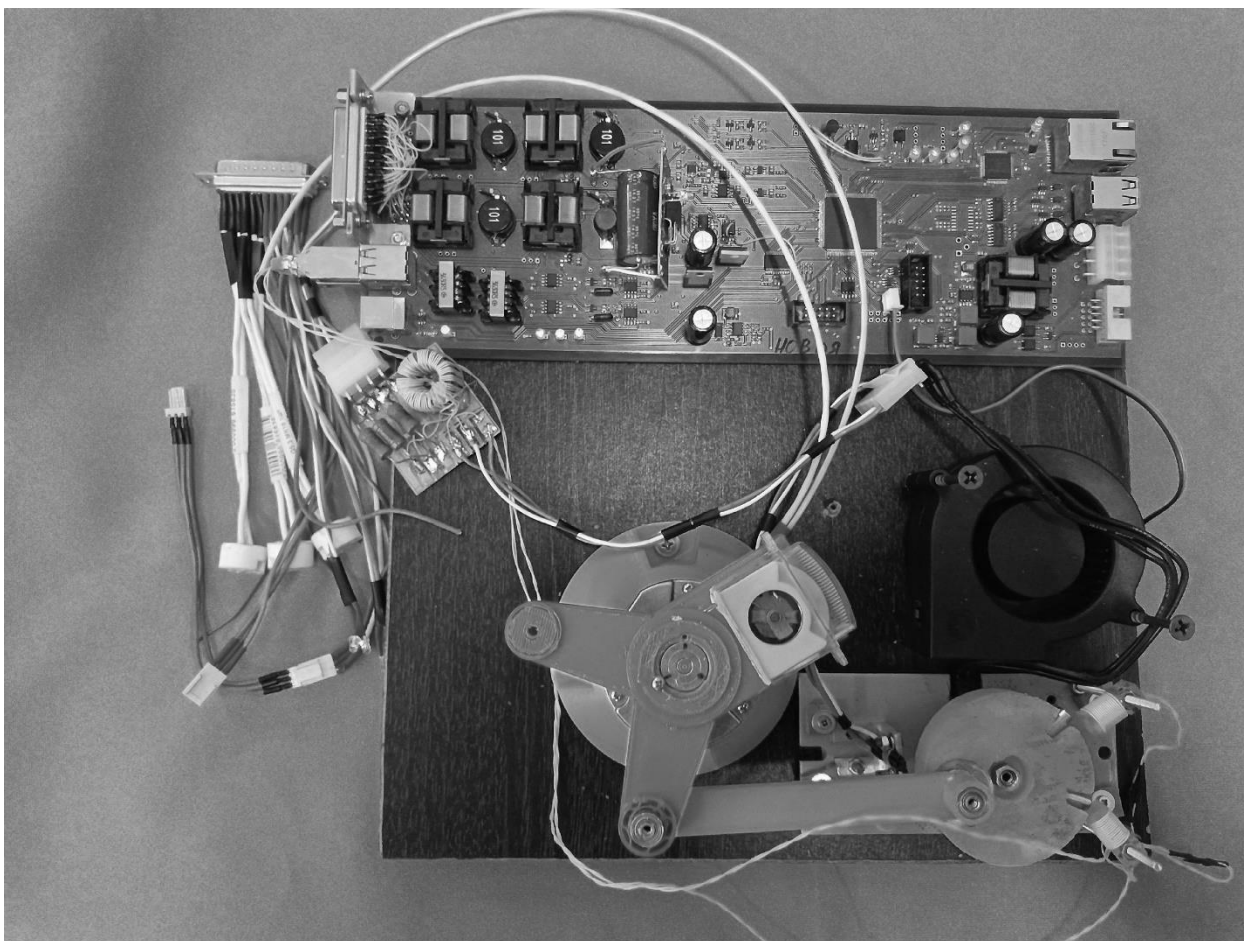


Рисунок 3 – Кинематика и электроника стенда проверки и калибровки датчиков

Данный стенд способен генерировать колебания с заведомо известными характеристиками. Предусмотрены меры для перекрёстного контроля колебаний несколькими методами, что предоставляет функциональность для проверки и калибровки датчиков не только крутильных колебаний, так и сопутствующих тангенциальных, центростремительных ускорений. Благодаря данным, полученным при работе на этом стенде, появляется возможность откалибровать амплитудно-частотную характеристику датчика, а также судить о работоспособности датчика в условиях его размещения на внешней поверхности вала. Другими словами, можно точно узнать сколько милливольт выдаёт датчик при определённой амплитуде колебаний, на определённой частоте. Физический смысл работы со стендом заключается в том, что благодаря жёсткому контролю всех подаваемых на вход датчика величин и осуществляя полный контроль нескольких источников сигнала, можно получить предельно точные графики измерения крутильных колебаний с минимальным воздействием паразитных сигналов и шумов.

Стенд оснащён датчиком Холла для фиксации «ноля» фазы колебания, парой индуктивных датчиков для оценки набегов фазы в обрабатываемом ПО вследствие амплитудно-фазовой конверсии в цифровых фильтрах, индуктивными датчиками углового положения грузовой площадки. Одной из ключевых особенностей данного стенда является использование бесколлекторных электродвигателей с неподвижными обмотками в разных ролях, один из которых используется для обеспечения механической энергией привода кинематики стенда, а второй – как прецизионный малозумный подшипниковый узел и индуктивный датчик контроля положения грузовой площадки. Имея стабильный сигнал с этого датчика, появляется возможность сравнивать с ним полученные характеристики от других датчиков, будь то сборка с тензорезисторами или гироскопом.

В качестве двигателя привода кинематики стенда используется стандартный двигатель A2807 для летающих дронов, с диаметром вала 4 мм, габаритными размерами 33,6 x 20 мм, мощностью 895,7 Вт, максимальным тяговым усилием 1996 грамм и максимальной скоростью вращения 1300 kV.

В качестве узла вращения и подвески грузовой площадки используется шпиндель-двигатель от дискового устройства массовой памяти жёсткого типа устаревшего персонального компьютера. Оригинальные детали кинематики стенда изготовлены методом 3D-печати. Для сопряжения отдельных деталей в кинематическую схему использованы прецизионные подшипниковые узлы от узлов подвески магнитных головок жёстких дисков.

Электроника стенда изготовлена на базе имевшейся платы драйверов клапанов криогенных жидкостей производства ИЯФ СО РАН, формата Евромеханика 3U. Плата аппаратно адаптирована для управления трёхобмоточным бесколлекторным двигателем, позволяя управлять частотой вращения и темпом ускорения вращения. Плата также имеет канал управления вентилятором обдува, необходимым для работы основного двигателя на низких оборотах. Плата оборудована 18-ти битным АЦП архитектуры последовательных приближений. АЦП имеет производительность 500 тысяч выборок в секунду, которые можно разделять между несколькими каналами входных сигналов. Это позволяет фиксировать в цифровом виде сигналы с полосой до 50 кГц при динамическом диапазоне до 80дБ. Плата оборудована интерфейсами связи с компьютером типов USB2.0, Ethernet 100. Питается плата от источника 12В. Имеется программа управления в среде Windows, позволяющая осуществлять доступ к ресурсам платы в пошаговом режиме. ПО автоматизации стенда находится в разработке.

Выводы

Должен отметить, что настоящая работа по исследованию возможности реализации измерителя крутильных колебаний на основе твердотельных гироскопов является неоконченной. Согласно проведённому теоретическому анализу научных публикаций и опросов людей, непосредственно работающих в сферах, связанных с измерением крутильных колебаний, можно с уверенностью заявить, что реализация измерителя крутильных колебаний судовой энергетической установки на базе твердотельного гироскопа более чем возможна. В настоящее время мной проводятся активные исследования стендовой аппаратуры и осуществляются разработка программы для обработки и анализа крутильных колебаний, полученных в ходе экспериментов.

Список литературы:

1. Smith J., Brown A. "High-frequency torsional vibration monitoring using gyroscopes". – Journal of Mechanical Engineering, 2019.
2. Иванов И. И., Петров П. П. Применение MEMS-гироскопов в авиационных двигателях. – М.: Наука, 2020.
3. Смолин Н. Н. Оптический метод измерения крутильных колебаний валовой линии судовой энергетической установки на основе эффекта флуоресценции // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2022. – № 3. – С. 5-7. – EDN QWGKEW.
4. Смолин Н. Н. Применение твердотельных гироскопов в устройствах для измерения крутильных колебаний // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2024. – № 3. – С. 55-58. – EDN LSUSAK.
5. Бородина О. Ю. Трибомеханическая система динамического гасителя крутильных колебаний вязкого трения судового дизеля / О. Ю. Бородина, С. П. Глушков // Речной транспорт (XXI век). – 2024. – № 2(110). – С. 48-51. – EDN WTQVRG.



6. Мартянов В. В. Метод оценки и прогнозирования виброактивности элементов пропульсивного комплекса пассажирских судов на основе расчета крутильных колебаний : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. – 2017. – 149 с. EDN: IWHZHA.

