

УДК [629.5.035.8 : 534.013] : [681.2 : 621.396.6]

Опыт применения радиоторсиографов РТ-660 на судах Северного бассейна

К.О. Сергеев, А.И. Прыгунов

Судомеханический факультет МА МГТУ, кафедра судовых энергетических установок

Аннотация. В статье описывается принцип действия и конструкция радиоторсиографов типа РТ-660, приводятся технические данные торсиографов, вспомогательного оборудования, амплитудно-частотные характеристики торсиографов, полученные на стенде, сведения о программном обеспечении, применяемом при работе с приборами. Анализируются погрешности измерений при использовании радиоторсиографов этого типа, рассматриваются методы борьбы с погрешностями.

Abstract. The paper describes the principle of operation and construction of radiotorsiographs (РТ-660), technical information about these devices and some auxiliary equipment, AF characteristics obtained on a stand, information about software applied during these devices' operation. The errors of measurements while using radiotorsiographs of this type have been analyzed, the methods of errors' correction have been considered as well.

1. Введение

Крутильные колебания валов судовых силовых установок возникают из-за неравномерного вращения валопровода, неизбежного вследствие колебаний движущих сил и моментов, возникающих при образовании и передаче энергии в судовых СЭУ. Основная опасность крутильных колебаний заключается в появлении знакопеременных моментов, которые приводят к возникновению в валах дополнительных знакопеременных касательных напряжений. При работе на резонансных числах оборотов касательные напряжения могут достигать существенных значений и приводить к поломке валов. Величина возникающих касательных напряжений зависит от упруго-инерционных, демпфирующих свойств системы и характера возмущающих моментов.

Для предотвращения повреждений валов от крутильных колебаний Правила Российского Морского Регистра судоходства требуют проведения расчета валов СЭУ на крутильные колебания. Результаты расчета должны подтверждаться замерами крутильных колебаний. Кроме подтверждения теоретических расчетов, измерение крутильных колебаний производится с целью диагностики демпферов – специальных устройств, предназначенных для борьбы с крутильными колебаниями валов.

Методы проведения замеров крутильных колебаний можно разделить на две группы: торсиографирование и прямое тензометрирование валов. Под торсиографированием понимается запись крутильных колебаний валов специальными приборами – торсиографами. Торсиографы фиксируют амплитуду колебаний в том сечении вала, с которым связан прибор. Значения напряжений в опасном сечении определяются косвенным путем, т.е. путем пересчета амплитуд колебаний, найденных в торсиографируемом сечении (по форме колебаний) (Ефремов, 2007). Как правило, торсиограф крепится непосредственно на свободный конец вала двигателя или редуктора.

Принцип действия всех торсиографов сейсмического типа одинаков. Приемная часть торсиографа в виде легкого валика или легкого шкива соединяется с исследуемым валом и колеблется вместе с ним. С приемной частью, через мягкие пружины, соединяется маятниковая масса, которая вращается почти равномерно. Разность движений между приемной частью и массой, обусловленная крутильными колебаниями, записывается пишущим устройством или преобразуется в электрический сигнал, который передается на регистрирующее устройство. Для преобразования разности движений (крутильных колебаний) в электрический сигнал применяются емкостной или индукционный принцип преобразования, реже встречаются конструкция с тензометрами на плоских пружинах, соединяющих массу с легким шкивом.

Электрический сигнал, пропорциональный крутильным колебаниям, передается на регистрирующую аппаратуру через токосъемники или бесконтактным способом (например, по радиоканалу).

2. Опыт применения радиоторсиографов

Диагностическая группа ООО "ДиаМАНТ" при проведении измерений крутильных колебаний использует радиоторсиографы типа РТ-660 с 1992 года. Радиоторсиографы разработаны в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. За указанный период были проведены измерения крутильных колебаний на 370 судах разных проектов, в общей сложности более чем на четырехстах двигателях разных типов. В это число входят как среднеоборотные, так и низкооборотные машины. Измерения проводились как с целью подтверждения данных теоретических расчетов, так и с целью диагностики демпферов крутильных колебаний.

Конструктивно радиоторсиограф РТ-660 состоит из двух основных элементов: датчика и приемника, связанных между собой по радиоканалу на частоте 660 кГц с помощью передающей и приемной антенн. Применение радиоканала исключает необходимость какой-либо центровки датчика, отсутствие в цепи передачи сигнала токосъемников снижает искажения сигнала при передаче. Приемная антенна может устанавливаться на расстоянии до 50 мм от датчика, что обеспечивает удобство в работе.

Основные технические характеристики радиоторсиографа РТ-660 следующие:

- диапазон частот вращения исследуемого вала – 0-1500 об/мин.;
- диапазон частот исследуемых колебаний – 600-1200 кол/мин.;
- диапазон амплитуд исследуемых колебаний – 10^{-5} - 10^{-2} радиан;
- относительная погрешность измерений – не более 3 %;
- цена калибровочной метки – $0,86 \cdot 10^{-2}$ радиан;
- амплитуда крутильных колебаний инерционной массы датчика в пределах ограничения – $4,8 \cdot 10^{-2}$ радиан;
- длительность непрерывной работы передатчика при полностью заряженных аккумуляторах – не менее 30 часов;
- питание приемника – сеть 50 Гц, 220 В;
- ток питания приемника – 0,1 А;
- габариты датчика – диаметр 100 мм, толщина 50 мм;
- масса датчика – 0,8 кг;
- габариты приемника – 70×120×190 мм;
- масса приемника – 0,7 кг;
- способ крепления датчика к исследуемому валу – жесткое;
- работоспособность радиоторсиографа обеспечена в условиях повышенной влажности при температурах -10 ÷ $+50$ ° С.

Внешний вид радиоторсиографа РТ-660 с приемной антенной показан на рис. 1.

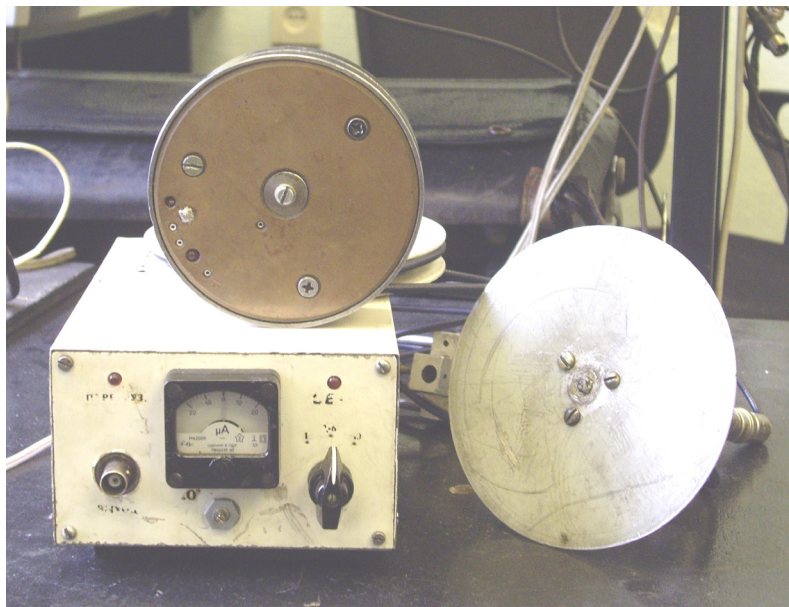


Рис. 1. Радиоторсиограф РТ-660

При проведении измерений с переднего торца коленчатого вала двигателя использовалось жесткое крепление датчика торсиографа, а для замеров с вала валовой линии использовался ременный

привод. В этом случае применяется специальная стойка с валиком на подшипниках. Датчик торсиографа крепится к валику стойки с одной стороны, а к другому концу валика крепится шкив для ремня.

Сигнал с датчика торсиографа записывается на магнитную ленту, либо непосредственно в память ЭВМ типа "Ноутбук", с использованием АЦП. Для записи торсиограммы на магнитную ленту используется магнитофон 7005 фирмы "Брюль и Кьер", как наиболее надежный. Его рабочий частотный диапазон (канала ЧМ записи/воспроизведения) при скорости ленты 381 мм/с от 0 до 12,5 кГц; отношение сигнал-шум – 44 дБ. Магнитофон имеет четыре канала, что позволяет одновременно с сигналом торсиограммы записывать сигнал отметчика оборотов или другие необходимые сигналы. Магнитофон сконструирован с учетом возможности калибровки каналов записи и воспроизведения, имеет сетевой и батарейный блоки питания. Магнитофон имеет две скорости движения ленты: 38,1 и 381 мм/с. Продолжительность непрерывной записи или воспроизведения при использовании стандартной кассеты и скорости движения ленты 38,1 мм/с около 5 часов, что вполне достаточно для проведения длительных судовых испытаний.

С магнитофонной ленты сигнал для дальнейшей обработки заносится в ЭВМ через АЦП типа NVL-03 фирмы "Сигнал". Учитывая, что сигнал, полученный с торсиографа, практически не содержит высокочастотных составляющих, АЦП используется без специального антиалингингового фильтра (встроенный антиалингинговый фильтр АЦП имеет частоту среза 12 кГц). Характеристики АЦП NVL03 приведены ниже:

- аппаратная реализация К1113ПВ1;
- количество каналов – 16;
- диапазоны входных напряжений + 1,0; + 1,25; + 2,5 В;
- предельное входное напряжение + 12 В;
- время преобразования не более 30 мкс;
- минимальный интервал между выборками не более 33 мкс;
- дискретность изменения интервалов запуска АЦП 1 мкс;
- верхний предел частотного диапазона входных сигналов 12,5 кГц;
- нижний предел частотного диапазона входных сигналов 0 Гц;
- крутизна спада АЧХ входного фильтра не менее 20 дБ /окт.;
- погрешность изменения напряжения + 0,25 %;
- погрешность интервалов времени 0,000001 %;
- режим запуска – аппаратный; программный; внешний;
- варианты приема результатов АЦП в ПЭВМ – по прерыванию.

При обработке торсиограмм в качестве специальной программы-анализатора используется программа "PRISMA", разработанная под руководством проф. МГТУ Прыгунова А.И. и доработанная в ООО "ДиаМАНТ". Программа позволяет производить узкополосный анализ сигнала, определять частоты и амплитуды резонансных колебаний. Специальная версия программы позволяет строить кривую развития резонансных колебаний в автоматическом режиме, выделяя из каждого занесения значения с максимальной амплитудой, что позволяет определить резонансную частоту и амплитуду с большей точностью. Пример спектра низкочастотных крутильных колебаний, полученных при помощи программы "PRISMA", приведен на рис. 2.

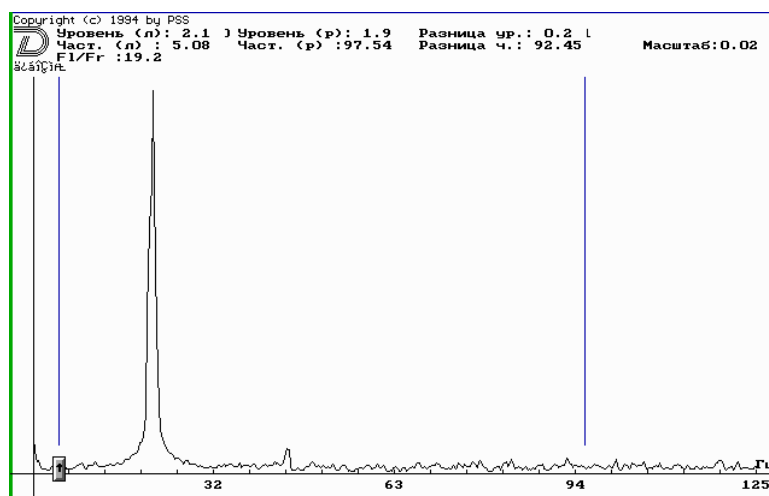


Рис. 2. Спектр крутильных колебаний

Максимальный частотный диапазон и объем занесения для программы "PRISMA" определен из следующих соображений: резонансные частоты для большинства распространенных двигателей лежат в пределах 20-80 Гц. Отсюда, с учетом характеристик прибора определяем верхний частотный диапазон $F = 125$ Гц. Исходя из 0,8 частоты Найквиста, находим интервал занесения $t = 0,4/F$, равный 0,0032 сек. Принимая объем занесения равным одному килобайту (при большем объеме занесения падает точность определения частоты при обработке "проходов", т.к. программа начинает усреднять частоту и амплитуду сигнала, которые постоянно изменяются), определим разрешающую способность анализатора по известной формуле: $\Delta f = 1/(Qt)$, где Q – объем занесения; t – интервал занесения; Δf – разрешающая способность анализа, $\Delta f = 0,3$ Гц.

При необходимости объем занесения можно увеличить до восьми килобайт, увеличив тем самым разрешающую способность анализа. При указанных выше объеме и интервале занесения время занесения $T = Qt$ равно 3,3 сек. Например, для двигателя 8NVD48 A2U при обработке "проходов" в районе резонансной частоты (около 280 об/мин – 4,6 об/сек.) за одно занесение будет анализироваться $4,6 \cdot 3,3/2 = 7,6$ полных цикла, что делает анализ корректным (Ефремов, Сергеев, 1999).

При использовании ЭВМ типа "Ноутбук" используется АЦП типа NVL-07, подключаемый к последовательному порту. Дальнейшая обработка сигнала не отличается от обработки, описанной выше.

Динамический диапазон приборов позволяет проводить измерения даже при плохо отрегулированном двигателе, что в практике диагностики демпферов является распространенным явлением. В комплекте с указанным выше АЦП и программой уверенно измеряются резонансные колебания вала при отношении амплитуд колебаний половинного или первого порядка и измеряемой частоты в 10 дБ.

Фирма имеет два прибора типа РТ-660, отличающиеся только конструкцией датчика. У датчика торсиографа РТ-660-02 (более поздняя модель) используется торсионный подвес инерционной массы. Эта конструкция оказалась менее удачной, чем предыдущая, так как имеет спад АЧХ ниже частоты 30 Гц, что усложняет обработку сигнала, так как требует введения поправочного коэффициента, зависящего от частоты. Кроме того, после использования этой модели в течение некоторого времени была отмечена ее чувствительность к продольным колебаниям (динамическому раскепу) коленчатого вала двигателя в случае его "жесткой" работы.

Для выяснения причин указанного явления в МГТУ был изготовлен малогабаритный стенд, позволяющий имитировать крутильные колебания.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) торсиографа РТ-660-02, снятая на стенде, приведена на рис. 3. На характеристике виден резонансный максимум в районе частоты 52 Гц, возникший по причине продольного резонанса инертной массы прибора из-за увеличенных зазоров в подшипниках. Далее прибор использовался (до ремонта) с учетом выявленных погрешностей.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) торсиографа РТ-660-01, полученная на том же стенде, приведена на рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика этой модификации радиоторсиографа имеет небольшой максимум в районе низких частот, объясняемый резонансом инертной массы. В целом же неравномерность АЧХ не превышает 3 %, что вполне допустимо в практике измерения крутильных колебаний.

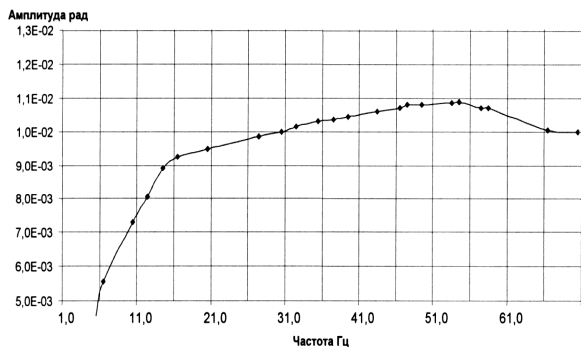


Рис. 3. АЧХ радиоторсиографа РТ-660-02

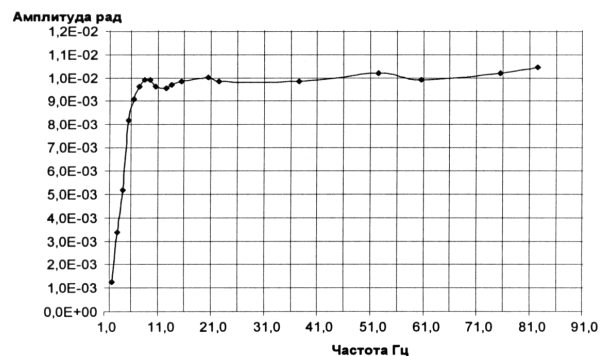


Рис. 4. АЧХ радиоторсиографа РТ-660-01

3. Погрешности измерений

Основными источниками погрешностей при записи сигнала являются: несоосность крепления датчика или валика крепления датчика с коленчатым валом двигателя (вызывает появление больших амплитуд первого порядка), разрегулировка двигателя (вызывает появление больших амплитуд первого и

половинного порядков) и импульсные помехи, наводимые на радиоканал передачи данных от датчика к приемнику от судового электрооборудования. Такая помеха имеет практически бесконечный спектр и при обработке приводит к увеличению уровня всех гармоник сигнала.

Для борьбы с указанными помехами используется специальная схема, позволяющая ограничивать амплитуду помехи при занесении сигнала в ЭВМ, или специальный режим работы обрабатывающей программы "PRISMA", позволяющий исключить из обработки кадр с дефектным участком записи. Наличие в сигнале гармоник первого и половинного порядка при измерении крутильных колебаний с целью определения технического состояния демпферов крутильных колебаний не является критичным, так как динамический диапазон всего измерительного тракта позволяет уверенно определять амплитуды частот резонансных колебаний на фоне указанных гармоник.

При проведении замеров для измерения амплитуд крутильных колебаний с целью проверки теоретических расчетов наличие недостоверных значений амплитуд первого и половинного порядка может быть недопустимым. В этом случае при проведении замеров используется ЭВМ типа "Ноутбук", программа которого имеет возможность визуализации заносимого сигнала в режиме реального времени, или "Ноутбук" используется параллельно с магнитофоном на начальном этапе измерений. Наличие временной реализации сигнала позволяет устранить погрешности монтажа датчика прибора или провести дополнительную регулировку двигателя. В этом случае, критерием качества регулировки может служить значение амплитуды гармоники половинного порядка (для четырехтактных двигателей) и первого – для двухтактных.

Мощным средством повышения точности измерений крутильных колебаний является сквозная калибровка измерительного тракта, возможная благодаря наличию тестового сигнала, генератором которого снабжены датчики радиотрисиографов (сигнал – "метка"). А проведение нескольких параллельных замеров на одном и том же испытательном режиме позволяет применять методы статистической обработки результатов замера.

4. Заключение

В целом же за более чем десятилетний срок эксплуатации радиотрисиографы РТ-660 зарекомендовали себя как надежные, мобильные и удобные в работе приборы. Погрешности измерения указанных приборов понятны, объяснимы, и борьба с ними не вызывает серьезных трудностей, что еще раз подчеркивает положительные стороны трисиографов этого типа.

Литература

- Ефремов Л.В.** Теория и практика исследования крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. СПб., Наука, 273 с., 2007.
- Ефремов Л.В., Сергеев К.О.** Приборное и программное обеспечение для диагностики технического состояния демпферов. Тезисы X-ой научно-техн. конференции, Мурманск, МГТУ, с.446-448, 1999.