

УДК 621.431.7 : 629.5.035

Выбор параметров преобразования при дискретном измерении крутильных колебаний валов судовых энергетических установок

К.О. Сергеев¹, М.В. Кудрявцев²

¹ Морская академия МГТУ, кафедра судовых энергетических установок

² Морская академия МГТУ, кафедра технологии металлов и судоремонта

Аннотация. В статье анализируются систематические погрешности, которые могут возникать при дискретном методе измерения крутильных колебаний. Приводятся расчетные формулы для получения параметров преобразования с заданной величиной погрешности измерений, а также конкретные значения для измерения крутильных колебаний наиболее распространенных типов двигателей.

Abstract. In the paper systematic inaccuracies which may appear under the discrete method of torsional vibrations measurement have been analyzed. Calculation formulas for getting transformation parameters with the given quantity of measurement accuracy have been given; concrete values for measuring torsional vibrations of the most prevalent types of engines have been shown.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, крутильные колебания, торсиографирование, погрешности, дискретное преобразование

Key words: ship power plants, torsion vibrations, measurement of torsional vibration, inaccuracies, discrete transformation

1. Введение

Правила Российского морского регистра судоходства (РМРС) требуют выполнения расчетов крутильных колебаний при проектировании и существенной модернизации судовых энергетических установок (СЭУ). Эти же правила оговаривают необходимость проведения замеров крутильных колебаний для подтверждения теоретического расчета. Другим аспектом, вызывающим необходимость проведения замеров, является диагностика технического состояния демпферов крутильных колебаний, для которой торсиографирование дает более точные и надежные результаты по сравнению с анализом силиконово-жидкости.

Измерение крутильных колебаний может выполняться двумя методами: тензометрированием и торсиографированием. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, определяющие область его применения, но торсиографирование получило большее распространение.

Ранее торсиографы – приборы для измерения и записи крутильных колебаний – основывались на сейсмическом принципе действия. Этот тип приборов и их погрешности подробно проанализированы в научной литературе (Ефремов, 2007).

Целью статьи является теоретический анализ систематических погрешностей, возникающих при измерении крутильных колебаний приборами, основанными на других принципах действия.

2. Принципы дискретного измерения крутильных колебаний

В настоящее время получили распространение торсиографы, основанные на дискретном принципе измерения крутильных колебаний. При этом методе производится измерение временных интервалов, за которые происходит поворот контролируемого вала на заданный угол, т.е. угловая скорость вращения вала измеряется не постоянно, а дискретно через определенные промежутки, задаваемые реперными (контрольными) точками (рис. 1). При отсутствии крутильных колебаний вала (равномерное вращение) время $T_1 = T_2 = T_3$. Фактически сигнал представляется в виде набора значений угловых скоростей (количественно равных числу разбиений), усредненных по углу между реперными точками. Приборы, работающие по указанному принципу, имеют совершенно другие источники погрешности измерений.

Дискретность разбиения определяется количеством реперных точек, проходящих мимо датчика за один оборот вала, а фиксация момента прохождения репера может выполняться методами, основанными на разных физических принципах: световом, электромагнитном. В первом случае используется перфорированный тем или иным способом диск, прерывающий световой поток к фотодатчику или диск (обод) со специальной отражающей лентой, имеющей рисунок из полос – "зебру". Такой принцип использован в торсиографе "СКАН", разработанном в Центральном научно-

исследовательском институте морского флота (ЦНИИМФ). Применяются и промышленные датчики угла, имеющие дискретность по углу порядка нескольких градусов, например, оптический энкодер H20DB-254-SS-100-A, изготовитель – BEI США (Попов, 2007).

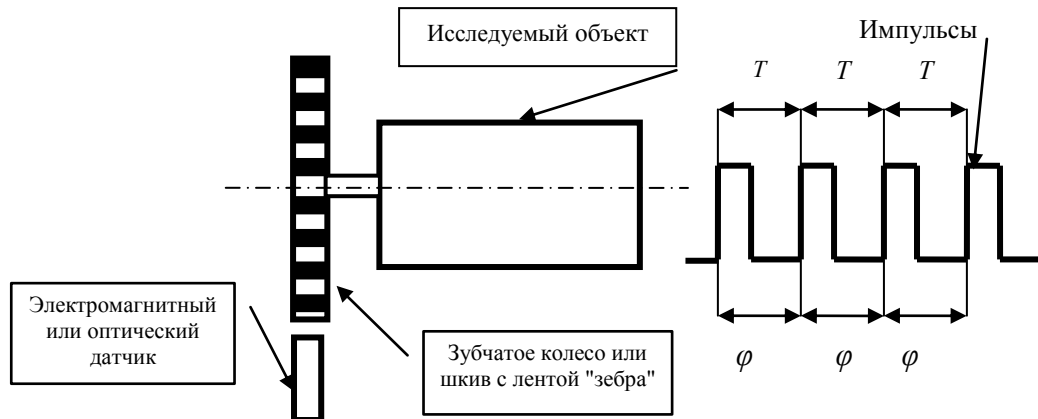


Рис. 1. Принцип измерения крутильных колебаний

При использовании индуктивных и индукционных датчиков, в качестве источника угловых отметок, может применяться шестерня, в т.ч. и шестерня валоповоротного устройства. В этом случае могут применяться датчики Холла и индуктивные конечные выключатели.

Далее сигнал с датчика может подаваться на преобразователь "частота – напряжение", схемы которого хорошо известны из радиотехники, и уже в аналоговом виде заносится в ЭВМ через аналого-цифровой преобразователь (АЦП), или же заносится в ЭВМ непосредственно в виде импульсов с датчика (или специального формирователя импульсов) и далее подвергается обработке уже программно. Известен и способ занесения сигнала в ЭВМ непосредственно в цифровом виде, с предварительным использованием контроллера с цифровыми счетчиками и 16-разрядным регистром, где и осуществляется основная обработка сигнала. Этот метод применяется в торсиографе "СЭТ", разработанном в Одесской государственной морской академии (ОГМА). Прибор оснащен датчиком, дающим 2500 импульсов за один оборот.

3. Источники погрешностей измерения крутильных колебаний

Погрешность измерения зависит и от точности установки реперов, и от точности фиксации момента прохождения репера, которая, в свою очередь, обусловлена физическим принципом работы датчика. У индукционного датчика максимум сигнала определяется скоростью прохождения репера, индуктивные датчики генерируют сигнал при приближении репера на определенное расстояние, оптические – при попадании светового потока в приемник. Кроме того, при использовании шестерни валоповоротного устройства возникает погрешность, обусловленная местом расположения считывающего устройства около "узла" колебаний моторной формы, т.е. там, где амплитуда моторной формы априорно имеет небольшую величину. При использовании отражающей ленты типа "зебра" погрешность возникает из-за разницы в расстоянии между отдельными отражающими полосами и ошибок из-за стыковки концов ленты. Эти ошибки могут давать в спектре сигнала несуществующие частоты или исказить амплитуду существующих.

Очевидно, что способ занесения также может исказить информацию, но гораздо более интересными являются теоретические требования к приборам с дискретным измерением крутильных колебаний.

Известно, что при дискретном представлении аналогового сигнала возможны две ошибки: ошибка дискретизации и ошибка квантования.

Условие, при котором осуществимо восстановление аналогового сигнала по полученному из него цифровому (а сигнал, полученный при помощи описанных выше преобразований, по сути, таковым и является), т.е. сохранение всей исходно содержащейся в сигнале информации, выражается теоремой Котельникова – Шеннона.

Для выполнения указанного условия требуется, чтобы полоса частот входного сигнала была не менее чем вдвое уже, чем частота дискретизации, то есть $f_{max} = 1/2F_d$. Сигналы крутильных колебаний в этом смысле весьма просты для обработки, т.к. практически не содержат высших, по отношению к резонансной частоте, гармоник. Следовательно, можно определять F_d по частоте высшей из ожидаемых в

сигнале резонансных частот, без риска столкнуться с проблемой появления ложных (кажущихся) частот (алиасинг от англ. *aliasing*). Но указанное соотношение справедливо полностью, только если дискретизация сигнала производится импульсами бесконечно малой ширины (на рис. 2 такие импульсы показаны точками).

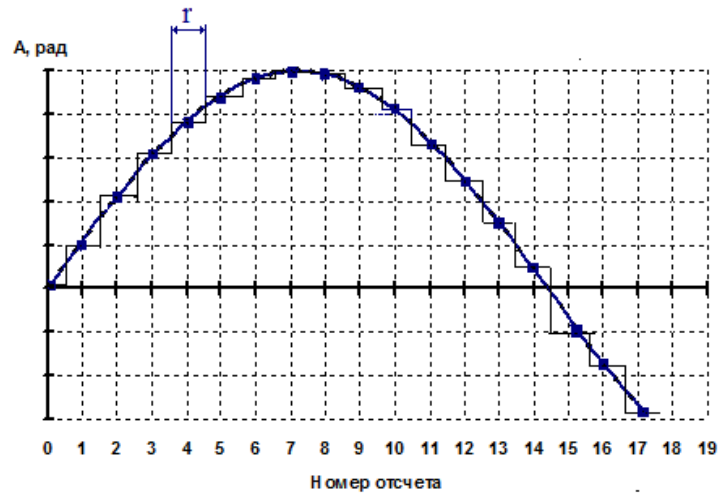


Рис. 2. Дискретизация сигнала при преобразовании

Если дискретизация сигнала производится импульсами конечной ширины (интервал r на рис. 2), то таким импульсам соответствуют средние значения сигнала на интервале длительности импульсов. При длительности импульсов r (Макс, 1983) имеем:

$$s(k\Delta t) = (1/r) \int_{k\Delta t - r/2}^{k\Delta t + r/2} s(t) dt.$$

Отсюда следует, что при дискретизации с усреднением спектр $S(f)$ заменяется спектром $S^*(f)$:

$$S^*(f) = S(f) \times [\sin(\pi fr)] / \pi fr \times \exp(-2\pi fr / 2).$$

Второй сомножитель в этой формуле меняет модуль спектра в $\{[\sin(\pi fr)] / \pi fr\}$ раз, а третий приводит к сдвигу фаз. Допустим, $r = \lambda \Delta t$, при $\lambda \leq 1$ и $F_d = 2\alpha f_{max}$, при $\alpha \geq 1$. Для этих условий передаточный коэффициент равен:

$$K(f) = \{ \sin[(\pi \lambda / 2\alpha) \cdot (f / f_{max})] \} / [(\pi \lambda / 2\alpha) \cdot (f / f_{max})].$$

Для того чтобы влияние преобразования (потеря модуля спектра сигнала) было меньше 1 % для всех частот, вплоть до f_{max} , необходимо выполнение неравенства:

$$[\sin(\pi \lambda / 2\alpha)] / (\pi \lambda / 2\alpha) \geq 0,99 \text{ или } \lambda / \alpha \geq 0,16.$$

Примем $\alpha = 1$ (дискретизация с частотой Найквиста), тогда $\lambda \geq 0,16$, т.е. ширина импульса дискретизации (временного интервала, за который происходит преобразование аналогового сигнала в цифровой) должна быть меньше 16 % расстояния между импульсами (временного интервала между двумя процессами преобразования).

При применяемом способе обработки сигнала крутильных колебаний имеем ширину импульса дискретизации r , равной расстоянию между импульсами, т.е. $\lambda = 1$ (рис. 2). Поэтому влиянием ширины импульсов дискретизации пренебречь нельзя. Таким образом, для обеспечения потерь модуля спектра не более чем 1 %, учитывая, что:

$$\lambda = r / \Delta t, \Delta t = 1 / F_d, \alpha = F_d / 2f_{max},$$

следует:

$$\alpha > \lambda / 0,16 \Rightarrow \alpha > 1 / 0,16 \geq 6,25 \text{ и } F_d = 6,25 \times 2f_{max} = 12,5f_{max}.$$

Необходимо отметить, что выполнение указанного условия значительно уменьшает возможность проявления эффекта алиасинга.

На основании изложенного получим формулу для определения необходимого числа реперов при указанной точности:

$$F_d = 6,25 \times 2f_{max} = 12,5f_{max}.$$

Но с другой стороны,

$$F_d = z \cdot n_{\text{рез}} = 12,5f_{\text{max}},$$

где z – число реперов на валу (число интервалов отсчета); $n_{\text{рез}}$ (об/мин) – частота вращения для резонанса k -го порядка резонансной частоты $f = f_{\text{max}}$ (Гц).

Далее:

$$n_{\text{рез}} = (60f) / k, \Rightarrow F_d = (60f) \times z / k = 12,5 \times (60f) \Rightarrow z = 12,5k.$$

Например, для распространенного двигателя 8NVD48 A2U частота резонанса моторной формы – 38 Гц. Для 8 порядка колебаний на частоте вращения 285 об/мин необходимо $12,5 \times 8 = 100$ реперов. Следует отметить, что в научной литературе встречаются рекомендации выбирать частоту дискретизации с запасом в 20 % (т.е. $2,2f_{\text{max}}$ от частоты Найквиста), в этом случае необходимо 120 реперов. Принимать, разумеется, необходимо наибольший порядок k возбуждения резонансной частоты, т.к. для меньших порядков частота вращения на резонансе будет больше, и условие выполнится автоматически. Если отсутствует информация о составе частот в спектре сигнала, можно задаться наибольшей частотой 100-120 Гц без риска столкнуться с проблемами точности преобразования и проявлением эффекта алиасинга.

Возможно также рассчитать потери модуля спектра сигнала при недостаточном числе реперов z , подставляя в приведенное выше неравенство

$$\alpha = z / 2k, \quad \lambda = 1.$$

Определим влияние сдвига фаз. Угол сдвига фаз в радианах равен (πfr), а в градусах

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{град}} &= 180 \times fr, \\ \varphi_{\text{град}} &= 180(\lambda / 2\alpha) \times (f / f_{\text{max}}) \text{ (Макс, 1983)}. \end{aligned}$$

При принятой ошибке в модуле 1 % $\Rightarrow \lambda / \alpha \geq 0,16$ ($\lambda = 1, \alpha = 6,25$), сдвиг фазы для f_{max} равен:

$$\varphi_{\text{град}} = 180^\circ \cdot 1 \cdot 0,16 / 2 = 180^\circ \cdot 0,08 = 14,4^\circ.$$

В таблице приведены значения количества реперов для измерения колебаний моторной формы распространенных среднеоборотных двигателей флота рыбной промышленности.

Таблица. Количество реперов для различных типов двигателей

Тип двигателя	Назначение двигателя	Резонансная частота, кол/мин	Порядок колебаний	Число реперов
8ZL 40/48 (8ЧН40/48)	ГД Проект В-408	2050	4,5	56
8NVD48 A2U (8ЧН 32/48)	ГД Проект 502Э	2280	8	100
8VD 26/20 AL-2 (8ЧН20/26)	ГД Проект "Атлантик 333"	2510	3,5	44
6VD 26/20 AL-2 (6ЧН20/26)	ВДГ Проект "Атлантик 333"	4500	6	75
6L525ПРВВ (6ЧН252,2/72)	ГД Проект 1386	2184	9	113
6L20 (6ЧН20/28)	ГД Проект "Атлантик 333"	5599	6	75
МАК М20 (6ЧН 20/30)	ГД Проект "Атлантик 333"	3378	6	75
12V23/30A (12ЧН23/30)	ГД Типа "И. Шаньков"	3688	6	75

Второй возможной ошибкой может быть ошибка квантования, имеющая несколько иной смысл, чем при обычной цифровой обработке сигналов. В нашем случае это относится к точности измерения временного интервала между реперами (при постулировании отсутствия ошибки в угле между реперами). Если не применяется преобразователь "частота – напряжение" (ошибки преобразователей такого типа здесь не рассматриваются), то измерение времени поворота производится путем заполнения промежутка между импульсами от реперов тактовыми импульсами более высокой частоты, обладающими высокой стабильностью. Например, в приборе "СЭТ" ОГМА применяется тактовый генератор с частотой 16 МГц. При обработке сигнала непосредственно в ЭВМ частота тактовых импульсов может задаваться программно.

Параметры сигналов крутильных колебаний из-за незначительных частот не требуют больших значений тактовой частоты и, следовательно, тактовые генераторы на любые частоты легко реализуемы. Но при необходимости можно определить ошибку квантования по известной формуле:

$$\sigma_k = F_d / 6^{1/2} \cdot f_T,$$

где f_T – тактовая частота.

Еще одно требование, которое может предъявляться при обработке дискретных сигналов крутильных колебаний – это требование к разрешению сигналов с близкими частотами. Разрешающая способность анализа имеет значение при проведении замеров с целью диагностики демпферов, где незначительное изменение частоты может свидетельствовать о начале деградации демпфера. Для разделения двух пиков с частотами f_1 и f_2 необходима запись сигнала (время наблюдения) длиной $T_{\text{зап}}$ (Дженкинс, Ваттс, 1971).

$$T_{\text{зап}} \geq 1 / (f_1 - f_2).$$

Принимая минимальную разрешающую способность анализа в 1 Гц, получим $T_{\text{зап}} - 1$ сек, т.е. время наблюдения должно быть не менее 1 сек. Количество оборотов вала, за которое должны проводиться измерение (запись) и анализ сигнала: $n/60$, где n – частота вращения вала об/мин. Это требование должно соблюдаться при разработке программного обеспечения.

4. Выводы

Основными условиями снижения систематических погрешностей при дискретном измерении крутильных колебаний являются:

- использование необходимого количества реперных точек, обусловливаемого резонансными частотами и порядком колебаний;
- применение времени наблюдения, достаточного для получения заданного разрешения по частоте.

Литература

Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его применения. М., Мир, 312 с., 1971.

Ефремов Л.В. Теория и практика исследования крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. СПб., Наука, 273 с., 2007.

Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М., Мир, 311 с., 1983.

Попов А.А. Опыт торсиографирования судовых валопроводов с применением современных средств и методов измерений. Науч.-техн. сборник Рос. мор. регистра судоходства, с.99-116, 2007.