

УДК 629.5.03-62-752.2. : 534.013

Анализ надежности демпферов главных двигателей СРСТ типа "Альпинист" по результатам торсиографирований

К.О. Сергеев, А.С. Жуков

Судомеханический факультет МА МГТУ, кафедра судовых энергетических установок

Аннотация. В статье рассматриваются результаты измерения крутильных колебаний главных двигателей судов типа "Альпинист", на основании которых определяется коэффициент надежности демпфера и другие эталонные диагностические параметры.

Abstract. In this paper results of measurements of "Alpinist" project vessels main engine torque vibrations have been considered. These measurements help determine coefficient of damper reliability and other reference diagnostic parameters.

Ключевые слова: демпфер, надежность, диагностика, "Альпинист", крутильные колебания
Key words: damper, reliability, diagnostics, "Alpinist", torque vibrations

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. Для защиты коленчатых валов от недопустимых крутильных колебаний современные ДВС оснащаются специальными устройствами – демпферами, которые поставляются рядом иностранных фирм как самостоятельное комплектующее изделие.

По данным Российского морского регистра судоходства (РМРС), фирма Hasse & Wrede определяет минимальный срок службы своих демпферов для судовых ДВС с $n > 600$ об/мин, равным 20 000 часов, а для ДВС с $n < 600$ об/мин – 30 000... 50 000 часов. Наиболее обстоятельные указания по техническому обслуживанию демпферов даны фирмой "STE-SCHWINGUNGSTECHNIK GmbH", которая поставляют свою продукцию для двигателей фирмы SKL (двигатели типов NVD36, NVD48, VD26/20, VD18/16, VD24/24, VD29/24 и др.). Согласно инструкции по техническому обслуживанию силиконовых демпферов крутильных колебаний, которые поставляются фирмой "STE-SCHWINGUNGSTECHNIK GmbH", минимальный срок службы при нормальной эксплуатации демпфера составляет 30 000 часов работы (Ефремов, 2007). Опыт эксплуатации демпферов показывает, что некоторая часть демпферов обрабатывает больше ресурса, заявленного фирмой-изготовителем.

Для определения технического состояния демпферов и их остаточного ресурса в правила РМРС включена "Методика диагностирования и определения остаточного ресурса силиконовых демпферов судовых ДВС" (Приложения..., 2008). Методика определяет диагностические параметры, по которым проводится определение технического состояния демпфера, включающие в себя: частоту свободных колебаний $N_{мэ}$, об/мин; амплитуду гармонической составляющей крутильных колебаний $A_{вэ}$, рад, и напряжений от них $\tau_{вэ}$, МПа, при резонансной частоте вращения и некоторые другие. Причем одно из ключевых мест среди них занимает уровень надежности демпфера для определения коэффициента надежности $K_{над}$. Значения диагностических параметров могут определяться несколькими методами, один из наиболее достоверных – определение по статистическому анализу результатов торсиографирования валопроводов установок однотипных судов при различных наработках двигателей с исправными демпферами.

2. Анализ результатов торсиографирований

Надежность демпфера будет определяться по результатам анализа замеров крутильных колебаний для двух судов типа "Альпинист" за период 12 лет. Замеры проводились сотрудниками ООО "ДиаМАНТ" совместно с кафедрой СЭУ МГТУ. Результаты замеров крутильных колебаний для резонансных частот и напряжений в коленчатых валах представлены на рис. 1 для М-183 "Дистинкт" и рис. 2 для М-182 "Вариант".

На главном двигателе судов типа "Альпинист" 8NVDA2U установлен силиконовый демпфер В-710 фирмы STE, с ресурсом 30 000 часов, поэтому в первом приближении за эталонное значение можно принять результаты диагностирования демпферов при наработке 30 000 часов и менее.

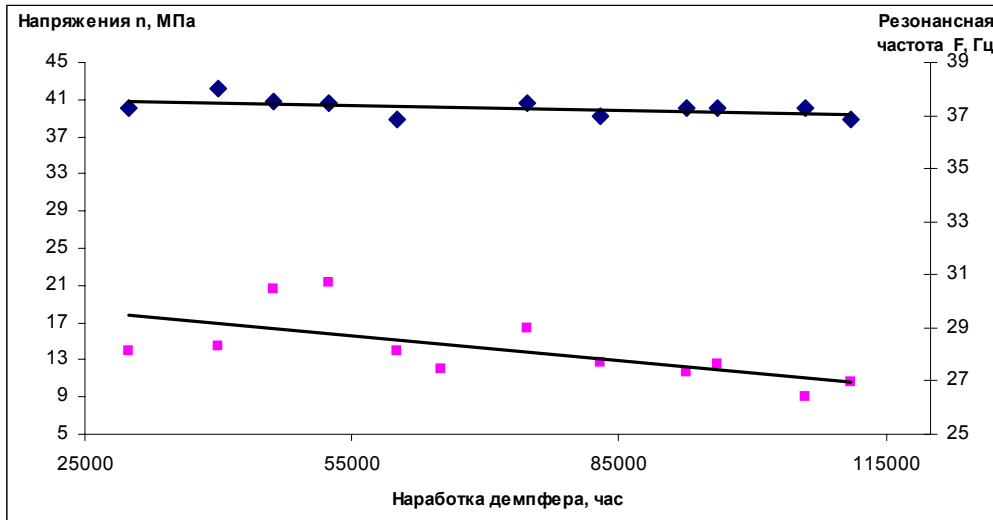


Рис. 1. Результаты замеров резонансных частот и напряжений для судна М-0183 "Дистинкт"

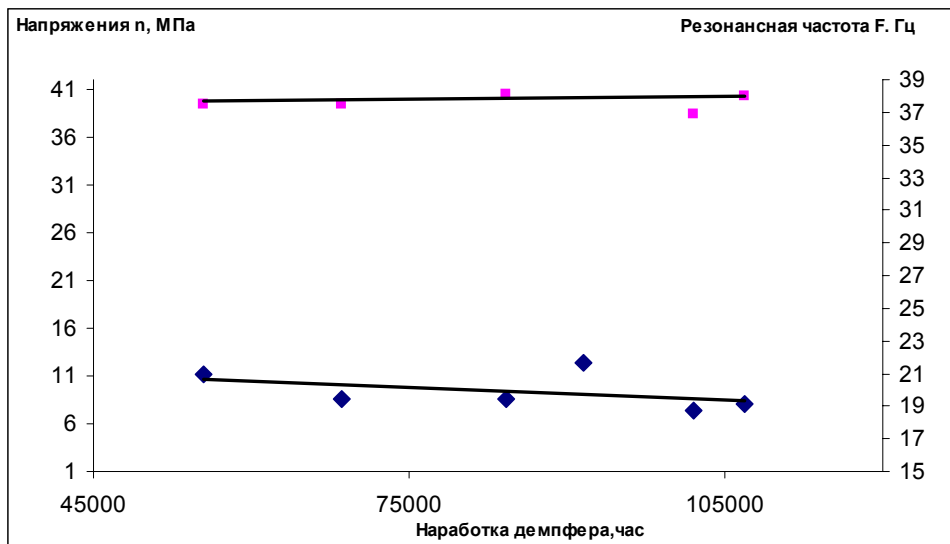


Рис. 2. Результаты замеров резонансных частот и напряжений для судна М-0182 "Вариант"

Учитывая, что результаты измерений амплитуд крутильных колебаний имеют большой разброс, проведем статистический анализ, проверив значимость результатов замеров амплитуд резонансных крутильных колебаний с помощью *t*-критерия (критерия Стьюдента) для малых выборок по известной формуле (Адлер и др., 1976)

$$t = (y_1 - y_i) / s(1/n + 1/n)^{0.5},$$

где y_1, y_i – средние значения замеров при диагностировании; s – ошибка опыта; n – количество наблюдений (замеров) в одном опыте. Так как измерения проводились в большинстве случаев при помощи одинаковой аппаратуры (радиоторсиограф конструкции ЦНИИ им. А.Н. Крылова РТ-660) при числе измерений в каждом замере не менее двух, ошибка опыта легко определяется для $n = 2$ и оказывается равной 1,72 МПа для значений напряжений в коленчатом валу и 0,6 Гц для резонансных частот колебаний. Табличное значение *t*-критерия для уровня значимости 5 % и числе степеней свободы 2 равно 4,3. Результаты попарного сравнения замеров приведены в табл. 1 и 2. Значения критерия *t* ни в одном случае не превышают табличных значений. Таким образом, с вероятностью $P = 1 - \alpha = 0,95$ можно считать, что различия между результатами замеров нет.

Таблица 1. Результаты обработки замеров для судна М-0183 "Дистинкт"

Наработка, час	Напряжения, МПа	t напр.	Резонансная частота, Гц	t рез. част.	Критерий для уровня значимости 0,5
30000	14		37,95		
40000	14,5	0,291	37,28	1,12	4,303
46159	20,6	3,843	38	0,08	4,303
52407	21,3	4,251	37,5	0,75	4,303
60000	13,9	0,058	37,49	0,77	4,303
65000	12	1,165	36,86	1,82	4,303
74730	16,4	1,398	37,49	0,77	4,303
83000	12,7	0,757	37	1,58	4,303
92600	11,6	1,398	37,28	1,12	4,303
96000	12,6	0,815	37,28	1,12	4,303
106000	9	2,912	37,28	1,12	4,303
111000	10,6	1,980	36,85	1,83	4,303
Среднее значение	14,1		37,36		
Стандартное отклонение	3,7		0,37		
Коэффициент вариации	0,26		0,01		

Таблица 2. Результаты обработки замеров для судна М-0182 "Вариант"

Наработка, час	Напряжения, МПа	t напр.	Резонансная частота, Гц	t рез. част.	Критерий для уровня значимости 0,5
55500	11,2	1,630	37,49	0,77	4,303
68576	8,5	3,203	37,49	0,77	4,303
84173	8,6	3,144	38,13	0,30	4,303
91500	12,3	0,990	39,4	2,42	4,303
102000	7,3	3,901	36,85	1,83	4,303
106850	8	3,494	38	0,08	4,303
Среднее значение	9,3		37,89		
Стандартное отклонение	1,97		0,87		
Коэффициент вариации	0,21		0,02		

Таким образом, обработка результатов замеров показывает, что демпфер А-710, будучи установленным на главный двигатель судов типа "Альпинист", является надежным, о чем говорит как отсутствие разницы в резонансных напряжениях в коленчатом валу двигателя при наработке от 30 до 110 тыс. часов (при гарантированном ресурсе 30 тыс. часов), так и величины напряжений, равных в среднем 14 МПа (при допустимых по правилам РМРС для данных частот вращения – 38 МПа) и практически не меняющаяся резонансная частота.

3. Анализ причин, обуславливающих надежность демпфера

Выясним причины повышенной работоспособности демпфера А-710 на главном двигателе судов типа "Альпинист". Физически износ демпфера заключается в деградации силиконовой жидкости и износе подшипников массы демпфера. Износ подшипников является определяющим фактором и пропорционален суммарному пути и работе трения при перемещении массы демпфера относительно ступицы (Ефремов, 2007).

МДК (машинно-движущий комплекс) судовой энергетической установки СРСТ типа "Альпинист" состоит из главного двигателя 8NVDA2U, главного и раздаточного редукторов, промежуточного вала, механизма изменения шага, гребного вала, гребного винта регулируемого шага, валогенераторов. Наличие валогенератора переменного тока обуславливает работу главного двигателя на

постоянной частоте вращения, равной 428 об/мин. Частота свободных колебаний (расчетная) системы вращающихся масс на данном проекте равна 38,55 Гц. Но максимальная амплитуда крутильных колебаний определяется не только значением резонансной частоты, но зависит и от векторной суммы (суммы α), характеризующей подвод энергии к колебательной системе. Векторные суммы для данного МДК приведены в табл. 3.

Таблица 3. Векторные суммы

Порядок колебаний	Резонансная частота вращения, об/мин	Сумма α
3,5	660	1,8
4	578	4,6
4,5	514	1,8
5	462	0,23
5,5	420	0,38
6	385	0,07
6,5	355	0,38
7	330	0,23
7,5	308	1,8
8	289	4,58
8,5	272	1,8
9	257	0,23
9,5	243	0,38

Из табл. 3 видно, что наибольшие возмущающие моменты будут при значении суммы α , равном 4,6 при резонансных частотах вращения 289 и 578 об./мин. Частота 289 об./мин. попадает в рабочий диапазон частот вращения, но только при проходе с режима прогрева на номинальные обороты. Частота 578 об./мин. лежит значительно выше рабочего диапазона. Графически это иллюстрируется на рис. 3, где показаны резонансные зоны для МДК.

Износ демпфера происходит при резонансе на частоте вращения, соответствующей наибольшему значению суммы α , по этой причине необходимо избегать длительной работы двигателя в запретной зоне. Поэтому прогрев двигателя производится при частоте вращения на 40-50 об./мин. ниже запретной зоны, а затем осуществляется быстрый проход через запретную зону и вывод на номинальный режим работы.

Другим источником возбуждающих моментов являются вынужденные колебания на номинальной частоте вращения двигателя. Но, как показывает опыт, при исправном демпфере значения напряжений от вынужденных колебаний не превышают 10-12 МПа.

Таким образом, большие наработки демпфера объясняются тем, что демпфер практически не работает на большей части скоростных режимов двигателя, за исключением прохода из режима прогрева на номинальные обороты. Масса демпфера не перемещается относительно ступицы и не происходит износа подшипников.

Тем не менее, есть еще один момент, на который необходимо обращать внимание при больших наработках демпфера: постепенное ухудшение их состояния связано с изнашиванием подшипников демпфера и накоплением продуктов износа в слое силиконовой жидкости. Это приводит к повышению работы трения и интенсивности изнашивания. Причем, как это следует из диагностической модели демпфера, трение нарастает нелинейно, а затем происходит резкое падение коэффициента затухания до нуля – схватывание и заклинка массы с полной потерей демпфирующих свойств (Ефремов, Сергеев, 2004).

4. Выводы

Демпфер А-710 главного двигателя 8NVD48A2U судов типа "Альпинист" является надежным, и ему можно присвоить коэффициент надежности (по требованиям методики диагностики) $K_{над} = 1$.

За эталонные значения диагностических параметров следует принять значения напряжений в коленчатом валу равными $9,3 \pm 1,93$ МПа для прочих судов проекта (14,1 МПа для М-0183 "Дистинкт") и значения резонансной частоты крутильных колебаний равной $37,36 \pm 0,87$ Гц.

Учитывая, что при наработках более 100 тыс. часов демпфер находится в зоне, в которой износ может иметь нелинейный характер, что может привести к заклинке массы демпфера и полной потере им демпфирующих свойств, проводить контроль технического состояния следует не реже, чем через 5 тыс. часов наработки.

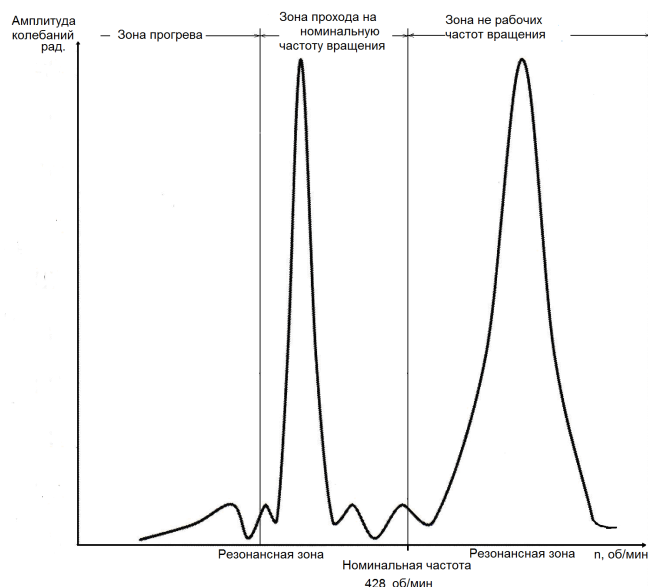


Рис. 3. Расположение резонансных зон

Для более существенного увеличения межповоротного интервала или полного отказа от проведения проверок необходимо провести теоретический расчет величины напряжений для крутильной системы как для демпфера с заклиненной массой, так и для демпфера с полным отсутствием силиконовой жидкости. При этом необходимо учитывать и величины напряжений от вынужденных колебаний на номинальной частоте вращения для указанных состояний демпфера.

Литература

- Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., Наука, 278 с., 1976.
- Ефремов Л.В., Сергеев К.О. Виброизмерительный метод исследования свойств демпфера крутильных колебаний. Вестник МГТУ, т.7, № 3, с.441-451, 2004.
- Ефремов Л.В. Теория и практика исследования крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. СПб., Наука, с.274, 2007.
- Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. Приложение 38. СПб., РМРС, 2008.