РОССИЙСКИЙ РЕЧНОЙ РЕГИСТР

РАСЧЕТ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ

Руководство Р.008-2004

РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДОВ И АГРЕГАТОВ

Руководство Р.009-2004



Москва
2016

gost.e-ecolog.ru

Ответственный за выпуск – С. В. Канурный

Оригинал-макет – Е. Л. Багров

Никакая часть настоящего издания не может для целей продажи воспроизводиться, закладываться в поисковую систему или передаваться в любой форме или любыми средствами, включая электронные, механические, фотокопировальные или иные средства, без получения предварительного письменного разрешения федерального автономного учреждения «Российский Речной Регистр».

© Российский Речной Регистр, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

РАСЧЕТ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ

Руководство Р.008-2004

1 Общие положения 7
1.1 Область распространения 7
1.2 Определения и обозначения 7
1.3 Объем требуемых расчетов 10
2 Расчет сил и моментов, действующих на коренные и шатунные шейки коленчатого вала 12
2.1 Назначение расчета 12
2.2 Последовательность расчета 12
3 Расчет напряжений в элементах конструкции коленчатого вала с помощью одномерной модели 16
3.1 Общие замечания 16
3.2 Порядок расчета напряжений с помощью одномерной модели 17
3.3 Расчет напряжений в коренной шейке 18
3.4 Расчет напряжений в щеке 22
3.5 Расчет напряжений в шатунной шейке 25
3.6 Расчет напряжений в элементах конструкции коленчатого вала для пусковых условий 27
3.7 Допускаемые напряжения 31
4 Расчет коленчатого вала на усталостную прочность с помощью одномерной модели 33
4.1 Допущения 33
4.2 Порядок расчета вала на усталостную прочность 34
4.3 Расчет коренной шейки на усталостную прочность 35
4.4 Расчет шатунной шейки на усталостную прочность 39

4.5 Расчет щеки на усталостную прочность 45
4.6 Допускаемые значения коэффициентов запаса прочности 47
5 Расчет напряженного состояния коленчатого вала с применением дискретных моделей метода конечных элементов 49
5.1 Цель расчета 49
5.2 Порядок и особенности расчета прочности 49
5.3 Моделирование внешних нагрузок 50
5.4 Свойства применяемых материалов 51
5.5 Расчет нагрузок и напряжений 51
6 Расчет коленчатого вала на усталостную прочность в случае определения напряжений с помощью *3D* моделей, использующих МКЭ 53
6.1 Общие замечания 53
6.2 Методика расчета 53
6.3 Оценка безопасности по критериям статической и усталостной прочности 56
Приложение. Примеры расчета коленчатого вала на прочность 57
Литература 68

РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДОВ И АГРЕГАТОВ

Руководство Р.009-2004

Введение 71
1 Общие положения 71
2 Содержание и оформление расчета крутильных колебаний 74
3 Измерение крутильных колебаний 80
3.1 Условия проведения испытаний 80
3.2 Параметры крутильных колебаний и места их измерения 81
3.3 Режимы испытаний 82
3.4 Обработка результатов испытаний 84
4 Предварительное заключение по результатам испытаний 85
5 Окончательное заключение по результатам испытаний 85

РОССИЙСКИЙ РЕЧНОЙ РЕГИСТР

РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДОВ И АГРЕГАТОВ

Руководство
Р.009-2004



Москва
2016

Утверждено	приказами Российского Речного Регистра от 24.12.2004 № 32-п, от 08.09.2016 № 48-п (Извещение № 1 об изменении)
Введено в действие	с 07.02.2005, Извещение № 1 об изменении — с 14.09.2016
Издание	1

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее руководство содержит требования к оформлению и порядку представления Российскому Речному Регистру (далее – Речному Регистру) материалов по расчету и измерению крутильных колебаний, а также к условиям проведения испытаний с целью определения параметров крутильных колебаний (амплитуд колебаний, напряжений, моментов, в отдельных случаях — температуры).

Руководство предназначено для специалистов Речного Регистра, проектных организаций и организаций, выполняющих расчеты и занимающихся экспериментальным определением параметров крутильных колебаний.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Настоящее руководство содержит требования к содержанию и оформлению расчетов крутильных колебаний и отчетов о проведении испытаний на крутильные колебания (далее – испытания) судовых движительных (дизельных и гребных электрических) установок (далее – установки), дизельных двигателей, испытываемых на стендах организаций–изготовителей (далее – двигатели), а также дизель–генераторных, дизель–редукторных, дизель–компрессорных и дизель–насосных агрегатов (далее – агрегаты) мощностью 110 кВт и более.

1.2 Расчеты крутильных колебаний установок, двигателей или агрегатов представляются Речному Регистру при согласовании:

.1 технического проекта нового судна;

.2 технического проекта нового двигателя или агрегата;

.3 технической документации переоборудуемого, модернизируемого, восстанавливаемого, обновляемого или переклассифицируемого судна в случаях, перечисленных в 1.3.

При оформлении указанных выше расчетов крутильных колебаний учитываются требования 6.1.3 ч. IV ПКПС.

1.3 При разработке технической документации переоборудуемого, модернизируемого, восстанавливаемого, обновляемого или переклассифицируемого судна расчеты крутильных колебаний выполняются в случае:

.1 установки на судно главного двигателя, марка которого отличается от марки спецификационного двигателя судна;

.2 установки на судно двигателя той же марки, что и спецификационный, но с повышенным наддувом, или с другой конструкцией коленчатого вала, или с поршнями, изготовленными из другого материала;

.3 установки другого маховика или выполнения проточки существующего, если момент инерции нового маховика отличается от прежнего на 10% и более;

.4 установки дополнительного маховика;

.5 установки демпфера крутильных колебаний (динамического виброгасителя), его изъятия или замены на демпфер (динамический виброгаситель) с другими техническими характеристиками; ремонте демпфера (динамического виброгасителя) с изменением демпфирующих или упругих характеристик (изменение марки силиконовой жидкости, зазоров в силиконовом демпфере, материала или размеров маховика, пружинных пакетов, диаметра пальцев динамического виброгасителя и т. п.);

.6 установки упругой муфты, ее изъятия или замены на муфту с другими техническими характеристиками;

.7 установки гребного винта других размеров или изготовленного из другого материала, или обрезки лопастей существующего винта, причем момент инерции нового винта или винта с обрезанными лопастями отличается от прежнего на 10% и более;

.8 установки дополнительного приемника мощности (валогенератора, насоса и т. п.), его изъятия или замены на приемник мощности другой марки, если момент инерции приемника соизмерим с моментом инерции кривошипно–шатунного механизма рабочего цилиндра;

.9 изменения диаметра валов на 2% и более. Полный расчет крутильных колебаний в этом случае допускается не представлять, если будет показано, что изменение диаметра отдельных участков вала не приводит к развитию опасных крутильных колебаний;

.10 модернизации агрегата с заменой двигателя (генератора, редуктора, компрессора, насоса) на двигатель (генератор, редуктор, компрессор, насос) другой марки.

1.4 Если на вновь проектируемом судне используется движительная установка, аналогичная одобренной ранее, то расчеты крутильных колебаний, выполненные для судна–прототипа, по согласованию с Речным Регистром могут быть распространены на вновь проектируемое судно.

1.5 По согласованию с Речным Регистром результаты расчета крутильных колебаний могут быть представлены в начальной стадии разработки рабочих чертежей. Без представления результатов расчетов крутильных колебаний рабочие чертежи движительной установки судна Речным Регистром не согласовываются.

1.6 Измерения крутильных колебаний производят:

.1 на головных/типовых установках, двигателях, агрегатах;

.2 на серийных или отремонтированных установках, двигателях, агрегатах при их модернизации или ремонте, вызвавших изменения в крутильно–колеблющейся системе в случаях, указанных в 1.3 и для которых представляются расчеты крутильных колебаний. Если после изменения конструкции

или технических характеристик отдельных элементов системы расчеты крутильных колебаний не выявляют существенных отклонений параметров крутильных колебаний в опасную сторону* по сравнению с результатами расчетов и измерений, полученными до внесения этих изменений, то по согласованию с Речным Регистром измерение параметров крутильных колебаний можно не производить;

.3 на эксплуатируемых установках, двигателях, агрегатах при периодических контрольных испытаниях для проверки эффективности работы демпферов крутильных колебаний или специальных устройств для снижения амплитуд крутильных колебаний после определенного срока их эксплуатации, предусмотренного техническими условиями или рекомендациями организации–изготовителя;

.4 при проведении контрольных испытаний после ремонта демпферов крутильных колебаний или специальных устройств для снижения амплитуд крутильных колебаний, если в процессе ремонта выполнены изменения, меняющие их демпфирующие или упругие характеристики (см. 1.3.5).

1.7 Испытания каждой конкретной установки, двигателя, агрегата производят в соответствии с программой испытаний (далее – программа), в которой учитываются их конструкция, назначение и режимы работы. Программу разрабатывают в соответствии с требованиями настоящего руководства и согласовывают с Речным Регистром. Допускается применение типовых программ, согласованных с Речным Регистром.

1.8 Результаты испытаний установок, двигателей и агрегатов оформляют в виде предварительного и окончательного заключения. Предварительное заключение оформляют в течение 10 календарных дней после завершения испытаний. Окончательное заключение по результатам испытаний установок, двигателей и агрегатов представляют Речному Регистру не позднее трех месяцев после проведения испытаний.

Срок рассмотрения Речным Регистром каждого из указанных выше заключений (первичное, вторичное и т.д. рассмотрение) не должен превышать 10 рабочих дней.

1.9 Если в окончательном заключении, при подготовке которого выполняются более тщательные исследования по сравнению с подготовкой предварительного заключения, запретная зона частот вращения вала окажется иной, чем указанная в предварительном заключении, то необходимые изменения должны быть внесены в эксплуатационную документацию установки, двигателя, агрегата и в документы, выдаваемые Речным Регистром.

---

* Здесь и далее существенными отклонениями параметров крутильных колебаний в опасную сторону считаются такие отклонения, при которых их значения достигают 80 % значений, допускаемых для длительной работы.

1.10 По результатам испытаний в актах освидетельствования судна и механизмов делается запись о наличии или отсутствии запретных зон частот вращения.

1.11 Результаты испытаний установки головного судна распространяются на все установки судов данной серии и отражаются в документах, выдаваемых Речным Регистром на суда. Результаты испытаний головного образца двигателя, агрегата распространяются на все двигатели, агрегаты данной серии и отражаются в технической документации.

1.12 Результаты испытаний головного/типового образца двигателя, агрегата и его приведенную крутильную схему рекомендуется включать в эксплуатационную документацию серийных двигателей, агрегатов данного типа.

2 СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ РАСЧЕТА КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

2.1 Результаты расчета крутильных колебаний установки, двигателя или агрегата, представляемые Речному Регистру при согласовании технической документации, должны содержать все сведения, указанные в 2.3—2.10, при этом форма представления расчетных материалов не регламентируется.

2.2 Расчет крутильных колебаний должен содержать результаты определения параметров свободных колебаний, возмущающих моментов и резонансных колебаний. Рекомендуется произвести также расчет вынужденных колебаний. В случае необходимости Речной Регистр может дополнительно запросить полный расчет со всеми промежуточными вычислениями.

2.3 В расчете крутильных колебаний приводятся формулы, которые использовались для выполнения расчетов (со ссылками на источники, из которых эти формулы заимствованы), а также полученные результаты расчета параметров свободных колебаний, возмущающих моментов и параметров резонансных колебаний с изложением кратких пояснений к расчетам. Рекомендуется произвести также расчет вынужденных колебаний. В случае необходимости Речной Регистр дополнительно запрашивает полный расчет со всеми промежуточными вычислениями.

2.4 В разделе «Общие сведения» даются краткая характеристика судна и описание движительной установки, двигателя или агрегата.

Применительно к судну приводятся следующие данные:

тип;

наименование судна (если к этому времени оно присвоено);

автор и номер проекта;

место и дата постройки (для построенного судна).

Для судов водоизмещением более 1000 т дополнительно указывают:

главные размерения;

водоизмещение (дедвейт);

класс Речного Регистра;

расположение машинного отделения (по длине судна).

2.5 В разделе «Исходные данные» приводятся основные характеристики и размеры элементов системы, при этом размерность параметров представляется в единицах СИ; не допускается использование единиц измерения см, $см^3$ вместо м, $м^3$ и т. д.

Должны быть указаны следующие данные:

.1 по двигателям внутреннего сгорания:

марка;

изготовитель;

тип (простого, двойного действия, с ПДП);

тактность;

рядность (рядный, V-образный, W-образный, звездообразный);

номинальная частота вращения;

тип шатуна бокового цилиндра V-образного двигателя (прицепной, центральный);

количество цилиндров;

механический к.п.д. двигателя;

давление наддува;

среднее эффективное давление;

давление конца сжатия;

степень сжатия;

масса поршня в сборе;

масса шатуна в сборе;

диаметр цилиндра;

угол поворота коленчатого вала, соответствующий интервалу между вспышками в цилиндрах, связанных с данным коленом (для нерядных двигателей);

радиус кривошипа;

отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;

угол поворота коленчатого вала между ВМТ первого цилиндра правого и левого блоков (для V-образного двигателя);

мощность двигателя в кВт;

количество цилиндров, работающих на одно колено;

минимально-устойчивая частота вращения;

последовательность вспышек в рабочих цилиндрах (порядок работы колен для V-образных двигателей);

размерная податливость и размерный момент инерции первого колена;

диаметры коренных и шатунных шеек коленчатого вала;

длина шатуна;

длины шатунной и коренной шеек;

материал коленчатого вала и его временное сопротивление на растяжение.

При отсутствии крутильной схемы двигателя, разработанной в организации–изготовителе, приводится эскиз коленчатого вала с указанием основных размеров конструктивных элементов вала, демпфера и маховика и номеров рабочих чертежей;

.2 по демпферам крутильных колебаний:

тип;

марка и/или номер чертежа;

изготовитель;

коэффициент демпфирования (рекомендуется);

первоначальная и предельно допускаемая вязкость демпфирующей жидкости вязкостных демпферов (рекомендуется);

момент инерции маховой массы (кольца);

момент инерции ступицы;

количество пружинных пакетов (для пружинных демпферов);

суммарная податливость (жесткость) пружинных пакетов;

форма колебаний, на которую настроен демпфер;

.3 по гребным винтам:

тип гребного винта;

номер чертежа;

диаметр;

шаговое отношение;

дисковое отношение;

число лопастей;

материал винта;

маховой момент или размерный момент инерции винта;

присоединенный размерный момент инерции воды (рекомендуется);

натяг (осевое перемещение) винта и соответствующий ему момент трения на сопрягаемых поверхностях ступицы винта и конусе гребного вала (рекомендуется);

.4 по упругим муфтам:

тип;

марка и/или номер чертежа;

изготовитель;

номинальный крутящий момент и соответствующий угол скручивания;

максимальный крутящий момент и соответствующий угол скручивания;

переменный момент, допустимый для длительной работы и для быстрого перехода;

допускаемая температура резинового элемента;

момент инерции;

податливость динамическая;

коэффициент демпфирования (относительное демпфирование);

.5 по редукторам:

тип;

марка;

изготовитель;

номер чертежа;

передаточные отношения для всех вариантов включения;

механический к. п. д. или к. п. д. каждого зацепления;

расчетный крутящий момент;

диаметры и материалы валов;

моменты инерции шестерен;

.6 по генераторам и гребным электродвигателям:

тип;

марка;

изготовитель;

мощность;

частота вращения;

момент инерции ротора;

.7 по упорным, промежуточным и гребным валам:

наименьший диаметр;

длина;

размеры облицовки;

материал вала и его временное сопротивление на растяжение.

Приводится структурная схема или эскиз крутильно–колеблющейся системы с указанием позиций, размеров и номеров чертежей основных элементов.

2.6 В разделе «Составление крутильной схемы системы» даются приведенная крутильная схема (расчетная схема эквивалентной приведенной системы) и сводная таблица данных, характеризующих крутильно–колеблющуюся

систему. Таблица должна содержать наименования масс и соединений (участков валопровода), передаточные отношения, диаметры, минимальные моменты сопротивления сечений участков валопровода, податливость соединений, моменты инерции масс.

Крутильную схему рекомендуется воспроизводить в принятом для этой области знаний виде, то есть колеблющиеся массы должны быть показаны с помощью плоских дисков, диаметр которых пропорционален моменту инерции массы, а соединения — в виде прямых линий, длина которых пропорциональна податливости соединений. Допускается размещение данных, характеризующих крутильно–колеблющуюся систему, непосредственно на изображении крутильной схемы.

Для главных дизель–электрических установок, установок с гидравлическими или электромагнитными муфтами, а также установок с различными вариантами включения агрегатов расчетные схемы приводятся отдельно для каждой части установки (например, «главный дизель – генератор» и «гребной электродвигатель – гребной винт» или «дизель – ведущая полумуфта» и «ведомая полумуфта – винт») или для каждого варианта включения агрегатов.

2.7 В разделе «Расчет свободных колебаний» приводятся результаты определения всех форм свободных колебаний, имеющих резонансы до 12-го порядка включительно в диапазоне частот вращения $(0\div1{,}2)n_{ном}$, для каждой самостоятельной части установки или каждого варианта ее включения.

Для каждой рассматриваемой формы колебаний определяются следующие параметры:

частота колебаний;

относительные амплитуды колебаний масс и амплитуды эластических (переменных) моментов в соединениях;

масштабы напряжений (моментов) всех участков системы.

Результаты расчета свободных колебаний всех рассматриваемых форм колебаний и вариантов (режимов) работы установки приводятся в табличной форме. В качестве иллюстраций приводятся графики амплитуд свободных колебаний всех выявленных форм.

2.8 В разделе «Расчет возмущающих моментов» приводятся таблица значений возмущающего момента в зависимости от частоты вращения вала и порядков гармоник возмущающего момента и графики изменения возмущающего момента в зависимости от частоты вращения для главных порядков гармоник этого момента. Если расчеты выполнены с помощью компьютерного приложения, одобренного Речным Регистром, допускается приводить только фрагмент таблицы и полные графики изменения возмущающего момента.

2.9 В разделе «Расчет резонансных колебаний» для главных порядков, расположенных в рабочем диапазоне, а также для всех порядков, расположенных в диапазоне $(0{,}85 \div 1{,}05)n_{ном}$, приводятся:

значения резонансных частот вращения для каждого из рассматриваемых порядков гармоник возмущающего момента и всех выявленных форм (частот) колебаний;

данные о геометрических суммах векторных диаграмм;

данные о фрикционной стойкости двигателя и масс системы (рекомендуется);

результаты определения резонансной амплитуды колебаний первой массы различными способами (рекомендуется);

сводные данные о значениях амплитуд колебаний первой массы, определенных различными способами, и значениях выбранных амплитуд колебаний первой массы;

расчетные и допускаемые напряжения (моменты) во всех соединениях системы (валах, муфтах, генераторах, прессовых или прессово-шпоночных соединениях и т. п.) для всех рассматриваемых порядков гармоник возмущающего момента и форм крутильных колебаний.

Перечисленные выше данные рекомендуется представлять в табличной форме. Если расчеты выполнены с помощью компьютерного приложения, одобренного Речным Регистром, допускается приводить только фрагменты указанных таблиц.

Для упругих муфт могут быть приведены значения расчетных температур их резиновых элементов.

Допускаемые значения напряжений (моментов) принимают в соответствии с 6.2 ч. IV ПКПС, при этом могут быть учтены данные организаций–изготовителей соответствующего оборудования.

При необходимости учета одновременного действия возмущающих моментов нескольких порядков расчет должен содержать определение суммарных напряжений (моментов) с учетом сдвига фаз гармонических составляющих возмущающего момента.

В разделе приводятся также таблицы и графики изменения околорезонансных напряжений (моментов) для тех порядков рассчитываемых форм колебаний, резонансные напряжения (моменты) от которых равны или больше 80% значений, допускаемых для длительной работы. На графики должны быть нанесены кривые изменения значений напряжений (моментов), допускаемых для длительной работы и быстрого прохода через резонанс, в зависимости от частоты вращения, а также запретные зоны частот вращения (если они есть), ширина которых определяется в соответствии с требованиями 6.4 ч. IV ПКПС.

Допускаемые напряжения для участка гребного вала, расположенного в нос от кормового дейдвудного уплотнения, рекомендуется принимать:

при дейдвудном устройстве с неметаллическими подшипниками – как для гребного вала;

при дейдвудном устройстве с металлическими подшипниками и масляной смазкой – как для промежуточного вала.

2.10 В заключительном разделе расчета крутильных колебаний приводятся выводы об отсутствии запретных зон в рабочем диапазоне частот вращения или о необходимости назначения таких зон, их расположении и ширине. В необходимых случаях даются рекомендации, подтвержденные соответствующим расчетом, по изменению отдельных элементов установки или эксплуатационных режимов ее работы.

3 ИЗМЕРЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

3.1 Условия проведения испытаний

3.1.1 Испытания установок, двигателей или агрегатов выполняются при техническом наблюдении Речного Регистра по программе испытаний, согласованной с Речным Регистром. До проведения испытаний заказчики работ и (или) исполнители работ предварительно согласовывают с Речным Регистром порядок проведения испытаний и объем проверок, которые будут выполняться экспертом(ами) Речного Регистра при выполнении работ по измерению параметров крутильных колебаний установок, двигателей или агрегатов.

Эксперт Речного Регистра, осуществляющий техническое наблюдение за проведением испытаний, до начала испытаний должен ознакомиться с расчетом крутильных колебаний (см. 6.3.1 ч. IV ПКПС).

3.1.2 Испытания установок производят при осадке, соответствующей эксплуатационному состоянию судна в балласте или при полной осадке. Если в результате испытаний при осадке, соответствующей состоянию судна в балласте, будет определено, что напряжения в коленчатом вале или в какомлибо вале валопровода равны или превышают 80% значения, допускаемого для длительной работы, то необходимо повторить испытания при полной осадке судна. Испытания головного судна при полной осадке допускается производить в первом эксплуатационном рейсе.

3.1.3 Испытания двигателей, агрегатов, как правило, должны производиться в организации–изготовителе двигателя, агрегата. Если соединение двигателя со штатным генератором, редуктором, компрессором, насосом и т. п. производится при монтаже агрегата на судне, то испытания допускается производить на судне.

3.1.4 В ходе испытаний двигателей и агрегатов должна быть предусмотрена возможность достижения их номинальной мощности.

3.1.5 Двигатели должны быть отрегулированы так, чтобы отклонения параметров рабочего процесса в каждом цилиндре от их средних по цилиндрам значений не превышали значений, указанных в документации организации-изготовителя.

3.2 Параметры крутильных колебаний и места их измерения

3.2.1 Параметры крутильных колебаний и места их измерения определяют в зависимости от типа установки, двигателя или агрегата.

3.2.2 При торсиографировании установок, двигателей и агрегатов амплитуду колебаний измеряют на свободном конце коленчатого вала. Кроме этого, дополнительно должна быть измерена амплитуда колебаний и/или напряжений в элементах валопровода:

.1 при наличии упругих, гидравлических разобщительных муфт, а также редукторных и реверс-редукторных передач, причем измерения выполняют за этими элементами;

.2 если расчетные значения напряжения в валопроводе дизельных и гребных электрических установок больше 80% значений, допускаемых для длительной работы.

3.2.3 В дизель–редукторных установках с двумя двигателями, работающими на один винт, измерение амплитуды колебаний на свободном конце коленчатого вала необходимо производить:

при одинаковых двигателях и одинаковых расчетных схемах каждой из ветвей системы до редуктора — на одном из двигателей;

при различных двигателях и/или различных крутильных схемах каждой из ветвей системы до редуктора — на каждом двигателе.

3.2.4 Если в составе крутильно–колеблющейся системы есть упругая муфта, то при испытаниях измеряют температуру резинового элемента и деформацию скручивания упругой муфты (рекомендуется). Точка измерения температуры резинового элемента упругой муфты должна располагаться в месте его наибольшей деформации и на максимальном удалении от поверхности с наиболее интенсивным отводом теплоты.

3.2.5 В установках с несколькими винтами измерения в соответствии с 3.2.2 производят:

на двухвинтовом судне (две крутильно–колеблющиеся системы) при одинаковых расчетных схемах обеих систем – на элементах одной из крутильно–колеблющихся систем;

на двухвинтовом судне (две крутильно–колеблющиеся системы) при различных расчетных схемах крутильно–колеблющихся систем – на элементах обеих систем;

на трехвинтовом судне (три крутильно–колеблющиеся системы) с одинаковыми расчетными схемами бортовых систем – на элементах средней и одной из бортовых систем;

на трехвинтовом судне (три крутильно–колеблющиеся системы) с различными схемами бортовых систем – на элементах всех трех систем.

3.2.6 Если при расчете крутильных колебаний в крутильно–колеблющейся системе с дополнительными приемниками мощности выявлены опасные формы колебаний, то дополнительно должны производиться измерения на свободном конце вала приемника мощности или в элементах его привода.

3.3 Режимы испытаний

3.3.1 Испытания производят во всем диапазоне изменения частоты вращения от минимально устойчивой до максимальной. Особое внимание при испытаниях должно быть уделено измерению амплитуд колебаний и/или напряжений в диапазонах частот вращения, близких к резонансным при той или иной форме (частоте) колебаний, а также в околорезонансных областях изменения частоты вращения.

3.3.2 Производится не менее двух циклов измерений при равномерном изменении частоты вращения вала от минимально устойчивой до максимальной и обратно со скоростью, достаточной для полного развития колебаний. Автоматизированные установки и агрегаты переводят при этом на ручное управление. Допускается производить измерения, разбивая весь диапазон частоты вращения от минимально устойчивой до максимальной на несколько поддиапазонов. Между измерениями в каждом из поддиапазонов должны быть выдержаны промежутки времени, достаточные для установления скорости судна, соответствующей исследуемому поддиапазону частоты вращения.

3.3.3 Измерения должны быть также выполнены на следующих фиксированных скоростных режимах:

.1 при частотах вращения, соответствующих спецификационным режимам работы установки, агрегата;

.2 при двух, как минимум, частотах вращения, значения которых больше каждой из указанных в .1, и при двух — меньше каждой из указанных в .1, с интервалом между ними не менее 3 % от значения соответствующей исследуемому спецификационному режиму частоты вращения;

.3 при частотах вращения, для которых расчетные или измеренные согласно 3.3.2 значения напряжений превышают 80 % значений, допускаемых для длительной работы;

.4 при двух, как минимум, частотах вращения, значения которых больше каждой из указанных в .3, и при двух — меньше каждой из указанных в .3, с интервалом между ними не менее 3 % от значения этой потенциально опасной частоты вращения.

3.3.4 Если расчетные или измеренные согласно 3.3.2 значения резонансных напряжений превышают 80% значений, допускаемых для длительной работы, дополнительно производят измерения при переходах через соответствующие резонансные частоты вращения с ближайшего спецификационного режима работы, расположенного ниже резонанса, на ближайший спецификационный режим, расположенный выше этого резонанса, и обратно. В установках и агрегатах с дистанционным автоматическим управлением (ДАУ) двигателем измерения производят как при автоматическом, так и при ручном управлении.

3.3.5 При наличии в составе крутильно-колеблющейся системы установки, агрегата упругой муфты, а также если по расчету в диапазоне от нуля до минимально устойчивой частоты вращения расположен резонанс, производят измерения при пуске двигателя до развития минимально устойчивой частоты вращения и при останове двигателя.

3.3.6 В двухвинтовых установках измерения на элементах одной из бортовых крутильно–колеблющихся систем согласно 3.3.2 – 3.3.4 производят при выполнении следующих условий:

.1 оба валопровода вращаются с одинаковой частотой вращения;

.2 двигатель второго валопровода остановлен.

3.3.7 В трехвинтовых установках измерения на элементах средней крутильно–колеблющейся системы согласно 3.3.2 – 3.3.4 производят при выполнении каждого из следующих условий:

.1 оба бортовых валопровода вращаются с номинальной частотой вращения;

.2 один бортовой валопровод вращается с номинальной частотой вращения, двигатель второго валопровода остановлен;

.3 двигатели обоих бортовых валопроводов остановлены.

3.3.8 В дизель–редукторных установках с двумя двигателями, работающими на один винт, измерения должны производиться:

.1 при одном отключенном двигателе согласно 3.3.2;

.2 при работе обоих двигателей на частотах вращения, указанных в 3.3.3.

3.3.9 В установках с редукторами, имеющими несколько ступеней редукции переднего хода, измерения выполняют на каждой ступени редукции.

3.3.10 В установках и агрегатах с редукторами и/или упругими муфтами должны также производиться измерения при отключении подачи топлива в один из цилиндров двигателя. При этом отключают тот цилиндр, без учета которого расчетная геометрическая сумма векторных диаграмм изменяется в наибольшей степени.

3.3.11 В установках с крыльчатыми движителями измерения производят на режимах, указанных в 3.3.2 и 3.3.7, при угле поворота лопастей крыльчатого движителя, соответствующем полному переднему ходу судна, и на нулевом угле поворота лопастей, а в случае необходимости – и при промежуточных значениях угла поворота лопастей.

3.3.12 В сложных установках, имеющих несколько двигателей и/или несколько дополнительных приемников мощности, которые могут включаться в работу в различных сочетаниях, измерения производят при всех возможных в эксплуатации вариантах их включения, для которых выполнены расчеты параметров крутильных колебаний.

3.3.13 В установках с редукторами, у которых схемы ступеней редукции переднего и заднего ходов неодинаковы, дополнительно измеряются амплитуды колебаний или напряжений при движении судна задним ходом.

3.3.14 Измерение температуры резиновых элементов упругих муфт производят на режимах, указанных в 3.3.3. На каждом режиме выполняют несколько измерений через каждые 15 мин работы. Остановки двигателей для выполнения измерений не должны превышать 3 мин.

Если в двух соседних измерениях температура резиновых элементов муфты не изменяется, или если в последующем измерении эта температура окажется ниже, чем в предыдущем, измерения считают полностью выполненными.

3.3.15 Испытания эксплуатируемых установок, двигателей, агрегатов при наличии в них специальных устройств для снижения амплитуд крутильных колебаний допускается производить по сокращенной программе, достаточной для оценки технического состояния этих специальных устройств.

3.4 Обработка результатов испытаний

3.4.1 Определение резонансных амплитуд колебаний (напряжений) производят по наибольшим значениям амплитуд на рассматриваемой части торсиограммы (осциллограммы).

3.4.2 При определении амплитуд колебаний или напряжений от вынужденных крутильных колебаний необходимо производить гармонический анализ торсиограмм (осциллограмм).

4 ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

4.1 В предварительном заключении указываются следующие данные:

наименование судна;

номер проекта;

марку и основные характеристики двигателя;

дату, место и условия проведения испытаний, в том числе данные о загрузке и осадке судна, состоянии акватории и т. п.;

список исполнителей и участников испытаний и названия организаций, представителями которых они являются;

перечень использованной аппаратуры и точки измерений;

основные режимы измерений.

4.2 В предварительном заключении приводятся следующие данные, полученные в результате измерений:

максимальные резонансные амплитуды колебаний или напряжений в исследуемых сечениях с указанием резонансных частот вращения, порядков (гармоник) и форм (частоты) колебаний;

пересчитанные по результатам измерения амплитуд колебаний напряжения и нагрузки в наиболее напряженных участках валопровода и замеренные температуры в резиновых элементах эластичных муфт с указанием допускаемых значений этих величин.

4.3 В выводах предварительного заключения указывают, выявлена ли при испытаниях необходимость назначения запретной зоны частот вращения или нет. Если зону назначают, то указывают ее расположение и ширину, а также дают временные рекомендации по эксплуатации установки, двигателя, агрегата с учетом влияния крутильных колебаний на период до выдачи окончательного заключения.

5 ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

5.1 Окончательное заключение оформляют в виде отчета о проведении испытаний крутильно–колеблющейся системы.

В заголовке на титульном листе после названия отчета указывают:

тип и назначение судна;

номер проекта и наименование судна.

5.2 Во введении указывают:

основание для проведения испытаний (головное судно серии, модернизация установки, двигателя или агрегата, замена гребного винта, проверка эффективности работы демпфера или динамического виброгасителя и т. п.);

номер расчета крутильных колебаний, кем и когда он был выполнен;

кем составлена и утверждена программа испытаний;

дату, место и условия проведения испытаний (загрузка и осадка судна, глубина фарватера, волнение);

результаты проверки качества регулировки двигателя;

список исполнителей и участников испытаний и организации, представителями которых они являются.

5.3 В разделе «Крутильная схема системы» указывают:

основные характеристики судна и установки, двигателя, агрегата;

эскиз крутильно–колеблющейся системы с указанием размеров и номеров чертежей основных деталей. Для демпферов крутильных колебаний указывается форма (частота) колебаний, на которую настроен демпфер, для антивибраторов — порядок гармоники возмущающего момента, на которую настроен антивибратор;

крутильную схему системы с указанием относительных моментов инерции масс и податливости соединений, а также постоянных системы;

значения фактического натяга гребного винта и/или соединительной муфты и соответствующего ему момента трения в соединении винта (муфты) с валом (рекомендуется);

для установок без разобщительных муфт — положение лопастей гребного винта относительно кривошипов коленчатого вала, то есть угол между кривошипом первого цилиндра и ближайшей к нему лопастью винта с указанием их взаимного расположения (рекомендуется).

5.4 В разделе «Торсиографирование» приводят:

наименование и краткую характеристику используемой аппаратуры (тип, марка, изготовитель, диапазон измеряемых частот и амплитуд колебаний или напряжений, собственная частота, для тензометров – сопротивление, база, способ наклейки), суммарную погрешность измерений;

место установки датчиков (для точек измерения на валопроводе за двигателем – координаты торсиографируемых или тензометрируемых сечений на эскизе валопровода);

способ соединения аппаратуры с двигателем или валопроводом (для торсиографов – вид привода, для тензодатчиков – тип токосъемного устройства и т. п.);

тип отметчиков времени и частоты вращения вала;

частоту записываемых и собственных колебаний торсиографа, частоту колебаний вибратора, масштаб и скорость записи, масштаб и диапазон амплитуд, период между отметками времени, дата тарировки, источники данных об измерительной аппаратуре; для торсиографа Гейгера дополнительно рекомендуется указывать масштаб углового рычага, масштаб главного пера, диаметры шкива торсиографа и торсиографируемого участка валопровода или ведущего шкива ременного привода, материал шкивов;

краткое описание методики измерения параметров крутильных колебаний;

результаты проверки качества регулирования двигателя;

краткое описание режимов работы установки, двигателя, агрегата при испытаниях в соответствии с требованиями 3.3 (диапазон и скорость измерения частоты вращения, фиксированные частоты вращения, маневры, управление двигателем — ручное или с помощью системы ДАУ и т. п.).

5.5 В разделе «Результаты испытаний» приводят:

графики изменения в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателей амплитуд колебаний торсиографируемых сечений и напряжений в тензометрируемых сечениях с указанием резонансных частот вращения, порядков и форм резонансных колебаний, а также результаты гармонического анализа отдельных участков торсиограмм (осциллограмм);

образцы торсиограмм (осциллограмм) на резонансных и номинальной частотах вращения с указанием частоты вращения вала, порядка гармоники возмущающего момента, масштаба записи, значений максимальных амплитуд и напряжений, периода между отметками времени и количества оборотов (или доли одного оборота) вала между двумя смежными отметками оборотов, или их копии в масштабе 1:1;

результаты сравнения расчетных частот, амплитуд колебаний и напряжений с измеренными. При расхождении расчетных и измеренных частот колебаний более чем на 5% приводится расчет собственных колебаний для откорректированной крутильной схемы установки, доведенный до получения масштаба моментов и напряжений;

таблицу измеренных и/или пересчитанных по результатам измерений резонансных напряжений (моментов) от крутильных колебаний в различных участках валопровода (валах, муфтах, редукторах и т.п.), деформации и температуры резиновых элементов упругих муфт. В случае необходимости приводятся также значения напряжений от вынужденных колебаний на спецификационных режимах работы установки. Производится сравнение указанных значений с соответствующими допускаемыми значениями по правилам Речного Регистра. В таблице рекомендуется приводить суммарное значение инерционного момента при переходе через резонанс и среднего крутящего

момента, соответствующего резонансной частоте вращения, который сравнивается с моментом трения в соединении винта с валом;

графики изменения напряжений, моментов и других величин, полученных непосредственными измерениями или пересчитанных по их результатам, в зависимости от частоты вращения коленчатого вала для различных участков валопровода. На графики наносятся кривые напряжений и моментов, допускаемых для длительной работы и быстрого прохода через резонанс.

Если напряжения или моменты превышают значения, допускаемые для длительной работы установки, двигателя, агрегата, должны быть приведены также значения этих величин, допускаемые для быстрого прохода через резонанс.

5.6 В случае необходимости внесения каких–либо конструктивных изменений для уменьшения опасности крутильных колебаний или их вредных последствий в отдельном разделе отчета приводят подтверждающие расчеты (расчет параметров крутильных колебаний при рекомендованном изменении элементов валопровода, расчет демпфера или динамического виброгасителя, расчет необходимого натяга гребного винта и т. п.).

5.7 В выводах по результатам испытаний указывают или на отсутствие запретных зон во всем диапазоне рабочих частот вращения коленчатого вала двигателя, или на необходимость назначения таких запретных зон; в последнем случае описывают их расположение и ширину, а также приводят рекомендации по изменению спецификационных режимов работы и/или конструкции элементов систем управления, порядка технического обслуживания элементов крутильно–колеблющейся системы (смещение спецификационных режимов работы установки по отношению к резонансным, установка в системе ДАУ блока быстрого прохода зоны или его перерегулировка, прохождение запретной зоны при ручном управлении двигателем или с помощью системы ДАУ, дополнительная регулировка двигателя, более частый осмотр упругих муфт и т. п.).

gost.e-ecolog.ru