РОССИЙСКИЙ РЕЧНОЙ РЕГИСТР

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИЛИКОНОВЫХ ДЕМПФЕРОВ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Руководство Р.043-2016

Москва
2016

gost.e-ecolog.ru

Утверждено приказом Российского Речного Регистра
от 26.09.2016 № 67-п

Введено в действие со 02.10.2016

Издание 1

Настоящее руководство определяет порядок проведения работ по проверке технического состояния силиконовых демпферов судовых двигателей внутреннего сгорания.

Руководство не исключает применение иных, зарекомендовавших себя на практике и одобренных Речным Регистром способов проверки технического состояния силиконовых демпферов.

Ответственный за выпуск — С. В. Канурный
Оригинал-макет — Е. Л. Багров

© Российский Речной Регистр, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

1 Общие положения 4
2 Обозначения, определения и пояснения 4
3 Область распространения 5
4 Метод оценки предполагаемого ресурса силиконовых демпферов и цель расчета 6
5 Торсиографирование 6
6 Оценка остаточного ресурса силиконового демпфера 7
7 Рекомендации по периодичности проверок работоспособности демпфера 10
8 Требования к отчетной документации 11
Приложение 1. Характеристики силиконовых демпферов судовых двигателей 14
Приложение 2. Оценка технического состояния силиконовых демпферов двигателей 8NVD36.1U теплохода «М. В. Ломоносов» 17
Приложение 3. Оценка технического состояния силиконовых демпферов двигателей CAT 3512B буксира «Бодрый» 39
Литература 74

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Цель настоящего Руководства — определение общего порядка проведения работ по оценке работоспособности силиконовых демпферов двигателей внутреннего сгорания, объема и содержания отчетной документации, проведение оценки остаточного ресурса силиконовых демпферов, выработавших гарантированный организацией-изготовителем ресурс, и определение времени до очередного контрольного торсиографирования (между очередными контрольными торсиографированиями), рекомендации по периодичности проверок работоспособности демпфера.

1.2 Руководство предназначено для проверки работоспособности силиконовых демпферов методом торсиографирования после выработки ими гарантированного организацией-изготовителем ресурса.

Результаты определения технического состояния демпфера по результатам анализа проб силиконовой жидкости не принимаются во внимание.

1.3 Положения руководства в отношении расчета предполагаемого ресурса силиконовых демпферов могут корректироваться по результатам выполненных дополнительных исследований с использованием новых физических моделей работы демпферов и опытных данных по их отказам.

2 ОБОЗНАЧЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОЯСНЕНИЯ

2.1 Термины, относящиеся к общей терминологии Правил, и их определения приведены в разд. 2 ч. 0 и 1.2 ч. IV ПКПС.

2.2 В настоящем руководстве приняты следующие обозначения и сокращения:

ГД — главный двигатель;

Система ДВД — система «двигатель–валопровод–движитель»;

ПКПС — правила классификации и постройки судов.

$A_{т\,вын}$ — амплитуда вынужденных колебаний ν-го порядка носка коленчатого вала на частоте вращения n_ν, рад;

$A_{1рез}$ — амплитуда колебаний ν-го порядка носка коленчатого вала на резонансной частоте вращения, рад;

R — предполагаемый ресурс силиконового демпфера, ч;

e_0 — постоянная системы, податливость коленчатого вала двигателя, рад/(Н·м);

$K_{ст}$ — коэффициент, учитывающий изменение физико-химических свойств силиконовой жидкости в результате ее «старения» за весь период срока службы демпфера;

$N_{мот}$ — расчетная частота моторной формы колебаний, Гц;

$N_{рез}$ — резонансная частота моторной формы колебаний, Гц;

$N_{вын}$ — частота вынужденных колебаний, Гц;

$n_{рас}$ — рассматриваемая частота вращения, мин$^{-1}$;

$n_{рез}$ — резонансная частота вращения, мин$^{-1}$;

$n_{экс}$ — эксплуатационная частота вращения, мин$^{-1}$;

n_ν — частота вращения, соответствующая вынужденным колебаниям рассматриваемого ν-го порядка, мин$^{-1}$;

$T_{гар}$ — ресурс безотказной работы демпфера, гарантированный организацией-изготовителем, ч;

$T_{к.т.}$ — время до очередного контрольного торсиографирования, ч;

$T_{нар}$ — наработка демпфера от начала эксплуатации до контрольного торсиографирования, ч;

$T_{ост}$ — остаточный ресурс демпфера, ч;

τ/A — масштаб напряжений, МПа/рад;

$\tau_{рез}$ — резонансные напряжения, МПа;

$\tau_{вын}$ — напряжения от вынужденных крутильных колебаний, МПа;

W — момент сопротивления участка крутильно-колеблющейся системы, в котором определяются напряжения, м^3.

3 ОБЛАСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

3.1 Руководство распространяется на двигатели, указанные в приложении 1, с силиконовыми демпферами, крутильные характеристики которых также приведены в этом приложении.

3.2 Руководство может быть распространено на другие типы силиконовых демпферов, устанавливаемые на указанные или другие типы двигателей при ином назначенном изготовителем гарантированном ресурсе, при условии, что метод оценки работоспособности силиконовых демпферов апробирован на достаточном для статистического анализа количестве двигателей.

4 МЕТОД ОЦЕНКИ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО РЕСУРСА СИЛИКОНОВЫХ ДЕМПФЕРОВ И ЦЕЛЬ РАСЧЕТА

4.1 Приведенный в данном руководстве расчетный метод оценки предполагаемого ресурса силиконового демпфера основан на допущении о линейной зависимости ресурса от соотношения допускаемых и измеренных при тензометрировании или определенных по результатам торсиографирования напряжений в коленчатом вале.

4.2 Целью расчета являются:

.1 определение предполагаемого ресурса силиконового демпфера и оценка его остаточного ресурса, а также времени до очередного контрольного торсиографирования;

.2 обоснование практических рекомендаций о допустимости двигателей к дальнейшей эксплуатации.

4.3 Окончательные результаты расчетов должны оформляться в соответствии с руководством Р.009-2004 «Расчет и измерение крутильных колебаний валопроводов и агрегатов».

5 ТОРСИОГРАФИРОВАНИЕ

5.1 Перед проведением испытаний ГД должны быть отрегулированы так, чтобы отклонения параметров каждого цилиндра от их средних значений не превышали значений, установленных организацией-изготовителем двигателя.

5.2 Торсиографирование необходимо выполнять с носка коленчатого вала двигателя (со стороны демпфера) аппаратурой, позволяющей регистрировать исследуемые процессы во всем рабочем

диапазоне частот вращения ГД. Торсиограммы записываются при изменении частот вращения от минимально устойчивых до максимально возможных и обратно, а также при проходе всего диапазона частот вращения ступенями в соответствии с ГОСТ 26046 и руководством Р.009-2004 «Расчет и измерение крутильных колебаний валопроводов и агрегатов».

5.3 Торсиографирование ГД проводится при ходовых или швартовных испытаниях судна. При этом должно быть соблюдено основное условие: ГД должен развивать частоту вращения, достаточную для достижения основных резонансов моторной формы колебаний.

5.4 В процессе испытаний должны быть зарегистрированы резонансные и околорезонансные колебания моторной формы, а также вынужденные колебания во всем рабочем диапазоне частот вращения коленчатого вала ГД (на основных эксплуатационных режимах) при его полной загрузке по мощности.

5.5 Обработка результатов испытаний (торсиограмм) и их гармонический анализ выполняются по методике В. П. Терских [4]. В результате обработки торсиограмм определяется собственная частота моторной формы колебаний и резонансные амплитуды основных порядков колебаний, а также амплитуды вынужденных колебаний всех рассматриваемых порядков.

Развитие амплитуд колебаний носка коленчатого вала представляется в виде графиков, построенных по наибольшим амплитудам за цикл.

Примечание. В качестве примера в приложениях 2 и 3 приведены амплитуды колебаний гармонических составляющих и образцы торсиограмм по результатам торсиографирования главных двигателей теплоходов «М.В. Ломоносов» и «Бодрый» соответственно.

6 ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СИЛИКОНОВОГО ДЕМПФЕРА

6.1 Предполагаемый и остаточный ресурс силиконового демпфера определяют на основе допущения о работе демпфера по гашению средних, наиболее вероятных амплитуд колебаний за цикл.

6.2 Остаточный ресурс демпфера $T_{ост}$ определяется по формуле, ч:

$$T_{ост} = R - T_{нар}. \qquad (6.2)$$

6.3 Предполагаемый ресурс силиконового демпфера определяется на резонансной и эксплуатационных частотах вращения по формуле, ч:

$$R = T_{гар} \cdot \frac{\tau_{доп}}{\tau_{рез} N_{рез}/N_{мот} + \sum\left(\tau_{вын} \cdot N_{вын}/N_{мот}\right)} \cdot K_{ст}, \qquad (6.3)$$

где $T_{гар}$ — ресурс безотказной работы демпфера, гарантированный организацией-изготовителем, ч; для рассматриваемых типов демпферов $T_{гар}$ = 20000 – 30000 ч;

$\tau_{доп}$ — допускаемые для длительной работы напряжения в коленчатом валу на рассматриваемых частотах вращения, определяемые в соответствии с 6.2 ч. IV ПКПС, МПа;

$\sum\left(\tau_{вын} \cdot N_{вын}/N_{мот}\right)$ — сумма произведений напряжений в коленчатом валу от вынужденных колебаний ν-го порядка и отношения частот вынужденных колебаний ν-го порядка к расчетной частоте моторной формы колебаний;

Примечания:

1. Рекомендуется рассматривать и суммировать напряжения от вынужденных колебаний не более трех – четырех порядков.

2. Так как расхождение по частотам $N_{рез}$ и $N_{мот}$ должно быть в пределах 5 %, то в формулу (6.2) вместо величины $N_{мот}$ можно подставить значение $N_{рез}$ по данным торсиографирования.

$K_{ст}$ — коэффициент, учитывающий изменение физико-химических свойств силиконовой жидкости в результате ее «старения» за весь период срока службы демпфера. Значения коэффициента $K_{ст}$ в зависимости от наработки демпфера указаны в табл. 6.1. Эти значения могут уточняться по мере накопления информации по отказам демпферов вследствие «старения» силиконовой жидкости.

Таблица 6.1

Значения коэффициента $K_{ст}$

$T_{нар}$, тыс. ч	30 – 50	50 – 70	>70
$K_{ст}$	0,99 – 0,95	0,95 – 0,90	0,90 – 0,85

Резонансная частота моторной формы колебаний, частота вынужденных колебаний, резонансные напряжения, напряжения от

вынужденных колебаний определяются по результатам торсиографирования с использованием методики В. П. Терских [4].

.1 Резонансная частота моторной формы колебаний ν-го порядка на резонансной частоте вращения рассчитывается по формуле, Гц:

$$N_{\text{рез}} = \nu n_{\text{рез}}. \qquad (6.3)$$

Примечание. Расхождение по частотам $N_{\text{рез}}$ и $N_{\text{мот}}$, определяемое из расчета свободных колебаний рассматриваемой системы ДВД, должно быть не более 5 %. В противном случае следует произвести корректировку параметров системы ДВД и выполнить расчет свободных колебаний для уточнения масштабов напряжений.

В качестве примера в приложениях 2 и 3 по результатам торсиографирования произведены корректировка параметров крутильной схемы и уточнение расчетной частоты моторной формы колебаний путем расчета свободных колебаний системы ДВД. Расхождение между фактической и расчетной частотами не превышает 4,3 и 4,5 % соответственно;

.2 частота вынужденных колебаний ν-го порядка на рассматриваемой частоте вращения рассчитывается по формуле, Гц:

$$N_{\text{вын}} = \nu \cdot n_{\text{рас}}; \qquad (6.4)$$

.3 резонансные напряжения рассчитываются по формуле, МПа:

$$\tau_{\text{рез}} = A_{1\text{рез}}\,(\tau/A), \qquad (6.5)$$

где $A_{1\text{рез}}$ — амплитуда колебаний носка коленчатого вала ν-го порядка на резонансной частоте вращения, рад;

τ/A — масштаб напряжений, МПа/рад;

.4 напряжения в элементах системы ДВД от вынужденных колебаний ν-го порядка с амплитудой колебаний $A_{\text{т вын}}$ на частоте вращения n_ν равны, МПа

$$\tau_{\text{вын}} = A_{\text{т вын}} \left| \delta^{(\rho)}_{k,\,k+1} \Big/ \alpha^{(1)}_{\text{т}} \right| \Big/ \left(K\, e_0\, W \right), \qquad (6.6)$$

где $\delta^{(\rho)}_{k,\,k+1}$; $\alpha^{(1)}_{\text{т}}$ — относительный эластический момент в соединении системы (k, k + 1) и относительная амплитуда колебаний системы;

k — порядковый номер элемента (массы) в соответствии с нумерацией элементов крутильной схемы;

e_0 — постоянная системы, податливость коленчатого вала двигателя, рад/(Н·м);

K — коэффициент, учитывающий искажение формы свободных колебаний возмущающими моментами в двигателе, определяемый с учетом геометрических сумм относительных амплитуд двигателя [4];

W — момент сопротивления участка системы (k, k + 1), в котором определяются напряжения, м^3.

В качестве примера в приложении 2 (разд. 4) представлен расчет вынужденных колебаний и напряжений для средних, наиболее вероятных амплитуд колебаний гармонических составляющих (табл. П2.4-3, П2.4-5, П2.4-7, П2.4-9) и для их максимальных значений (табл. П2.4-4, П2.4-6, П2.4-8, П2.4-10) на резонансной и эксплуатационной частотах. В приложении 2 (табл. П2.6-1) и в приложении 3 (табл. П3.5-1) приведены результаты оценки предполагаемого ресурса демпферов и их остаточного ресурса.

7 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПЕРИОДИЧНОСТИ ПРОВЕРОК РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕМПФЕРА

7.1 В соответствии с рассчитанным остаточным ресурсом время $T_{к.т}$ до очередного контрольного торсиографирования рекомендуется определять по табл. 7.1.

Таблица 7.1

Значения времени $T_{к.т}$

$T_{ост}$, ч	$T_{к.т}$, ч
более 30 000	15 000 [1]
10 000–30 000	10 000 [2]
менее 10 000	результат расчета $T_{ост}$

[1] Время $T_{к.т}$ назначается равным 0,5 $T_{гар}$.

[2] По результатам усреднения рекомендаций организаций-изготовителей демпферов [6].

Примечания. 1. Организации-изготовители силиконовых демпферов фактически не ограничивают срок их службы при условии периодического контроля их технического состояния после 15 000 часов работы основным способом – измерением крутильных колебаний. На основании оценки работоспособности силиконовых демпферов по формуле (6.2) наибольшая периодичность проверок технического состояния силиконовых демпферов принята равной 15 000 ч.

2. Для уточнения времени до очередного контрольного торсиографирования для конкретной установки при $T_{ост}$ = 10 000 – 30 000 ч рекомендуется выполнить повторные расчеты по формулам (6.1 – 6.2), принимая допущение о развитии максимальных амплитуд колебаний за цикл и соответствующих им напряжений.

Окончание табл. 7.1

При этом, если $T_{ост}$ больше 15 000 ч, назначается $T_{к.т.}$ = 15 000 ч; если $T_{ост}$ меньше 15 000 ч, то $T_{к.т.} = T_{ост}$.
В качестве примера в табл. П2.5.2-2 приложения 2, в 4.3 и 4.5 приложения 3 приведены результаты повторных расчетов, выполненных на основе допущения о развитии максимальных амплитуд колебаний за цикл.

7.2 Максимальный срок до очередного контрольного торсиографирования для оценки работоспособности силиконовых демпферов не должен превышать 15 000 ч, что составляет для судов речного флота 5–7 навигаций (лет), а для судов смешанного (река – море) плавания — 3–4 года.

7.3 При выявлении неудовлетворительного технического состояния силиконового демпфера, в случае, когда действующие напряжения, которые определены в соответствии с 6.2 ч. IV ПКПС превышают допускаемые для длительной работы, назначаются запретные зоны частот вращения в соответствии с указаниями 6.4 ч. IV ПКПС. При установке нового демпфера следует выполнить контрольное торсиографирование.

8 ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

8.1 Результаты торсиографирования оформляют в виде предварительного и окончательного заключения. Сроки оформления предварительного и окончательного заключений, а также представления окончательного заключения на согласование Речному Регистру должны соответствовать п. 1.8 руководства Р.009-2004 «Расчет и измерение крутильных колебаний валопроводов и агрегатов».

8.2 В предварительном заключении приводятся краткие данные судна и энергетической установки согласно п. 4.1 руководства Р.009-2004. Кроме того, в выводах предварительного заключения должна содержаться оценка технического состояния демпфера и заключение о допуске демпфера к дальнейшей эксплуатации. Указывается срок действия предварительного заключения.

8.3 Окончательное заключение содержит следующие разделы (примеры оформления окончательного заключения приведены в разд. 6 приложения 2 и разд. 5 приложения 3):

.1 информация о судне: тип и наименование судна, номер проекта, регистровый номер;

.2 краткая характеристика судна и энергетической установки:

дата, место и условия проведения измерений (загрузка и осадка судна, состояние моря, глубина фарватера);

исполнитель измерений;

использованная аппаратура и точки измерений;

основные режимы измерений;

краткое описание энергетической установки системы ДВД;

тип, марка, заводской номер главного двигателя (ГД);

номинальная мощность и частота вращения;

частоты вращения, соответствующие основным спецификационным режимам длительной работы на частичных нагрузках;

наработка ГД;

диаметры шеек коленчатого вала и временное сопротивление его материала;

тип (марка) силиконового демпфера;

структурная схема установки;

крутильная схема системы;

.3 краткое описание устройств для измерений:

информация об использованных датчиках, измерительной и регистрирующей аппаратуре;

тип анализатора при гармоническом анализе торсиограмм;

место установки датчика и тип его привода;

тип отметчика времени и частоты вращения вала;

режимы работы установки, на которых проводились измерения (ручное или с помощью системы ДАУ управление двигателем и т. п.);

.4 результаты измерений;

масштаб записи амплитуд колебаний (график тарировки);

графики развития амплитуд колебаний носка коленчатого вала двигателя в зависимости от частоты вращения двигателя;

графики результатов гармонического анализа отдельных участков торсиограмм;

образцы торсиограмм;

масштабы напряжений для элементов системы;

.5 расчеты:

вынужденных колебаний и напряжений на резонансных и эксплуатационных частотах вращения двигателя;

максимальных напряжений в коленчатом вале двигателя от резонансных, околорезонансных и вынужденных колебаний на резонансных и основных эксплуатационных частотах вращения;

допускаемых Речным Регистром напряжений для длительной работы на рассматриваемых частотах вращения двигателя. Кроме того, должны быть приведены графики развития напряжений в коленчатом вале двигателя и допускаемые для длительной работы и, при необходимости, быстрого прохода. При наличии запретных зон они указываются на графиках;

предполагаемого ресурса демпфера на резонансных и основных эксплуатационных частотах вращения двигателя;

остаточного ресурса демпфера на резонансных и основных эксплуатационных частотах вращения двигателя;

оценка времени до очередного контрольного торсиографирования;

.6 выводы.

На основании выполненных измерений и расчетов производится анализ результатов, в результате которого оценивается техническое состояние демпфера и количество часов до очередного контрольного торсиографирования.

В случае неудовлетворительного технического состояния демпфера определяются диапазоны и расположение запретных для длительной эксплуатации зон. При условии обозначения таких запретных зон на тахометрах, если их расположение в рабочем диапазоне частот вращения удовлетворяет требованиям 6.2.3 ч. IV ПКПС, двигатели допускаются к дальнейшей эксплуатации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
(справочное)

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛИКОНОВЫХ ДЕМПФЕРОВ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Необходимые для расчета крутильных колебаний характеристики силиконовых демпферов приведены в табл. П1.1

Таблица П1.1

Моменты инерции силиконовых демпферов

Двигатель	Обозначение демпфера	Эффективный момент инерции, $\theta^э$, кг·м^2	Момент инерции маховика демпфера, $\theta_м$, кг·м^2	Гарантированный ресурс $T_{гар}$, ч
NVD26	А-400	0,900	0,750	30000
NVD26	7.2-1(∅450)	1,940	1,800	30000
8NVD36.1U	А-560	5,430	4,180	30000
8NVDS48A-2U	А-710	15,730	14,000	30000
NVD48	В-790	29,070	23,450	30000
Г60, Г70, Г70-5	Г60-2500-1	62,000	62,800	30000
235Д-04 (05)	3.010.7-00	5,688	4,255	20000
Mitsubishi 6D24TC	—	0,219	0,178	20000
Scania DI 16 43M10-58	1503907	0,080	0,083	20000
Scania DI 12 59M	1367619	0,120	0,120	20000
Scania D12 Cummins QSB5.9 HD/HO	—	0,058	0,058	20000
Cummins KTA38M1	—	1,2655	1,035	20000
Cummins NTA 14-G	DA1178	0,270	0,220	20000
Caterpillar Cat 3196B	—	0,139	0,187	20000
Caterpillar C12	1678125	0,169	0,173	20000
Caterpillar C12	1678125 группа 1230464	0,309	0,172	20000
Caterpillar Cat 3406E	—	0,219	0,063	20000
Caterpillar C9	208-9619	0,172	0,172	20000
Caterpillar C18	329-6110	1,188	1,131	20000
Caterpillar C32	326-2660	0,651	0,635	20000
Caterpillar Cat 3512B	8NO339	7,636	4,005	20000

Окончание табл. П1.1

Двигатель	Обозначение демпфера	Эффективный момент инерции, $\theta^э$, кг·м^2	Момент инерции маховика демпфера, $\theta_м$, кг·м^2	Гарантированный ресурс $T_{гар}$, ч
Caterpillar Cat 3516B	—	6,981	6,536	20000
MAN D 2840	51.02201-0136	0,563	0,448	20000
MAN D2842 LE4xx	51.02201-0107	0,319	0,224	20000
MAN D2876 LE4xx	51.02201-0166	0,3230	0,218	20000
MAN D2866 LXE	51.02201-0081 + Нав 51.02601-0426	0,185	0,117	20000
MAN D2866 LXE	51.02201-0081 + Нав 51.02201-0455	0,195	0,117	20000
MAN D2866 LXE	51.02201-0132 + Нав 51.02201-0469	0,183	0,120	20000
MAN D2866 LXE	51.02201-0132 + Нав 51.02201-0480	0,188	0,120	20000
MAN D2862 LE4xx	51.02201-0166 + Нав 51.02115-0255	0,301	0,218	20000
MAN D2862 LE4xx	51.02201-0166 + Нав 51.02115-0273	0,314	0,218	20000
Weichai X8170ZC	—	1,819	0,561	20000
Weichai WD615C-22 (24)	61560020010	0,223	0,143	20000
Weichai WD618C-22	61800020012	0,236	0,152	20000
Weichai WP4C120-18	—	0,091	0,090	20000
B6190	511.02.14	2,5860	2,4375	20000
Volvo Penta D9A-CR1	—	0,2735	0,1150	20000
Volvo Penta D16MH	—	0,3341	0,290	20000
Yanmar 6HYM-WET	—	0,4449	0,2818	20000

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
(справочное)

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛИКОНОВЫХ ДЕМПФЕРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ 8NVD36.1U ТЕПЛОХОДА «М. В. ЛОМОНОСОВ»

1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТОРСИОГРАФИРОВАНИЯ ГЛАВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ 8NVD36.1U

Работа выполнена с целью проверки работоспособности силиконовых демпферов двигателей в связи с выработкой ресурса 30000 ч, гарантированного организацией-изготовителем демпферов. Наработка главных двигателей к моменту испытаний 19.06.2004 г. составила 33414 ч.

Проверка работоспособности силиконовых демпферов выполнена торсиографированием системы ДВД.

Испытания проведены 19 июня 2004 г. специалистами фирмы «ТОРСИО» (г. Санкт-Петербург) на т/х «М. В. Ломоносов» (пр.305) в ходовом режиме его работы на р. Северная Двина. Судно в балласте. Осадка кормой 1,45 м, глубина фарватера 3,2 м, волнение-штиль.

Энергетическая установка двухвальная. Каждая пропульсивная установка (см. 11.1.3.3 ч. IV ПКПС) состоит из двигателя, валопровода и гребного винта (рис. П2.1-1), параметры каждого элемента установки приведены в табл. П2.1-1.

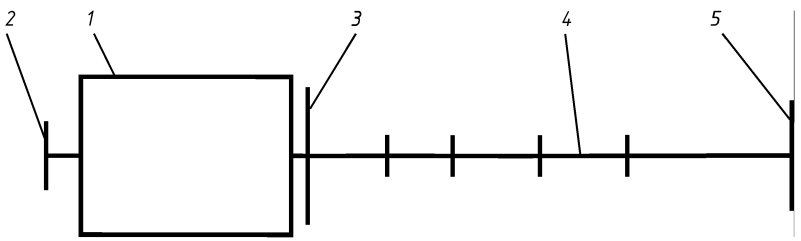


Рис. П2.1-1. Структурная схема установки:
1 – двигатель; 2 – демпфер силиконовый; 3 – маховик; 4 – валопровод; 5 – гребной винт

Таблица П2.1-1

Параметры элементов пропульсивной установки

Элемент установки	Параметры
Двигатель 8NVD36.1U: двигатель левого борта (далее ЛБ) заводской № 6711585, двигатель правого борта (далее ПрБ) заводской № 6711583	Номинальная мощность 300 кВт, частота вращения коленчатого вала двигателя на режиме номинальной мощности 500 мин$^{-1}$, диаметр шеек коленчатого вала: шатунных – 155 мм; коренных – 160 мм; габаритные размеры маховика двигателя – 1000 × 300 мм
Демпфер силиконовый А-560	Эффективный момент инерции демпфера $\theta^{э} = 5{,}43$ кг·м^2; момент инерции маховика демпфера $\theta_м = 4{,}18$ кг·м^2; диаметр вала привода демпфера – 120 мм; Временное сопротивление материала вала $R_m = 470$ МПа
Валопровод: общий вид по черт. 305-242-100-000	Включает в себя вал-коротыш d_{min}=120 мм; R_m= 490 - 510 МПа; зубчатую муфту с резиновыми вкладышами; упорный вал по черт. 244-002-000, d_{min}=120 мм; R_m= 490 - 510 МПа; три промежуточных вала по черт. 243-002-100, минимальный диаметр каждого вала d_{min}=110 мм; R_m= 490 - 510 МПа, гребной вал по черт. 242-100-000, d_{min}=120 мм; R_m= 490 - 510 МПа; d_{min}=130 мм в районе конуса гребного вала
Гребной винт черт. 1361-616-1	Диаметр лопастей $D = 1{,}1$ м, шаг лопастей $H = 1{,}09$ м; количество лопастей $z = 4$; дисковое отношение $\Theta = 0{,}65$; масса $G = 184$ кг; маховой момент GD^2=42 кг· м^2; $R_m = 600$ - 680 МПа; материал — сталь

Крутильная схема крутильно-колеблющейся системы приведена на рис. П2.1-2.

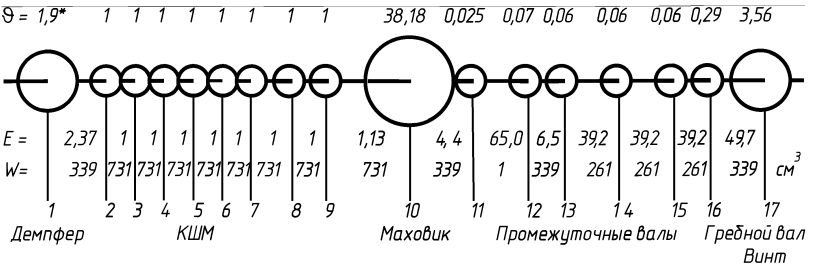


Рис. П2.1-2. Крутильная схема системы: * – с учетом момента инерции навешанного компрессора

Постоянные системы:

θ_0 =3,94 кг · м^2;

e_0 = 780 · 10^{-10}, рад/(Н · м).

Торсиографирование выполнялось с носка коленчатого вала двигателя (со стороны демпфера) радиоторсиографом с регистрацией исследуемых процессов на ноутбук Toshiba с модулем АЦП типа Е-440. Торсиограммы записывались при изменении частоты вращения от минимально устойчивой 200 мин$^{-1}$ до 441 – 447 мин$^{-1}$ и обратно, а также при проходе всего диапазона частот вращения ступенями через 10 – 20 мин$^{-1}$ в соответствии с ГОСТ 26046 и Р.009-2004 «Расчет и измерение крутильных колебаний валопроводов и агрегатов».

Обработка торсиограмм выполнялась по методике [4].

Графики развития амплитуд колебаний носка коленчатого вала построены по наибольшим амплитудам за цикл. Там же представлены амплитуды колебаний гармонических составляющих, полученные в результате гармонического анализа на аналого-цифровом преобразователе Е-440. Графики и образцы торсиограмм представлены в разд. 3 настоящего приложения.

В исследуемом диапазоне зарегистрированы резонансные колебания 7,5; 8; 8,5 порядков двухузловой (моторной) формы с частотой 44,7 Гц, а также вынужденные колебания 4 и 4,5 порядков.

По результатам торсиографирования выявлено, что отличие $N_{рез}$ и $N_{мот}$ составляет более 5 %, поэтому была откорректирована крутильная схема системы и выполнен расчет свободных колебаний для уточнения масштабов напряжений и моментов в элементах системы. Расчет представлен в разд. 3 настоящего приложения.

Расчет вынужденных колебаний и напряжений выполнен для средних, наиболее вероятных амплитуд колебаний гармонических составляющих и для их максимальных значений на резонансной (335 мин$^{-1}$) и эксплуатационной (440 мин $^{-1}$) частотах и представлен в разд. 3 настоящего приложения.

Допускаемые напряжения для элементов системы определены в соответствии с 6.2 ч. IV ПКПС.

Расчетная оценка предполагаемого ресурса демпферов и их остаточный ресурс определены по методике [1] на эксплуатационной и резонансной частотах вращения на основе допущения о развитии средних, наиболее вероятных амплитуд колебаний за цикл. Время до очередного контрольного торсиографирования уточнено на основе допущения о развитии максимальных амплитуд колебаний за цикл. Расчет представлен в разд. 5 настоящего приложения. Основные результаты торсиографирования представлены в разд. 6.

В результате торсиографирования выявлено:

Максимальные напряжения в коленчатых валах двигателей, вызванные развитием резонансных ν=8; околорезонансных ν= 7,5 и 8,5, а также вынужденных колебаний ν= 4 и 4,5 порядков, на частоте вращения 335 мин$^{-1}$ достигают 17,3 МПа — ЛБ и 18,0 МПа — ПрБ, что ниже допускаемых значений 31,3 МПа.

На эксплуатационной частоте вращения 440 мин$^{-1}$ напряжения, вызванные развитием крутильных колебаний, составляют 19,7 МПа — ЛБ и 20,4 МПа — ПрБ, что ниже допускаемых значений 28,58 МПа.

По результатам определения максимальных напряжений построены графики их развития (рис. П2.1-3) в коленчатых валах двигателей, иллюстрирующие характер их нагруженности.

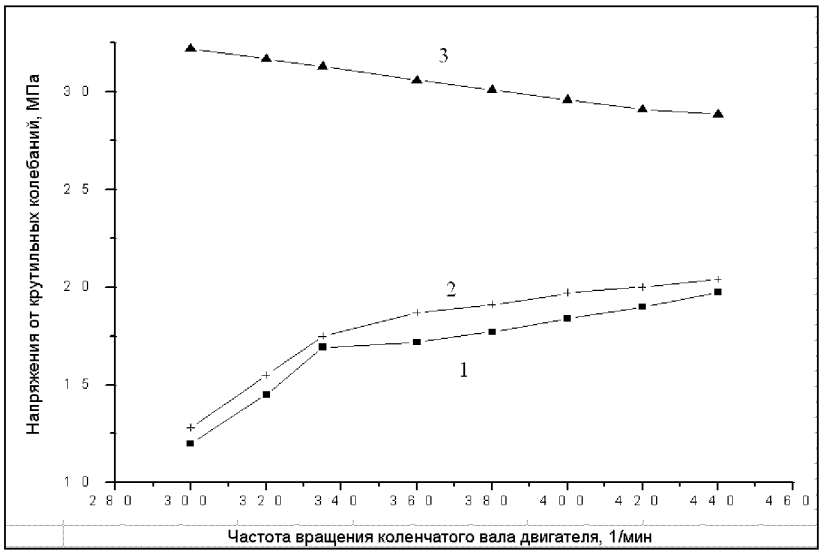


Рис. П2.1-3. Графики развития напряжений в коленчатом вале двигателя: *1* — напряжения в коленчатом вале двигателя ЛБ; *2* — напряжения в коленчатом вале двигателя ПрБ; *3* — допускаемые напряжения

Выводы по результатам испытаний

На основании выполненного экспериментального исследования параметров крутильных колебаний установок левого и правого бортов т/х «М. В. Ломоносов» можно сделать следующие выводы:

Силиконовые демпферы А-560 двигателей 8NVD36.1U с заводскими № 6711585 (ЛБ) и № 6711583 (ПрБ) находятся в технически удовлетворительном состоянии и допускаются к дальнейшей эксплуатации.

Контрольное торсиографирование для очередной проверки работоспособности силиконовых демпферов двигателей ПрБ и ЛБ следует произвести через 15000 ч.

2 ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОРСИОГРАММ

Образцы записи тарировочных графиков, торсиограмм и графики гармонического анализа приведены на рис. П.2.2-1 – П2.2-9.

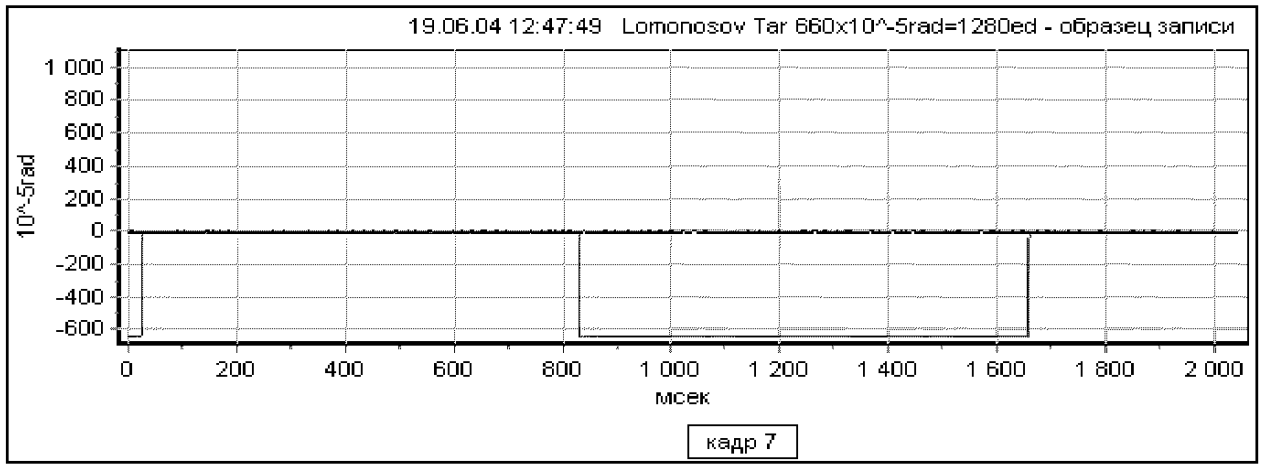


Рис. П2.2-1. Тарировочный график

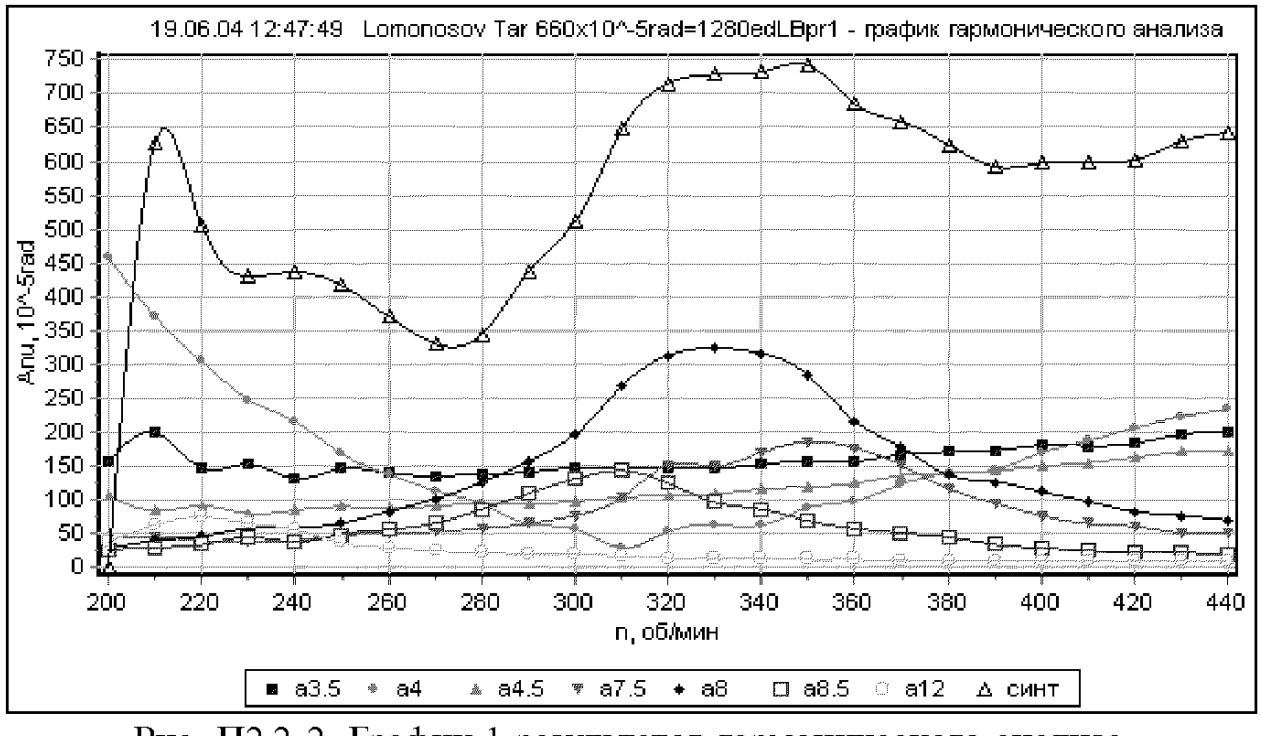


Рис. П2.2-2. График 1 результатов гармонического анализа

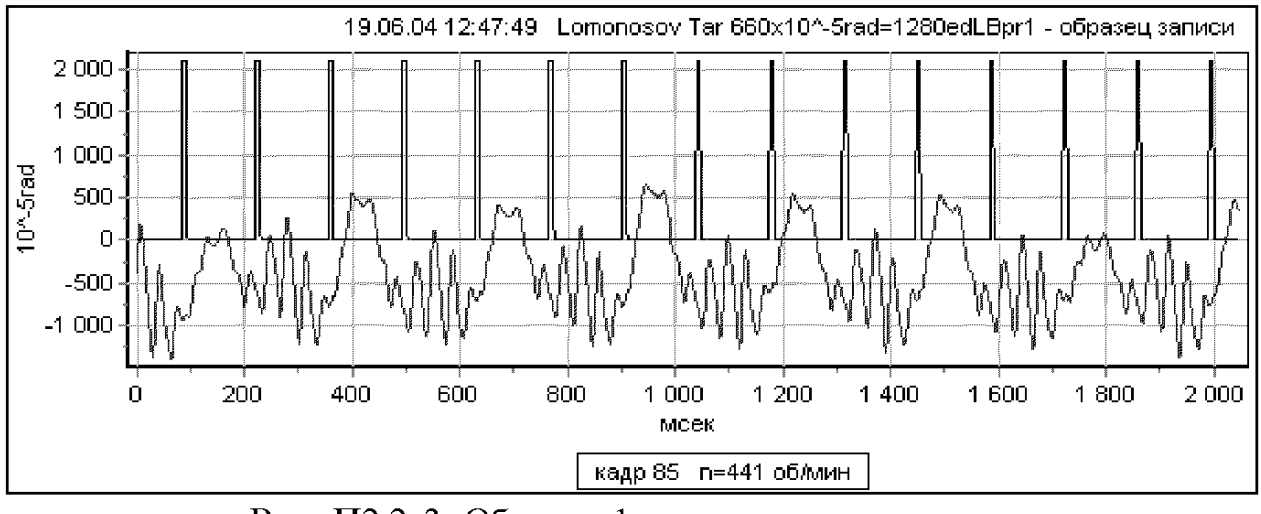


Рис. П2.2-3. Образец 1 записи торсиограммы

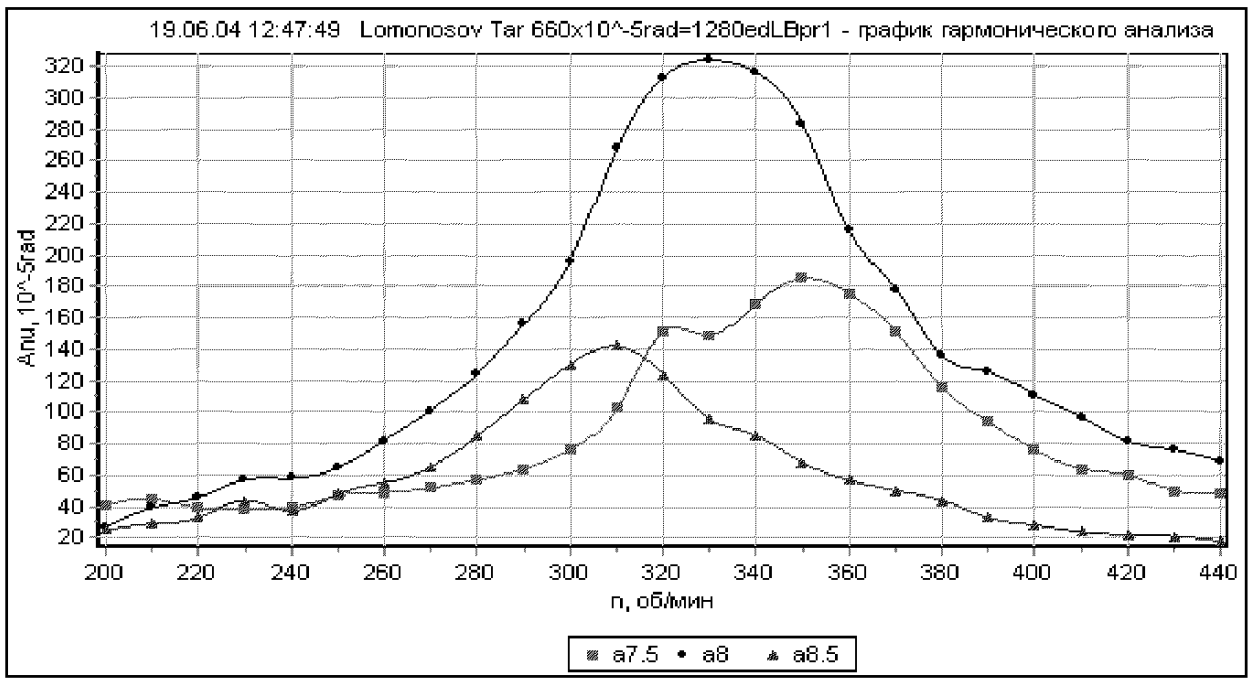


Рис. П2.2-4. График 2 результатов гармонического анализа

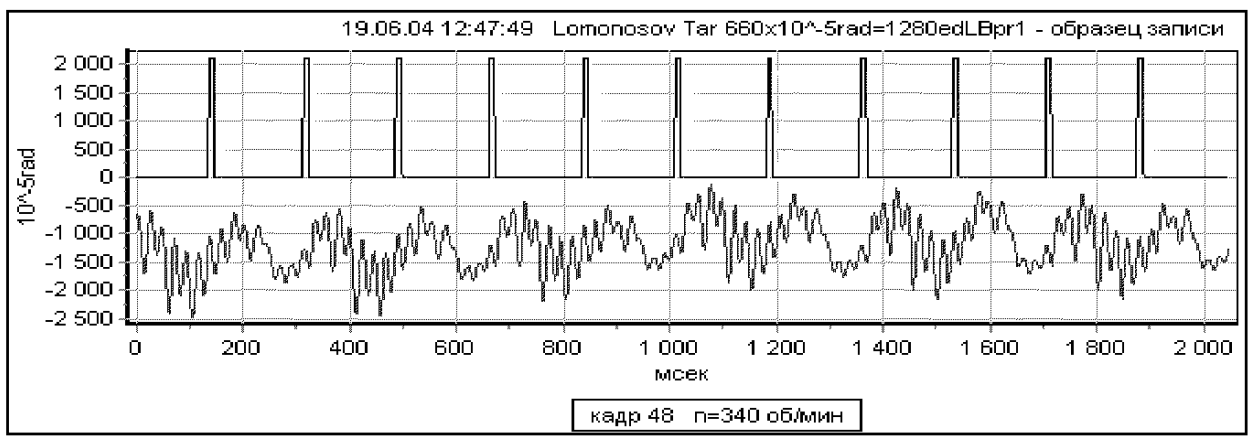


Рис. П2.2-5. Образец 2 записи торсиограммы

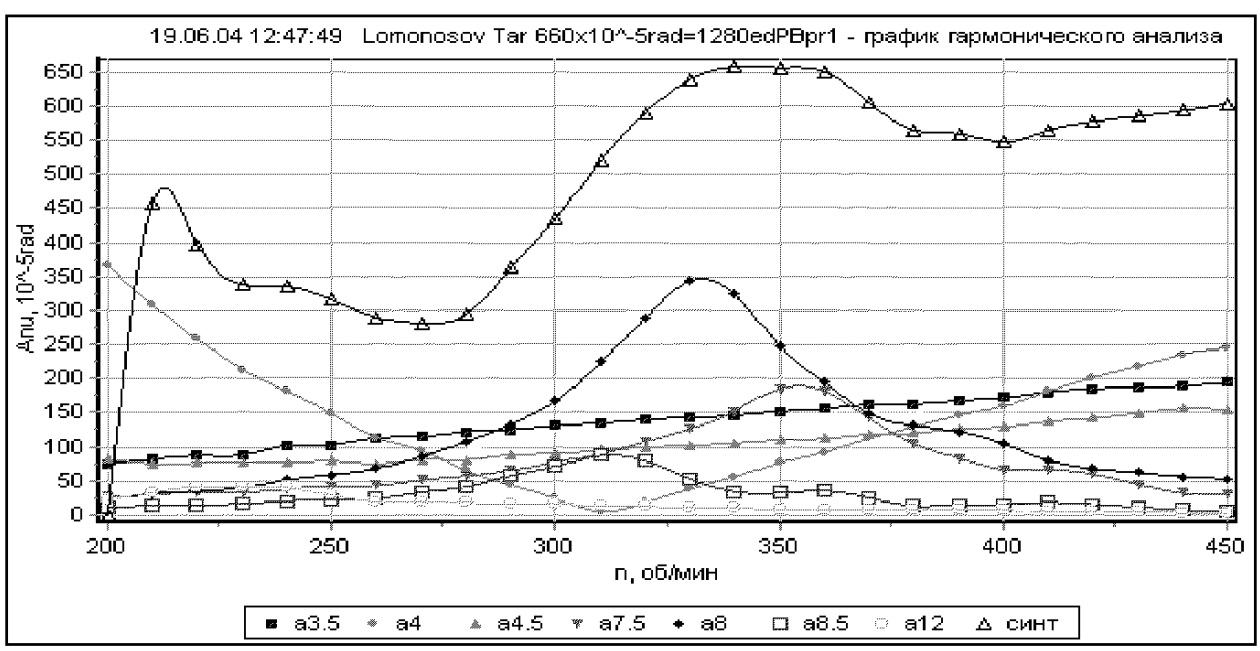


Рис. П2.2-6. График 3 результатов гармонического анализа

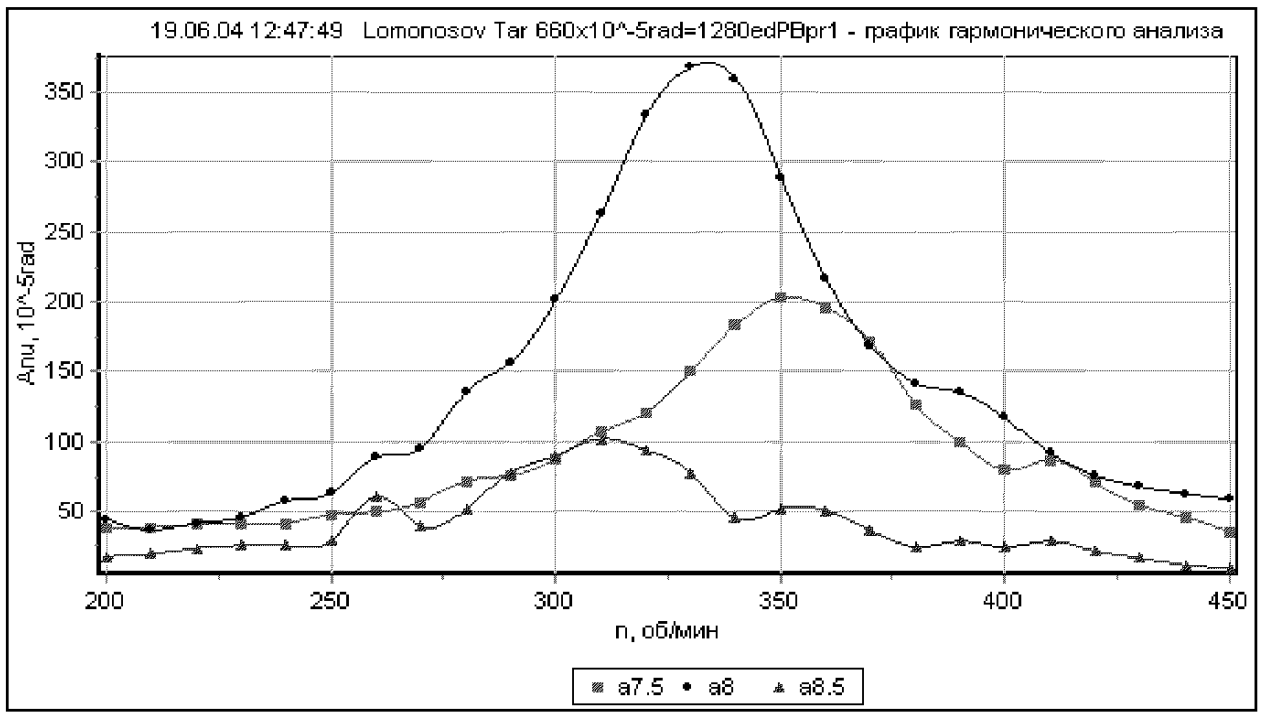


Рис. П2.2-7. График 4 результатов гармонического анализа

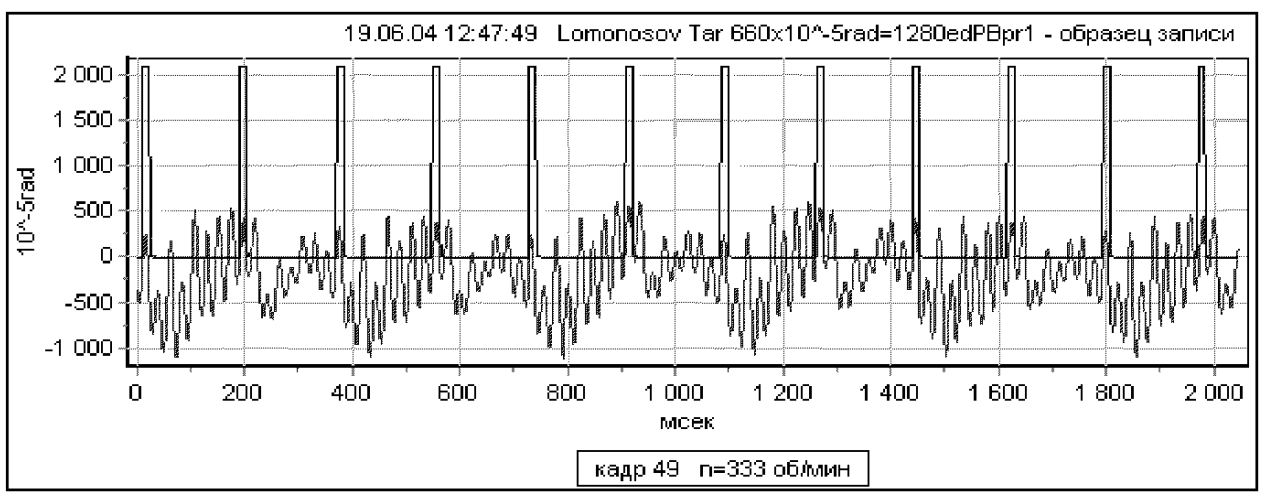


Рис. П2.2-8. Образец 3 записи торсиограммы

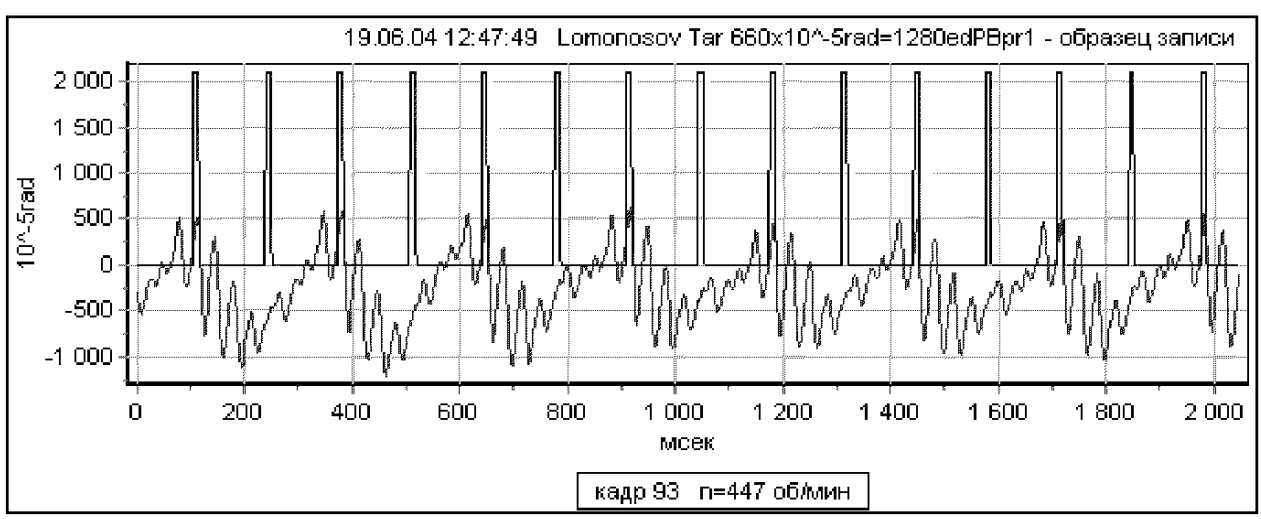


Рис. П2.2-8. Образец 4 записи торсиограммы

3 РАСЧЕТ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Исходные данные для расчета свободных крутильных колебаний приведены в табл. П2.3-1 и табл. П2.3-2.

Таблица П2.3-1

Общие данные

т/х «М. В. Ломоносов»	15.09.2006	13:50:19
Момент инерции, кг·м^2	θ_0	3,94
Податливость, рад/(Н·м)	e_0	$780 \cdot 10^{-10}$
Относительный момент сопротивления, МПа$^{-1}$	a_0	$1 \cdot 10^{-5}$
Минимальная частота, кол/мин	N_{min}	100
Максимальная частота, кол/мин	N_{max}	7200
Точность расчета значащих цифр	Z_c	5
Номер эталонной массы двигателя	N_{al}	2

Таблица П2.3-2

Исходные данные для расчета свободных колебаний

№ масс	Приведенный момент инерции масс $\vartheta = \theta/\theta_0$	Соединение	Приведенная податливость $E = e/e_0$	Относительный момент сопротивления, МПа$^{-1}$	Комментарий
01	1,9				демпфер
02	1	0102	2,37	2,59	цилиндр 1
03	1	0203	1	5,59	цилиндр 2
04	1	0304	1	5,59	цилиндр 3
05	1	0405	1	5,59	цилиндр 4
06	1	0506	1	5,59	цилиндр 5
07	1	0607	1	5,59	цилиндр 6
08	1	0708	1	5,59	цилиндр 7
09	1	0809	1	5,59	цилиндр 8
10	38,18	0910	1,13	5,59	маховик
11	0,025	1011	4,4	2,59	коротыш
12	0,07	1112	65	0,00780	зубчатая муфта
13	0,0 6	1213	6,5	2,59	упорный вал
14	0,0 6	1314	39,2	2,0	промеж. вал
15	0,0 6	1415	39,2	2,0	промеж. вал
16	0,29	1516	39,2	2,0	промеж. вал
17	3,56	1617	49,7	2,59	гребной вал

Результаты расчета частот колебаний приведены в табл. П2.3-3.

Таблица П2.3-3

Результаты расчета частот колебаний различных форм

№	Частота колебаний, кол./мин	$\Theta_{экв}$	$K_{дин}$
01	589,74	$-6{,}23 \cdot 10^{-09}$	$6{,}62 \cdot 10^{-01}$
02	2800,5	$-5{,}26 \cdot 10^{-08}$	$1{,}86 \cdot 10^{-01}$
03	4354,1	$1{,}25 \cdot 10^{-03}$	$2{,}28 \cdot 10^{-03}$
04	7167,3	$6{,}50 \cdot 10^{-05}$	$3{,}49 \cdot 10^{+02}$

Примечание. $\Theta_{экв}$ — эквивалентная стойкость ветви на массе присоединения, отнесенная к квадрату безразмерной частоты, рассчитывается в программе расчета свободных колебаний;

$K_{дин}$ — коэффициент динамичности системы, равен произведению квадрата безразмерной частоты колебаний на сумму произведений моментов инерции масс системы, умноженных на квадрат их относительных амплитуд колебаний α^2, или сумма произведений фрикционной стойкости масс H на квадрат их относительных амплитуд колебаний.

Результаты расчета амплитуд, эластических моментов и масштабов напряжений приведены в табл. П2.3-4 – П2.3-7.

Таблица П2.3-4

Результаты расчета параметров свободных колебаний при частоте 589,74 кол./мин (1-узловая форма колебаний)

№	Относительная амплитуда колебаний	Соединение	Относительный эластический момент	Масштаб напряжений, МПа/рад
01	1,005			
02	1	0102	0,002239	86,44
03	0,9966	0203	0,003411	61,02
04	0992	0304	0,004579	81,92
05	0,9863	0405	0,005742	102,7
06	0,9794	0506	0,006898	123,4
07	0,9713	0607	0,008046	143,9
08	0,9621	0708	0,009184	164,3
09	0,9518	0809	0,01031	184,5
10	0,9389	0910	0,01143	204,4
11	0,7038	1011	0,05345	2064
12	–2,772	1112	0,05347	$6{,}855 \cdot 10^{5}$
13	–3,118	1213	0,05324	2056
14	–5,196	1314	0,05302	2651
15	–7,26	1415	0,05265	2633
16	–9,304	1516	0,05214	2607
17	–11,74	1617	0,04898	1891

Таблица П2.3-5

Результаты расчета параметров свободных колебаний при частоте 2800,5 кол./мин (2-узловая форма колебаний)

№	Относительная амплитуда колебаний	Соединение	Относительный эластический момент	Масштаб напряжений, МПа/рад
01	1,135			
02	1	0102	0,05701	2201
03	0,9166	0203	0,08344	1493
04	0,8089	0304	0,1077	1926
05	0,6799	0405	0,129	2308
06	0,5328	0506	0,147	2630
07	0,3717	0607	0,1611	2882
08	0,2008	0708	0,1709	3058
09	0,02459	0809	0,1762	3153
10	–0,1753	0910	0,1769	3164
11	–0,1753	1011	$-5{,}636 \cdot 10^{-6}$	0,2176
12	–0,1674	1112	–0,0001214	1557
13	–0,1646	1213	–0,0004311	16,64
14	–0,1374	1314	–0,0006921	34,6
15	–0,1018	1415	–0,00091	45,5
16	–0,05976	1516	–0,001071	53,57
17	0,01625	1617	–0,001529	59,05

Таблица П2.3-6

Результаты расчета параметров свободных колебаний при частоте 4354,1 кол./мин (3-узловая форма колебаний)

№	Амплитуда	Соединение	Относительный эластический момент	Масштаб напряжений, МПа/рад
01	1,424			
02	1	0102	0,179	6911
03	0,7571	0203	0,2429	4345
04	0,4658	0304	0,2913	5210
05	0,1448	0405	0,321	5743
06	–0,1855	0506	0,3303	5908
07	–0,5039	0607	0,3184	5696
08	–0,7901	0708	0,2862	5121
09	–1,026	0809	0,2358	4217
10	–1,218	0910	0,1702	3045
11	11,11	1011	–2,802	$1{,}082 \cdot 10^{5}$
12	192,1	1112	–2,784	$3{,}569 \cdot 10^{7}$
13	204,6	1213	–1,925	$7{,}432 \cdot 10^{4}$

Окончание табл. П2.3-6

№	Амплитуда	Соединение	Относительный эластический момент	Масштаб напряжений, МПа/рад
14	249,3	1314	–1,141	$5{,}703 \cdot 10^4$
15	256,5	1415	–0,185	9251
16	225,2	1516	0,7984	$3{,}992 \cdot 10^4$
17	–21,86	1617	4,972	$1{,}92 \cdot 10^5$

Таблица П2.3-7

Результаты расчета параметров свободных колебаний при частоте 7167,3 кол./мин (4-узловая форма колебаний)

№	Амплитуда	Соединение	Относительный эластический момент	Масштаб напряжений, МПа/рад
01	4,548			
02	1	0102	1,497	$5{,}78 \cdot 10^4$
03	–0,6702	0203	1,67	$2{,}988 \cdot 10^4$
04	–2,224	0304	1,554	$2{,}78 \cdot 10^4$
05	–3,393	0405	1,169	$2{,}091 \cdot 10^4$
06	–3,975	0506	0,5816	$1{,}04 \cdot 10^4$
07	–3 868	0607	–0,1066	1907
08	–3,092	0708	–0,7763	$1{,}389 \cdot 10^4$
09	–1,78	0809	–1,312	$2{,}346 \cdot 10^4$
10	0,04998	0910	–1,62	$2{,}898 \cdot 10^4$
11	5,724	1011	–1,29	$4{,}979 \cdot 10^4$
12	87,93	1112	–1,265	$1{,}621 \cdot 10^7$
13	89,23	1213	–0,1991	7688
14	60,7	1314	0,7277	$3{,}639 \cdot 10^4$
15	7,457	1415	1,358	$6{,}791 \cdot 10^4$
16	–48,82	1516	1,436	$7{,}179 \cdot 10^4$
17	1,648	1617	–1,016	$3{,}921 \cdot 10^4$

4 РАСЧЕТ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТОРСИОГРАФИРОВАНИЯ

Исходные данные для расчета вынужденных крутильных колебаний приведены в табл. П2.4-1 и табл. П2.4-2.

Таблица П2.4-1

Общие данные

Название	Величина	Значение
Постоянный момент инерции системы	θ_0, кг · м^2	3,94
Постоянная податливость системы	e_0, рад/(Н·м)	$780 \cdot 10^{-10}$

Окончание табл. П2.4-1

Название	Величина	Значение
Номер первой массы двигателя	C_1	2
Номер последней массы двигателя	C_z	9
Чередование вспышек		13578642
Угол заклинки кривошипов	K_{si}, град	90

Таблица П2.4-2

Исходные данные для расчета вынужденных колебаний

№ масс	Приведенный момент инерции масс $\vartheta = \theta/\theta_0$	Соединение	Приведенная податливость $E = e/e_0$	Момент сопротивления $W \cdot 10^6$, м^3	Комментарий
01	1,9				демпфер
02	1	0102	2,37	339	1 цилиндр
03	1	0203	1	731	2 цилиндр
04	1	0304	1	731	3 цилиндр
05	1	0405	1	731	4 цилиндр
06	1	0506	1	731	5 цилиндр
07	1	0607	1	731	6 цилиндр
08	1	0708	1	731	7 цилиндр
09	1	0809	1	731	8 цилиндр
10	38,18	0910	1,13	731	коленчатый вал
11	0,025	1011	4,4	339	коротыш
12	0,07	1112	65	1	зубчатая муфта
13	0,06	1213	6,5	339	упорный вал
14	0,06	1314	39,2	261	промежуточный вал
15	0,06	1415	39,2	261	промежуточный вал
16	0,29	1516	39,2	261	промежуточный вал
17	3,56	1617	49,7	339	гребной вал

Результаты определения напряжений и моментов в элементах крутильно-колеблющейся системы приведены в табл. П2.4-3 – П2.4-10.

Таблица П2.4-3

Напряжения и моменты в элементах системы ЛБ (средние) по результатам торсиографирования при частоте вращения 335 мин$^{-1}$

Элементы системы	Величина	Соед.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
Порядок	ν	—	7,5	8	8,5	4,5
Торсиограф с носка коленчатого вала	A, 10^{-2} рад	01	0,136	0,295	0,072	0,106
Вал демпфера	τ, МПа	0102	2,12	5,24	1,44	0,56

Окончание табл. П2.4-3

Коленчатый вал	τ, МПа	0910	2,98	8,93	2,08	0,80
Промежуточный вал	τ, МПа	1516	0,059	0,160	0,034	0,041
Элементы системы	Величина	Соед.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
Гребной вал	τ, МПа	1617	0,059	0,169	0,039	0,032

Таблица П2.4-4

Напряжения и моменты в элементах системы ЛБ (максимальные) по результатам торсиографирования при частоте вращения 335 мин$^{-1}$

Элементы системы	Величина	Соед.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
Порядок	ν	—	7,5	8	8,5	4,5
Торсиограф с носка коленчатого вала	A, 10^{-2} рад	01	0,160	0,324	0,096	0,111
Вал демпфера	τ, МПа	0102	2,50	5,75	1,92	0,62
Коленчатый вал	τ, МПа	0910	3,51	9,80	2,78	0,83
Промежуточный вал	τ, МПа	1516	0,07	0,18	0,05	0,04
Гребной вал	τ, МПа	1617	0,07	0,19	0,05	0,03

Таблица П2.4-5

Напряжения и моменты в элементах системы ЛБ (средние) по результатам торсиографирования при частоте вращения 440 мин$^{-1}$

Элементы системы	Величина	Соед.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
Порядок	ν	—	7,5	8	8,5	4
Торсиограф с носка коленчатого вала	A, 10^{-2} рад	01	0,041	0,063	0,014	0,221
Вал демпфера	τ, МПа	0102	1,10	1,93	0,48	1,69
Коленчатый вал	τ, МПа	0910	1,67	0,95	0,78	14,88
Промежуточный вал	τ, МПа	1516	0,02	0,01	0,01	0,55
Гребной вал	τ, МПа	1617	0,03	0,02	0,02	0,46

Таблица П2.4-6

Напряжения и моменты в элементах системы ЛБ (максимальные) по результатам торсиографирования при частоте вращения 440 мин$^{-1}$

Элементы системы	Величина	Соед.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
Порядок	ν	—	7,5	8	8,5	4
Торсиограф с носка коленчатого вала	A, 10^{-2} рад	01	0,049	0,069	0,018	0,233
Вал демпфера	τ, МПа	0102	1,32	2,11	0,62	1,78
Коленчатый вал	τ, МПа	0910	2,00	1,04	1,00	15,68
Промежуточный вал	τ, МПа	1516	0,03	0,01	0,01	0,58
Гребной вал	τ, МПа	1617	0,04	0,02	0,03	0,48

Таблица П2.4-7

Напряжения и моменты в элементах системы ПрБ (средние) по результатам торсиографирования при частоте вращения 335 мин$^{-1}$

Элементы системы	Величина	Соед.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
Порядок	ν	—	7,5	8	8,5	4,5
Торсиограф с носка коленчатого вала	A, 10^{-2} рад	01	0,139	0,340	0,050	0,103
Вал демпфера	τ, МПа	0102	2,17	6,03	1,00	0,58
Коленчатый вал	τ, МПа	0910	3,05	10,29	1,45	0,77
Промежуточный вал	τ, МПа	1516	0,06	0,18	0,02	0,04
Гребной вал	τ, МПа	1617	0,06	0,19	0,03	0,03

Таблица П2.4-8

Напряжения и моменты в элементах системы ПрБ (максимальные) по результатам торсиографирования при частоте вращения 335 мин$^{-1}$

Элементы системы	Величина	Соед.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
Порядок	ν	—	7,5	8	8,5	4,5
Торсиограф с носка коленчатого вала	A, 10^{-2} рад	01	0,160	0,367	0,070	0,113
Вал демпфера	τ, МПа	0102	2,50	6,51	1,40	0,03
Коленчатый вал	τ, МПа	0910	3,51	11,10	2,03	0,85
Промежуточный вал	τ, МПа	1516	0,07	0,02	0,03	0,04
Гребной вал	τ, МПа	1617	0,07	0,02	0,04	0,03

Таблица П2.4-9

Напряжения и моменты в элементах системы ПрБ (средние) по результатам торсиографирования при частоте вращения 440 мин$^{-1}$

Элементы системы	Величина	Соед.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
Порядок	ν	—	7,5	8	8,5	4
Торсиограф с носка коленчатого вала	A, 10^{-2} рад	01	0,032	0,056	0,007	0,236
Вал демпфера	τ, МПа	0102	0,86	1,71	0,24	1,81
Коленчатый вал	τ, МПа	0910	1,30	0,84	0,39	15,88
Промежуточный вал	τ, МПа	1516	0,02	0,01	0,006	0,59
Гребной вал	τ, МПа	1617	0,03	0,02	0,01	0,49

Таблица П2.4-10

Напряжения и моменты в элементах системы ПрБ (максимальные) по результатам торсиографирования при частоте вращения 440 мин$^{-1}$

Элементы системы	Величина	Соед.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
Порядок	ν	—	7,5	8	8,5	4
Торсиограф с носка коленчатого вала	A, 10^{-2} рад	01	0,046	0,063	0,012	0,251
Вал демпфера	τ, МПа	0102	1,24	1,93	0,41	1,92
Коленчатый вал	τ, МПа	0910	1,88	0,95	0,67	16,89
Промежуточный вал	τ, МПа	1516	0,03	0,01	0,01	0,63
Гребной вал	τ, МПа	1617	0,04	0,02	0,02	0,52

5 ОЦЕНКА ПРЕДПОЛАГАЕМОГО РЕСУРСА ДЕМПФЕРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ 8NVD36.1U

5.1 Допускаемые напряжения и расчетные формулы

Допускаемые напряжения в шейках коленчатого вала рассчитываются в соответствии с 6.2 ч. IV ПКПС по следующей формуле, МПа:

$$\tau_{доп} = (45 - 0{,}4d^{0{,}5} - 13n_{рас}/n_{ном})(2R_m - 510)/R_m,$$

где d — диаметр шатунной шейки, мм: d = 155 мм;

R_m — временное сопротивление материала вала на растяжение, МПа, R_m = 510 МПа.

Подставляя значения $n_{рас}$ и $n_{ном}$ = 500 мин$^{-1}$, получим следующие значения допускаемых напряжений:

$n_{рас}$, мин$^{-1}$	$\tau_{доп}$, МПа	$n_{рас}$, мин$^{-1}$	$\tau_{доп}$, МПа	$n_{рас}$, мин$^{-1}$	$\tau_{доп}$, МПа
300	32,22004	335	31,31004	390	29,88004
320	31,70004	350	30,92004	420	29,10004
330	31,44004	370	30,40004	440	28,58004

Предполагаемый ресурс рассчитаем по формуле (6.2), приняв $K_{ст}$ = 0,99, ч:

$$R = T_{гар} \cdot \frac{\tau_{доп}}{\tau_{рез} N_{рез}/N_{мот} + \sum(\tau_{вын} \cdot N_{вын}/N_{мот})} \cdot K_{ст},$$

а остаточный ресурс – по формуле (6.1), ч:

$$T_{ост} = R - T_{нар}.$$

Частоту вынужденных колебаний рассчитаем по формуле (6.4), кол/мин:

$$N_{вын} = \nu\, n_{рас}.$$

5.2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕСУРСА ПРИ ДЕЙСТВИИ СРЕДНИХ И МАКСИМАЛЬНЫХ АМПЛИТУД КОЛЕБАНИЙ ЗА ЦИКЛ И СООТВЕТСТВУЮЩИХ ИМ НАПРЯЖЕНИЙ

Результаты расчета при действии средних, наиболее вероятных, амплитуд колебаний за цикл и соответствующих им напряжений приведены в табл. П2.5.2-1.

Таблица П2.5.2-1

Результаты расчета при действии средних амплитуд колебаний за цикл и соответствующих им напряжений

Установка левого борта				Установка правого борта			
Частота моторной формы $N_{мот}$ = 2680 кол./мин, наработка $T_{нар}$ = 33414 ч Резонансная частота вращения $n_{рез}$ = 335 мин$^{-1}$, $n_{рас}$ = 335 мин$^{-1}$							
Порядок	$N_{вын}$, кол./мин	$N_{вын}/N_{мот}$	τ, МПа	Порядок	$N_{вын}$, кол./мин	$N_{вын}/N_{мот}$	τ, МПа
7,5	2512,5	0,9375	2,98	7,5	2512,5	0,9375	3,05
8	2680,0	1	9,33*	8	2680,0	1	10,75*
8,5	2847,5	1,0625	2,08	8,5	2847,5	1,0625	1,45
4,5	1507,5	0,5625	0,80	4,5	1507,5	0,5625	0,77
$\tau_{доп}$ = 31,31004 МПа R = 62745 ч, $T_{ост}$ = 29331 ч				R = 59674 ч, $T_{ост}$ = 26260 ч			
Эксплуатационная частота вращения $n_{экс}$ = 440 мин$^{-1}$, $n_{рас}$ = 440 мин$^{-1}$							
7,5	3300	1,231343	1,67	7,5	3300	1,231343	1,30
8	3520	1,313433	0,95	8	3520	1,313433	0,84
8,5	3740	1,395522	0,78	8,5	3740	1,395522	0,39
4	1760	0,666716	14,88	4	1760	0,666716	15,9
$\tau_{доп}$ = 28,58004 МПа R = 60531,47 ч, $T_{ост}$ = 27117,47 ч				R = 62003,11 ч, $T_{ост}$ = 28589,11 ч			
* расчет выполнен по формуле (6.5)							

Результаты расчета при действии максимальных амплитуд колебаний за цикл и соответствующих им напряжений приведены в табл. П2.5.2-2.

Таблица П2.5.2-2

Результаты расчета при действии максимальных амплитуд колебаний за цикл и соответствующих им напряжений

Установка левого борта				Установка правого борта			
Частота моторной формы $N_{мот}$ = 2680 кол./мин, наработка $T_{нар}$ = 33414 ч Резонансная частота вращения $n_{рез}$ = 335 мин$^{-1}$, $n_{рас}$ = 335 мин$^{-1}$							
Порядок	$N_{вын}$, кол./мин	$N_{вын}/N_{мот}$	τ, МПа	Порядок	$N_{вын}$, кол./мин	$N_{вын}/N_{мот}$	τ, МПа
7,5	2512,5	0,9375	3,51	7,5	2512,5	0,9375	3,51
8	2680,0	1	10,25*	8	2680,0	1	11,61*
8,5	2847,5	1,0625	2,78	8,5	2847,5	1,0625	2,03
4,5	1507,5	0,5625	0,83	4,5	1507,5	0,5625	0,85
$\tau_{доп}$ = 31,31004 МПа R= 54672 ч, $T_{ост}$ = 21258 ч				R = 53029 ч, $T_{ост}$ = 19615 ч			
Эксплуатационная частота вращения $n_{экс}$ = 440 мин$^{-1}$, $n_{рас}$ = 440 мин$^{-1}$							
Порядок	$N_{вын}$, кол./мин	$N_{вын}/N_{мот}$	τ, МПа	Порядок	$N_{вын}$, кол./мин	$N_{вын}/N_{мот}$	τ, МПа
7,5	3300	1,231343	2,00	7,5	3300	1,231343	1,88
8	3520	1,313433	1,04	8	3520	1,313433	0,95
8,5	3740	1,395522	1,00	8,5	3740	1,395522	0,67
4	1760	0,666716	15,68	4	1760	0,666716	16,89
$\tau_{доп}$ = 28,58004 МПа R = 55239,61 ч, $T_{ост}$ = 21825,61 ч				R = 54448,2 ч, $T_{ост}$ = 21034,2 ч			
* – расчет выполнен по формуле (6.5)							

6 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТОРСИОГРАФИРОВАНИЯ

Основные результаты контрольного торсиографирования приведены в табл. П2.6-1.

Таблица П2.6-1

Параметры двигателя и определение остаточного ресурса демпфера двигателя 8NVD36.1U по результатам торсиографирования

Параметры	Борт	
	левый	правый
Теплоход	М. В. Ломоносов	
Двигатель	8NVD36.1U	
Заводской номер	6711585	6711583
Номинальная мощность, кВт	300	
Номинальная частота вращения, мин$^{-1}$	500	
Эксплуатационная частота вращения, мин$^{-1}$	440	
Диаметр и ширина маховика, мм	1000 × 300	
Минимальный диаметр шатунной шейки, мм	155	

Окончание табл. П2.6-1

Параметры	Борт	
	левый	правый
Наличие противовесов на коленах вала	нет	
Тип силиконового демпфера	А-560	
Наработка двигателя, ч	33414	
Гарантированный организацией-поставщиком демпфера ресурс, ч	25000 – 30000	
Фактический ресурс демпфера, ч	33414	
Частота моторной формы колебаний, Гц	44,7	
Резонансная частота вращения ν= 8, мин$^{-1}$	335	
Максимальные напряжения в коленчатом вале от резонанса 8; околорезонансных 7,5; 8,5 и вынужденных колебаний 4,5 порядков на резонансной частоте вращения, МПа	17,3	18,0
Максимальные напряжения в коленчатом вале от вынужденных колебаний 4; 8; 7,5 и 8,5 порядков на эксплуатационной частоте вращения, МПа	19,72	20,39
Допускаемые Правилами Речного Регистра напряжения:		
на резонансной частоте вращения, МПа	31,3	
на эксплуатационной частоте вращения, МПа	28,58	
Расчетная оценка предполагаемого ресурса демпфера:		
на резонансной частоте вращения, ч	62700	59600
на эксплуатационной частоте вращения, ч	60500	62000
Остаточный ресурс демпфера:		
на резонансной частоте вращения, ч	29300	26200
на эксплуатационной частоте вращения, ч	27100	28500
Время до очередного контрольного торсиографирования, ч	15000	

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
(справочное)

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛИКОНОВЫХ ДЕМПФЕРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ CAT 3512B БУКСИРА «БОДРЫЙ»

1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТОРСИОГРАФИРОВАНИЯ ГЛАВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ CAT 3512B

Работа выполнена с целью проверки работоспособности силиконовых демпферов двигателей в связи с выработкой ресурса 20 000 ч, гарантированного организацией-изготовителем демпферов. Наработка главных двигателей к моменту испытаний 9.07.2015 г. составила 21046 и 21018 ч для установок ЛБ и ПрБ соответственно.

Проверка работоспособности силиконовых демпферов выполнена торсиографированием системы ДВД.

Испытания проведены 9 июля 2015 г. специалистами ООО «ТОРСИО» (г. Санкт-Петербург) на швартовном режиме работы буксира «Бодрый» при отношении глубины к осадке более 4.

Энергетическая установка – двухвальная. Каждая пропульсивная установка (см. 11.1.3.3 ч. IV ПКПС) состоит из двигателя Caterpillar CAT 3512B, эластичной муфты RATO-S 1711, валопровода и винто-рулевой колонки (ВРК) фирмы Schottel SRP 1010-FP (рис. П3.1-1) с передаточным отношением 5,7859:1. Параметры каждого элемента установки приведены в табл. П3.1-1. На установке ЛБ предусмотрен отбор мощности от главного двигателя через эластичную муфту Stromag PVN 350 на пожарный насос (FiFi).

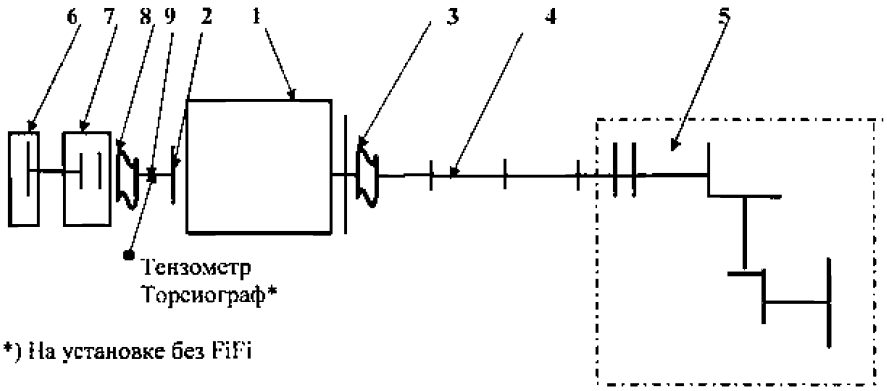


Рис. П3.1-1. Структурная схема пропульсивной установки:
1 — двигатель; *2* — демпфер; *3* — эластичная муфта RATO-S 1711; *4* — валопровод, состоящий из вала-коротыша, промежуточного вала и двух карданных валов; *5* — винто-рулевая колонка; *6* — пожарный насос; *7* — блок сцепления; *8* — эластичная муфта Stromag PVN 350; *9* — вал проставочный

Таблица П3.1-1

Параметры элементов пропульсивной установки

Элемент установки	Параметры
Двигатель Cat 3512B: двигатель ЛБ заводской № 4TN00486, двигатель ПрБ заводской № 4TN00485	Номинальная мощность 1231 кВт, частота вращения коленчатого вала двигателя на режиме номинальной мощности 1800 мин$^{-1}$, диаметр шатунных шеек коленчатого вала 135 мм; временное сопротивление материала коленчатого вала на растяжение $R_m \geq 800$ МПа
Демпфер силиконовый Damper 8NO339	Эффективный момент инерции демпфера $\theta^э = 7{,}636$ кг·м^2 ; момент инерции маховика демпфера $\theta_м = 4{,}005$ кг·м^2
Эластичная муфта RATO-S 1711	Номинальный момент $T_{kN} = 10{,}0$ кН·м, допускаемый эластический момент $T_{kW} = 2{,}5$ кН·м
Валопровод:	включает в себя вал-коротыш d_{min}=108 мм; R_m=490-510 МПа; промежуточный вал d_{min}=108 мм; R_m=490-510 МПа; два карданных вала с минимальным диаметром каждого вала d_{min}=98,4 мм
Винто-рулевая колонка	Schottel SRP 1010-FP.; $i = 5{,}7859 : 1$
Пожарный насос и его привод (FiFi)	Пожарный насос (FiFi pump) KVAERNER CN 125-500 (150 кW, 1500 об/мин); блок сцепления; муфта Stromag PVN 350; проставочный вал d_{min}= 112 мм

Крутильная схема крутильно-колеблющейся системы ЛБ, на которой указаны приведенные и редуцированные параметры звеньев, приведена на рис. П3.1-2.

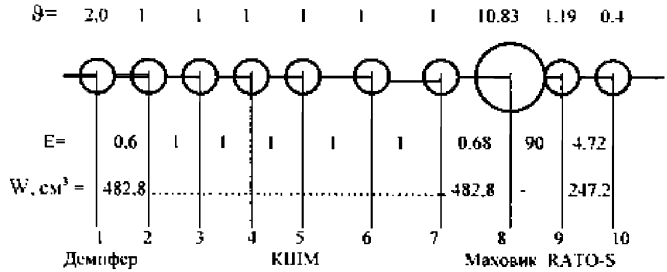


Рис. П3.1-2. Приведенная и редуцированная крутильная схема установки ЛБ

Крутильная схема крутильно-колеблющейся системы ПрБ, на которой указаны приведенные и редуцированные параметры звеньев, приведена на рис. П3.1-3.

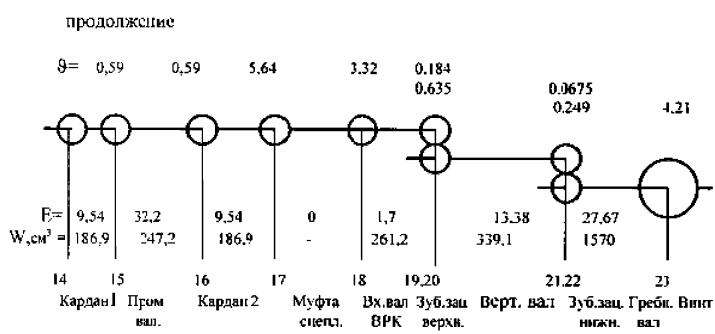


Рис. П3.1-2. Приведенная и редуцированная крутильная схема установки ПрБ

Постоянные системы:

$e_0 = 0{,}1159 \cdot 10^{-6}$ рад/(Н·м);

$\theta_0 = 1{,}6554$ кг·м^2.

Торсиографирование выполнялось на установке ПрБ с носка коленчатого вала двигателя со стороны демпфера радиоторсиографом и на установке ЛБ бесконтактной тензометрической аппара-

турой Phillips в сечении проставочного вала привода пожарного насоса (FiFi) с регистрацией исследуемых процессов на ноутбук Asus с модулем АЦП типа Е-440. Тензорезисторы типа КФ5П1-10-200 собраны по мостовой схеме и установлены универсальным секундным клеем в сечении проставочного вала ∅112 мм. Частотный диапазон измерительного сигнала аппаратуры Phillips в пределах 0 – 1500 Гц. Максимальная суммарная погрешность измерений до ±3,0 %. В качестве отметчика частот вращения применялся магнитный прерыватель, установленный на проставочном вале ∅112 мм и замыкающий цепь отметчика при каждом обороте коленчатого вала двигателя.

Торцовая бесконтактная измерительная аппаратура (радиоторсиограф 820, приемная антенна, тензостанция РТ-660): измеряемая амплитуда колебаний от ±0,1′ (угловой минуты) до ±2°47′, или от 0,001 до 0,05 рад; диапазон измеряемых частот – 0,5 Гц до 1000 Гц; несущая частота – 5,0 кГц; диапазон частот вращения – до 2800 мин$^{-1}$.

Максимальная суммарная погрешность полного тракта (радиоторсиограф – приемная антенна – тензостанция – аналого-цифровой преобразователь – регистрирующая аппаратура) до ±2,0 %.

Торсиограммы записывались при изменении частот вращения от минимально устойчивых 650 мин$^{-1}$ до максимально возможных 1765 мин$^{-1}$ и обратно, а также при проходе всего диапазона частот вращения ступенями через 100 мин$^{-1}$ в соответствии с ГОСТ 26046 и руководством Р.009-2004 «Расчет и измерение крутильных колебаний валопроводов и агрегатов».

Обработка торсиограмм выполнялась по методике [4].

Графики развития амплитуд напряжений в сечении проставочного вала ∅112 мм и амплитуд колебаний носка коленчатого вала построены по наибольшим амплитудам за цикл. Гармонический анализ произведен на аналого-цифровом преобразователе Е-440. Образцы тарировки аппаратуры и торсиограмм представлены в разд. 1 настоящего приложения.

В исследуемом диапазоне зарегистрированы резонансные колебания ν=3,5; 4,5 и 6,0 порядков моторной формы (4-узловой – установка ПрБ; 5-узловой – установка ЛБ) с частотой (90,4 – 92,75) Гц – ПрБ и 83,4Гц – ЛБ. Следует отметить, что расхождение по частотам, зарегистрированных в процессе торсиографиро-

вания, и представленных в расчете составляет до 9,9 %, и поэтому понадобилась корректировка крутильной схемы и выполнение расчета свободных колебаний до допустимых расхождений 5 %, а также определение масштабов напряжений и моментов в элементах системы.

Расчет свободных колебаний системы при работе на ВРК и при работе на пожарный насос представлен в разд. 2 настоящего приложения. Расхождение между расчетом и измерениями не превышает 4,5 %. В разд. 2 представлены таблицы и формы колебаний только до 6-узловой формы. Остальные формы колебаний не представляют практического интереса.

Допускаемые напряжения и амплитуды колебаний для коленчатого вала приняты по данным фирмы Caterpillar.

Допускаемые напряжения для любого рассматриваемого отдельно взятого порядка колебаний составляют 21 МПа, а допускаемые амплитуды колебаний носка коленчатого вала:

для порядков $\nu = 0,5$ и $\nu = 1,0$ — $A = 1,00°$;

для порядка $\nu = 1,5$ — $A = 0,25°$;

для всех других порядков — $A = 0,15°$.

Расчет напряжений произведен по формулам [4].

Значения резонансных амплитуд колебаний и напряжений (максимальных и средних наиболее вероятных) представлены в табл. П3.1-2.

Таблица П3.1-2

Резонансные амплитуды колебаний и напряжения от них

Форма колебаний	Порядок ν	$n_{рез}$	$A^*_{1\ рез}$, 10^{-5}, рад	Установка ЛБ			Установка ПрБ		
				Напряжения на коленчатом валу, МПа					
				Макс. $\tau_{рез}$	Средн. $\tau_{рез}$	$\tau_{доп}$	Макс. $\tau_{рез}$	Средн. $\tau_{рез}$	$\tau_{доп}$
4-узловая	3,5	1550	173/93	–	–	–	9,1	4,9	21,0
4-узловая	4,5	1270	129/60	–	–	–	6,8	3,2	21,0
4-узловая	6	1010	120/60	–	–	–	6,3	3,2	21,0
5-узловая	3,5	1430	215,9/108	11,3	5,7	21,0	–	–	–

*В числителе значения максимальных амплитуд колебаний, в знаменателе – средних наиболее вероятных

Примечание. $A_1 = \tau_{рез,т,т+1}(1/\delta_{т,т+1}) i\, e_0\, W_{т,т+1}$, рад; $W_{т,т+1} = W_{4,5} =$ 275,7 см^3; $\tau_{рез,т,т+1} = \tau_{4,5}$, МПа; $\tau_{рез,3,5} = 1,0/0,5$ МПа; $\delta_{т,т+1} = \delta_{4,5} = 0,01452$; $i = 1$; $A_х/A_т = \alpha_х/\alpha_т$

Расчетная оценка предполагаемого ресурса демпферов, остаточный ресурс, и время до очередного контрольного торсиографирования определены в соответствии с методикой оценки работоспособности силиконовых демпферов крутильных колебаний двигателей [1].

Предполагаемый ресурс силиконового демпфера R при действии суммарных резонансных, околорезонансных и вынужденных колебаний, определяется из выражения, ч:

$$R = T_{\text{гар}} \cdot \left[\tau_{\text{доп}} \Big/ \left(\tau_{\text{рез}} N_{\text{рез}} / N_{\text{мот}} \right) \right] \cdot K_{\text{ст}}, \qquad \text{(П3.1-1)}$$

где $T_{\text{гар}}$ — ресурс безотказной работы демпфера, гарантированный фирмой-изготовителем, ч: $T_{\text{гар}} = 20000$;

$\tau_{\text{доп}}$ — допускаемые для длительной работы напряжения в коленчатом валу при действии резонанса отдельно взятого порядка (см. табл. П3.1-2), МПа;

$\tau_{\text{рез}}$ — действующие напряжения в коленчатом валу от резонанса ν-го порядка, МПа;

$N_{\text{рез}}$ — резонансная частота моторной формы колебаний, Гц;

$N_{\text{мот}}$ — расчетная частота моторной формы колебаний, Гц;

$K_{\text{ст}}$ — коэффициент, учитывающий изменение физико-химических свойств силиконовой жидкости в результате ее «старения» за весь период срока службы демпфера, $K_{\text{ст}} = 0{,}98$.

Предполагаемый ресурс демпфера определен для резонансов 3,5, 4,5 и 6,0 порядков, причем в разд. 3 настоящего приложения произведена оценка предполагаемого ресурса демпфера при действии резонанса 3,5 порядка как наиболее сильного.

Остаточный ресурс демпфера $T_{\text{ост}}$ определяется по формуле, ч

$$T_{\text{ост}} = R - T_{\text{нар}}, \qquad \text{(П3.1-2)}$$

где R — предполагаемый ресурс силиконового демпфера, ч;

$T_{\text{нар}}$ — наработка демпфера от начала эксплуатации до контрольного торсиографирования, ч: $T_{\text{нар}} = 21046$ (21018).

Расчет представлен в разд. 3 настоящего приложения.

Основные результаты торсиографирования и время до очередного контрольного торсиографирования представлены в разд. 4 настоящего приложения.

Результаты торсиографирования

Наибольшие напряжения в коленчатых валах двигателей вызваны действием резонанса 3,5 порядка на частоте вращения 1430 мин$^{-1}$ – ЛБ и 1550 мин$^{-1}$ – ПрБ.

При этом:

в установке ЛБ максимальные напряжения достигают 11,3 МПа, а средние, наиболее вероятные, значения составляют 5,7 МПа, что ниже допускаемых 40,4 МПа;

в установке ПрБ максимальные напряжения достигают 9,1 МПа, а средние, наиболее вероятные, значения составляют 4,9 МПа, что ниже допускаемых 39,2 МПа.

Выводы по результатам испытаний

На основании выполненных исследований крутильных колебаний установок правого и левого бортов буксира «Бодрый» можно сделать следующие выводы:

Силиконовые демпферы Damper 8NO339 двигателей Caterpillar CAT 3512B (зав. № 4TN00486-ЛБ, зав. № 4TN00485 – ПрБ) находятся в технически удовлетворительном состоянии и допускаются к дальнейшей эксплуатации.

Контрольное торсиографирование демпферов двигателей левого и правого бортов необходимо произвести через 10000 ч.

2 ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Образцы записи тарировочных графиков, торсиограмм и графики гармонического анализа применительно к установке ПрБ приведены на рис. П.3.2-1 – П3.2-9.

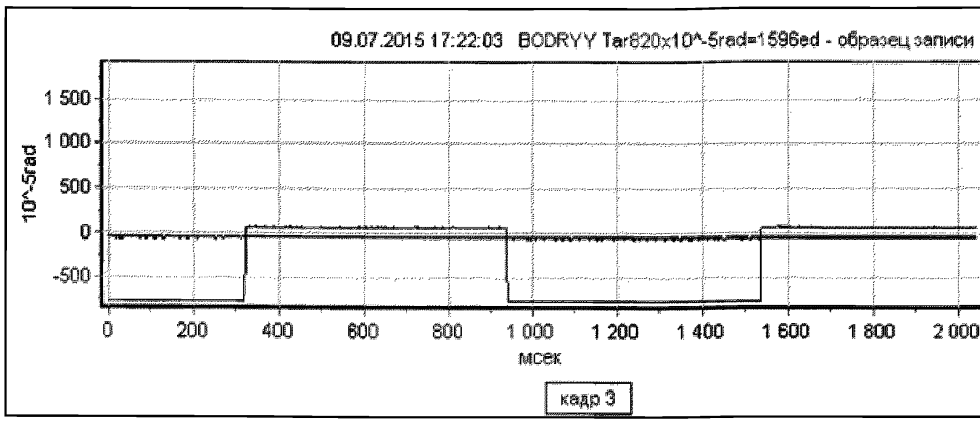


Рис. П3.2-1 Тарировочный график

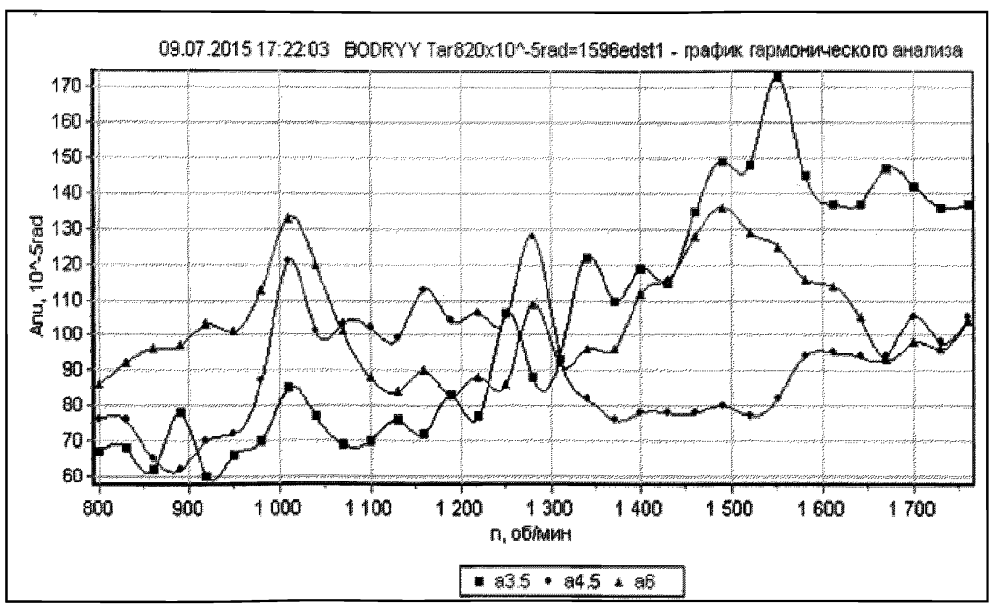


Рис. П3.2-2 График 1 гармонического анализа при работе на ВРК с максимальной нагрузкой. Максимальные амплитуды колебаний

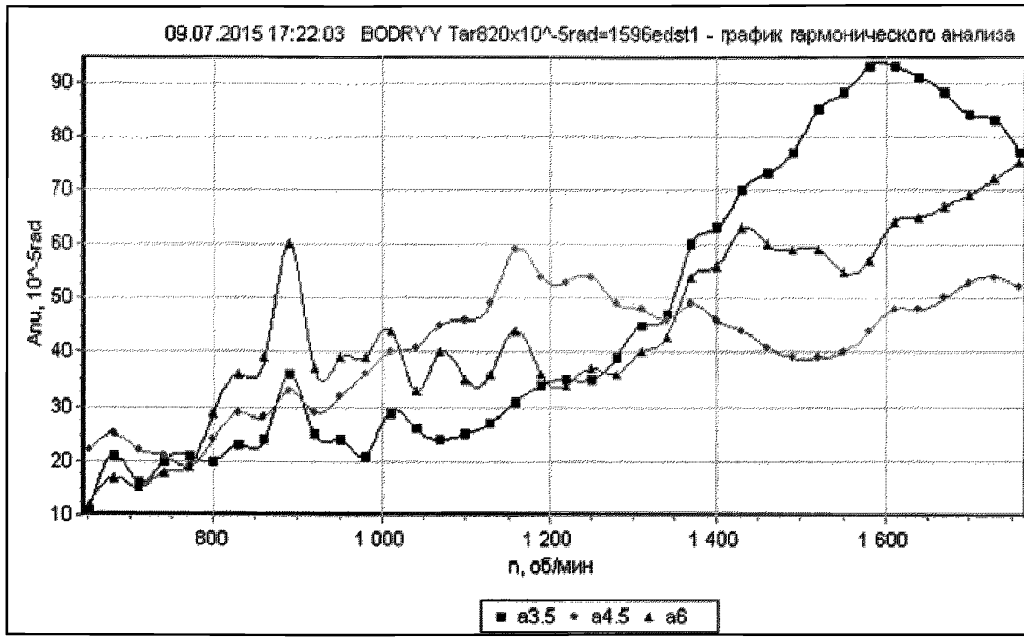


Рис. П3.2-3 График 2 гармонического анализа при работе на ВРК с максимальной нагрузкой. Усредненные амплитуды колебаний

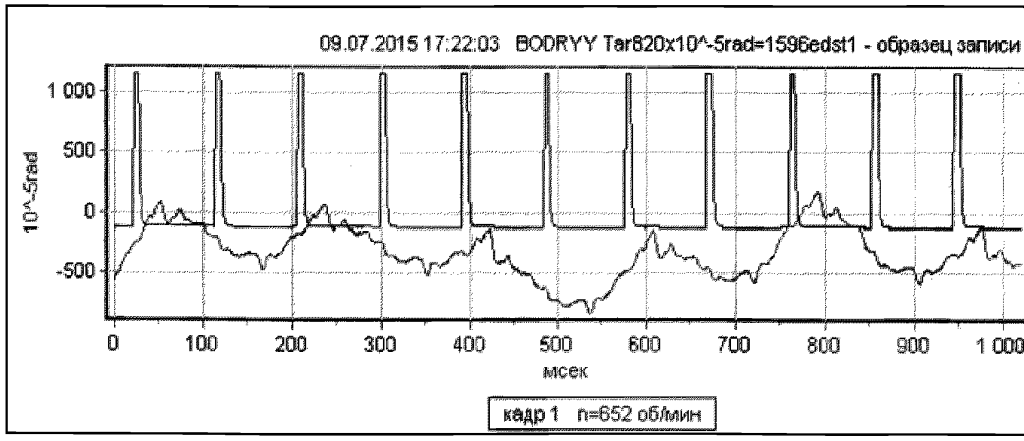


Рис. П3.2-4 Образец 1 записи торсиограммы

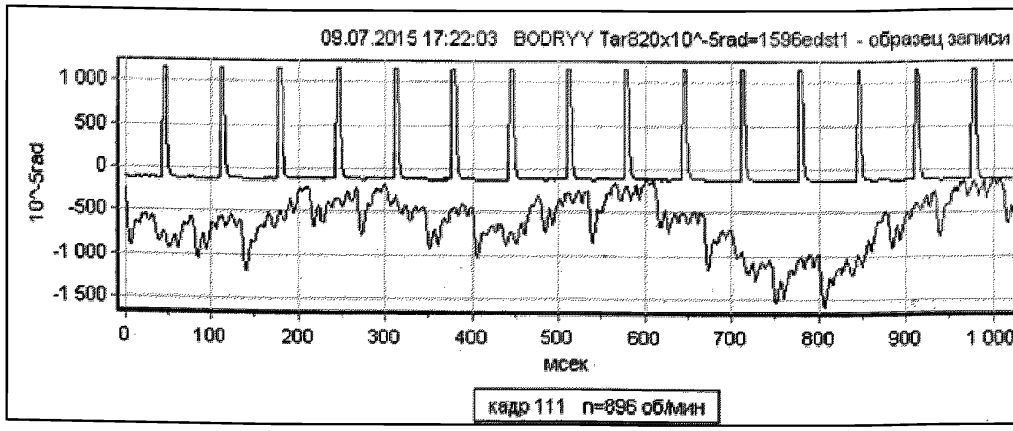


Рис. П3.2-5 Образец 2 записи торсиограммы

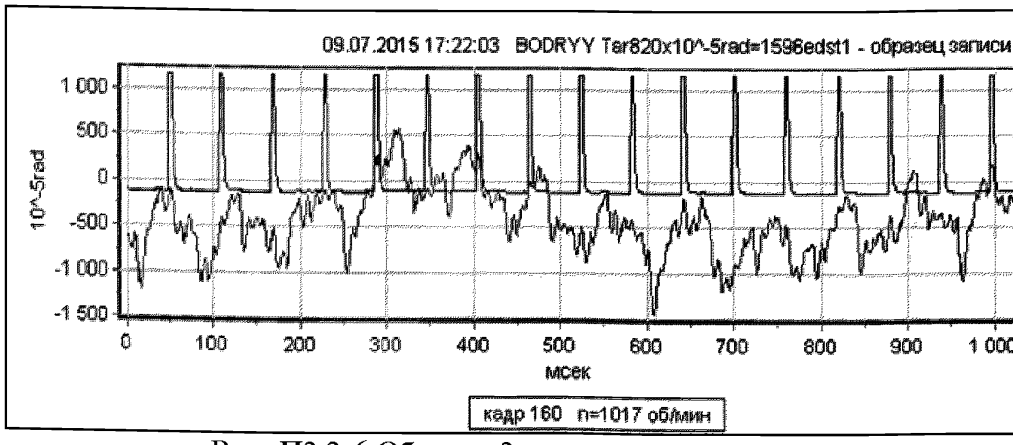


Рис. П3.2-6 Образец 3 записи торсиограммы

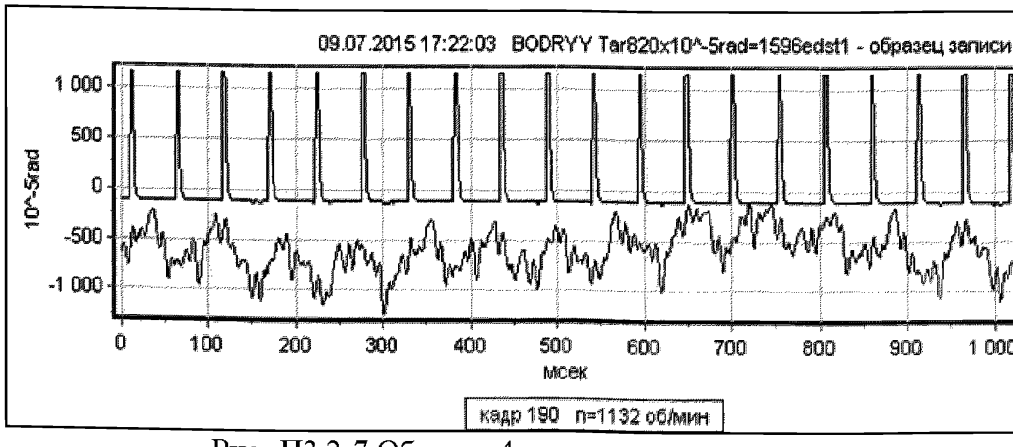


Рис. П3.2-7 Образец 4 записи торсиограммы

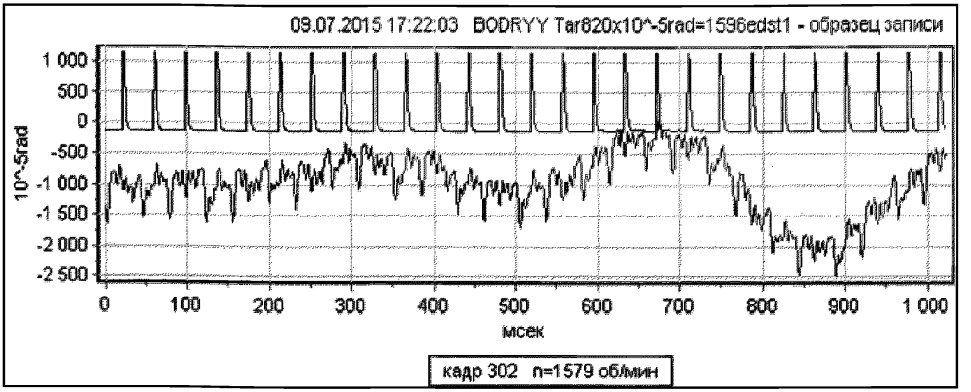


Рис. П3.2-8 Образец 5 записи торсиограммы

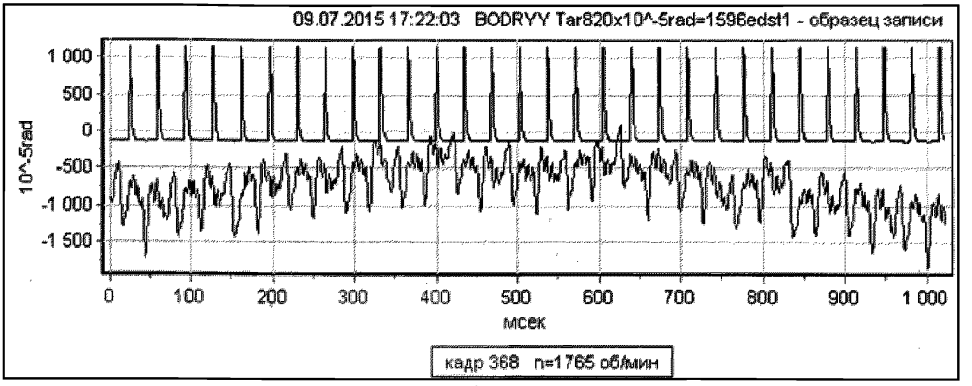


Рис. П3.2-9 Образец 6 записи торсиограммы

Образцы записи тарировочных графиков, торсиограмм и графики гармонического анализа применительно к установке ЛБ приведены на рис. П.3.2-10 – П3.2-14.

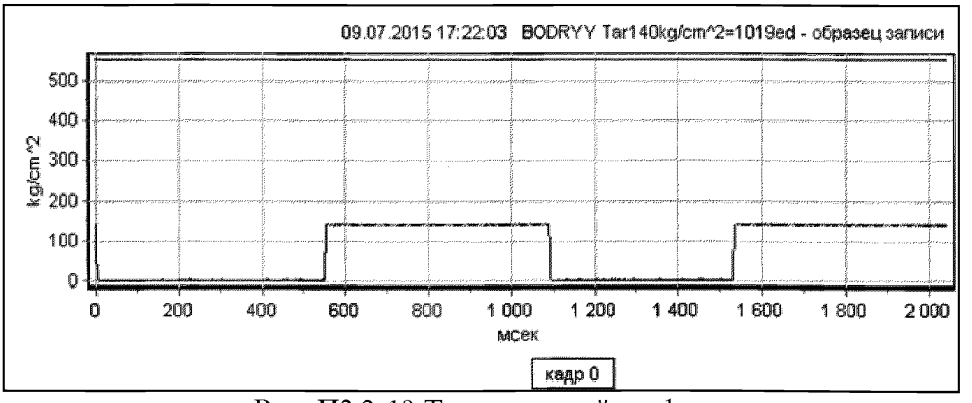


Рис. П3.2-10 Тарировочный график

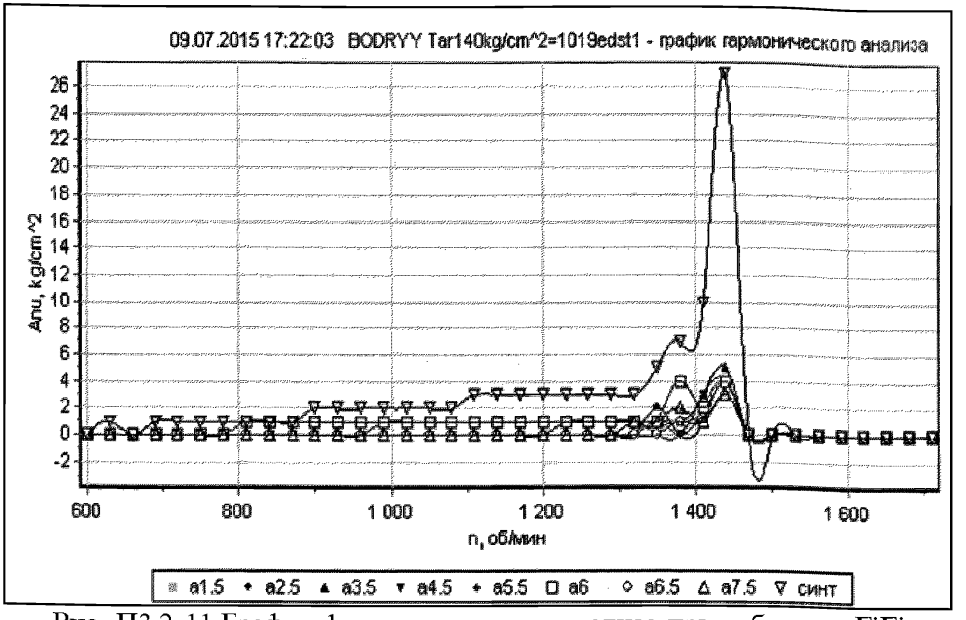


Рис. П3.2-11 График 1 гармонического анализа при работе на FiFi с максимальной нагрузкой

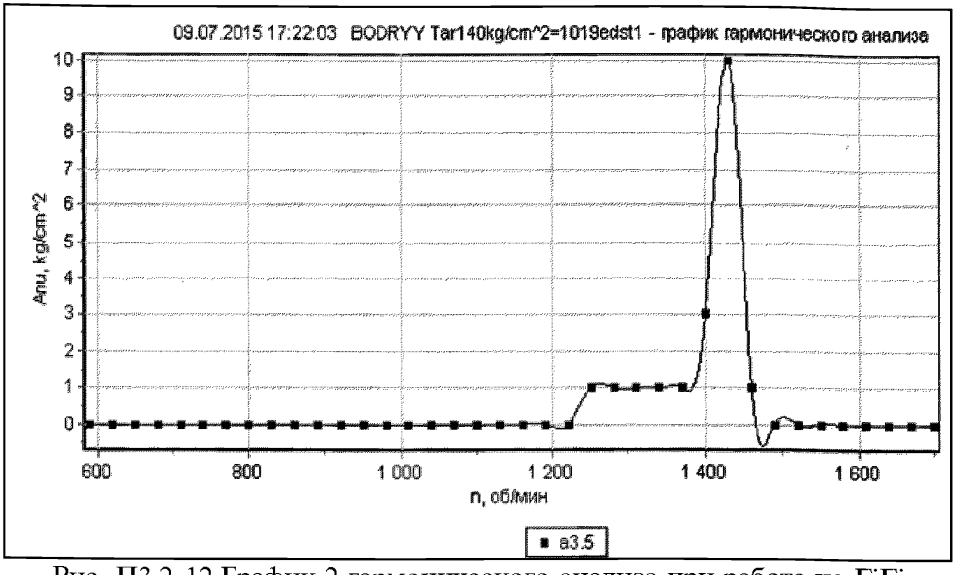


Рис. П3.2-12 График 2 гармонического анализа при работе на FiFi с максимальной нагрузкой. Максимальные амплитуды колебаний

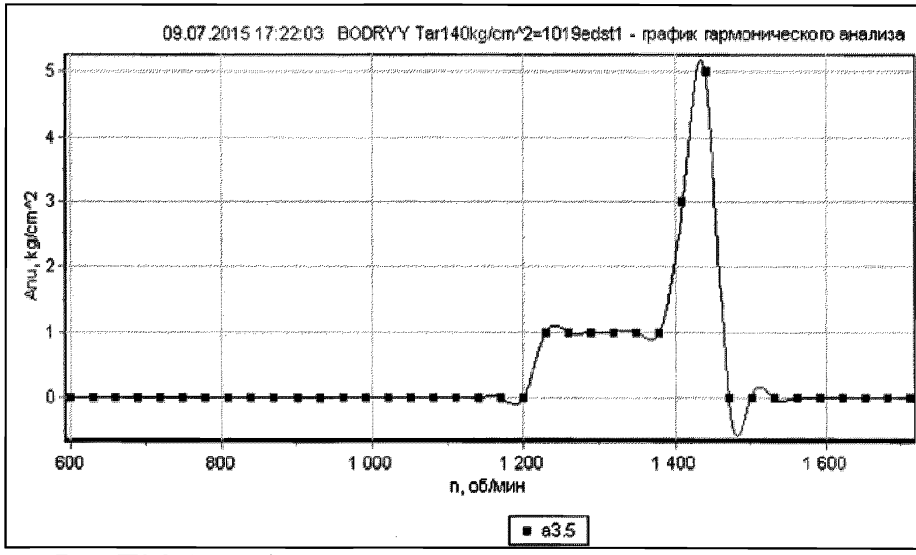


Рис. П3.2-13 График 3 гармонического анализа при работе на FiFi с максимальной нагрузкой. Усредненные амплитуды колебаний

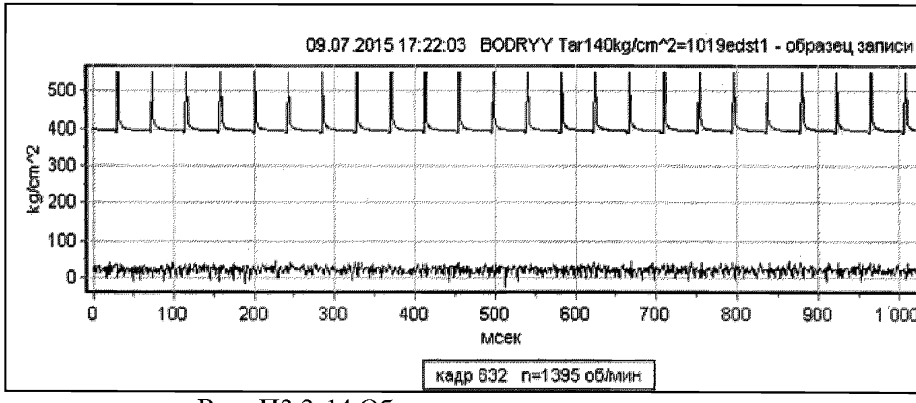


Рис. П3.2-14 Образец записи торсиограммы

3 РАСЧЕТ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Исходные данные для расчета свободных крутильных колебаний в установке ЛБ приведены в табл. П3.3-1 и табл. П3.3-2.

Таблица П3.3-1

Общие данные

Установка ЛБ с пожарным насосом RATO и Stromag 100 %	Величина	Значение
Момент инерции, кг·м^2	Θ_0	1,6554
Податливость, рад/(Н·м)	e_0	0,1159 e-06
Относительный момент сопротивления, МПа$^{-1}$	a_0	1,0 e-05
Минимальная частота, кол/мин	N_{min}	180
Максимальная частота, кол/мин	N_{max}	25920
Точность расчета, значащих цифр	Z_c	5
Номер первой массы двигателя	N_{a1}	6

Таблица П3.3-2

Исходные данные для расчета свободных колебаний в установке ЛБ

№	Момент инерции	Связь	Податливость	Относительный момент сопротивления	Комментарий
01	0,7				пожарный насос
02	0,147	0102	11,4	0,37	входной вал
03	0,508	0203	3,9	0,37	редуктор, блок сцепления
04	0,271	0304	500	0,01137	муфта Stromag PVN350
05	2,0	0405	0,98	3,13	демпфер, проставочный вал
06	1	0506	0,68	5,49	цилиндр 1
07	1	0607	1	5,49	цилиндр 2
08	1	0708	1	5,49	цилиндр 3
09	1	0809	1	5,49	цилиндр 4
10	1	0910	1	5,49	цилиндр 5
11	1	1011	1	5,49	цилиндр 6
12	10,83	1112	0,68	5,49	маховик
13	1,19	1213	90	0,01137	муфта RATO-S1711
14	0,4	1314	4,72	2,81	вал-коротыш
15	0,59	1415	9,54	2,12	кардан 1
16	0,59	1516	32,2	2,81	промежут. вал
17	5,64	1617	9,54	2,12	кардан 2
18	3,32	1718	0	0,01137	фрикц. муфта
19	0,184	1819	1,7	2,97	вх. вал ВРК
20	0,635	1920	0	0,01137	верхн. зуб. зац.
21	0,0675	2021	13,33	1,67	вертик. вал
22	0,249	2122	0	0,0049	нижн. зуб. зац.
23	4,21	2223	27,67	3,08	гребной вал и винт

Результаты расчета частот колебаний в установке ЛБ приведены в табл. П3.3-3.

Таблица П3.3-3

Результаты расчета частот колебаний различных форм

№	Частота, кол./мин	$\Theta_{экв}$	$K_{дин}$
01	593,48	1,35 e-10	3,86 e-02
02	871,97	5,47 e-12	2,68 e-01
03	1909,2	-1,32 e-03	2,06 e+01
04	2850,3	-6,59 e-04	1,396 e+01
05	5154,3	6,16 e-05	4,00 e-01
06	9341,7	9,82 e-03	1,21 e+05
07	10065	-1,17 e-05	4,17 e+04
08	11411	-2,00 e-02	2,48 e+05
09	12386	-3,84 e-02	1,17 e+07
10	13388	-6,31 e-02	2,32 e+01
11	20745	-5,08 e-01	5,10 e+06
12	21519	-5,956 e-01	3,01 e+06
13	22275	-6,826 e-01	4,79 e+01
$\Theta_{экв}$ и $K_{дин}$ см. табл. П2.3-3 приложения 2			

Результаты расчета амплитуд, эластических моментов и масштабов напряжений для первых шести форм свободных колебаний в установке ЛБ приведены в табл. П3.3-4 – П3.3-9. Остальные формы колебаний интереса не представляют.

Таблица П3.3-4

Результаты расчета параметров свободных колебаний 1-узловой формы

01	Частота колебаний 593,48 кол./мин			
№	амплитуда	связь	относительный эластический момент	масштаб напряжений МПа / рад
01	2,0448			
02	2,0327	0102	0,001061	286,740
03	2,0277	0203	0,0012824	346,600
04	1,0047	0304	0,0020459	1,7994 e04
05	1,0025	0405	0,0022477	71,812
06	1	0506	0,0037338	68,012
07	0,99552	0607	0,004475	81,512
08	0,99031	0708	0,0052129	94,952
09	0,98437	0809	0,0059469	108,320
10	0,97769	0910	0,0066765	121,610
11	0,97029	1011	0,0074011	134,810
12	0,96477	1112	0,0081203	147,910
13	-0,46304	1213	0,015864	1,395 e05
14	-0,53599	1314	0,015456	550,040

Окончание табл. П3.3-4

01	Частота колебаний 593,48 кол./мин			
№	амплитуда	связь	относительный эластический момент	масштаб напряжений МПа / рад
15	-0,68193	1415	0,015297	721,560
16	-1,1649	1516	0,014999	533,770
17	-1,3031	1617	0,01449	683,470
18	-1,3031	1718	0,0090422	7,953 e04
19	-1,313	1819	0,0058355	196,480
20	-1,313	1920	0,0056564	4,975 e04
21	-1,3805	2021	0,0050385	301,700
22	-1,3805	2122	0,0049694	1,014 e05
23	-1,5109	2223	0,0047146	153,070

Таблица П3.3-5

Результаты расчета параметров свободных колебаний 2-узловой формы

02	Частота колебаний 871,97 кол./мин			
№	амплитуда	связь	относительный эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	-10,364			
02	-10,232	0102	-0,011608	3137,200
03	-10,177	0203	-0,014014	3787,600
04	0,96585	0304	-0,022286	1,960 e05
05	0,98728	0405	-0,021867	698,640
06	1	0506	-0,013708	340,770
07	1,0171	0607	-0,017108	311,620
08	1,0326	0708	-0,015481	281,980
09	1,0464	0809	-0,013829	251,890
10	1,0586	0910	-0,012154	221,390
11	1,069	1011	-0,010461	190,540
12	1,075	1112	-0,0087501	159,380
13	0,18605	1213	0,009877	8,687 e04
14	0,13776	1314	0,010231	364,100
15	0,039312	1415	0,010319	486,760
16	-0,29417	1516	0,010357	368,560
17	-0,39032	1617	0,010079	475,420
18	-0,39032	1718	0,0065566	5,767 e04
19	-0,39794	1819	0,0044832	150,950
20	-0,39794	1920	0,0043661	3,840 e04
21	-0,45095	2021	0,0039618	237,230
22	-0,45095	2122	0,0039131	7,986 e04
23	-0,55425	2223	0,0037334	121,220

Таблица П3.3-6

Результаты расчета параметров свободных колебаний 3-узловой формы

03	Частота колебаний 1909,2 кол./мин			
№	амплитуда	связь	относительный эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	-0,25184			
02	-0,23684	0102	-0,0013153	355,480
03	-0,23067	0203	-0,0015823	427,660
04	1,0099	0304	-0,0024812	2,182 e04
05	1,0103	0405	-0,00038189	12,201
06	1	0506	0,015117	275,350
07	0,97721	0607	0,022787	415,060
08	0,94693	0708	0,030283	551,590
09	0,90938	0809	0,037546	683,890
10	0,86486	0910	0,044521	810,950
11	0,81371	1011	0,051155	931,780
12	0,77468	1112	0,057396	1045,500
13	-10,183	1213	0,12175	1,071e06
14	-10,319	1314	0,028804	1025,000
15	-10,291	1415	-0,0028557	134,700
16	-8,6998	1516	-0,04943	1759,100
17	-7,8527	1617	-0,088801	4188,700
18	-7,8527	1718	-0,42851	3,769 e06
19	-6,7842	1819	-0,62849	2,116 e04
20	-6,7842	1920	-0,63806	5,6118 e06
21	2,1952	2021	-0,67111	4,019 e04
22	2,1952	2122	-0,66997	1,367 e07
23	20,617	2223	-0,66578	2,162 e04

Таблица П3.3-7

Результаты расчета параметров свободных колебаний 4-узловой формы

04	Частота колебаний 2850,3 кол./мин			
№	амплитуда	связь	относительный эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	0,1399			
02	0,18362	0102	-0,0038349	1036,500
03	0,19678	0203	-0,0033734	911,730
04	1,029	0304	-0,0016645	1,464 e04
05	1,026	0405	0,0031029	99,136
06	1	0506	0,038183	695,500
07	0,94472	0607	0,055279	1006,900
08	0,87329	0708	0,07143	1301,100
09	0,78693	0809	0,08636	1573,000

Окончание табл. П3.3-7

04	Частота колебаний 2850,3 кол./мин			
№	амплитуда	связь	относительный эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
10	0,68712	0910	0,099813	1818,100
11	0,57556	1011	0,11156	2032,100
12	0,49301	1112	0,1214	2211,300
13	-18,648	1213	0,21268	1,870 e06
14	-17,861	1314	-0,1667	5932,500
15	-15,106	1415	-0,28885	1,362 e04
16	-0,89869	1516	-0,44121	1,570 e04
17	3,397	1617	-0,45028	0,212
18	3,397	1718	-0,12274	1,079 e06
19	3,2778	1819	0,07007	2359,300
20	3,2778	1920	0,080381	7,070 e05
21	1,7262	2021	0,11597	6944,000
22	1,7262	2122	0,11796	2,407 e06
23	-1,741	2223	0,12531	4068,400

Таблица П3.3-8

Результаты расчета параметров свободных колебаний 5-узловой формы

05	Частота колебаний 5154,3 кол./мин			
№	амплитуда	связь	относительный эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	-0,042423			
02	-0,025018	0102	-0,0015267	412,620
03	-0,018262	0203	-0,0017323	468,190
04	1,1072	0304	-0,0022509	1,9797 e04
05	1,093	0405	0,014524	464,010
06	1	0506	0,13673	2490,500
07	0,80736	0607	0,19264	3508,800
08	0,56959	0708	0,23777	4331,000
09	0,29998	0809	0,26961	4911,000
10	0,013594	0910	0,28639	5216,500
11	-0,27355	1011	0,28714	5230,300
12	-0,45841	1112	0,27185	4951,800
13	0,05413	1213	-0,0056949	5,009 e04
14	0,064012	1314	-0,0020938	74,512
15	0,070331	1415	-0,00066234	31,243
16	0,016961	1516	0,0016575	58,985
17	-0,0041886	1617	0,0022169	104,570
18	-0,0041886	1718	0,0008962	7882,200
19	-0,0043905	1819	0,00011877	3,999
20	-0,0043905	1920	7,3607 e-05	647,380

Окончание табл. П3.3-8

05	Частота колебаний 5154,3 кол./мин			
№	амплитуда	связь	относительный эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
21	-0,0032899	2021	-8,2256 e-05	4,925
22	-0,0032899	2122	-9,4671 e-05	1932,100
23	0,00059682	2223	-0,00014047	4,561

Таблица П3.3-9

Результаты расчета параметров свободных колебаний 6-узловой формы

06	Частота колебаний 9341,7 кол./мин			
№	амплитуда	связь	относительный эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	108,35			
02	-117,32	0102	19,796	5,350 e06
03	-182,17	0203	16,629	4,494 e06
04	0,70954	0304	-0,36576	3,217 e06
05	1,0334	0405	-0,33045	1,056 e04
06	1	0506	0,049088	894,130
07	0,76727	0607	0,23273	4239,100
03	0,39364	0708	0,37363	6805,600
09	-0,052272	0809	0,44592	8122,300
10	-0,48859	0910	0,43632	7947,500
11	-0,83518	1011	0,34659	6313,200
12	-0,96657	1112	0,19322	3519,500
13	154,65	1213	-1,7291	1,521 e07
14	3,2952	1314	32,067	1,141 e06
15	-304,94	1415	32,31	1,524 e06
16	-281,44	1516	-0,72961	2,596 e04
17	16,426	1617	-31,223	1,473 e06
18	16,426	1718	-14,21	1,250 e08
19	23,559	1819	-4,1958	1,413 e05
20	23,559	1920	-3,3998	2,990 e07
21	32,29	2021	-0,65256	3,908 e04
22	32,29	2122	-0,25231	5,149 e06
23	-1,5835	2223	1,2242	3,975 e04

Графики, иллюстрирующие результаты расчета амплитуд свободных колебаний в установке ЛБ, приведены на рис. П3.3-1 – П3.3-6.

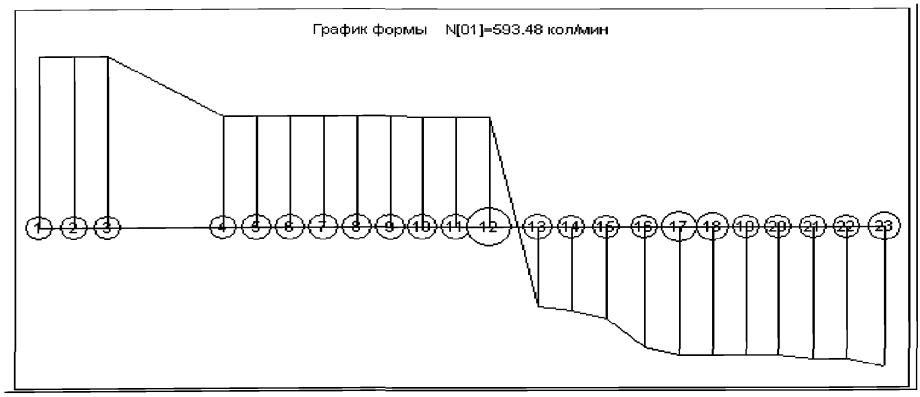


Рис. П3.3-1. График амплитуд свободных колебаний 1-узловой формы

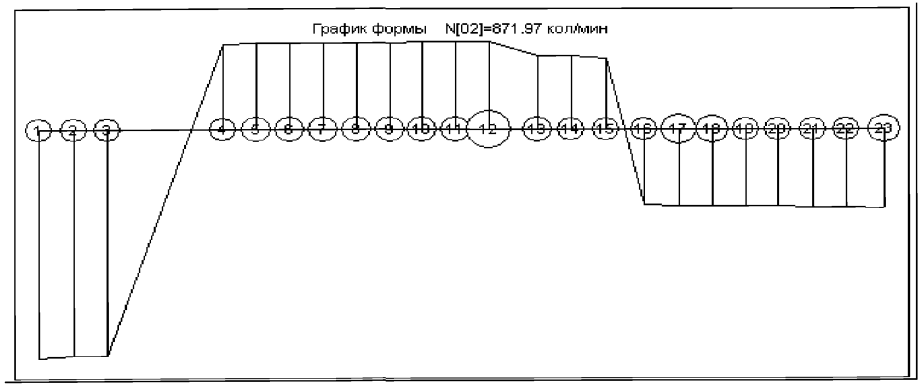


Рис. П3.3-2. График амплитуд свободных колебаний 2-узловой формы

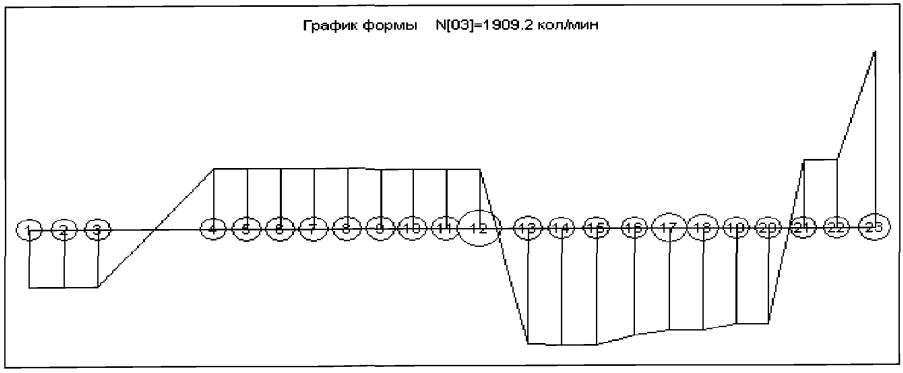


Рис. П3.3-3. График амплитуд свободных колебаний 3-узловой формы

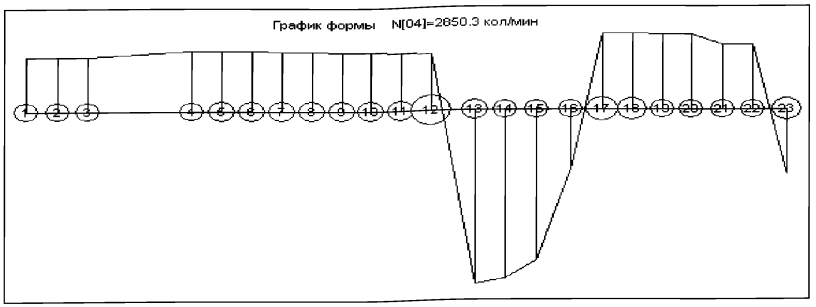


Рис. П3.3-4. График амплитуд свободных колебаний 4-узловой формы

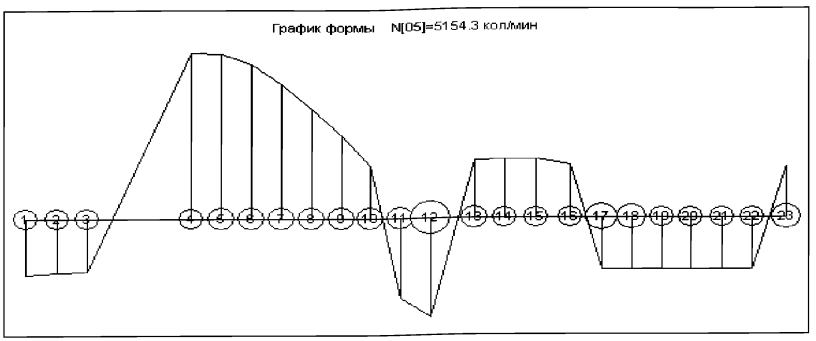


Рис. П3.3-5. График амплитуд свободных колебаний 5-узловой формы

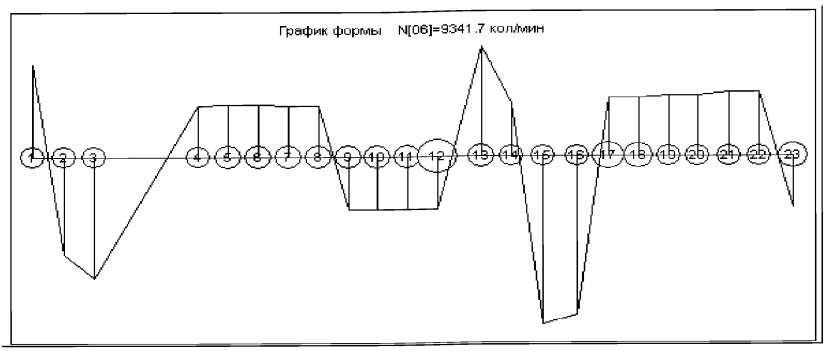


Рис. П3.3-6. График амплитуд свободных колебаний 6-узловой формы

Исходные данные для расчета свободных крутильных колебаний в установке ПрБ приведены в табл. П3.3-10 и табл. П3.3-11.

Таблица П3.3-10

Общие данные

Буксир «Бодрый». Установка ПрБ без пож. насоса	Величина	Значение
Момент инерции, кг·м^2	e_0	1,6554
Податливость, рад/(Н·м)	Θ_0	0,1159 e-06
Относительный момент сопротивления, МПа$^{-1}$	a_0	1,0 e-05
Минимальная частота, кол/мин	N_{min}	180
Максимальная частота, кол/мин	N_{max}	25920
Точность расчета, значащих цифр	Z_c	5
Номер первой массы двигателя	N_{a1}	2

Таблица П3.3-11

Исходные данные для расчета свободных колебаний в в установке ПрБ

№	Момент инерции	Связь	Податливость	Относительный момент сопротивления	Комментарий
01	2,0				демпфер
02	1	0102	0,6	5,49	цилиндр 1
03	1	0203	0,6	5,49	цилиндр 2
04	1	0304	0,6	5,49	цилиндр 3
05	1	0405	0,6	5,49	цилиндр 4
06	1	0506	0,6	5,49	цилиндр 5
07	1	0607	0,6	5,49	цилиндр 6
08	10,8	0708	0,6	5,49	маховик
09	1,19	0809	90	0,01137	муфта RATO-S
10	0,40	0910	4,72	2,81	вал-коротыш
11	0,59	1011	9,54	2,12	кардан 1
12	0,59	1112	32,2	2,81	промежут. вал
13	5,64	1213	9,54	2,12	кардан 2
14	3,32	1314	0	0,01137	фрикц. муфта
15	0,184	1415	1,7	2,97	вх. вал ВРК
16	0,635	1516	0	0,01137	верхн. зуб. зац.
17	0,0675	1617	13,38	1,67	вертик. вал
18	0,249	1718	0	0,0049	нижн. зуб. зац.
19	4,21	1819	27,67	3,08	гребной вал, винт

Результаты расчета частот колебаний в установке ПрБ приведены в табл. П3.3-12.

Результаты расчета амплитуд, эластических моментов и масштабов напряжений для первых шести форм свободных колебаний в установке ПрБ приведены в табл. П3.3-13 – П3.3-18. Остальные формы колебаний интереса не представляют.

Таблица П3.3-12

Результаты расчета частот колебаний различных форм

№	Частота, кол/мин	$\Theta_{экв}$	$K_{дин}$
01	614,49	8,08 e-10	3,14 e-02
02	1909,2	-3,67 e-06	2,05 e+01
03	2850,7	1,15 e-05	1,41 e+01
04	5313,1	5,90 e-07	3,87 e-01
05	9341,6	1,45 e+00	3,40 e+05
06	11410	-7,05 e+00	8,69 e+02
07	12387	5,09 e-01	1,85 e+02
08	13853	1,71 e-05	1,38 e+01
09	20744	-5,72 e+00	5,59 e+00
10	21519	3,98 e+01	2,43 e+02
11	23009	2,48 e-04	1,70 e+02
$\Theta_{экв}$ и $K_{дин}$ см. табл. П2.3-3 приложения 2			

Таблица П3.3-13

Результаты расчета параметров свободных колебаний 1-узловой формы

01	Частота колебаний 614,49 кол./мин			
№	амплитуда	связь	эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	1,001			
02	1	0102	0,0015914	28,987
03	0,99761	0203	0,002386	43,461
04	0,99444	0304	0,0031787	57,900
05	0,99047	0405	0,0039689	72,293
06	0,93571	0506	0,0047559	86,628
07	0,98017	0607	0,0055391	100,890
08	0,97638	0708	0,0063179	115,080
09	-0,34633	0809	0,014697	1,293 e05
10	-0,41416	0910	0,014369	511,360
11	-0,54999	1011	0,014238	671,590
12	-1,0001	1112	0,01398	497,500
13	-1,129	1213	0,013511	637,310
14	-1,129	1314	0,0084513	7,433 e04
15	-1,1383	1415	0,0054728	184,270
16	-1,1383	1516	0,0053064	4,667 e04
17	-1,2017	1617	0,004732	283,360
18	-1,2017	1718	0,0046676	9,526 e04
19	-1,3242	1819	0,0044298	143,830

Таблица П3.3-14

Результаты расчета параметров свободных колебаний 2-узловой формы

02	Частота колебаний 1909,2 кол./мин			
№	амплитуда	связь	эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	1,0093			
02	1	0102	0,01552	282,700
03	0,97681	0203	0,023191	422,420
04	0,94613	0304	0,030683	558,890
05	0,90819	0405	0,03794	691,080
06	0,86328	0506	0,044906	817,970
07	0,81175	0607	0,051528	938,580
08	0,7771	0703	0,057755	1052,000
09	-10,215	0809	0,12213	1,074 e06
10	-10,351	0910	0,028894	1028,200
11	-10,324	1011	-0,0028646	135,120
12	-8,727	1112	-0,049584	1764,600
13	-7,8772	1213	-0,089078	4201,800
14	-7,8772	1314	-0,42985	3,781 e06
15	-6,8054	1415	-0,63045	2,123 e04
16	-6,8054	1516	-0,64005	5,629 e06
17	2,202	1617	-0,6732	4,031 e04
18	2,202	1718	-0,67206	1,372 e07
19	20,682	1819	-0,66786	2,168 e04

Таблица П3.3-15

Результаты расчета параметров свободных колебаний 3-узловой формы

03	Частота колебаний 2850,7 кол./мин			
№	амплитуда	связь	эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	1,0213			
02	1	0102	0,035556	647,650
03	0,94734	0203	0,052657	959,140
04	0,87849	0304	0,068857	1254,200
05	0,79461	0405	0,08388	1527,900
06	0,69714	0506	0,097468	1775,400
07	0,58775	0607	0,10939	1992,500
08	0,51608	0708	0,11944	2175,600
09	-13,812	0809	0,21476	1,889 e06
10	-18,019	0910	-0,16807	5981,000
11	-15,239	1011	-0,29132	1,374 e04
12	-0,90795	1112	-0,44508	1,584 e04
13	3,4255	1213	-0,45424	2,143 e04
14	3,4255	1314	-0,12385	1,089 e06
15	3,3054	1415	0,070627	2378,000

Окончание табл. П3.3-15

03	Частота колебаний 2850,7 кол./мин			
№	амплитуда	связь	эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
16	3,3054	1516	0,081027	7,126 e05
17	1,741	1617	0,11692	7001,300
18	1,741	1713	0,11893	2,427 e06
19	-1,7549	1819	0,12634	4102,100

Таблица П3.3-16

Результаты расчета параметров свободных колебаний 4-узловой формы

04	Частота колебаний 5313,1 кол./мин			
№	амплитуда	связь	эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	1,0768			
02	1	0102	0,12794	2330,400
03	0,81266	0203	0,18734	3412,400
04	0,57705	0304	0,23561	4291,700
05	0,30715	0405	0,26989	4916,100
06	0,019014	0506	0,28814	5248,400
07	-0,27025	0607	0,28927	5269,000
08	-0,43418	0708	0,27321	4976,600
09	0,04623	0809	-0,0053379	4,6947 e04
10	0,056	0910	-0,0020699	73,663
11	0,063053	1011	-0,0007393	34,873
12	0,015701	1112	0,0014706	52,334
13	-0,0035782	1213	0,0020208	95,323
14	-0,0035782	1314	0,00082201	7229,700
15	-0,003776	1415	0,00011632	3,916
16	-0,003776	1516	7,5048 e-05	660,050
17	-0,0028744	1617	-6,7386 e-05	4,035
18	-0,0028744	1718	-7,8912 e-05	1610,400
19	0,00048554	1819	-0,00012143	3,942

Таблица П3.3-17

Результаты расчета параметров свободных колебаний 5-узловой формы

05	Частота колебаний 9341,6 кол./мин			
№	амплитуда	связь	эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	-1,0459			
02	1	0102	-3,4099	6,211 e04
03	4,2263	0203	-3,2263	5,877 e04
04	6,6764	0304	-2,4502	4,463 e04
05	7,9006	0405	-1,2241	2,230 e04
06	7,6739	0506	0,22668	4129,000
07	6,038	0607	1,6359	2,980 e04

Окончание табл. П3.3-17

05	Частота колебаний 9341,6 кол./мин			
№	амплитуда	связь	эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
08	4,3912	0708	2,7447	4,999 e04
09	-1026,4	0809	11,454	1,007 e08
10	-21,787	0910	-212,85	7,575 e06
11	2024,1	1011	-214,45	1,012 e07
12	1868	1112	4,8471	1,725 e05
13	-109,02	1213	207,23	9,775 e06
14	-109,02	1314	94,317	8,295 e08
15	-156,37	1415	27,848	9,376 e05
16	-156,37	1516	22,564	1,985 e08
17	-214,31	1617	4,3308	2,593 e05
18	-214,31	1718	1,6744	3,417 e07
19	10,51	1819	-8,1251	2,638 e05

Таблица П3.3-18

Результаты расчета параметров свободных колебаний 6-узловой формы

06	Частота колебаний 11410 кол./мин			
№	амплитуда	связь	эластический момент	масштаб напряжений, МПа/рад
01	0,073159			
02	1	0102	-1,5447	2,814 e04
03	2,2708	0203	-1,2708	2,315 e04
04	2,9195	0304	-0,64868	1,182 e04
05	2,7683	0405	0,15113	2752,900
06	1,8588	0506	0,90954	1,657 e04
07	0,44002	0607	1,4188	2,584 e04
08	-0,48357	0708	1,5393	2,804 e04
09	-10,252	0809	0,10854	9,546 e05
10	5,0113	0910	-3,2338	1,151 e05
11	30,623	1011	-2,6847	1,266 e05
12	-42,313	1112	2,2651	8,061 e04
13	1,3249	1213	-4,5742	2,158 e05
14	1,3249	1314	-2,5271	2,223 e07
15	3,5723	1415	-1,322	4,451 e04
16	3,5723	1516	-1,1419	1,004 e07
17	10,536	1617	-0,52049	3,117 e04
18	10,536	1718	-0,32564	6,646 e06
19	-0,34083	1819	0,39311	1,276 e04

Графики, иллюстрирующие результаты расчета амплитуд свободных колебаний в установке ПрБ, приведены на рис. П3.3-7 – П3.3-12.

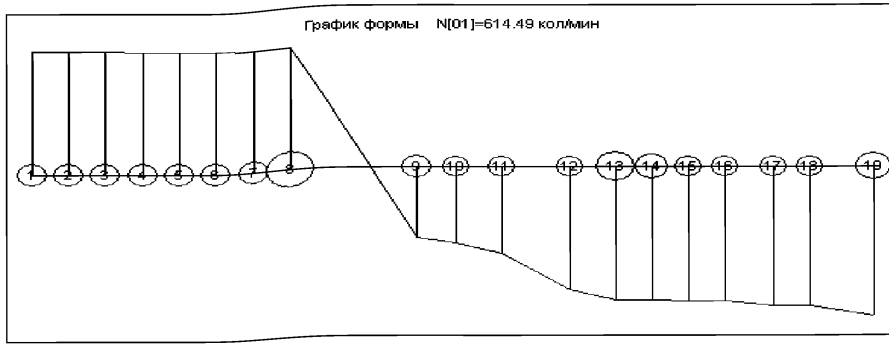


Рис. П3.3-7. График амплитуд свободных колебаний 1-узловой формы

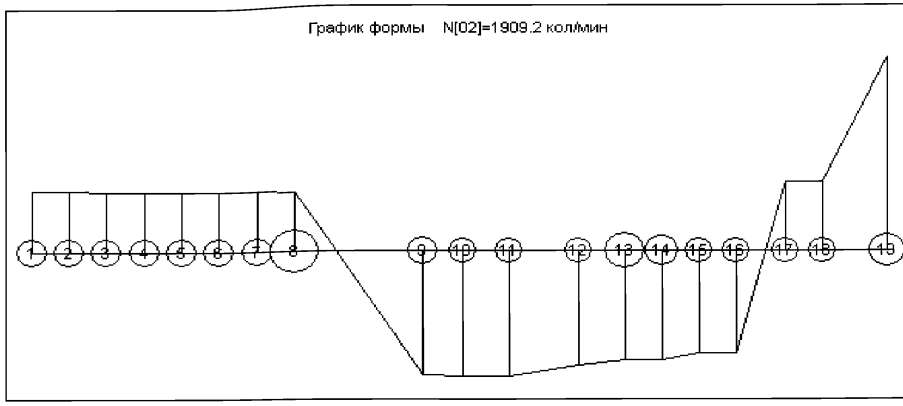


Рис. П3.3-8. График амплитуд свободных колебаний 2-узловой формы

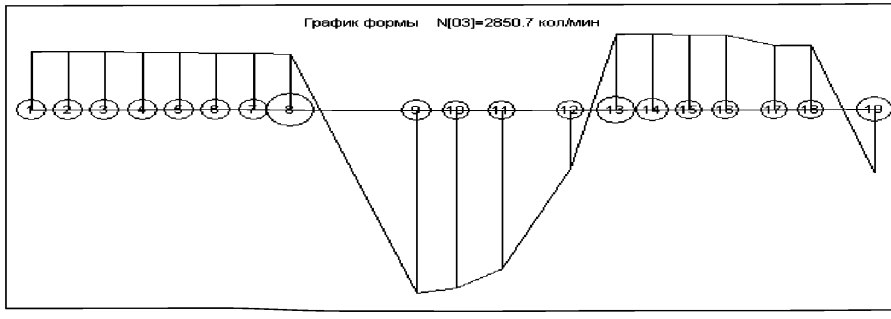


Рис. П3.3-9. График амплитуд свободных колебаний 3-узловой формы

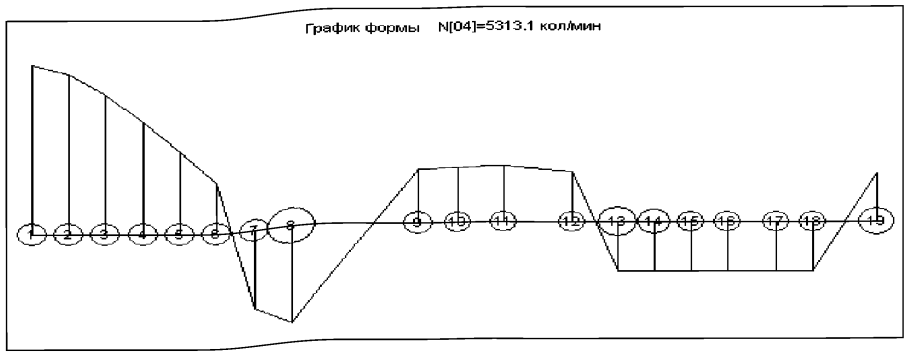


Рис. П3.3-10. График амплитуд свободных колебаний 4-узловой формы

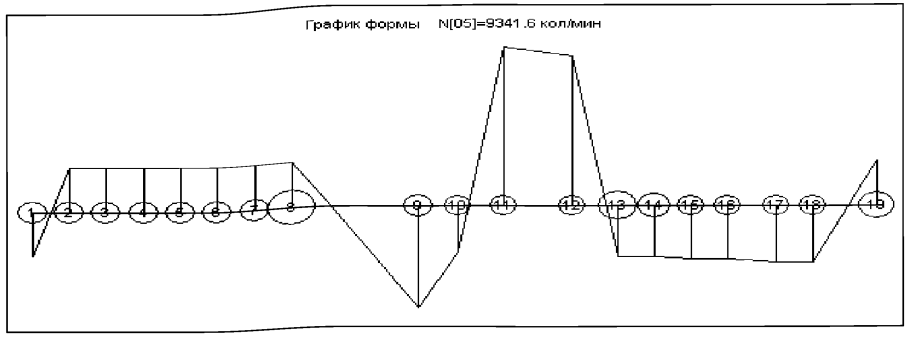


Рис. П3.3-11. График амплитуд свободных колебаний 5-узловой формы

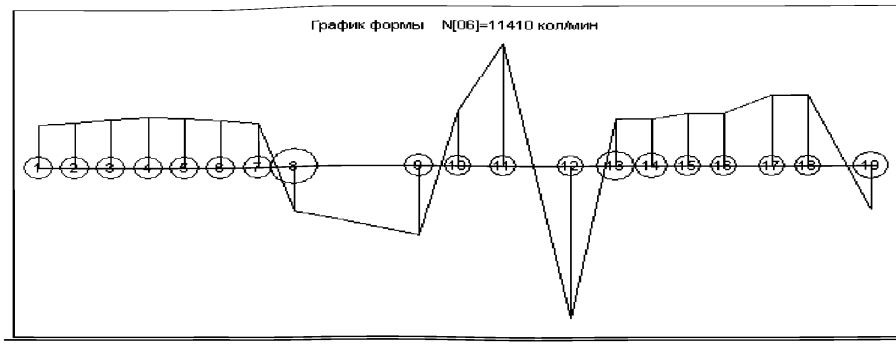


Рис. П3.3-12. График амплитуд свободных колебаний 6-узловой формы

4 ОЦЕНКА ПРЕДПОЛАГАЕМОГО РЕСУРСА ДЕМПФЕРА

4.1 Расчетные формулы

Оценим ресурс демпфера двигателя CAT 3512B при $K_{ст} = 0{,}98$ и $\tau_{доп} = 21{,}0$ МПа с помощью следующих формул:

предполагаемый ресурс, ч

$$R = 20000\left[\tau_{доп}\Big/\left(\tau_{рез}N_{рез}/N_{мот}\right)\right]K_{ст}\ ;$$

остаточный ресурс

$T_{ост} = R - T_{нар}$.

4.2 Оценка ресурса демпфера двигателя ЛБ для средних, наиболее вероятных, значений амплитуд

В расчете использованы следующие значения параметров:

частота колебаний моторной формы $N_{мот} = 5005$ кол./мин;

частота резонансных колебаний $N_{рез} = 5005$ кол./мин;

наработка двигателя $T_{нар} = 21046$ ч;

резонансная частота вращения $n_{рез} = 1430$ мин$^{-1}$;

действующие напряжения в коленчатом вале от резонанса 3,5 порядка $\tau_{рез} = 5{,}7$ МПа.

Получены следующие результаты:

предполагаемый ресурс демпфера $R = 72210{,}53$ ч;

остаточный ресурс демпфера $T_{ост} = 51164{,}53$ ч.

4.3 Оценка ресурса демпфера двигателя ЛБ для максимальных значений амплитуд

В расчете использованы следующие значения параметров:

частота колебаний моторной формы $N_{мот} = 5005$ кол./мин;

частота резонансных колебаний $N_{рез} = 5005$ кол./мин;

наработка двигателя $T_{нар} = 21018$ ч;

резонансная частота вращения $n_{рез} = 1430$ мин$^{-1}$;

действующие напряжения в коленчатом вале от резонанса 3,5 порядка $\tau_{рез} = 11{,}3$ МПа.

Получены следующие результаты:

предполагаемый ресурс демпфера $R = 36424{,}78$ ч;

остаточный ресурс демпфера $T_{ост} = 15378{,}78$ ч.

4.4 Оценка ресурса демпфера двигателя ПрБ для средних, наиболее вероятных значений амплитуд

В расчете использованы следующие значения параметров:
частота колебаний моторной формы $N_{мот}$ = 5005 кол./мин;
частота резонансных колебаний $N_{рез}$ = 5215 кол./мин;
наработка двигателя $T_{нар}$ = 21018 ч;
резонансная частота вращения $n_{рез}$ = 1550 мин$^{-1}$;
действующие напряжения в коленчатом вале от резонанса 3,5 порядка $\tau_{рез}$ = 4,9 МПа.
Получены следующие результаты:
предполагаемый ресурс демпфера R = 80617,45 ч;
остаточный ресурс демпфера $T_{ост}$ = 59599,45 ч.

4.5 Оценка ресурса демпфера двигателя ПрБ для максимальных значений амплитуд

В расчете использованы следующие значения параметров:
частота колебаний моторной формы $N_{мот}$ = 5005 кол./мин;
частота резонансных колебаний $N_{рез}$ = 5425 кол./мин;
наработка двигателя $T_{нар}$ = 21018 ч;
резонансная частота вращения $n_{рез}$ = 1550 мин$^{-1}$;
действующие напряжения в коленчатом вале от резонанса 3,5 порядка $\tau_{рез}$ = 9,1 МПа.
Получены следующие результаты:
предполагаемый ресурс демпфера R = 41729,03 ч;
остаточный ресурс демпфера $T_{ост}$ = 20711,03 ч.

5 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТОРСИОГРАФИРОВАНИЯ

Основные результаты торсиографирования сведены в табл. П3.5-1.

Таблица П3.5-1

Результаты определения остаточного ресурса демпферов

Параметры	Борт	
	левый	правый
Теплоход	Бодрый	
Двигатель	CAT 3512B	
Заводской номер	4TN00486	4TN00485
Номинальная мощность, кВт	1231	

Окончание табл. П3.5-1

Параметры	Борт	
	левый	правый
Номинальная частота вращения, мин$^{-1}$	1800	
Эксплуатационная частота вращения, мин$^{-1}$	1500–1600	
Маховик	–	
Минимальный диаметр шатунной шейки, мм	135	
Наличие противовесов на коленах вала	–	
Тип силиконового демпфера	Damper 8NO339	
Наработка двигателя, ч	21046	21018
Ресурс, гарантированный фирмой-поставщиком демпфера, ч	20000	
Использованный ресурс демпфера, ч	21046	21018
Частота моторной формы колебаний, Гц	83,4	90,4–92,75
Резонансная частота вращения ν=3,5, мин$^{-1}$	1430	1550–1590
Максимальные напряжения в коленчатом вале на резонансной частоте вращения, МПа	11,3	9,1
Допускаемые напряжения на резонансной частоте вращения, МПа	21,0	
Расчетная оценка предполагаемого ресурса демпфера*, ч	36400/72200	41700/80600
Остаточный ресурс демпфера, ч	15300/51100	20700/59500
Время до очередного контрольного торсиографирования, ч	10000	10000
* В числителе — при действии максимальных напряжений, в знаменателе — при действии средних, наиболее вероятных напряжений		

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернов С. Е. Методика оценки работоспособности силиконовых демпферов крутильных колебаний судовых дизелей.

Судостроение, 2000, № 3. С. 27 – 31.

2. ГОСТ 26046-83. Установки судовые. Общие требования к испытаниям на крутильные колебания. –

М.: ГК СССР по стандартизации.

3. Российский Речной Регистр. Руководство Р.009-2004 «Расчет и измерение крутильных колебаний валопроводов и агрегатов».

4. Терских В. П. Крутильные колебания валопровода силовых установок. Т. 1 – 4. — Л.: Судостроение, 1969 – 1971.

5. Алексеев В. В. Демпфирование крутильных колебаний в судовых валопроводах. / В. В. Алексеев, Ф. Ф. Болотин, Г. Д. Кортын. — Л.: Судостроение, 1973.

6. Бухарина Г. И. Вопросы повышения точности и достоверности исследования крутильных колебаний судовых валопроводов. / Г. И. Бухарина, Л. В. Ефремов, М. Ю. Иванов, К. О. Сергеев. // Российский морской регистр судоходства. Научно-технический сборник, 1999. Вып. 22, с. 152 – 168.

gost.e-ecolog.ru