

УДК 621.431.74

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ РЕДУКТОРОВ МОРСКОГО БУКСИРА

В. В. Родыгин, асп.

Н. И. Николаев д-р техн. наук, проф.

В. В. Герасиди, канд. техн. наук,

Изложены современные методы контроля технического состояния дизель-редукторной установки морских судов. Нормативные документы РС и результаты безразборного контроля состояния судового редуктора и линии вала позволяют упростить процедуру освидетельствования, существенно сократив затраты судовладельца. Полученный результат также помогает выявить скрытые дефекты, сократить количество аварийных случаев, определить сроки проведения работ по техническому обслуживанию судовой дизель-редукторной установки.

Ключевые слова: редуктор; контроль состояния; вибрация; освидетельствование.

Article describes the modern methods to control the technical condition of the ship's diesel engine-gearbox. Regulatory documents Register of Shipping and the results of monitoring condition marine gearbox, shaft line are simplifying the procedure for Classification Surveys considerably reducing the cost. This results also helps to detect hidden defects reduce the amount of accidents, to determine time of maintenance of the ship's diesel engine-gearbox.

Key words: gearbox; control the technical condition; vibration; surveys.

Состав и эксплуатация СЭУ.

Одним из основных типов судовой энергетической установки (СЭУ) для судов среднего и малого водоизмещения является дизель-редукторная установка (ДРУ). Использование редуктора дает возможность назначать частоту враще-

ния гребного вала отличную от оборотов главных высоко- и среднеоборотных двигателей, что позволяет получить максимальный КПД импульсивного комплекса (оптимальные размеры винта, конструкция корпуса и т.п.).

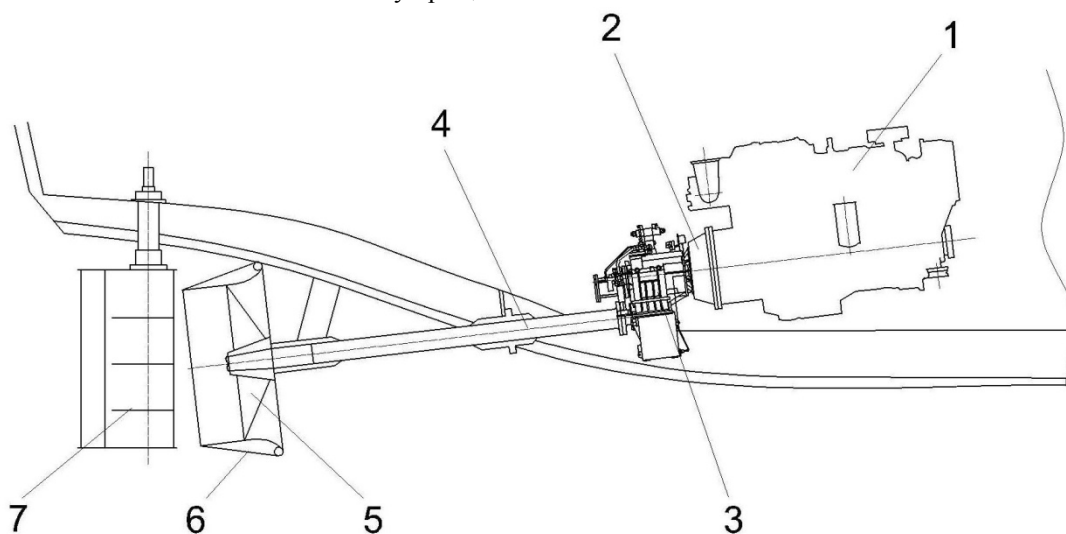


Рис. 1 Дизель-редукторная установка буксира проекта 2608 с реверс редукторной передачей:
1 – главный двигатель (ГД); 2 – муфта; 3 – редуктор; 4 – гребной вал; 5 – винт; 6 – насадка; 7 – перо руля

Редукторы, входящие в состав ДРУ отличаются многообразием конструкций. В основном на современных судах применяются редукторы с цилиндрическими и планетарными ступенями. Они имеют высокий КПД, компактны, надежны и позволяют распределять передаваемую мощность на несколько потоков. На примере буксира проекта 2608 фирмы «Damen» рассмотрим двухвальную ДРУ с реверс – редуктором WAF 675L немецкой компании «Reintjes».

Каждый судовой дизель буксира приводит в движение ВФШ в направляющей насадке через

реверс-редуктор. ГД установлен на амортизаторах, передача мощности от двигателя к редуктору осуществляется через упругую муфту. ГД высокооборотные (ВОД) Caterpillar 3512C TA (1230 кВт), четырехтактные, 12 – цилиндровые, V – образные дизеля с газотурбинным наддувом, оснащенные электронной системой управления. Каждая дейдвудная труба состоит из толстостенной стальной трубы, приваренной к конструкции корпуса, и опирается в корме на два кронштейна, имеющие V-образное расположение. Дейдвудные трубы – закрытого типа с масляной ванной,

снабжаются сальниками в носу и корме. Гребные валы изготавливаются из высококачественной стали. Каждый гребной вал опирается на два подшипника Railko с масляной смазкой, тип CY160LS. ВФШ типа Kaplan II имеют 3 лопасти и рассчитаны на номинальный крутящий момент дизеля. Редуктор WAF 675L (таблица 1) выполнен из серого литейного чугуна и стали, жестко крепится к фундаменту. Имеет встроенное многодисковое сцепление с гидравлическим приводом, что обеспечивает плавное включение для полной передачи мощности в обоих направлениях. Масло имеет автономный контур циркуляции и охлаждается в теплообменнике контуром забортной воды. Реверс осуществляется регулирующим клапаном с электрическим и пневматическим приводом, с возможностью аварийного управления. Параметрический контроль над работой редуктора в эксплуатации производится с помощью датчиков давления, температуры масла, оборотов входного и выходного валов дистанционно или с местного пульта управления.

Таблица 1
Спецификация редуктора WAF 675L

Наименование	Характеристики
Модель	WAF 675L
Изготовитель	Reintjes, Германия
Год постройки	2012
Серийный номер	78402
Тип редуктора	цилиндрический, реверсивный
Передаточное число	7,476:1
Входная мощность, кВт	1230
Допустимый крутящий момент на входе, Нм	6523
Объем масла, л	90
Обороты на входе, мин ⁻¹	1800
Обороты на выходе, мин ⁻¹	241
Масса редуктора, кг	2570

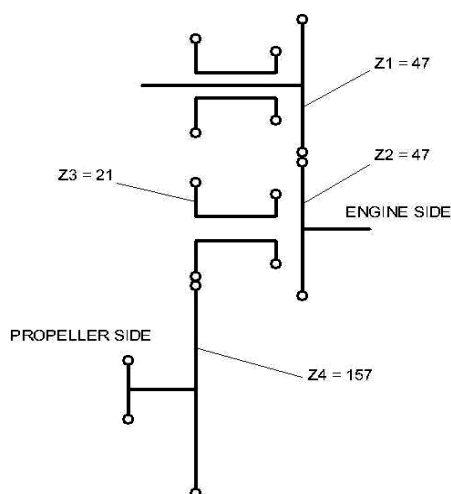


Рис. 2 Кинематическая схема редуктора WAF 675L «Reintjes»

Эксплуатация и ремонт редуктора производится в соответствии с правилами завода изготовителя и РС в строго регламентируемые сроки. Ежедневные проверки на стоянке и на ходу включают в себя визуальный осмотр, уровень, давление и температуру масла, а также состояние масляного фильтра. Каждые 2000 часов или 6 месяцев производится анализ масла (при необходимости его замена), проверка теплообменника, цинковых протекторов, и замена масляного фильтра. Через 5000 часов эксплуатации или один год осуществляется обтяжка болтов и чистка масляного холодильника. По истечению 30000 часов заводом изготовителем предусмотрен капитальный ремонт редуктора с осмотром и частичной заменой отдельных деталей.

Особенность контроля редуктора при освидетельствовании «по состоянию»

Особенностью современных редукторов является сложность, и трудоемкость контроля технического состояния с помощью предусмотренных РС Правил классификационных освидетельствований. Правила [1] предписывают вскрытие редуктора для детального осмотра и, при необходимости разборкой его узлов и деталей, что влечет за собой существенные материальные затраты. Учитывая особенности эксплуатации судов с ДРУ (нагрузки до 50%, наработка до 2000 часов/год) и рекомендации завода изготовителя (разборка редуктора - 30000 часов), представляется возможным разработать систему и производить обслуживание редуктора «по состоянию» [1]. В настоящее время используются следующие виды контроля: визуальный, параметрический, трибологический и вибрационный. Одним из наиболее эффективных методов контроля состояния редуктора без вывода из эксплуатации является вибродиагностика, поскольку вибрация содержит важно необходимую информацию о состоянии системы. Нормы, предназначенные для оценки допустимости фактических уровней вибрации механизмов и оборудования судов при постройке (после ремонта) и судов в эксплуатации по результатам измерений параметров их вибрации описано в Правилах классификации и постройки морских судов [2] (часть VII, глава «Вибрация механизмов и оборудования»). Документ приводит технические нормы, общее положение и нормированные параметры вибрации таких механизмов, как двигателя внутреннего сгорания (ДВС), главных паровых турбозубчатых агрегатов, упорных подшипников, роторных вспомогательных механизмов (центробежные насосы, сепараторов, вентилято-

ры), поршневых воздушных компрессоров, котлов, теплообменных аппаратов, газотурбозубчатых агрегатов, винторулевых колонок с механическим приводом. Как мы видим в данном разделе отсутствуют любые регламентируемые уровни вибрации (нормы вибрации) судовых редукторов или ДРУ. Глава Правил [2] «Системы мониторинга технического состояния механизмов», позволяет нам оценивать вибрационное состояние редукторной передачи для РС при проведении освидетельствования на основе схемы планово - предупредительного технического обслуживания (СППТ) и контроля состояния (КС). Данным результатом также может воспользоваться экипаж судна для определения сроков проведения работ по техническому обслуживанию редукторной передачи и произвести заказ необходимых сменно - запасных частей.

Измерения

Нами была собрана необходимая информация, и неоднократно произведены замеры в соответствии с разработанной методикой. Измерения проводились квалифицированными операторами при помощи одобренных РС и допущенных к применению средств измерения. Контроль вибрации ДРУ осуществлялся на свободной воде при волнении моря не более 4 баллов и прямолинейном движении судна на трех установившихся режимах ($1000/1300/1600 \text{ мин}^{-1}$). Измерения проводились в различных направлениях, в зависимости от конструктивных особенностей и требований Правил (х – горизонтальное продольное направление «нос-корма», у – горизонтальное поперечное направление «борт-борт», z – вертикальное направление). Схема контрольных точек приведена на рисунке 4.

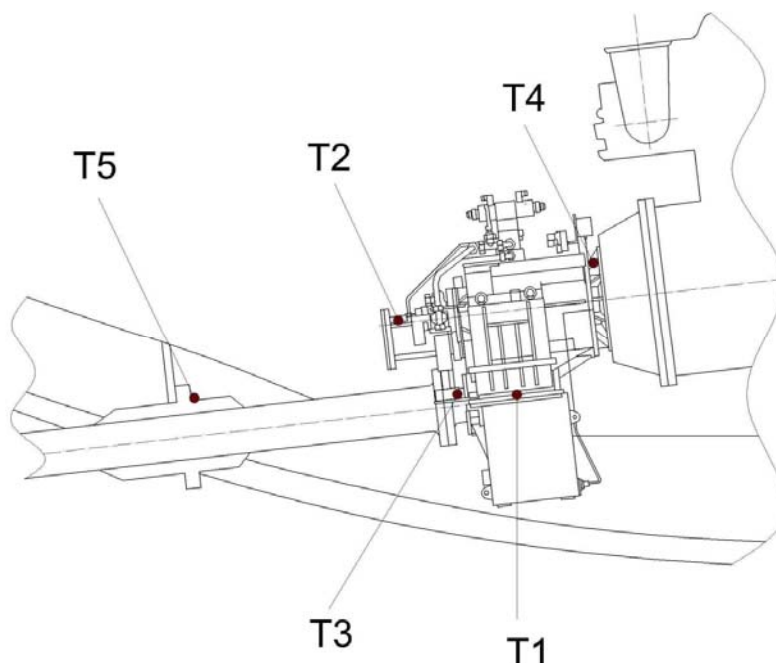


Рис. 3 –Схема измерений вибрации ДРУ буксира проект 2608

Согласно требованиям вибрационного контроля технического состояния дейдвудных устройств гребных валов [3] виброскорость в вертикальном и горизонтальном направлениях в диапазоне частот $(0,5-10)n$, где n – частота вращения гребного вала (мин^{-1}), не должна превышать $1,8 \text{ мм/с}$. Уровень виброскорости на дейдвуде правого и левого борта испытуемого буксира (T5, рисунок 3) лежит в пределах $1,5 \text{ мм/с}$, что не превышает нормируемый показатель. Измерения и анализ вибрации редуктора проводились согласно ГОСТ 10816-1-97 и 10816-3-2002. Были получены среднеквадратичные значения виброскорости не превышающие $1,42 \text{ мм/с}$ в рекомендуемом диапазоне частот вращения гребного вала, что соответствует хорошему состоянию и

позволяет эксплуатировать без каких-либо ограничений.

В таблице 2 приведены характерные частоты вибрации для основных узлов редуктора WAF 675L «Reintjes», а на рисунке 4 зависимость виброскорости от частоты при различных нагрузках ГД ($1000/1300/1600 \text{ мин}^{-1}$). Из рисунка 5 видно, что на основной частоте вращения ведущего вала (f_0) значение виброскорости при увеличении частоты уменьшается от $V=0,3 \text{ мм/с}$ при 1000 мин^{-1} до $V=0,05 \text{ мм/с}$ при 1600 мин^{-1} . На лопастной частоте самый большой уровень виброскорости $V=0,6 \text{ мм/с}$ при частоте вращения ведущего вала редуктора (ГД) 1600 мин^{-1} . На этой нагрузке можно рекомендовать оценивать состояние лопастей винта вибрационными мето-

дами. На зубцовой частоте первой ступени редуктора (f_1) уровень вибрации увеличивается от $V=0,05$ мм/с при частоте вращения ведущего вала редуктора 1000 мин^{-1} до $V=0,2$ мм/с соответственно при 1600 мин^{-1} . На зубцовой частоте

второй ступени редуктора (f_2) уровень вибрации наоборот уменьшается от $V=0,28$ мм/с при частоте вращения ведущего вала редуктора 1000 мин^{-1} до $V=0,12$ мм/с соответственно при 1600 мин^{-1} .

Таблица 2

Основные характерные частоты вибрации узлов редуктора типа WAF 675L «Reintjes»

Параметр	Формула	Режим работы ГД, мин^{-1}		
		1000	1300	1600
Основная частота вибрации ведущего вала ГД, Гц	$f_0 = n_d / 60$	16,67	21,67	26,67
Частота вспышек цилиндров ГД, Гц	$f_u = f_0 \cdot 6$	100	130	160
Основная частота вибрации ведомого вала (вала винта), Гц	$f_e = f_0 / i_1$	2,22	2,89	3,56
Основная частота вращения промежуточного вала, Гц	$f_n = f_0 / i_2$	16,67	21,67	26,67
Зубцовая частота, Гц	$f_1 = f_n \cdot Z_2$	783,34	1018,34	1253,34
	$f_1 = f_n \cdot Z_1$	783,34	1018,34	1253,34
	$f_2 = f_e \cdot Z_4$	350,00	455,00	560,00
	$f_2 = f_0 \cdot Z_3$	350,00	455,00	560,00
Лопастная частота, Гц	$f_l = f_e \cdot Z_4$	6,69	8,69	10,70

где: n_d – частота вращения двигателя, мин^{-1} ; $i_1 = 7,476$ передаточное отношение ведущего/ведомого валов редуктора; $i_2 = 1$ передаточное отношение ведущего/промежуточного вала; Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 – число зубьев (рисунок 2); $Z_1 = 3$ – число лопастей винта

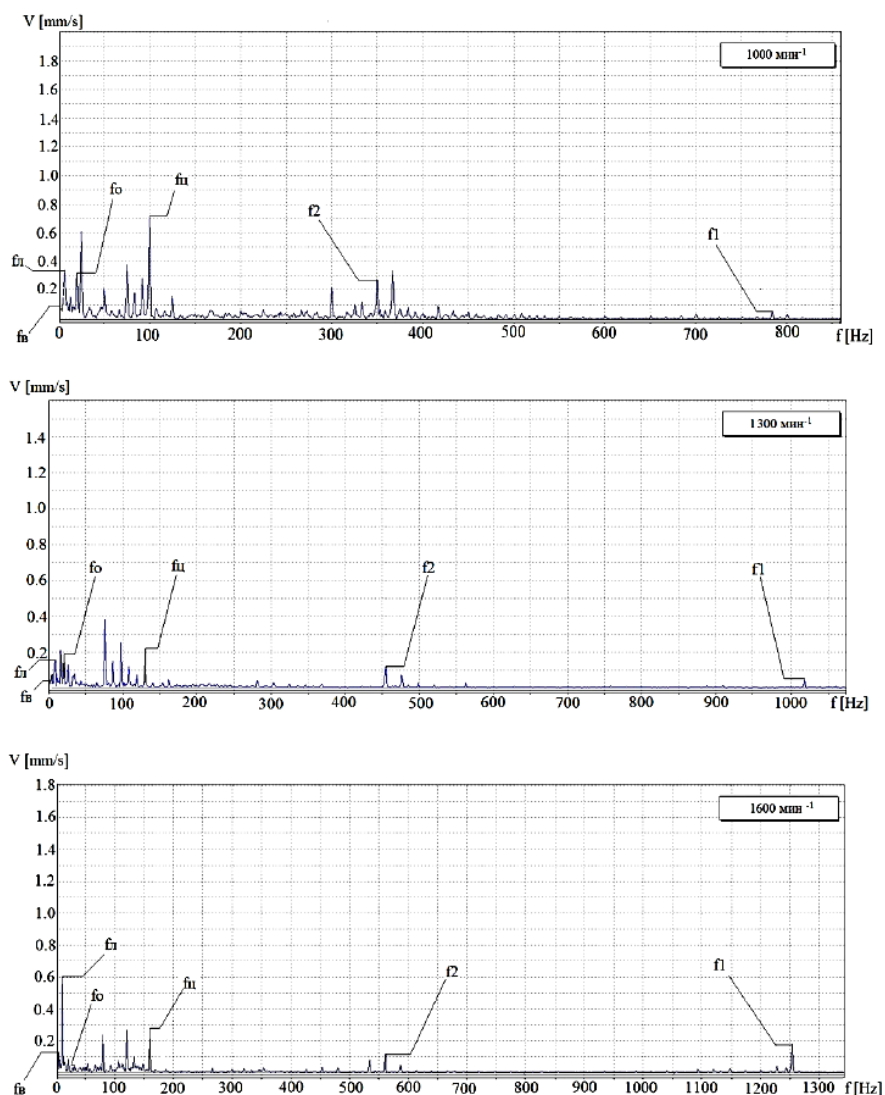


Рис. 4 Зависимость виброскорости от частоты, редуктор WAF 675L, точка T1х, правый борт ($1000/1300/1600 \text{ мин}^{-1}$)

Вывод

Проведенный нами анализ выявил большое количество современных судов, где основным типом СЭУ является ДРУ. Данные суда, как правило, работают кратковременно и при малых нагрузках. Редукторы оснащены приборами контроля, сигнализацией, обладают высокой надежностью, но при этом обязаны проходить освидетельствование с разборкой для детального осмотра узлов и отдельных деталей. При переходе на систему контроля «по состоянию», к применяемым методам (визуальный, параметрический, трибология) необходимо вводить контроль вибрации для определения технического состояния редуктора. Это позволит сократить количество аварийных случаев, спрогнозировать развитие дефектов и снизить расходы судовладельца при освидетельствовании судов.

Литература

1. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. НД № 2-020101-012.– СПб., 2014.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Том 2. НД № 2-020101-082.– СПб., 2015.
3. Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. НД № 2-030101-009.– СПб., 2014.
4. ГОСТ 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования, 1997 г.
5. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. 2007 г.
6. Ваншейдт, В.А. Судовые установки с двигателями внутреннего сгорания / В.А. Ваншейдт, П.А. Гордеев // Судостроение.– 1978.
7. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова.– М.: «Машиностроение», 1988.

УДК 621.311.1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ (ЧАСТЬ 2)

*А.Б. Каракаев, д-р. техн. наук, проф.,
А.В. Луканин, канд. техн. наук, доц.*

В статье рассмотрены вопросы представления судовой электроэнергетической системы с помощью логической модели, представлены функциональная, структурная и формализованная схемы, проводится анализ характера функционирования элементов и блоков судовой электроэнергетической системы. Показаны модели построения однофункциональных и многофункциональных систем непрерывного действия с помощью теории графов и матриц. Изложены вопросы выбора и обоснования количественных показателей сложных технических систем, затронуты аспекты анализа и синтеза контролепригодности. Установлены классы проверок технического состояния любого объекта судовой электроэнергетической системы и способы выявления дефектов и неисправностей.

Ключевые слова: Судовая электроэнергетическая система, электрооборудование, контролепригодность.

In the article there are considered questions of ship electrical power system presentation by logical model, there are presented functional, structural and formalized schemes, there is given an analysis of functionality character of ship electrical power system elements and blocks. There presented models of single and multi function systems built based on theories of graphs and matrixes.

There stated questions of selection and justification of complicated technical systems quantitative index, there mentioned synthesis and analysis aspects of controllability. There stated technical condition checking class of any object of ship power energy system and ways of defects and malfunction detection.

Keywords: Ship electrical power system, electrical equipment, controllability.

Продолжая рассматривать теоретические основы анализа контролепригодности (КП) судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) [1] следует учесть [2], что объекты диагностирова-

ния непрерывного действия разделяют на однофункциональные и многофункциональные.

Если система имеет только один рабочий алгоритм функционирования, в реализации которого участвуют все блоки и связи функциональ-