



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ

практическая реализация требований имо 18

ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ОСТОЙЧИВОСТИ

современные требования 64

СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ГРУЗА НА ГАЗОВОЗЕ

алюминиево-магниевые сплавы и сварные соединения 91



№ 42/43
Июнь
2016

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 42/43

RESEARCH BULLETIN

BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

Санкт-Петербург
2016



СОДЕРЖАНИЕ

Пальников К.Г. Обращение генерального директора. 2

Бойко М.С. Обращение главного редактора. 3

ОБОЗРЕНИЕ 6

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Зиненко Н.Н., Панамарев В.Е. Опыт мониторинга выбросов вредных веществ с отработавшими газами судовых энергетических установок 8

Емельянов М.Д. Повреждаемость полупогружных буровых установок и пути ее снижения 14

Гришкин В.В. Применение оборудования для фильтрации нефти в соответствии с международными требованиями по предотвращению загрязнения нефтью с судов. 18

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Штрек А.А., Буянов А.С. Техничко-экономическое обоснование оптимальных параметров арктического контейнеровоза для транзитных перевозок по Северному морскому пути. 23

Чернов О.А. Научно-исследовательские суда в современной морской индустрии. Обзор 31

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

Апполонов Е.М., Корицунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Развитие расчетно-экспериментальных подходов по уточнению локальной ледовой нагрузки 40

Азовцев А.И., Евенко В.И., Кулеш В.А., Кутейников М.А., Огай А.С., Петров В.А. Предложение по развитию требований к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт. 47

Тряскин В.Н., Дехтярь И.В., Численная проверка методики проектирования рамного бортового набора надводного корабля на основе требований правил классификационных обществ 58

K.G. Palnikov RS Director General address

M.S. Boyko Editor-in-Chief address

NEWSROOM

MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

N.N. Zinenko, V.E. Panamarev Harmful substances concentrations monitoring in ship power plant exhaust gases

M.D. Emelyanov Semisubmersible mobile offshore drilling units (MODU) damage RATE and the ways to reduce it

V.V. Grishkin Oil filtering equipment in compliance with international requirements on oil pollution prevention

SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT

A.A. Shtrek, A.S. Buyanov Feasibility study of Arctic containership optimal parameters for transit navigation along the Northern Sea Route

O.A. Chernov Research vessels in the modern maritime industry. Review

STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

Ye.M. Appolonov, V.A. Korshunov, D.A. Ponomarev, A.A. Rodionov Development of computational and experimental approaches to refinement of local ice load

A.I. Azovtsev, V.I. Evenko, V.A. Kulesh, M.A. Kuteynikov, A.S. Ogai, V.A. Petrov, Proposal for rule requirements development for ships operating in contact with ground

V.N. Tryaskin, I.V. Dekhtyar Numerical verification of design methodology based on the classification societies requirements in application to web frames of naval ships

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

Кутейников М.А., Одегов В.С. Приборы контроля устойчивости. Современные требования. 64

Немзер А.И., Юрканский А.В., Кутейников М.А., Захаров М.Е. Разработка программного обеспечения для определения максимальной удерживающей силы и угла крена эскортных буксиров в соответствии с требованиями Правил РС. 70

Семенова В.Ю., Киав Тхура. Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот и возникающих при поперечной качке шпангоутных контуров на тихой воде 75

Живица С.Г. Прогноз параметров качки аварийного морского объекта при борьбе за его живучесть в штормовых условиях 82

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

Башаев В.К., Павлова В.И., Осокин Е.П., Зыков С.А., Дриц А.М. Деформируемые алюминивно-магниевые сплавы и сварные соединения для конструкций систем хранения груза газозовозов 91

Третьякова Т.В. Разработка и внедрение комплексной программы по применению высокоэффективных неметаллических изоляционных и отделочных материалов на строящихся заказах в АО «ПО «Севмаш» 100

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

Хабаров А.А. Создание судовых подшипников нового поколения 105

Павловский В.А., Власьев М.В. Оценка повышения давления паров при хранении СПГ в судовом криогенном резервуаре. 110

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РАДИОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Щукин А.Ю., Забирохин П.Б. Некоторые аспекты компьютерного моделирования механических испытаний вращающихся электрических машин. . . 114

Приходько В.М., Приходько И.В. Математическое обеспечение для оптимальной сушки изоляции электрооборудования судов по энергосберегающей технологии 121

Максимова М.А., Рогов С.С. Мониторинг технического состояния судового энергетического оборудования 125

Фисай В.Г., Иванов Б.Г. Обоснование внедрения системы информационной поддержки для обеспечения живучести кораблей и судов. . 130

Фисай В.Г., Иванов Б.Г. Особенности применения системы сигнализации уровня жидких грузов и аварийных масс воды для кораблей и судов. . 134

Правила предоставления статей 138

SEAWORTHINESS

M.A. Kuteynikov, V.S. Odegov Stability control instruments. Up-to-date requirements

A.I. Nemzer, A.V. Yurkanskiy, M.A. Kuteynikov, M.E. Zaharov Software development to determine maximum holding force and heel angle of escort tugs with regard to RS rules

V.Y. Semyonova, Kiav Tkhura The determination of nonlinear second-order forces due to frequency difference and occurring during the transverse motions of the contours in calm water

S.G. Zhivitsa Forecast of rolling and pitching parameters of emergency offshore facility during damage control in storm conditions

MATERIALS AND WELDING

V.K. Bashaev, B.I. Pavlova, E.P. Osokin, S.A. Zykov, A.M. Drits Deformed aluminum-magnesium alloys and welds for cargo containment system structures of gas carriers

T.V. Tretyakova Development and implementation of package program on the application of high performance non-metallic insulation and finishing materials at JSCO "PO "Sevmash" orders under construction

MACHINERY INSTALLATIONS AND PROPULSION

A.A. Khabarov Development of next generation marine bearings

V.A. Pavlovsky, M.V. Vlasiev Evaluation of vapour pressure increase in storage of LNG cryogenic ship tank

ELECTRICAL AND RADIO NAVIGATIONAL EQUIPMENT

A.Y. Shchukin, P.B. Zabiropkhin Some aspects of mechanical tests computer simulation of rotating electrical machines

V.M. Prikhodko, I.V. Prikhodko Mathematical basis for effective ships electrical insulation drying subject to energy saving solutions

M.A. Maksimova, S.S. Rogov Monitoring of technical condition of the ship's power equipment

V.G. Fisai, B.G. Ivanov Feasibility of the information support system implementation for damage control of ships and vessels

V.G. Fisai, B.G. Ivanov Application features of liquid cargo and emergency waters alarm system for ships and vessels



ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РАДИОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 534.13; УДК 62-89

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А.Ю. Щукин, ООО «ЦКТИ-Вибросейсм», Санкт-Петербург, e-mail: AShchukin@cvs.spb.su

П.Б. Забирохин, ООО «ЦКТИ-Вибросейсм», Санкт-Петербург, e-mail: PZabirokhin@cvs.spb.su

Представлены результаты, касающиеся разработки методики компьютерного моделирования механических испытаний вращающихся электрических машин в соответствии с требованиями правил российского морского регистра судоходства. Предложены рекомендации по выбору типа конечно-элементного анализа, заданию внешнего воздействия и обработки результатов расчета. Предложен алгоритм расчета поврежденности системы.

Ключевые слова: вращающиеся электрические машины, испытания, расчет, моделирование, виброустойчивость, вибропрочность, удароустойчивость, ударопрочность.

SOME ASPECTS OF MECHANICAL TESTS COMPUTER SIMULATION OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES

A.Y. Shchukin, CKTI-Vibroiseism Ltd. (CVS), St. Petersburg, e-mail: AShchukin@cvs.spb.su

P.B. Zabirokhin, CKTI-Vibroiseism Ltd. (CVS), St. Petersburg, e-mail: PZabirokhin@cvs.spb.su

The article specifies the results as regards development of methods of computer simulation during mechanical tests of rotating electrical machines in compliance with the Rules of Russian Maritime Register of Shipping. The selection guidelines for the type of finite element analysis, assignment of external action and processing the calculation results. An algorithm for calculating the system damage (vulnerability) is proposed.

Keywords: rotating electrical machines, simulation of tests, vibration resistance, shock resistance, impact-resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена некоторым аспектам методики компьютерного моделирования механических испытаний вращающихся электрических машин (ВЭМ) в соответствии с требованиями Правил технического наблюдения за постройкой

судов и изготовлением материалов и изделий для судов (том 2, часть IV, раздел 10, [1]) Регистра. На основании положений этой методики должны быть разработаны предложения по доработке названных правил, предусматривающие включения в них положений, допускающих замену натуральных механических испытаний соответствующими

расчетами. Замена натуральных испытаний расчетом позволит существенно сократить расходы на обоснование прочности и работоспособности ВЭМ в условиях динамических нагрузок, а также оценить прочность и работоспособность ВЭМ, испытания которых, вследствие их технических характеристик (веса, габаритов), невозможны либо крайне сложны для реализации. Актуальность проблемы подтверждается появляющимися в последнее время работами, связанными с численным моделированием ВЭМ. Например, в [2] на примере расчета асинхронного тягового двигателя и сравнения результатов с экспериментальными данными показано, что подход, связанный с численным моделированием, экономичен и более информативен по сравнению с традиционными экспериментальными методами.

1. ОБЗОР ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ РС К ИСПЫТАНИЯМ ВЭМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

ВЭМ в соответствии с требованиями [1] подвергаются следующим видам механических испытаний:

- на обнаружение резонансных частот;
- на вибропрочность;
- на виброустойчивость;
- на ударопрочность;
- на удароустойчивость.

При использовании компьютерного моделирования обнаружение резонансных частот заменяется расчетом собственных частот и форм колебаний изделия в диапазоне частот от 2 до 80 Гц – модальным анализом системы.

На основе результатов модального анализа решаются следующие задачи:

оцениваются условия наличия резонанса в заданном диапазоне частот;

определяются поддиапазоны частот, в которых проводятся расчеты на вибрационные воздействия;

определяется длительность ударных импульсов.

При моделировании испытаний на вибропрочность задаются режимы вибрации с постоянной амплитудой и изменяющейся во времени частотой воздействия. Поддиапазоны частот, амплитуды перемещений, ускорений и время испытаний (для проведения конечно-элементных (КЭ) расчетов) для каждого поддиапазона приведены в табл. 1.

Целью испытаний на виброустойчивость, которые, в отличие от испытаний на вибропрочность, проводятся в рабочем состоянии, является оценка виброустойчивости изделия, его узлов и деталей при вибрационном механическом воздействии. При испытаниях на виброустойчивость, помимо оценки прочности элементов, выполняется анализ зазоров между ротором и статором, несущей способности упорных и опорных подшипников.

Таблица 1
Испытания на вибропрочность. Параметры режимов

Поддиапазон частот, Гц		Параметры				
		Амплитуда, мм		Ускорение, g		Время, ч
2	8	1,4		0,02	0,36	450
8	16	0,7		0,18	0,72	220
16	31,5	0,35		0,36	1,4	110
-	30*	0,35		0,8	3,2	110
31,5	63	0,2		1,8	3,1	55
63	80	0,12		0,02	0,36	25

* При отсутствии резонанса рекомендуется проверка на частоте 30 Гц.

Поддиапазоны частот и амплитуды для испытаний на виброустойчивость (для проведения КЭ расчетов) приведены в табл. 2.

Таблица 2
Испытания на виброустойчивость. Параметры режимов

Поддиапазон частот, Гц		Параметры				
		Амплитуда, мм		Ускорение, g	Время, ч	Число циклов
f_1	f_2	A				
2	8	1,0		$A(2\pi f_r)^2$	2	7200 f_r , где f_r – резонансная частота, Гц
8	16	0,5				
16	31,5	0,25				
31,5	63	0,15				
63	80	0,1				
$f = 30$ Гц, если нет резонанса		0,25		0,905	2	2,16·10 ⁵

При расчете на виброустойчивость учитываются нагрузки, действующие на элементы ВЭМ в рабочем состоянии, которое при механических испытаниях соответствует режиму работы ВЭМ на холостом ходу.

Целью испытаний на ударопрочность является оценка напряженного состояния изделия, его узлов и деталей при ударном механическом воздействии.

Длительность действия ударного ускорения задается в соответствии с низшей собственной частотой изделия (ВЭМ) [1]. Характеристики ударного импульса ускорения (для проведения КЭ расчетов) приведены в табл. 3.

Таблица 3
Длительность ударного ускорения

Значение низшей резонансной частоты, Гц	Длительность ударного импульса, мс	Испытания	
		Ударопрочность	Удароустойчивость
До 60	18	334 удара в каждом направлении, интенсивность 7 g	7 ударов в каждом направлении, интенсивность 5 g
60 – 100	11		
100 – 200	6		
200 – 500	3		

Целью испытаний на удароустойчивость является оценка прочности изделия, его узлов и деталей при ударном воздействии, а также анализ зазоров между ротором и статором, несущей способности упорных и опорных подшипников.

Расчет на удароустойчивость подразумевает одновременное действие нагрузок при работе ВЭМ на холостом ходу и ударных нагрузок. Параметры ударного воздействия при моделировании испытаний на удароустойчивость (интенсивность ускорения и количество ударов) задается также по табл. 3.

2. ВЫБОР ТИПА АНАЛИЗА ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

При моделировании вибрационного воздействия с использованием прямого динамического (*Transient*) анализа возможен учет в расчетной модели нелинейных характеристик отдельных элементов конструкции (зазоров, нелинейной жесткости подшипников, виброизоляции и т.д.). Однако выполнение расчетов в такой постановке требует большого машинного времени для расчетов и больших объемов памяти.

В качестве альтернативы может быть рекомендован метод гармонического анализа. Численные эксперименты показывают, что гармонический (*Harmonic*) анализ дает на резонансных частотах чуть более консервативный результат, что обосновывает возможность использования гармонического анализа в качестве базового метода определения отклика системы при расчете на вибрационное воздействие. На рис. 1 в качестве иллюстрации приведены графики осевого

перемещения конца ротора для случая осевой нагрузки длительностью 1 мин с интервалом изменения частоты от 16 до 31,5 Гц (динамический анализ для сокращения времени проведен для диапазона частот 18 – 22 Гц).

Для удобства сравнения по оси абсцисс для обоих типов анализа отложены значения изменяющейся частоты. При динамическом анализе ротор совершает непрерывные колебания с изменяющейся во времени амплитудой колебаний, что отражено на рисунке, а в случае гармонического анализа могут быть получены сразу значения амплитуды ответных колебаний в рассматриваемом поддиапазоне.

3. ЗАДАНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ

Важным параметром, определяющим ответную реакцию конструкции на заданное динамическое воздействие, является демпфирование.

В качестве характеристики демпфирования регламентируется величина относительного демпфирования ξ в долях от критического [3].

При прямом динамическом анализе ВЭМ может быть рекомендовано рэлеевское демпфирование [4], для которого матрица диссипации имеет вид

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (1)$$

где $[M]$ и $[K]$ – соответственно матрицы масс и жесткостей системы;

α и β – коэффициенты, которые позволяют задать затухание в системе для заданного диапазона частот.

В соответствии с рекомендациями в ГОСТ 17516.1-90 для конструкций (сварных или на

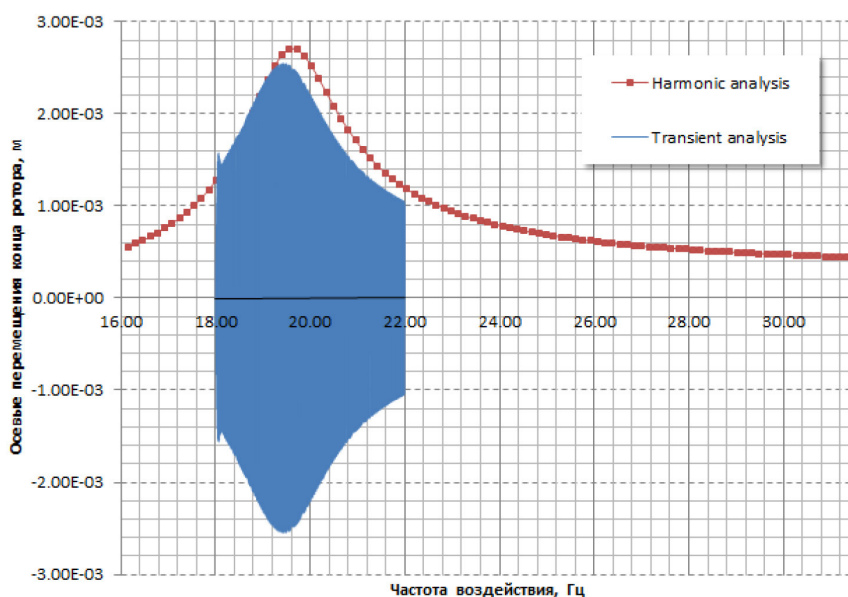


Рис. 1 Сравнение прямого интегрирования (*Transient*) и гармонического (*Harmonic*) анализа

болтах) в зависимости от уровня напряжений в конструкции при динамических воздействиях задаются следующие параметры демпфирования [3]:

- $\xi = 4\%$ при уровне напряжений $(0,25 - 0,5) \sigma_T$;
- $\xi = 7\%$ при уровне напряжений $(0,5 - 1,0) \sigma_T$.

В табл. 4 приведены значения коэффициентов α и β в зависимости уровня демпфирования от частоты $F(f_k)$ для диапазонов частот в соответствии с требованиями [1]. Характерный график, иллюстрирующий зависимость демпфирования от частоты в конструкции при задании рэлеевского демпфирования, приведен на рис. 2.

Таблица 4
Рекомендуемые расчетные параметры демпфирования

Диапазон частот	Уровень напряжений	ξ	α	β
2 – 8	$(0,25 - 0,5) \sigma_T$	0,04	0,804	1,273E-3
	$(0,5 - 1,0) \sigma_T$	0,07	1,407	2,228E-3
8 – 16	$(0,25 - 0,5) \sigma_T$	0,04	2,681	5,305E-4
	$(0,5 - 1,0) \sigma_T$	0,07	4,691	9,264E-4
16 – 31,5	$(0,25 - 0,5) \sigma_T$	0,04	5,333	2,681E-4
	$(0,5 - 1,0) \sigma_T$	0,07	9,334	4,691E-4
31,5 – 63	$(0,25 - 0,5) \sigma_T$	0,04	10,556	1,347E-4
	$(0,5 - 1,0) \sigma_T$	0,07	18,473	2,358E-4
63 – 80	$(0,25 - 0,5) \sigma_T$	0,04	17,716	8,904E-5
	$(0,5 - 1,0) \sigma_T$	0,07	31,003	1,558E-4

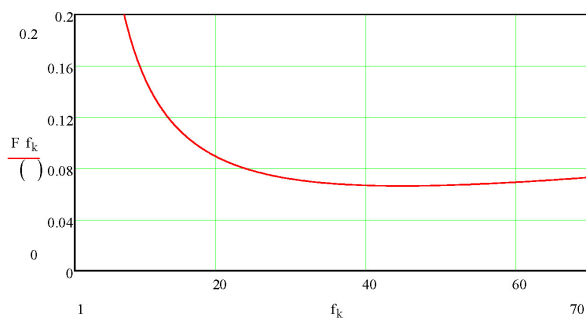


Рис. 2 Демпфирование в системе ($\xi = 0,07$) в поддиапазоне 31,3 – 63 Гц

В случае гармонического анализа возможно задание постоянного демпфирования (4 % или 7 % в соответствии с [3]) во всем диапазоне частот.

4. РАСЧЕТ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ДЕТАЛЯХ ВЭМ

Как известно, в случае нерегулярного нагружения, долговечность конструкции оценивается с использованием повреждения, накопленного в ней, которое

вычисляется как отношение расчетного числа циклов до разрушения к числу циклов, моделирующих механические испытания ВЭМ при заданном режиме испытаний.

В общем случае, если каждый i -й цикл в рассматриваемом процессе нагружения конструкции повторяется n_i раз, при описании повреждения, накопленного в конструкции, в инженерной практике используется правило линейного суммирования повреждений (правило Пальмгрена–Минера). Согласно данному правилу повреждение, накопленное в опасной точке, определяется по формуле (2) [4 – 6]:

$$a = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}, \quad (2)$$

где k – число различных амплитуд напряжений в процессе нагружения;

n_i – число повторений амплитуды σ_i в процессе нагружения;

N_i – число циклов до разрушения при амплитуде напряжения σ_i , определяемое по кривой усталости для рассматриваемой детали.

В качестве кривой усталости для углеродистых сталей может быть рекомендовано степенное уравнение Веллера [4, 7]:

$$N(\sigma) = N_G \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right)^m, \quad (3)$$

где σ_{-1} , N_G , m – константы материала;

$N(\sigma)$ – зависимость числа циклов до разрушения от амплитуды напряжения.

В качестве примера на рис. 3 приведен характерный график осевого перемещения ротора при ударном воздействии ($t = 0,018$ с – длительность импульса). Зависимости для напряжений в критических точках конструкции имеют аналогичный вид.

Особенностью компьютерного моделирования испытаний на ударпрочность является то обстоятельство, что при выполнении расчетов в случае, когда колебания конструкции от двух соседних импульсов не накладываются друг на друга, достаточно выполнить расчет на один импульс, так как при последующих приложениях расчетной ударной нагрузки картина колебаний повторяется.

Анализ расчетов на ударные нагрузки показывает, что при заданном в соответствии с [3] затухании в конструкции обычно достаточно учесть поврежденность от первых двух пиков колебаний после каждого из $N = 334$ ударов (см. табл. 3). Консервативно можно принять, что в этом случае амплитуда напряжений не должна превосходить величины, соответствующей общему количеству циклов $N_p = 2 \cdot 334$, определенной по построенной кривой усталости детали.

Более точную оценку может дать суммирование по формуле (2) поврежденностей от каждой группы нагружения, соответствующей различным пикам напряжений σ_i в затухающем процессе после ударного воздействия.

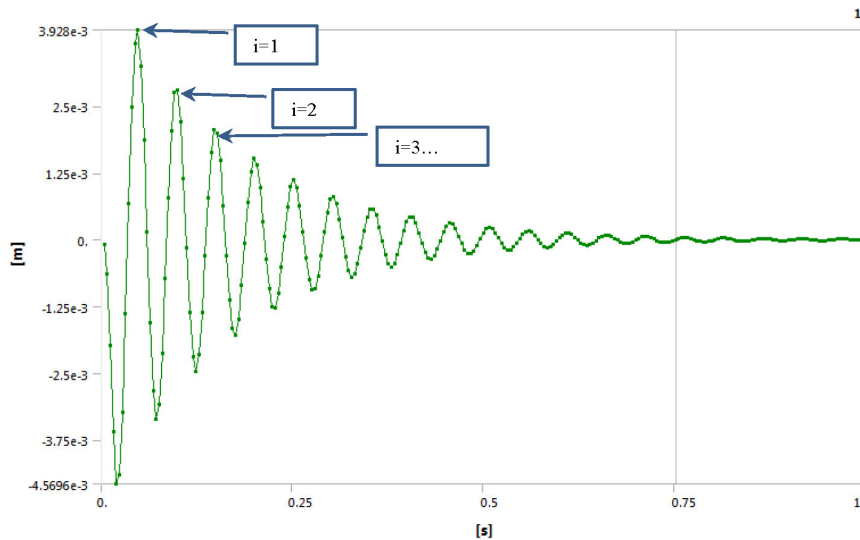


Рис. 3 Затухание осевых перемещений ротора при ударном воздействии

В случае одночастотных затухающих колебаний с коэффициентом демпфирования ξ имеем:

$$\sigma_i = \sigma_{\max} e^{-(i-1)\delta}, \quad (4)$$

где σ_{\max} – максимальная амплитуда напряжений в ходе затухающих колебаний после удара;

δ – логарифмический декремент затухания, связанный с относительным демпфированием (при малом демпфировании) ξ соотношением

$$\delta = 2\pi\xi. \quad (5)$$

Тогда, подставляя (4) в (3), а (3) в (2) для суммарной поврежденности, получаем:

$$\begin{aligned} a &= \sum_{i=1}^k n N_G^{-1} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{-1}} \right)^m e^{-(i-1)\delta m} = \\ &= \frac{n}{N_G} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{-1}} \right)^m \sum_{i=1}^k e^{-(i-1)\delta m} = \\ &= \frac{n}{N_G} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{-1}} \right)^m \frac{1 - e^{-k\delta m}}{1 - e^{-\delta m}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где k число учитываемых пиков определяется условием: $\sigma_k > \sigma_{-1}$; $\sigma_{k+1} < \sigma_{-1}$.

Устремляя в (6) k в бесконечность, получаем, с учетом (5), консервативную оценку для поврежденности в случае ударной нагрузки:

$$a = \frac{n}{N_G} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{-1}} \right)^m (1 - e^{-2\pi\xi m})^{-1}. \quad (7)$$

В (7) коэффициент выражает влияние всех пиков колебаний, следующих за первым максимумом.

Для вибрационного воздействия в пределах рассматриваемых поддиапазонов частот амплитуда перемещений и напряжений обычно носит нерегулярный циклический характер (см. рис.1).

При таком характере изменения напряжений в элементе конструкции для оценки накопленной повреждаемости могут быть использованы следующие данные:

- зависимость между числом циклов до разрушения N и амплитудой напряжений σ в виде функции $N(\sigma)$;

- зависимость напряжения от частоты вынужденных колебаний системы f в виде $\sigma = \sigma(f)$.

Тогда, в предположении линейного суммирования повреждений, можно определить полную поврежденность в интересующей точке при прохождении системой резонанса колебаний для изменяющейся во времени частоты внешнего возбуждения.

Допустим, что частота воздействия меняется от f_1 до f_2 за время T . Зависимость частоты f от времени t не регламентируется и возможно использование различных зависимостей. Как правило, при испытаниях используется степенная зависимость вида

$$f(t) = (f_2/f_1)^{t/T} f_1. \quad (8)$$

В общем случае найдем связь между малым приращением частоты df и приращением времени dt :

$$dt = t'(f) df. \quad (9)$$

Для поврежденности a напишем дифференциальное уравнение [4]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{1}{N(\sigma)}. \quad (10)$$

Отсюда для приращения поврежденности da за малый промежуток времени dt из зависимостей (8) и (9) находим:

$$da = \frac{dN}{N(\sigma)} = \frac{f \cdot dt}{N(\sigma)} = \frac{t'_f \cdot f \cdot df}{N(\sigma)}. \quad (11)$$

Тогда для поврежденности, накопленной за все время процесса, получаем выражение в виде интеграла в частотном диапазоне:

$$a = \int_{f_1}^{f_2} \frac{t'_f(f) \cdot f}{N[\sigma(f)]} \cdot df. \quad (12)$$

Для степенной зависимости после подстановки (3) в выражение (12) получаем:

$$a = \frac{T}{\ln(f_2/f_1)} \int_{f_1}^{f_2} \frac{df}{N[\sigma(f)]}. \quad (13)$$

При моделировании многократного изменения частоты (длительности испытаний) от f_1 до f_2 , в качестве T в (13) подставляем полное время испытаний.

Для кривой усталости (3) из (13) получим:

$$a = \int_{f_1}^{f_2} \frac{T}{N[\sigma(f)] \ln(f_2/f_1)} df = \frac{T}{N_G \sigma_{-1}^m \ln(f_2/f_1)} \int_{f_1}^{f_2} \sigma^m(f) df. \quad (14)$$

5 ЗАДАНИЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Важным вопросом моделирования механических испытаний является вопрос, связанный с численным заданием внешнего воздействия.

Интенсивность ударного импульса Ia с учетом значения низшей резонансной частоты может быть задана с использованием зависимости

$$Ia(t) = Iasin(\pi \frac{t}{\tau}), \quad (15)$$

где τ – длительность ударного импульса, с.

Графики ударных импульсов для моделирования испытаний на ударопрочность для различных значений низшей резонансной частоты приведены на рис. 4. Для расчета на удароустойчивость графики на рис. 4 масштабируются для приведения к максимальному ускорению 5g.

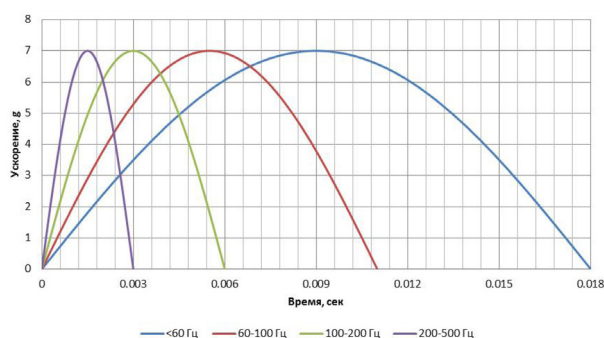


Рис. 4 Ударные импульсы при испытаниях на ударопрочность

В случае применения метода прямого динамического анализа при задании вибрационного

воздействия при расчетах на вибропрочность необходимо корректное задание этого воздействия (перемещения или ускорения) в виде периодической функции с изменяющимся во времени периодом. Заданым видом внешнего воздействия:

$$x(t) = A \sin(\varphi(t)). \quad (16)$$

Здесь $\varphi(t)$ – пока неопределенная функция, зависящая от требуемой зависимости круговой частоты от времени $2\pi f = \omega = \omega(t)$; A – амплитуда перемещений, задаваемая в соответствии с данными табл. 1 и 2.

Для функции, заданной в виде (16), определим значение круговой частоты ω для произвольного значения времени $t = t^*$.

Предположим, что функция $x(t)$ представима в виде:

$$x(t) = A \sin[\omega(t - t^*) + a + \delta(t - t^*)], \quad (17)$$

где ω, a – константы; $\delta(t - t^*)$ – функция, бесконечно-малая второго порядка в окрестности $t - t^*$.

В этом случае круговая частота колебаний функции $x(t)$ в окрестности $t = t^*$ близка к значению ω , а период колебаний, соответственно, к величине $2\pi/\omega$.

Константы ω, a определяются из разложения функции $f(t)$ в степенной ряд в окрестности точки $t = t^*$: $a = \varphi(t^*)$; $\omega(t) = \varphi'(t)$.

Таким образом, круговая частота колебаний функции $x(t)$ определяется как функция от времени:

$$\omega(t) = \varphi'(t). \quad (18)$$

Теперь, для определения вида функции $\varphi(t)$ по известной $\omega(t)$, необходимо применить вместо операции дифференцирования операцию интегрирования:

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau \quad (19)$$

(предполагаем, что для $t = 0$ $x(t) = 0$).

Подставляя формулу (19) в формулу (16) для степенной функции (8) имеем:

$$A(t) = A \sin \left\{ \frac{2\pi f_1 T_r [(f_2/f_1)^{t/T_r} - 1]}{\ln(f_2/f_1)} \right\}. \quad (20)$$

Формулы (16), (19) могут быть использованы и для случая зависимости частоты от времени, отличной от зависимости (8).

С точки зрения расчета долговечности, случай прямого динамического анализа может быть аналогичен случаю гармонического анализа с той лишь разницей, что функция $\sigma(f)$ задается как огибающая соответствующей зависимости напряжения от частоты (аналогичной зависимости, представленной на рис. 1).

6 ПРОЦЕДУРА МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВЭМ

Процедура компьютерного моделирования механических испытаний ВЭМ проиллюстрирована на схеме – см. рис. 5. На ней показаны все основные этапы расчета от получения исходных данных (чертежей и 3D-моделей элементов) до оценки критериев (коэффициентов запаса и повреждаемости).

ВЫВОДЫ

Современные численные методы позволяют разработать детальную методику компьютерного моделирования механических испытаний ВЭМ в соответствии с требованиями правил Регистра.

Моделирование вынужденных колебаний ВЭМ позволяет оценить динамическое состояние, вибрационную прочность и долговечность элементов конструкции ВЭМ при заданных условиях испытаний.

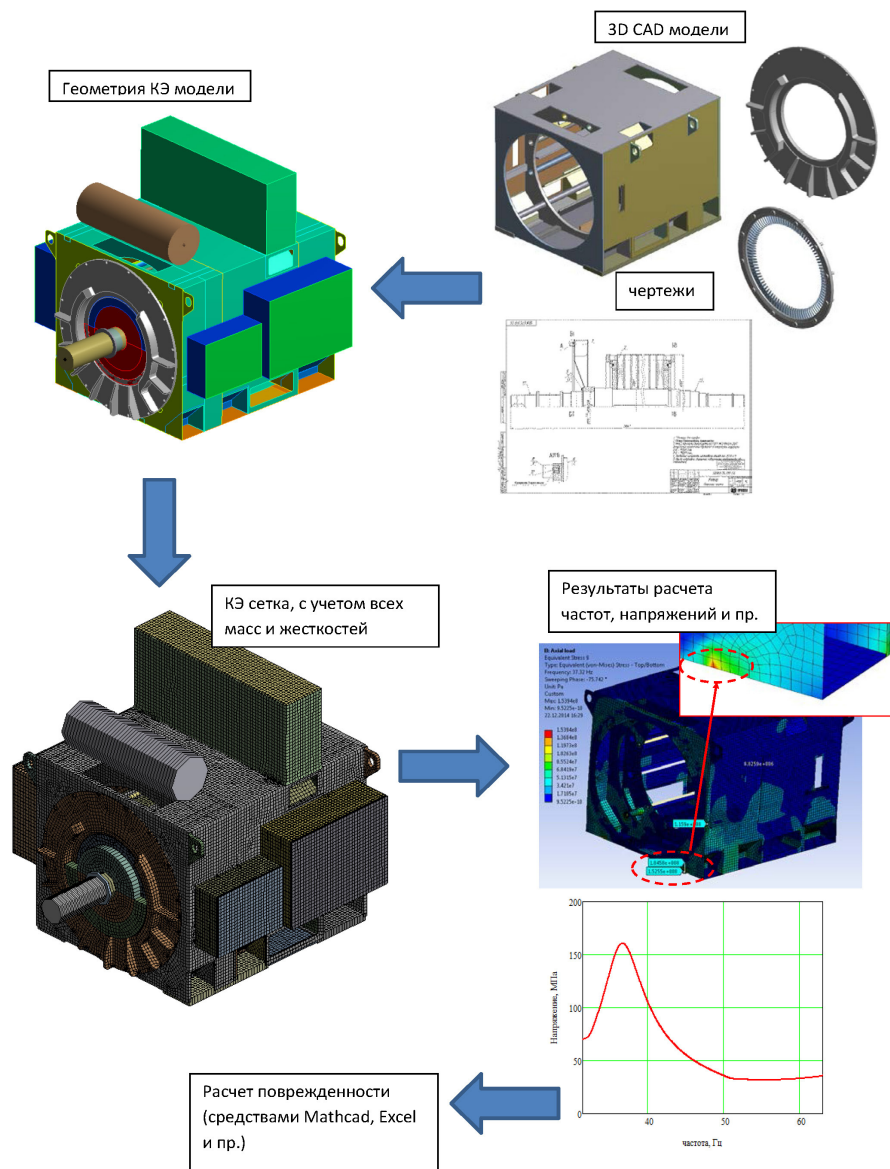


Рис. 5 Схема компьютерного моделирования испытаний ВЭМ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. Т.1.– СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015.
2. Бояршинов М.Г., Трушков В.А. Вычислительное моделирование динамических и прочностных характеристик механического оборудования // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современного машиностроения». – Юрга, 11–12 декабря 2014 г.
3. ГОСТ 17516.1-90. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам.
4. Когаев В.П. Расчет на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1993.
5. Трошенко В.Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. – Киев: Наукова думка, 1987.
6. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3 т. Т.1, 8-е изд. / под. ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001.
7. Когаев В.П., Махутов Н.А. Гусенков А.П. Расчет деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник. – М.: Машиностроение, 1985.

УДК 629.12.066

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СУДОВ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

В.М. Приходько, канд. техн. наук, проф., ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург
И.В. Приходько, аспирант, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург,
e-mail: wslwsl@yandex.ru

Разработано математическое обеспечение для ресурсосбережения, снижения энергозатрат, повышения эффективности, интенсификации и оптимизации технологических режимов процесса прогрева, подсушки, сушки, восстановления сопротивления изоляции увлажненных обмоток судовых асинхронных двигателей после зимнего отстоя речных судов, при судоремонте, а также в эксплуатационных условиях на водном транспорте.

Ключевые слова: судовые асинхронные двигатели, тиристорные преобразователи, система дифференциальных уравнений.

MATHEMATICAL BASIS FOR EFFECTIVE SHIP ELECTRICAL INSULATION DRYING SUBJECT TO ENERGY SAVING SOLUTIONS

V.M. Prikhodko, PhD, professor, FSEI Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg
I.V. Prikhodko, postgraduate, FSEI Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
e-mail: wslwsl@yandex.ru

The developed software (mathematical basis) has been reviewed for cost-effective use of resources, saving energy costs, efficiency enhancement, intensification and optimization of operating schedule of warm-up process modes, predrying, drying, insulation resistance buildup for the ships' dampened asynchronous motor windings after the river ships's wintering, anchorage during shiprepair as well as under service conditions in the water transport industry.

Keywords: asynchronous motors, thyristor converter, differential equation system.

В настоящее время разработаны портативные универсальные тиристорные преобразователи с перестраиваемыми структурами силовых вентиляльных модулей, обеспечивающие ресурсосбережение, снижение затрат энергии, повышение эффективности, интенсификацию и оптимизацию технологических процессов контрольного прогрева, подсушки, сушки и восстановления сопротивления

изоляции увлажненных обмоток судового электрооборудования, которые проводятся после зимнего отстоя речных судов, при судоремонте, а также в эксплуатационных условиях на водном транспорте [1–3]. Для судостроения и судоремонта рекомендован инновационный способ безразборной сушки увлажненных обмоток судовых асинхронных двигателей (АД) электрическим током, управляемым

**В оформлении издания использовались графические материалы
из открытых источников сети интернет:**

<http://gibka-rezka-svarka.ru/>
<http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolshix-korablej-27-foto.html>
<http://www.cloveritservices.com/Home.aspx>
www.fonstola.ru/
www.wallpapers.ru/
<http://www.ye42oester.nl/>
<http://miraziz.uz/>
<http://www.radioscanner.ru/>
<http://xn--24-dlcyxgbyj.xn--80asehdb/?p=4257>
<http://www.russiapost.su/archives/12268>
<http://utimenews.org/ru/>
<http://kmtп.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 42/43

Редакционная коллегия журнала

Ответственные за выпуск: *А.В. Зухарь, М.Р. Маркушина*
Редактор *Е.Б. Мюллер*
Компьютерная верстка *С.С. Лазарева*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 22.06.2016. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 16,2. Уч.-изд.л.: 15,9. Тираж 500

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8
www.rs-class.org/ru/