

Тарануха Н. А., Худяков С. А.
N. A. Taranukha, S. A. Khudiakov

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ СУДОВЫХ МАЛОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

ADVISABLE CRITERIA FOR THE ESTIMATION OF UNBALANCE IN LOW-SPEED MARINE DIESEL ENGINES



Тарануха Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина 27; 8 (4217) 24-11-42. E-mail: taranukha@knastu.ru
Mr. Nikolay A. Taranukha – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Shipbuilding, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin St, Komsomolsk-on-Amur, Russia; (4217) 24-11-42.
E-mail: taranukha@knastu.ru.



Худяков Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского (Россия, Владивосток); 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая 44, кв. 120; 8-924-239-55-51
Mr. Sergei A. Khudiakov – PhD in Engineering, Associate Professor, Professor, Admiral G.I.Nevelsky State Maritime University (Russia, Vladivostok); 44 Verhneportovaya St, Vladivostok, Russia; 8-924-239-5551.

Аннотация. Данная работа посвящена вопросам, связанным с оценкой вибрации судовых малооборотных дизелей. Рекомендуется использовать критерии неуравновешенности, разработанные на основе значений неуравновешенных моментов от сил инерции 1-го и 2-го порядков, а также гармонических составляющих опрокидывающего и горизонтального скручивающего моментов. При этом рассматриваются частоты включительно по главный порядок, равный числу цилиндров дизеля. Предлагаемые критерии учитывают нормы вибрации дизелей, регламентируемые Правилами Российского морского регистра судоходства.

Summary. The paper deals with the issue of estimating vibrations in low-speed marine diesel engines. It is recommended to use the unbalance criteria designed on the basis of the values of unstable moments of inertia forces of the first and second orders; and also the harmonic constituents of the disturbing and horizontal torsion moments. At the same time, the frequencies are considered inclusively up to the main order that is equal to the number of cylinders in a diesel engine. The proposed criteria allow to consider the norms of diesel vibration regulated by the Rules of the Russian Marine Register of Shipping Industry.

Ключевые слова: кораблестроение, малооборотные дизели, вибрация, неуравновешенность, рекомендуемые критерии оценки.

Key words: shipbuilding, low-speed diesel engines, vibration, unbalance, advisable estimation criteria.

УДК 539.3/4

Введение. Состояние проблемы

С целью оценки виброактивности дизелей по величинам неуравновешенных сил инерции или моментов от этих сил ряд исследователей предлагали ввести критерии неурав-

новешенности, за которые принимались амплитуды вынужденных колебаний остова дизеля под действием рассматриваемого усилия, приложенного к его центру масс [1].

Так, В. Я. Климов и Б. С. Стечкин предложили формулы, используя метод приведения, для определения амплитуд виброперемещений крайней точки остова под действием гармонической силы или момента [1]

$$A_p = \frac{P_v}{M \cdot v^2 \omega^2}; \quad A_m = \frac{L \cdot M_v}{2 \cdot \theta \cdot v^2 \cdot \omega^2}, \quad (1)$$

где A_p и A_m – амплитуды вынужденных колебаний от силы и момента;

M и θ – масса и осевой момент инерции остова дизеля, соответствующие плоскости действия возмущающего момента;

L – длина дизеля (для вертикального и горизонтального моментов);

H – высота дизеля (вводится вместо длины для опрокидывающего момента);

P_v и M_v – гармоническая сила или момент v -го порядка;

v – порядок возмущающего усилия;

ω – круговая частота вращения 1-го порядка.

Допускаемые значения критериев должны быть [1]

$$A_p = A_m \leq 0,10 - 0,15 \text{ мм.} \quad (2)$$

Данные критерии имеют размерность и неудобны при сравнении дизелей разной мощности. Они совершенно не согласуются с нормами вибрации МРС. К тому же они не учитывают совместность колебаний остова малооборотных дизелей (МОД) с судовыми корпусными конструкциями (значения масс и момента инерции системы ДД значительно больше, чем только дизеля). Также критерии не предполагают возможности возникновения резонансных колебаний системы ДД. По данным причинам рассматриваемые критерии неприемлемы для судовых МОД.

Безразмерные критерии А. М. Каца учитывают совместное воздействие усилий в продольном, вертикальном и поперечном направлениях и основаны на тех же предпосылках (только для усилий с частотами 1-го и 2-го порядков) [1]

$$\xi = [P_I + 0,25 \cdot P_{II} + \frac{6 \cdot L \cdot (M_I + 0,25 \cdot M_{II})}{L^2 + H^2}] / (M \cdot D \cdot \omega^2);$$

$$\eta = [P_r + \frac{6 \cdot L \cdot M_r}{L^2 + H^2}] / (M \cdot D \cdot \omega^2), \quad (3)$$

где D – диаметр поршня;

H – высота дизеля;

P_I , P_{II} и P_r – неуравновешенные силы инерции поступательно движущихся деталей 1-го, 2-го порядка и вращающихся масс;

M_I , M_{II} и M_r – неуравновешенные моменты от сил инерции 1-го и 2-го порядков.

Предлагалось значение данных критериев $\xi = \eta \leq 0,01$. Данные критерии учитывают только неуравновешенные усилия первых двух порядков дизелей и поэтому также неприемлемы для оценки неуравновешенных моментов с более высокими порядками, например гармонических составляющих горизонтального скручивающего момента M_x и опрокидывающего момента $M_{оп}$. Одновременно с этим учет совместного воздействия гармонических усилий с различными частотами не дает возможности оценить систему ДД с точки зрения возникновения резонансов (только на одной частоте). В них также не отражены действующие нормы вибрации дизелей, аналогично ранее рассмотренным размерным критериям.

Другой подход. Рекомендуемые критерии

В связи с перечисленными недостатками упомянутые выше критерии не применяются для судовых МОД, т.е. для оценки возмущающих вибрацию моментов в них с широким спектром частот с 1-го по главный порядок, равный числу цилиндров.

Поэтому автором [2; 3] разработаны и предложены для использования в двигателестроении и судостроении безразмерные критерии неуравновешенности для судовых МОД. В этом случае критерии применимы для оценки амплитудных значений гармонических составляющих любого порядка с учетом возможных резонансных явлений в колебаниях системы ДД. При этом используются допускаемые уровни вибрации остовов МОД по нормам РМРС 2010 г. как ускорения вынужденных колебаний дизеля. Таким образом, уровень вибрации дизеля даже в условиях резонанса не должен превышать допускаемых значений.

Предлагаемый критерий неуравновешенности МОД дает возможность на стадии проектирования судна оценить виброактивность устанавливаемого дизеля и в случае возможных резонансов (по 1-й, H или X -форме) предпринять соответствующие меры. Это могут быть меры по конструктивному изменению жесткости системы ДД. В необходимых случаях могут предприниматься меры, связанные с установкой дополнительных связей верхнего крепления остова с конструкциями корпуса судна, которые могут иметь нестандартные компенсирующие элементы [3; 8; 9].

Аналогично рассмотренным выше критериям, предлагаемый критерий основан на оценке вынужденных колебаний остова МОД (по виброускорениям) под действием возмущающего момента. С целью устранения размерности в качестве критерия используется относительное ускорение, которое определяется из выражения

$$V_m = \frac{a_v}{g} = \frac{M_v \cdot L}{2 \cdot \theta \cdot g}, \quad (4)$$

где V_m – критерий неуравновешенности по моменту;

M_v – неуравновешенный момент v -го порядка;

a_v – амплитуда виброускорения от действия неуравновешенного момента;

θ – момент инерции дизеля;

L – длина дизеля;

g – ускорение свободного падения.

Осевые моменты инерции дизеля определяются из выражений:

– для гармонической составляющей опрокидывающего момента (относительно оси X , при этом в формуле критерий L заменяется на H)

$$\theta_x = M \cdot (B^2 + H^2); \quad (5)$$

– для моментов от сил инерции 1-го и 2-го порядков (относительно оси Y)

$$\theta_y = M \cdot (L^2 + H^2); \quad (6)$$

– для гармонических составляющих горизонтального скручивающего момента (относительно оси Z)

$$\theta_z = M \cdot (B^2 + L^2), \quad (7)$$

где B – высота остова дизеля.

Допускаемые значения критериев определяются по допускаемым ускорениям по нормам МРС (с учетом возможных резонансов в системе ДД с коэффициентом динамичности

$\beta_R = 10,5$). Значение β_R определено по результатам натурных экспериментов [3]. Тогда формула допускаемого значения критерия примет вид

$$[V_m] = \frac{[a_v]}{\beta_R \cdot g} = \frac{[a_v]}{10,5g}, \quad (8)$$

где $[a_v]$ – значение допускаемого виброускорения (по Правилам классификации и постройки морских судов, 2010 г., Т. 2, п. 9.3 «Нормы вибрации двигателей внутреннего сгорания»).

Для примера укажем, что на танкерах типа «Самотлор» был установлен дизель 6ДКРН74/160-3 в качестве главного, который имел резонанс Н-формы колебаний (возмущение от $M_{опб}$) в рабочем диапазоне частоты вращения. При этом амплитуды вибрации остова дизеля не превышали допускаемые значения, так как с постройки судна были установлены связи верхнего крепления остова [3; 5; 6].

В табл. 1, 2 и 3 приведены значения критериев неуровновешенности нескольких конкретных дизелей.

Таблица 1

Значения критериев неуровновешенности дизеля 6ДКРН74/160-3

Обозначение	Порядок	Частота, Гц	Момент, кН·м	$10V_m$	$10[V_m]$	$V_m/[V_m]$
M_I	1	2	0	0	0.05	0
M_{II}	2	4	748	0.57	0.18	3.16
M_Z	Z	12	402	0.73	1.20	0.60
M_{X2}	2	4	107	0.16	0.18	0.89
M_{X3}	3	6	571	0.88	0.41	1.50
M_{X4}	4	8	165	0.30	0.70	0.43
M_{X5}	5	10	14.3	0.03	1.00	0.03

Примечание. Отмечены моменты, для которых критерий превышает допускаемое значение (их необходимо учитывать при расчетах вибрации упругой системы ДД)

МОД типа 8ДКРН70/120-3 были установлены на судах типа «Варнемюнде» и имели резонанс Х-формы колебаний на номинальной частоте вращения. При этом амплитуды вибрации превышали нормы МРС и после установки жестких связей верхнего крепления были значительно снижены за счет повышения частоты свободных колебаний указанной формы [3; 5].

Таблица 2

Значения критериев неуровновешенности дизеля 8ДКРН70/120-3 (или К8Z70/120Е фирмы MAN)

Обозначение	Порядок	Частота, Гц	Момент, кН·м	$10V_m$	$10[V_m]$	$V_m/[V_m]$
M_I	1	2.333	460	0.50	0.06	8.33
M_{II}	2	4.667	0	0	0.24	0
M_Z	Z	18.670	154	0.52	1.88	0.27
M_{X2}	2	4.667	11.2	0.03	0.24	0.13
M_{X3}	3	7.000	152	0.25	0.55	0.38
M_{X4}	4	9.333	636	1.06	0.90	1.18
M_{X5}	5	11.670	151	0.31	1.23	0.26

Примечание. Отмечены моменты, для которых критерий превышает допускаемое значение (их необходимо учитывать при расчетах вибрации)

Таблица 3

Значения критериев неуравновешенности дизеля 6ДКРН60/195-7
(или 6L60MC фирмы MAN)

Обозначение	Порядок	Частота, Гц	Момент, кН·м	$10V_m$	$10[V_m]$	$V_m/[V_m]$
M_I	1	1.78	0	0	0.05	0
M_{II}	2	3.56	–	–	0.15	–
M_Z	Z	10.70	640	1.20	1.08	1.11
M_{X2}	2	3.56	163	0.27	0.15	1.80
M_{X3}	3	5.35	720	1.32	0.44	3.00
M_{X4}	4	7.12	221	0.44	0.67	0.66
M_{X5}	5	8.91	21	0.05	1.08	0.05

Примечание. Отмечены моменты, для которых критерий превышает допустимое значение (их необходимо учитывать при расчетах вибрации)

В табл. 1, 2 и 3 приведены критерии неуравновешенности трех моделей дизелей типа 6ДКРН74/160-3, 8ДКРН70/120-3 (K8Z70/120E фирмы MAN) и 6ДКРН60/195-7 (6L60MC фирмы MAN) по всем гармоническим составляющим моментов включительно по главный порядок, расчет которых был выполнен ранее [4; 5].

Поэтому с целью снижения виброактивности современных МОД (фирм MAN B&W типа LMC, SMC, SMC-C и фирмы Sulzer типа RTA, RTB, RT flex) принимаются следующие меры:

- устанавливаются компенсаторы неуравновешенного момента 2-го порядка (навесные на остовах или встроенные в остов);
- устанавливаются связи верхнего крепления остова МОД с конструкциями корпуса в поперечном направлении с целью снижения вибрации по Н и Х-формам колебаний (из-за значительного увеличения «остроты» индикаторных диаграмм и повышения гармонических составляющих $M_{оп}$ и M_X).

Конструкции связей верхнего крепления МОД, запатентованные разными фирмами и авторами, приведены в работе [3].

Допускаемые значения критерия неуравновешенности МОД (нормы вибрации судовых ДВС) приведены на рис. 1.

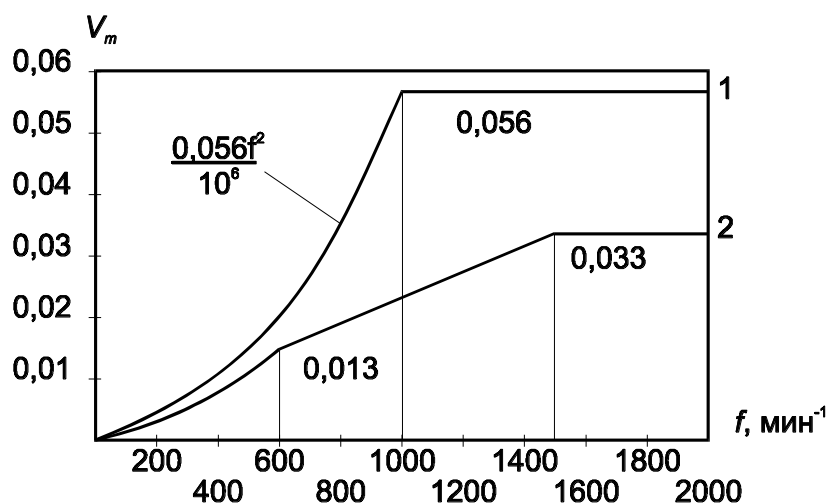


Рис. 1. Допускаемые значения предлагаемых критериев неуравновешенности МОД:
1 – критерий по Правилам РМРС 1985 г.; 2 – критерий по Правилам РМРС 2010 г.

Ужесточение норм вибрации дизелей с 1995 г. (то же в действующих Правилах издания 2010 г.) значительно снизило допускаемые значения критерия неуравновешенности, что отражается на требованиях к неуравновешенности дизелей.

Для удобства использования допускаемых значений критериев в разных диапазонах частот могут быть использованы следующие уравнения:

– в диапазоне частот от 0 до 10 Гц –

$$[V_m] = 1,32 \cdot (f^2 \cdot 10^{-4}); \quad (9)$$

– в диапазоне частот от 10 до 25 Гц –

$$[V_m] = 1,32 \cdot (f^2 \cdot 10^{-5}); \quad (10)$$

– выше частоты 25 Гц –

$$[V_m] = 0,033. \quad (11)$$

Заключение

В заключение следует отметить, что использование предлагаемых критериев неуравновешенности МОД дает возможность на стадии проектирования определить спектр гармонических составляющих неуравновешенных моментов с частотами от 1-го по главный порядок, равный числу цилиндров, и далее сопоставлять их с частотами свободных колебаний упругой системы «дизель-днище» [3, 5-7]. В случаях совпадения частот или незначительной их разницы следует разрабатывать меры по предотвращению повышенной вибрации системы конструктивными методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Истомин, П. А. Динамика судовых двигателей внутреннего сгорания / П. А. Истомин. – Л.: Судостроение, 1964. – 288 с.
2. Худяков, С. А. Критерии неуравновешенности судовых малооборотных дизелей / С. А. Худяков // Судостроение и судоремонт: межвуз. сб. – Владивосток, 1980. – С. 79-83.
3. Худяков, С. А. Практика решения проблем вибрации судовых дизелей: моногр. / С. А. Худяков. – Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2006. – 172 с.
4. Худяков, С. А. Особенности вибрации судовых малооборотных дизелей / С. А. Худяков. – 1985. – 12 с. – Деп. в ЦНИИ «Румб», ДР-2221.
5. Худяков, С. А. Обеспечение вибростойкости механизмов, оборудования, корпусных конструкций в машинных отделениях теплоходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Худяков, С. А. – Владивосток: ДВПИ, 1982. – 24 с.
6. Khoodiakov, S. A. Principles of Laying Down Limits of Elastic System Free Vibration Frequencies in Engine Rooms. – Proceedings ISC'2002. – St. Peterburg, 2002. – P. 143-150.
7. Тарануха, Н. А. Динамика упругих систем в машинных отделениях судов с главными малооборотными дизелями / Н. А. Тарануха, С. А. Худяков // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2012. – № 67 (351). – С. 161-168.
8. Тарануха, Н. А. Определение жесткостной характеристики нестандартизированного материала упругой связи динамической системы / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № IV-1(4). – С. 4-11.
9. Любушкина, Н. Н. Программно-информационное обеспечение задачи о колебаниях стержня с большими деформациями / Н. Н. Любушкина, А. Н. Петрова, Н. А. Тарануха // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2 (14). – С. 30-39.