

Ефремов Л.В., Кудрявцев М.В., Иванов М.Ю.

Моделирование торсиограмм и спектрограмм при расчете крутильных колебаний силовых установок

В соответствии с требованиями Морского Регистра расчеты крутильных колебаний принято завершать таблицами и графиками фактических и допускаемых амплитуд и напряжений. Аналогичные данные должны быть представлены и в отчетах об экспериментальных исследованиях крутильных колебаний.

Однако, современный уровень компьютерных технологий позволяет одновременно производить еще и гармонический (порядковый) или спектральный анализ записи крутильных колебаний, что повышает точность и достоверность исследований. Например, эта процедура обязательна при диагностировании демпферов крутильных колебаний, когда в качестве диагностического параметра используется частота и амплитуда наиболее сильного резонанса моторной формы крутильных колебаний.

Спектрограмма необходима для решения не менее важной задачи о выявлении помех и искажений, которые могут накладываться на основную запись крутильных колебаний. Это имеет особое значение при освоении новых методов измерений и для совершенствования методов расчета крутильных колебаний.

В этой связи особо актуальной становится проблема моделирования теоретических торсиограмм и спектрограмм на заключительной стадии расчета крутильных колебаний с целью их последующего сравнения с экспериментальными результатами. В работе [1] показаны примеры теоретических торсиограмм и спектрограмм, но подробного описания методики их формирования там не дано, что и послужило поводом для написания настоящей статьи.

Эта проблема относится к задачам о векторном анализе и синтезе гармонических колебаний (гармоник), которые одновременно действуют при работе установки на исследуемой частоте вращения вала. При этом каждая i -ая гармоника n_i -го порядка имеет свою круговую частоту ω_i , амплитуду A_i и сдвиг по фазе j_i .

Для построения теоретической торсиограммы можно применить тригонометрический вариант функции (1) векторной суммарной амплитуды $A_S(t)$

$$A_S(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(t \omega_i + j_i) \quad (1)$$

Решение этого простого на первый взгляд уравнения в действительности представляет собой весьма сложную проблему, поскольку большинство входящих в уравнение (1) гармоник относятся к нерезонансным крутильным колебаниям и лишь некоторые гармоники могут оказаться резонансными или околорезонансными колебаниями.

Известно [1], что резонансные колебания можно определить на основе уравнений баланса возмущающих и демпфирующих моментов в системе. Однако, для расчета колебаний вдали от резонанса общепринятой и хорошо проверенной методики в литературе найти трудно.

Нерезонансные амплитуды колебаний простых систем еще можно оценивать путем достаточно громоздкого расчета частотного уравнения и остаточного момента для заданной частоты без учета демпфирования в системе. Для сложных крутильных схем такой способ скорее всего не корректен потому, что при значительном отклонении от рассматриваемой резонансной частоты исходная форма колебаний искажается и мы легко можем попасть (и попадаем!) в зону развития соседних форм колебаний, что приводит к нелепым результатам.

Поэтому практический интерес может представить приведенная в данной статье методика [1], согласно которой расчет суммарных амплитуд при любой частоте вращения (как резонансной, так и нерезонансной) выполняется по формуле (1), параметры которой являются функциями порядков колебаний n_i и заданной частоты вращения валов n .

$$\begin{aligned} A_i &= Av(n_i, n), \\ w_i &= p n n_i / 30, \\ j_i &= j(n_i). \end{aligned} \tag{2}$$

В основу расчета амплитуды вынужденных колебаний $Av(n_i, n)$ положен принцип аппроксимации исследуемой крутильной схемы системы, которая находится в состоянии резонанса, некоторой эквивалентной системой с одной степенью свободы. Это значит, что обе системы имеют одинаковые частоты свободных колебаний, а так же одинаковые возмущающие и демпфирующие моменты. На этом принципе построено большинство методик расчета резонансных колебаний, которые, как правило, обеспечивают требуемую достоверность вычислений.

В работе [1] приведена формула (1-6), которая соответствует указанному выше принципу. Она положена в основу приведенной ниже методике, которая после дополнительных исследований, направленных на уточ-

нение формул для предварительного расчета возмущающих моментов от движущей силы и остаточного инерционного момента эквивалентной системы, позволила составить следующий общий алгоритм расчета амплитуд вынужденных колебаний каждого n -го порядка рассматриваемой формы.

$$Av(n_i, n) := \frac{K(n, n) A(n)}{\sqrt{b(n)^2 \frac{\dot{\theta}_1}{e} - f(n, n)^2 \dot{\theta}_1^2 + f(n, n)^2}} \quad (3)$$

где $K(n, n)$ - коэффициент влияния фактической частоты вращения на возмущающий момент n -го порядка, $A(n)$ и $b(n)$ - расчетная амплитуда (рад) и коэффициент динамического усиления для резонансных колебаний n -го порядка, $f(n, n)$ - функция учета отклонения исследуемой частоты вращения от резонансной, определяемый по программе (4)

$$f(n, n) := \begin{cases} n/nr(n) & \text{if } n/nr(n) \geq 1 \\ nr(n)/n & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Наиболее сложным принято считать вопрос об определении величины сдвига $j(n_i)$, поскольку его строгое решение связано с необходимостью каждый раз выполнять обратное преобразование Фурье для реальной индикаторной диаграммы дизеля.

Можно рекомендовать два более простых варианта вычислений этой функции. Первый, более точный вариант заключается в аппроксимации расчетной зависимости сдвига по фазе гармоник тангенциальной силы конкретного двигателя от порядка колебаний. Программы расчета такой задачи даны в работе [1], а на рис. 1 приведен пример ее решения для индикаторной диаграммы двигателя 8NVD48.

Второй, самый простой вариант, заключается в том, что бы принять сдвиг по фазе $j_1 = \text{const} = 0$, что соответствует арифметической сумме амплитуд гармоник. В этом случае получаем максимальную суммарную амплитуду, что, как правило, приводит к некоторому запасу надежности расчета. Если учесть неизбежное рассеивание параметров крутильных колебаний и тот факт, что в зарубежной практике обычно используется именно этот простой вариант, то его можно рекомендовать к широкому применению без риска снижения достоверности вычислений.

$$\varphi_k = (0.17848 \ 1.078 \ -0.21696 \ 0.01544)$$

$$y(n) := \varphi_{k,0} + \varphi_{k,1}n + \varphi_{k,2}n^2 + \varphi_{k,3}n^3$$

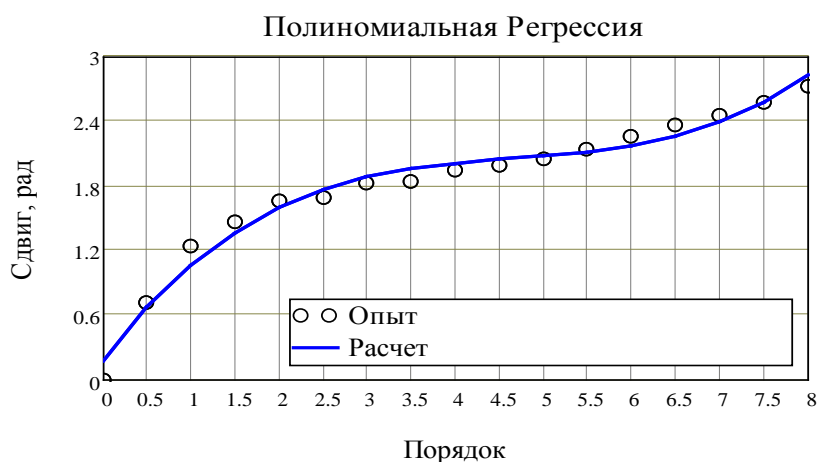


Рисунок 1. Пример зависимости сдвига по фазе гармоник индикаторной диаграммы двигателя от их порядка

Приведенные выше зависимости в своей совокупности образуют методику построения теоретической торсиограммы.

Что касается спектрограммы, то она может быть построена в двух вариантах непосредственно по формуле (3) для всех порядков при рассматриваемой частоте вращения n (об/мин). Первый вариант заключается в построении зависимости амплитуды $A_v(n_i, n)$ от порядка колебаний, а второй вариант – от частоты колебаний, Гц

$$F(n, n) = n n / 60 \tag{5}$$

Для подтверждения эффективности и работоспособности предложенной методики сравним теоретические торсиограммы и спектрограммы, рассчитанные для моторной формы колебаний силовой установки рыболовного траулера проекта 503 с независимыми результатами торсиографирования судна этого же проекта, заимствованные из статьи А.А. Попова этого сборника (см. стр.). Такой выбор связан с тем, что используемые экспериментальные данные получены с носового торца коленчатого вала двигателя 8NVD48 - 2AU (1320 л.с. при 428 об/мин) с применением современной аппаратуры и имеют весьма высокое качество.

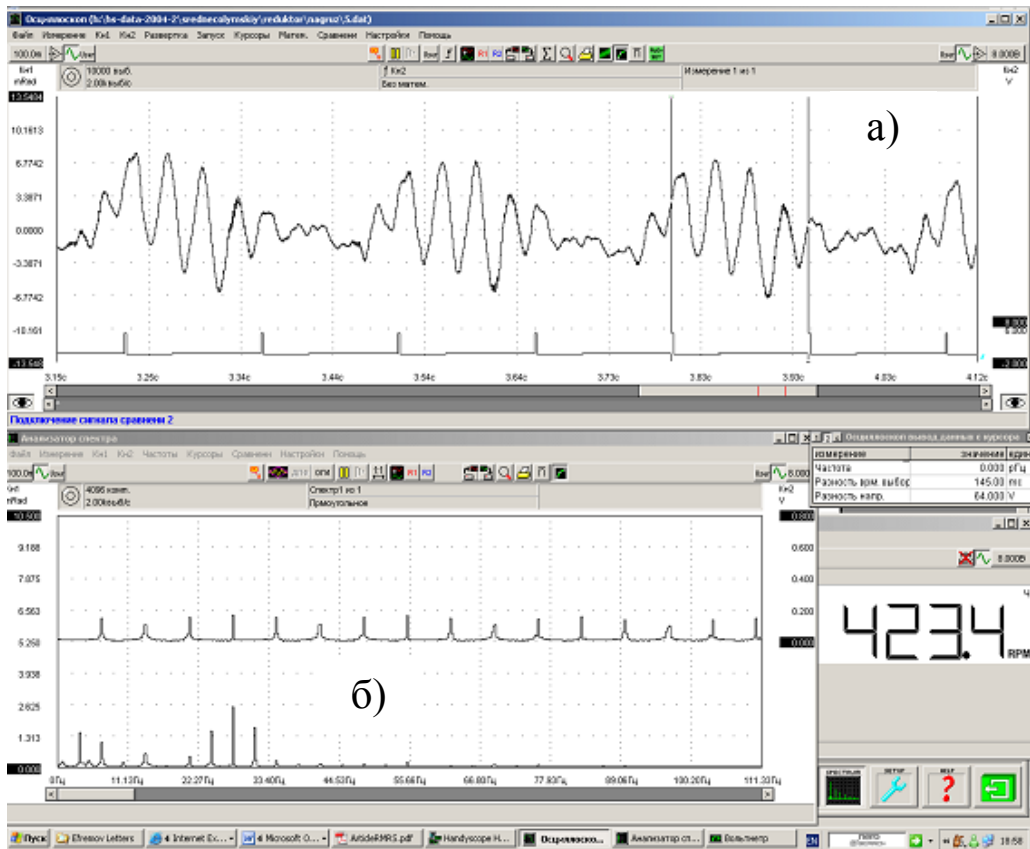


Рисунок 2 Экспериментальные торсиограмма (а) и спектрограмма (б) полученные при работе вблизи номинальной частоты вращения

Целесообразно рассмотреть два характерных режима работы силовой установки. Первый режим относится к работе вблизи номинальной частоты вращения, где вообще нет резонансов, но развиваются заметные суммарные вынужденные колебания в виде сильных биений. Второй режим относится к резонансным оборотам 8-го порядка моторной формы в районе 280 об/мин.

Экспериментальная торсиограмма и спектрограммы для первого режима работы двигателя показаны на рис. 2, а на рис.3 приведены их расчетные версии.

Совместное рассмотрение этих материалов позволяет во первых подтвердить высокую достоверность предложенной методики прогнозирования торсиограммы, ввиду очевидного ее согласия с экспериментом.

Во-вторых, приведенные данные позволяют объяснить природу колебаний при номинальной частоте вращения. Очевидно, что суммарные колебания в форме биений образованы близкими по частоте нерезонансными колебаниями моторной формы 4, 4.5 и 3.5 – го порядков из-за того, что резонансы этих колебаний находятся выше номинальных оборотов. Можно так же заметить слабое проявление 5.5 – го и 8 - го порядков.

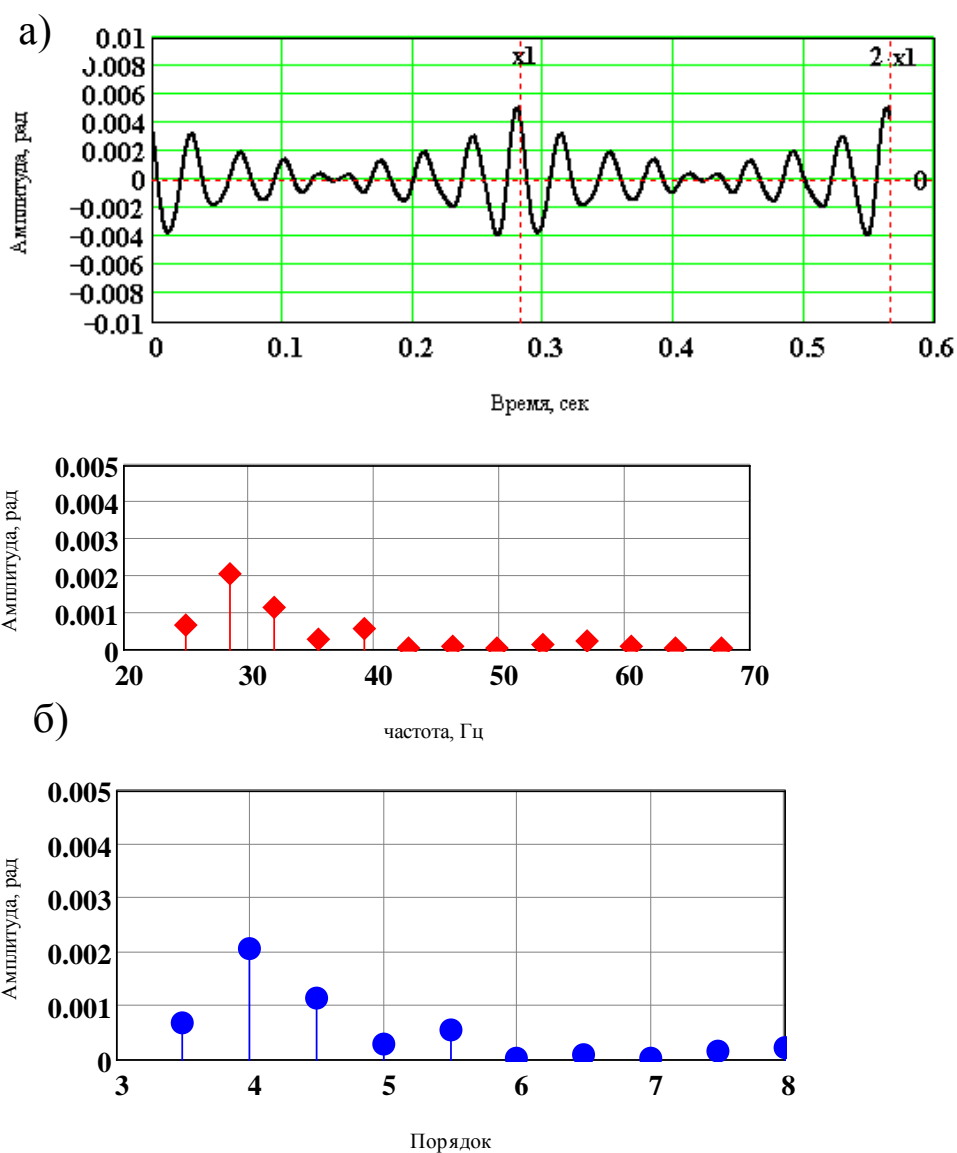


Рисунок 3 Теоретические торсиограмма (а) и спектрограммы (б) при работе на номинальной частоте вращения

В-третьих, наличие расчетных спектрограмм позволяет оценить некоторые неизбежные погрешности измерений. На рис. 2б наряду с «законными» спектральными составляющими 4, 4.5 и 3.5 – го порядков, можно заметить очень слабые гармоники 0.5-го и 1-го порядков. Возможные причины таких (незначительных!) явлений объясняются в упомянутой статье.

Хорошее согласие экспериментальной и теоретической торсиограмм наблюдается и при 280 об/мин в зоне резонанса 8-го порядка (см. рис. 4).

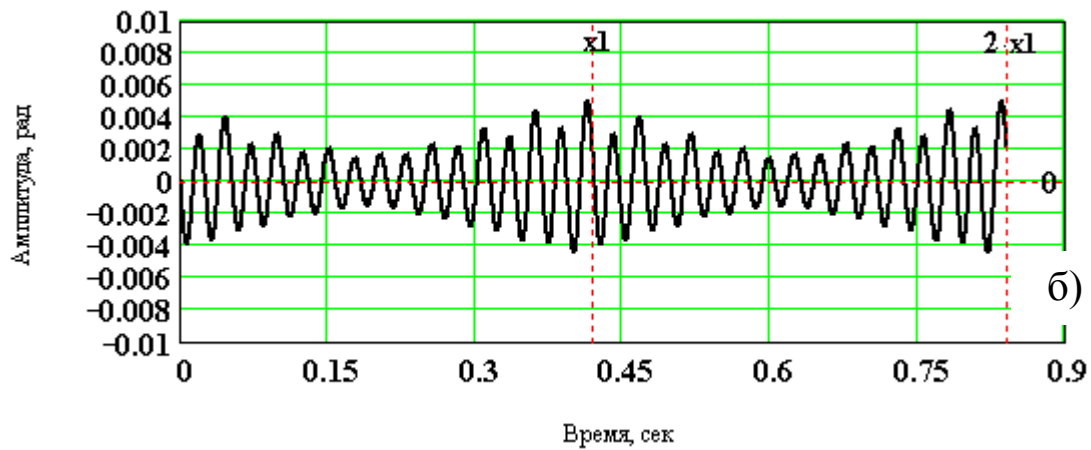
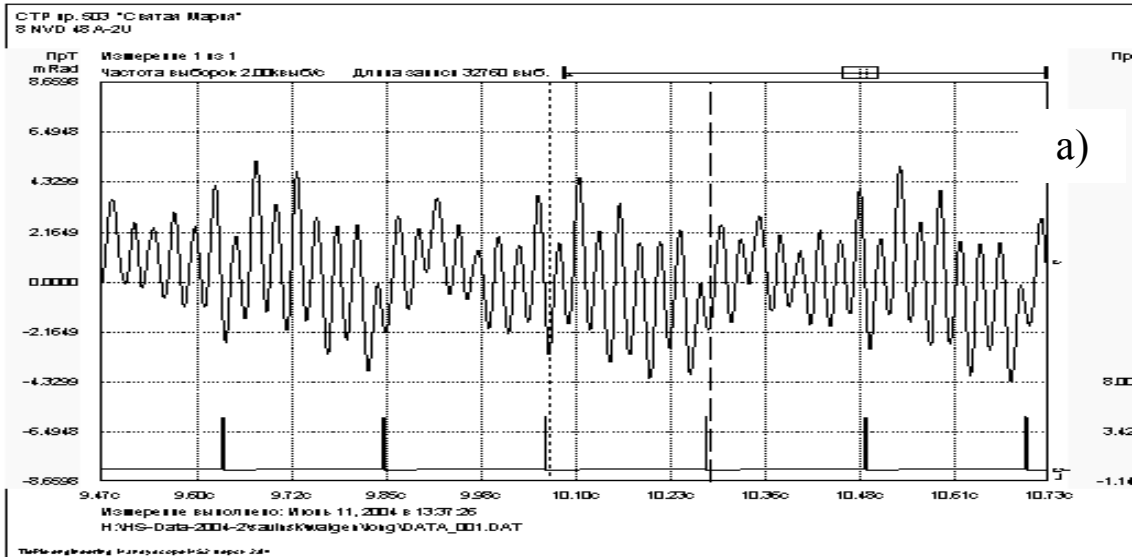


Рисунок 4 Экспериментальная (а) и теоретическая (б) торсиограммы на резонансной частоте вращения 8-го порядка

Из этих образцов видно, что в данном случае не наблюдается чистой синусоиды 8-го порядка. Здесь так же имеет место некоторое биение суммарной амплитуды, причины которого следуют из спектрограммы на рис.5.

В данном случае рядом с основным резонансом 8-го порядка расположены не очень сильные, но ощутимые резонансы 7.5-го и 8.5-го порядков. Их околорезонансные амплитуды складываются с колебаниями 8-го порядка, что и приводит к биениям. Кроме того проявляется некоторое влияние уже очень слабых колебаний 4-го порядка.

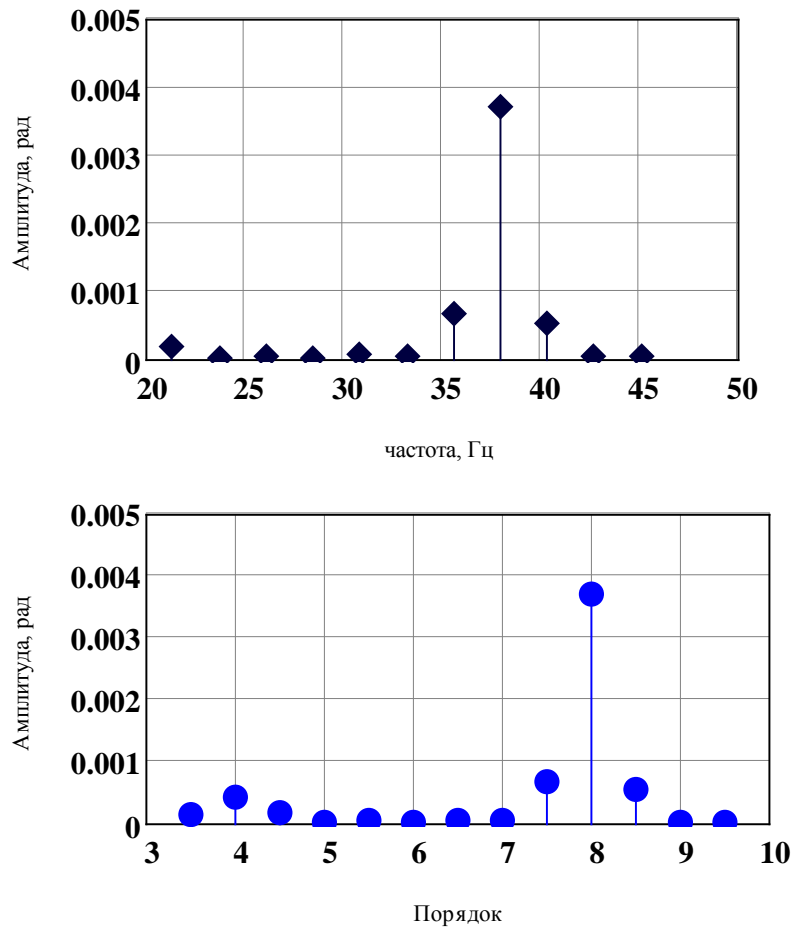


Рисунок 5 Спектрограммы на резонансной частоте вращения 8-го порядка

Материалы этой статьи позволяют уверенно завершать все расчеты крутильных колебаний моделированием торсиограмм и спектрограмм по изложенной выше методике в рамках общей методологии работы [1].

Литература

[1] Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. - СПб.: Наука, 2007. -276.