

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДЕТАЛЯХ ДВС

В.С. Попович, А.А. Жердев, Р.Е. Пестрецов

В статье приведены результаты анализа экспериментальных исследований динамических процессов деталей дизелей, разработанные и апробированные комплексные методики определения оптимальных динамических параметров крутильных систем двигателей.

Ключевые слова: дизельные двигатели, крутильные колебания.

Значительное место в исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей двигателей внутреннего сгорания занимают методы тензометрирования натуральных деталей, которое выполняется в статических условиях и на работающих двигателях. Эти исследования уточняют и дополняют методику теоретического анализа НДС деталей, позволяют выполнить исследования по влиянию различных факторов, оценить достоверность выбранной методики расчетно-теоретического анализа НДС.

Для деталей опорного узла двигателя «блок – картер – коленчатый вал – крышка коренного подшипника» представлена методика измерения на натуральных деталях напряженно-деформированного состояния. На рисунке 1 приведены экспериментальные конструкции коленчатых валов дизельных двигателей 6Ч 13/14 и 4Ч 13/14.

При тензометрировании деталей ДВС применялись тензорезисторы типа КФ-5 с чувствительным элементом из константовой фольги, номинальным значением сопротивления 200 Ом и базой 5 мм. Для монтажа соединений использовался провод марки МГТФ сечением 0,14 мм².

Из усилительной аппаратуры применялся тензометрический усилитель типа УТ4А-1. Регистрация процессов проводилась осциллографом типа Н-125 на осциллографную фотобумагу шириной 120 мм. Скорость перемещения фотобумажной ленты составляла 1000 мм/с. Отметка времени с интервалом 0,002 сек. наносилась на осциллограмму с помощью отметчика времени осциллографа ртутной лампой.

Для отметки частоты вращения коленчатого вала двигателя и положения поршня первого цилиндра в ВМТ использовались индуктивные датчики. При тензометрировании на работающих двигателях использовались ртутные амальгамированные токосъемники типа РАТ-2, соединенные последовательно.

Загрузка двигателей осуществлялась электрической тормозной установкой типа САК-Н670 производства ГДР.

Схемы расположения тензорезисторов на элементах коленчатых валов двигателей 6Ч 13/14 и 4Ч 13/14 приведены на рисунке 1а и 1б соответственно.

Основное внимание уделяется изучению закономерности изменения НДС взаимосвязанных деформаций сопряженных деталей коренного опорного узла, анализу этой закономерности в зависимости от режимов работы двигателя и установлению достоверного реального характера нагруженности деталей.

Для всех элементов коленчатых валов 6Ч 13/14 и 4Ч 13/14, на которых были наклеены тензорезисторы, были записаны осциллограммы при работе двигателей по скоростным и по нагрузочным характеристикам при различной частоте вращения коленчатого вала.

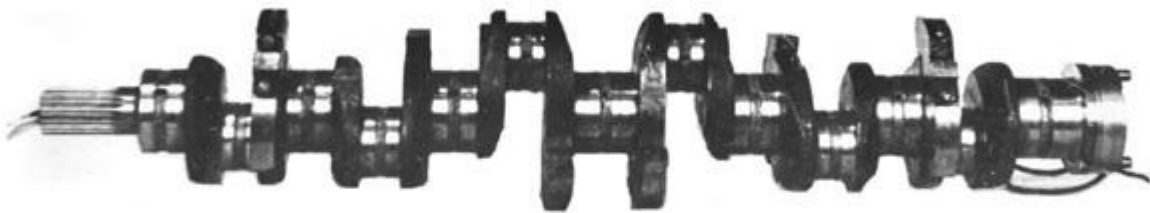
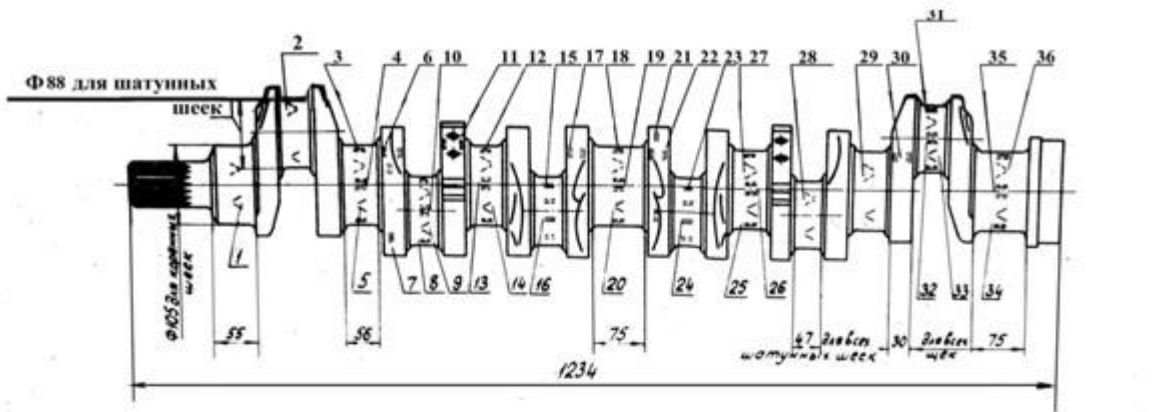
На осциллограммах изменения напряжений сопряженных деталей коренного опорного узла отмечены колебания с различной частотой. По характеру колебательные процессы представляют собой биения с различной амплитудой и количеством периодов изменения процесса на участках осциллограмм.

На первом этапе анализа определяется вид колебаний – крутильные или изгибные, источник возбуждения, определялась преобладающая компонента колебаний с одним и тем же периодом ее изменения. Зная отметки времени и число полных колебаний, определялась частота преобладающей компоненты. Для разделения низкочастотных и высокочастотных компонент колебаний использовался метод построения огибающих.

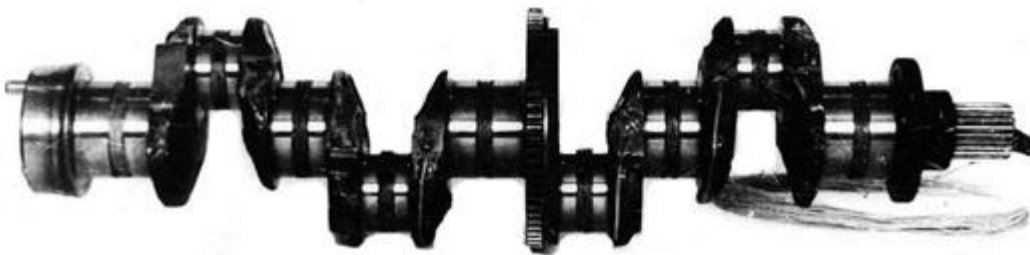
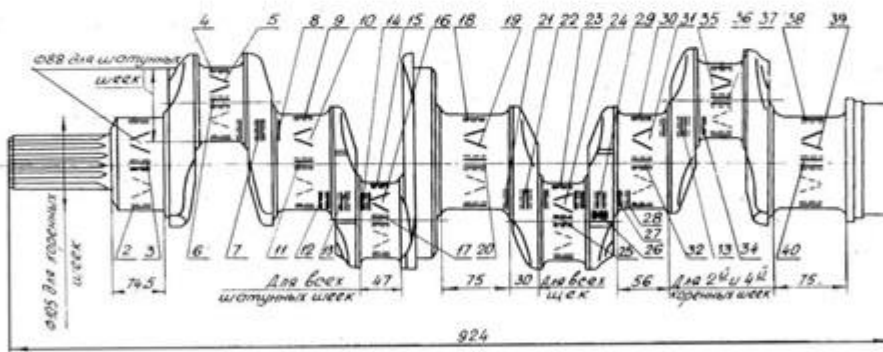
Для большинства деталей двигателя внутреннего сгорания имеют место действия переменных нагрузок, которые приводят к появлению в опасных сечениях переменных напряжений. Эти напряжения представляют собой случайные величины, так как они являются результатом нестабильности рабоче-

го процесса двигателя, флуктуации максимального давления в цилиндрах и частоты

вращения коленчатого вала даже на установленных режимах работы двигателя.



а)



б)

Рисунок 1 – Схемы размещения тензорезисторов и экспериментальный коленчатый вал:
а) дизеля 6Ч13/14, б) дизеля 4Ч13/14

Реализация изменения напряжений в интервале времени, соответствующем рабочему циклу двигателя, рассматривается как случайный процесс. Такая интерпретация характера изменения действующих напряжений (нагрузок) на основные детали в процессе работы двигателя вполне оправдывает применение понятий теории вероятности для описания априорного распределения, адекватного реальным процессам.

Для описания основных свойств случайных процессов изменения напряжений используются следующие статистические функции: а) плотность распределения случайного процесса изменения напряжений и функция распределения (или интегральная функция), б) статическая составляющая процесса – математическое ожидание выбранной величины напряжения и динамическая составляющая – среднее квадратическое отклонение этой величины, в) автокорреляционная функция, г) спектральная плотность.

Подбор закона распределения по экспериментальным реализациям изменения напряжений осуществляется на основании статистических характеристик и построения гистограмм. Оценка соответствия эмпирического и нормального теоретического распределения производилась на основании ошибок асимметрии и эксцесса. Если эмпирические величины эксцесса и асимметрии не превосходят своих трехкратных основных ошибок, то распределение можно считать нормальным. В том случае, когда проверка по критерию нормального распределения отмечает некоторое несовпадение эмпирического распределения с нормальным, то описание случайного процесса можно улучшить, используя нормальное распределение и его производные. Для этого можно воспользоваться рекомендациями, приведенными в технической литературе.

Анализ результатов параметров статистического оценивания показывает, что в большинстве случаев эмпирические кривые распределения плотности не соответствуют нормальному закону распределения. Это подтверждается величинами асимметрии $A\sigma$ (мера косости кривой) и эксцесса $E\sigma$ (мера крутости кривой).

Как показывает статистический анализ, распределение изменения напряжений для сопряженных деталей коренного опорного узла в различных эксплуатационных условиях удовлетворительно соответствует смещенному нормальному закону распределения, так называемому закону распределения типа А.

Для проверки согласованности плотно-

сти распределения, полученной путем обработки реализаций изменения напряжений, применялся критерий согласия χ^2 Пирсона. Сущность метода проверки состоит в том, что в качестве меры расхождения плотностей эмпирической и теоретической кривых используется распределение χ^2 . Гипотеза о согласованности распределений проверяется путем анализа этого распределения.

Связь реализаций изменения напряжений в отдельных точках скоростной или нагрузочной характеристик двигателей теряет свою однозначность, и изучаемая физическая система (n -мерный вектор) переходит в одно из возможных состояний. Имеет место так называемая статистическая связь, когда реализация изменения напряжений реагирует на переменность режимов работы двигателя, в результате деформируется закон распределения или статистические характеристики.

В том случае, когда известны реализации изменения напряжений на различных режимах работы двигателя по скоростной или нагрузочной характеристикам, то статические связи между режимами определяются методами корреляционного и регрессионного анализов.

Автокорреляция случайного процесса изменения напряжений характеризует зависимость значений одной и той же функции $\sigma(t)$, но в различные моменты времени. Автокорреляционная функция характеризует, главным образом, тесноту линейной связи значений случайной функции в двух сечениях. При линейной связи значение корреляционной функции будет наибольшим.

Для стационарного случайного процесса автокорреляционная функция зависит лишь от разности временного интервала. Зависимость одной случайной функции от другой определяется взаимной корреляционной функцией.

При анализе процессов изменения напряжения в зависимости от режимов работы двигателя взаимные корреляционные функции используются в целях: 1) проверки статистической независимости двух случайных функций, 2) оценки импульсной и частотной характеристик системы, 3) предсказания величины ошибок времени запаздывания в стационарных процессах, так как взаимная корреляционная функция для линейных процессов будет иметь максимум при разности времени, равной времени прохождения сигнала в системе, 4) оценки амплитуд и Фурье-компонент величин, искаженных некоррелированным шумом или другими сигналами, 5) определение путей прохождения входного сигнала по большой линейной системе, по-

сколько каждому из путей соответствует отдельный максимум на коррелограмме.

Более показательной является величина нормированной автокорреляционной функции при условии линейной связи.

Можно говорить о положительной и отрицательной корреляции. Если большим значениям $\sigma(t1)$ соответствуют большие значения $\sigma(t2)$, то корреляция положительна, и наоборот.

Понятие корреляции тесно переплетается с понятием регрессии. В корреляционном анализе оценивается сила стохастической связи, в регрессионном – ее форма. Оба вида анализа применяются для установления причинных соотношений между реализациями изменения напряжений и определения наличия или отсутствия связи.

Регрессионный анализ, исследуя, односторонние стохастические зависимости, применяется для: 1) установления формы зависимости, 2) определения функции регрессии, 3) построения точечных и интервальных оценок параметров функции регрессии, 4) проверки согласованности полученной эмпирической функции регрессии экспериментальным данным реализации изменения напряжений.

Основной задачей регрессионного анализа является подбор такой функции, которая бы наилучшим образом отражала закономерность, с помощью которой можно было бы решать задачу обоснованного прогноза.

Подбор и построение различных форм регрессионной связи между двумя реализациями изменения напряжений при работе двигателя на скоростной и нагрузочной характеристиках проводился на основании уравнений линейной регрессии $Y = a + bX$, квадратичной регрессии $Y = a + bX + cX^2$, экспоненциальной регрессии $Y = a \cdot \exp(bX)$, степенной регрессии $Y = aX^b$ и логарифмической регрессии $Y = a + b \cdot \ln(x)$.

Для оценки выбранного уравнения регрессии определяется остаточная дисперсия, равная среднему квадрату отклонений вычисленных реализаций от соответствующих эмпирических значений, и которая служит достаточно удобным и геометрически наглядным критерием удовлетворительности выбранного уравнения.

Одним из методов обработки экспери-

ментальных выборочных реализаций конечной длины (осциллограммы при тензометрировании), позволяющих характеризовать частотный состав измеряемого сигнала, является спектральный анализ. Математической основой его, связывающей временной или пространственный сигналы с предоставлением в частотной области, используется преобразование Фурье. Спектральный анализ имеет предпочтительные особенности по сравнению с автоковариационной функцией. Во-первых, это связано с тем, что оценки спектра на соседних частотах более независимы, и поэтому выборочный спектр легче интерпретировать, чем выборочную автоковариационную функцию. Во-вторых, спектр для колебательных процессов в системе ДВС представляет непосредственный физический смысл.

Спектральный анализ объединяет два важных теоретических подхода: статистический анализ временных рядов и методы анализа Фурье.

Спектр и автоковариационная функция связаны соотношением преобразования Фурье и поэтому наличие автоковариационной функции какого-либо процесса эквивалентно знанию спектра.

Дискретно-временное преобразование Фурье автоковариационной последовательности определяет спектральную плотность мощности (СПМ).

Воспользовавшись выкладками из [1, 2] для определения спектра стационарного случайного процесса на основе фундаментального соотношения, связывающего выборочный спектр и выборочную ковариационную функцию.

Информация, полученная путем обработки результатов тензометрирования деталей коренного опорного узла двигателей 4Ч 13/14 и 6Ч 13/14, представлена в виде автокорреляционных функций, периодограмм для реализаций изменения напряжений в элементах коленчатых валов, крышек коренных подшипников и межцилиндровых перегородок блокартеров вышеперечисленных двигателей.

На рисунке 2 приведены фрагменты дискретно-временного изменения напряжений, автокорреляционных функций и изменения спектральной плотности мощности по частоте для ряда деталей коренного опорного узла.

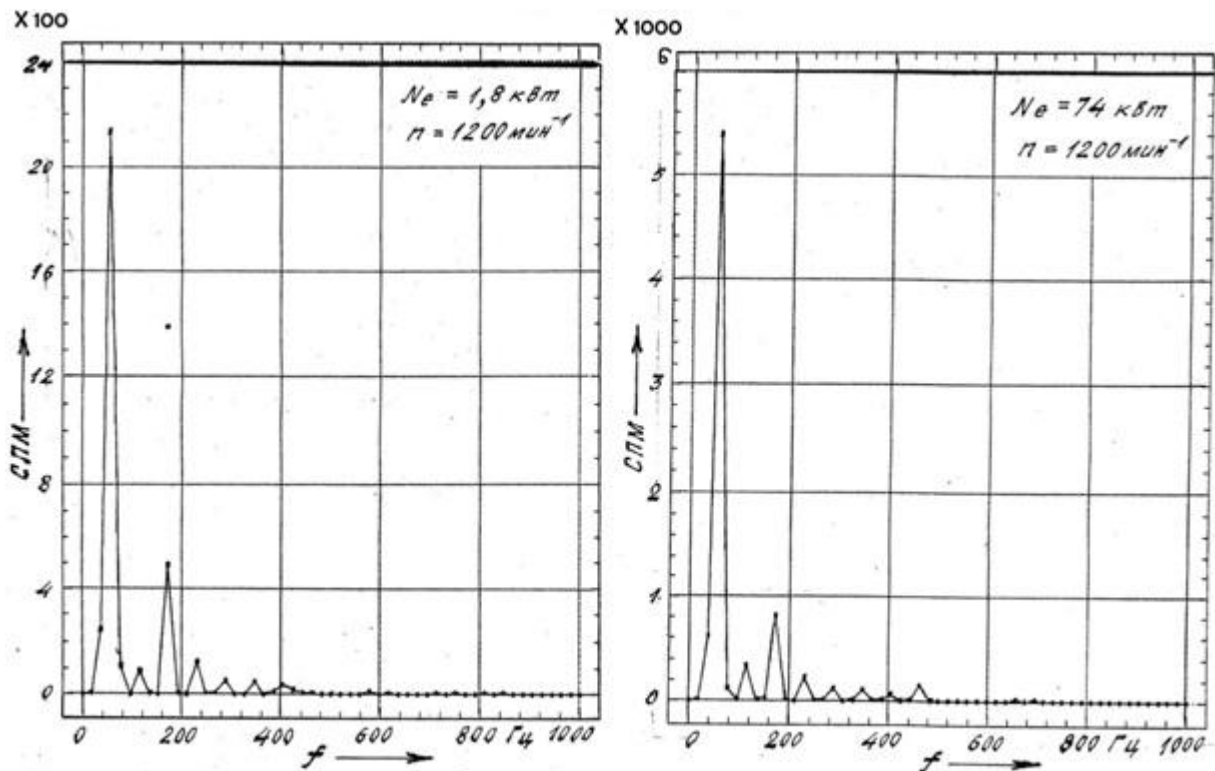


Рисунок 2 – Периодограммы изменения напряжений в сечении 7 щеки (мост 21) коленчатого вала дизеля 6Ч 13/14

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попович, В. С. Экспериментальные методы исследования напряженного и деформированного состояния деталей машин : учебное пособие / В. С. Попович. – 2-е изд., перераб. и доп. – Барнаул : изд. АлтГТУ, 2009. – 108 с.

2. Попович, В. С. Анализ резонансных процессов при крутильных колебаниях в ДВС / В. С. Попович, А. А. Жердев // Ползуновский вестник. – № 4/3. – 2013. – С. 150–157.

Попович В.С., д.т.н., проф., профессор кафедры «Механика и инноватика» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел.: (83852) 367608, e-mail: vspopovich@yandex.ru.

Жердев А.А., аспирант кафедры «Механика и инноватика» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел.: (83852) 367608, e-mail: zherdev.Andrej.86@mail.ru.

Пестрецов Р.Е., аспирант кафедры «Механика и инноватика» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел.: 8-905-928-1218, e-mail: pestret@mail.ru.