

ИССЛЕДОВАНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Симаков Евгений Алексеевич

магистрант, Волгоградский государственный технический университет, РФ, г. Волгоград

Косов Олег Дмитриевич

канд. техн. наук, доцент, Волгоградский государственный технический университет, РФ, г. Волгоград

INVESTIGATION OF TORSIONAL VIBRATIONS OF THE VEHICLE ENGINE CRANKSHAFT

Yevgeny Simakov

Master's student, Volgograd state technical University, Russia, Volgograd

Oleg Kosov

Candidate of technical Sciences, associate Professor, Volgograd state technical University, Russia, Volgograd

Аннотация. В статье проводится анализ основных этапов исследования крутильных колебаний валопроводов и силовых установок транспортных средств. Несмотря на значительное количество экспериментальных и теоретических работ, проблемы с их последствиями остаются актуальными. Для определения направлений по их устранению и повышению надежности машин выполнена эта работа.

Abstract. The article analyzes the main stages of the study of torsional vibrations of shaft lines and power plants of vehicles. Despite a significant amount of experimental and theoretical work, problems with their consequences remain relevant. This work was performed to determine the ways to eliminate them and improve the reliability of machines.

Ключевые слова: крутильные колебания; свободные и вынужденные колебания; резонанс; демпфирование; валопроводы; силовая установка; экспериментальные и теоретические исследования.

Keywords: torsional vibrations; free and forced vibrations; resonance; damping; shaft lines; power plant; experimental and theoretical research.

В выполненной работе проведен анализ информационных источников, направленных на исследования крутильных колебаний коленчатого вала двигателей транспортных средств, в том числе и судов, с возможностями разработки рекомендаций по увеличению

эксплуатационного ресурса.

Увеличение энергонасыщенности силовых установок транспортных средств является постоянно тенденцией двигателестроения. Это приводит к увеличению среднего эффективного давления, быстроходности, напряженности деталей силовых передач, усложнению конструктивных схем, снижению надежности и долговечности деталей и узлов.

Увеличение динамической нагруженности приводит к возникновению упругих колебаний силовых приводов. Эти колебания происходят при воздействии на детали приводов периодически изменяющихся сил и моментов, определяемых условиями эксплуатации. В этих динамических системах особенно опасными становятся колебания в резонансных зонах, при совпадении вынужденных частот с собственными частотами системы. При создании машин с силовыми приводами всегда была необходимость обеспечения их надежной и долговечной работы. Такая работа проводится на этапах проектирования, производства и эксплуатации. Конструктор при проектировании должен уметь учитывать условия работы проектируемой машины, а эксплуатационник должен владеть методами и средствами сохранения и продолжения жизненного цикла.

В результате неравномерной работы силовых установок машин с переменным сопротивлением нагрузки, в этих валопроводах возникают крутильные колебания. Так как, валопроводы обладают упругостью и на них размещены массы, в каждом сечении вала они могут перемещаться с разными угловыми скоростями, вызывая упругие деформации. Колебания масс элементов силовой передачи относительно друг друга, вызывающие закрутку отдельных участков, называют крутильными.

Исследование крутильных колебаний разделяются на три этапа [7]:

-создание фундаментальных математических теорий периодического движения объектов. Работы Лейбница, Лагранжа. Лапласа, Якоби и других математиков 17-19 веков, на основании которых создан математический аппарат, современный и сегодня;

-оснащение транспортных установок поршневыми двигателями, которые приводили к поломкам валов с этими двигателями. Изучение характера открыло новое явление, наличие упругих крутильных колебаний валов, приводящих к усталостным разрушениям. Потребовалось создание методов инженерного расчета, базирующихся на математических законах;

-исследование крутильных колебаний, которые могли бы дать оценку вынужденных и резонансных амплитуд и возникающих в валопроводах напряжений.

Исследование периодических возмущающих моментов не вызывают сегодня затруднений. Они могут быть определены прямым разложением в ряд Фурье расчетной диаграммой суммарного крутящего момента (тангенциальной силы) и изложены в учебно-методической литературе [1,3,5,7,8,11,14].

Демпфирующие сопротивления, не смотря на большой объем исследований, не имеют надежной методики. К этим сопротивлениям относятся сопротивления в подшипниках, трение в цилиндропоршневой группе и КШМ, в при водах узлов и систем ДВС. Кроме этих внешних трений сопротивления существуют внутренние. К ним относятся микроструктурное трение в материале валопровода, трение в упругих муфтах, различных демпфирующих устройствах. Проблемам демпфирования в ДВС посвящены работы Лурье И.А., Ф.Ф. Болотина, Г.И. Бухариной, В.П. Терских, В.К. Житомирского, П.А. Истомина и др.[4,6,7,8,9,12,14]

Действительная картина усложняется наличием нелинейных колебательных процессов. Однако сложность расчета с учетом нелинейности при практической реализации не оправдывает ее применение и достаточным является использовать алгоритмы расчета для линейных систем[7,9].

Современные силовые установки имеют много форм колебаний, частоты которых, соизмеримы

с рабочими частотами достаточно ощутимых гармоник возмущающих моментов. Имеются исследования [7], которые показывают, что при массивном маховике одноузловая форма обычно мало зависит от присоединенной к ней системы с достаточно податливым валопроводом. Исследования показывают, что это происходит когда момент инерции маховика составляет более 10 единиц КШМ, а податливость валопровода более 10 единиц коленчатого вала. Поэтому ответственность за развитие этой формы у четырехтактных дизелей (у малооборотных двухтактных дизелей практически нет) должны нести создатели силовой установки. На этом основании средние и высокооборотные двигатели оснащаются гасителями колебаний этой формы на носке коленчатого вала в месте максимальных амплитуд колебаний.

Такие предварительные расчеты могут быть оценочными и недостаточными, поэтому первую форму (моторную форму) не следует использовать для оценки резонансных амплитуд.

Расчетные и экспериментальные исследования крутильных колебаний необходимо сравнивать с допускаемыми критериями. В машиностроении это допускаемые напряжения для материалов, из которых они изготовлены; для других классификационных обществ, например, судовым регистром (РС), регламентируются их правилами.

Вместе с теорией и расчетными методами развивались и экспериментальные методы оценки крутильных колебаний. Применяют методы торсиографирования и тензометрирования. Торсиографированием измеряют амплитуды колебаний сечений валопровода, а тензометрированием - амплитуды скручивания участков вала. Измерения проводятся в диапазоне частот от 2 Гц до 1 кГц, амплитуды крутильных колебаний первой массы фиксируются в диапазоне 0,0005 - 0,02 рад., амплитуды скручивания валов соответствуют напряжениям от 5 до 100 МПа. Современная измерительная техника использует бесконтактный принцип передачи сигнала от датчика, установленного на вращающемся валу к регистрирующему блоку.

Организационные положения проведения экспериментальных работ определены в национальном стандарте ГОСТ Р ИСО 3046-5-2004 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 5. Крутильные колебания» [7].

Вопросы исследования крутильных колебаний для судовых двигателей отражены в требованиях Российского морского регистра судоходства (РС), который входит в состав Международной Ассоциации Классификационных обществ (МАКО). Требования РС по исследованию крутильных колебаний силовых установок (СУ) должны выполняться при проектировании или модернизации судов, а так же в порядке контроля за техническим состоянием элементов СУ.

Крутильные колебания рассчитывают организации, которые имеют доверенность РС. Экспериментальные работы проводят лаборатории признанные РС. В России головной организацией является ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова.

Для поддержания судов в нормальном техническом состоянии, соответствующему классу РС, нормативные документы РС предусматривают систему периодического освидетельствования судов (ежегодных и очередных с периодичностью 5 лет), которые выполняются под наблюдением филиалов.

Основные требования по крутильным колебаниям заложены в следующих разделах РС:

- расчеты и измерения крутильных колебаний валопроводов судовых энергетических установок и агрегатов (глава 6.6. из 5 части «Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов» НД №2 -020101-040, 2004 г.);

- инструкция по оформлению материалов по крутильным колебаниям валопроводов судовых энергетических установок и агрегатов (Приложение к главе 6.6, из 5 части «Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов» НД №2-020101-040, 2004 г.;

-методика диагностирования и определения остаточного ресурса силиконовых демпферов судовых ДВС (Приложение 47 из руководства по техническому наблюдению за судами в эксплуатации, НД №2-030101-009).

Программы расчетов на ЭВМ должны быть одобрены РС. В расчетах должны содержаться следующие сведения:

1. В водной части должны быть приведены основания для выполнения расчета (разработка технического проекта, модернизация энергетической установки, замена гребного винта, коленвала и т.п.) Указывается методика расчета.
2. Дается краткая характеристика судна и его энергетической установки.
3. Приводится кинематическая схема с выполнением позиций их расшифровка, а так же эскиз валопровода, расчетная крутильная схема.
4. Приводятся сведения о параметрах двигателя внутреннего сгорания и режимах его работы (n_n , $I_{ц}$, $D_{ц}$, S , развал цилиндров, прядок вспышек, угол заклинки кривошипов, ε , и др. характеристики).
5. Описание конструкции демпфера, его паспортные данные, включая назначенный ресурс (до первой проверки демпфера)
6. Расчет должен содержать результаты определения всех частот и форм свободных колебаний, имеющих резонансы до 12 порядка в диапазоне частот вращения включительно от минимальной частоты до $1,2 n_n$.
7. Для каждой рассматриваемой формы колебаний должны быть определена частота свободных колебаний, относительные амплитуды колебаний масс, амплитуды эластичных (переменных) моментов в соединениях, масштабы напряжений (моментов) всех участков системы; суммы произведений моментов инерции масс на квадрат их относительных амплитуд.
8. Для каждого из порядков (гармоник) возмущающих моментов всех рассчитываемых форм колебаний должны быть приведены резонансные частоты вращения, значения амплитуд колебаний первой массы двигателя и напряжений (моментов) во всех элементах системы и их сопоставления с соответствующими допускаемыми значениями.
9. По результатам расчетов должны быть представлены графики напряжений.
10. В заключении расчета даются выводы об отсутствии запретной зоны в рабочем диапазоне частот или о необходимости назначения зоны. В необходимых случаях следует дать рекомендации по изменению силовой установки.

Вышеперечисленные требования РС разработаны на основании многочисленных работ российских ученых и инженеров. Они изложены в монографиях, статьях, патентах, учебниках и учебных пособиях. Значительный вклад в изучение крутильных колебаний силовых установок наземных транспортных средств внесли Истомин П.А., Доброгаев Р.П., Маслов Г.С., Попык Н.Г., Чистяков В.К., Гоц А.Н., Ефремов Л.В., Никишин В.Н. и др. На трудах этих ученых воспитано множество специалистов по двигателям внутреннего сгорания.

Расчеты крутильных колебаний требует применения программного обеспечения, разработки алгоритмов и применения вычислительной техники. Они проводились с самых первых алгоритмических языков Бейсик, Паскаль, Фортран. Сегодня наиболее доступным математическим редактором для инженерных расчетов являются электронные таблицы EXCEL. Из редакторов высшего уровня, наиболее мощным можно считать MAPLE и MATHEMATICA. Ядро системы MAPLE составляет системы MATHCAD и MATLAB.

Проведенный анализ информационных источников показывает на значительное количество теоретических и экспериментальных работ. Многие из них используются в учебном процессе в вузах при выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работах в бакалавриате и магистратуре, связанных с проектированием и эксплуатацией двигателей внутреннего сгорания.

Обзор информационных баз позволяет выбрать направление работы по аналитическому исследованию факторов, изменяющих характеристики крутильных колебаний во время эксплуатации для выполнения магистерской диссертации.

Список литературы:

1. Гоц А.Н. Гармонический анализ крутящего момента двигателя с помощью ЭВМ / А.Н. Гоц, В.Н. Брындин, К.В. Валиков // Повышение эксплуатационной надежности и качества ремонта автомобилей. – Иваново-Владимир: ИЭИ, 1974. – С. 24 – 28.
2. Гоц А.Н. Методика расчета крутильных систем двигателей внутреннего сгорания на стадии проектирования / А.Н. Гоц // Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф; под ред. В.В. Эфроса, А.Н. Гоца. Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2001. – С. 101 –104. – ISBN 5-89368-233-5.
3. Гоц А.Н. Методика и алгоритм расчета набегającego крутящего момента ДВС / А.Н. Гоц, А.Н. Красулин, К.В. Валиков // Двигателестроение. – 1983. – №1. – С. 29 – 30.
4. Гоц А.Н. Ускоренный метод оценки долговечности жидкостных демпферов крутильных колебаний / А.Н. Гоц // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1998. – № 6. – С. 11 – 12. – ISSN 0235-8573.
5. Гоц А.Н. Крутильные колебания коленчатых валов автомобильных и тракторных двигателей. Учебное пособие/ А.Н. гоц, 2-е изд. - Москва,: Форум НИЦ ИНФРА, 2020., -208 с.
6. Гоц А.Н. Оптимизация параметров жидкостного демпфера крутильных колебаний коленчатого вала автомобильного дизеля ГАЗ / А.Н. Гоц, В.Ф. Дрозденко, А.Н. Красулин, П.В. Сорокин // Совершенствование конструктивных и комбайновых двигателей: сб. науч. тр. ЦНИТА, 1989. – С. 79 – 87.
7. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. Санкт-Петербург “Наука” 2007.
8. Истомин П.А. Кинематика и динамика поршневых ДВС. Судпромгиз, 1961.
9. Маслов Г.С. Расчеты колебаний валов. Справочник. М.: Машиностроение, 1980.-152 с.
10. Никишин В.Н. Угловые колебания коленчатого вала и характеристики дизеля // Автомобильная промышленность. – 2007.
11. Попык Н.Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высшая школа, 1970,-340с.
12. Паровай Ф.В., Д.С. Лёжин, В.П. Ржевский, В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев Исследование крутильных колебаний валов. Электронное учебное пособие САМАРА 2011.
13. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер: пер. с англ. Л.Г. Корнейчука; под ред. Э.И. Григолюка. – М.: Машиностроение. – 1985. – 472 с.
14. Чистяков В.К. Динамика поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1989. -257 с.