

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ПРИВОДНОЙ ЦЕПИ МАЛОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

А.Н. Соболенко, д.т.н., проф.; Ю.А. Корнейчук, асп.
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Приводится анализ причин возникновения кинематической погрешности цепного привода механизма газораспределения малооборотного судового дизеля.

Показана возможность использования кинематической погрешности цепной передачи для диагностики неисправностей в работе привода.

Приведены результаты экспериментальных исследований на дизельных двигателях, оснащенных сдвоенной цепью привода распределительных валов.

Для мощных судовых малооборотных дизелей (МОД) характерно применение цепного привода распределительного вала несмотря на появление двигателей с электронным управлением работой топливopодачи и газораспределителя. [1].

В эксплуатации находится огромное количество таких двигателей, ресурс которых далеко не исчерпан. Форсированные компактные МОД серии МС-С фирмы MAN B&W, имеющие цепной привод распределительного вала, являются весьма популярными на рынке судовых МОД.

Вытяжка цепей привода распределительного вала в результате изнашивания шарниров является причиной кинематической погрешности привода распределительных валов. Масса главной приводной цепи мощного судового дизеля достигает двух тонн. Обрыв цепи при работе дизеля может вызвать разрушение цепного отсека, стать причиной пожара в машинном отделении в дополнение к угрозе общей безопасности судна из-за остановки главного двигателя. Ключевое место в обеспечении безотказной работы цепного привода распределительного вала занимает качество приработки цепи.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований износа и вытяжки цепей дизельных двигателей, оснащенных сдвоенной цепью привода распределительных валов. Схема цепного привода приведена на рис. 1. Устройство включает в себя шестерни коленчатого, топливо- и газораспределительного валов и четыре направляющие шестерни.

При проведении исследований были выполнены измерения износа и удлинение в процессе

приработки цепей фирм-изготовителей «Renold» (Великобритания) и «Tsubaki» (Япония). Цепь фирмы «Tsubaki», согласно сертификату, длиннее цепи фирмы «Renold» на 11 мм. Такая разность длин определена конструктивными особенностями цепей — шаг внутреннего звена цепи фирмы «Tsubaki» больше шага наружного звена на 0,11 мм.

Для измерения кинематической погрешности цепного привода использовался специально разработанный прибор [2] (рис. 2), предназначенный для измерения контактных шагов наружных t_{2i-1} и внутренних t_{2i} звеньев для $i = 1, 2, 3, \dots, n$ по схеме, указанной на рис. 3.

Результаты измерений характерных размеров новой японской цепи, растянутой в цехе усилием, рекомендованным фирмой-изготовителем для измерения, совпали с данными сертификата,

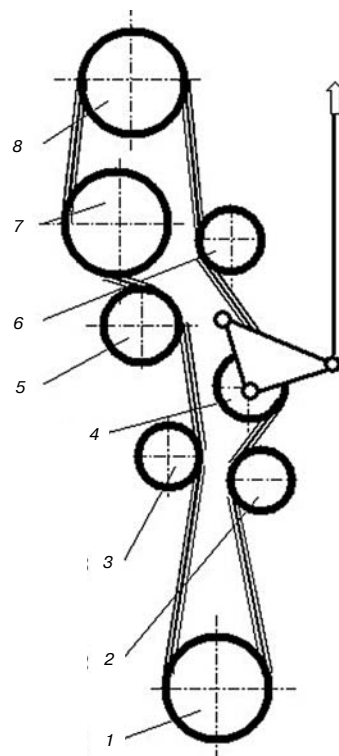


Рис. 1. Схема цепного привода распределительных валов дизеля MAN B&W 562VTBF140:

1 — шестерня коленчатого вала $z = 38$ зубьев; 2, 3, 5, 6 — шестерни направляющие $z = 26$; 4 — шестерня натяжного устройства $z = 26$; 7 — шестерня распределителя ГНВД $z = 38$; 8 — шестерня распределителя привода клапанов $z = 38$



Рис. 2. Прибор для измерения удлинения и длины втулочно-роликовых цепей

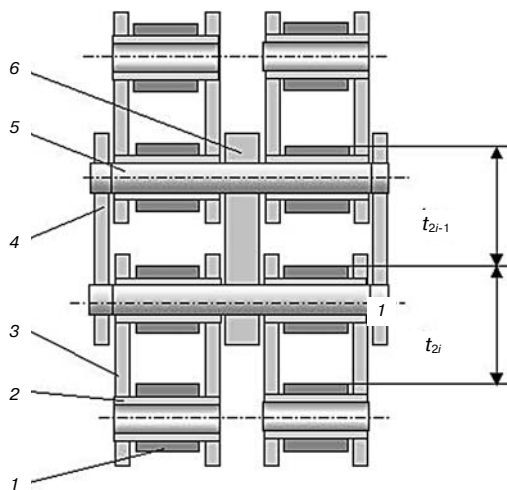


Рис. 3. Конструкция сдвоенной втулочно-роликовой цепи:

1 — ролик; 2 — втулка; 3 — пластина внутреннего звена; 4 — боковая пластина наружного звена; 5 — валик; 6 — центральная пластина наружного звена

что подтверждает корректность измерений, выполненных предложенным прибором.

На рис. 3 приведена конструкция сдвоенной втулочно-роликовой цепи. Наружное звено состоит из двух валиков и трех соединительных пластин, а внутреннее звено — из двух втулок, двух роликов и двух соединительных пластин. В результате изнашивания шарниров увеличиваются шаги (расстояние между роликами) только наружных звеньев, что ведет к удлинению цепи. Нарушение прессового соединения втулок 2 в пластинах 3 (см. рис. 3) приводит к интенсивному росту шага внутреннего звена и аварийному изнашиванию проушин.

Вопросы диагностики износа цепей МОД по кинематической погрешности привода распределительных валов были рассмотрены в статье [3]. В качестве оценки кинематической погрешности цепной передачи используется запись деформации пружины натяжного устройства при проворачивании коленчатого вала дизеля валоповоротным устройством. Такая система диагностирования цепного привода в сборе хороша

тем, что охватывает всю совокупность погрешностей его деталей (цепей, шестерен, натяжного устройства), но не обладает достаточной достоверностью и глубиной диагностирования. Поэтому ее следует использовать в сочетании с подсистемой диагностики цепи по ее кинематической погрешности (изменение длины ведущего участка цепи) и другими технологиями, например измерением радиального биения изношенных звеньев в зацеплении с шестерней [4].

Для оценивания кинематической погрешности цепи (при проворачивании двигателя валоповоротным устройством) необходимо измерить контактные шаги (см. рис. 2) всех звеньев в виде их отклонений от номинального шага: Δ_{2i-1} — нечетные отклонения для наружных звеньев и Δ_{2i} — четные отклонения для внутренних звеньев, $i = 1, 2, 3, \dots, n$. По результатам измерений вычисляются разности шагов смежных звеньев $h_i = \Delta_{2i-1} - \Delta_{2i}$, которые называют разноразмерностями. Сумма h_i на ведущем участке цепи представляет собой отклонение длины участка от номинального значения (кинематическую погрешность цепи (КПЦ)). Просчитывая эту сумму после каждого поворота коленчатого вала на два звена, получим значения для построения диаграммы изменения КПЦ (рис. 4), которая описывает изменение длины ведущего участка цепи, состоящего из 64 звеньев, по мере ее полного проворачивания. Она характеризует вытяжку и равномерность изнашивания цепи по длине. В случае неравномерного изнашивания возникают проблемы натяжения цепи. Наличие дефектных звеньев с увеличенным шагом ведет

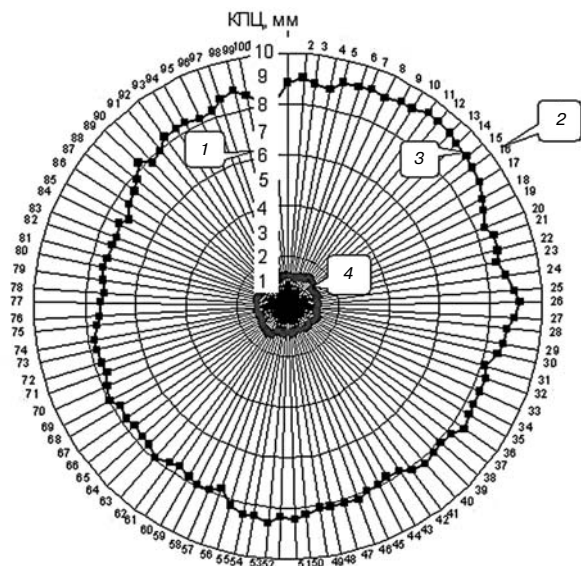


Рис. 4. Изменение кинематической погрешности носовой части сдвоенной цепи:

1 — шкала КПЦ; 2 — номер измерения; 3 — цепь фирмы «Renold» при наработке 44 000 ч; 4 — цепь фирмы «Tsubaki» при наработке 10 450 ч

к скачкообразному ее изменению и росту динамической нагрузки на цепь. Диаграмма строится по схеме окна, скользящего вдоль цепи. В электронных таблицах вычисляется отклонение длины участка цепи в окне от ее номинального значения. Через каждые два звена производится отсчет. Полученные значения откладываются на графике в виде круговой лепестковой диаграммы. Теоретически минимальной кинематической погрешности цепи соответствует центр диаграммы, а периферия диаграммы — максимальной погрешности. Если диаграмма представлена концентрическими окружностями, то изнашивание наружных звеньев цепи равномерное и обеспечивается нормальное зацепление — шаг цепи больше шага шестерни.

С ростом КПЦ контакт ролика цепи с зубом шестерни смещается вверх по прямому профилю зуба. Плавные кривые КПЦ в виде эллипса свидетельствуют о неравномерном изнашивании цепи по длине, что необходимо учитывать при ее натяжении. Ступенчатое изменение кривой в радиальном направлении величиной 1 мм и более служит признаком дефектных распрессованных звеньев.

Точность прибора (см. рис. 2) определяется погрешностью механического индикатора часового типа и составляет 0,01 мм.

Точность оценивания среднего износа зависит от дисперсии отклонений разноразмерностей звеньев

$$\sigma^2(h) = \sigma^2(\Delta_{2i-1}) + \sigma^2(\Delta_{2i}), \quad (1)$$

где $\sigma^2(h)$ — дисперсия разноразмерности; $\sigma^2(\Delta_{2i-1}) = \sigma_{\text{н}}^2(\Delta) + \sigma_{\text{пр}}^2$ и $\sigma^2(\Delta_{2i}) = \sigma_{\text{вн}}^2(\Delta) + \sigma_{\text{пр}}^2$ — дисперсии отклонений от номинала соответственно наружных и внутренних звеньев с учетом случайных ошибок прибора.

Стандартное отклонение выборочной совокупности разноразмерностей h_i

$$s(h) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

где \bar{h} — среднее значение разноразмерности.

Качество приработки цепи предлагается оценивать по изменению среднего значения \bar{h} и стандартного отклонения $s(h)$ разноразмерности. Рассмотрим изменение стандартного отклонения $s(h)$ в серии измерений для новой цепи фирмы «Tsubaki».

Обычно измерения производятся разными людьми и разными приборами. На шаг звена влияет разностенность роликов. Иногда результаты измерений сопоставимы с уровнем погрешностей средств измерения. Поэтому достоверностью измерений в силу их случайного характера необ-

ходимо управлять путем использования методов математической статистики. Использование процедур математической статистики позволяет исключить из анализа недостоверные наблюдения и сформировать информативные показатели диагностики даже в невыгодных условиях измерений. Например, использование разноразмерности шагов в качестве показателя изнашивания шарниров цепи исключает систематическую ошибку измерений. КПЦ как сумма разноразмерностей менее чувствительна к случайным ошибкам в силу действия закона больших чисел.

Данные рис. 5 показывают, что некоторые результаты измерений можно считать недостоверными. Когда одна из выборочных дисперсий (s_{max}^2) значительно больше остальных, для оценки возможности ее отсева применяют критерий Кокрена [5]

$$\hat{G}_{\text{max}} = \frac{s_{\text{max}}^2}{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_k^2}. \quad (3)$$

Если \hat{G}_{max} больше табличного значения [5] для заданных k , $v = n - 1$ и выбранного уровня значимости, где n — объем отдельной выборки, то нуль-гипотеза о равенстве дисперсий отвергается и принимается альтернативная гипотеза: $\sigma_{\text{max}}^2 \neq \sigma^2$.

В качестве примера проверим достоверность нескольких дисперсий выборок равного объема по критерию Кокрена. В результате измерений и последующих вычислений имеем 18 дисперсий: 1858, 4073, 1140, 1008, 1119, 1323, 719, 910, 719, 1204, 1084, 1252, 1281, 1193, 1656, 653, 1053, 1244, для которых определим критерий Кокрена

$$\hat{G}_{\text{max}} = \frac{4073}{1858 + 1140 + 1008 + 4073 + \dots + 1244} = 0,1734.$$

Для $\alpha = 0,05$, $k = 5$, $v = 100$ табличное значение отсутствует. Принимаем ближайшее табличное значение (0,1144) для $\alpha = 0,05$, $k = 15$, $v = 36$. Так как $\hat{G}_{\text{max}} = 0,1734 > 0,1144$, то дисперсию этого наблюдения следует признать

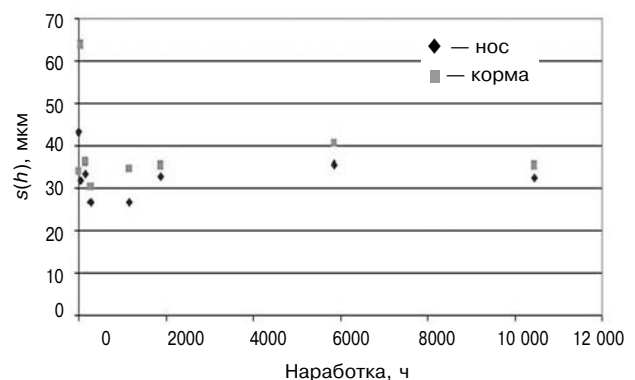


Рис. 5. Погрешность измерения разноразмерности цепи

выпадающей из ряда остальных. Следовательно, это наблюдение следует исключить из дальнейшего анализа в силу значительной погрешности измерений.

Особенность конструкции сдвоенной цепи (см. рис. 3) позволяет производить парные измерения контактных шагов для носовой и кормовой части. Такая избыточность информации повышает ее достоверность, в результате чего снижается возможность грубой ошибки при измерениях. В случае пространственных искажений контура цепи это обстоятельство поможет подтвердить его наличие по значительному расхождению парных измерений.

После аварийного обрыва цепи фирмы «Renold», связанного с разрушением деталей движения цилиндра, смежного с цепным отсеком, ее заменили цепью фирмы «Tsubaki» из 202 звеньев шагом 76,2 мм. Перед установкой на двигатель цепь растянули в цехе завода нагрузкой 78 кН и измерили ее серповидность относительно натянутой параллельно струны.

В идеальной сдвоенной цепи кривые КПЦ носового и кормового участков должны совпадать. В реальной ситуации этого не происходит в силу погрешности измерений, некорректного центрирования или технологических ошибок изготовления цепи. Серповидность новой цепи фирмы «Tsubaki», выявленная измерениями, выполненными на судоремонтном заводе (рис. 6), подтвердилась данными вычислений КПЦ. Длина ведущего участка цепи различна для носового и кормового рядов наблюдений.

Для анализа качества приработки и интенсивности изнашивания новой цепи фирмы «Tsubaki» были проведены сравнительные наблюдения с процессами изнашивания цепей фирмы «Renold» на однотипных двигателях.

На рис. 7 представлены результаты измерений изнашивания цепей фирмы «Renold» и фирмы «Tsubaki». Как видим, период приработки занял не более 50 ч для цепи фирмы «Tsubaki» и 5000 ч для цепи фирмы «Renold». Для построения кри-

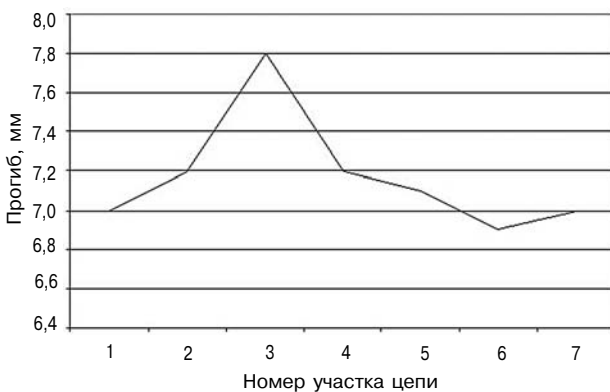


Рис. 6. Серповидность цепи фирмы «Tsubaki»

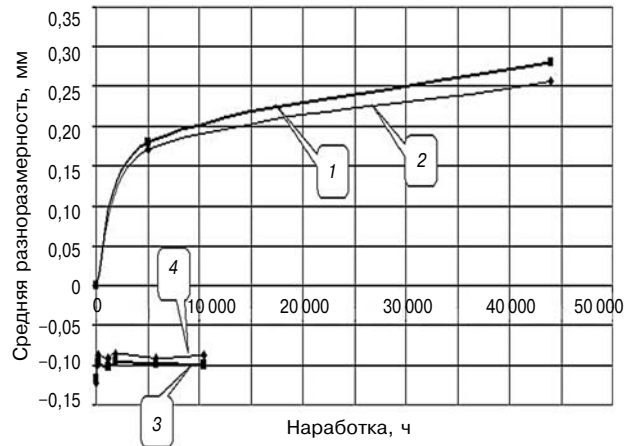


Рис. 7. Изнашивание шарниров:

1 — цепь фирмы «Renold» (нос); 2 — цепь фирмы «Renold» (корма); 3 — цепь фирмы «Tsubaki» (нос); 4 — цепь фирмы «Tsubaki» (корма)

вой изнашивания цепи «Renold» использовались как данные измерений, так и результаты расчета по уравнению регрессии, полученному ранее для двигателей этой серии

$$\bar{h} = 0,176 + 1,4957 \cdot 10^{-6} T, \text{ мм.}$$

Средняя скорость удлинения сдвоенной цепи «Renold» в результате установившегося изнашивания шарниров составляет $1,5 \cdot 10^{-3}$ мкм/ч.

Расхождение средних значений нос–корма не превышает 0,02 мм. Объяснить это расхождение погрешностями измерения не удастся. Кроме первого измерения кормовая часть цепи оказывалась стабильно длиннее. Но так как цепь одна, то расхождение можно объяснить результатами некорректного центрирования привода.

Выводы

1. Ускоренная приработка цепи фирмы «Tsubaki» за первые 50 ч работы вызвана как конструктивными особенностями цепи, так и примененными технологическими мероприятиями — предварительной вытяжкой цепи под нагрузкой, прокручиванием цепи в смазочном масле с присадкой дисульфида молибдена. Рекомендуется производить перезатяжку такой цепи с учетом интенсивности ее изнашивания через первые 50 ч наработки.

2. Подсистема контроля КПЦ является одним из основных компонентов системы диагностирования цепного привода и позволяет локализовать дефекты как на уровне одного звена, так и заданного набора звеньев. Контроль КПЦ повышает эффективность диагностирования цепного привода в целом.

3. Достоверность выполненных оценок обеспечена контролем погрешности измерений и исключением некорректных наблюдений. Схема измерения разноразмерностей h_i практически исключает систематические ошибки. КПЦ как

сумма h_i ведущего участка цепи снижает влияние случайных ошибок на основе действия больших чисел.

4. Появление дефектных звеньев сказывается на перераспределении нагрузки между остальными звеньями цепи и приводит к неравномерному изнашиванию шарниров, оцениваемому колебаниями размеров на диаграмме

КПЦ. Замену дефектных звеньев и натяжение цепи желательно производить с учетом неравномерности КПЦ, так как замена звена не всегда решает проблему восстановления плавности работы привода. Продольные и поперечные колебания цепи в значительной степени определены неравномерностью КПЦ.

Литература

1. Коробков Ю.П., Кайков Л.В. 40-летие судового дизелестроения на ОАО «Брянский машиностроительный завод» // Двигателестроение. — 2001. — № 4. — С. 3–6.

2. А. с. 530164 СССР, МКИЗ G01B 5/02. Прибор для определения удлинения и длины втулочно-роликовых цепей / Ю.А. Корнейчук, В.С. Попов (СССР). № 2130326/28; Заявлено 29.04.75; Опубл. 30.08.76, Бюл. № 36. — 2 с.

3. Корнейчук Ю.А. Износ деталей дизелей БДКРН 45/120-7 // Морской инженерный сервис. — Л. : Транспорт. — 1991. — № 2. — С. 42–48.

4. Ляховецкий З.А., Александров А.А., Соломко В.А. Дефектация втулочно-роликовой цепи привода распределительного вала дизеля по положению роликов на зубьях звездочки // Двигателестроение. — 1984. — № 7. — С. 46–47.

5. Закс Л. Статистическое оценивание. — М. : Статистика, 1976. — 598 с.

ЮБИЛЕЙ!

*Виктору
Васильевичу
Лашманову
70 лет*



*22 октября 2008 года исполнилось 70 лет
главному конструктору по моторостроению
«Уральского дизель-моторного завода»
Виктору Васильевичу Лашманову*

*Коллектив УДМЗ и редакция журнала «Двигателестроение»
поздравляют юбиляра и желают ему здоровья
и творческого долголетия*