

УДК 621.43

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИЗЕЛЬНЫХ ФОРСУНОК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Н. В. ГРУНТОВИЧ

*ООО «Центр научно-прикладных проблем энергетики»,
г. Гомель, Республика Беларусь*

Д. В. КИРДИЩЕВ

*Брянский государственный аграрный университет,
Российская Федерация*

В. Б. ПОПОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Ключевые слова: вибродиагностика, диагностическая модель, распознавание, износ форсунки.

Введение

В Республике Беларусь за последние 5 лет машинно-тракторный парк сельскохозяйственных предприятий сократился на 30–45 %. Кроме того, около 80 % техники эксплуатируется сверх срока. Удельный расход топлива повысился на 10–15 % по сравнению с нормативным. Затраты на эксплуатацию составляют 35–45 % от себестоимости продукции, тогда как в 90-е гг. они были на уровне 20–30 %. Ежегодно требуется обновлять не менее 10 % тракторов, 12 % уборочной техники, 10 % других агрегатов и механизмов [1]. Сложная ситуация и на сельскохозяйственных предприятиях России [2]. Уровень механизации сельского хозяйства в России ниже, чем в других странах. Если в России на 100 га посевных площадей в 2011 г. мощность тракторных двигателей составила 56 л. с., то в Великобритании – 148; США – 156; Франции – 273; Германии – 397 л. с. Количество зерноуборочных комбайнов на 1000 га посевов за тот же год составило: Россия – 3; Великобритания – 14; США – 15; Франция – 16; Германия – 25 единиц, при этом парк сельскохозяйственной техники в России изношен на 70 %.

Возрастной состав тракторов может быть представлен: эксплуатация до 3 лет – 8 %; от 3–10 лет – 19 %; свыше 10 лет – 73 %; зерноуборочных комбайнов, соответственно – 13; 28; 59 %.

Происходит ежедневное сокращение парка тракторов в среднем на 7 %, зерноуборочных комбайнов – на 8 %. Ежегодные расходы на запасные части и ремонт оцениваются в 25 млрд р. (в ценах 2011 г.).

Последние 10 лет учеными России уделяется большое внимание экономическому росту и модернизации производства в сельском хозяйстве [2]. Рассматривая экономические показатели, автор отмечает, что энергоёмкость в России превышает энергоёмкость в Японии в 3,5 раза, а в Германии – в 3 раза. Совокупные энергетиче-

ские затраты на производство 1 т условной зерновой единицы в России в сравнение с США выше более чем в пять раз.

К 2000 г. темпы роста цен от продажи сельскохозяйственной продукции в 7,5 раза отставали от темпов роста цен на приобретаемые товары и услуги. В 2012 г. при покупке одного трактора сельскохозяйственные организации отдали почти в три раза больше зерна, чем в 2000 г. За один центнер минеральных удобрений – больше в 6,7 раза. Все это значительно усложнило проблему модернизации техники в сельскохозяйственных организациях.

При этом следует отметить, что оптимальный срок службы трактора составляет 6–7 лет, после чего затраты на его эксплуатацию резко увеличиваются (требуется больше запчастей, увеличивается расход горючего, может снижаться сезонная выработка).

По этой причине весьма актуальным является решение задач повышения долговечности и безотказности сельскохозяйственной техники на основе компьютерных технологий и технической диагностики.

Анализируя состояние эксплуатации техники в предприятиях аграрного производства, видно, что тракторы и сельскохозяйственные машины в хозяйствах эксплуатируются на несоответствующем уровне, что приводит к снижению эффективности их эксплуатации. В таблице приведена статистика по снижению экономичности дизелей сельскохозяйственной техники в результате износа топливной аппаратуры (ТА) [1].

Целью данного исследования является разработка виброакустической диагностической модели, позволяющей без демонтажа выявить дефекты форсунок дизелей на ранней стадии их возникновения.

Влияние неисправностей двигателя на потери топлива

Виды неисправности	Снижение показателей	Потери топлива, кг/год		
		«Беларус» 800/820	«Беларус» 1221»	«Беларус» 2522»
Неисправность одной форсунки	топлива – 15–20 %	2000	3300	6100
Уменьшение угла опережения впрыска топлива	5 %/град	700	900	1700
Износ плунжерных пар топливного насоса	15–20 %	2000	3300	6100

Постановка задачи исследования

В тракторных и комбайновых дизелях применяются закрытые форсунки с многодырчатыми распылителями различного конструктивного исполнения [2] (рис. 1).

Запорная игла прижимается к седлу распылителя через штангу 2 пружиной 9. Верхний конец пружины опирается на регулировочный винт 4, который свернут в стакан пружины, и удерживается в заданном положении контргайкой 10. На стакан сверху наверх колпак 5, служащий для отвода топлива из внутренней полости форсунки и ограничивающий доступ к регулировочному винту. Винтом 6 устанавливают натяг пружины 9, определяющий давление впрыска. Топливо к форсунке подводится через штуцер 3, который свернут в резьбовое отверстие корпуса форсунки.

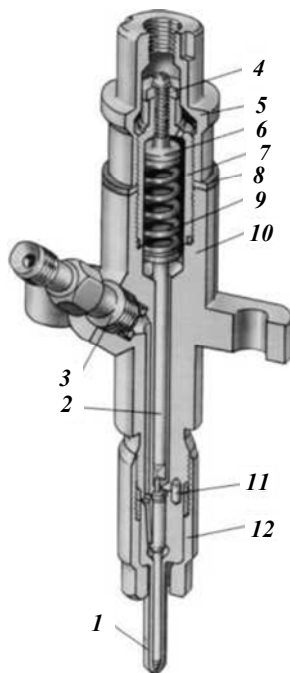


Рис. 1. Устройство форсунки: 1 – распылитель; 2 – штанга; 3 – штуцер подвода топлива; 4 – контргайка; 5 – колпак форсунки; 6 – регулировочный винт; 7 – гайка пружины; 8 – прокладка; 9 – пружина; 10 – корпус форсунки; 11 – штифты; 12 – гайка распылителя

Топливо в кольцевую камеру подается по наклонному каналу. Когда нет подачи топлива насосом, давление в камере составляет 2,4 МПа. Оно давит на дифференциальную площадку иглы, но его сила меньше силы пружины 9, которая перекрывает распыливающие отверстия.

При поступлении топлива от насоса в форсунку (рис. 2, импульс «а») сила давления топлива на дифференциальную площадку и углы становится больше усилий пружины 9, игла поднимается, ударяясь о корпус форсунки (рис. 2, импульс «b»). Через образовавшуюся кольцевую щель и распыливающее отверстие (рис. 2, импульс «с») топливо поступает в камеру сгорания.

Подъем иглы ограничен упором ее торца в корпус форсунки и составляет 0,2–0,28 мм. После прекращения подачи топлива насосом давление в кольцевой камере резко снижается и под действием пружины 9 игла прижмется запорным конусом к седлу распылителя (рис. 2, импульс «d»), перекрывая распыливающие отверстия. Топливо, просачивающееся через зазор между иглой и распылителем, отводится через отверстие в колпаке 5 и сливной штуцер в топливный бак или фильтр тонкой очистки.

Как следует из рис. 2, износ пружин в форсунках 2 и 4 одного и того же дизеля – разный (импульс «b» и «d») и уровень закоксованности иглы тоже разный (импульс «d»). Это приводит к разной подаче топлива в камеру сгорания. Разность амплитуд вибрации в диапазоне частот 440–480 Гц составляет около 25 Дб. В метрической системе измерений эта разность будет отличаться в 16 раз. Чем больше подача топлива, тем больше шум и вибрация.

Прекращение (отсечка) подачи топлива должно быть резким, без повторного подъема иглы, в противном случае в конце впрыскивания топливо образует у выходных отверстий распылителя капли, которые, сгорая не полностью, вызывают его закоксовывание.

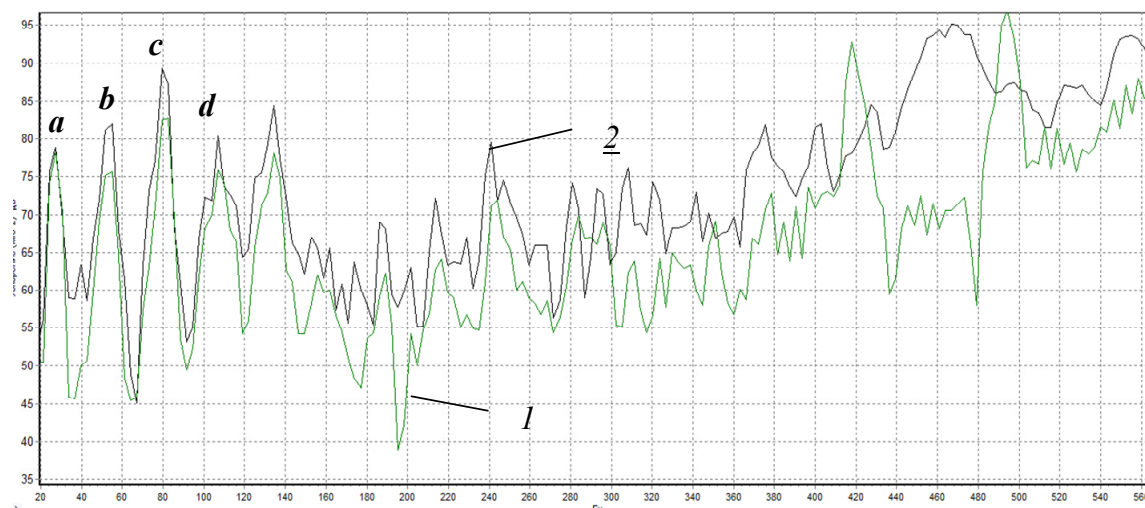


Рис. 2. Спектр вибрации дизельных форсунок Д-240 на 700 об/мин 300 моточасов (светлая кривая 1 – 2 форсунка; темная кривая 2 – 4 форсунка).

Амплитуды вибрации форсунок: *a* – поступление топлива в полость форсунки; *b* – подъем иглы; *c* – впрыск топлива в камеру сгорания; *d* – опускание иглы

Работа дизельных двигателей неразрывно связана с эффектом вибраций, интенсивность и характер которых проявляются разным образом в зависимости от технического состояния оборудования. Получить полную информацию о техническом состоянии без вывода оборудования из рабочего режима, т. е. без демонтажа или без разборки, можно, анализируя вибрации. Периодически проводя такой анализ, можно прогнозировать остаточный рабочий ресурс форсунок задолго до выхода оборудования из строя.

Предлагаемый авторами способ вибродиагностирования исключает необходимость демонтажа форсунок с двигателя.

В состав диагностического комплекса входит:

- вибродатчик ускорения (тип АР-1040, диапазон измерения 5–5000 Гц);
- многофункциональный сборщик данных МСД-2010;
- персональный компьютер с программой обработки данных.

Многофункциональный сборщик данных МСД-2010 предназначен для аналого-цифрового преобразования выходных сигналов датчиков, которые представляют собой электрический заряд, напряжение (ток), временного сохранения полученных данных в буферном ОЗУ и передачи их в ПЭВМ для дальнейшей обработки.

МСД работает под управлением ПЭВМ на напряжении 220 В в сети переменного тока и 9–18 В в сети постоянного тока от аккумулятора с потребляемой мощностью не более 5 Вт.

МСД-2010 может использоваться в составе измерительно-информационной системы при экспериментальных исследованиях или контроле технического состояния различных машин и механизмов, а также промышленного оборудования.

Компьютерная программа позволяет представить результаты измерения в метрической системе, м/с^2 , и в относительных единицах, дБ. Для определения частот вибрации используется преобразование Фурье.

Датчик крепится на магните к форсунке, что исключает негативное воздействие вибрации, создаваемой двигателем при записи результатов.

Достоинством данного способа является низкая стоимость оборудования, простота использования, высокая точность диагностирования, мобильность и автономность оборудования.

Построение диагностической модели

Любая диагностическая модель должна отражать изменение диагностических параметров при изменении технического состояния диагностируемого объекта или, как правило, отдельного узла этого объекта. Следовательно, диагностические параметры должны в меньшей мере изменяться под воздействием различных помех. В данном случае датчик виброускорения (диапазон частот 5–5000 Гц) устанавливается на форсунку работающего дизеля. Все физические процессы, которые происходят в форсунке во время работы, регистрируются вибродатчиком и передаются в компьютер. Было обследовано более 10 дизельных двигателей с разными ресурсами: новые тракторы и тракторы с временем наработки более 8000 ч.

Проведенные исследования показали, что уровень вибрации на частоте 27 Гц (700 об/мин) и 48 Гц (2000 об/мин) характеризует техническое состояние топливного насоса.

Уровень вибрации на частоте 48 Гц (700 об/мин) и 67 Гц (2000 об/мин) зависит от упругости пружины форсунки, при перемещении иглы вверх заплечико иглы ударяет в торец корпуса форсунки.

Величина вибрации форсунки на частоте 88 Гц (700 об/мин), 85, 100 и 115 Гц (2000 об/мин) зависит от технического состояния форсунки, в первую очередь, от закоксованности соплового отверстия распылителя.

Амплитуда вибрации на частотах 85, 100 и 115 Гц на 2000 об/мин характеризует впрыск топлива через сопловые отверстия. Такое впрыскивание называется дробящим [3]. При этом колебательное движение иглы не обязательно должно сопровождаться посадкой ее на конус. Наличие дробящего впрыскивания является показателем подвижности иглы форсунок.

Дробящее впрыскивание возможно при работе дизеля на низких скоростных режимах, однако способность к нему у форсунок изменяется в зависимости от конструктивных и регулировочных параметров, в частности, она снижается у бывших в эксплуатации форсунок в результате изнашивания запирающих конусов и уменьшения разности их углов. Неустойчивые режимы работы наблюдаются также у штифтовых форсунок [4].

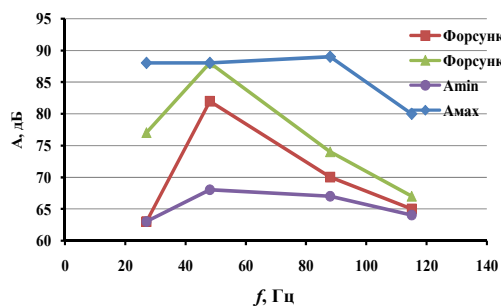
Численное значение вибрации на частоте 119 Гц (700 об/мин) и 131 Гц (2000 об/мин) зависит от упругости пружины, а также от износа посадочного конуса иглы. Эта вибрация возникает при опускании иглы в посадочный конус.

При построении диагностической модели на каждой информативной частоте для различных двигателей определяем максимальное и минимальное значения вибрации. Полученные точки соединяем огибающей. По оси абсцисс откладывается численное значение информативных частот вибрации, без масштаба, а по оси ординат – уровень виброускорения, дБ.

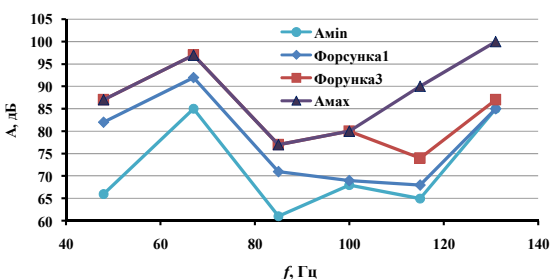
Определение технического состояния форсунок при помощи диагностической модели

Определим техническое состояние форсунок 1 и 3 двигателя с ресурсом 8425 ч при 700 об/мин (рис. 3, а). Если топливный насос создает стандартное давление, то уровень вибрации на частоте 27 Гц будет около 87 дБ. Плунжерная пара топливного насоса форсунки Ф1 работает хуже, по сравнению с форсункой Ф3. Если пружина форсунки изношена, то вибрация на частоте 48 Гц будет максимальной, а на частоте 115 Гц вибрация будет минимальной. В новой форсунке при истечении топлива вибрация на частоте 88 Гц будет максимальной. При закоксованности иглы форсунки вибрация на частоте 88 Гц будет значительно меньше. В данном примере форсунки двигателя с наработкой 8425 ч изношены практически одинаково, но плунжеры

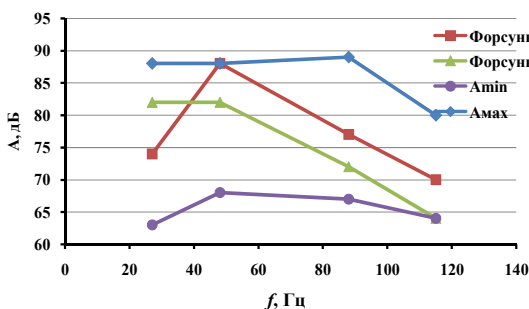
топливного насоса изношены по-разному. При 2000 об/мин диагностические признаки форсунок сохраняются. Изменились диагностические параметры топливного насоса. Очевидно, при повышенных оборотах топливный насос работает лучше (частота 78 Гц). В двигателе с наработкой 300 ч форсунки разрегулированы (рис. 3, д). Топливный насос форсунок 1 и 3 работает в стандартном режиме (рис. 3, е). Несколько хуже работает топливный насос форсунок 2 и 4 (рис. 3, д). Пружины форсунок 1 и 3 находятся в норме, но иглы закоксованы (рис. 3, е). Пружины форсунок 2 и 4 несколько ослаблены, но иглы форсунок находятся в хорошем техническом состоянии (рис. 3, д).



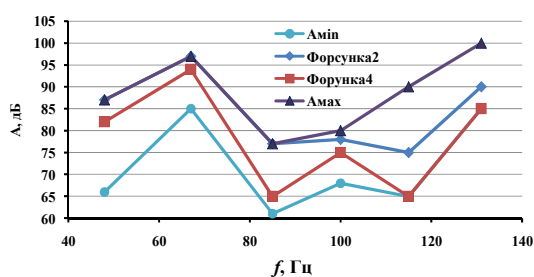
а)



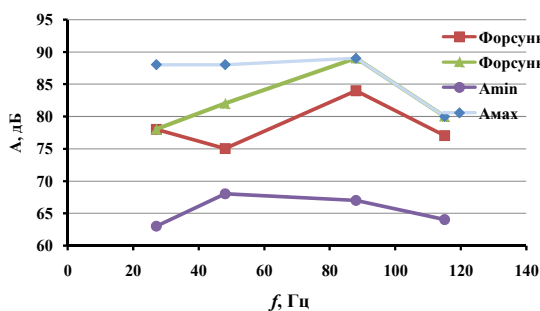
б)



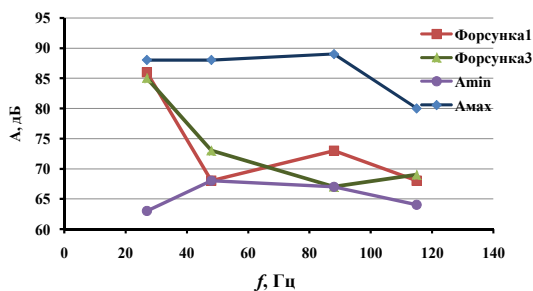
в)



г)



д)



е)

Рис. 3. Диагностические модели исследуемых форсунок дизелей тракторов: а – диагностическая модель форсунок при 700 об/мин, 8425 ч; б – диагностическая модель форсунок при 2000 об/мин, 8425 ч; в – диагностическая модель форсунок при 700 об/мин, 8425 ч; г – диагностическая модель форсунок при 2000 об/мин, 8425 ч; д – диагностическая модель форсунок при 700 об/мин, 300 ч; е – диагностическая модель форсунок при 700 об/мин, 300 ч

Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Виброакустическая диагностическая модель дизельных форсунок позволяет определить степень износа основных деталей форсунок во время работы дизеля.
2. Выявление дефектов форсунок на ранней стадии дает возможность оптимизировать ремонт топливной аппаратуры и экономить дизельное топливо.

Литература

1. Диагностика и техническое обслуживание машин : учебник / А. В. Новиков [и др.] ; под ред. А. В. Новикова – Минск : ИВЦ Минфина, 2013. – 340 с.
2. Панин, А. В. Экономический рост в сельском хозяйстве на основе модернизации производства : монография / А. В. Панин. – М. : Проспект, 2016. – 240 с.
3. Грунтович, Н. В. Техническое диагностирование дизелей сельскохозяйственной техники / Н. В. Грунтович // Проблемы энергообеспечения, информатизации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК : материалы VIII науч.-техн. конф., Брянск, 2014 г. / Брян. с.-х. акад. – Брянск, 2014. – С. 85–88.
4. Габитов, И. И. Топливная аппаратура автотракторных дизелей / И. И. Габитов, А. В. Неговара. – Уфа : Из-во Башкир. ГАУ, 2004. – 216 с.

Получено 13.03.2017 г.