

В. Е. Тарасенко¹, А. А. Жешко²¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: trs9@yandex.by

²РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: azeshko@gmail.com

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ С БОКОВЫМ ПОДВОДОМ ТОПЛИВА

Аннотация. В статье представлены результаты обработки массива данных вибродиагностики топливной форсунки с боковым подводом топлива (АЗПИ) серии 171.1112010-01 при испытании на стенде с дробящим распылением топлива. Выполнено графическое построение преобразованного сигнала виброускорения топливной форсунки с дробящим распылением в пространстве комплексных чисел. Получена графическая интерпретация преобразования Фурье в комплексной плоскости для сигнала виброускорения форсунки на стенде с дробящим распылением с указанием вычисленных фаз колебаний для каждой гармоники спектра.

Ключевые слова: форсунка, система, стенд, сигнал, спектр, анализ, преобразование.

V. E. Tarasenko¹, A. A. Zheshka²¹EI "Belarusian State Agrarian Technical University"

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: trs9@yandex.by

²RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: azeshko@gmail.com

PROCESSING OF VIBRATION DIAGNOSTICS DATA OF A FUEL INJECTOR WITH LATERAL FUEL SUPPLY

Abstract. The results of processing an array of vibration diagnostics data for a side-feed fuel injector (AZPI) of the 171.1112010-01 series during testing on a bench with crushing fuel spray are presented. A graphical construction of the transformed vibration acceleration signal of a fuel injector with a crushing spray in the space of complex numbers has been completed. A graphical interpretation of the Fourier transform in the complex plane for the vibration acceleration signal of a nozzle on a crushing spray stand is obtained, indicating the calculated oscillation phases for each harmonic of the spectrum.

Keywords: nozzle, system, stand, signal, spectrum, analysis, transformation.

Введение

Топливная форсунка самым непосредственным образом влияет на процесс сгорания в дизельном двигателе. С течением времени конструкция и принцип работы форсунок неоднократно менялись, у каждого нового поколения появлялись свои особенности [1]. В зависимости от системы впрыска различают форсунки со штифтовыми распылителями, применяемыми в форкамерных двигателях, и с дырчатыми распылителями, применяемыми в двигателях с непосредственным впрыском топлива (DI – direct injection) [2]. В зависимости от способа управления открытием распылителя различают стандартные форсунки с одной пружиной, форсунки двухпружинные, форсунки с датчиком положения иглы распылителя и форсунки, управляемые электромагнитным клапаном или пьезоэлектрическим элементом. Конструкция корпуса форсунки зависит



Рисунок 1 – Внешний вид форсунки с боковым подводом топлива Алтайского завода прецизионных изделий (АЗПИ) серии 171.1112010-01 [13]

от способа установки ее в головке блока – с помощью фланца, прижимного хомута, прижимной гайки или непосредственно вворачиванием корпуса в отверстие головки блока [2].

Большое значение имеет регулярное диагностирование топливной аппаратуры двигателей: необходимы операции своевременного диагностирования форсунок, которые помогут устранить неисправности [2, 3, 4].

Основная часть

В статье рассмотрены результаты математической обработки массива данных, полученных в результате нагружения топливной форсунки с боковым подводом топлива серии 171.1112010-01 (рисунок 1) и виброконтроля многоканальной системой с гибкой структурой [5–9].

Поскольку количество выборок должно быть кратным степени 2, извлекали из массива исходных данных $2^7 = 128$ выборки (таблица), которые соответствуют частотам виброускорения форсунки на стенде с дробящим распылением топлива при различных частотах.

Проведен анализ Фурье для выделенных из общего массива данных, который получил широкое распространение для анализа сигналов в вибродиагностике [10], а также используется для определения коэффициентов гармоник и построения фильтров [11, 12]. Поскольку в рассматриваемом случае имеются дискретные наблюдения $y_1, y_2, \dots, y_n$, то прямое дискретное преобразование Фурье выполняется в соответствии с формулой

$$Y_k = \sum_{j=0}^n y_j e^{-\frac{2\pi}{n} jk}, \quad (1)$$

где $k = 0, 1, \dots, n - 1$, элемент выборки из $n = 128$ элементов.

Фрагмент данных анализа Фурье спектра вибрации дизельной форсунки с боковым подводом топлива

№ гармоник	Частота, f , ГЦ	Виброускорение, дБ	Преобразование Фурье (комплексное число)	Амплитуда	Фаза, град	Обратное преобразование Фурье (входной сигнал, дБ)
1	19	62,80	41,9 287 366 172 572	0,328	0,000	62,801
2	21	64,08	2,96 331 100 698 442 + 2,07 485 424 911 296 <i>i</i>	0,028	34,999	64,080
3	25	59,89	0,605 393 178 980 156 + 2,21 068 130 763 273 <i>i</i>	0,018	74,685	59,891
4	27	56,63	0,882 000 744 718 849 + 2,53 776 697 384 525 <i>i</i>	0,021	70,835	56,634
5	32	58,26	–2,63 966 507 440 204E-02 + 1,37 104 055 269 785 <i>i</i>	0,011	91,103	58,261
6	40	55,93	0,896 566 360 366 406 + 0,925 740 193 866 188 <i>i</i>	0,010	45,917	55,932
7	44	63,38	–0,269 310 651 922 184 + 1,47 748 373 653 505 <i>i</i>	0,012	100,330	63,376
8	45	72,10	–1,15 339 987 306 793 + 1,03 024 823 110 428 <i>i</i>	0,012	138,228	72,100
9	46	81,29	–0,988 977 327 645 159 + 0,659 225 587 092 387 <i>i</i>	0,009	146,314	81,289

№ гармоник	Частота, f , ГЦ	Виброускорение, дБ	Преобразование Фурье (комплексное число)	Амплитуда	Фаза, град	Обратное преобразование Фурье (входной сигнал, дБ)
10	49	86,76	$-1,76\ 867\ 312\ 936\ 613 + 1,427\ 765\ 248\ 707i$	0,018	141,088	86,756
11	52	85,48	$-0,154\ 119\ 272\ 585\ 887 - 1,01\ 129\ 555\ 744\ 288i$	0,008	-98,665	85,475
12	59	49,06	$1,08\ 006\ 254\ 470\ 532 - 0,617\ 002\ 963\ 381\ 391i$	0,010	-29,738	49,064
13	61	38,36	$0,557\ 471\ 909\ 884\ 652 + 0,149\ 087\ 139\ 124\ 438i$	0,005	14,972	38,362
14	63	43,71	$1,1\ 192\ 873\ 054\ 398 + 0,521\ 303\ 899\ 572\ 282i$	0,010	24,974	43,712
15	64	46,97	$0,770\ 873\ 562\ 054\ 803 + 0,151\ 123\ 745\ 292\ 448i$	0,006	11,092	46,969
16	67	41,27	$0,757\ 015\ 346\ 926\ 661 - 0,98\ 879\ 140\ 286\ 057i$	0,010	-52,562	41,269
17	72	43,83	$1,45\ 247\ 820\ 804\ 822 + 0,145\ 558\ 437\ 791\ 826i$	0,011	5,723	43,826
18	75	49,87	$0,758\ 641\ 462\ 806\ 237 + 1,04938\ 271\ 533\ 701i$	0,010	54,135	49,874
19	82	46,15	$-0,470\ 519\ 445\ 587\ 183 + 0,561\ 161\ 640\ 970\ 673i$	0,006	129,979	46,150
20	89	46,61	$-7,10\ 037\ 338\ 309\ 861E - 02 + 1,1917900\ 013\ 909i$	0,009	93,389	46,614
21	91	43,01	$-0,570\ 431\ 929\ 689\ 138 + 0,332\ 666\ 728\ 403\ 418i$	0,005	149,750	43,007
22	94	47,54	$-0,591\ 522\ 950\ 115\ 043 - 0,102\ 288\ 787\ 037\ 779i$	0,005	-170,189	47,543
23	98	67,78	$-0,341\ 670\ 878\ 560\ 945 + 0,135\ 309\ 936\ 912\ 657i$	0,003	158,395	67,782
24	102	70,92	$-1,54\ 425\ 440\ 608\ 017E - 02 + 0,363\ 340\ 138\ 945\ 879i$	0,003	92,434	70,922
25	106	53,47	$0,653\ 863\ 072\ 253\ 712 + 0,473\ 140\ 919\ 071\ 868i$	0,006	35,890	53,472
26	110	42,42	$-0,170\ 621\ 105\ 768\ 269 + 0,105\ 968\ 854\ 719\ 268i$	0,002	148,157	42,420
27	119	36,60	$-0,154\ 872\ 039\ 577\ 901 - 0,208\ 596\ 446\ 986\ 759i$	0,002	-126,592	36,602
28	122	40,09	$0,950\ 063\ 711\ 988\ 643 - 0,735\ 036\ 329\ 522\ 044i$	0,009	-37,728	40,091
29	128	36,37	$0,678\ 918\ 862\ 883\ 568 + 0,289\ 449\ 068\ 453\ 201i$	0,006	23,090	36,367
30	132	38,69	$0,614\ 910\ 879\ 617\ 597 + 0,633\ 040\ 447\ 972\ 511i$	0,007	45,832	38,692
31	138	34,39	$-9,55\ 828\ 705\ 477\ 987E - 03 + 0,409\ 216\ 155\ 738\ 657i$	0,003	91,338	34,387
32	144	39,39	$-0,264\ 689\ 137\ 497\ 847 - 2,3\ 765\ 532\ 028\ 772E - 02i$	0,002	-174,869	39,387
33	150	58,35	$-7,4049\ 533\ 732\ 657E - 02 + 0,237\ 673\ 045\ 527\ 238i$	0,002	107,305	58,346
34	153	50,44	$-0,294\ 892\ 444\ 092\ 289 + 0,185\ 662\ 102\ 498\ 048i$	0,003	147,806	50,435
35	155	38,57	$-6,50\ 133\ 862\ 211\ 028E - 02 - 5,53\ 343\ 809\ 058\ 713E - 02i$	0,001	-139,598	38,570
36	158	37,17	$4,66\ 987\ 847\ 384\ 874E - 02 - 0,172\ 967\ 005\ 244\ 084i$	0,001	-74,891	37,173
37	162	37,17	$0,16322\ 558\ 437\ 042 + 0,194\ 270\ 656\ 701\ 046i$	0,002	49,963	37,172

Результатом преобразования являются комплексные числа, представленные в таблице. Трёхмерная графическая интерпретация представлена на рисунке 2. Модуль данных комплексных чисел равен амплитуде k -й спектральной составляющей (k -й гармоники), а аргумент комплексного числа Y_k равен фазе этой гармоники.

Например, для 4-й гармоники в алгебраической форме записи комплексного числа $z = x + yi$ получим:

$$Y_4 = 0,882000744718849 + 2,53776697384525i.$$

Для которой амплитуда определится через абсолютную величину комплексного числа $z_k = x + yi$ по формуле

$$|z|_4 = \sqrt{x^2 + y^2},$$

амплитуда для 4-й гармоники определится как

$$r = |z|_4 = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{0,8820^2 + 2,5377^2} = 0,2686. \quad (2)$$

Для нахождения мнимого аргумента использовали следующее соотношение:

$$x + yi = |x + yi| \times e^{\theta} = |x + yi| \times (\cos \theta + \sin \theta),$$

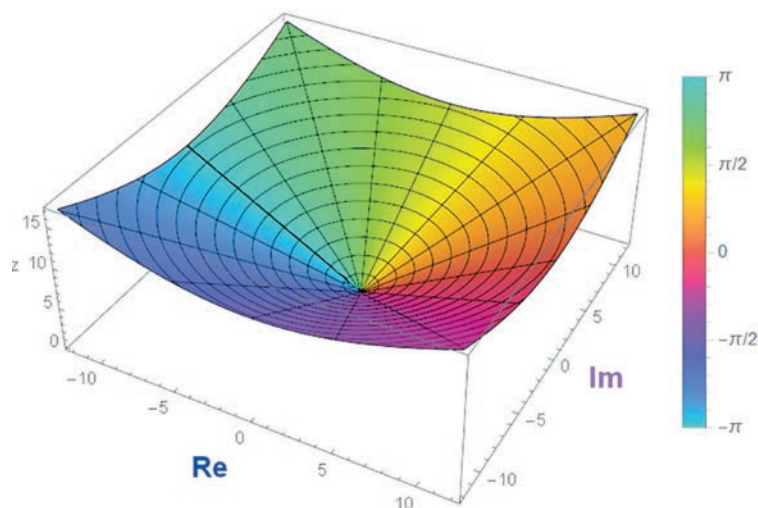


Рисунок 2 – Преобразованный сигнал виброускорения топливной форсунки с боковым подводом топлива (171.1112010-01) в пространстве комплексных чисел

тогда мнимый аргумент

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \quad (3)$$

а для нахождения фазы φ получим

$$\varphi_n = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \quad (4)$$

тогда для 4-й гармоники фаза составит

$$\varphi_4 = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{2,538}{0,882}\right) = 70,8351 \text{ град.} = 1,2363 \text{ рад.}$$

Посредством полученных значений модулей и фаз для различных гармоник можно представить комплексные числа в тригонометрической форме:

$$z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi), \quad (5)$$

тогда

$$z = 0,2686 \times (\cos(1,2363) + i \sin(1,2363)).$$

В показательной форме записи комплексных чисел

$$z = re^{i\varphi}. \quad (6)$$

Для рассматриваемого примера 4-й гармоники согласно формуле (6) $z = 0,2686e^{i \cdot 1,2363}$.

Поскольку над данными, представленными в таблице, произведены преобразования Фурье, для получения исходного сигнала воспользуемся обратным преобразованием Фурье, которое преобразует спектральное представление временного ряда в действительное [11, 12]

$$y_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y_k \left[\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + i \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right], \quad (n = 0, \dots, N-1). \quad (7)$$

По формуле (7) вычисляем данные для всего ряда наблюдений, результаты приводим в 4-м столбце таблицы. По формулам (2) и (4) определяем значения амплитуды сигнала и его фазы, приводим их значения в 5-м и 6-м столбцах таблицы. Для проверки правильности полученных



Рисунок 3 – Графическая интерпретация преобразования Фурье в комплексной плоскости для сигнала виброускорения топливной форсунки на стенде с дробящим распылением топлива с указанием вычисленных фаз колебаний для каждой гармоники спектра

результатов выполняем обратное преобразование Фурье, которое должно соответствовать исходному сигналу (седьмой и третий столбцы таблицы).

Таким образом, преобразование Фурье позволяет разложить сигнал, снятый в зависимости от времени проведения испытаний, на частотные составляющие (спектр) [12].

Для обработки виброакустических сигналов по временным параметрам используется метод, основанный на определении среднеквадратического значения виброускорения:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}}, \quad (8)$$

где $n = 128$;

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y}{n} = \frac{62,80 + 64,08 + 59,9 + 56,63 + \dots + 35,23 + 34,30}{128} = 41,93.$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(62,80 - 41,93)^2 + (64,08 - 41,93)^2 + \dots + (34,30 - 41,93)^2}{128}} = 10,96 \text{ дБ}.$$

Как видно из расчетов, данный метод прост и может эффективно использоваться для выявления дефектов деталей, для которых известно допустимое среднеквадратичное отклонение по виброускорению.

Заключение

На примере топливной форсунки дизельного двигателя рассмотрены такие информативные диагностические параметры, как частота импульсов в спектре вибрации форсунки, время между импульсами, амплитуда импульсов. При этом указанные параметры характеризуют не только техническое состояние непосредственно самой форсунки, но и частично топливного насоса.

Выполнен анализ Фурье для выделенных из общего массива данных, а также определены коэффициенты гармоник и построения фильтров. Выполнено графическое построение преобразованного сигнала виброускорения форсунки с дробящим распылением в пространстве комплексных чисел. Получена графическая интерпретация преобразования Фурье в комплексной плоскости для сигнала виброускорения форсунки на стенде с дробящим распылением с указанием вычисленных фаз колебаний для каждой гармоники спектра.

Список использованных источников

1. Какие бывают топливные дизельные форсунки : сайт компании DieselKraft. – 2024–2025. – URL: <https://dieselmkraft.by/poleznaya-informatsiya/kakie-byvayut-toplivnye-dizelnye-forsunki.html> (дата обращения: 28.08.2025).
2. Обслуживание форсунок дизельных двигателей: рекомендации для дизель-сервисов / под ред. Тадеуша Янишевского. – WUZETEM, Warszawa. – 48 с.
3. Якубович, А. И. Экономия топлива на тракторах : монография / А. И. Якубович, Г. М. Кухаренок, В. Е. Тарасенко. – Мн. : БНТУ, 2009. – 229 с.
4. Тарасенко, В. Е. Анализ топливных систем дизелей с электронным управлением топливopодачей / В. Е. Тарасенко, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2016. – Вып. 50. – С. 52–57.
5. Ролич, О. Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей / О. Ч. Ролич, В. Е. Тарасенко // Агропанорама. – 2019. – № 5. – С. 42–45.
6. Диагностирование многоканальной измерительной системой с гибкой структурой форсунок фирмы BOSCH / А. А. Жешко, В. Е. Тарасенко, О. Ч. Ролич [и др.] // Технический сервис машин. – 2021. – Т. 59. – № 1 (142). – С. 55–64.
7. Тарасенко, В. Е. Исследование вибрации форсунок с помощью многоканальной системы с гибкой структурой / В. Е. Тарасенко, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2020. – Вып. 54. – С. 185–191.
8. Ролич, О. Ч. Интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики систем, узлов и механизмов дизельного двигателя на базе беспроводной mesh-сети / О. Ч. Ролич, В. Е. Тарасенко, И. И. Балаш // Агропанорама. – 2019. – № 6. – С. 38–41.
9. Тарасенко, В. Е. Анализ вибрационных характеристик форсунок CRIN2 автотракторных дизелей / В. Е. Тарасенко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса : материалы Республ. науч.-практ. конф. Белорусская агропромышленная неделя БЕЛАГРО-2024 / редкол.: В. А. Самсонович (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2024. – С. 254–257.
10. Основы цифровой обработки сигналов : учеб. пособие / В. Г. Кoberниченко ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 150 с.
11. Математические основы обработки сигналов. Практикум : учеб. пособие / О. С. Вадутов ; изд. 3-е, испр. и доп. – Томск : Томск. политех. ун-т, 2014. – 102 с.
12. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие / А. Б. Сергиенко ; 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
13. Форсунка 171.1112010-01 : оф. сайт Алтайского завода прецизионных изделий. – Барнаул, 2019–2025. – URL: <https://azpi.ru/catalog/traditsionnaya-sistema-vpryska-topliva/mekhanicheskie/171-1112010-01/> (дата обращения: 19.09.2025).