

ОЦЕНКА ВЫСОКО- ЧАСТОТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ЗАПУСКЕ

А. Ю. Демедюк

Аспирант

Днепропетровский национальный

университет

ул. Научная, 13, г. Днепропетровск,

Украина, 49050

E-mail: demed861@mail.ru

Викладаються матеріали експериментальних і теоретичних досліджень параметрів збудженого стану, а також умов їх застосовності, дозволяючих оцінювати роботоспроможність РРД за фактором високочастотної стійкості процесів, які відбуваються у камері згоряння на запуску. Оцінка інформативності обраних параметрів проведена на основі порівняння їх величин, отриманих при випробуваннях двигунів в стендових умовах

Ключові слова: високочастотна стійкість, параметри збудженого стану, РРД, середньоквадратичний розкид, довірна вірогідність

Излагаются материалы экспериментальных и теоретических исследований параметров возбужденного состояния, а также условий их применимости, позволяющих оценивать работоспособность ЖРД по фактору высокочастотной устойчивости процессов, происходящих в камере сгорания на запуске. Оценка информативности выбранных параметров проведена на основе сравнения их величин, полученных при испытаниях двигателей в стендовых условиях

Ключевые слова: высокочастотная устойчивость, параметры возбужденного состояния, ЖРД, среднеквадратический разброс, доверительная вероятность

1. Введение

Оценка информативности максимальных амплитуд в полосах частот проведена на основе сравнения их величин, полученных при испытаниях некоторых из тех экземпляров двигателей 8Д518 и 11Д613, которые разрушились из-за высокочастотной неустойчивости рабочего процесса в КС на запуске, и при испытаниях устойчивых на этом режиме экземпляров двигателей. Информация, имевшаяся по испытаниям двигателей указанных конструкций, позволяла осуществить такую оценку посредством проверки соответствия максимальных амплитуд уравнению (1):

$$X_{ny} > \bar{X}_{ny} + \Phi(S_{Xy}, t_{уст}, t_{ун} \cdot \chi^2 \cdot n_y), \quad (1)$$

где χ^2 , $t_{уст}$, $t_{ун}$ – соответственно квантили распределений Пирсона, Стьюдента и Гаусса для числа степеней свободы $(n_{ny} - 1)$ и принятой доверительной вероятности $\gamma = 0,95$.

Использовавшиеся при этой оценке данные о максимальных амплитудах были получены при обработке магнитных записей виброперегрузок КС в осевом и радиальном направлениях (ВО, ВР) и колебаний давления горючего и окислителя на входе в форсунки (КДО, КДГ). Спектральная обработка магнитных записей производилась в диапазоне 0,9 ÷ 4,4 кГц, охватываемом полосами частот фильтров № 19 ÷ 27 анализатора спектра частот FSp-10а.

Обработке подвергались интервалы записей, соответствовавшие периоду испытания с момента воспламенения в КС до момента набора двигателями 90% номинального давления в КС.

По испытаниям двигателей, разрушившихся из-за высокочастотной неустойчивости в пределах указанного периода испытания, верхняя граница интервала обработки ограничивалась моментом, опережающим момент разрушения не менее чем на 0,08 сек.

2. Постановка проблемы

Полученные результаты свидетельствуют о соответствии максимальных амплитуд условиям признания их информативными, так как их величины, полученные при испытаниях неустойчивых экземпляров двигателей, существенно выше тех, которыми характеризуются устойчивые экземпляры.

Повышенный уровень максимальных амплитуд при неустойчивой работе этих двигателей на запуске отмечается практически во всем рассматриваемом диапазоне частот (в большинстве полос частот) по всем 4 измерениям.

Полученные данные позволяют отметить еще одну особенность проявления высокочастотной неустойчивости двигателей: полосы частот, максимальные амплитуды, в которых по каждому отдельному измерению являются наибольшими в рассматриваемом диапазоне частот, не менее чем по 3-м измерениям из 4-х совпадают или являются смежными.

Основываясь на отмеченных различиях между работоспособными и неработоспособными из-за высокочастотной неустойчивости на запуске двигателями, признаками неустойчивой работы двигателей или повышенной вероятности отказов из-за высокочастотной неустойчивости на запуске можно считать повышенный уровень максимальных амплитуд в совпадающих

или смежных полосах частот хотя бы по 3-м из 4-х измерений колебаний давления горючего и окислителя на входе в форсунки и виброперегрузки КС в осевом и радиальном направлениях.

В связи с этим единичные экземпляры двигателей можно считать работоспособными при условии несоответствия максимальных амплитуд в полосах частот следующей системе неравенств по любому одному из 4-х возможных сочетаний 3-х измерений в каждом сочетании, образуемом из указанных 4-х измерений:

$$\begin{aligned}
 &A_{1\max\Delta Fi} > A_{1\max\Delta Fi}^* \\
 &A_{2\max\Delta Fi} > A_{2\max\Delta Fi}^* \\
 &A_{3\max\Delta Fi} > A_{3\max\Delta Fi}^* \\
 &|N^{\circ}F_{A1\max} - N^{\circ}F_{A2\max}| \leq 1 \\
 &|N^{\circ}F_{A1\max} - N^{\circ}F_{A3\max}| \leq 1
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $A_{1\max\Delta Fi}$, $A_{2\max\Delta Fi}$, $A_{3\max\Delta Fi}$ – значения максимальных амплитуд по сочетанию 3-х измерений (нумерация входящих в сочетание измерений -1, 2, 3 – произвольная) в полосах частот ΔFi ; $A_{1\max\Delta Fi}^*$, $A_{2\max\Delta Fi}^*$, $A_{3\max\Delta Fi}^*$ – предельные величины максимальных амплитуд соответствующих измерений (1, 2, 3) в полосах частот ΔFi ; $N^{\circ}F_{A1\max}$, $N^{\circ}F_{A2\max}$, $N^{\circ}F_{A3\max}$ – порядковые номера полос частот ΔFi (порядковые номера соответствующих фильтров АСЧ FSp-10а), в которых реализовались максимальные амплитуды, превышающие предельные величины соответствующих измерений (1, 2, 3).

3. Цель и задачи исследования

Как было отмечено выше, при потере двигателями работоспособности из-за высокочастотной неустойчивости в КС на запуске повышенный уровень максимальных амплитуд наблюдается не только в тех полосах частот, в которых они являются наибольшими в рассматриваемом диапазоне частот, но и в большинстве полос частот этого диапазона. Исследование информативности средних значений приведенных максимальных амплитуд $A_{\max\text{нр.}\Delta Fi}$ проводилось с целью выяснения целесообразности применения этого параметра для «сжатого» представления информации о максимальных амплитудах во всем диапазоне частот, подвергающемся обработке, и для сравнительной оценки работоспособности ЖРД.

Это исследование проведено [1] по материалам испытаний двух конструктивных вариантов двигателя 8Д518 и трех конструктивных вариантов двигателя 11Д613. Оно основывалось на проверке соответствия средних значений приведенных максимальных амплитуд при сравнении данных, характеризующих 1 и 2 конструктивные варианты двигателей 8Д518, 2 и 1, 1 и 3, 2 и 3 конструктивные варианты двигателей 11Д613 по результатам успешных испытаний условию (2):

- а) $X_{\text{нр}}$ существенно больше X_y
- б) различия между $X_{\text{нр}}$ и X_y незначительны, но при этом $S_{X_{\text{нр}}}$ существенно больше S_{X_y} .

Здесь сравниваемые варианты в каждой паре записаны в последовательности, при которой второй вариант характеризуется по исходам испытаний большим запасом работоспособности.

Результаты проверки, представленные в табл. 1, свидетельствуют о том, что различия между статистическими данными средних величин приведенных максимальных амплитуд, характеризующими успешные испытания сравниваемых вариантов двигателей, качественно соответствуют различиям в работоспособности этих вариантов. Это соответствие выражается в снижении средних величин приведенных максимальных амплитуд и (или) уменьшении разброса их значений при повышении работоспособности двигателей. Эти изменения систематичны практически по всем 4 измерениям и в большинстве случаев рассмотренный объем данных свидетельствует об их существенности.

Применение статистических характеристик, учитывающих результаты оценок средних величин и разбросов приведенных максимальных амплитуд по группам успешных испытаний, позволяет классифицировать (ранжировать) работоспособность конструктивных вариантов каждого из указанных двигателей в соответствии с различиями, установленными по исходам испытаний. Реализация такой возможности иллюстрируется следующим. По данным об исходах испытаний (о частностях устойчивой работы двигателей при испытаниях) конструктивные варианты каждого из двигателей 8Д518 и 11Д613 образуют такие последовательности соответственно относительно повышению частности безотказной работы на запуске: 1,2 варианты двигателя 8Д518; 2,1,3 вариант двигателя 11Д613.

Такие же последовательности из вариантов этих двигателей образуются, если без привлечения сведений об отказах двигателей при испытаниях ранжировать их конструктивные варианты в порядке снижения средних величин приведенных максимальных амплитуд, характеризующих верхнюю границу доверительного интервала их значений, полученных по группам успешных испытаний двигателей соответствующих вариантов:

$$\bar{A}_{(B)\max\text{нр.}\Delta Fn} = \bar{A}_{\max\text{нр.}\Delta Fn} + S_{A_{\max\text{нр.}\Delta Fn}} \frac{t\gamma_{\text{ст}}}{\sqrt{n}} \tag{2}$$

Представленные в таблице 2 результаты расчетов $A_{(B)\max\text{нр.}\Delta Fn}$, проведенных исходя из $\gamma=0,95$ и $n=35$ измерений, свидетельствуют о том, что работоспособность вариантов двигателя 8Д518 ранжируются по выборочным данным о средних величинах приведенных максимальных амплитуд в полном соответствии с исходами их испытаний по любому из 4-х измерений. Работоспособность вариантов двигателя 11Д613 ранжируется по 3-м измерениям из 4-х: по измерениям виброперегрузок КС в осевом и радиальном направлениях и колебаний горючего на входе в форсунки.

Установив таким образом применимость средних величин приведенных максимальных амплитуд для классификации работоспособности различных конструктивных вариантов однотипных двигателей, представлялось практически целесообразным ответить на вопрос: возможна ли на основе этих данных классификация работоспособности двигателей разных типов?

Рассмотренные результаты сравнения работоспособности разных конструктивных вариантов каждого из двигателей 8Д518 и 11Д613, позволяют частично от-

ветить на поставленный вопрос следующим образом: если классификация работоспособности двигателей разных типов на запуске по данным о средних величинах приведенных максимальных амплитуд, основанных на измерениях колебаний давления компонентов топлива на входе в форсунки и виброперегрузок КС возможна, то не все из указанных измерений для этого применимы.

Оценка применимости для этой цели отдельных измерений основывалась на анализе связи между результатами ранжирования работоспособности тех же конструктивных вариантов двигателей 8Д518 и 11Д613 по средним величинам приведенных максимальных амплитуд, полученных при успешных испытаниях, и по сведениям об исходах испытаний. При этом каждый из 5 вариантов двух двигателей рассматривался как отдельный тип двигателя с точки зрения того, какое из 5 мест он занимает в ряду, ранжированном в порядке

возрастания величин указанных амплитуд на верхней границе доверительного интервала, и в ряду, ранжированном в порядке снижения частоты неоявления отказов двигателей из-за высокочастотной неустойчивости. Оценка связи между результатами такого ранжирования по исходам испытаний и по каждому из четырех измерений производилась по коэффициенту корреляции рангов Спирмена [3]:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N^3 - N},$$

где в данном случае d_i - разность между местами определенного двигателя (варианта), занимаемыми им в рядах, ранжированных по исходам испытаний и по измерениям; N - число ранжируемых двигателей.

Таблица 1

Сравнение средних величин и среднеквадратичных разбросов средних значений приведенных максимальных амплитуд, характеризующих устойчивость экземпляров различных конструктивных вариантов изделий 8Д518 и 11Д613

Изделия	Обозначения измерений	Единицы измерений	Варианты изделий	Количество измерений	Сравнение амплитуд				Сравнение разбросов амплитуд				Оценка соответствия уравнению (1)
					$\bar{A}_{\max пр. \Delta F_n}$	$t_{Ст}$	P	Оценка существенности различий	$S_{\bar{A}_{\max пр. \Delta F_n}}$	F	P	Оценка существенности различий	
8Д518	ВО	g	1	37	20	1,84	>0,05	-	12,2	11,2	<0,05	+	+
			2	46	17				3,65				
	ВР	g	1	37	13	4,13	<0,05	+	5,66	7,9	<0,05	+	+
			2	46	9				2,01				
	КДГ	кгс/см ²	1	35	0,30	4,26	<0,05	+	0,080	1,1	>0,05	-	+
			2	43	0,22				0,084				
	КДО	кгс/см ²	1	37	0,33	0,90	>0,05	-	0,150	2,5	<0,05	+	+
			2	41	0,30				0,095				
11Д613	ВО	g	2	86	18	1,86	>0,05	-	7,38	1,47	>0,05	-	-
			1	36	15				6,09				
	ВР	g	2	88	12	0,79	>0,05	-	5,80	3,13	<0,05	+	+
			1	38	10				3,28				
	КДГ	кгс/см ²	2	87	0,26	2,91	<0,05	+	0,110	3,35	<0,05	+	+
			1	38	0,20				0,065				
	КДО	кгс/см ²	2	85	0,20	1,58	>0,05	-	0,097	1,02	>0,05	-	-
			1	38	0,17				0,098				
	ВО	g	1	36	15	0,00	>0,05	-	6,09	1,52	>0,05	-	-
			3	113	15				4,94				
	ВР	g	1	38	10	5,23	<0,05	+	3,28	1,35	>0,05	-	+
			3	110	7				2,82				
	КДГ	кгс/см ²	1	38	0,20	8,06	<0,05	+	0,065	2,78	<0,05	+	+
			3	114	0,13				0,039				
	КДО	кгс/см ²	1	38	0,17	2,31	<0,05	+	0,098	2,95	<0,05	+	-
			3	109	0,20				0,057				
ВО	g	2	86	18	3,54	<0,05	+	7,38	2,23	<0,05	+	+	
		3	113	15				4,94					
ВР	g	2	88	12	6,67	<0,05	+	5,80	4,23	<0,05	+	+	
		3	110	7				2,82					
КДГ	кгс/см ²	2	87	0,26	10,9	<0,05	+	0,119	9,3	<0,05	+	+	
		3	114	0,13				0,039					
КДО	кгс/см ²	2	85	0,20	0,00	>0,05	-	0,097	2,9	<0,05	+	+	
		3	109	0,20				0,057					

4. Выводы

Представленные в табл. 2 результаты ранжирования вариантов указанных двигателей по исходам испытаний, проведенного с учетом оценки существенности различий между ними по измерениям, и результаты оценки связи между ними свидетельствуют о том, что классификация устойчивости двигателей по средним величинам приведенных максимальных амплитуд, определяемых по любому из четырех измерений, имеет положительный знак связи (положительный коэффициент корреляции r_s) с классификацией по исходам испытаний. Наиболее информативными в данном случае оказались средние значения приведенных максимальных амплитуд, определяемые по измерению виброперегрузок КС в радиальном направлении, так как вероятность P реализации практически полного качественного соответствия результатов ран-

жирования работоспособности двигателей по данным указанного измерения результатам ранжирования по исходам испытаний за счет случайных факторов мала ($P = 0,05$).

Оценки вероятности $P(\bar{A}_{\text{ВРmaxпр.}\Delta F_n} < \bar{A}^*)$ превышения средними значениями приведенных максимальных амплитуд виброперегрузок КС в радиальном направлении заданного (предельного) значения, вычисленные также по результатам 35 измерений, произведенных при успешных испытаниях, незначительно (на $0,000 \pm 0,016$) отличаются от частоты безотказной работы двигателей q_y , что позволяет считать возможным и эффективным не только качественную оценку работоспособности двигателей, но и прогноз надежности обеспечения устойчивости двигателей на запуске на основании отдельных, характеризующих этот режим работы, параметров возмужденного состояния.

Таблица 2

К оценке применимости средних величин приведенных максимальных амплитуд для качественной и количественной характеристики работоспособности изделий

Изделия		8Д518		11Д613			
Конструктивные варианты		1	2	1	2	3	
Сведения по исходам испытаний	Число рассмотренных испытаний	955	2089	1540	68	114	
	q_y	0,985	1,000	0,996	0,971	1,000	
$A_{(B)\text{max пр.}\Delta F_n}$ по $n = 35$ измерениям	ВО, g	24,2	18,3	17,1	20,5	16,7	
	ВР, g	14,9	9,7	11,1	14,0	8,0	
	КДГ, кгс/см ²	0,33	0,25	0,22	0,30	0,14	
	КДО, кгс/см ²	0,38	0,33	0,20	0,23	0,22	
Ранги работоспособности вариантов изделий каждого вида	По измерениям	ВО	2	1	2	3	1
		ВР	2	1	2	3	1
		КДГ	2	1	2	3	1
		КДО	2	1	1	3	2
	По исходам	2	1	2	3	1	
Ранги работоспособности всей совокупности вариантов изделий	По измерениям	ВО	5	3	2	4	1
		ВР	5	2	3	4	1
		КДГ	5	3	2	4	1
		КДО	5	4	1	3	2
	По исходам	4,5	1,5	3	4,5	1,5	
Коэффициент корреляции r_s между рангами работоспособности по исходам и по измерениям	ВО	+0,80					
	ВР	+0,95					
	КДГ	+0,80					
	КДО	+0,35					
$ q_y - P(\bar{A}_{\text{ВРmaxпр.}\Delta F_n} < \bar{A}^* - 25g) $		0,002	0,000	0,003	0,016	0,000	

Литература

1. Сарычев, Ф.Г. Оценка стабильности высокочастотной устойчивости двигателя 8Д724 на запуске в период август 1970 – октябрь 1971 гг : технический отчет №26-140, предприятие п/я Г-4311 [Текст] / Ф.Г. Сарычев, В.Н. Быченков, Л.Л. Рогачев; МОМ, 1971. – 57 с.
2. Пустыльник, Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. [Текст] / Е.И. Пустыльник – «Наука», М, 1968. – 288 с.
3. Бернштейн, А. Справочник статистических решений. [Текст] / А. Бернштейн – «Статистика», М, 1968. – 253 с.
4. Смирнов, Н.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. [Текст] / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский – Физматгиз, М, 1959. – 436 с.

5. Шор, Я.Д. Таблицы для анализа и контроля надежности. [Текст] / Я.Д. Шор, Ф.И. Кузьмин – «Советское радио», М, 1968. – 288 с.
6. Кренделл, С. Случайные колебания. [Текст] /С. Кренделл – «Мир», М, 1967 – 356 с.
7. Сарычев, Ф.Г. Исследование погрешностей определения параметров возбужденного состояния по данным дискретного спектрального анализа. [Текст] /Ф.Г. Сарычев, В.Н. Быченков, Л.Л. Рогачев; РК техника, серия 7, выпуск 8 – ГОНТИ 9, 1972 – С. 31 – 38.
8. Харкевич, А.А. Спектры и анализ. [Текст] /А.А. Харкевич – Физматгиз, 1962. – 236 с.
9. Мошкин, Е.К. Нестационарные режимы работы ЖРД. [Текст] /Е.К. Мошкин – «Машиностроение», 1970. – 336 с.
10. Методика измерений параметров ЖРД и изделий при огневых стендовых испытаниях. [Текст] / НИИ-229, МОМ, 1965. – С. 5 – 17.

УДК 532.516

СТРУКТУРА ПОТОКА В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ПОДВОДЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РАСХОДА

С. В. Носко

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: Nosko S.V.@ukr.net

А. А. Шевчук*

E-mail: Shevchuk_O_A1992@ukr.net

*Кафедра прикладной гидроаэромеханики и

механотроники

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

Представлені аналітичні і експериментальні дослідження нестабілізованої течії при радіальному підводі додаткових витрат рідини в область місцевого опору. Отримані результати дозволяють оцінити вплив зміни гідродинамічних умов входу в вузьку частину каналу на структуру потоку і перерозподіл тиску по довжині

Ключові слова: місцеві опори, радіальний підвід витрат, перерозподіл тиску, нестабілізована течія, гідродинамічні умови

Представлены аналитические и экспериментальные исследования нестabilизированного течения при радиальном подводе дополнительного расхода жидкости в область местного сопротивления. Полученные результаты позволяют оценить влияние изменения гидродинамических условий входа в узкую часть канала на структуру потока и перераспределения давления по длине

Ключевые слова: местные сопротивления, радиальный подвод расхода, перераспределение давления, нестabilизированное течение, гидродинамические условия

1. Введение

Многие системы и узлы технологического оборудования имеют каналы сложной конфигурации, которые не являются конструктивными недоработкам, а имеют вполне определенное функциональное назначение и играют важную роль в обеспечении данного производственного процесса.

Эксплуатационные характеристики данного оборудования не всегда совпадают с их расчетной эффективностью, что обусловлено гидродинамическими особенностями течения, и в частности, условиями входа среды в рабочие зоны аппаратов. Все это свидетельствует о важности изучения гидродинамики технологического оборудования с точки зрения обеспечения заданного распределения потока и достижения максимальной эффективности их работы.

2. Анализ исследований и публикаций

Исследованием условий входа и развитием профиля скорости на гидродинамическом начальном участке занимались ряд авторов.

В работе [1-4] показано, что характер профиля скорости на входе потока в трубопровод и длина его начального участка зависят не только от режима течения (числа Рейнольдса), но и от формы и геометрических параметров предшествующих участков. И наиболее действенным способом является установка на входе плавного коллектора, очерченного по лемнискате.

Авторы работы [5-7] исследовали влияние условий входа на гидродинамические характеристики потока на начальном участке при различных формах и площадях поперечного сечения переходных