

Таким образом, на примере показана методика автоматизированного моделирования динамики линейной ПГС с теплообменником в сосредоточенных параметрах. Аналогичным образом может быть составлена схема замещения любых других ПГС с теплообменниками и проведены расчеты динамических характеристик с помощью пакета прикладных программ *PGS*.

Библиографический список

1. Бердников В.В. Прикладная теория гидравлических цепей. М.: Машиностроение, 1977. - 192 с.
2. Ашихмин Р.П., Бердников В.В., Тогулева Т.П. Автоматизация исследований пневмогидравлических систем летательных аппаратов // Исследование и выбор определяющих параметров систем механического оборудования летательных аппаратов. - М.: МАИ, 1980. - С. 27-37.
3. Разработка элементов системы автоматизированного проектирования пневмогидравлических схем /Бердников В.В., Тогулева Т.П., Ашихмин Р.П., Эдельштейн М.А. // Пневматика и гидравлика. - М.: Машиностроение, 1984. Вып. 10. - С. 89-97.
4. Пакет прикладных программ для расчета динамики пневмогидравлических систем питания /Бердников В.В., Тогулева Т.П., Ашихмин Р.П., Богодяленская Е.Е. - Деп. в ЦНТИ ГА. Библиографический указатель ВИНТИ "Депонированные научные работы" № 9, 1986. - 103 с.
5. Кейс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 223 с.
6. Берман С.С. Расчет теплообменных аппаратов турбоустановок. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 240 с.

УДК 621.45.00.11.018.3

В.А.Букин, А.А.Мишуков, Е.В.Степанов

СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ДЛЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЧАСТОТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ САР ГТД
С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЛЕЙНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПУЛЬСАТОРА

Обозначения

- $\omega_{зд}$ - частота вращения ротора высокого давления;
 $\omega_{нд}$ - частота вращения ротора низкого давления;

- P_{2BC} - давление воздуха за компрессором высокого давления;
- P_M - давление в маятниковой полости регулятора $P_{до}$;
- G_T - расход топлива;
- f, F - частота пульсатора;
- $f_{опр}$ - частота опроса;
- $f_{пр}, F_{пр}$ - частота выборки;
- A_L - дискретное значение параметра;
- A_0 - среднее значение параметра;
- A - амплитуда;
- A_k - амплитуды гармоник ($k = 1, 2, 3$);
- f_k - частота гармоник;
- n - количество значений параметра в одном периоде;
- C_c^k, D_c^k, Re_k, Im_k - коэффициенты гармонического анализа;
- $\varphi_k, \Delta F_k$ - фазовый сдвиг;
- K - комплекс параметров;
- P - параметр.

С о к р а щ е н и я

ГТД - газотурбинный двигатель;

САР - система автоматического регулирования.

К современным системам автоматического регулирования газотурбинных двигателей предъявляются повышенные требования как по быстродействию, так и по качеству регулирования. Экспериментальное исследование динамических свойств - важный этап создания таких систем, позволяющий ускорить доводочные работы и повысить их качество.

Наиболее точным и детальным методом определения динамических характеристик является частотный метод, для которого, однако, характерны большой объем экспериментальных работ и значительная трудоемкость обработки полученной информации. Уменьшение затрат времени на проведение частотных испытаний, автоматизация регистрации па-

раметров и обработки информации еще больше подчеркивает преимущество этого метода динамического исследования систем регулирования по сравнению с другими.

Настоящая статья посвящена совершенствованию частотных методов испытаний САР ГТД, разработке комплекса средств для их проведения и реализации автоматизированной обработки материалов испытаний.

Текст иллюстрирован экспериментальными данными.

Разработка пульсатора и совершенствование методики испытаний

Исходя из принципов уменьшения затрат времени на проведение частотных испытаний и облегчения анализа, была поставлена задача по созданию пульсатора гармонических возмущений с возможностью точной и быстрой установки заданной частоты. Высокая точность установки заданной частоты позволяет обеспечить повторяемость режимов испытаний, что является немаловажным фактором облегчения идентификации частотных характеристик.

С целью автоматизации обработки информации такой пульсатор должен обеспечить выработку в определенный момент каждого периода импульсного электрического сигнала, а также постоянных служебных кодовых сигналов, характеризующих значение частоты.

В качестве параметра, по которому пульсатором создается гармоническое возмущение, было принято обратно пропорциональное $\frac{1}{\Delta P}$ давление P_M в маятниковой полости изодромного регулятора, схема которого широко используется в САР ГТД /3, рис. 2.13/. Требуемые расходы для создания возмущений являются небольшими и определяются величиной давления P_M за жиклером, рабочее давление не превышает 2 МПа. Возмущения по давлению P_M регулятора проходят по всем линиям системы: от входа в регулятор до выходных параметров двигателя, что позволяет получить максимальное количество полезной информации. Такая методика создания возмущений дает возможность проводить частотные исследования как замкнутой системы, так и разомкнутой, когда дополнительным фиксируемым сливом из маятниковой полости режим ГТД снижается ниже зоны работы регулятора.

В отличие от метода создания гармонического возмущения путем переменного слива, дозируемого в камеру сгорания топлива, применяемый метод не нарушает штатного режима работы агрегатов САР и системы топливоподачи.

Диапазон частот, необходимый для исследования запасов устойчивости САР и динамики агрегатов, обычно находится в пределах 0,01... 10 Гц, причем, выше частот 3...4 Гц ГТД практически перестает реагировать на возмущения расхода топлива.

Приводные гидравлические пульсаторы гармонических сигналов, например золотникового типа, мало пригодны для создания возмущений с небольшим изменением расходов рабочей жидкости. В приводных пульсаторах вызывает затруднения точная установка частоты возмущений, частотный диапазон ограничен. В них трудно осуществлять выработку характеризующей значение частоты служебной информации, которая требуется для выбора необходимого алгоритма обработки зарегистрированной информации конкретного измерения.

Проблема задания возмущений с малыми изменениями расходов и высокой точностью поддержания заданной частоты решается созданием гидравлического пульсатора с релейным принципом управления на базе быстродействующих электромагнитных клапанов. В электронном блоке управления такого пульсатора легко осуществимы предъявляемые к нему требования. В пульсаторе использованы нормально закрытые электромагнитные клапаны МКТ-158, применяемые в сервоприводах электронных систем регулирования. Технические данные клапана: время полного открытия не более $6 \cdot 10^{-3}$ с, напряжение питания 6 В при токе 0,7 А, диаметр проходного сечения 1 мм, допустимый перепад давления на клапане до 2 МПа.

Для получения гармонического сигнала, близкого к синусоидальному закону, использовано 8 клапанов: через 4 клапана производится подпитка управляющей полости $P_{\text{уп}}$ постоянным давлением, а через другие 4 клапана производится перепуск из управляющей полости в слив. Амплитуда возмущений регулируется дроссельными пакетами, установленными последовательно с клапанами. Алгоритм включения клапанов за один цикл следующий.

Положение	Клапаны подпитки				Клапаны слива			
	1,	2,	3,	4	5,	6,	7,	8
Открытие, град	7,	21,	38,	64	187,	206,	218,	242
Закрытие, град	173,	159,	142,	118	353,	339,	322,	298

Для управления пульсатором разработан электронный блок, уста-

интервалов дискретно 20 значений частоты от 0,01 до 7,24 Гц при
интервале изменения частоты $\sqrt{2}$.

Электронный управляющий блок (рис. 1) включает в себя генера-
тор, который вырабатывает две частоты, отличающиеся в $\sqrt{2}$ раза.
Эти опорные частоты делятся двухдекадным двоичным делителем, кото-
рый и определяет диапазон частот пульсатора. Через переключатель
диапазонов частот импульсы поступают на трехдекадный делитель час-
тоты с общим коэффициентом деления 360. Если один полный цикл
работы пульсатора принять за 360° , то с помощью восьми схем совпаде-
ний в нужный момент через электронные ключи включаются и выключа-
ются электромагнитные клапаны гидравлического пульсатора.

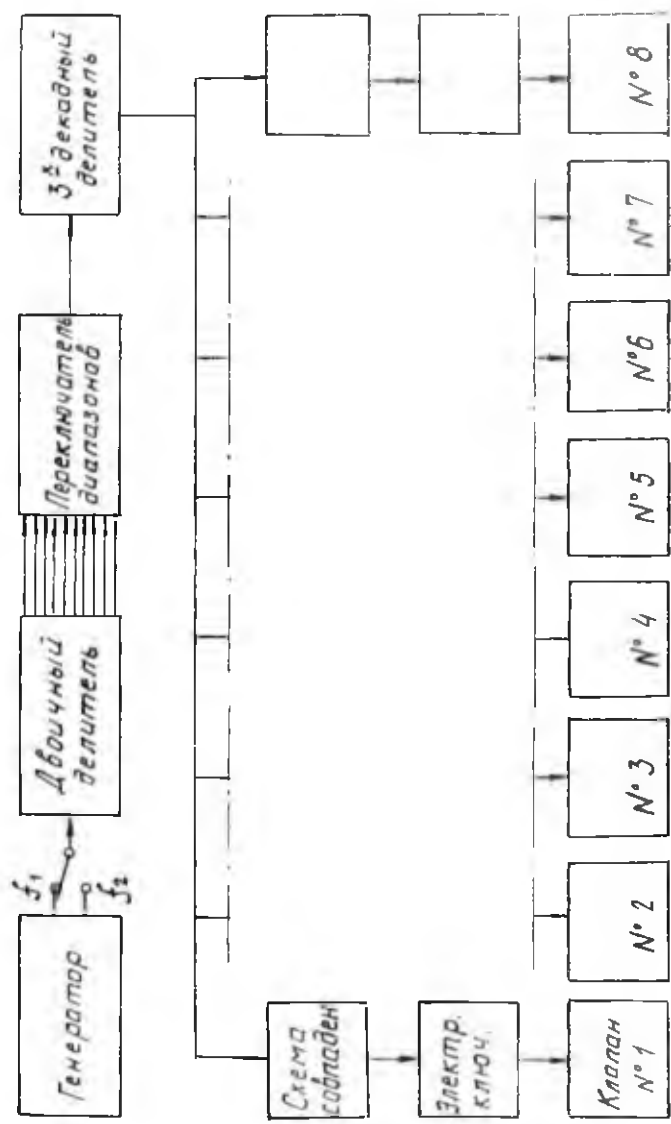
Для выдачи служебной информации, используемой при выборе ал-
горитма обработки материалов регистрации, в электронном блоке ус-
тановлен контактор, обеспечивающий распознавание значения частоты
в четырехразрядном двоичном коде. Контактор перестраивается одно-
временно с переключателем диапазонов.

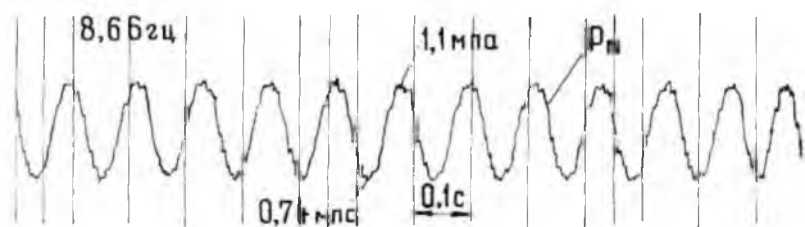
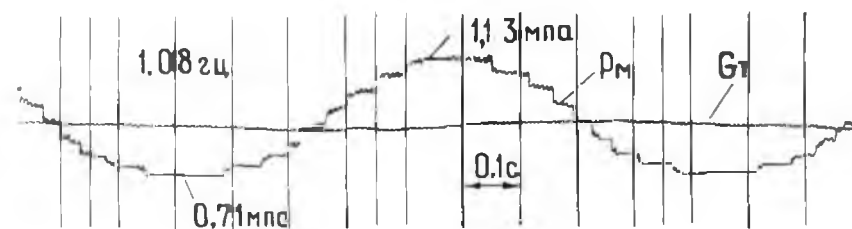
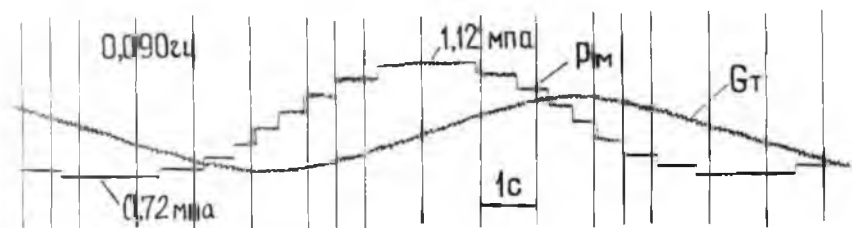
На рис. 2 помещены осциллограммы, полученные при обработке
пульсатора и блока управления совместно с изохронным регулятором
прохода керосина на различных частотах. Как видно из осциллограмм,
изработанный пульсатор обеспечивает форму возмущения, близкую к
синусоидальной. Более детальный анализ формы возмущения и точности
установки частоты проводится далее по данным автоматизированной об-
работки материалов частотных испытаний.

По техническим данным электромагнитов и проведенным экспери-
ментам имеется возможность увеличения частоты возмущений, создавае-
мых пульсатором, предположительно до 15...25 Гц при сохранении
требуемой формы сигнала.

Реализация автоматизированной обработки материалов испытаний

Регистрация параметров при гармонических возмущениях и автома-
тизированная обработка производится на комплексе "Эра-Лотос". Комп-
лекс позволяет выполнять на основе гармонического анализа частотную
обработку не менее 20 параметров, в аналоговом виде регистрируемых
на магнитную ленту, а также выводить оперативные графики изменения
параметров во времени. Сигналы с частотных датчиков перед регистра-
цией предварительно преобразуются в аналоговые. Исходя из исследуе-





Р и с. 2. Изменение параметров при работе пульсатора

того диапазона, выбрана частота опроса параметров при записи $f_{\text{опр}} = 80 \text{ Гц}$.

Комплекс программы состоит из двух программ, объединенных общей памятью, через которую передается из программы в программу необходимая для расчетов массив информации.

Программа управления работой системы и приема телеметрической

информации осуществляется на каждом цикле измерений прием Kodочными значениями по каждому параметру с изменением в зависимости от частоты процесса прореживания дискретных значений параметров. Кроме того, программа ведет прием и обработку калибровочной информации. По окончании приема двух периодов процесса автоматически вызывается программа гармонического анализа.

Программа расчета амплитудно-частотных характеристик проводит гармонический анализ трех гармоник каждого параметра. Период процесса определяется по двум колебаниям. Для определения периода используются моменты изменения напряжения, подаваемого на электромагнит № I.

Гармонический анализ проводится за один период относительно исходного момента - включения или выключения напряжения электромагнита № I по следующим формулам:

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i; \quad A = \frac{1}{2} (A_{max} - A_{min}); \quad A_i^* = A_i - A_0; \quad dt = f_{np} / f_{оп};$$

$$C_i^* = \sin [2\pi f_{\kappa} dt (i-1)];$$

$$D_i^* = \cos [2\pi f_{\kappa} dt (i-1)];$$

$$Re_{\kappa} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n A_i^* C_i^*;$$

$$Im_{\kappa} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n A_i^* D_i^*;$$

$$A_{\kappa} = \sqrt{Re_{\kappa}^2 + Im_{\kappa}^2};$$

$$\varphi_{\kappa} = \begin{cases} \arcsin \frac{Im_{\kappa}}{A_{\kappa}}, & Re \geq 0; \\ \pi - \arcsin \frac{Im_{\kappa}}{A_{\kappa}}, & Re < 0. \end{cases}$$

Данные гармонического анализа каждого измерения заносятся в таблицу, где указывается рассчитанная частота f , частота прореживания f_{np} , число обрабатываемых при анализе точек, значения и соотношения амплитуд $A_0, A, A_1, A_1/A, A_2/A, A_3/A$, а также сдвиг фаз $\Delta\varphi_1$ первой гармоники каждого параметра относительно первой гармоники сигнала P_N , а также сдвиг фаз второй и третьей гармоник относительно первой. Причем, в графе $\Delta\varphi_1$ для параметра P_N печатается сдвиг фаз первой гармоники относительно исходного момента обработки.

Такой вид таблицы позволяет проанализировать каждый параметр на "чистоту" первой гармоники, по которой ведется дальнейший анализ САР.

Кроме измеренных параметров программа позволяет рассчитывать комплексы параметров K , которые в свою очередь также подвергаются гармоническому анализу, а также позволяет производить пересчет амплитуд колебаний давления P_M в амплитуду колебаний частоты вращения $\tau_{\text{вд}}$, соответствующее амплитуде колебаний регулируемого параметра на входе в регулятор.

В этой же таблице после расчета по заданному алгоритму рассчитываются сдвиг фаз и соотношения входных и выходных амплитуд выбранных звеньев, а также всей системы по регулируемому параметру.

По таким таблицам легко могут быть построены частотные характеристики как отдельных звеньев, так и всей системы регулирования в разомкнутом виде.

Результаты отработки комплекса средств для частотных исследований

Разработанный комплекс частотных исследований прошел экспериментальную отработку при испытаниях в составе двигателя.

В таблицах помещены примеры расчета динамических параметров звеньев и всей системы по измерениям, выполненным во время частотных испытаний одного из ГТД. По многочисленным экспериментам суммарная погрешность установки и вычисления частоты в диапазоне 0,04...2,5 Гц не превышает 1%. На частотах выше 2,5 Гц погрешность гармонического анализа учитывается, но точность (при необходимости) можно повысить увеличением опросности сигнала во время регистрации (следующая частота опроса 400 Гц).

Двойная амплитуда первой гармоники отличается от размаха колебаний не более чем на 10% при низких частотах и не более чем на 3...4% при высоких. Амплитуды второй и третьей гармоник не превышают 10% амплитуды первой гармоники, а в основном, находятся в пределах 3...4%.

На примере таблиц можно проанализировать характер поведения двигательных параметров $\tau_{\text{вд}}$, $\tau_{\text{нд}}$, $P_{2\text{вд}}$ при частотах 0,08 и 3,55 Гц. При частоте 0,08 Гц прослеживается подавляющее значение первой гармоники. Амплитуды второй гармоники не превышают 14% первой, а третьей — 7%. При частоте 3,55 Гц возмущения по $\tau_{\text{вд}}$ и $P_{2\text{вд}}$ еще проходят, но амплитуда первой гармоники снижается до ~ 65%, а амплитуды второй и третьей гармоник относительно первой возраста-

Т а б л и ц а

Т а б л и ц ы ч а с т о т н ы х и с с ы т а н и й

испытание 17.2 87
 34Р II F = 3,5556 Гц 22,340 I/C ПР I Точек
 22

индекс	МО	к	А I	А/А I	А 2/А I	А 3/А I	Δ F I	F12-F11	F13-F12	Δ N	В А I
1М	9,195	2,123	2,080	0,980	0,034	0,046	170,1	-111,4	-171,8		21,61
11	26,23	2,369	2,148	0,907	0,016	0,147	42,81	-25,01	-92,48		
12	67,62	6,430	4,153	0,646	0,340	0,474	-131,3	131,7	7,797		
13	5024	7,809	1,607	0,211	0,588	0,364	-159,6	-58,16	-57,83		
14	7,771	0,045	0,030	0,564	0,273	0,297	-11,13	-109,1	13,38		
15	14,02	0,185	0,152	0,823	0,148	0,248	30,78	-115,8	-290,4		
16	0,827	0,429	0,182	0,424	0,324	0,323	-192,7	32,74	278,8		
17	2,474	0,121	0,071	0,590	0,260	0,291	80,09	-153,3	-260,2		
18	12,14	0,166	0,118	0,836	0,037	0,335	3,569	-138,3	65,73		
19	12,22	0,245	0,149	0,606	0,077	0,363	5,798	-114,0	70,40		
20	0,900	0,251	0,102	0,404	0,377	0,260	-192,2	37,95	280,1		
21	2,615	0,134	0,089	0,664	0,255	0,242	63,40	-139,1	-266,0		

В В X	А В А	С I	А Н А	А В А	Р В А	Т В С
В X	А В А I	И I	от			
	-131,3	-37,01		-165,4	-137,1	-30,05
	0,192	69,18x	10,81	27,94	0,301	

от 27...47%. По $\tau_{\text{ГД}}$ гармонический сигнал сильно искажен: амплитуда первой гармоники снижается до 21% от общей амплитуды, а амплитуды второй и третьей гармоник составляет 36...59% от амплитуды первой гармоники.

В таблице приведены также параметры звеньев: ротора АД, ротора ДД, звена, характеризующегося давлением $P_{\text{ЭВВ}}$. Входной параметр этих звеньев - расход топлива G_T . Здесь также приводятся частотные данные всей системы регулирования с входным параметром $\tau_{\text{ВД}}$ и выходным $\tau_{\text{ДД}}$. По таким данным звеньев легко строятся их частотные характеристики.

В заключение следует отметить технологичность проведения частотных испытаний САР в составе ГТД, незначительные затраты времени на подготовительные операции, простоту и эффективность проведения анализа материалов испытаний и результатов автоматизированных вычислений, почти полное отсутствие ручных вычислительных операций.

В в о д ы

1. С целью экспериментального определения подробных динамических характеристик САР ГТД создан комплекс средств для автоматизированного частотного исследования.

2. При создании комплекса произведено усовершенствование способа частотного исследования САР ГТД, разработан релейный гидравлический пульсатор на базе быстродайствующих электромагнитных клапанов с электронным блоком управления, реализована автоматизированная регистрация и специальная обработка материалов испытаний на системе "Сиб-Лотос".

3. Экспериментальная отработка комплекса средств частотных исследований подтвердила его эффективность при проведении испытаний САР ГТД, автоматизированных вычислениях и анализе результатов испытаний.

Библиографический список

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1984. - 832 с.
2. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. - М.: Наука, 1973. - 584 с.

УДК 629.7.064:519.246.87

Е.А.Вакулич, В.В.Выборнов, С.В.Гамов, Е.Ю.Мордвинцев

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОСИСТЕМ ПО ПУЛЬСАЦИОННОМУ СОСТОЯНИЮ

Проблема обеспечения надежности работы гидросистемы (ГС) и проблема безразборного контроля являются в настоящее время в практике машиностроения одними из наиболее актуальных. В полной мере это относится к эксплуатации современных летательных аппаратов, обладающих гидросистемами большой сложности.

Высокая степень готовности ГС для заданной надежности осуществляется при переходе от традиционной системы эксплуатации по ресурсу к прогрессивной системе эксплуатации по техническому состоянию, что возможно только при наличии эффективных методов диагностирования.

Среди методов контроля за техническим состоянием ГС перспективны разработки в области акустической диагностики, отличительная особенность которой состоит в использовании в качестве источника информации динамических параметров. Это позволяет обеспечить быстрое принятие решений в аварийных ситуациях, способствует успешному обнаружению зарождающихся дефектов. Наиболее широко в данной области представлена вибродиагностика, в основном рассматривающая диагностирование машин циклического действия.

Наряду с вибродиагностикой получение информации о техническом состоянии агрегатов ГС возможно путем анализа пульсации рабочей среды. Плодотворность этого пути обусловлена следующими факторами: элементы агрегатов непосредственно взаимодействуют со средой, влияя на параметры пульсации, пульсации обладают большой энергией и хорошо различимы на фоне случайного шума, имеют общесистемный характер. Кроме того, измерение пульсации проводится с помощью комплекса, обеспечивающего высокую достоверность зарегистрированной информации, так как измерительный канал имеет стабильные динамические характеристики всех входящих элементов, в том числе и трубопроводной линии, измене-