

**САМАРСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
имени академика
С. П. КОРОЛЕВА**

А. Г. КОНЕВ

**ЭЛЕКТРОННЫЕ
СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ
АВИАЦИОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

**САМАРА
1992**

Государственный комитет РСФСР
по делам науки и высшей школы

Самарский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

А.Г.К о н е в

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебное пособие

Самара 1992

УДК 629.7.036.3-55

Электронные системы управления авиационных двигателей: Учеб. пособие /А.Г.К о н е в;
Самар. авиац. ин-т. Самара, 1992. 60 с.

ISBN 5-230-16914-1

Рассмотрены специфические особенности работы систем автоматического управления (САУ) авиадвигателей. Приведены технико-экономические обоснования перехода на электронные системы управления (ЭСУ). Приведен анализ преимуществ полностью электронных САУ по сравнению с супервизорными. Приведены примеры ЭСУ отечественных и зарубежных авиадвигателей. Рассмотрены вопросы надежности ЭСУ и их интегрирование с САУ самолета.

Пособие предназначено для студентов, изучающих курс "Регулирование авиационных двигателей". Выполнено на кафедре "Автоматические системы энергетических установок".

Табл. 5. Ил. 23.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С.П.Королева

Рецензенты: И.С.З а г у з о в, Л.И.Б р у д к о в

ISBN 5-230-16914-1



Самарский авиационный институт, 1992

ОТ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ К ЭЛЕКТРОННЫМ САУ

Авиационный двигатель как объект регулирования по сравнению со стационарными установками обладает следующими специфическими особенностями:

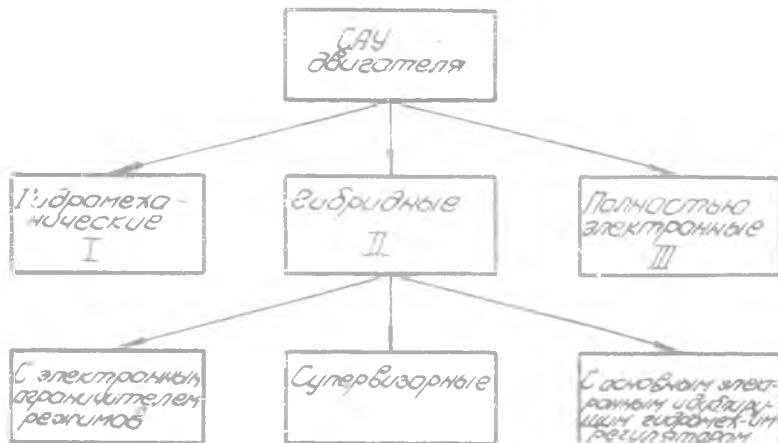
многорежимность (так, например, ~~температура~~ температура двигателя от режима малого газа до взлетного изменяется в 15-20 раз);

работа двигателя при существенно изменяющихся внешних условиях, а именно, в диапазоне изменения температуры окружающей среды от -60 до $+40^{\circ}\text{C}$ и давления от 780 до 15 мм рт.ст. (следует заметить, что изменение температуры на входе от -30 до $+30^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению тяги двигателя на 30-40%);

высокие требования по точности поддержания рабочих параметров.

Указанные особенности и специфика эксплуатации двигателя обуславливают применение сложной системы автоматического управления (САУ). Отдельные узлы САУ двигателя могут быть построены на элементах различной физической природы (механические, пневматические, гидравлические, электрические, электронные, оптические и т.д.) Выбор того или иного физического принципа определяется рядом функциональных, технических и экономических критериев. Некоторые узлы САУ, например исполнительные органы, должны выполняться только в виде механических устройств. А вот функции вычисления, логики, запоминания в настоящее время наиболее успешно решаются электронными системами. Классификация САУ двигателей приведена на рис. 1.

Основным отличительным признаком гидромеханических САУ является то, что все счетно-решающие операции, необходимые для регулирования двигателя, выполняются механизмами, состоящими из рычагов, кулачков, сильфонов и т.п. В связи с усложнением авиадвигателей



Р и с. I. Классификация САУ двигателей

число функций, выполняемых регулятором, непрерывно растет. Так, за период с 1960 по 1970 гг. функциональная насыщенность САУ удвоилась, одновременно возросли ее вес и стоимость. Особенностью и слабым местом гидромеханических САУ является то, что для выполнения каждой из заданных функций регулирования необходим отдельный, часто очень сложный узел со своей счетно-решающей частью и памятью, выполненный на плоском или объемном кулачке. Увеличение числа функций, реализуемых САУ, вызванное усложнением двигателей и стремлением оптимизировать их характеристики, приводит к непосредственному увеличению числа узлов гидромеханической САУ и соответственно к увеличению веса и стоимости систем и, как следствие, к снижению их надежности (начинает действовать закон перехода количества в качество). В гидромеханической САУ введение новых функций или изменение программ приводит к необходимости замены целых узлов и даже коренной переделке агрегата в целом.

Гидромеханическая САУ требует большого объема наземного технического обслуживания и проверки в воздухе для проведения необходимых подрегулировок после замены агрегатов. Бывает нужно настроить 7-10 регулируемых элементов, с помощью которых устанавливается время приемистости двигателя, частота вращения на режиме малого газа, максимальные частоты вращения роторов и др. Кроме того, гидромеханичес-

кий регулятор не позволяет компенсировать изменение плотности топлива и износ двигателя. поэтому большие затраты времени связаны с первоначальной регулировкой двигателя и с периодическими подрегулировками в процессе эксплуатации. В меньшей степени указанные выше обстоятельства характерны для гибридных САУ.

В связи с ростом числа функций, выполняемых регулятором, появились гидромеханические САУ с электронными ограничителями режимов, опасных для двигателя. С 1970 г. двигатели фирмы Роллс-Ройс имеют электронные ограничительные регуляторы по параметрам n и T_c . Двигатель НК-8 оборудован электронным ограничителем температуры газов.

Супервизорный принцип построения САУ означает, что воздействие со стороны электроники на исполнительные устройства ограничено. В супервизорных САУ регулирование двигателя по обычным программам выполняет гидромеханический регулятор, а электронный регулятор корректирует характеристики гидромеханического, обеспечивая этим оптимизацию характеристик двигателя. Супервизорная САУ работает, как правило, в области квазистационарных режимов. Приемистость и сброс газа осуществляются гидромеханической системой. Для супервизорной системы характерно наличие контура контроля состояния двигателя и информации пилота о нем. В случае отказа электроники гидромеханический регулятор позволяет обеспечивать продолжение полета, но с несколько ухудшенными характеристиками двигателя. В супервизорной схеме существует возможность сочетания высокой точности регулирования электронной системы с большой надежностью гидромеханического регулятора.

Супервизорная система регулирования установлена на двигателях "Олимп 593" СПС "Конкорд", НК-144, НК-86. Дальнейшим развитием САУ являются такие схемы, в которых все без исключения функции управления выполняет электронный регулятор, но в то же время имеется простой гидромеханический регулятор, который включается только в случае полного отказа и отключения электроники. Он позволяет завершить полет без аварии. Такие САУ имеют двигатели "Джем" и "Пегас".

Полностью электронные САУ характеризуются тем, что все функции регулирования, в том числе и дублирование, осуществляются электронными узлами, а гидромеханика используется только в системах топ-

2-509

ливоподачи и исполнительных механизмах. Полностью электронные САУ (и гибридные тоже) до последнего времени разрабатывались и применялись как в аналоговом, так и в цифровом варианте. Однако в связи с прогрессом в микропроцессорной технике и с перспективами интеграции САУ двигателя с другими автоматическими системами самолета современные ЭСУ выполняются только на базе ЦЕМ. Использование в САУ авиадвигателей ЦЕМ позволяет совершить качественный скачок по всем показателям систем:

неограниченные возможности расширения числа функций и повышения их сложности:

осуществление многопараметрического (многоконтурного) регулирования, особенно для двигателей изменяемого цикла;

интеграция регулирования модулей силовой установки, а в перспективе и полная интеграция с самолетными системами;

обеспечение непрерывного самоконтроля САУ и диагностики двигателя.

Эволюция САУ авиадвигателей показана на рис. 2-6. Процентное соотношение по годам функций, выполняемых гидромеханическими и электронными устройствами в САУ, показывает диаграмма на рис. 7. В табл. I приведены некоторые сравнительные характеристики гидромеханических и электронных САУ.

Т а б л и ц а I

Характеристики	Гидромеханическая САУ	ЭСУ
Надежность	Высокая	Требует резервирования
Стоимость	Высокая	Сравнительно низкая
Вес	До 30% от веса двигателя	В 7-10 раз меньше
Точность	0,8%	0,1-0,2%
Возможность дублирования	Затруднена	Практически без ограничен.
Стоимость обслуживания	Высокая	Незначительная
Возможность интеграции с другими системами ЛА	Затруднена	Не вызывает затруднений
Чувствительность к свойству топлива	Высокая	Низкая

Характеристики	Гидромеханическая САУ	ЭСУ
Пожароопасность	Высокая	Низкая
Число выполняемых функций	до 30	Уже 250 для современных САУ

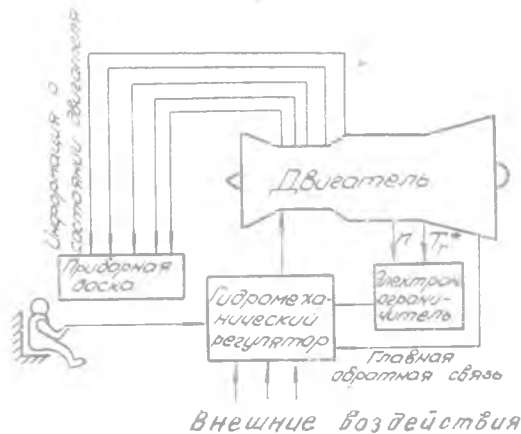


Р и с. 2. Гидромеханическая САУ

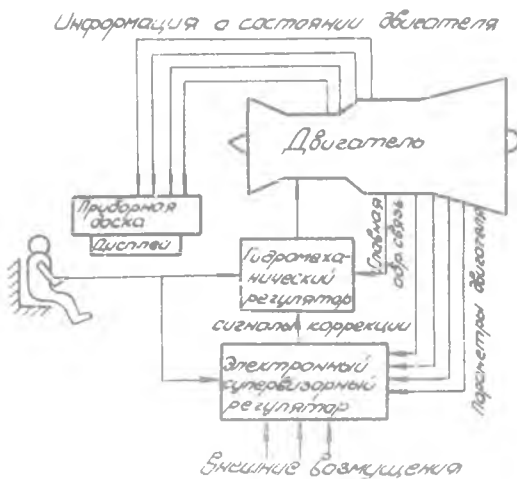
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЭСУ

Рассматривая этот вопрос, бывает трудно разделить технические и экономические преимущества ЭСУ по сравнению с гидромеханической, не забывая при этом про экологию и удобство обслуживания. Несомненно, техническими преимуществами являются следующие:

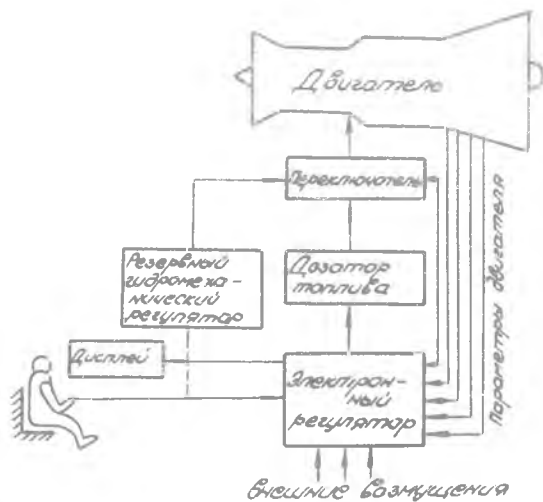
повышение ресурса двигателя в среднем на 50% за счет исключения перегрузок при взлете и наборе высоты;



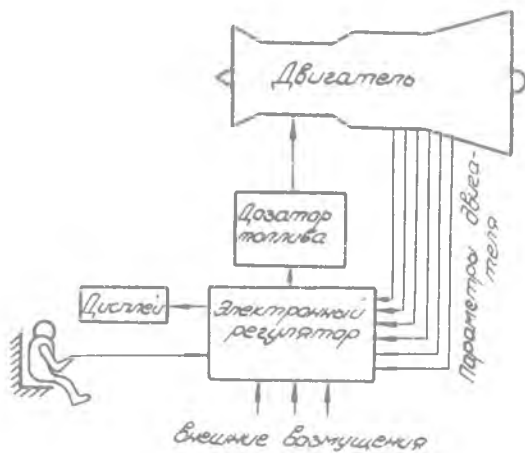
Р и с. 3. Гибридная САУ с электронным ограничителем режимов



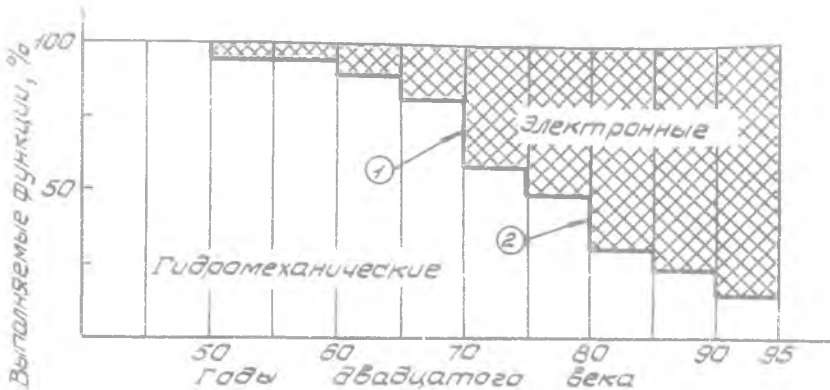
Р и с. 4. Супервизорная САУ



Р и с. 5. Гибридная САУ с основным электронным и дублирующим гидромеханическим регулятором



Р и с. 6. Полностью электронная САУ



Р и с. 7. Функции, выполняемые гидромеханическими и электронными устройствами: 1 - рост цен на нефть и появление БИС; 2 - усложнение двигателей, повышение требований по точности, увеличение числа регулируемых параметров

улучшение динамических характеристик двигателя. Например, использование цифровой ЭСУ ДДЭС на двигателе *F 100 PW 220* истребителя *F -15* позволило уменьшить время приемистости от режима малого газа до максимального форсажного с 7 до 4 секунд (специалист в области эксплуатации истребителей это прекрасно оценит);

высокая степень адаптации. ЭСУ гораздо легче совершенствовать, так как сами двигатели модифицируются на протяжении всего срока службы. Усовершенствование гидромеханической САУ является дорогостоящим мероприятием, в то время как ЭСУ чаще всего требуют только изменения программного обеспечения;

значительное уменьшение разброса тяги нескольких двигателей (синхронизация их работы). Это происходит за счет ликвидации тросовой связи между кабиной пилота и двигателем (самолет США "Принцесса" имеет 10 ТВД);

существенное повышение (в 5-10 раз) точности поддержания регулируемых параметров. Если говорить о параметрах компрессора, то это означает приближение линии рабочих режимов к границе помпажа, т.е. более полное использование возможностей двигателя при гарантированном запасе устойчивости;

интеграция с другими системами самолета. Результаты испытаний в 1986 г. цифровой САУ *HIDEC* свидетельствуют о возможности повышения на 5-10% тяги и снижения на 15% расхода топлива благодаря интеграции САУ двигателя *P 100 PW 220* и САУ самолета *F-15*;

реализация сложных программ регулирования;

увеличение на порядок и более числа функций, выполняемых системой управления;

проведение диагностики состояния двигателя, что способствует повышению надежности и увеличению ресурса;

снижение веса САУ в 7-10 раз по сравнению с гидромеханической. Экономическими преимуществами применения ЭСУ будут:

уменьшение расхода топлива за счет регулирования тяги по оптимальным законам;

удешевление обслуживания САУ и двигателя на 50-80%;

уменьшение случаев задержек отмен вылета и убывтков от выключения двигателей в полете в 3 раза;

уменьшение вдвое стоимости топливорегулирующей аппаратуры (по данным фирмы "Гамильтон Стандарт");

опережающая диагностика отказов двигателя. Применение цифровой ЭСУ *DECI* фирмы "Лукас" на истребителе "Торнадо" позволило английским ВВС сэкономить 4 миллиона фунтов стерлингов в основном за счет выявления отказов, ранее не поддававшихся контролю;

снижение затрат не только изготовителям, но и авиакомпаниям при использовании ЭСУ *FADEC*. Например, для замены гидромеханического регулятора в аэропорту (имеется в виду зарубежный аэропорт) требуется 3 часа, а для замены блока или всей системы *FADEC* нужно 15 минут;

снижение стоимости разработки, производства и обслуживания за счет применения типовых блоков и использования опыта электронной промышленности;

простота изменения программ регулирования. Это способствует уменьшению времени и средств на доводку двигателя и проведение контрольно-сдаточных испытаний;

существенное снижение эксплуатационных затрат. Большое внимание специалисты уделяют снижению эксплуатационных затрат, такое большое, что проектирование нового двигателя начинается с их подсчета. Действительно, при большом парке самолетов и высокой ин-

тенсивности полетов эксплуатационные затраты составят большую часть всех расходов, включая проектирование и изготовление.

Преимущества цифровой ЭСУ, как они представляются сотрудникам фирмы Кузнецова, приведены на рис. 8.

Представление о стоимости некоторых ЭСУ дает табл. 2. Несомненно, использование ЭСУ внесет вклад в улучшение экологической обстановки путем:

снижения токсичности выхлопа за счет оптимизации процессов горения с помощью более точного дозирования топлива и воздуха;

снижения шума за счет повышения устойчивости работы газовой турбины.

Т а б л и ц а 2

Двигатель (самолет)	<i>JT9D-7R4</i> (B767, A310)	<i>PW2037</i> (B757)	<i>PW4000</i> (A310)
Тип САУ	Супервизорная	<i>FADEC</i>	<i>FADEC</i>
Стоимость САУ в долларах	> 100000	~ 90000	~ 67000
Число выполняемых функций*	31	162	158
Стоимость реализации одной функции в долларах	~ 1200	~ 340	~ 280

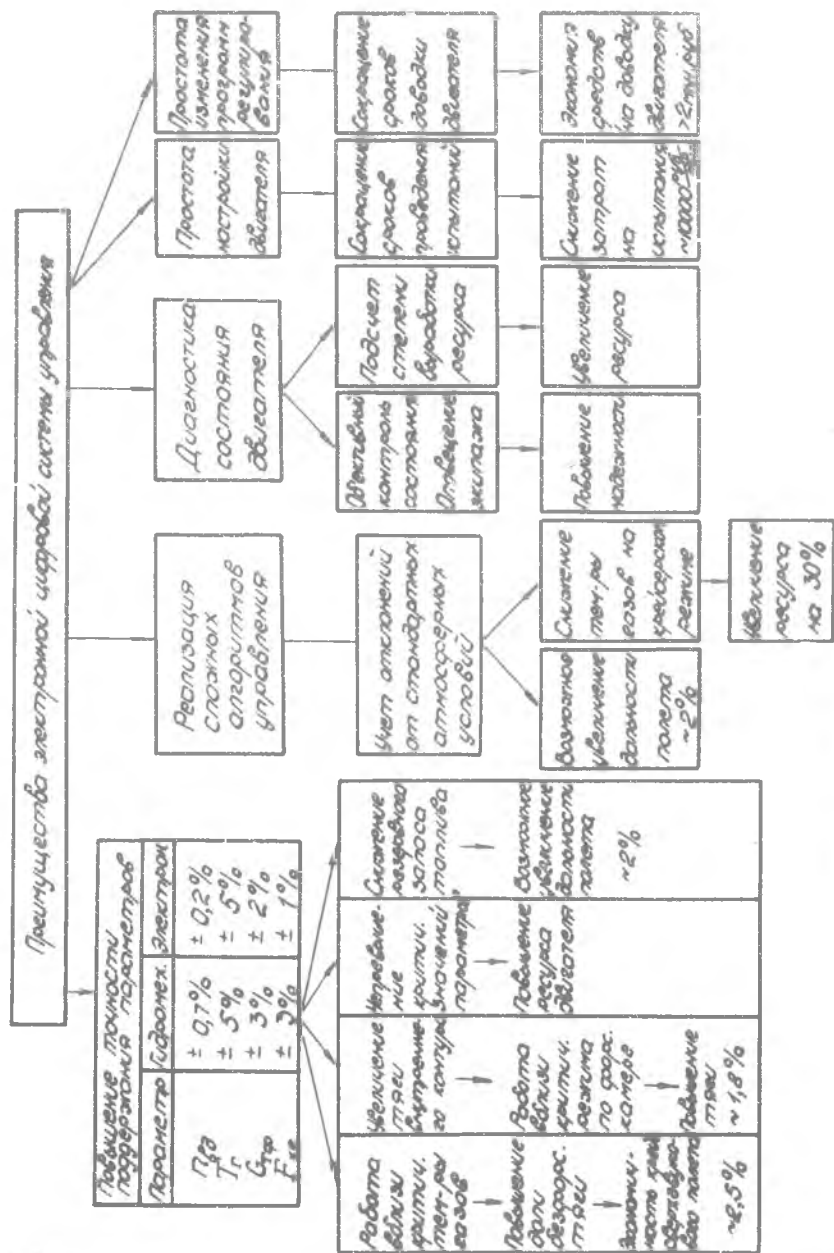
Применение ЭСУ способствует разгрузке пилота (экипажа) за счет: малого усилия на РУДе;

отсутствия гистерезиса при задании режима;

точного соответствия тяги положению РУД;

автоматического поддержания параметров в допустимых пределах; минимизации времени приемистости.

При полете на малых высотах, когда осуществляется отслеживание рельефа местности, тяга двигателя (режим работы) должна задаваться непосредственно регулятором системы управления полетом. Загрузка пилота в этом случае уменьшается, так как ему не нужно манипулировать РУДом и он сможет сосредоточить свое внимание на выполнении других операций. Разгрузка пилота (экипажа) способствует повышению безопасности полетов. Создание ЭСУ позволяет разработать систему



Р и с . 8. Преимущества цифровой ЭСУ

состоящую в основном из стандартных блоков, которая может быть установлена на любой двигатель. Фирма "Тамилтон Стандарт" разработала ЭСУ *БЕС/ЖСГ118* пригодную для любого авиационного двигателя. Среди недостатков и проблем использования ЭСУ можно отметить следующие:

1. Для всех гибридных систем их эффективность будет зависеть от согласования характеристик электронного и гидромеханического контуров, поскольку точность регулирования, законы регулирования и постоянные времени в них различны.

2. Электронный регулятор должен функционировать рядом с двигателем при высоких температурах и интенсивных вибрациях. Способность электронных блоков выдерживать такие условия до конца не выяснена.

3. Большой проблемой является передача сигналов без погрешностей, вызванных их электрической природой. Помехозащищенность линий передачи сигналов низка.

4. Использование аналоговых датчиков и исполнительных органов, работающих в аналоговом режиме, вызывает необходимость применения дополнительных блоков преобразования "аналог-код" и "код-аналог".

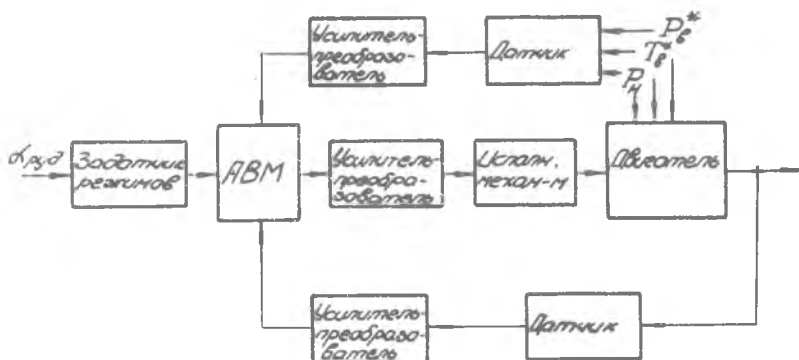
5. Возникают серьезные проблемы с охлаждением электронных блоков (температура должна быть не выше 65-80°C). Нужно эффективное термостатирование блоков ЭВМ. Эта проблема сравнима с проблемой теплоизоляции трубопроводов и агрегатов на двигателях с криогенным топливом.

6. Очень важным является обеспечение надежности и стабильности электропитания БЦВМ. В качестве источников питания можно принять только генераторы переменного тока, установленные на каждом двигателе. Уже сейчас разработаны генераторы массой 0,9-1,5 кг, объединенные в один узел с топливным насосом. В перспективе для питания всей ЭСУ будет достаточно мощности не более 100 Вт.

АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аналоговые ЭСУ являются логическим продолжением развития гидромеханических и пневматических САУ двигателей. Достоинством является то, что в аналоговых ЭСУ процесс регулирования аналогичен

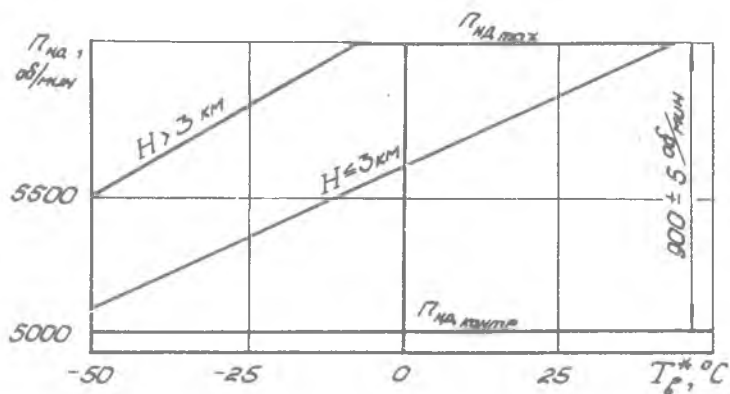
процессам в гидромеханических САУ с тем отличием, что вместо пневматических, гидравлических сигналов передаются и преобразуются электрические аналоговые сигналы. Аналоговые ЭСУ явились промежуточными системами на переходном этапе от гидромеханических к цифровым ЭСУ, хотя ЭСУ с АВМ имеют и самостоятельное значение. Блок-схема аналоговой ЭСУ показана на рис. 9. Напряжения, соответствующие регулируемым параметрам и внешним условиям, зарегистрированные датчиками через усилители-преобразователи, подаются на вход в АВМ. В АВМ поступают также сигналы от задачика режимов. В решающем блоке АВМ формируются программы регулирования, определяются величины регулирующих факторов в зависимости от $\alpha_{руд}$. Напряжения на выходе из АВМ, соответствующие новым значениям регулирующих факторов ($\theta_{т}$, $\theta_{тф}$, $F_{с}$, $U_{двиг}$...), поступают в усилитель и далее к исполнительным механизмам.



Р и с. 9. Блок-схема аналоговой ЭСУ

Заслуживает более подробного рассмотрения аналоговая супервизорная ЭСУ двигателя НК-86. Двухконтурный турбореактивный двигатель НК-86 имеет один регулирующий фактор - $\theta_{т}$ и соответственно один (основной) регулируемый параметр - $n_{вд}$. Аналоговая ЭСУ двигателя используется для регулирования частоты вращения ротора НД на взлетном режиме и средней температуры газа за турбиной на всех

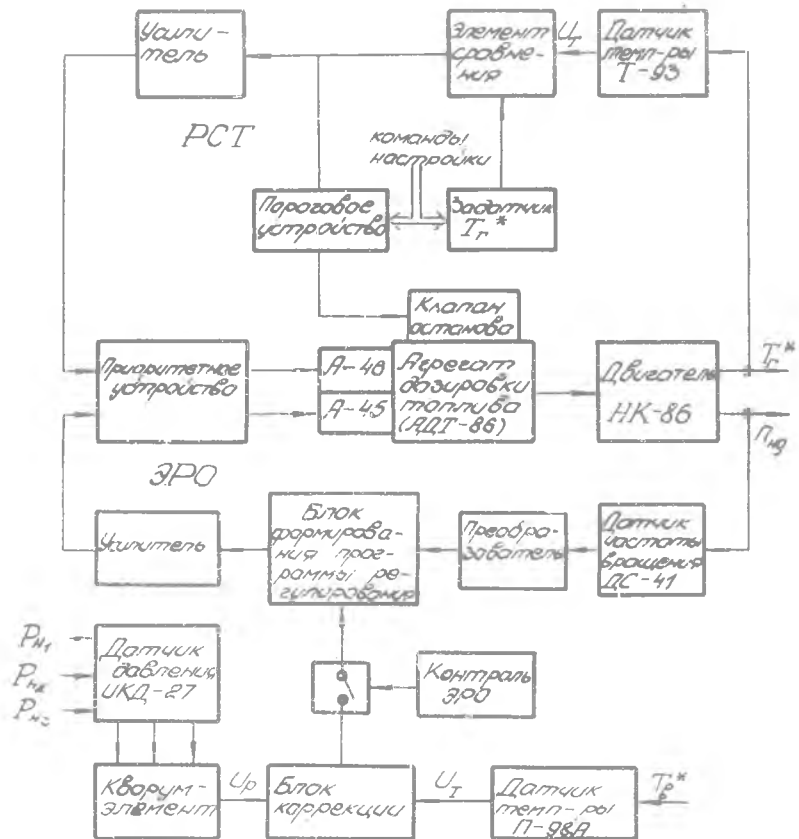
режимах работы. Электронный регулятор n_{HD} (ЭРО) поддерживает частоту вращения ротора НД в соответствии с программой на рис.10, а электронный регулятор температуры (РСТ) работает на ограничение T_T^* на режимах запуска ($T_{T, зап}^*$), взлета ($T_{T, взл}^*$), максимальной продолжительности ($T_{T, мл}^*$). Электронные регуляторы воздействуют на расход топлива в двигателе через АДТ (агрегат дозировки топлива).



Р и с. 10. Программа регулирования двигателя по температуре воздуха на входе при действии ЭРО

Блок-схема ЭСУ приведена на рис. 11. Информация о величине регулируемого и ограничиваемого параметров двигателя и параметров воздушного потока воспринимается: ДС-41 – электроиндукционным датчиком частоты вращения ротора НД; Т-93 – хромель-алюминиевым датчиком температуры T_T^* ; П-98А – терморезисторным датчиком температуры T_B^* ; ИКД-2ТДА – индуктивным датчиком давления окружающей среды P_H .

Сигнал с выхода датчика ДС-41 поступает в преобразователь, который выдает в блок формирования программы регулирования напряжение, пропорциональное частоте вращения n_{HD} . В блок формирования программы регулирования поступает также сигнал с блока коррекции, на вход которого подается напряжение, пропорциональное T_B^*



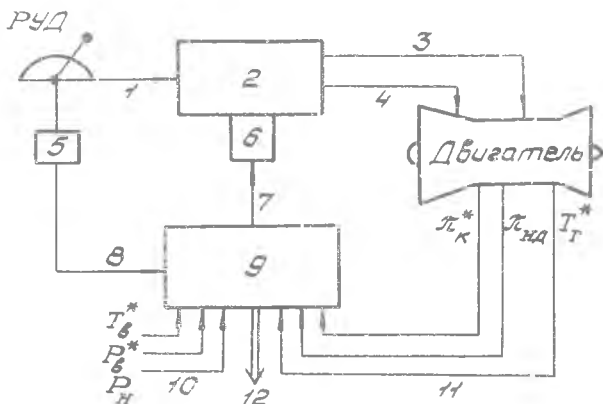
Р и с. II. Блок-схема супервизорной ЭСУ двигателя НК-86

и P_H . Причем сигнал поступает с кворум-элемента, который выдает напряжение по двум близким из трех сигналов с датчиков ИКД-2ТД, установленных на трех двигателях. Блок "Контроль ЭРО" служит для проверки нормального функционирования электронного регулятора перед полетом.

Сигнал в виде изменения напряжения, соответствующего заданному значению $\theta_{\text{пр}}$, подается с выхода блока формирования программы в выходной усилитель ЭРО и далее на приоритетное устройство. При ограничении температуры газа за турбиной ЭДС термопар Т-93 (8 датчиков, включенных параллельно) сравнивается с заданным значением, соответствующим $T_{\text{т.зоп}}^*$, $T_{\text{т.вкл}}^*$, $T_{\text{т.мак}}^*$ и сигнал рассогласования, предварительно усиленный, подается в выходной усилитель РСТ. Напряжение с выхода РСТ сравнивается с напряжением ЭРО в приоритетном устройстве, и сигнал, соответствующий меньшему расходу топлива $\theta_{\text{пр}}$, проходит в блок управления клапанами МКТ-158 (А45), МКТ-159 (А46). Эти клапаны управляют давлением в рабочей полости сервомотора дозирующей иглы АДТ. Если в процессе запуска или на режиме обратной тяги температура газов выше значения $T_{\text{г}}^*$ настройки на $13-27^{\circ}\text{C}$ в течение 0,7-1,3 с, срабатывает пороговое устройство и выдает сигнал на останов двигателя.

Применение ЭСУ на двигателе НК-86 оптимизирует взлетный режим работы, способствует снижению удельного расхода топлива, предохраняет узлы двигателя от термических и механических перегрузок, а также повышает ресурс. Примером гибридной САУ (рис. 12) является комбинированная электронно-гидравлическая система, установленная на двигателе PW -4000 самолета B767. В ней электронный контур выполняет супервизорную функцию. На вход цифрового регулятора поступают сигналы, характеризующие рабочие параметры двигателя, положения РУД и параметры окружающей среды. Электронная часть системы подает на топливный регулятор сигнал, который характеризует величину тяги (через частоту вращения или степень сжатия), соответствующую данному положению РУД. Электронный регулятор следит за тем, чтобы не превышались параметры, значения которых ограничены. Достоинством этой системы является высокая надежность благодаря наличию гидромеханического регулятора.

Супервизорная серийная САУ ЕЕС-90, изготовленная в количестве 5000 штук, используется на двигателе $F 100 PW220$. В этой систе-



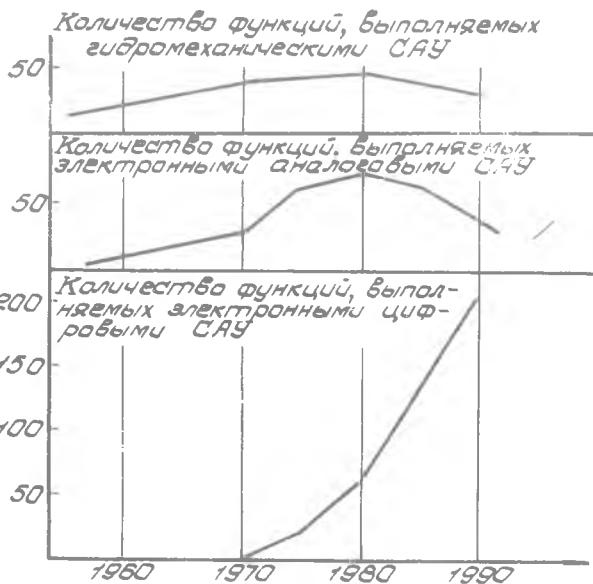
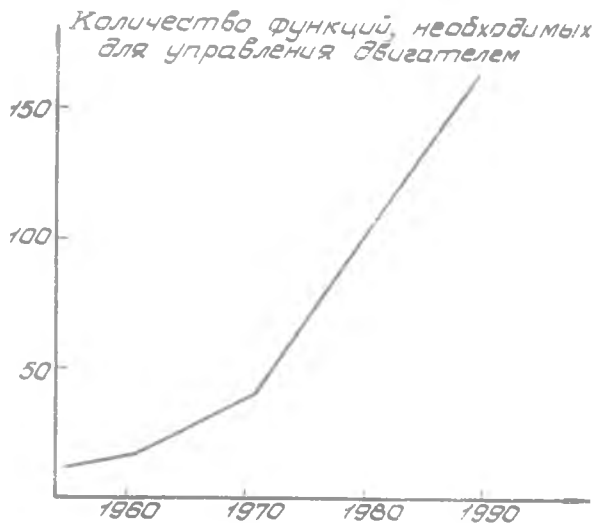
Р и с. 12. Блок-схема супервизорной ЭСУ двигателя PW-4000: 1 - соединительный кабель; 2 - гидромеханический регулятор; 3 - подача топлива в двигатель; 4 - регулирование лопаток НА и отбора воздуха из компрессора; 5 - датчик положения РУД; 6 - электромотор системы подстройки; 7 - управляющий сигнал; 8 - соединительный кабель; 9 - цифровой супервизорный регулятор; 10 - сигналы внешних условий; 11 - сигналы обратной связи от двигателя; 12 - сигнал на дисплей пилота

ме гидромеханическая часть управляет всеми режимами, кроме максимального и малого газа.

Цифровая супервизорная система установлена на двигателях *PT6A-744* и *PT6A-535*.

Недостатками аналоговых ЭСУ являются: низкая точность, малое быстродействие, ограниченное число выполняемых функций, высокая стоимость выполнения одной функции, существенные трудности в интеграции САУ двигателя с другими автоматическими системами самолета.

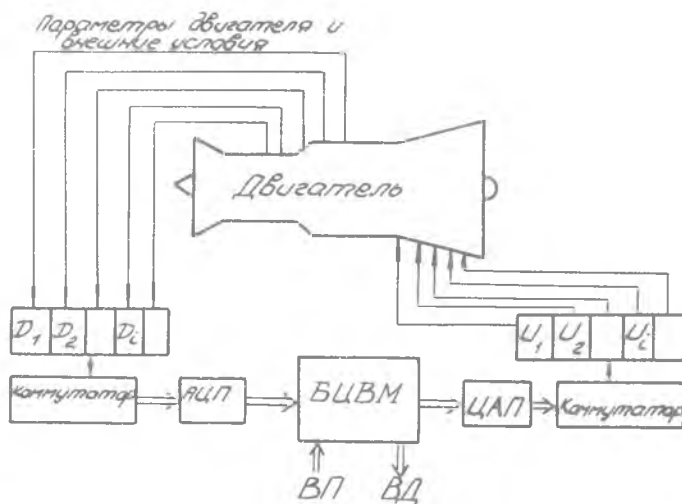
Аналоговые системы применялись в процессе внедрения электроники в САУ двигателей в гибридных (преимущественно супервизорных) системах. В настоящее время они вытеснены цифровыми ЭСУ.



Р и с. 13. Количество функций, необходимых для управления двигателем

ЦИФРОВЫЕ ЭСУ ДВИГАТЕЛЕЙ

Цифровые ЭСУ в настоящее время являются наиболее распространенными благодаря их очевидным преимуществам, главными из которых являются: практически неограниченное количество выполняемых функций (рис. 13), высокая точность регулирования, возможность интеграции САУ двигателя с другими системами самолета. Блок-схема цифровой ЭСУ приведена на рис. 14 (усилители и блоки питания не показаны). Цифровой системой управления называется система, в которой управляющие сигналы выражаются в числовом коде (преимущественно двоичном). Цифровая система содержит в замкнутом контуре цифровое вычислительное устройство, служащее для обработки информации. В зависимости от типов датчиков и их характеристик САУ с ЦВМ может содержать устройства для преобразования аналоговых сигналов в цифровые и наоборот.



Р и с. 14. Блок-схема ЭСУ двигателя: Д - аналоговые датчики; АЦП - аналого-цифровой преобразователь; БЦВМ - бортовая цифровая вычислительная машина; ЦАП - цифроаналоговый преобразователь; И - аналоговые исполнительные устройства; ВП - ввод программы (от пилота); ВД - вывод данных на дисплей

Датчики

Датчики авиационных систем управления работают в условиях больших механических и термических воздействий и поэтому на них приходится большая часть отказов в САУ. Развитие цифровых ЭСУ вызывает большую практическую потребность в разработках цифровых датчиков и устройств сопряжения аналоговых датчиков с цифровыми ЭВМ. В условиях совершенствования мини-ЭВМ и микропроцессоров, снижения их стоимости оказывается важным сохранить минимальные затраты на датчики и устройства сопряжения. За длительный период эксплуатации аналоговых датчиков в измерительных системах достигнут высокий уровень их отработки и поэтому в большинстве промышленных систем ряд измерений еще долгие годы будет оставаться аналоговым. Это особенно относится к системам, где скорости протекания регистрируемых процессов относительно невелики.

В авиационных системах скорости протекания процессов значительны и для них применение цифровых датчиков весьма актуально. Формирование управляющих (выходных) сигналов для ЦВМ возможно двумя путями: применение отработанных аналоговых датчиков совместно с АЦП;

разработка (или совершенствование имеющихся) датчиков с цифровым выходным сигналом.

Датчики, применяемые в САУ авиадвигателей, служат для измерения следующих параметров: температуры, статического и динамического давлений, частоты вращения, расхода топлива; линейных и угловых перемещений.

Для измерения температур в диапазоне $-60 \dots +300^\circ\text{C}$ наибольшее распространение получили аналоговые датчики, в которых используется зависимость электрического сопротивления чувствительного элемента от температуры. Температура газа в районе турбины измеряется платиновыми или хромель-алюминиевыми термопарами аналоговым выходным сигналом и большой термической инерцией. В настоящее время для измерения высоких температур разрабатываются датчики в виде акустических генераторов колебаний, выходной сигнал которых (частота) является функцией температуры. Такие датчики не требуют аналого-цифровых преобразователей. Фирмой "Лукас" разработан пирометрический датчик для измерения температуры лопаток турбины, который

проходил испытания на двигателе "Олимп 593". Этот датчик обеспечивает измерение 99,5% истинной температуры через 5 мкс и позволяет фиксировать температуру поверхности каждой из лопаток турбины.

Измерение давлений производится потенциометрическими, пьезоэлектрическими, емкостными, индукционными датчиками. Все они имеют аналоговый выходной сигнал. Фирмой "Гамильтон Стандарт" разработан дискретный датчик, имеющий на выходе электрический сигнал с частотой, пропорциональной давлению. Его высокая точность (0,1%) сочетается с удобством использования выходного дискретного сигнала в цифровой системе управления. Чувствительным элементом датчика являются вибрационные цилиндры, которые преобразуют пневматическое давление в электрический сигнал. Принцип действия датчика такой же, как у электрически возбуждаемого камертона. Когда давление внутри цилиндра растет, жесткость цилиндра повышается. Собственная частота цилиндра растет пропорционально изменению давления. Выходной сигнал имеет частоту в диапазоне 4,5-5,0 кГц. На двигателях серий *RB211* и *JT9A* принята к применению микропроцессорная система измерения параметра *EPR*¹.

Применение этой системы позволяет повысить в 3 раза надежность и в 2 раза точность измерения по сравнению с электромеханическими системами. Диапазон измерения параметра *EPR* лежит в пределах 0,8-2,0, а погрешность измерения $\pm 0,35-0,6\%$.

Для измерения частоты вращения вала турбокомпрессора наибольшее распространение получили бесконтактные датчики. Такие датчики не имеют механического контакта с валом, а их выходной сигнал представляет собой последовательность электрических импульсов, частота следования которых пропорциональна частоте вращения вала, что представляет удобство в цифровых ЭСУ. Известны следующие бесконтактные датчики измерения скорости вращения: оптические; радиоактивные; магнитоиндукционные.

Оптический датчик содержит источник света, луч которого через оптическую систему направлен на вал. На валу нанесена метка, например в виде наклонного зеркала. Отраженный от метки луч попадает на фотоприемник. О числе оборотов вала судят по частоте модуляции све-

*EPR*¹ представляет собой отношение давления на выходе из двигателя к давлению на входе в него, т.е. он характеризует тягу, развиваемую двигателем.

тового потока, попадающего на фотоэлемент. Использование оптических датчиков в условиях работы на двигателе является нежелательным, так как оптический датчик требует наличия источника, приемника и оптической системы, работа которых в условиях больших виброперегрузок и высоких температур (до +300°C) затруднена. Кроме того, на работу оптического датчика большое влияние оказывают осевые и радиальные "биения" вала.

Принцип действия радиоактивного датчика состоит в следующем: на поверхности вала или какой-либо точке связанной с ним детали укрепляется капсула с радиоактивным изотопом. На некотором расстоянии от вращающейся детали за экраном, имеющим щель, устанавливается детектор радиоактивных излучений, соединенный с регистрирующим устройством. Частота импульсов, попадающих на детектор, пропорциональна частоте вращения вала. Основным недостатком радиоактивного датчика является необходимость в биологической защите, что значительно увеличивает его габариты и массу.

Широкое распространение у нас и за рубежом получили магнитоиндукционные датчики. Принцип действия их основан на преобразовании скорости вращения вала в электрические импульсы с частотой, пропорциональной скорости вращения. Магнитоиндукционные датчики имеют сравнительно небольшие габариты и массу, простота конструкции сочетается у них с виброустойчивостью и вибропрочностью. Датчики работают в широком диапазоне температур, обладают большим ресурсом и надежностью. Магнитоиндукционные датчики разрабатываются фирмами "Смит Индастрие ТД", "Бендикс Корпорейшн" и применяются как для индикации числа оборотов, так и в системах регулирования двигателя. Магнитоиндукционный датчик типа ДС-4I используется в САУ двигателя НК-86.

Благодаря наличию в ЭСУ БЦВМ возможно измерение ускорений вращения вала турбокомпрессора. Для этих целей используется информация дискретного измерителя частоты вращения в виде первой разности i -го и $(i - 1)$ значений:

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{n_i - n_{i-1}}{T},$$

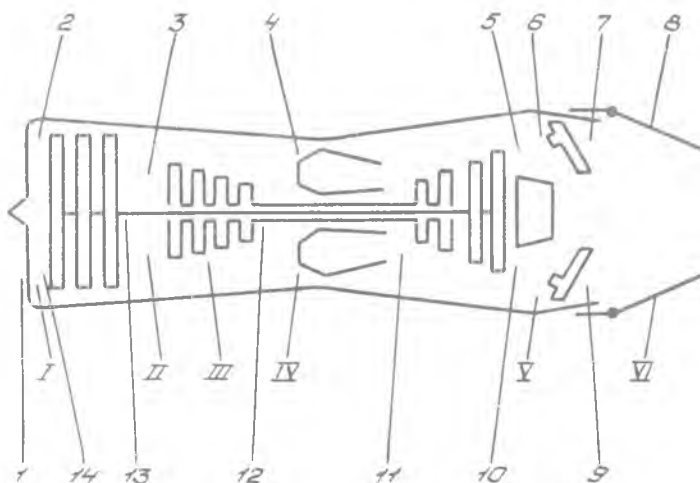
где n_i и n_{i-1} - средние значения частоты вращения вала на соответствующих циклах измерения; T - время между измерениями n_i и n_{i-1} значений.

погрешность измерения ускорения вала на режимах приемистости и сброса газа составляет 2-4%.

ЦИФРОВАЯ САУ ДВС ДВИГАТЕЛЯ F100PW220

Система ДВС - это цифровая система управления с полной ответственностью, с выборочным резервированием элементов, содержащая алгоритмы обнаружения отказов, позволяющие определить неисправности на различных режимах работы. На двигателе сохранены неизменными гидромеханические агрегаты (дозаторы топлива, силовые исполнительные механизмы). Имеется резервный гидромеханический регулятор с ограниченным набором функций.

На рис. 15 изображена схема двигателя и показаны регулируемые параметры и регулирующие факторы. Причем к входным параметрам кроме параметров окружающей среды отнесены сигналы о положении исполнительных органов. Регулирующие факторы $\alpha_{ВНА}$, $\alpha_{НА}$, $F_{КР}$ действуют при запуске и на переходных режимах.



Р и с. 15. Схема двигателя F 100 PW220: Регулируемые и входные параметры: I) $P_{В}^*$; 2) $\alpha_{ВНА}$; 3) $\alpha_{НА}$; 4) $\beta_{Т}$; 5) $P_{Т}^*$; 6) $\beta_{ТФ}$; 7) сигнал включения форсажной камеры; 8) $F_{КР}$; 9) положение крана включения топливных коллекторов форсажной камеры; 10) $T_{Т}$; II) $P_{К}^*$; 12) $P_{ВД}$; 13) $P_{НА}$; 14) $T_{В}$; Регулирующие факторы: I-угол поворота лопаток ВНА вентилятора ($\alpha_{ВНА}$); II-угол поворота лопаток НА компрессора ($\alpha_{НА}$); III - клапан перепуска воздуха; IV-расход основного топлива ($\beta_{Т}$); V-расход форсажного топлива ($\beta_{ТФ}$); VI-площадь критического сечения сопла ($F_{КР}$)

Законы управления, содержащиеся в памяти БЦВМ:

1) программное регулирование $\alpha_{внв}$, $\alpha_{на}$, $F_{кр}$;

2) замкнутое регулирование θ_T и $F_{кр}$.

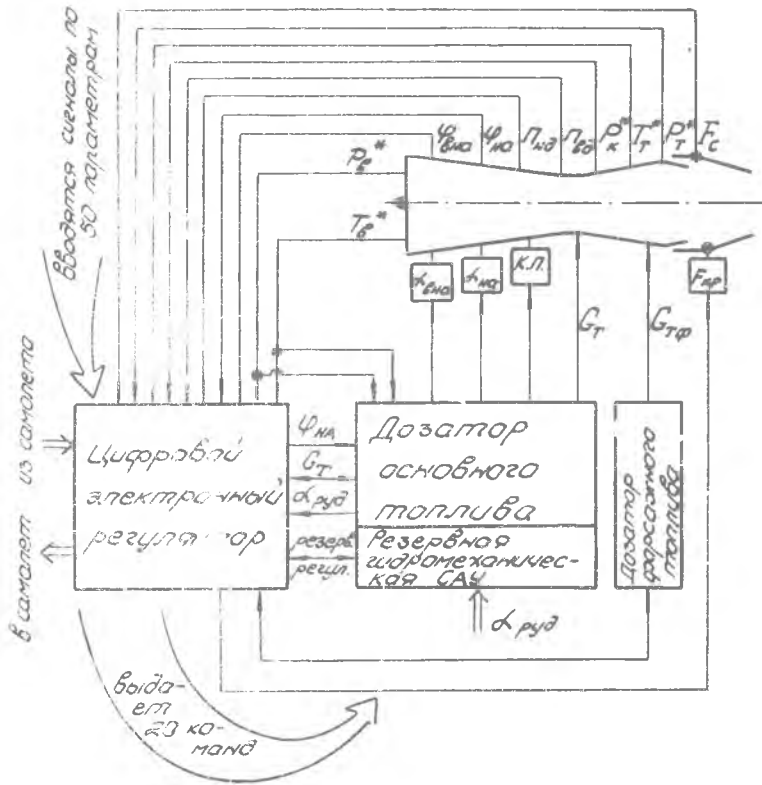
Заданная величина частоты вращения вентилятора $n_{нд}$, а следовательно, и расход воздуха через двигатель $\theta_{вв}$ поддерживаются изодромным регулятором путем воздействия на расход топлива θ_T . Управление двигателем по $\theta_{вв}$ осуществляется на всех рабочих режимах. Предельно допустимые значения $n_{нд}$, $T_{г.нд}$, P_K ограничиваются регулятором путем воздействия на θ_T .

Заданное значение степени повышения давления в двигателе

$\pi_{гд}^* = \frac{P_{г.нд}^*}{P_2^*}$ (параметр EPR) поддерживается изодромным регулятором путем изменения $F_{кр}$. Контур регулирования по параметру

$\pi_{гд}^*$ включен только на максимальном нефорсированном режиме и при работе форсажной камеры. Благодаря наличию двух замкнутых контуров регулирования САУ обеспечивает автоматическую регулировку режима при ухудшении характеристик модулей двигателя. Поскольку параметр EPR непосредственно характеризует тягу, САУ может поддерживать заданное значение тяги. По мере ухудшения характеристик двигателя температура газа за турбиной $T_{г.нд}$ будет возрастать, что позволяет поддерживать заданное значение параметра EPR до величины допустимой температуры газов.

Блок-схема ЭСУ приведена на рис. 16. Основной (электронный) канал ЭСУ ДДЭС устанавливает на максимальном нефорсированном и на всех форсированных режимах заданное положение точки на линии рабочих режимов вентилятора. Приведенная частота вращения вентилятора поддерживается путем изменения θ_T , а параметр EPR — путем изменения $F_{кр}$. На более низких режимах сопло не регулируется. Выбранные законы управления обеспечивают полную автоматическую самоподстройку даже после замены отдельных узлов двигателя. Эти законы выражаются в программном изменении заданного положения точки на линии рабочих режимов вентилятора исходя из оптимальной величины тяги двигателя и запаса газодинамической устойчивости. Высокая надежность работы САУ обеспечивается дублированием датчиков, наиболее важных для управления основным контуром двигателя. В случае отказа одного из дублированных датчиков параметра продолжение нормальной работы двигателя надежно обеспечивается алгоритмом обнару-



Р и с. 16. Блок-схема ЭСУ двигателя F100 PW220

жения и парирования отказов без каких-либо корректирующих действий со стороны пилота.

Электронный регулятор обеспечивает трехуровневое парирование отказов в зависимости от степени их серьезности:

при отказе одного из резервированных датчиков обеспечивается нормальная эксплуатация двигателя;

при отказе одного из датчиков, необходимых для работы форсажного контура, обеспечивается нормальная эксплуатация двигателя без включения форсажной камеры;

при отказе какого-либо нерезервированного датчика, необходимого для работы основного контура двигателя, осуществляется переключение на резервный канал управления.

Алгоритм обнаружения и парирования отказов обеспечивает защиту двигателя от превышения допустимых значений R_{HD} , R_{BD} и $T_{T, BD}^*$. Если обнаруживается, что величина того или иного параметра превысила определенное значение или изменяется с такой скоростью, что может выйти за установленный предел, то управление переключается на резервный канал.

Система ДЕЕС состоит из 50 модулей, 15 из которых допускают замену в условиях эксплуатации без проведения последующей отладки двигателя.

При использовании в САУ аналоговых датчиков и исполнительных органов необходимо наличие устройств, преобразующих сигнал в код и код в сигнал. Характер информации, поступающей с датчиков, предполагает наличие следующих преобразователей: "постоянное напряжение - код" (каналы $T_{T, T}^*$); "переменное напряжение - код" (каналы P_B^* , P_K^* , P_T^*); "угол - код" ($U_{ВНА}$, $U_{НА}$, $\alpha_{ср}$); "сопротивление - код" (каналы $T_{H, T}^*$); "частота вращения - код" (каналы R_{HD} , R_{BD}); "расход - код" (каналы Q_T , Q_{TP}).

Для приведения в действие аналоговых исполнительных механизмов необходимы преобразователи кода в угловое или линейное перемещение.

БОРТОВАЯ ЦИФРОВАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА

БЦМ представляет собой основной блок любой ЭСУ, обеспечивающий переработку информации и взаимодействие отдельных узлов системы. Указанные операции выполняются специализированными или универсальными ЦМ. Специализированные обладают относительной простотой и высокой надежностью, но в то же время малой гибкостью, неспособностью к перестройке при изменении решаемой задачи (например, изменение структуры контура управления или закона регулирования). Сложность и громоздкость универсальных ЦМ в настоящее время ликвидированы благодаря освоению БИС (больших интегральных схем) и созданию малогабаритных процессоров (микропроцессоров). Поэтому в

настоящее время предпочтительно применение универсальных БЦВМ. Современные БЦВМ имеют массу 3-10 кг, занимают объем 5-12 дм³ и потребляют мощность 30-100 Вт.

Используемые для управления двигателем БЦВМ решают следующие задачи:

прием и обработка поступающей информации о частоте вращения роторов, температуре, давлении в различных точках двигателя, положении управляющих органов, разовых сигналов с датчиков помпы и горения;

формирование сигналов управления расходом топлива и положением исполнительных органов управления геометрией двигателя, ограничение параметров рабочего процесса;

управление запуском двигателя;

решение информационных задач, расчет приведенной тяги, подсчет времени наработки.

Кроме перечисленных основных задач, т.е. задач собственно управления, БЦВМ должна выполнять целый ряд функций, связанных с самоконтролем, контролем систем управления в целом. В соответствии с решаемыми задачами БЦВМ содержит следующие устройства.

Операционное устройство (ОУ) предназначено для формирования адресной информации, для арифметической и логической обработки числовой информации, а также подготовки информации для выдачи и приема из БЦВМ.

Устройство управления (УУ) служит для координации работы основных функциональных узлов БЦВМ, направляет ход вычислительного процесса и обеспечивает входной и выходной информацией БЦВМ.

Задачей устройства обмена (УО) является организация обмена информацией между БЦВМ и тремя независимыми группами абонентов. Две группы расположены в устройствах преобразования (УП) вне БЦВМ, и одна представляет собой группу внутренних абонентов. Активной стороной при обмене информацией во всех случаях является БЦВМ.

Устройство прерываний программ (УПП) предназначено для обеспечения прерывания (прекращения) выполнения текущих программ и перехода к выполнению других программ. Необходимость осуществления прерываний вызывается не столько разделением машинного времени между различными программами, сколько потребностью быстро реагировать на различные ситуации, связанные с выполнением текущих программ, сос-

тованием отдельных устройств машины и работающих с ней абонентов. Прерывание процесса выполнения программ может быть внутренним, когда сигнал прерывания вырабатывается устройствами самой БЦВМ, внешним, когда сигналы прерывания поступают от внешних абонентов и, наконец, программным, когда сигнал прерывания связан с выполнением текущей программы.

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) служит для приема, хранения и выдачи информации, наиболее часто используемой другими устройствами БЦВМ и изменяющейся в процессе ее работы (например, информации о состоянии промежуточных линий коммутационной системы, информации о набираемом номере вызываемого абонента и др.). При работе ОЗУ другие устройства БЦВМ могут как записывать в него информацию, так и считывать ее.

Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) применяется для хранения и выдачи постоянной или редко изменяющейся информации (например, программ, таблиц, информации о категориях абонента и др.). При работе с ПЗУ другие устройства могут только считывать из него информацию. Как правило, около 15-20% емкости запоминающих устройств БЦВМ используется для самопроверки. Память БЦВМ может быть запрограммирована на хранение "модели" регулирования, которая используется для синтеза (воспроизведения) основных рабочих параметров в случае отказа в системе на участке "датчик - БЦВМ". Высокоуниверсальные БЦВМ могут быть быстро приспособлены для применения на различных двигателях и в разных условиях эксплуатации. Это достигается путем замены в БЦВМ соответствующего чипа, т.е. ее перепрограммирования. Это дает большие преимущества перед гидромеханическими САУ, так как при этом исключается дорогостоящий и трудоемкий процесс переконструирования производства и замены кулачков и кинематических звеньев. Ниже приведены технические характеристики БЦВМ системы автоматического управления отечественного ТРДДФ.

Быстродействие, тыс.оп/с	400
Объем ОЗУ, 12 разрядных слов	256
Объем ПЗУ, 12 разрядных слов	3840
Разрядность, бит	12
Способ передачи чисел	параллельный
Число абонентов	128

Количество команд	30
Время выполнения, мкс	
короткой операции	2,4
длинной операции	9,6
Потребляемая мощность, Вт	50
Масса, кг	6,75
Объем, дм^3	7,5
Время непрерывной работы, ч	10
Ресурс, ч	5000
Рабочий диапазон температур	-50 до +50°C.

КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Разработка и внедрение двигателей с форсажной камерой, предназначенных для сверхзвукового полета, вызвали необходимость согласования работы воздухозаборника, двигателя и регулируемого сопла, т.е. создания для этих целей единой САУ. В отечественной литературе такая система получила название комплексной системы управления (КСУ). Зарубежные специалисты такого термина не употребляют. В США и некоторых странах Западной Европы принято деление САУ на следующие типы.

DEEC (Digital Electronic Engine Control) - цифровая электронная система управления, осуществляющая операции по управлению двигателем на всех установившихся и переходных режимах.

FADEC (Full Authority Digital Electronic Control System) - цифровая система управления с полной ответственностью, т.е. система, позволяющая решать дополнительно к задачам *DEEC* такие, как быстрый запуск на землю и в воздухе, быстрое изменение и устойчивое поддержание тяги в соответствии с заданием, обеспечение газодинамической устойчивости двигателя на всех режимах.

HIDEC (Highly Integrated Digital Electronic Control) - высокоинтегрированная цифровая электронная система управления. В этой системе САУ двигателя функционально автоматически связана с системами управления соплом, воздухозаборником, полетом самолета. Независимо от терминологии, КСУ представляет собой шаг к созданию интегрированной САУ.

До недавнего времени (еще в начале 70-х годов) наибольшее внимание уделялось характеристикам силовых установок на установившихся режимах. При этом заботы были направлены в основном на совершенствование узлов двигателя, увеличение η_k^{**} , температуры цикла, снижение массы конструкции и улучшение экономических характеристик. В результате этих усилий конструкция двигателя достигла такого уровня совершенства, что попытки использования уже имеющихся методов и путей развития двигателей сталкиваются с возрастающими трудностями и не дают заметного эффекта. Значительно расширился высотно-скоростной диапазон применения ЛА. Для боевых самолетов это увеличение M до 3 и более и высоты полета до 30 км.

Использование КСУ привело к следующему:

были сформулированы более высокие требования к маневренности самолета;

появились значительные температурно-скоростные неравномерности вследствие маневра и широкого использования бортового ракетного оружия;

в состав силовой установки, помимо ТРДДФ, включены воздухозаборник смешанного сжатия и всережимное регулируемое сверхзвуковое сопло.

Указанные обстоятельства вызвали необходимость согласования работы двигателя, воздухозаборника и сопла и привели к созданию КСУ, а в перспективе должны привести к объединению систем управления самолетом и САУ двигателя. Известно, что существующие гидромеханические регуляторы регулируют одновременно не более 5-6 параметров, и, будучи вполне надежными, тем не менее не отвечают предъявляемым требованиям. Так, в перспективном двигателе со сложным термодинамическим циклом потребуются регулировать не менее 11 параметров двигателя и 4-5 параметров воздухозаборника. К указанным выше параметрам можно добавить параметры систем шумоглушения и реверса тяги. Все эти параметры должны регулироваться с учетом соблюдения устойчивой и безопасной работы на переходных и установившихся режимах, включая быструю приемистость, включение и выключение форсажа, маневры, пуски ракет.

На многодвигательных пассажирских самолетах новые задачи САУ заключаются в поддержании заданного процента максимальной тяги с учетом полетных и атмосферных условий, а также в обеспечении синх-

ронности работы двигателей. В случае применения гидромеханических регуляторов пилоту приходится вручную настраивать режим нужной тяги по указателю частоты вращения. Это способствует увеличению нагрузки на пилота, что приводит к снижению эффективности применения самолета. Применение КСУ позволяет значительно расширить эксплуатационные возможности ЛА. Статические характеристики, такие, как тяга и удельный расход топлива могут быть улучшены за счет использования запасов устойчивости и работы на режимах, более близких к предельным. Внешние возмущения при этом можно будет парировать временным изменением положения рабочей точки двигателя. Смещением границ устойчивости во время приемистости и дросселирования можно получить более быстрый и плавный переходный процесс. За счет устранения забросов температуры и других перегрузок можно значительно увеличить ресурс двигателя и время между ремонтами.

В большинстве случаев программа регулирования двигателя базируется на предварительных оценках характеристик. По мере совершенствования последних (доработка двигателя, изменение характеристик в эксплуатации) возникает необходимость изменения программ регулирования. Для гидромеханических систем это сложно и дорого, так как программа в них задается с помощью кулачков и других кинематических звеньев. В цифровой КСУ изменения в программе могут быть произведены буквально за несколько часов. Более того, изменение программ можно проводить непосредственно в процессе летных испытаний. Разборка, ремонт, сборка и отладка на стенде сложного гидромеханического агрегата требуют примерно в 20 раз больше времени и стоят в 9-10 раз дороже, чем те же операции для электронного устройства. По данным зарубежных авиакомпаний на долю САУ падает около 1,8% отказов с отменой вылетов. Задержка вылета приносит убытки до 1000 долларов, а отмена вылета — до 12000 долларов.

Использование КСУ позволяет добиться следующих целей:

снижения стоимости эксплуатации системы на 25%;

уменьшения времени сборки и настройки системы на 50%;

снижения стоимости системы на 30%;

средней наработки на отказ 2000 часов;

снижения веса системы на 25%;

уменьшения времени замены системы на 50%;

повышения точности регулирования и повторяемости уровня тяги на 50%;

способности системы продолжать работу при отказах ее элементов.

Разработка КСУ началась в Англии в 1974 г., а в 1976 г. прошли летные испытания аналоговой системы на самолете "Конкорд" № 202. Одновременно начались работы по интеграции бортовой ЦЕМ с несколькими системами самолета-истребителя, в том числе с системой управления воздухозаборником, системой отображения информации на лобовом стекле, системой управления огнем и вычислителем воздушных данных. КСУ силовой установки "Конкорда" была смонтирована в одном блоке, где находились БЦЕМ, устройства ввода и вывода сигналов, а также запоминающее устройство, в которое была введена программа регулирования расходом топлива реактивного сопла, геометрией воздухозаборника, форсажной камерой и устройствами шумоглушения. В дальнейшем аналоговая КСУ была заменена на цифровую. Результаты анализа показали следующие преимущества цифровой системы:

- более высокая надежность;
- значительное уменьшение состава аппаратуры;
- возможность реализации оптимальных законов регулирования работы двигателя на всех режимах и снижения удельного расхода топлива;
- упрощение работы пилота по управлению силовой установкой;
- возможность более простой модернизации двигателя путем изменения программы БЦЕМ системы управления;
- возможность получения от системы управления сведений о работе двигателя в полете;

более высокая точность и стабильность в работе.

Возможности цифровых КСУ позволяют при регулировании силовой установки использовать новые принципы и алгоритмы управления.

Эффективность применения КСУ для газогенератора

1. Возможность интегрального управления частотой вращения ротора ВД. Обычная система управления не в состоянии избежать недобора по частоте вращения, возникающего из-за износа двигателя и свойств пропорциональных регуляторов. Последовательное включение интегратора исключает это явление.

2. Непосредственное управление температурой газа перед турбиной. Оно осуществляется путем расчета T_p^* по значениям расхода

топлива, полноты сгорания и температуры на входе в камеру сгорания, т.е. фактически $P_k^{ак}$.

3. Обнаружение помпажа и автоматический выход из него путем управления расходом топлива и перепусками во время помпажа.

4. Непосредственное управление расходом воздуха, которое используется для ограничения $Q_{гмаж}$ и $Q_{гтпа}$.

5. Ограничение числа M на выходе из компрессора для достижения максимальной приемистости во время переходных процессов.

Преимущества применения КСУ при управлении форсажным контуром

1. Предварительное заполнение форсажных топливопроводов обеспечивает более быстрое увеличение форсажной тяги.

2. Для управления подачей форсажного топлива используется расчет коэффициента избытка воздуха в форсажной камере.

3. В форсажной камере путем измерения колебаний давления в ней в диапазоне 40-60 Гц обнаруживается неустойчивое горение.

4. Непосредственный контроль погасания пламени в форсажной камере осуществляется с помощью измерения степени повышения давления на вентиляторе на статических и переходных режимах.

Эксплуатационные преимущества КСУ при управлении двигателем и воздухозаборником

1. Обнаружение неравномерностей воздушного потока и контроль запаса по помпажу. Это позволяет двигателю работать на повышенных режимах почти во всем диапазоне высот и скоростей полета и открывать клапаны перепуска только при наличии опасных возмущений на входе.

2. Обнаружение и контроль помпажа воздухозаборника. При его обнаружении система увеличивает расход воздуха через двигатель, пока помпаж не исчезнет.

3. Опережающий розжиг форсажной камеры. Он необходим для сглаживания переходных процессов в воздухозаборнике при включении форсажной камеры.

4. Измерение величины расхода воздуха через двигатель с целью согласования работы двигателя и воздухозаборника при отклонении параметров атмосферы. Современная КСУ способна вести регулирование по 12 переменным, снабжать необходимыми данными диагностическое устройство с большим объемом информации, управлять воздухозаборником и всеми режимами работы силовой установки. Кроме того, КСУ должна обеспечивать:

автоматическую компенсацию изменения характеристик двигателя по мере выработки им ресурса;

повышение устойчивости работы двигателя за счет увеличения запаса по помпажу компрессора и вентилятора и уменьшение времени разгона, благодаря регулированию геометрических параметров двигателя;

уменьшение чувствительности двигателя и САУ к изменению окружающих условий, загрязнению топлива, изменению характеристик узлов двигателя, отбору воздуха из компрессора;

упрощение процедуры выявления дефектов путем применения встроенной системы самоконтроля и диагностики дефектов.

Требования к процессору КСУ

Многообразие и большой объем функций, выполняемых КСУ, предъявляет определенные требования к процессору системы. КСУ современной силовой установки может потребовать от 50 до 100 решений в секунду. Фактором, который ограничивает минимальную скорость решения, является желаемый частотный спектр каждого из самостоятельных контуров регулирования силовой установки. Для малых возмущений по входу, таких как незначительное перемещение дресселя или незначительное изменение высоты полета, требуемая интенсивность решений по воздухозаборнику и двигателю может составлять от 20 до 50 решений в секунду. Для внутренних возмущений, таких как нарушение характера течения воздуха при больших углах атаки или больших перемещениях дресселя двигателя, частота решений для ряда переменных двигателя может составлять от 100 до 1000 решений в секунду. Например, быстродействующие контуры, такие как контур управления створкой воздухозаборника, отбором воздуха от компрессора и направляющими аппаратами компрессора могут потребовать более чем 100 решений в

секунду, тогда как датчики для этих контуров могут потребовать около 1000 решений в секунду для обработки возмущений с учетом предыстории. С другой стороны, требуемая частота решения для центрального тела, клин, воздухозаборника и сопла намного медленнее вследствие большой инерционности этих устройств. Управляющее устройство силовой установки представляет собой отдельные блоки, размещенные в соответствии с условиями работы двигателя. Управление воздухозаборником может быть осуществлено на базе отдельного процессора, который устанавливается на планере самолета. Однако функции управления должны быть объединены с системой "двигатель - сопло" посредством интегрированной системы управления силовой установкой.

Для многодвигательных самолетов распределенное управление (один блок управления на один двигатель) оказывается предпочтительнее в отношении надежности по сравнению с концепцией централизованного управления.

ПРИВОДЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

К исполнительным органам (к двигателю относятся дозаторы топлива (пускового, основного и форсажного) и механизмы изменения геометрии проточной части (створки и лапаны перепуска, направляющие аппараты компрессора и турбины, створки реактивного сопла и т.п.). Правильный выбор приводного устройства, его точность и надежность определяют показатели для всего САУ. В качестве приводов исполнительных органов ЭСУ наиболее часто применяются: электромагниты, шаговые электродвигатели, электрогидравлические усилители. Сравнительные характеристики приводов даны в табл. 3.

В гибридных САУ важнейшей проблемой является создание исполнительных механизмов, способных нормально функционировать по сигналам, и гидромеханической и электронной систем при достаточно хорошем согласовании характеристик обеих систем. На рис. 17 показана стыковка исполнительных механизмов электронной и гидромеханической систем регулятора основного контура советского авиадвигателя. Цифрами на схеме обозначены:

1 - дозатор основного топлива;

2 - дозатор пускового топлива;

3 - переключатель систем управления с электронной на гидравлическую и обратно;

Свойства	Привод		
	Пневматический	Гидравлический	Электрический
Возможность интеграции с ЭСУ	Малая	Малая	Большая
Влияние на процесс в двигателе	Большая, за счет отбора воздуха из компрессора	Среднее	Не влияет
Удельная мощность	Удовлетворительная	Высокая	Удовлетворительная
Пожароопасность	Низкая	Высокая	Низкая
Удобство в эксплуатации	Высокое	Низкое, за счет загрязнения топливом	Высокое
Помехозащищенность	Высокая	Высокая	Низкая, за счет влияния электромагнитных полей

4 - электроклапан переключателя системы; нормальное положение - закрытое (НЗ);

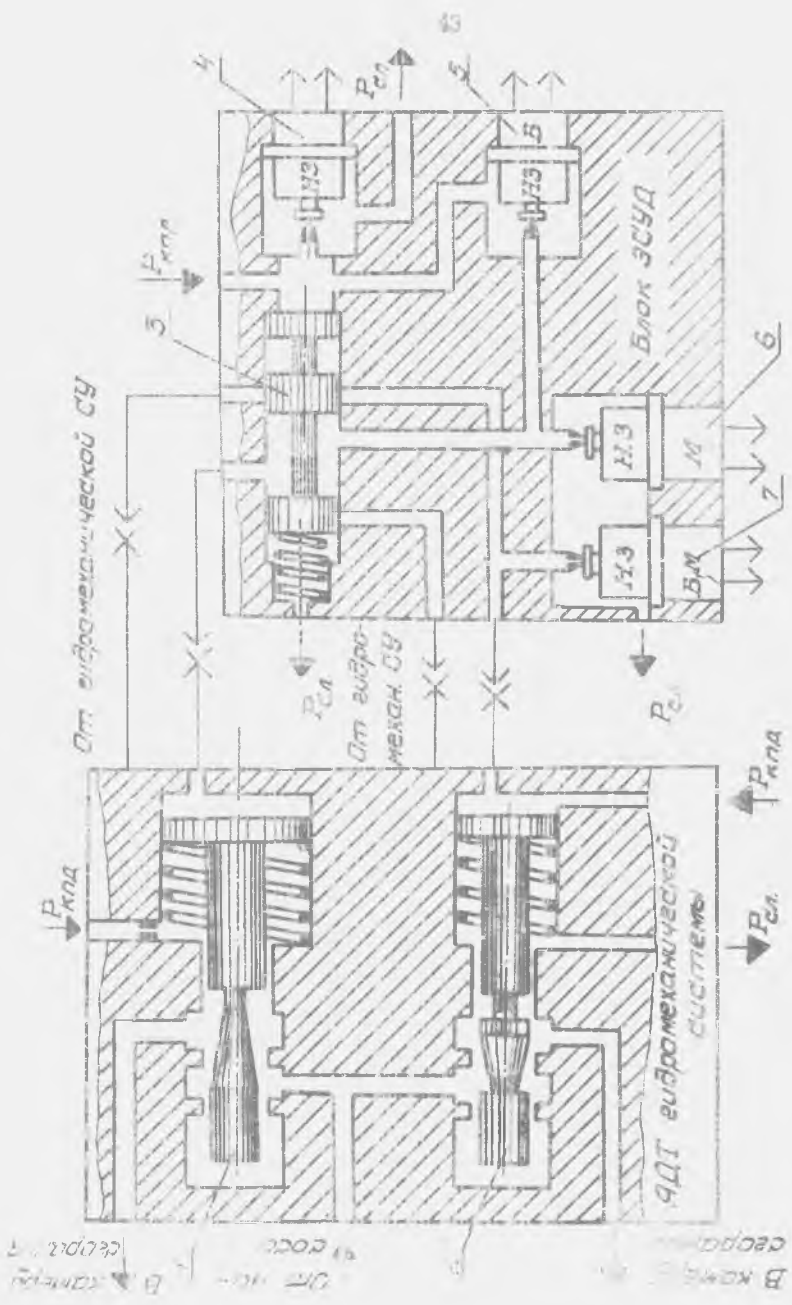
5 - электроклапан, обеспечивающий увеличение расхода основного топлива (НЗ);

6 - электроклапан, обеспечивающий уменьшение расхода основного топлива (НЗ);

7 - электроклапан, обеспечивающий увеличение или уменьшение расхода дросельного топлива (НЗ);

Все элементы системы находятся в положении, при котором регулирование осуществляется по сигналам ЭСУ.

На электроклапан 4 подается управляющий сигнал, клапан открывается. Управляющая линия переключателя 3 соединена со вторым переключателем под действием дросельного переключателя 3 отключается влияние системы управления по дросельному и основному топливу. При поступлении сигнала с ЭСУ на электроклапан 5 он открывается. В это время дросельная дозатора X поступает управление в режиме, и дросельная линия переключается в управление, следовательно, увеличивается расход топлива. При подаче сигнала на электроклапан 6 управление



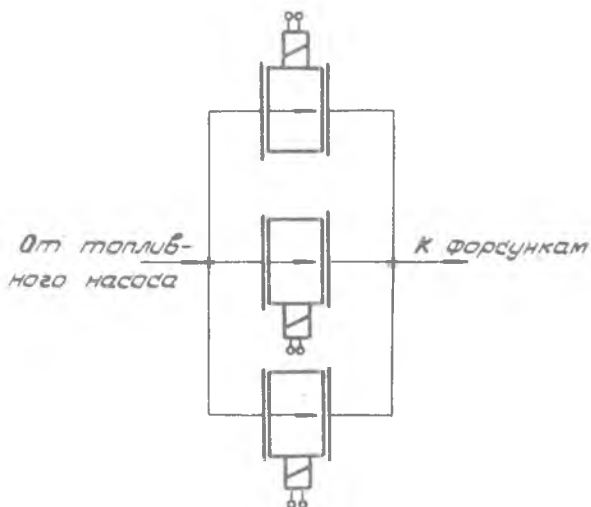
Р и с. 17. Стиковка исполнительных механизмов электронной и гидромеханической СУ

полость дозатора 1 сообщается со сливом и расход топлива в двигатель уменьшается. Электроклапан 7 при подаче на него сигнала от ЭСУ соединяет управляющую полость дозатора 2 с магистралью слива и при этом увеличивается расход пускового топлива. При закрытом положении клапана 7 дозатор 2 под действием давления $P_{кплд}$ перекрывает магистраль пускового топлива.

В случае отказа ЭСУ электроклапан 4 обесточивается и перекрывает магистраль слива из управляющей полости переключателя систем 3. Под воздействием управляющего давления $P_{кплд}$ переключатель займет крайнее левое положение, сообщая управляющие полости дозаторов 1 и 2 с гидравлическими магистралями. В дальнейшем управление двигателем осуществляется по сигналам гидравлической системы управления.

Достаточно простым дозатором топлива может служить блок электромагнитных клапанов (рис. 18), имеющих различную площадь проходного сечения. Если на каждый электромагнит подавать электрические сигналы управления различной скважности, то можно добиться дозирования топлива с высокой точностью. Весьма перспективными являются дозаторы в виде просельного крана, приводимого в движение шаговым электродвигателем. Шаговый мотор состоит из трехфазной статорной обмотки (в статоре 60 зубьев) и ротора (62 зуба), представляющего собой постоянный магнит из редкоземельных металлов. Число зубьев статора и ротора позволяет за полный оборот выполнять дискретное число шагов (обычно 360). Шаговый мотор 15-го типоразмера фирмы "Даути" имеет следующие характеристики: габариты - длина 43 мм, диаметр 36 мм; крутящий момент 0,35 кг·см при скорости вращения до 1200 шаг/с; потребляемая мощность - 10 Вт. Такой мотор может использоваться в САУ малоразмерных двигателей в качестве прямого механического привода без сервоусилителей. При отказе ЭСУ шаговый мотор остается в положении, которое он занимал непосредственно перед отказом. На выходе шагового мотора формируется цифровой сигнал, вследствие чего отпадает необходимость в аналого-цифровом преобразовании.

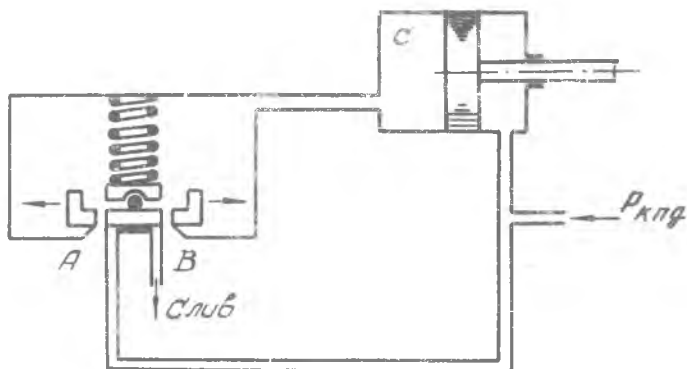
В случае отсутствия сигнала управления (выход из строя ЭСУ или источника питания) исполнительные органы двигателя должны фиксироваться в положении "до аварии" или в положении, соответствующем режиму малого газа. Фирма "Даути" разработала трехпозиционный



Р и с. 18. Блок электромагнитных клапанов

электрогидравлический привод, фиксирующийся при отказах (рис. 19). Плоский золотниковый клапан этого устройства управляется электрическим приводом и может занимать одно из трех положений: полностью открывать жиклер *A*. Полностью открывать жиклер *B* или полностью закрывать оба жиклера, находясь в среднем положении. Поскольку плоский золотник, перекрывающий жиклеры, нагружен пружиной, которая удерживает его в среднем положении, то отказ в системе электропитания приводит к фиксации положения исполнительного органа (при этом жидкость в полости будет заперта) в том положении, которое он занимал в предшествующее время. Программы управления двигателем составляются, как правило, таким образом, что в случае отказа какого-либо исполнительного органа ЭСУ перенастраивает остальные исполнительные органы таким образом, чтобы заданный режим работы двигателя оставался прежним.

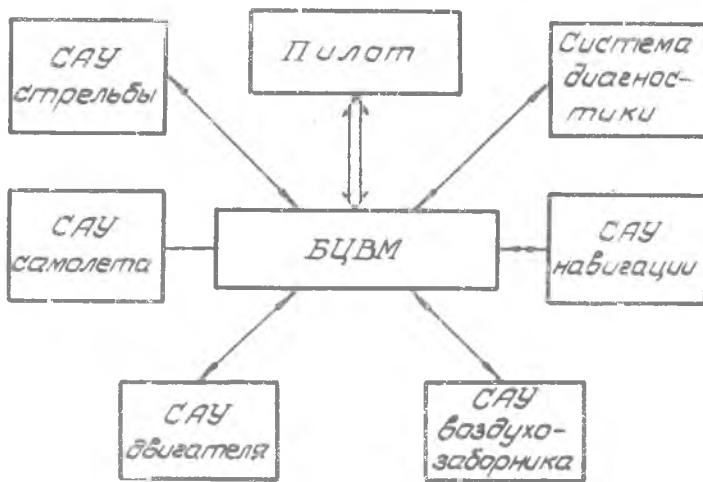
В настоящее время специалисты заняты разработкой топливных насосов, одновременно осуществляющих и функции дозирования топлива. Это несомненно приведет к упрощению САУ и повышению общей надежности.



Р и с. 19. Трехпозиционный электрогидравлический усилитель

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ САМОЛЕТА И ДВИГАТЕЛЯ

Интеграция систем управления самолета и силовой установки позволяет осуществить целый ряд усовершенствований, которые можно реализовать на современных самолетах. Первым шагом на пути интеграции стала объединенная система управления воздухозаборником, двигателем и реактивным соплом. В дальнейшем происходило подключение к этой системе других самолетных САУ (рис. 20). Эксплуатационные характеристики самолета в целом можно улучшить, если увеличить объем информации, передаваемой в систему управления силовой установкой. Например, когда режим полета не вызывает ухудшения характеристик потока в воздухозаборнике, система управления самолетом может сигнализировать о допустимости перехода на режимы работы двигателя с меньшими запасами газодинамической устойчивости. Линия рабочих режимов двигателя смещается таким образом, что при сохранении тяги может быть снижен расход топлива. Такая функция управления может выполняться цифровым электронным регулятором во всем диапазоне режимов работы двигателя, пока в регулятор поступает соответствующая информация из системы управления самолетом. При изменении режима полета и ухудшении характеристик потока в воздухозаборнике в регулятор двигателя



Р и с. 20. Интеграция систем ЛА

ли поступает сигнал, в соответствии с которым повышаются запасы газодинамической устойчивости. Быстродействие электронных регуляторов и время переходных процессов в двигателе должны быть такими, чтобы требуемый запас газодинамической устойчивости устанавливался раньше, чем изменится режим полета. Зарубежные специалисты считают, что на самолетах будущего вся информация, поступающая к двигателю и от него, будет передаваться через специально предназначенные для этого быстродействующие информационные шины. Эти шины представляют собой мультиплексные двунаправленные каналы и выполняются в соответствии с нормами *MIL-STD-1553B*.

В 1987 году в США проведены испытания интегрированной ЭСУ. Предварительные результаты испытаний высокоинтегрированной цифровой САУ *HIDES* свидетельствуют о возможности повышения на 5-10% тяги и снижении на 15% расхода топлива благодаря интеграции систем управления самолетом и силовой установкой (двигатель *PW II28* вместо *F 100 W 100*). Система *HIDES* испытывалась на самолете *F 15* и рассчитана на работу в двух режимах:

1. Адаптивное управление двигателем АДЕС (*Adaptive Engine Control System*). На этом режиме работа двигателя оптимизируется пу-

тем автоматического приближения рабочей точки вентилятора и компрессора к границе помпажа. Параметром регулирования при этом является *EPR*.

П. Управление профилем полета. САУ выдает пилоту или автодросселю (при автоматическом управлении самолетом) профиль полета, рассчитанный на БЦВМ по критериям оптимизации профильности, дальности или расхода топлива.

Испытания в режиме адаптивного управления проводились на различных режимах двигателя и маневрах самолета (выполнено 18 полетов). В процессе проведения полетов установлено, что скорость набора высоты повысилась на 10%, а время набора уменьшилось на 12%. Уменьшилось время приемистости двигателя: при выходе на максимальный форсажный режим на 13%. Путем изменения программного обеспечения системы *NIJES* двигатель 13 раз преднамеренно вводился в помпаж, чтобы оценить способность САУ автоматически выводить двигатель из срывных режимов и подтвердить правильность заложенных в программы алгоритмов устойчивой работы двигателя. Все преднамеренные помпажи парировались САУ, обеспечивающей автоматическое восстановление работы двигателя, что позволило пилоту не трогать РУД.

Планируется исследовать с помощью САУ *NIJES* снижение температуры газа перед турбиной при одновременном уменьшении удельного расхода топлива как метод увеличения ресурса двигателя. При этом ЭСУ, поддерживая заданную тягу, будет согласованно увеличивать *EPR* при соответствующем уменьшении расхода воздуха. Особый интерес представляет разработка управляющей программы оптимизации режимов полета, которая позволила бы компенсировать ухудшение параметров двигателя по мере выработки ресурса, а также учитывать отклонение атмосферных условий от стандартных, изменения в системе управления полетом, конфигурации вооружения и баков на внешних подвесках. Система должна непрерывно автоматически оценивать техническое состояние двигателя и вычислять допустимую величину уменьшения запаса газодинамической устойчивости для конкретного двигателя.

Фирма "Тэррит-Эрисерч" разработала ЭСУ *GEMS*, предназначенную для самолетов служебной авиации. Эта система является эквивалентом вычислителей экономичности полета. Она выполняет следующие функции:

обеспечение синхронной работы двух двигателей;
 расчет оптимального режима работы двигателей в зависимости от внешних условий, фазы полета и выбранного критерия оптимизации (минимального времени, расхода топлива или стоимости);
 регулирование режима работы двигателей.

Пилот вручную перемещает РУД, а система *GEMS* корректирует режим работы двигателей.

Краткие сведения об электронных системах управления зарубежных авиадвигателей приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

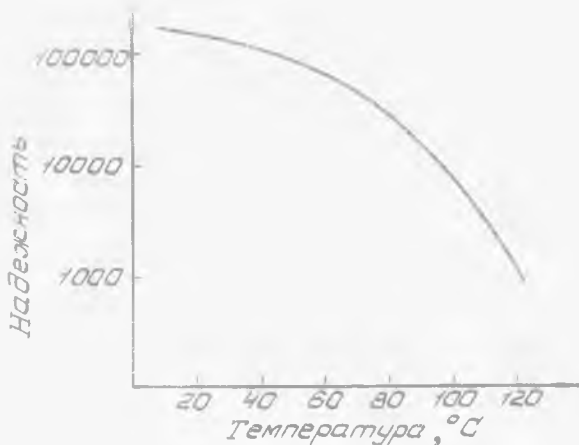
Двигатель/фирма	Фирма, изготавливающая ЭСУ	Сведения об ЭСУ
Истребитель "Торнадо"	Лукас Аэроспейс	Цифровая ЭСУ с полной ответственностью типа <i>FADEC</i> без гидромеханического резервирования. Имеется опережающая диагностика отказов двигателя
Истребитель F-15	Дженерал электрик Гамильтон стандарт	Интегрированная система управления самолетом и силовой установкой. Цифровая ЭСУ имеет упрощенный гидромеханический регулятор. Выборочное резервирование отдельных элементов. Система диагностики
Истребитель F-18	Даути-Смитс	Две САУ, полностью заменяющие друг друга: гидромеханическая и цифровая ЭСУ. Имеется система диагностики и парирования отказов
Истребитель ВВП "Хэриер"	Даути-Смитс	Цифровая ЭСУ с полной ответственностью с дублирующим упрощенным электронным каналом и гидромеханическим резервированием. Регулируемый параметр - $P_{вент}^*$, $P_{ВД}^*$, $T_{г}^*$ - ограничиваются
Военно-транспортный самолет С-17	Гамильтон стандарт	Двухканальная цифровая серийная ЭСУ с полной ответственностью ВЕС-104. Регулируемый параметр - $P_{г}^*$, $P_{ВД}^*$, $P_{к}^*$, $P_{ВД}^*$, $T_{г}^*$ - ограничиваются

Двигатель/фирма	Фирма, изготавливающая ЭСУ	Сведения об ЭСУ
Вертолеты "Уэстленд", "Линкс"	Гамильтон Стандарт	Цифровая ЭСУ с полной ответственностью с аварийным ручным управлением. Регулируемый параметр — <i>Мкр.</i> <i>ПТК, ИНО, Т_к</i> — ограничиваются
Белл-Боинг V-22	Лукас	Двухканальный цифровой регулятор с полной ответственностью и резервный аналоговый регулятор
Аэробусы B747-300 A320	Аэроспейс, Джeneral электрик	Цифровая ЭСУ с полной ответственностью типа <i>FADEC</i>
Служебный самолет	Дауги-Смитс	Двухканальная ЭСУ типа <i>FADEC</i> . Переход на второй канал происходит автоматически за 0,1 с
Служебный самолет "Дирджет 36"	Герритт Эриссерч	Цифровая ЭСУ <i>CEMS</i> , являющаяся эквивалентом вычислителей экономичности полета

НАДЕЖНОСТЬ САУ

Работа электронных устройств на двигателе происходит в условиях больших перепадов температур, вибрационных и ударных нагрузок. Поэтому первые электронные регуляторы начала шестидесятых годов, содержащие электронные лампы, обладали низкой надежностью. В начале семидесятых годов благодаря появлению БИС (большие интегральные схемы), обладающих повышенной надежностью, и в связи с резким повышением цен на нефть ЭСУ начали интенсивно развиваться. Вместе с тем их надежность оставалась ниже, чем у гидромеханических систем. Надежность электронных блоков ЭСУ определяется числом деталей и температурными условиями эксплуатации (рис. 21).

При проектировании современных ЭСУ используются общие методы



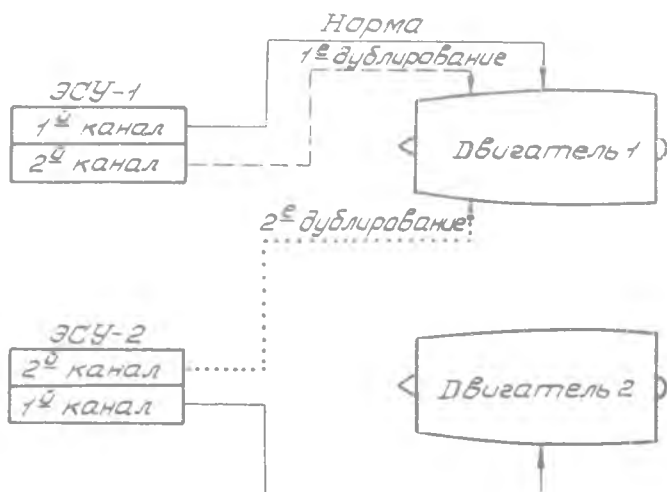
Р и с. 21. Надежность электронных блоков ЭСУ

обеспечения надежного функционирования сложных систем: построение систем с избыточным числом элементов и преобразование используемой информации, т.е. переход от пространственно-временной информации к частотно-спектральной. Простейшим и наиболее распространенным способом повышения надежности является дублирование, которое широко используется с учетом малых габаритов и веса электронных устройств. Так, например, САУ двигателя "Джем" (вертолет "Линкс") имеет основной цифровой электронный канал, электронный дублирующий канал и электронный канал защиты свободной турбины от раскрутки. САУ двигателя "Пегас" (самолет "Хэриер") включает основной цифровой канал с полной ответственностью, резервный цифровой канал и ручную систему управления.

В Великобритании запатентована (заявка 2125185, МКИ $\# 05B23/02$ $\# 02C9/26$) вспомогательная электронная система более простая и поэтому более надежная, чем основная, действующая независимо от основной и включающаяся в случае ее отказа. В системе топливопитания последовательно располагаются два дозирующих устройства, управляемых соответственно основным цифровым электронным регулятором и вспомогательным электронным регулятором. Основной регулятор осуществляет замкнутое регулирование частоты вращения ротора ВД. Вспомогательный

регулятор ограничивает частоту вращения ротора НД. Предполагается, что при высоком уровне надежности основного регулятора вступление в действие вспомогательного и переход на ограничительное регулирование будет резким. Тем не менее, сразу после запуска двигателя проводятся периодические проверки готовности к действию вспомогательного регулятора по программе, заложенной в память БЦМ.

На рис. 22 показана схема дублирования САУ двигателя советского бомбардировщика. В штатном режиме (норма) работает первый канал ЭСУ-1. В случае отказа 1-го канала автоматически происходит переход на 2-й канал ЭСУ-1. При выходе из строя 2-го канала производится переключение на 2-й (свободный) канал ЭСУ-2 второго двигателя.



Р и с. 22. Дублирование САУ двигателей

В супервизорных ЭСУ высокая точность электронной части удачно сочетается с надежностью гидромеханического регулятора. В случае полного выхода из строя электронной части управление переходит к гидромеханическому регулятору, который обеспечивает нормальное функционирование двигателя, но с пониженными характеристиками. На-

дежность полностью электронных систем управления типа *FADEC* обеспечивается системой самопроверки в сочетании с моделированием параметров двигателя. Математическая модель двигателя действует в реальном масштабе времени. Выходные данные модели сравниваются как для коррекции модели, так и для определения отказов датчиков и исполнительных механизмов. В случае отказа элемента системы на участке "датчик - ЭВМ" регулятор получает нужные данные от модели, а отказавший элемент отключается.

В настоящее время находит широкое распространение дублирование датчиков наиболее важных параметров. Причем один из датчиков используется в системе управления, а другой - для целей контроля состояния двигателя и диагностики. В случае отказа одного из датчиков информация с другого используется в обеих системах. Отказ исполнительного механизма вызывает действие логики альтернативного управления, которая обеспечивает перепрограммирование параметров двигателя таким образом, что для данного положения отказавшего исполнительного механизма подбираются положения других исполнительных механизмов, позволяющие двигателю работать при удовлетворительном уровне характеристик. О степени надежности современных ЭСУ можно судить по требованиям, предъявляемым например, к САУ двигателя *PW 2037*:

надежность электронных блоков цифровой ЭСУ - менее трех выключений двигателя на I миллион часов летной наработки;

надежность агрегата дозирования топлива и исполнительных механизмов - менее пяти выключений на I миллион часов летной наработки.

САУ этого двигателя построена таким образом, что ни один единичный отказ в электронике не может стать причиной приостановки эксплуатации двигателя. В математическом обеспечении каждого канала управления имеется алгоритм идентификации, локализации и парирования отказов. Система обеспечивает парирование любого единичного отказа, а также ряда сочетаний групповых отказов. В значительной мере надежность ЭСУ обеспечивается в процессе их изготовления и отработки на специальных стендах, включающих математические модели двигателя.

Эксплуатация авиадвигателей с высокими удельными параметрами, а также двигателей изменяемого цикла в первую очередь потребует совершенствования системы автоматического управления. Создание новейших САУ будет идти по пути увеличения числа выполняемых функций и быстродействия, повышения точности и надежности, снижения стоимости и улучшения условий эксплуатации. В связи с этим можно прогнозировать следующие направления в развитии САУ: создание универсальных ЭСУ; разработка адаптивных систем управления; совершенствование электронных блоков и линий связи; внедрение цифровых датчиков и электромеханических приводных устройств; переход к оптоэлектронным и оптическим системам.

Создание универсальных ЭСУ. Имеются в виду ЭСУ, которые могут быть приспособлены на любой двигатель с изменением программного обеспечения. Такие электронные регуляторы будут строиться на базе серийных блоков общего назначения (т.е. не только для авиации). Первые разработки этих систем уже осуществляются. Фирмой "Гамильтон Стандарт" создается серийная цифроаналоговая САУ *ВВС/ЭСУ 118* с гидромеханическим резервированием. Эта универсальная САУ может применяться для ТВД мощностью до 5000 л.с. и ТРДД тягой до 5000 кгс. В системе имеется одна цифровая и одна аналоговая платы. Адаптация к двигателям различных типов осуществляется путем:

- модификации математического обеспечения;
- замены аналоговой платы;
- замены модулей гидромеханической части.

Система будет иметь автономный источник питания, а ее электронные блоки будут охлаждаться топливом. Основная цель создания универсальных регуляторов – это снижение их стоимости изготовления и эксплуатации.

Разработка адаптивных систем управления. Применение самонастраивающихся САУ вызвано следующим:

- программы регулирования далеки от совершенства;
- имеется всегда разброс характеристик отдельных моделей двигателя при серийном производстве;
- по мере выработки ресурса изменяются исходные характеристики; двигатель постоянно совершенствуется.

Задачей логики самонастройки является управление характеристиками двигателя для обеспечения минимального удельного расхода топлива при сохранении величины заданной тяги. Примером адаптации САУ может служить ее функционирование при отказе датчика или исполнительного органа. Так, например, в случае отказа датчика берется значение измеряемого параметра из математической модели двигателя либо производится вычисление параметра по измеренным значениям других. Следствием отказа исполнительного органа является стабилизация его положения и перенастройка других исполнительных органов таким образом, чтобы режим работы двигателя не изменился. В ближайшее время ожидается внедрение в эксплуатацию цифровых ЭСУ без гидромеханической резервной части, т.е. сведение гидромеханической части к дозатору топлива и топливному насосу с фильтром.

Совершенствование электронных блоков и линий связи. В деле совершенствования БЦВМ можно выделить следующие направления: увеличение быстродействия, повышение рабочей температуры электронных блоков, организация параллельной обработки информации. Требование высокого быстродействия к БЦВМ обусловлено усложнением разрабатываемых и перспективных двигателей, повышением степени интеграции, необходимостью применения сложных систем встроенного контроля и диагностики, повышением требований к динамическим характеристикам САУ. Применение арсенида галлия в интегральных схемах позволит существенно увеличить вычислительную мощность БЦВМ. Арсенид галлия: (*GaAs*) является кристаллическим соединением, обладающим важными для электронных схем оптическими, радиационными и термическими свойствами и, что особенно важно, высокой подвижностью электронов. Последнее свойство арсенида галлия позволяет повысить быстродействие интегральных схем в 3-6 раз по сравнению с традиционными кремниевыми. Кроме того, интегральные схемы на основе *GaAs* работают при более высокой температуре и потребляют меньше электроэнергии. Арсенид галлия, в отличие от кремния, поглощает свет более эффективно и может его излучать. Это свойство можно использовать в электронно-оптических устройствах, предназначенных для связи с оптическими шинами.

В настоящее время предельная рабочая температура изделий электронной техники 125°C . Использование интегральных инжекторных кремниевых схем позволит повысить рабочую температуру до 3000°C . Это,

в свою очередь, повысит надежность работы вблизи двигателя электронных блоков САУ и не потребует охлаждения их топливом (значит, произойдет снижение массы системы). При осуществлении распределенной обработки информации требуются высокотемпературные электронные схемы для оснащения собственными процессорами датчиков и исполнительных механизмов (ИМ). Встроенный в датчик или исполнительный механизм процессор позволит осуществлять аналого-цифровое преобразование, используя собственные специальные алгоритмы, и по командам центрального процессора передавать значение измеренной величины в виде двоичного кода в шину данных. Одновременно вычислительные функции осуществляются в нескольких датчиках и ИМ, при этом достигается высокая степень быстродействия, обусловленная параллельной обработкой информации. Параллельная обработка информации может повысить реальное быстродействие БЦВМ на один-два порядка. Это может быть достигнуто еще и надлежащим построением структуры вычислителя, разработкой специальных алгоритмов управления, применением языка высокого уровня.

В настоящее время уже началось опытное применение гибких световодов в качестве высоконадежных линий связи, не подверженных электромагнитным воздействиям. Волокна из обычного стекла на основе двуоксида кремния обладают большим световым сопротивлением. Японские химики предложили окислы с добавлением германия и сурьмы. Первые эксперименты показали, что поглощение света в этом случае в два раза меньше, чем в стекле. Перспективным является использование галлоидных соединений, содержащих смеси фтора и хлора с такими материалами, как цирконий, барий, гадолиний. Такие материалы на два-три порядка прозрачнее стекла. По одному волокну из нового материала можно будет одновременно передавать до 20 тысяч сигналов. Потери энергии в современных (стеклянных) световодах сопоставимы с потерями в электрических кабелях. Диаметры и массы оптических кабелей в 5-10 раз меньше, чем электрических. Сейчас основной недостаток оптических кабелей — низкие механические свойства световодов и их высокая стоимость по сравнению с электрическими.

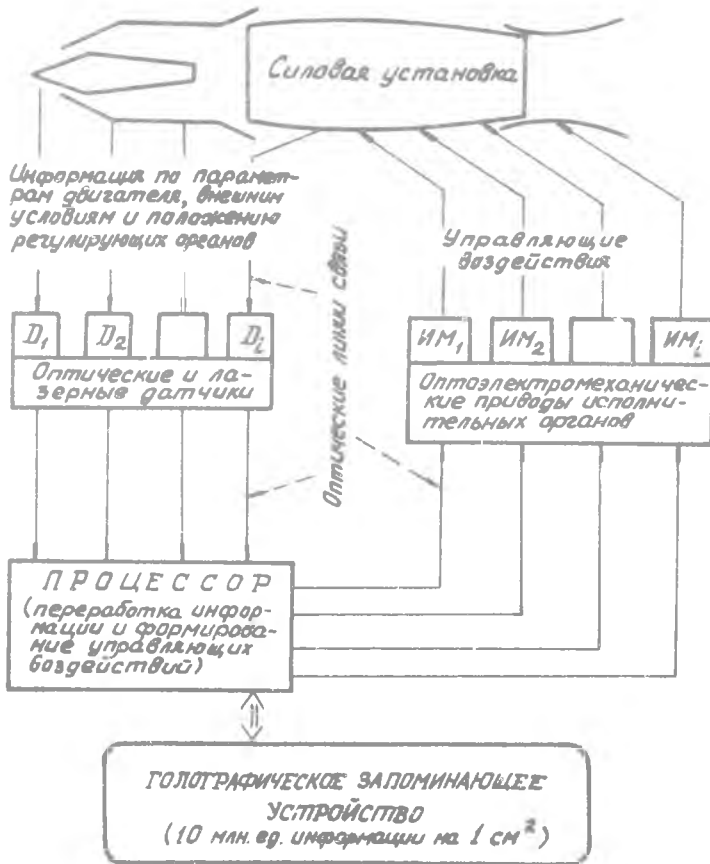
Внедрение цифровых датчиков и электромеханических приводных устройств. Разработка постоянных магнитов с высокой индукцией магнитного поля, применение кобальт-самариевых сплавов и специальных

сталей в сочетании с интегральными твердотельными силовыми переключателями приведет к целесообразности использования электрической энергии для привода исполнительных механизмов и подачи топлива в двигатель. В перспективе привод топливных насосов от электродвигателя позволит отказаться от перепуска и связанного с этим подогрева топлива. Расположение мощного электрогенератора (выполняющего функции стартера) вдоль оси двигателя и отсутствие коробки передач приведет к уменьшению миделя. Так как в САУ не будет использоваться топливо, то будут исключены случаи загрязнения и возгорания, упростится техническое обслуживание. В перспективных САУ приоритет будут иметь акустические, оптические и лазерные датчики со встроенными процессорами и цифровым входом. Существенное снижение массы САУ (повышение удельных характеристик двигателя) может дать использование композиционных материалов для изготовления корпусов электронного регулятора, исполнительных механизмов, а также деталей топливных насосов. В табл. 5 приведены предварительные оценки (по зарубежным источникам) уменьшения массы топливного насоса из композиционных материалов.

Т а б л и ц а 5

Наименование	Среднестатистическая масса узла от общей массы насоса, %	Уменьшение массы при использовании композитивов, %
Основной корпус выпускного устройства	27,9	45 - 55
Корпус входного устройства	9,1	45 - 55
Несущий корпус	15,8	0
Подшипники, прокладки, гайки	12,5	0
Вал	8,4	40 - 60
Кольца и уплотнения	4,5	0
Кольцо диффузора	6,9	30 - 60
Импеллер	3,9	20 - 30
Входная часть	1,8	20 - 30
Болты	7,3	0

Переход к оптоэлектронным и оптическим системам. В электронных системах управления уже обнаружены недостатки, ограничивающие в будущем их применение в сложных системах. В случае решения задач управления быстропротекающими процессами (каковым является рабочий процесс в двигателе) возникает необходимость в обработке большого массива данных при высоком быстродействии. Существует определенный отрезок времени, в течение которого ЭВМ выполняет комплекс операций, связанных с выдачей определенного управляющего сигнала. Естественно, этот отрезок тем больше, чем сложнее и совершеннее САУ. В этот отрезок времени САУ двигателя представляет собой звено чистого запаздывания. Известно, что такие звенья уменьшают устойчивость системы. Из литературы известен следующий факт. Для выбора оптимального режима работы системы путем полного перебора при 100 (ста) управляющих воздействиях, которые нужно подобрать с точностью в 1%, может потребоваться для решения миллион лет работы самой быстродействующей ЭВМ. Заметим, что для авиационного двигателя можно назвать около десяти управляющих и возмущающих воздействий: $\sigma_T, \sigma_{T^*}, F_0, F_{0.3}, \alpha_{вн}, \alpha_{на}, F_{кл}, \sigma_{турб}, P_0, T_0, H$. Получается, что хотя ЭСУ только начинают свое победное шествие, а уже имеется прогноз на исчерпаемость их возможностей. На смену им придут оптоэлектронные и оптические САУ. Прежде всего они должны обладать очень большим быстродействием, надежностью и точностью, иметь высокую плотность записи в запоминающих устройствах. Это будет обеспечиваться лазерными и оптическими датчиками рабочих параметров и внешних условий, а также каналами связи высокой помехозащищенности в виде оптических волокон. Совершенно не исключено сочетание ЛОСУ и ЭСУ с гидромеханическими агрегатами. Легко можно будет разместить полную модель двигателя в блок голографической памяти оптоэлектронной вычислительной машины. Неизбежно придется решать сложные преобразования оптической информации в цифровую, а цифровой — в аналоговую. На рис. 23 представлена гипотетическая блок-схема перспективной САУ двигателя. В такой САУ легко будут решаться проблемы адаптации и появится возможность реализации любых программ управления за счет повышения быстродействия процессора и объема памяти запоминающего устройства. Высокая надежность САУ будет обеспечена помехоустойчивостью оптических линий связи с



Р и с. 23. Блок-схема перспективной САУ

простотой дублирования датчиков параметров двигателя. Указанные выше обстоятельства приведут к повышению экономичности и безопасности полетов.

СОДЕРЖАНИЕ

От гидромеханических к электронным САУ	3
Технико-экономические обоснования применения ЭСУ	7
Аналоговые электронные системы управления двигателей	14
Цифровые ЭСУ двигателей	21
Цифровая САУ ДЭЭС двигателя <i>P 100 PW220</i>	25
Бортовая цифровая вычислительная машина	28
Комплексные системы управления	31
Приводы исполнительных органов	37
Интеграция систем управления самолета и двигателя	42
Надежность САУ	46
Направления развития САУ авиадвигателей	50

К о н е в Александр Георгиевич

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Редактор Т.К.К р е т и н и н а
Техн.редактор Г.А.Усачева
Корректор Е.Д.А н т о н о в а

Свод. тем. пл. № 45

Подписано в печать 04.02.92. Формат 60x84^I/16.
Бумага оберточная. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 3,25. Усл.кр.-стт. 3,49. Уч.-изд.л. 3,15.
Тираж 200 экз. Заказ № 509. Цена 70к.

Самарский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева.
443086. г. Самара, Московское шоссе, 34.

Типография им. В.П.Мяги Самарского полиграфического
объединения. 443099. г. Самара, ул. Венцека, 60.