

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ САУ ДВИГАТЕЛЯ РД-93 БАРК-93

© 2006 Г.Д. Душиц-Коган, С.А. Сумачев

ФГУП «Завод им. В.Я. Климова», г. Санкт-Петербург

В статье приведен опыт разработки электронной части САУ двигателя РД-93 БАРК-93. По отношению к САУ базового двигателя РД-33 введены новые программы регулирования, реализованы функции углубленной самодиагностики, расширены функции диагностики силовой установки. В ходе стендовых испытаний двигателя, а также в ходе летно-конструкторских испытаний на самолете, БАРК-93 зарекомендовал себя как надежная система, обеспечивающая выполнение заданных программ управления и контроля с высокой точностью.

Целью разработки блока автоматического управления и контроля БАРК-93 было создание на современной элементной базе интегрированной цифровой системы управления двигателя РД-93. Основными преимуществами разрабатываемой системы должны были стать:

- введение адаптивных программ управления, реализация которых в аналоговой технике невозможна;

- существенная экономия габаритов и веса при замене на БАРК-93 трех электронных блоков БПР-88, БПК-88 и АПД-88, входящих в состав системы управления и контроля базового двигателя РД-33;

- повышение надежности системы;

- повышение точности выполнения программ управления;

- улучшение характеристик контролепригодности, за счет развитых систем диагностики и самодиагностики.

БАРК-93 имеет модульную структуру. Функции, выполняемые двумя основными модулями, разделены. Первый модуль выполняет функции запуска двигателя, автоматическую противопомпажную защиту (АПЗ), управление расходом топлива в основную камеру сгорания и форсажную камеру, управление соплом двигателя, управление включением форсажа. Вторым модулем осуществляется контроль силовой установки, подсчет наработки двигателя на различных режимах, накопление параметрической информации в энергонезависимой памяти, обмен с бортовыми системами и информационно-диагностическим комплексом ИДК-93. Для исключения ложного срабатывания исполнительных механизмов системы АПЗ управление ими реализовано от двух модулей. Система встроенного са-

моконтроля БАРК проверяет целостность программного кода и данных, величины напряжений питания БАРК, датчиков и исполнительных механизмов, другие параметры.

Процесс разработки и отладки БАРК-93 был разделен на три основных этапа. На первом этапе был создан функциональный макет изделия, с помощью которого в ходе лабораторных проверок и испытаний на двигателем стенде были проверены программы управления двигателем и контроля силовой установки. На втором этапе был изготовлен технологический образец, с помощью которого были отработаны конструктивные решения и система встроенного самоконтроля. На этом этапе были продолжены работы по модификации алгоритмов управления двигателем с целью повышения точности выполнения программ управления, а также снижению забросов температуры газа на приемистости. На третьем этапе были изготовлены опытные образцы БАРК-93, которые подверглись лабораторным, в том числе специальным, проверкам, большому количеству стендовых двигательных испытаний а также летным испытаниям.

В течение всех трех этапов с учетом приобретенного опыта постоянно совершенствовались алгоритмы диагностики САУ двигателя, алгоритмы самодиагностики БАРК-93. В качестве примера можно привести эволюцию системы контроля исправности каналов измерения частот вращения роторов двигателя и турбостартера. На первом этапе она включала в себя градиентный и допусковый контроль замеренной величины. На втором этапе был введен контроль целостности электрических цепей. На третьем этапе был дополнительно введен функ-

циональный контроль замеренных частот вращения по другим параметрам двигателя. В процессе стендовых ресурсных испытаний двигателя реализованная система контроля доказала свою эффективность. В ранней стадии развития дефекта при наличии переменного контакта в стендовой части цепи измерения частоты вращения ротора низкого давления система контроля БАРК-93 показала отказ по превышению допустимой скорости изменения параметра (градиентный контроль). В дальнейшем отказ надежно выявлялся еще до запуска двигателя при контроле целостности электрической цепи. После переключения питания БАРК на работающем двигателе (на работающем двигателе контроль целостности цепи невозможен) отказ канала надежно выявлялся с помощью функционального контроля.

Функциональный контроль реализован также для контроля каналов измерения температуры газа двигателя, температуры газа турбостартера, токов ионизации, сигнализаторов положения РУД, исполнительного механизма канала управления расходом топлива в основную камеру сгорания. В основе функционального контроля лежат достаточно простые, но эффективные алгоритмы. Их применение позволяет с высокой вероятностью исключить негативные последствия отказов, не выявленных другими средствами контроля.

Введенная в БАРК-93 программа ограничения производной частоты вращения ротора компрессора высокого давления позволяет избежать ненужных забросов температуры газа в процессе приемистости обеспечивает практически монотонный ее рост вплоть до выхода на программу ограничения. На рис.1 приведена осциллограмма параметров, зарегистрированных в процессе приемистости от режима «Малый газ» до режима «Максимал».

На осциллограмме представлены: частота вращения ротора компрессора высокого давления «Nк» и ее программа ограничения «Nк огр», замеренная температура газа «Т4», программа ограничения температуры газа «Т4 огр» и вычисленная температура газа с учетом инерционности термопар «Т4 синтезир.». Температуры приведены в масштабе 0.1.

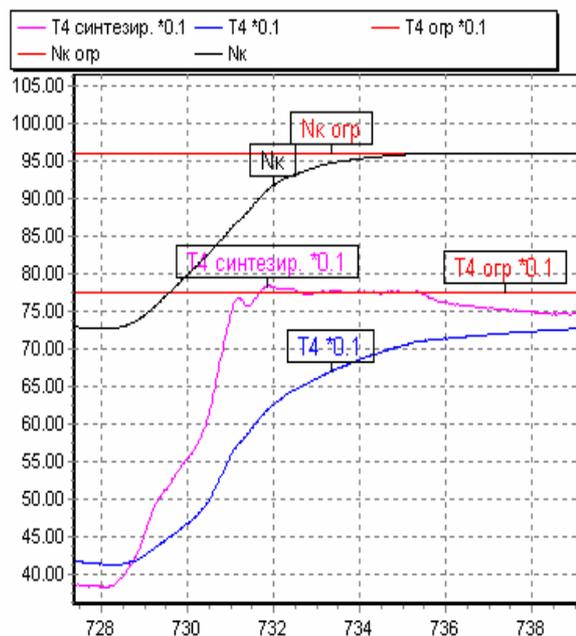


Рис.1. Приемистость «Малый газ»–«Максимал»

В БАРК-93 реализована программа ограничения температуры газа на запуске. Это позволяет уменьшить максимальную величину заброса температуры в процессе запуска на 100 и более градусов, что особенно существенно при запусках «горячего» двигателя при выполнении нескольких запусков подряд или запуске после останова при малом временном разрыве между ними.

Точность поддержания параметров двигателя на установившихся режимах работы двигателя составляет:

- по частоте вращения ротора низкого давления $\pm 0.3\%$;
- по частоте вращения ротора высокого давления $\pm 0.15\%$;
- по температуре газа двигателя $\pm 2\text{ К}$ (по замеренной величине).

На динамических режимах величины забросов параметров относительно программ ограничения составляют:

- по частоте вращения ротора низкого давления не более 1% ;
- по частоте вращения ротора высокого давления не более 0.3% ;
- по температуре газа двигателя не более 20 К (по величине, полученной после компенсации инерционности термопар).

На всех этапах испытаний на двигательном стенде и в процессе летных испытаний контроль функционирования БАРК-93 и двигателя осуществлялся с помощью информационно-диагностического комплекса

ИДК-93. ИДК-93 позволяет осуществлять в реальном времени на основе данных, передаваемых БАРК-93 с периодичностью 25 мс, контроль исправности цепей датчиков и исполнительных механизмов, контроль исправности БАРК, контроль параметров силовой установки и ее системы управления. Кроме этого ИДК-93 позволяет с помощью специальной системы команд управлять включением режимов контроля БАРК-93 и двигателя, применяемых при отладке и наземных опробованиях двигателя. К таким режимам контроля относятся: принудительный переход на резервную гидромеханическую систему управления, контроль контура ограничения температуры газа, контроль противопопашной системы, контроль запусков в воздухе, включение «огневой дорожки», отключение форсажа и др.

С помощью ИДК-93 осуществляется считывание параметров силовой установки и системы управления, зарегистрированных в энергонезависимой памяти БАРК-93. Объем энергонезависимой памяти позволяет хранить информацию за пять часов работы двигателя при частоте регистрации параметров 5 Гц. С помощью ИДК-93 можно установить другую частоту регистрации параметров в диапазоне 0.2...40 Гц. При этом временной промежуток, сохраняемый в энергонезависимой памяти БАРК-93, соответственно увеличится (максимум до 125 часов) или уменьшится (минимум до 35 минут). Повышенная частота регистрации параметров применялась для обеспечения корректной оценки приемистостей, выполненных в полете, и динамики изменения отдельных параметров двигателя для настройки параметров градиентного контроля.

БАРК-93 и ИДК-93 в процессе стендовых испытаний двигателя и в период летных испытаний эффективно выявляли и сигнализировали об отдельных неисправностях электрических стендовых и самолетных цепей. Это способствовало своевременному устранению дефектов, предотвращению их возможных негативных последствий. Высокая частота регистрации позволяет выявлять кратковременные перебои в цепях питания, отслеживать появление и длительность кратковременных дискретных сигналов.

Для упрощения и ускорения процедуры локализации неисправностей в ИДК-93 реализована функция отображения взаимозависимостей связанных отказов. Так, при отказе питания датчиков давления дополнительно в виде графа отображается следующая информация: сигнал «Резервная система» сформирован по причине отказа контура управления расходом топлива в основную камеру сгорания, который сформирован из-за недостоверной величины давления воздуха на входе в двигатель, что произошло по причине отсутствия питания датчиков. Таким образом, нетрудно проследить связь между отказом одной из основных функций управления двигателем и вызвавшим его элементарным отказом.

На основе результатов анализа зарегистрированной в полете информации в процессе летных испытаний корректировались законы управления двигателем. Изменения были внесены в программу ограничения температуры газа двигателя для обеспечения более высокой тяги при температуре воздуха на входе в двигатель до 45 °С. Благодаря этому удалось повысить максимальную скорость самолета на 0.05 М. Ни один из параметров, приведенных в основных данных двигателя, превышен не был. Проведению этой работы способствовали:

- наличие точных данных о параметрах двигателя и БАРК-93 в течение полета;
- возможность оперативного изменения программ управления, заложенных в БАРК-93;
- возможности анализа параметрической информации с помощью ИДК-93.

Возможность оперативного изменения программы управления в БАРК-93 позволила по результатам первого этапа летных испытаний ввести новый режим работы двигателя. В результате тяга двигателя при температуре воздуха на входе менее 15°С была увеличена примерно на 300 кг. Были модифицированы программы ограничения частот вращения роторов и температуры газа двигателя. Эффективность произведенных изменений подтверждена ресурсными испытаниями двигателя под управлением БАРК-93.

Алгоритмы контроля силовой установки также были модифицированы по результатам стендовых двигательных и летных ис-

питаний. В канал измерения виброскорости двигателя встроены цифровые полосовые фильтры четвертого порядка для выделения первых гармоник частот вращения роторов двигателя, а также звено коррекции нелинейности характеристики датчика МВ-27. Для исключения переменного срабатывания сигнализации выхода параметров двигателя за допустимые диапазоны в алгоритмы контроля введен гистерезис.

При наработке отдельных экземпляров БАРК-93 на двигательном стенде более 1000 часов и в эксплуатации более 300 часов отказов БАРК, приводящих к переходу на резервную гидромеханическую систему управления зарегистрировано не было.

Процесс разработки БАРК-93 в настоящее время продолжается. Основными направлениями развития являются:

- расширение функций встроенного самоконтроля;

- дальнейшее развитие функционального и параметрического контроля;
- повышение эксплуатационной и производственной технологичности.

ИДК-93 развивается в направлении углубления функций диагностики силовой установки для обеспечения эксплуатации двигателя по техническому состоянию. Кроме этого пользовательский интерфейс ИДК модифицируется с учетом отзывов и рекомендаций, полученных в ходе эксплуатации системы.

Современные технологии, примененные в ходе разработки и внедрения САУ двигателя РД-93 БАРК-93 позволили решить задачу управления и диагностики силовой установки максимально эффективно с большой экономией временных и материальных ресурсов.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM DEVELOPMENT EXPERIENCE OF BARK-93 UNIT OF RD-33 ENGINE

© 2006 G.D. Dushits-Kogan, S.A. Sumachev

The Federal state unitary enterprise “Klimov Corporation”

The article presents the development experience of the electronic automatic control system for the RD-93 engine based on the BARK-93 unit. The automatic control system of the RD-33 family engines was improved with the new control programs and the enhanced power plant and self-diagnosis functions. During the engine bench tests and the flight tests BARK-93 proved to be a reliable system, provided the high precision of the given monitoring and control programs execution.