

УДК 629.7.03:681.518.7

С.В. ЕПИФАНОВ¹, Л.Л. ЯЦКО²

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ САМОЛЕТА

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков²Научно-технический комплекс «Электронприлад», Киев

Рассмотрена проблема управления параметрами воздуха и электрической мощностью авиационной вспомогательной силовой установки. Выявлены особенности одно- и двухвальных установок. Предложена методика настройки контуров управления регулирующими элементами компрессора, дан сравнительный анализ качества управления при различной структуре САУ.

вспомогательная силовая установка, управление, характеристика компрессора, рабочие параметры

Введение

Современные самолеты и вертолеты (ЛА) оснащаются вспомогательными силовыми установками (ВСУ), предназначенными для обеспечения ЛА электроэнергией и сжатым воздухом в условиях, когда маршевые двигатели полностью или частично остановлены. Этот воздух поступает в воздушную систему (ВС) ЛА и используется для запуска маршевых двигателей, в системе кондиционирования (СК) и в противообледенительной системе (ПОС). Проблемы управления ВСУ слабо отражены в технической литературе. В основном это связано с тем, что большинство ВСУ имеют одновальную схему и одно управляющее воздействие – расход топлива G_T . Поэтому необходимые для проектирования САУ соотношения между параметрами могут быть получены из теории одновальных турбореактивных двигателей (ТРД) [1].

1. Постановка задачи

Основным требованием к управлению одновальной ВСУ (рис. 1) является поддержание постоянства частоты вращения ротора n , что необходимо для обеспечения постоянства частоты электрического тока приводимого генератора. Это реализуется путем изменения G_T . Линия рабочих режимов 4 (рис. 2), которая характеризует работу ВСУ при

ее запуске, должна располагаться ниже границы допустимых рабочих режимов 3, которая выбирается с учетом границы газодинамической устойчивости (ГДУ) 2 и запасов на разброс характеристик вновь изготовленных компрессоров, на разброс положений границы ГДУ, а также на изменение этих характеристик и границ вследствие эксплуатационного износа.

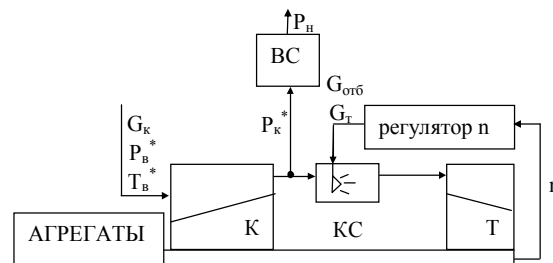


Рис. 1. Схема одновальной ВСУ с нерегулируемым компрессором

Рассмотрим точку А (рис 2), соответствующую работе ВСУ на режиме холостого хода (без нагрузки на генератор и при минимальном расходе воздуха). При включении электрической нагрузки положение точки А не изменяется, так как при этом не изменяются n и характеристика сети, а снижение расхода газа через турбину G_T компенсируется ростом G_T и T_g^* . При увеличении расхода отбираемого воздуха изменяется характеристика ВС и рабочая точка на характеристике компрессора перемещается в положение С, а соответствующая точка на характери-

ке ВС – из положения A' в положение C' . Давление за компрессором при этом снижается, запас ГДУ компрессора увеличивается, а рабочая точка смещается в область пониженных КПД компрессора.

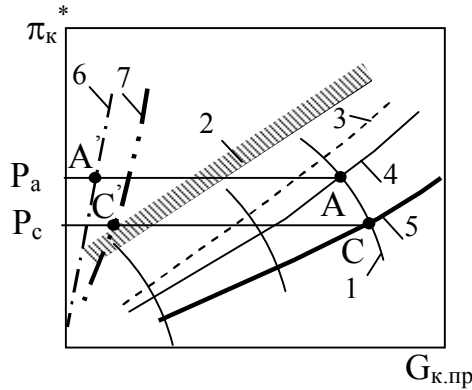


Рис. 2. Характеристика компрессора одновальной ВСУ: 1 – напорная линия $n_{пр} = \text{const}$; 2 – граница ГДУ; 3 – граница допустимых рабочих режимов; 4, 5 – линии рабочих режимов при минимальном и максимальном отборе воздуха; 6, 7 – характеристики ВС при минимальном и максимальном расходе

Таким образом, преимущества такой схемы ВСУ – ее простота и положительное влияние отборов воздуха на запас ГДУ, а основные недостатки:

- необходимость специального профилирования компрессора для обеспечения запасов ГДУ в условиях минимальных отборов воздуха;
- снижение КПД сжатия всего воздуха при увеличении отборов;
- узкий диапазон варьирования расхода отбираемого воздуха;
- отсутствие возможности обеспечения необходимого для нормальной работы воздушной системы ЛА соотношения между давлением и расходом отбираемого воздуха.

Последние недостатки усиливаются тем, что современные ЛА оснащаются развитыми ВС, имеющими свои элементы управления, которые обеспечивают варьирование параметров потребляемого воздуха в широком диапазоне. Рассмотрим пути продления этих недостатков и соответствующие варианты структуры системы автоматического управления.

2. Одновальная ВСУ с управлением ВНА компрессора

Решение проблемы обеспечения широкого диапазона варьирования давления и расхода отбираемого воздуха требует введения дополнительного управляющего воздействия. Из различных способов управления компрессором [2] в рассматриваемом случае наиболее эффективным является использование регулируемого направляющего аппарата (ВНА) компрессора. На рис. 3 приведена схема ВСУ и ее САУ, а на рис. 4 – соответствующая характеристика компрессора при постоянной приведенной частоте вращения и различных положениях ВНА.

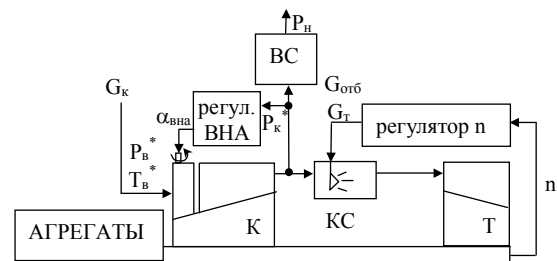


Рис. 3. Схема одновальной ВСУ с регулируемым компрессором

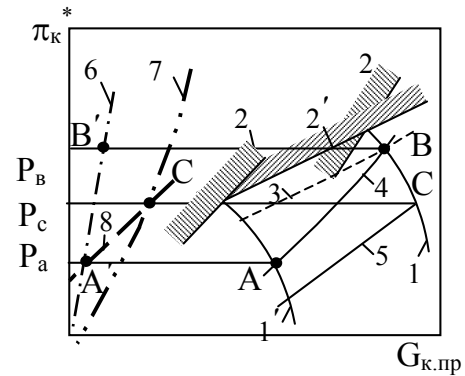


Рис. 4. Характеристика регулируемого компрессора одновальной ВСУ: 1 – линия $n_{пр} = \text{const}$, $\alpha_{ВНА} = \alpha_1$; 1' – линия $n_{пр} = \text{const}$, $\alpha_{ВНА} = \alpha_2$; 2 – граница ГДУ при $\alpha_{ВНА} = \text{const}$, $n = \text{var}$; 2' – граница ГДУ при $n_{пр} = \text{const}$, $\alpha_{ВНА} = \text{var}$; 3 – граница допустимых рабочих режимов; 4, 5 – линии рабочих режимов при минимальном и максимальном отборе воздуха и $n_{пр} = \text{const}$; 6, 7 – характеристики ВС при минимальном и максимальном расходе

Изменение положения ВНА от α_2 до α_1 в сторону увеличения (раскрытия) приводит к перемещению

рабочей точки на характеристике компрессора из положения А в положение В со снижением запаса ГДУ (им соответствуют точки А' и В' на характеристике ВС). Если же характеристика ВС изменяется в сторону больших расходов (уменьшения гидравлического сопротивления), то рабочая точка перемещается в положение С', а запас ГДУ изменяется незначительно. Отметим также, что характер изменения T_r^* при этом определяется условием постоянства приведенного расхода через турбину

$$A_T = G_T \frac{\sqrt{T_r^*}}{P_T^*},$$

где $P_T^* = \pi_K^* P_B^* \sigma_{КС}$.

В точке В по сравнению с точкой А выше и G_T , и π_K^* . В точке С по сравнению с точкой В ниже и G_T , и π_K^* . Поэтому при определенном сочетании характеристик компрессора и воздушной системы значение T_r^* при указанных переходах изменяется незначительно, что является положительной особенностью рассматриваемой ВСУ.

Таким образом, изменение положения ВНА позволяет обеспечить заданное положение рабочей точки на заданной характеристике ВС 8 (рис. 4). Это задание может быть выражено значением потребного давления или расхода отбираемого воздуха. Возможные структурные варианты САУ и особенности их реализации рассмотрены ниже.

Рассмотренная ВСУ не лишена рассмотренных ранее недостатков 1 и 2. Кроме того, известно [1], что термодинамическое совершенство газотурбинных установок определяется уровнем π_K^* и T_r^* . Использование одноступенчатого центробежного компрессора ограничивает параметр π_K^* сравнительно низкими значениями ($\pi_K^* = 4 \div 5$), которые определяются потребностями ВС. Использование осевого компрессора с отбором за промежуточными ступенями нецелесообразно из-за низкого КПД такого компрессора при малых расходах воздуха. Поэтому в рамках данной схемы повысить π_K^* термодинами-

ческого цикла ГТУ можно, используя двухступенчатый центробежный компрессор с отбором воздуха за первой ступенью (рис. 5). Несмотря на усложнение ВСУ и новые проблемы, связанные с согласованием работы этих ступеней, недостатки 1 и 2 сохраняются, что приводит к необходимости поиска других схемных решений.

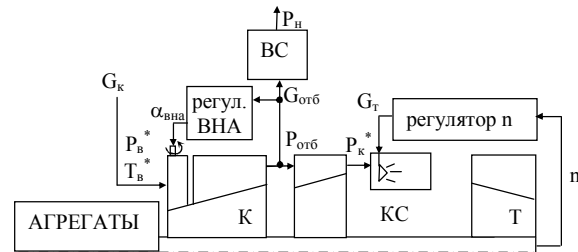


Рис. 5. Схема одновальной ВСУ с регулируемым двухступенчатым компрессором

3. ВСУ со свободной турбиной и служебным компрессором

Существенное повышение КПД ВСУ без использования двухступенчатого компрессора может быть достигнуто при переходе к двухвальной схеме (рис. 6), в которой функции сжатия циклового и отбираемого воздуха разделены; предназначенный для ВС ЛА воздух сжимается в отдельном служебном компрессоре (СК) с управляемым ВНА, приводимом от свободной турбины (СТ).

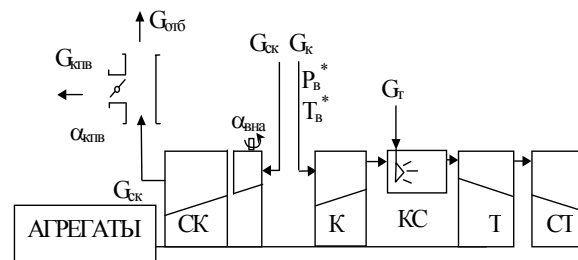


Рис. 6. Схема двухвальной ВСУ со служебным компрессором

Турбокомпрессор такой ВСУ имеет высоконапорную ($\pi_K^* \sim 8 \div 10$) центробежную ступень и лишен перечисленных выше недостатков 1 и 2, так как с него снято требование постоянства частоты вращения, и изменение потребного расхода воздуха или

электрической нагрузки он воспринимает одинаково – как изменение загрузки СТ, а дросселирование турбокомпрессора выполняется при переменной n_{TK} , то есть аналогично турбокомпрессору турбовального двигателя. Частота вращения свободной турбины $n_{СТ}$ при этом должна быть постоянной. Поэтому, как показано выше, управление параметрами отбираемого воздуха в данной схеме также может быть обеспечено изменением положения ВНА СК. На рис. 7 представлена характеристика СК, соответствующая $n_{СТ.пр} = \text{const}$, на которую нанесена характеристика ВС.

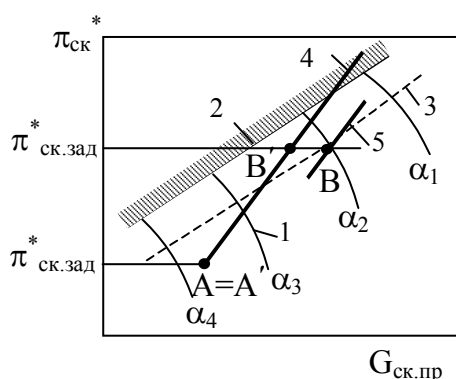


Рис. 7. Характеристика СК при $n_{пр} = \text{const}$: 1 – напорные линии $\alpha_{ВНА} = \text{const}$; 2 – граница ГДУ; 3 – граница допустимых рабочих режимов; 4, – характеристика ВС; 5 – характеристика сети с открытым КПВ

Видно, что при увеличении $\alpha_{ВНА}$ рабочая точка А перемещается по характеристике ВС вверх, и происходит значительное снижение запаса ГДУ СК. Поэтому большие давления отбираемого воздуха (точка В) могут быть обеспечены только при увеличении расхода воздуха в компрессоре до значения, соответствующего точке В. Чтобы избыточный воздух не попадал в ВС, необходимо использовать клапан перепуска воздуха (КПВ, рис. 6) и открыть его так, чтобы $G_{КПВ} = G_{в} - G_{в}^{\cdot} = G_{СК} - G_{отб}$. Отметим, что открытие КПВ приводит к смещению характеристики сети, присоединенной к СК (рис. 7). Это следует учитывать при разработке динамической модели объекта управления, необходимой для создания САУ.

Итак, наиболее полное решение поставленной выше проблемы обеспечивается двухвальной ВСУ

со служебным компрессором. Рассмотрим некоторые проблемы управления такой ВСУ.

4. Анализ структурных вариантов САУ системы кондиционирования

При $n = \text{const}$ и $\alpha_{ВНА} = \text{const}$ положение напорной линии (изодромы) характеристики компрессора зависит от температуры воздуха на входе в двигатель $T_{В}^*$. Поэтому приведенная на рис. 7 характеристика расслаивается по $T_{В}^*$, в частности, смещаются линии 2 и 3. Будем считать, что известны характеристики сети потребителя $\pi_{СК}^* = f_{П}(G_{отб.пр})$ и КПВ $G_{КПВ.пр} = f_{КПВ}(\pi_{КПВ}^*, \alpha_{КПВ})$, а режим ВС задан потребным значением $\pi_{СК.зад}^*$ (в исходном виде указанных характеристик и задания могут использоваться значения $P_{К}^*$, в этом случае их необходимо преобразовать, используя соотношение $\pi_{СК}^* = P_{К}^*/P_{В}^*$).

4.1. Разомкнутое управление ВНА и КПВ

Пусть потребная характеристика ВС слабо зависит от $T_{В}^*$, а режим работы ВС задан значением $\pi_{СК.зад}^*$. Тогда допустимые сочетания $\pi_{СК}^*$ и $G_{СК}$ ограничены линиями 3 (рис. 7) $\pi_{СК}^* = f_{огр}(G_{СК.огр}, T_{В}^*)$, каждая из которых параметризована по α : $\alpha_{огр} = f_{\alpha.огр}(\pi_{СК}^*, T_{В}^*)$. Соответствующие изолинии $T_{В}^* = \text{const}$ и $\alpha_{огр} = \text{const}$ представлены на рис. 8.

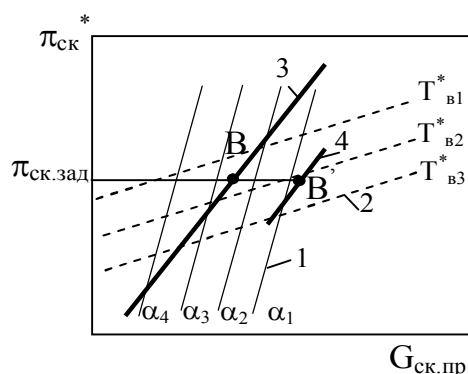


Рис. 8. Характеристика по границе допустимых режимов: 1 – линии $\alpha_{ВНА} = \text{const}$; 2 – линии $T_{ВНА}^* = \text{const}$; 3 – характеристика ВС; 4 – характеристика сети

На основе этой характеристики и характеристики $f_{КПВ}$ можно получить настроечные характеристики

разомкнутых регуляторов (автоматов) ВНА и КПВ (рис. 9). Заданное положение ВНА определяется как $\alpha_{\text{ВНА.зад}} = \min(\alpha_{\text{огр}}, \alpha_{\text{п}})$.

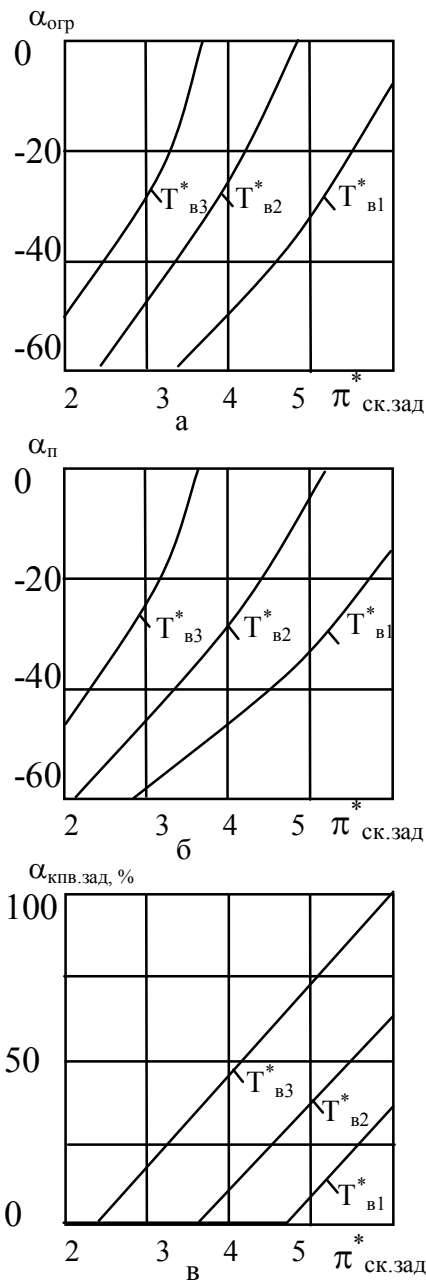


Рис. 9. Настройки автоматов ВНА и КПВ: а, б – по границе рабочих режимов; в – по характеристике ВС

Погрешности управления при полностью разомкнутой схеме определяются погрешностями следующих исходных данных:

- заданного значения $\pi_{\text{СК.зад}}^*$;
- характеристики компрессора

- $\pi_{\text{СК}}^* = f(G_{\text{СК.пр}}, \alpha_{\text{ВНА}}, T_{\text{в}}^*)$;
- границы допустимых рабочих режимов $\pi_{\text{СК}}^* = f_{\text{огр}}(G_{\text{СК.огр}}, T_{\text{в}}^*)$;
- расходной характеристики КПВ $G_{\text{КПВ.пр}} = f_{\text{КПВ}}(\pi_{\text{КПВ}}^*, \alpha_{\text{КПВ}})$;
- характеристики ВС $\pi_{\text{СК}}^* = f_{\text{П}}(G_{\text{отб.пр}})$.

4.2. Замкнутое управление давлением за СК, разомкнутое антипомпажное управление

Для организации замкнутого управления необходимо измерять параметры воздуха за СК. Наиболее просто реализовать измерение давления. В качестве управляющего воздействия в замкнутом контуре управления целесообразно использовать $\alpha_{\text{ВНА}}$, так как при рационально спроектированном служебном компрессоре значительная часть его режимов реализуется при закрытом положении КПВ, и использовать КПВ для управления не представляется возможным.

Положение КПВ устанавливается по следующему алгоритму:

- по представленной на рис. 9,а зависимости определяем $\alpha_{\text{огр}} = f_{\alpha_{\text{огр}}}(\pi_{\text{СК}}^*, T_{\text{в}}^*)$;

- сравниваем с ним текущее значение $\alpha_{\text{ВНА.тек}}$: если $\alpha_{\text{ВНА.тек}} < \alpha_{\text{огр}}$, необходимо открыть КПВ;

- определяем потребное положение КПВ, используя его расходную характеристику:

$$\alpha_{\text{кпв.зад}} = f^{-1}(G_{\text{кпв.пр.зад}}, \pi_{\text{кпв}}^*),$$

где

$$G_{\text{кпв.пр.зад}} = G_{\text{ск.пр.огр}} - G_{\text{ск.пр.тек}} + G_{\text{кпв.пр.тек}};$$

$G_{\text{ск.пр.огр}}$ определяется по текущим значениям $\pi_{\text{СК}}^*$ и $\alpha_{\text{ВНА}}$ и в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 8;

$G_{\text{ск.пр.тек}}$ определяется по текущим значениям $\pi_{\text{СК}}^*$ и $\alpha_{\text{ВНА}}$ в соответствии с характеристикой СК (рис. 7);

$f^{-1}(\dots)$ – функция, обратная к $f(\dots)$.

Несомненным преимуществом данного варианта структуры САУ по сравнению с предыдущими является возможность обеспечения высокой точности

поддержания потребного давления. Отметим, что в представленном алгоритме не используется информация о характеристике потребителя. Поэтому такая система инвариантна по отношению к конфигурации ВС ЛА. Отсутствие необходимости использования указанной характеристики приводит также к снижению погрешностей управления КПВ.

4.3. Замкнутое управление давлением за СК, замкнутое антипомпажное управление

Для реализации второго замкнутого контура необходимо обеспечить измерение расхода воздуха $G_{СК}$ или $G_{отб}$. По конструктивным соображениям более приемлемым может быть второй вариант. В этом случае значение $G_{СК}$ может быть рассчитано: $G_{СК} = G_{отб} + G_{КПВ}$, а $G_{КПВ}$ определяется по характеристике КПВ.

Контур антипомпажного управления регулирует запас ГДУ СК. Этот запас может быть представлен как избыточный по отношению к границе допустимых рабочих режимов расход (рис. 7):

$$\Delta G = G_{ск.пр.тек} - G_{ск.пр.огр}$$

Тогда заданное значение $\Delta G_{зад} = 0$.

В отличие от предыдущего варианта, в данном случае для настройки САУ не используется характеристика СК – нужна лишь характеристика ограничений в форме $G_{ск.пр.огр} = f(\pi_{СК}^*, T_B^*)$, в которой не используются текущие значения $\alpha_{ВНА}$. Еще одним существенным преимуществом данного варианта структуры САУ является возможность обеспечения хорошей динамики контура антипомпажного управления путем использования релейного ПИД-регулятора расстояния до линии ограничения.

Выводы

1. Применение компрессора с управляемым ВНА позволяет решить проблему обеспечения заданных параметров воздуха, отбираемого из ВСУ.

2. Использование двухвальной схемы обеспечивает возможность существенного повышения экономичности ВСУ.

3. Замкнутое управление параметрами СК с использованием поворотных ВНА и КПВ с непрерывно изменяемом положением обеспечивает более высокую точность управления по сравнению с другими структурными вариантами САУ, поэтому оно может быть рекомендовано к практической реализации.

4. Предложенная методика позволяет выполнить настройку соответствующих контуров управления.

В качестве направлений дальнейших исследований можно рекомендовать:

- проработку предложенного варианта одновальной ВСУ с двухступенчатым компрессором и его сравнение с ВСУ двухвальной схемы;
- развитие методики анализа погрешностей управления параметрами СК для различных структурных схем САУ;
- развитие методики анализа и синтеза динамических свойств рассмотренных схем САУ;
- разработку и анализ преимуществ многомерной САУ ВСУ с совместным взаимно согласованным управлением расходом топлива, положением КПВ и углом установки ВНА.

Литература

1. Кулагин В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2002. – 616 с.
2. Нечаев Ю.Н. Законы управления и характеристики авиационных силовых установок. – М.: Машиностроение, 1995. – 400 с.

Поступила в редакцию 1.06.2004

Рецензент: д-р техн. наук Б.И. Кузнецов, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.