

## Управление органами механизации компрессора газотурбинного двигателя с использованием его математической модели

Гуревич О.С.<sup>1\*</sup>, Гольберг Ф.Д.<sup>1\*\*</sup>, Зуев С.А.<sup>1\*\*\*</sup>, Бусурин В.И.<sup>2\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,  
ЦИАМ, Авиамоторная ул., 2, Москва, 111116, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

\*e-mail: [gurevich\\_os@ciam.ru](mailto:gurevich_os@ciam.ru)

\*\*e-mail: [fegolb@ciam.ru](mailto:fegolb@ciam.ru)

\*\*\*e-mail: [zuevsa@ciam.ru](mailto:zuevsa@ciam.ru)

\*\*\*\*e-mail: [kaf301@mail.ru](mailto:kaf301@mail.ru)

### Аннотация

Рассмотрены новые принципы управления органами механизации компрессора, основанные на применении в программном обеспечении цифровой САУ математической модели «виртуальный двигатель». Разработаны структура и алгоритмическое обеспечение для управления углами установки направляющих аппаратов компрессора и клапанами перепуска воздуха непосредственно по расчетным значениям запасов газодинамической устойчивости компрессора и величинам его КПД. Приведены результаты оценки эффективности рассмотренных методов управления применительно к ТРДД большой степени двухконтурности.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, газотурбинный двигатель, органы механизации компрессоров, виртуальный двигатель.

## Введение

Современные газотурбинные двигатели управляются с использованием параметров регулирования, косвенно характеризующих его базовые характеристики, такие как величина тяги  $R$ , удельный расход топлива  $C_R$ , а также параметры, непосредственно влияющие на безопасность эксплуатации и надёжность, такие как температура газа  $T^*_Г$  в камере сгорания (КС), запасы  $\Delta K_y$  газодинамической устойчивости (ГДУ) и др. Непосредственное регулирование этих параметров недоступно в связи с невозможностью их измерения. В настоящее время программы управления двигателем формируются при проектировании и доводке двигателя на основании расчетов и экспериментальных характеристик по доступным для измерения параметрам, таким как частоты вращения  $n_i$  роторов, температура газа за турбиной  $T^*_Т$ , расход  $G_T$  топлива в КС.

Применение в современных системах автоматического управления (САУ) ГТД цифровых электронных регуляторов, обладающих высоким быстродействием (системы типа FADEC), позволяет ввести в программное обеспечение (ПО) этих систем термогазодинамическую математическую модель двигателя («виртуальный двигатель») [1] и с достаточно высокой точностью вычислять в процессе работы двигателя параметры, недоступные для непосредственного измерения –  $R$ ,  $C_R$ ,  $T^*_Г$ ,  $\Delta K_y$ .

Использование этих параметров для регулирования двигателя позволяет повысить качество управления рабочим процессом в нем и реализовать характеристики, заложенные при проектировании.

Применение математических моделей двигателя в САУ, рассматривается в настоящее время как одно из перспективных направлений развития систем управления, контроля и диагностики двигателей [2-5].

### **Особенности выбора программ управления**

#### ***Управление органами механизации компрессора высокого давления***

В отличие от применяемого обычно разомкнутого управления углами  $\varphi_{НА}$  установки направляющих аппаратов компрессора и клапанами  $L_{КЛ}$  перепуска воздуха по программам вида:

$$\varphi_{НА} (L_{КЛ}) = f(n_K, T_{ВХ}^*)$$

рассмотрим замкнутое управление этими регулируемыми факторами непосредственно по параметрам, характеризующим запасы ГДУ –  $\Delta K_y$  и эффективность компрессора – его КПД  $\eta_K^*$  [6-7].

Схема структурно-алгоритмического построения контуров управления органами механизации (ОМ) компрессора высокого давления (КВД) приведена на рис. 1.

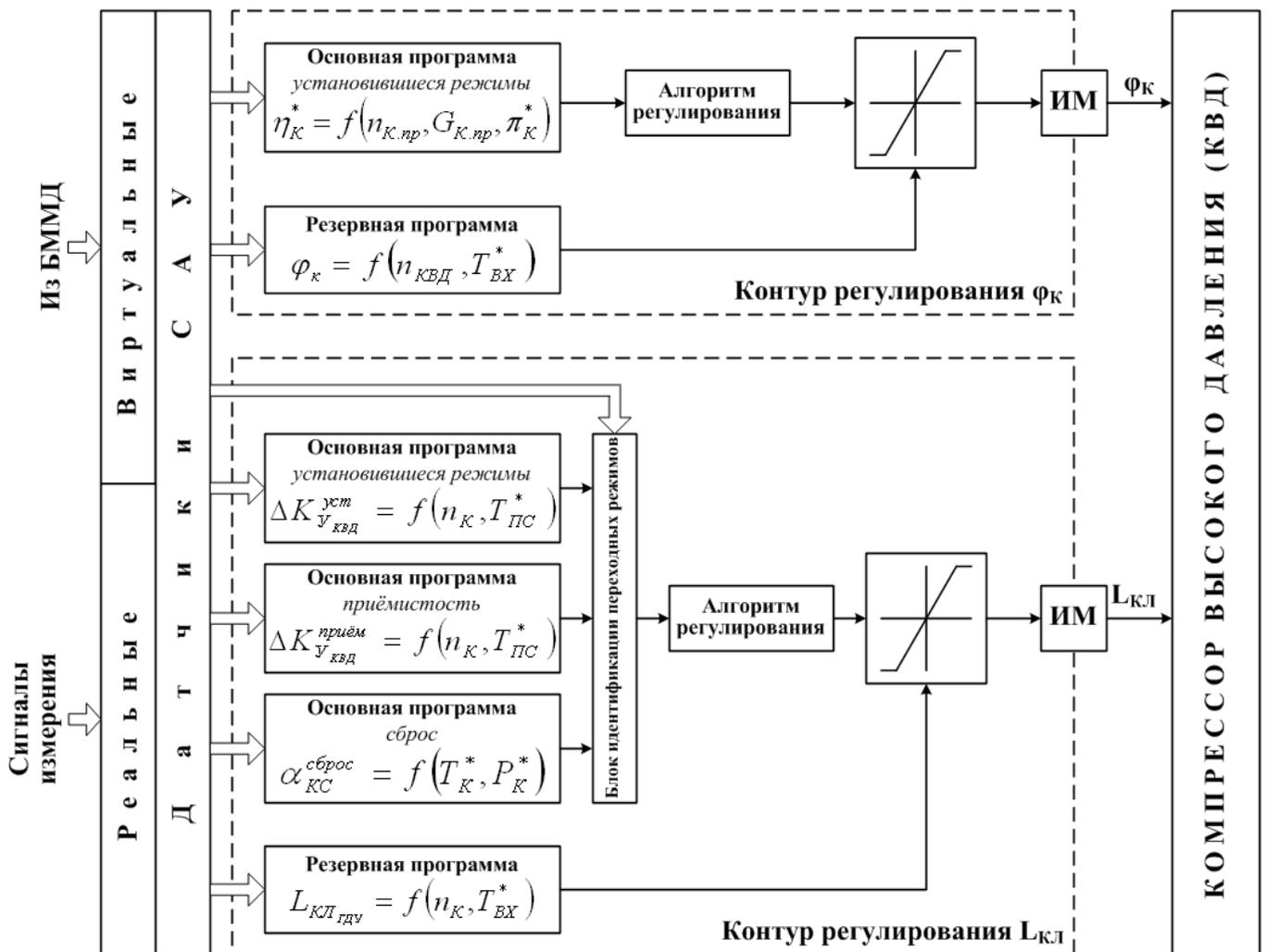


Рис. 1 - Структурно-алгоритмическое построение контуров управления КВД

Основными для управления КВД в этом случае являются программы:

$$\eta_K^{*max} = f(n_{Kпр}, G_{Kпр}, \pi_K^*) \text{ и}$$

$$\Delta K_{ymin} = f(n_{Kпр}, G_{Kпр}, \pi_K^*),$$

где  $G_{Kпр}$  – приведенный расход воздуха через КВД,  $\pi_K^*$  – степень повышения давления в КВД. Первая из них выбирается из условия обеспечения максимально возможного КПД КВД на установившихся режимах его работы. При этом режимы работы, как и характеристики КВД, определяются по частоте вращения  $n_{Kпр}$ , приведенной по температуре  $T_{пс}^*$  на входе в компрессор, вычисляемой с помощью бортовой математической модели двигателя (БММД), вместо используемой в

настоящее время температуры  $T_{ВХ}^*$  на входе в двигатель. Вторая программа обеспечивает сохранение требуемых запасов ГДУ КВД на установившихся и переходных режимах работы двигателя.

В связи с изменением положения границы «помпажа» компрессора в различных условиях эксплуатации и, как правило, отсутствием точных данных о запасах ГДУ для их использования в математической модели, в качестве регулируемого параметра может использоваться определяемое расчётом в БММД отклонение  $\delta\Delta K_{у}$  запасов ГДУ от их значений вдоль дроссельной характеристики двигателя – расходуемые запасы ГДУ.

Управление по программе  $\eta_{к}^{*max} = f(n_{кпр}, G_{кпр}, \pi_{к}^*)$ , обеспечивающей максимальные значения КПД компрессора, осуществляется воздействием на направляющие аппараты КВД.

Для управления расходуемыми запасами ГДУ КВД по программам вида  $\Delta K_{уmin} = f(n_{кпр}, G_{кпр}, \pi_{к}^*)$  дополнительно может осуществляться непрерывное замкнутое управление клапаном  $L_{кЛГду}$  перепуска воздуха из-за КВД.

Результатом взаимосвязанного управления  $\varphi_{НА}$  и  $L_{кЛГду}$  по описанной выше схеме будет увеличение КПД КВД с сохранением запасов ГДУ, и вследствие этого на установившихся режимах работы двигателя – повышение его экономичности и тяги.

На режимах сброса клапан перепуска воздуха можно использовать для защиты от погасания камеры сгорания. Для этого воздействием на клапан  $L_{кЛГду}$  можно применить программу управления  $\alpha_{кС} = f(T_{к}^*, P_{к}^*)$  по рассчитанному в математической модели значению коэффициента  $\alpha_{кС}$  избытка воздуха  $\alpha_{кС}$ .

Увеличение расхода перепускаемого воздуха, позволит ограничить максимальную допустимую величину  $\alpha_{КС}$  и обеспечить устойчивое горение в КС.

### *Управление органами механизации подпорной ступени компрессора низкого давления*

Одна из задач регулирования ТРДД, в которых применяются компрессоры низкого давления с подпорными ступенями (ПС), связана со значительным снижением запасов ГДУ ПС на режимах сброса. Для её решения применяются клапаны  $L_{ПСГДУ}$  перепуска воздуха из ПС.

Программы разомкнутого (без обратной связи) управления клапанами  $L_{ПСГДУ}$  на современных двигателях как для установившихся, так и переходных режимов работы имеют вид:

$$L_{ПСГДУ} = f(n_B, T_{ВХ}^*)$$

С помощью ПО «виртуальный двигатель» можно реализовать замкнутое непрерывное управление клапаном перепуска воздуха из ПС непосредственно по величине требуемых запасов газодинамической устойчивости ПС компрессора низкого давления (КНД) по программе

$$\Delta K_{уПСmin} = f(n_{ПСпр}, \pi_{ПС}^*, G_{ПСпр}).$$

Схема этого контура показана на рис. 2.

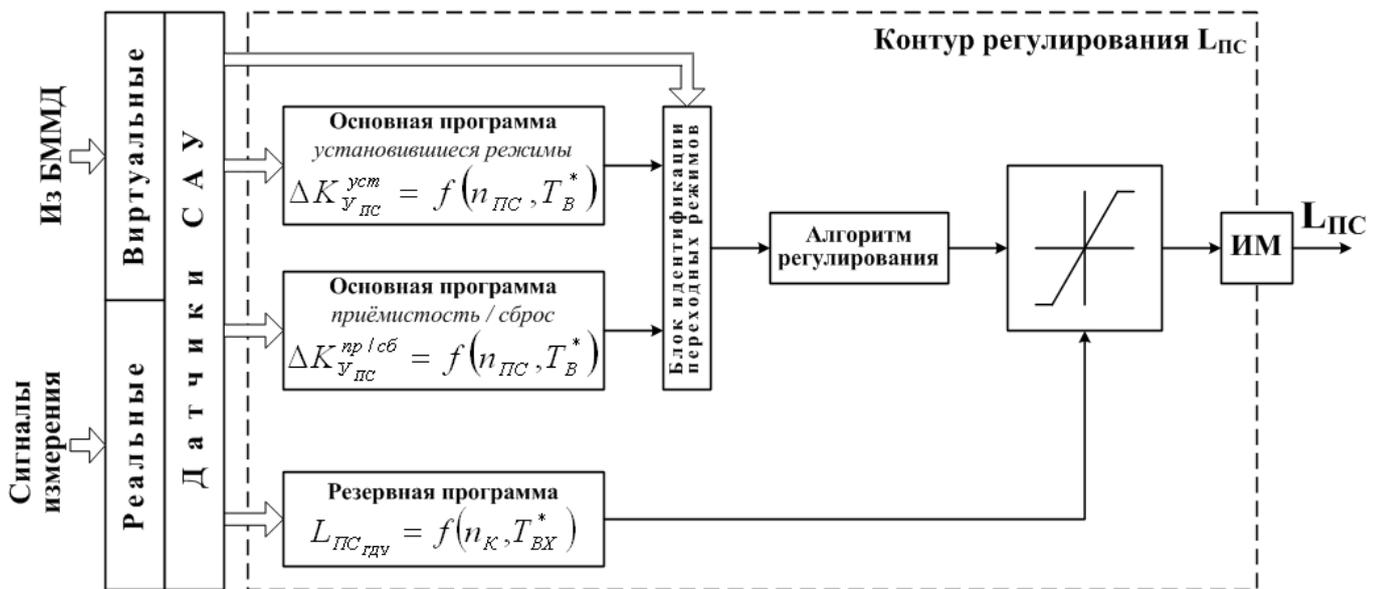


Рис. 2 – Структурно-алгоритмическое построение контура управления ПС КНД

Так же, как и при управлении отбором воздуха из КВД, на установившихся и переходных режимах работы двигателя целесообразно применять различные программы.

На установившихся режимах и на режимах приемистости, где запасы ГДУ ПС не снижаются, можно минимизировать (или полностью исключить) отборы воздуха из ПС и, таким образом, улучшить экономичность двигателя на установившихся режимах.

На режимах сброса, где максимально расходуются запасы ГДУ ПС, для их сохранения на достаточном уровне увеличивается перепуск воздуха из ПС.

### **Оценка эффективности применения новых методов управления органами механизации компрессоров**

Ниже приведены некоторые оценки, полученные при моделировании процессов управления одним из ТРДД с большой степенью двухконтурности.

На рис. 3 показано изменение параметров двигателя на дроссельных режимах его работы в условиях крейсерского полета ( $M = 0.8, H = 11\text{км}$ ) для двух способов управления органами механизации КВД.

При одном из них управление ОМ КВД осуществляется по традиционным программам управления вида  $\varphi_{\text{НА}}(L_{\text{КЛ}}) = f(n_{\text{К}}, T_{\text{ВХ}}^*)$ .

При втором способе НА КВД управление осуществляется по программе  $\eta_{\text{К}}^{*\text{max}} = f(n_{\text{Кпр}}, G_{\text{Кпр}}, \pi_{\text{К}}^*)$ , где величина  $\eta_{\text{К}}^{*\text{max}}$  соответствует максимальным величинам КПД КВД при незначительном уменьшении запасов ГДУ (не более 4% по отношению к их величинам на установившихся режимах работы двигателя в условиях  $M = 0, H = 0$ , получаемым при программах регулирования первого типа).

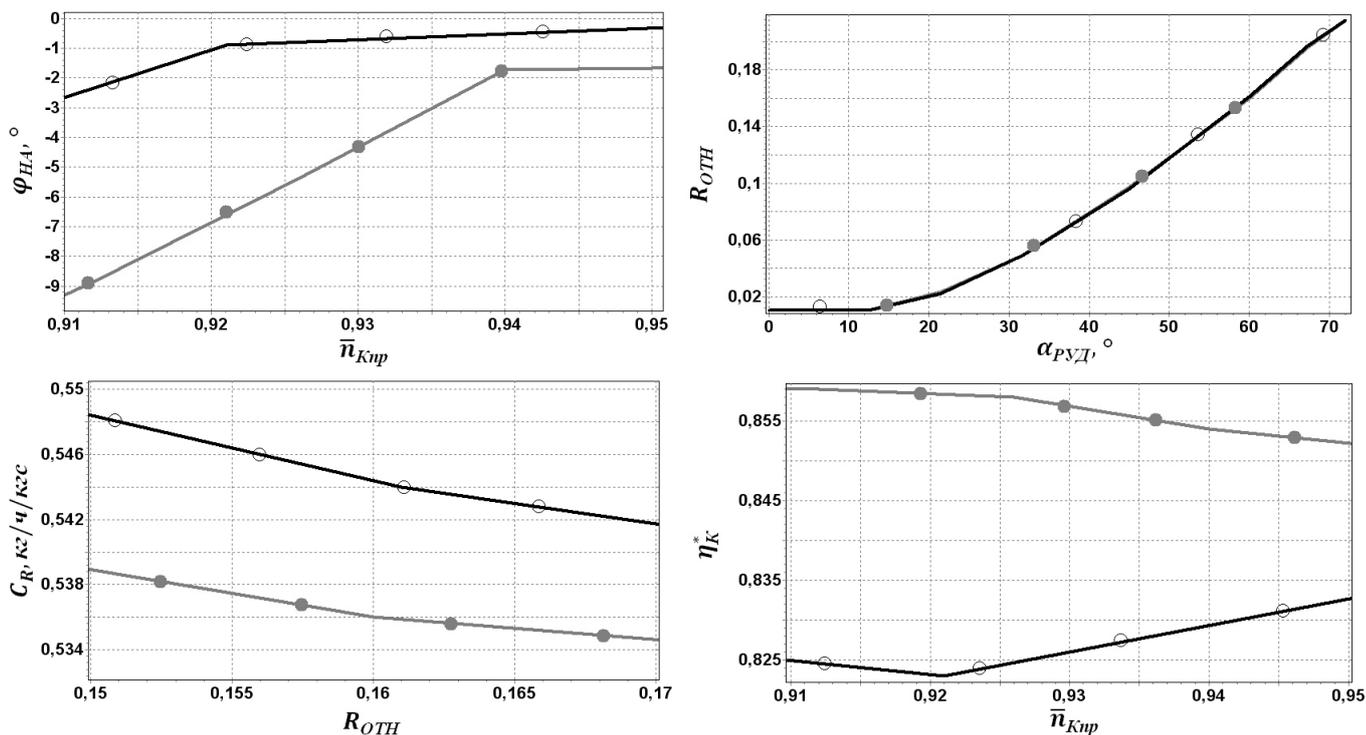


Рис. 3 - Дроссельные режимы,  $M = 0.8, H = 11\text{км}$ ; —●— Интеллектуальное управление  $\Delta K_{\text{У}}$  и КПД компрессора; —○— управление  $\varphi_{\text{НА}}$  по измеряемым параметрам

Из графиков видно, что при таком управлении на установившихся режимах работы ТРДД вблизи крейсерского режима полета удается заметно снизить удельный расход топлива при сохранении величины тяги.

На рис. 4 приведено изменение некоторых параметров в процессах приемистости на режиме полета  $M = 0.5$   $H = 0$ .

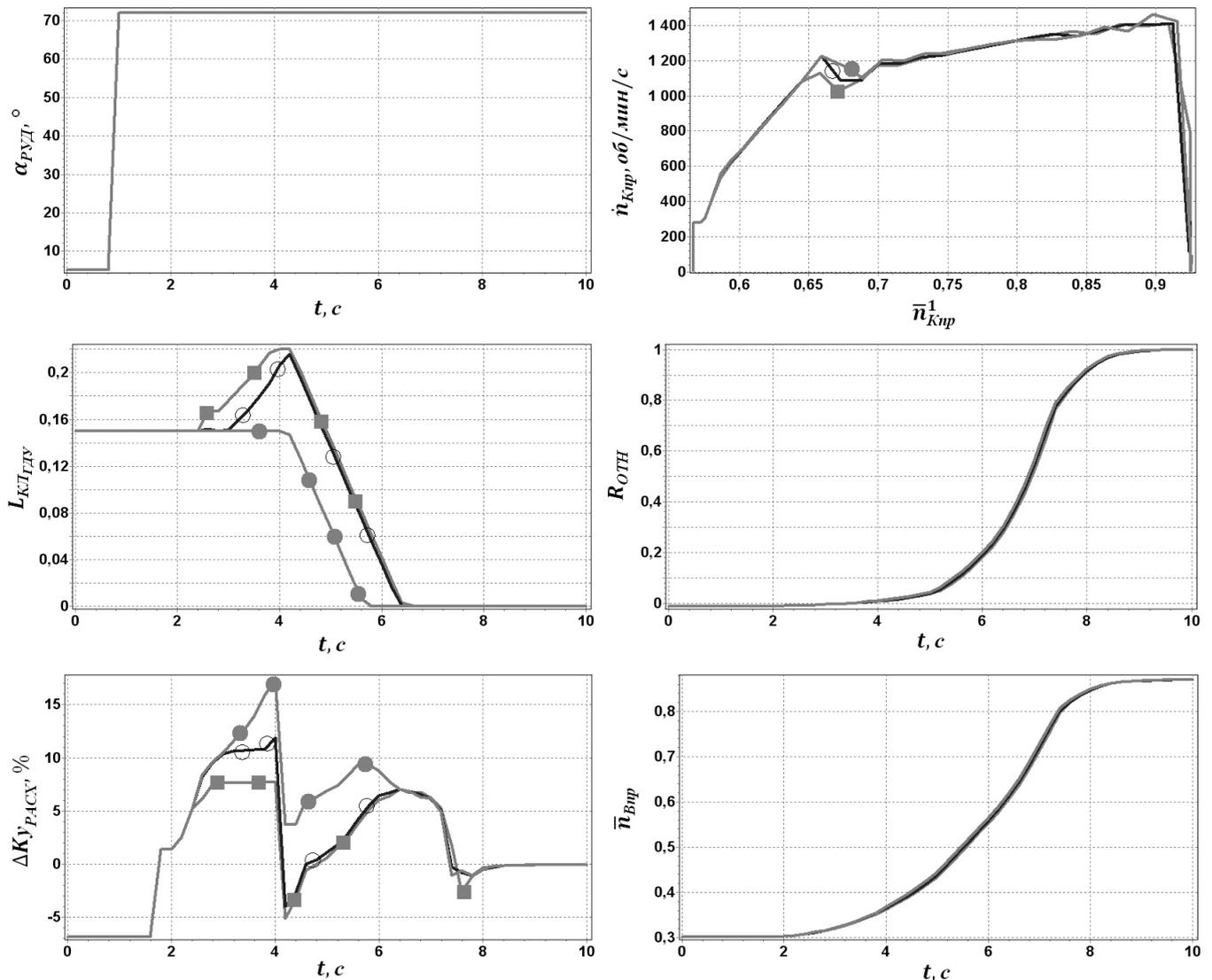


Рис. 4 - Процесс приемистости,  $M = 0.5$ ,  $H = 0$ ;  $\bullet$ — Традиционная программа управления  $L_{KLГДУ}$  ( $\Delta k_{y_{расх}} = 17\%$ );  $\circ$ — Управление  $L_{KLГДУ}$  по программе  $\Delta k_{y_{расх}} \leq 10\%$ ;  $\blacksquare$ — Управление  $L_{KLГДУ}$  по программе  $\Delta k_{y_{расх}} \leq 7\%$

Процессы получены при традиционных программах управления и при применении рассмотренных методов. В последнем случае ограничение расходуемых

запасов ГДУ обеспечивается воздействием на клапан перепуска воздуха, а с помощью программы:

$$(dn_K/dt)_{\text{ПР}} = f(P_{\text{ВХ}}^*, n_K, T_{\text{ВХ}}^*)$$

сохраняется характер изменения тяги и время процесса приемистости.

Видно, что в данном случае удается снизить на 10% величину расходуемых запасов ГДУ за счет увеличения примерно на 7% максимальной величины расхода перепускаемого воздуха.

На рис. 5 приведено изменение параметров ТРДД в процессах сброса, при традиционных программах управления и при применении замкнутого управления клапаном  $L_{\text{КЛГДУ}}$  перепуска воздуха по программе ограничения величины коэффициента  $\alpha_{\text{КС}}$ .

Из графиков видно, что применяя замкнутое управление клапаном перепуска воздуха по расчетным значениям  $\alpha_{\text{КС}}$  можно уменьшить максимальные величины  $\alpha_{\text{КС}}$  в процессе сброса для обеспечения устойчивого горения в КС. При этом процессы изменения других параметров двигателя (тяги  $R$  и частоты вращения КНД  $n_{\text{В}}$ ) отличаются незначительно.

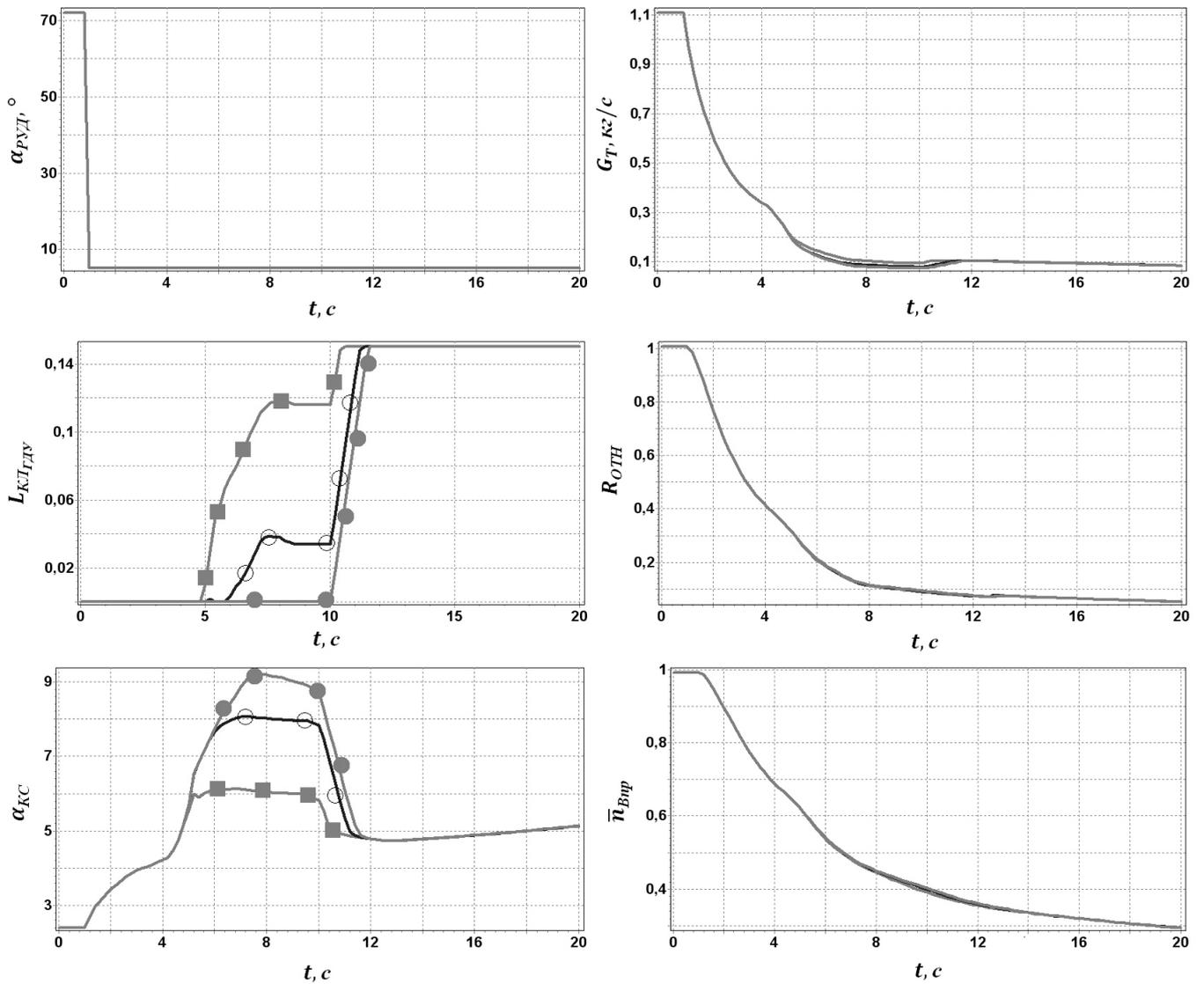


Рис. 5 - Процессы сброса,  $M = 0$ ,  $H = 0$ ;  $\bullet$ — Традиционная программа управления  $L_{кЛгду}$  ( $\alpha_{кс} = 9.2$ );  $\circ$ — Управление  $L_{кЛгду}$  по программе  $\alpha_{кс} \leq 8$ ;  $\blacksquare$ — Управление  $L_{кЛгду}$  по программе  $\alpha_{кс} \leq 6$

На рис. 6 показано изменение параметров ТРДД в условиях  $M = 0.5$ ,  $H = 0$  в диапазоне дроссельных режимов, где происходит срабатывание клапана перепуска воздуха из ПС при дискретном управлении положением клапана перепуска по традиционной программе и при замкнутом управлении по расчетным параметрам. Величины расходуемых запасов ГДУ ПС рассчитываются относительно их значений вдоль дроссельной характеристики двигателя в условиях  $M = 0$ ,  $H = 0$ .

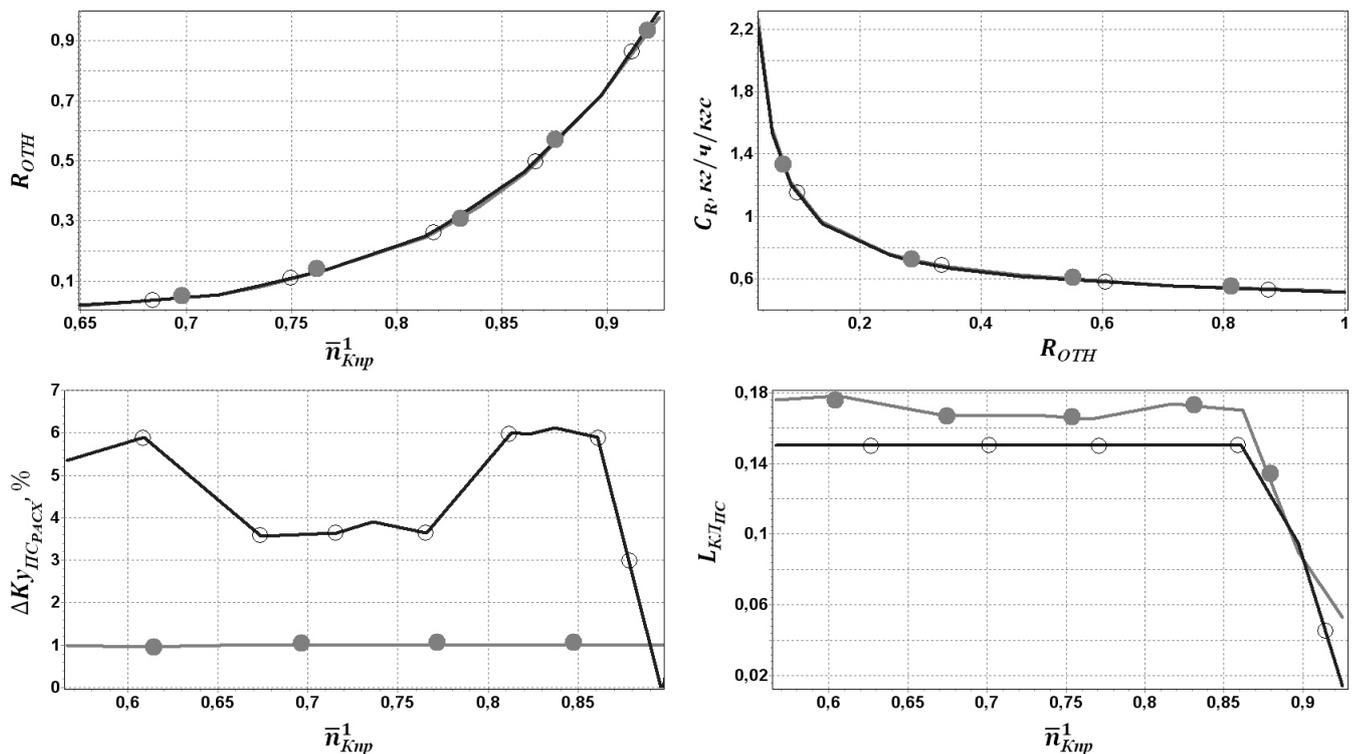


Рис. 6 - Изменение параметров двигателя вдоль дроссельной линии,  $M = 0.5, H = 0$ ;  
 —●— Управление по расчетным параметрам ( $\Delta K_{у, ПС, расх, max} = 1\%$ ); —○— Традиционная программа управления

Видно, что при регулировании положения клапана перепуска воздуха из ПС  $L_{ПСГДУ}$  по традиционной программе наблюдается увеличение расходуемых запасов ГДУ ПС относительно дроссельной линии в условиях  $M = 0, H = 0$  на величину до 6%. При замкнутом регулировании с настройкой  $\Delta K_{у, ПС, расх, max} = 1\%$  заданная величина расходуемых запасов поддерживается неизменной вплоть до достижения относительной приведенной частоты вращения ротора высокого давления величины  $n_{Кпр} = 95\%$ , при которой происходит принудительное закрытие клапана перепуска. При этом величины тяги и удельного расхода топлива ( $R$  и  $C_R$ ) остаются практически неизменными.

## Заключение

1. Разработаны методы управления органами механизации компрессора ТРДД, основанные на применении ПО «виртуальный двигатель», позволяющие осуществить:

- взаимосвязанное управление органами механизации КВД (направляющими аппаратами  $\varphi_{НА}$  и клапанами  $L_{КЛi}$  отбора воздуха) по расчетным значениям запасов ГДУ, КПД компрессора и коэффициента  $\alpha_{КС}$  избытка воздуха, получаемым расчетом во встроенной в САУ математической модели двигателя;
- управление клапаном перепуска воздуха из подпорной ступени компрессора низкого давления непосредственно по величинам запасов ГДУ ПС, оптимизированное для установившихся и переходных режимов работы двигателя.

2. Путем математического моделирования процессов управления ТРДД большой степени двухконтурности показано, что применение разработанных методов управления может позволить:

- на установившихся крейсерских режимах работы двигателя уменьшить удельный расход топлива при сохранении требуемой величины тяги;
- в процессах приемистости существенно (до 10%) уменьшить расходуемые запасы ГДУ КВД;
- в процессах сброса снизить на величину, достигающую 8%, расходуемые запасы ГДУ подпорной ступени КВД и в 1,5...2 раза уменьшить

максимальные величины коэффициента избытка воздуха для сохранения устойчивого горения в камере сгорания.

### Библиографический список

1. Гольберг Ф.Д., Гуревич О.С., Петухов А.А. Математическая модель двигателя в САУ ГТД для повышения надежности и качества управления // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=33278>
2. Гольберг Ф.Д., Гуревич О.С., Петухов А.А. Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями / Под ред. О.С. Гуревича. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. - 264 с.
3. Sanjay G., Kumar A., Mathews H.K., Rosenfeld T., Rybarik P., Viassolo D.E. Intelligent control and health monitoring. More Intelligent Gas Turbine Engines. – Cleveland, 2009. Part 3. - 178 p.
4. Litt J.S., Simon D.L., Garg S., Ten-Heui Guo, Mercer C., Millar R., Behbahani A., Bajwa A., Jensen D.T. A Survey of Intelligent Control and Health Management Technologies for Aircraft Propulsion Systems // Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication. 2004. Vol. 1. № 12. Pp. 543-563.
5. Костюков В.М., Капырин Н.И. Модель газотурбинного двигателя и его системы управления для особых значений углов атаки и метеорологических условий // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28075>

6. Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д., Селиванов О.Д. Интегрированное управление силовой установкой многорежимного самолета. – М.: Машиностроение, 1994. - 304 с.

7. Нечаев Ю.Н. Законы управления и характеристики авиационных силовых установок. – М.: Машиностроение, 1995. - 400 с.