

УДК 621.452.33: 519.876.5

С.В. ЕПИФАНОВ, Р.Л. ЗЕЛЕНСКИЙ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТУРБОВАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Рассмотрены два метода формирования упрощенной математической модели турбовального двигателя в составе силовой установки летательного аппарата: автономный газогенератор с системой СТ-Р-В и автономный двигатель с системой Р-В. Данные модели могут быть использованы на полунатурном стенде при испытании систем автоматического управления. Приведены алгоритмы решений каждого метода. Получены переходные процессы по двум методам и сравнены с результатами моделирования по нелинейной математической модели. В качестве возмущающих факторов были выбраны следующие параметры: по газогенератору - расход топлива, а по винту - угол установки лопастей.

турбовинтовой двигатель, газогенератор, динамическая модель, автономный двигатель, система редуктор-винт

1. Постановка задачи

Проектирование и испытания современных электронных систем управления (САУ) летательных аппаратов и их двигательных установок - сложный и трудоемкий процесс. Его эффективность существенно повышается при широком использовании математического моделирования двигательных установок [1].

На стадии проектирования моделирование позволяет выбрать структуру и параметры и оценить качество САУ.

На ранней стадии испытаний САУ оказывается возможным заменить некоторые испытания полунатурным моделированием, при котором испытываемые элементы САУ представлены натурными образцами, а объект управления и другие элементы САУ - математическими моделями.

Применение полунатурного моделирования особенно эффективно для таких объектов, которые имеют высокую стоимость и натурные испытания которых требуют специального оборудования и расходных материалов. Одним из таких объектов является двигательная установка.

Одним из важнейших требований к математическим моделям, используемым при полунатур-

ных испытаниях, является их функционирование в реальном масштабе времени, что обеспечивает сопряжение моделей с натурными элементами САУ. Для такого сложного объекта, как авиационный газотурбинный двигатель, это требование противоречит требованиям высокой точности и накладывает существенные ограничения на структуру модели.

Так, например, имеющиеся универсальные средства типа ПЭВМ в настоящее время не обеспечивают реализацию в реальном времени динамических моделей ГТД, основанных на решении уравнений динамики роторов совместно с термогазодинамическими уравнениями рабочего процесса.

Поэтому в рассматриваемом случае математическая модель получается путем упрощения исходной нелинейной поэлементной модели рабочего процесса и является результатом компромисса между обеспечиваемым на заданной вычислительной базе быстродействием и достижимой при выбранной структуре модели точностью расчета параметров объекта.

Объект моделирования - турбовинтовая двигательная установка, в состав которой входят двигатель с одновальным газогенератором (ГГ) и свободной турбиной (СТ), редуктор и воздушный винт (рис. 1).

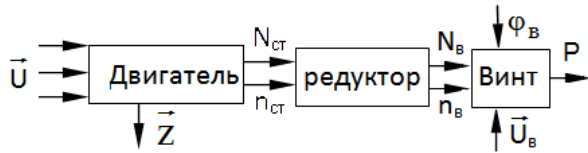


Рис. 1. Структурная схема ТВД:

G_T – расход топлива (управляющее воздействие на двигатель); Φ_v – угловое положение лопастей винта (управляющее воздействие на винт); $\vec{Z}$ – параметры рабочего процесса; $N_{ст}, n_{ст}$ – мощность и частота вращения свободной турбины; N_v, n_v – мощность и частота вращения винта

2. Виды динамических моделей

В зависимости от того, какие динамические свойства реальной двигательной установки учитываются при моделировании, можно выделить следующие виды моделей:

- модель с автономным газогенератором;
- модель с автономным двигателем.

2.1. Модель с автономным газогенератором

Данная модель основана на следующих предположениях:

- работа свободной турбины и выходного устройства не оказывает влияния на параметры газогенератора;
- связи мощности свободной турбины с частотой вращения и параметрами газогенератора на установившихся и переходных режимах одинаковы.

Эти предположения дают возможность считать, что модель двигательной установки состоит из двух независимых моделей (рис. 2) – модели газогенератора и модели системы СТ – редуктор – винт.

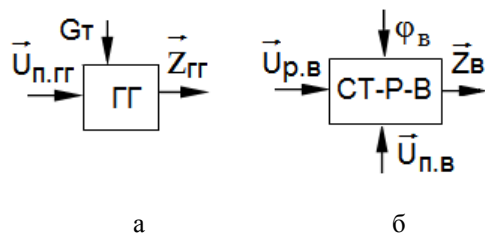


Рис. 2. Структура динамической модели ТВД с автономным газогенератором:
а – газогенератор; б – система СТ – редуктор-винт

2.1.1. Динамическая модель газогенератора.

Входные параметры: G_m – параметр режима, и параметры внешних воздействий

$$\vec{U}_{n.z2} = [H \ \Delta T_{cay} \ M \ \Delta G_{omb} \ N_{omb.z2}]^m,$$

где H и M – высота и скорость полета; ΔT_{cay} – отклонение температуры от значения, соответствующего стандартным атмосферным условиям; ΔG_{omb} и $N_{omb.z2}$ – отборы воздуха и мощности.

Выходные параметры:

$$\vec{Z}_{z2} = [n_{z2} \ P_k^* \ T_e^*]^m,$$

где n_{z2} – частота вращения ротора газогенератора; P_k^* – давление за компрессором; T_e^* – температура перед турбиной.

Динамическая модель ГГ формируется традиционным путем [2, 3] с использованием линеаризации термогазодинамической модели. Выходные параметры представляются как сумма статической $\vec{Z}_{cm}$ и динамической $\Delta \vec{Z}$ составляющих:

$$\vec{Z} = \vec{Z}_{cm} + \Delta \vec{Z}. \quad (1)$$

Значения $Z_{cm.i}$ как функции режима и полетных условий представляются нелинейной термогазодинамической моделью в приведенных параметрах:

$$Z_{cm.i.np} = f(G_{m.np}). \quad (2)$$

Динамические отклонения задаются моделью следующего вида:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\vec{X}} &= A \Delta \vec{X} + B \Delta \vec{U}; \\ \Delta \vec{Y} &= C \Delta \vec{X} + D \Delta \vec{U}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta \vec{X} = \Delta n_{z2}$, $\Delta \vec{U} = [\Delta G_m \ \Delta G_{omb} \ \Delta N_{omb.z2}]^m$,

$\Delta \vec{Y} = [\Delta T_{cm}^* \ \Delta P_k^* \ \Delta T_e^* \ \Delta P_c]$, T_{cm}^* – температура за свободной турбиной; P_c – тяга сопла.

Нелинейные свойства динамической модели учитываются путем динамической задания зависимости коэффициентов матриц A , B , C , D от режима и полетных условий. При этом в качестве параметра режима используется n_{z2} .

2.1.2. Динамическая модель системы СТ-Р-В.

Входные параметры (рис.2, б): $\vec{U}_{p.в} = [G_{m.np} \ \phi_{\theta}]$ и

$$\vec{U}_{n.в} = [H \ \Delta T_{cay} \ M \ \Delta N_{омб.см}]^m.$$

Выходные параметры: $\vec{Z}_{\theta} = [n_{cm} \ N_{cm} \ N_{\theta} \ P_{\theta}]^m$.

Динамическая модель системы СТ-Р-В основана на решении уравнения динамики ротора СТ:

$$J_{cm} \frac{d\omega_{cm}}{dt} = \frac{N_{cm} \eta_{mp} - N_{\theta} - \Delta N_{омб.см}}{\omega_{cm}}, \quad (4)$$

где ω_{cm} - круговая частота вращения ротора СТ,

N_{cm} и N_{θ} - мощность СТ и винта;

η_{mp} - КПД трансмиссии;

J_{cm} - момент инерции вращающихся масс, приведенный к частоте вращения СТ.

Мощность СТ определяется по внешней характеристике двигателя вида

$$N_{cm.np} = f(G_{m.np}, \phi_{\theta}, n_{cm.np}). \quad (5)$$

Мощность винта определяется по формуле

$$N_{\theta} = C_N \rho \ n_{\theta}^3 \ D^5, \quad (6)$$

где $C_N = f(\phi_{\theta}, \lambda)$ - коэффициент мощности;

$\lambda = \frac{V_n}{n_{\theta} D}$ - поступь винта,

$n_{\theta} = \frac{n_{cm}}{i_p}$ - частота вращения винта;

D - диаметр винта,

i_p - передаточное отношение редуктора,

ρ - плотность воздуха.

Таким образом, два выходных параметра системы СТ-Р-В (n_{cm} и N_{θ}) определяются в результате решения уравнения (4) с использованием характеристики винта $C_N = f(\phi_{\theta}, \lambda)$.

Третий выходной параметр (тяга P_{θ}) может быть рассчитан с помощью соответствующей характеристики винта $C_R = f(\phi_{\theta}, \lambda)$:

$$P_{\theta} = C_R \rho \ n_{\theta}^2 \ D^4. \quad (7)$$

2.2. Модель с автономным двигателем

Данная модель (рис. 3) не использует предположений об автономной работе газогенератора и об инвариантности внешней характеристики двигателя.

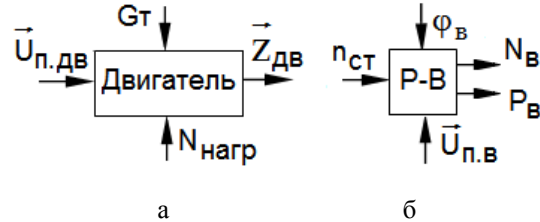


Рис. 3. Структура динамической модели ТВД с автономным двигателем: а - двигатель; б - система редуктор-винт

Однако, как это видно из анализа рис. 3, двигатель и винт являются автономными лишь с точки зрения описания их свойств, но для моделирования необходимо решать уравнения их работы совместно, так как входной параметр модели двигателя (мощность нагрузки $N_{нагр}$) является выходным параметром винта, а входной параметр системы Р-В (n_{cm}) является выходным параметром модели двигателя.

2.2.1. Динамическая модель двигателя. Вход-

ные параметры: G_m и

$$\vec{U}_{n.дв} = [H \ \Delta T_{cay} \ M \ \Delta G_{омб} \ \Delta N_{омб.гг} \ \Delta N_{нагр}]^m,$$

где $N_{нагр}$ - мощность внешней нагрузки на выводном валу СТ:

$$\Delta N_{нагр} = N_{нагр} - \frac{N_{\theta}}{\eta_{mp}} - \Delta N_{смб.см}. \quad (8)$$

Выходные параметры:

$$\vec{Z}_{дв} = [n_{гг} \ n_{cm} \ R_k^* \ T_c^* \ R_c \ N_{cm}]^m.$$

Динамическая модель двигателя формируется из исходной термогазодинамической модели путем ее линеаризации и представляется в форме (1).

Статические составляющие $Z_{cm.i}$ как функции режима и полетных условий представляются нелинейной термогазодинамической моделью или как характеристики в приведенных параметрах

$$Z_{cm.i.np} = f(G_{m.np}, n_{cm.np}), \quad (9)$$

где второй аргумент используется лишь для тех параметров, на которые его влияние существенно.

Динамические отклонения задаются моделью (3),

где $\Delta \bar{X} = [\Delta n_{22} \Delta n_{cm}]^m$;

$$\Delta \bar{U} = [\Delta G_m \Delta N_{назр} \Delta G_{омб} \Delta N_{омб.22}]^m;$$

$$\Delta \bar{Y} = [\Delta T_{cm}^* \Delta P_{\kappa}^* \Delta T_{\epsilon}^* \Delta P_{\epsilon} \Delta N_{cm}]^*.$$

Коэффициенты матриц А, В, С, D задаются как функции n_{22} , n_{cm} и внешних условий.

2.2.2. Модель системы редуктор-винт. Данная система – статическая, так как все динамические свойства регулятора и винта отнесены к СТ и учтены в модели двигателя.

Входные параметры: параметры режима n_{cm} и ϕ_{ϵ} ; параметры внешних воздействий:

$$\bar{U}_{n.\epsilon} = [H \Delta T_{cay} M]^m.$$

Выходные параметры: $\bar{Z}_{\epsilon} = [N_{\epsilon} R_{\epsilon}]^n$.

Мощность и тяга винта определяется по характеристикам винта и входным параметрам с использованием выражений (6) и (7).

3. Анализ результатов

Для сравнительного анализа исследуемых моделей были получены переходные процессы с возмущениями по положению лопастей винта (рис. 4) и по расходу топлива (рис. 5).

Основными преимуществами модели с автономным газогенератором являются:

1) простота - уравнения динамики газогенератора и свободной турбины решаются независимо;

2) возможность разделения ответственности за поставку исходных данных: разработчик двигателя предоставляет динамическую модель газогенератора и внешнюю характеристику двигателя, за качество динамической модели системы СТ-Р-В несет ответ-

ственность поставщик характеристик винта и разработчик САУ.

Основным недостатком данного варианта модели является то, что предложение об автономной работе ГГ и СТ может быть обоснованно применено только к турбовальным двигателям на режимах, близких к расчетному. Это связано с тем, что при проектировании этих двигателей стремятся всю свободную работу расширения газа преобразовать в механическую работу на выводном валу.

В случае турбовинтового двигателя, как известно из теории двигателей, такой вариант не является наилучшим – существует оптимальное распределение энергии газов между винтом и реактивным соплом.

Таким образом, энергия газового потока, выходящего из газогенератора, распределяется между СТ и соплом. Это распределение зависит от условий работы газогенератора, от частоты вращения СТ и от условий работы сопла. Поэтому на переходных и установившихся режимах распределения энергии могут отличаться, вследствие чего внешняя характеристика СТ не может быть использована для моделирования переходных режимов.

Однако для параметров, используемых в САУ двигателя (n_{22} , n_{cm} , N_{cm}), точность данной модели при анализе управляющего воздействия на газогенератор (в рассматриваемом случае - расхода топлива) может оказаться удовлетворительной, однако при возмущении в системе СТ-Р-В качество модели ухудшается.

Преимуществом модели с автономным двигателем является более высокая точность моделирования. Недостатками являются:

- более высокий (второй) порядок системы дифференциальных уравнений;
- необходимость совместного расчета двигателя и винта при моделировании.

Модель двигателя при этом остается автономной, что упрощает поставку ее параметров разра-

ботчиком двигателя. Качество модели при этом гораздо выше, чем в варианте модели с автономным газогенератором (переходный процесс близок к переходному процессу, который получен в результате моделирования по нелинейной математической модели).

Вывод

Для более качественного моделирования силовой установки, а следовательно и САУ лучше применять модель автономного двигателя с независимой моделью редуктор-винт.

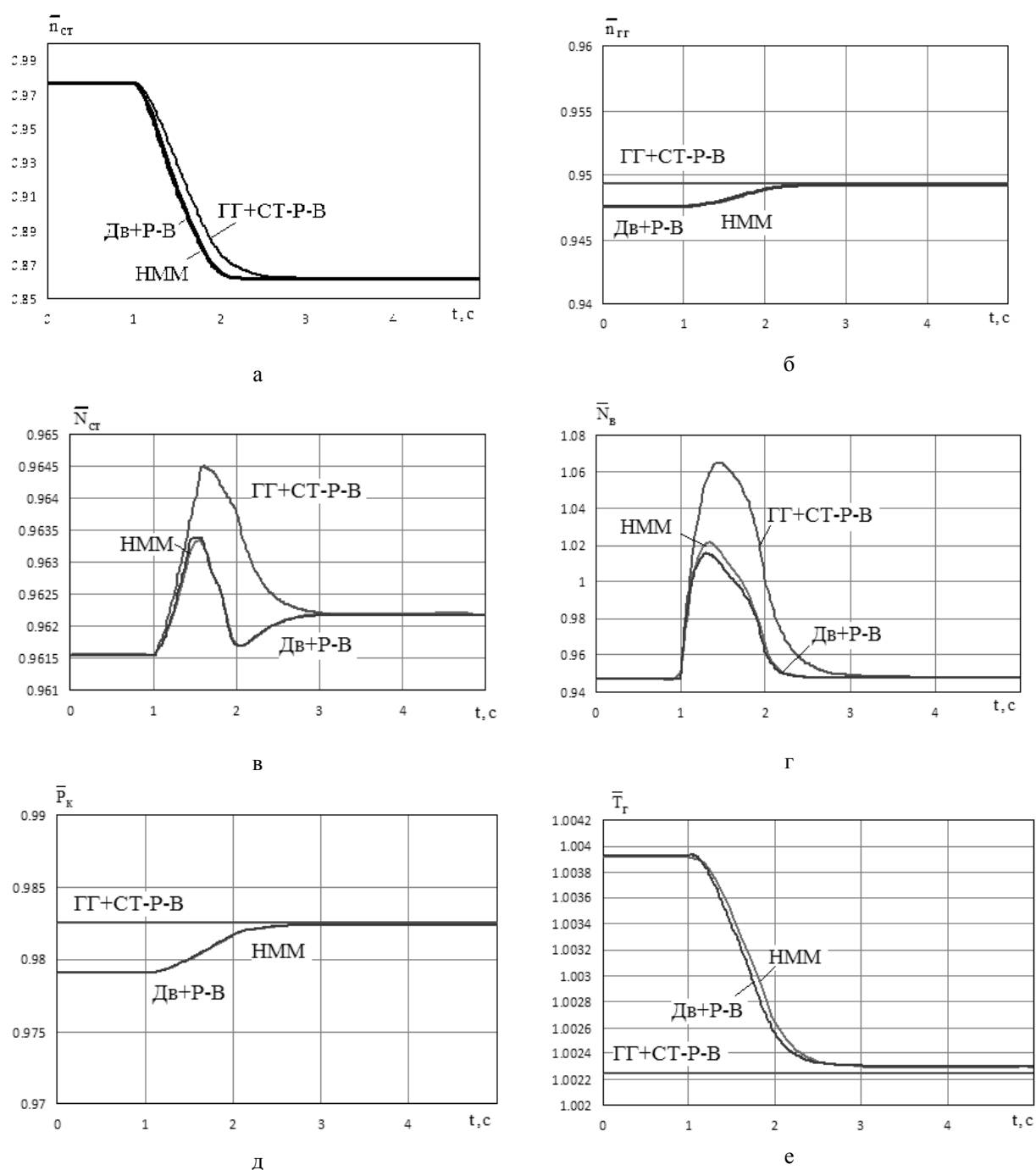


Рис. 4. Переходные процессы при возмущении по положению лопасти винта $\Delta\phi_\theta = 10^\circ$, $G_T = \text{const}$

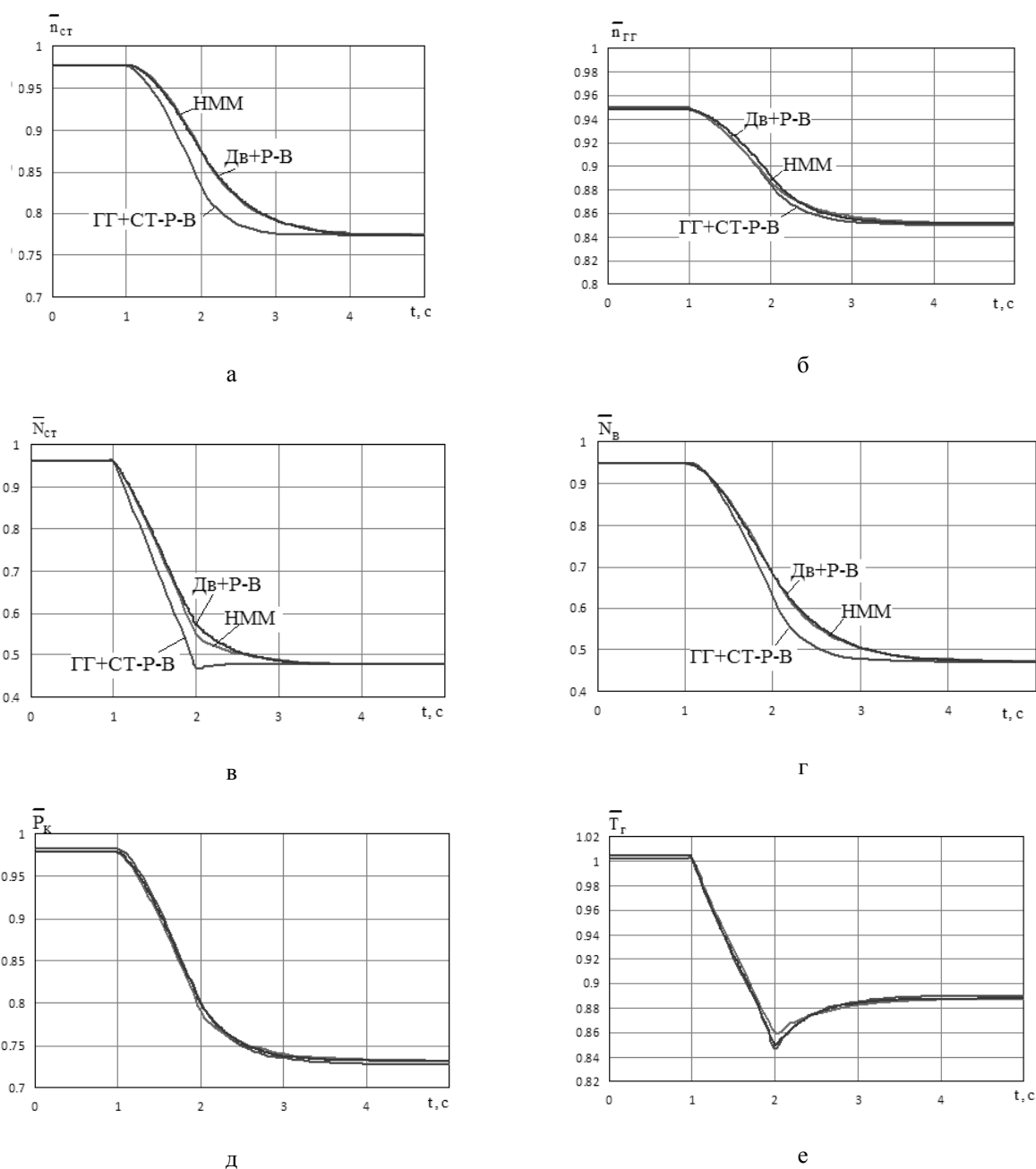


Рис. 5. Переходные процессы при возмущении по расходу топлива $\Delta G_m = -50 \text{ кг/час}$, $\Delta \phi_\theta = \text{const}$

Литература

1. Добрянский Г.В., Мартянова Т.С. Динамика авиационных ГТД. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Черкасов Б.А., Куликов Г.Г., Свитский О.Л. Об одном методе определения параметров линейной динамической модели ГТД // Труды ЦИАМ. – 1984. – № 1071. – С. 80-90.

3. Куликов Г.Г., Горюнов И.М., Романов М.А. Метод определения динамических параметров ГТД в САПР-Д // Испытания авиационных двигателей: Межвузовский научный сборник. – Уфа, 1986. – Вып. 14. – С. 39-46.

Поступила в редакцию 15.06.2008

Рецензент: канд. техн. наук Е.В. Павлюк, ГП «Харьковское агрегатное конструкторское бюро», Харьков.