

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ СОПЛОМ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2010 Б. Б. Косенок

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Приведён анализ кинематических и динамических параметров механизма управления сопла турбореактивного двигателя и алгоритм оптимизации кинематической схемы движения створок сопла.

Сопло турбореактивного двигателя, кинематика, динамика, оптимизация параметров.

Сопло турбореактивного двигателя служит для увеличения динамического импульса газового потока на выходе из двигателя и согласования режима работы турбины и компрессора. Современные выходные устройства должны обеспечивать отклонение выходной струи вплоть до изменения направления ее движения на противоположное. Без математического моделирования было бы непросто проследить кинематику всех движущихся частей сопла. Поэтому для моделирования кинематики и динамики механизма управления сопла является актуальным использование современных программных пакетов.

В данной статье рассмотрен анализ кинематики и динамики механизма управления сопла с использованием программного пакета КДАМ (кинематический и динамический анализ механизмов), разрабатываемого автором на кафедре ОКМ СГАУ, и проверка методик на экспериментальной установке, а также проведённая в КДАМе оптимизация параметров механизма управления сопла с целью снижения нагрузок на гидропривод.

В качестве примера было рассмотрено сопло двигателя ТРДДФ Д-30Ф6, созданного Пермским ОАО "Авиадвигатель". Сопло имеет схему сверхзвукового сопла эжекторного типа со свободноповешенными флюгерными створками наружного сопла (трехстворчатое сопло) (рис. 1).



Рис. 1. Конструкция сопла

Внутреннее сопло, состоящее из двух рядов створок, образует либо сужающийся тракт, либо сужающе-расширяющийся конический тракт типа сопла Лавала. В разрыве контура расположены внутренняя обечайка, которая образует либо цилиндрический тракт эжектора за критическим сечением, с подачей вторичного воздуха подпитки в разрыв контура, либо расширяющийся конический тракт, служащий продолжением расширяющегося тракта внутреннего сопла второго ряда створок. Наружные створки, служащие для плавного сопряжения с обводами хвостовой части мотогондолы, самоустанавливаются в зависимости от результирующего момента аэродинамических сил давления, действующих снаружи и изнутри.

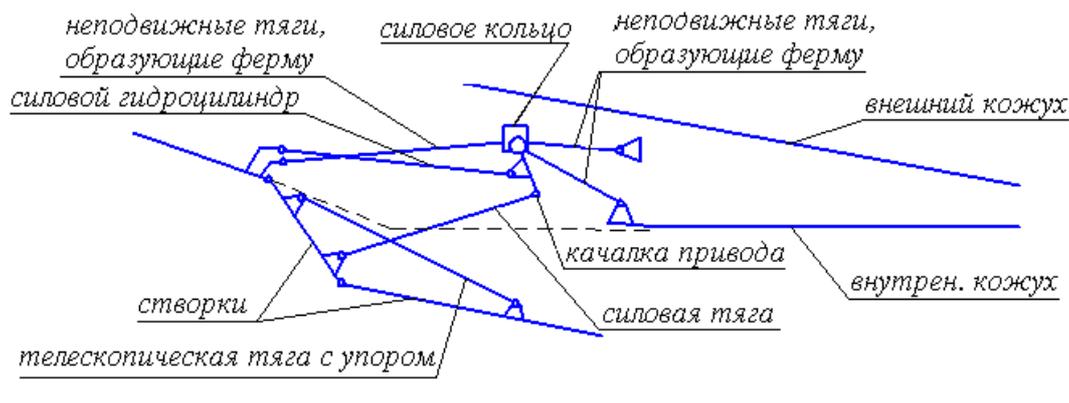


Рис. 2. Кинематическая схема механизма управления соплом

При этом строго фиксируются два крайних положения, обеспечивающих минимальную и максимальную площадь среза выходного сечения сопла. Все четыре венца выполнены по схеме «створка-проставка» и имеют 18 створок, чередующихся с таким же количеством проставок. Кинематическая схема РС ТРДДФ Д-30Ф6 (рис. 2) уникальна тем, что критическое сечение сопла может изменять не только площадь, но и положение по длине сопла. Особенностью данной схемы является также то, что сопло на отдельных режимах работает как эжекторное, а на других – как сопло Лаваля.

Это достигается за счёт того, что сверхзвуковая створка классического сопла Лаваля разделена на управляемую гидроприводом и управляемую аэродинамически. Такое разделение позволяет получать на бесфорсажном режиме эжекторное сопло с критическим сечением на срезе первого ряда сверхзвуковых створок, а на режиме форсажа, на взлёте – эжекторное сопло с критическим сечением на срезе венца сверхзвуковых створок. Разделение сверхзвуковой створки на два венца решает также задачу охлаждения сверхзвуковой створки.

Дозвуковая и первая сверхзвуковая створки управляются с помощью гидроцилиндров через качалки и силовые тяги. Качалки закрепляются шарнирно на силовом кольце, которое входит в состав жесткой силовой фермы, на которую подвешены две сверхзвуковые створки: вторая сверхзвуковая внутренняя створка на

одном шарнире, а наружная – на двух шарнирах и связующем кольце.

При выходе двигателя на взлётный режим (максимальный форсажный режим) двигатель некоторое время работает на максимальном бесфорсажном режиме (рис. 3,а). В этом режиме сопло максимально сжимается, обеспечивая минимальную критическую площадь. При этом возрастает степень расширения, что ведёт к увеличению скорости истечения газа и, следовательно, к росту тяги двигателя. Сопло принимает форму сопла Лаваля. Угол раскрытия дозвуковых створок α доходит до 40° , угол раскрытия сверхзвуковых створок θ лежит в диапазоне $0,5...2^\circ$. Выходная площадь сопла в $1,03...1,1$ раза больше критической.

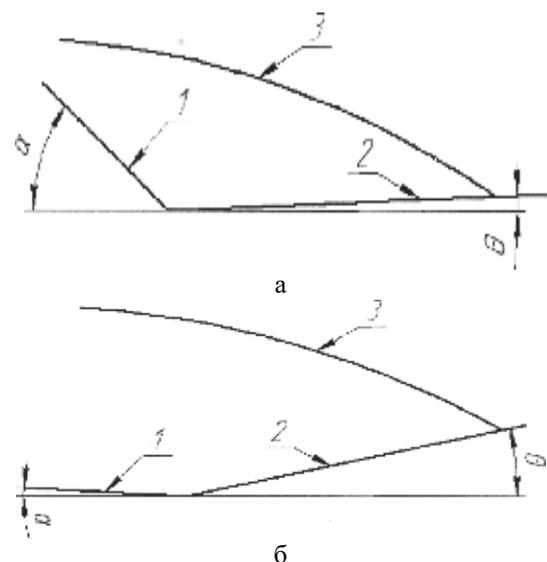


Рис. 3. Положения створок сопла на различных режимах работы двигателя:
 а – максимальный бесфорсажный режим;
 б – максимальный форсажный режим;
 1 – дозвуковые створки; 2 – сверхзвуковые створки;
 3 – наружные створки

Затем происходит включение форсажной камеры и переход на максимальный форсажный режим (рис. 3,б). При этом параметры газового потока быстро возрастают, и сопло раскрывается, обеспечивая максимальную пропускную способность. По сравнению с бесфорсажным режимом критическая площадь увеличивается примерно в 1,5 раза, а площадь среза сопла ещё больше.

Сопло остаётся соплом Лавалья, но его форма сильно меняется. Угол раскрытия дозвуковых створок α падает до 3° , угол раскрытия сверхзвуковых створок θ лежит в диапазоне $9...12^\circ$. В целом режим регулирования сечения сопла достаточно сложен, и кроме указанных режимов возможно большое количество промежуточных режимов, на которых створки занимают различные положения.

Для проведения кинематического и динамического анализа в программном пакете КДАМ с использованием метода модульного векторного моделирования [1] была создана векторная модель механизма управления соплом (рис. 4). Параметрическая формула векторной модели приведена на рис. 5.

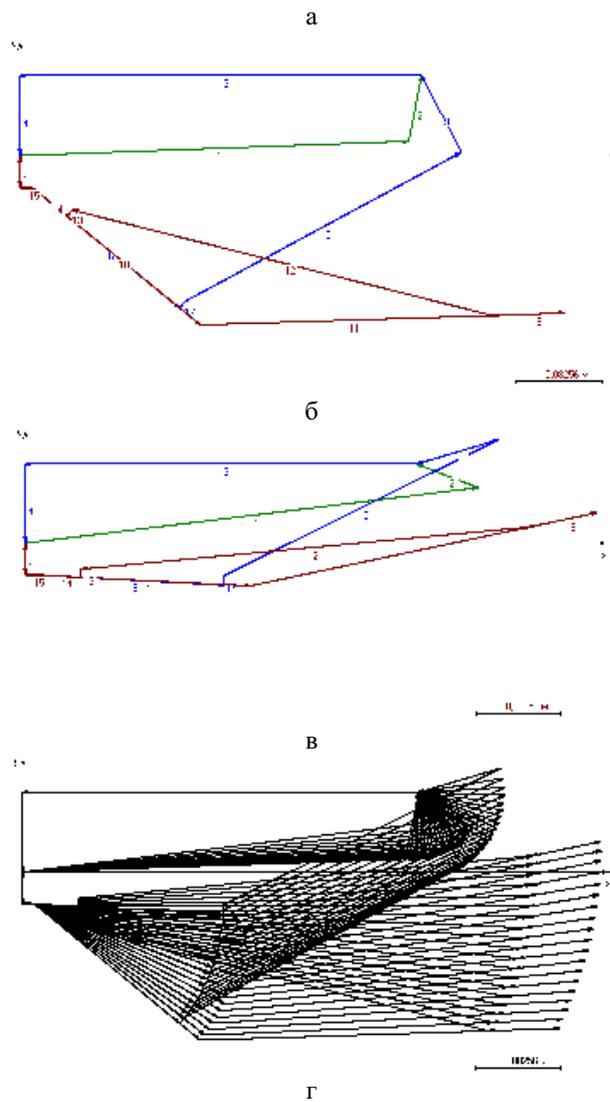


Рис. 4. Внешний вид интерфейса программы КДАМ и векторная модель механизма управления створок сопла:

- а – внешний вид интерфейса КДАМ;
- б – векторная модель на режиме «максимал»;
- в – векторная модель на режиме «форсаж»;
- г – планы положений створок сопла

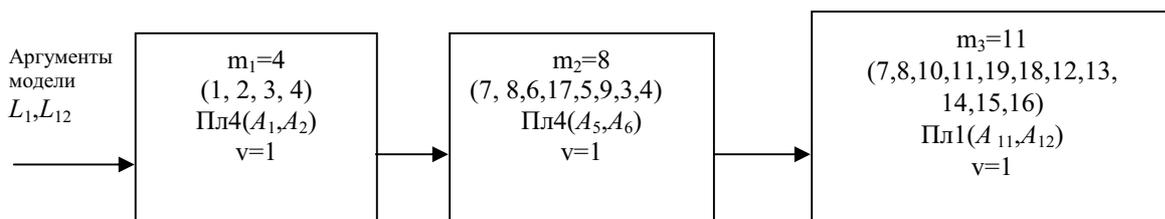
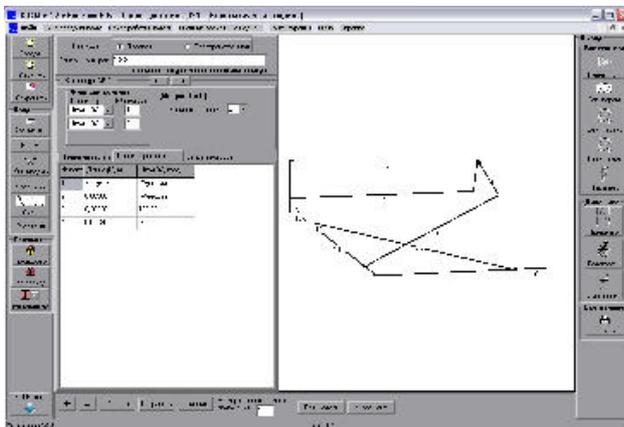


Рис. 5. Параметрическая формула векторной модели механизма управления соплом

Связи углов векторов имеют вид:
 $A_{17}=A_6+90^\circ$; $A_9=A_2+38^\circ$; $A_{10}=A_6+0^\circ$; $A_{13}=A_6-90^\circ$;
 $A_{14}=A_6+180^\circ$; $A_{19}=A_{11}+0^\circ$; $A_{18}=A_{11}+180^\circ$.

С помощью экспериментальной установки (рис. 6), имеющейся на кафедре КиПДЛА СГАУ был проведен эксперимент с целью определения усилий на внешней кромке сверхзвуковой створки сопла.



а



б



в



г

Рис. 6. Внешний вид экспериментальной установки: а – ручной гидропривод; б, в, г – виды на динамометр, закреплённый на внешней кромке сверхзвуковой створки

Установка состоит из отделенного от двигателя и препарированного сопла, установленного в монтажной раме, ручного гидропривода, необходимого для нагнетания рабочей жидкости в приводы створок, и динамометра, закрепленного на основании неподвижной сверхзвуковой створки сопла, а второй точкой опоры – на внешней кромке подвижной сверхзвуковой створки сопла.

В ходе проведения эксперимента было произведено четыре замера и получены значения давления в манометре гидропривода и усилия на внешней кромке сверхзвуковой створки.

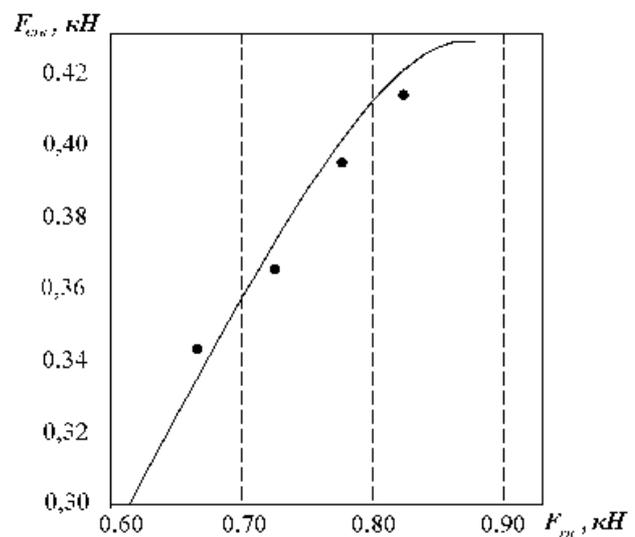


Рис. 7. Зависимость усилия на кромке сверхзвуковой створки от усилия в гидроциindre
 • – экспериментальные данные;
 — — кривая, полученная в КДАМ-е

Учитывая, что диаметр поршня равен 50 мм, пересчитаем полученные значения по формуле (1), получим значение усилия на штоке одного гидроцилиндра:

$$F_{ГЦ} = p_{np} \frac{\pi d^2}{4} \tag{1}$$

Показания индикатора на динамометре пересчитаем в усилия на кромке створки в соответствии с тарировочной зависимостью динамометрической пружины $F_{СТВ}(\text{кН})=1,4A(\text{мм})$.

На график значений усилий, полученных в КДАМ-е (рис. 7) нанесём полученные экспериментально значения усилий.

Разница результатов эксперимента и расчёта в КДАМ-е не более 12%.

Проведём анализ кинематических параметров механизма управления створками сопла исходя из предположения, что на режиме «максимал» угол отклонения дозвуковой створки $\alpha = 40^\circ$, а угол отклонения сверхзвуковой створки $\theta = 2^\circ$.

Из газодинамического расчёта, не приведенного в данной статье из-за ограниченного объёма, получим значения усилий, действующих на створки на режиме «максимал» и на режиме «форсаж».

Усилие на пружине в телескопической тяге на режиме «форсаж» примем равное $P_{\text{ТТ}} = 1105 \text{ Н}$.

Рассчитав в КДАМ-е векторную модель с данными значениями, получим график усилий на гидроприводе (рис. 8).

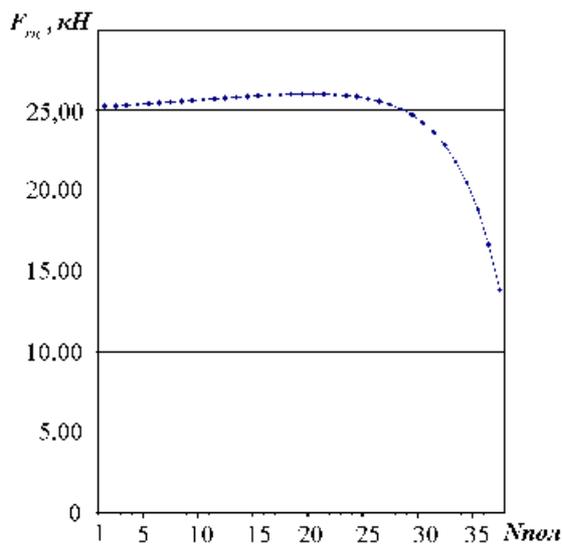


Рис. 8. Усилия на гидроприводе исходного механизма управления соплом, полученные в КДАМ-е на всём диапазоне работы сопла

По графику видно, что полученные значения сильно отличаются на всём диапазоне работы сопла.

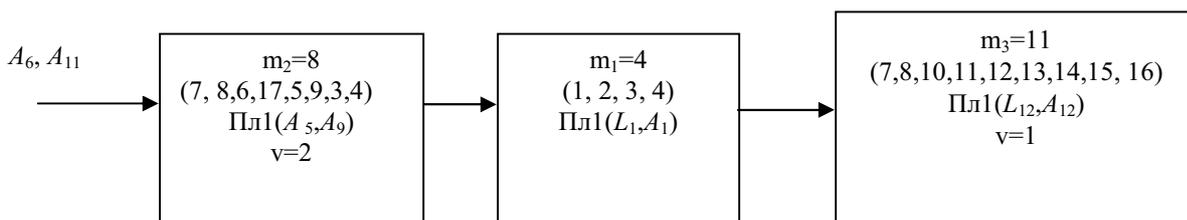


Рис. 9. Параметрическая формула векторной модели

Синтез кинематических параметров механизма управления створками сопла будем проводить, подбирая три параметра векторов, а именно: длину вектора 6 – L_6 (или длину силовой тяги) и длин 2-го и 9-го векторов – L_2, L_9 (то есть, длины плеч качалки гидропривода), исходя из критерия, что усилие на штоке гидропривода не должно превышать 23 кН, то есть чтобы проводимые расчёты дали возможность получить снижение максимальных усилий хотя бы как минимум на 10%.

Кроме того, для режима «максимал» принимаем следующие значения:

угол раскрытия дозвуковых створок $\alpha = 40^\circ$, угол раскрытия сверхзвуковых створок $\theta = 2^\circ$.

Для режима «форсаж» принимаем значения:

угол раскрытия дозвуковых створок $\alpha = 3^\circ$, угол раскрытия сверхзвуковых створок $\theta = 12^\circ$, усилия на створках и телескоп. тяги: $P_{\text{Г дозв}} = 15963,5 \text{ Н}$, $P_{\text{Г сверхзв}} = 12336,01 \text{ Н}$, $P_{\text{ТТ}} = 1105 \text{ Н}$.

Произведём соответствующие изменения в векторной модели рис. 4, а именно, изменим порядок следования контуров с 1-2-3 на 2-1-3, а также изменяемыми параметрами модели сделаем угол отклонения вектора 6 (A_6) и угол отклонения вектора 11 (A_{11}). Получим векторную модель с новой параметрической формулой на рис. 9. Сама векторная модель механизма управления соплом, предназначенная для синтеза кинематических параметров, приведена на рис. 10.

Связи углов векторов имеют вид:

$$A_{17} = A_6 + 90^\circ; A_2 = A_9 - 27^\circ; A_{10} = A_6 + 0^\circ;$$

$$A_{13} = A_6 - 90^\circ; A_{14} = A_6 + 180^\circ.$$

Рассчитав данную векторную модель с использованием блока параметрического синтеза в КДАМ-е, получим значения трёх варьируемых параметров: длину вектора 6 (длины силовой тяги) и длины 2-го и 9-го векторов (длины плеч качалки гидропривода), при этом значения усилия на штоке гидропривода не должны превышать 23 кН.

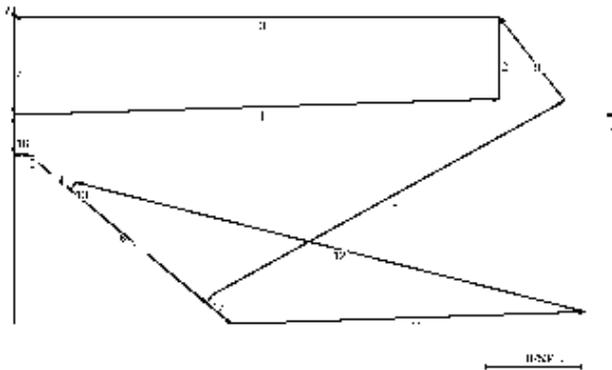


Рис. 10. Векторная модель механизма, предназначенная для синтеза кинематических параметров

Были получены следующие значения – длина 5-го вектора $L_5=0,267$ м, длина 9-го вектора $L_9=0,053$ м и длина 2-го вектора $L_2=0,0635$ м. Сравнительный график значений усилий на гидроприводе приведен на рис. 11.

Таким образом, даже простейший автоматизированный параметрический синтез параметров механизма створок сопла

позволил как минимум на 10 % снизить максимальное усилие на гидроприводе по сравнению с изначальными параметрами механизма.

Проведение параметрического синтеза кинематических параметров ещё на стадии эскизного проектирования позволит не только снизить энергетические затраты на управление соплом, но и увеличить надёжность двигателя.

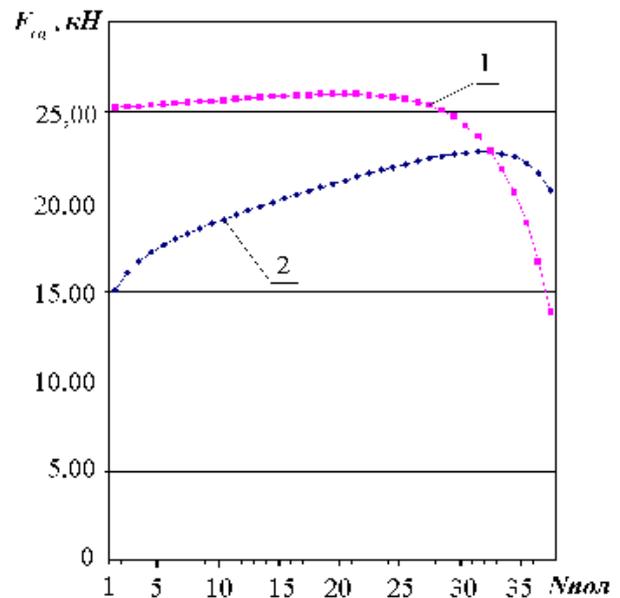


Рис. 11. Усилия на гидроприводе:
1 – исходного механизма;
2 – оптимизированного механизма

Библиографический список

1. Семёнов, Б. П. Модульное моделирование механизмов [Текст] / Б. П. Семёнов, Тихонов А. Н., Косенок Б. Б. – Самара: СГАУ, 1996.

References

2. Semyonov, B. P. Modular modelling of mechanisms / B. P. Semyonov, A. N. Tikhonov, B. B. Kosenok. – Samara: SSAU, 1996.

DYNAMIC ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF TURBOJET ENGINE NOZZLE CONTROL MECHANISM

© 2010 B. B. Kosenok

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The paper presents the analysis of kinematic and dynamic parameters of the mechanism of turbojet engine nozzle control, as well as an algorithm of optimization of the kinematic pattern of nozzle shutter motion.

Turbojet engine nozzle, kinematics, dynamics, optimization of parameters.

Информация об авторах

Косенок Борис Борисович, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Основы конструирования машин», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), borkos@yandex.ru. Область научных интересов: методы исследования и композиция механизмов.

Kosenok Boris Borisovitch, candidate of technical science, associate professor, working for the doctor's degree at the department "Foundations of machine designing", Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), borkos@yandex.ru. Area of research: methods of research and composition of mechanisms.