

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОРАЗМЕРНОГО ГТД

**Г.М. Макарьянц**

*Самарский университет*

Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: makaryants@ssu.ru

**А.Б. Прокофьев**

*Самарский университет*

Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: prokofev.ab@ssau.ru

**Е.В. Шахматов**

*Самарский университет*

Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: shakhmatov.ev@ssau.ru

**Ключевые слова:** МГТД, идентификация, коэффициент усиления, постоянная времени.

**Аннотация:** Вопрос настройки регулятора оборотов малоразмерного одновального газотурбинного двигателя (МГТД) остается малоизученным. Для повышения качества процесса регулирования МГТД требуются достоверные сведения о его динамических свойствах. В работе представлен анализ огневых испытаний МГТД Jet-Cat P-60, в ходе которых по разгонным характеристикам двигателя были определены коэффициент усиления двигателя по расходу топлива и его постоянная времени. Было показано, что чувствительность к расходу топлива у МГТД падает с увеличением режима работы, однако, в отличие от полноразмерных ГТД, чувствительность падает немонотонно и имеет максимум на частотах вращения близких к малому газу. Изменение инерционности МГТД по режиму также отличается от традиционно падающей монотонной характеристики ГТД. При разгоне постоянная времени МГТД растет, а при дросселировании МГТД падает.

## 1. Введение

Надежность работы и ресурс газотурбинного двигателя (ГТД) в значительной степени определяются тепловыми нагрузками на его турбину. Борьба за снижение теплонапряженности турбины имеет большое значение особенно для малоразмерных газотурбинных двигателей (МГТД), которые сами по себе конструктивно обладают невысоким ресурсом.

Камеру сгорания и лопатки МГТД, как правило, изготавливают с помощью аддитивных технологий [1,2]. Получаемый при этом материал имеет низкую сопротивляемость к циклическим нагрузкам, в том числе и тепловым. Тепловая же малоцикловая усталость лопаток турбины обычно возникает при высоком забросе температуры газа перед ней. Такой заброс появляется всегда в процессе приемистости двигателя, он обусловлен термодинамикой рабочих процессами в ГТД и задача системы автоматического управления (САУ) не допустить высоких его значений. Поэтому вопрос повышения качества динамических процессов регулируемых

параметров МГТД за счет адекватной настройки регулятора его САУ для обеспечения длительного ресурса двигателя является важным.

Как показывает практика многие узлы, агрегаты и системы МГТД значительно упрощены. Сделано это в угоду снижения его себестоимости. Не является исключением и система автоматики двигателя. В большинстве случаев, реализован простой ПИ-регулятор оборотов с ограничением по максимальной температуре на выходе из турбины. В этом случае проблема уменьшения заброса температуры на турбине при изменении режима работы двигателя решается просто – не допускается заброс по оборотам ротора двигателя. Это возможно при равенстве полюса передаточной функции двигателя как объекта управления и нуля передаточной функции регулятора.

Однако полюс передаточной функции двигателя (или его постоянная времени) меняется в зависимости от режима работы. В связи с чем, требуется проводить идентификацию двигателя как объекта управления.

В работе рассмотрен вопрос определения динамических свойств МГТД на базе временных зависимостей частоты вращения ротор и расхода топлива, полученных в ходе огневых испытаний.

## **2. Идентификация динамических характеристик ГТД**

### **2.1. Обоснование определения постоянной времени двигателя**

Упрощенно математические модели элементов САУ одновального МГТД можно представить следующем виде. Двигатель – инерционное звено первого порядка с переменными в зависимости от режима работы коэффициентом усиления и постоянной времени. Блок управления – ПИ-регулятор, общий коэффициент усиления которого определяет быстродействие САУ, или скорость нарастания частоты вращения ротора – его ускорение. Этот коэффициент настраивается в процессе доводки по ускорению ротора для обеспечения беспомпажной работы двигателя. Другой коэффициент – множитель при интеграторе, влияет на наличие перерегулирования в системе. В идеале, чтобы исключить перерегулирование, множитель при интеграторе должен быть равен величине обратной постоянной времени объекта регулирования. Именно это и является мотивом для точного определения постоянной времени двигателя и исследования ее изменения при изменении режима работы МГТД.

### **2.2. Методика идентификации**

Исследования проводились на МГТД JetCat P-60. Согласно паспорту, тяга двигателя составляет всего 63 Н. Однако для ее обеспечения при малых размерах миделя (диаметр – 83 мм) двигатель имеет внушительную частоту вращения: от 50 000 об/мин на малом газе до 165 000 об/мин на максимальном режиме. Одновальная схема и большие обороты делают двигатель очень «прожорливым» – расход керосина изменяется от 70 мл/мин на малом газе до 240 мл/мин на максимальном режиме (по паспорту). Идентификация динамических характеристик двигателя проводилась на базе временных зависимостей расхода топлива и оборотов при изменении режима работы двигателя.

Для определения коэффициента усиления двигателя частота вращения ротора изменялась ступенчато с шагом примерно 9 000 об/мин (рис. 1). Всего было порядка 12 ступеней в диапазоне от малого газа до максимала. Затем определялась величина ступени входного сигнала – расхода топлива (рис. 2) и выходного сигнала – оборотов ротора (рис. 1). Их отношение, нормированное к максимальному значению оборотов, дает зависимость коэффициента усиления двигателя от режима его работы. В

дальнейшем значение этого коэффициента не только представляло интерес для анализа чувствительности двигателя к расходу топлива, но также использовалось при идентификации постоянной времени двигателя.

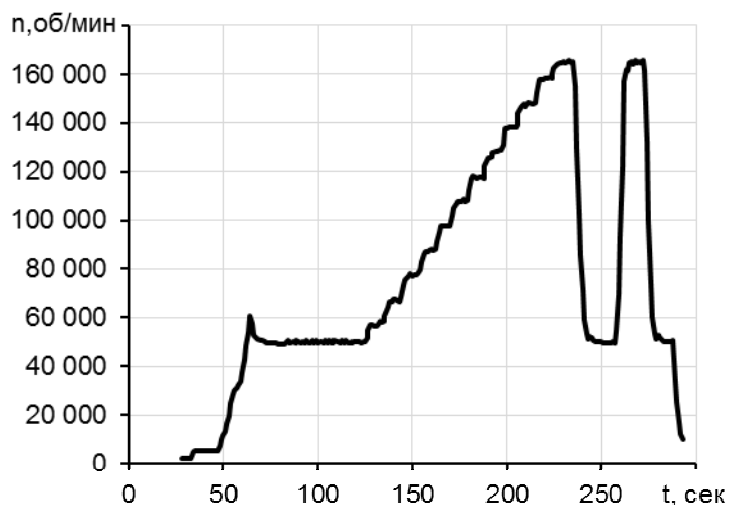


Рис. 1. Изменение оборотов ротора МГТД по времени в ходе исследований.

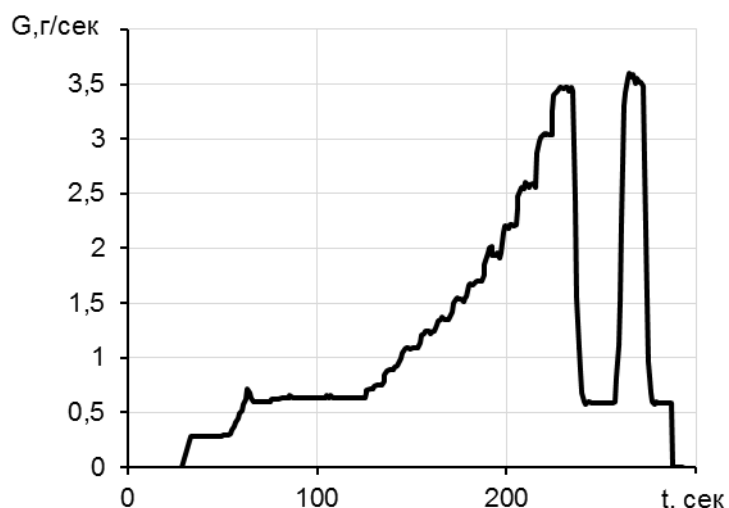


Рис. 2. Изменение расхода топлива МГТД по времени в ходе исследований.

Постоянная времени оценивалась по характеристике приемистости, т.е. по временной зависимости оборотов и расхода топлива от времени при ступенчатом изменении режима с малого газа сразу до максимального. Учитывая только инерционности ротора постоянную времени можно рассчитать по следующей зависимости:

$$T = -\frac{1}{d \frac{n_{i+1} - n_i}{dt} / dt} \left( \frac{n_i - n_{реж}}{n_{max}} \right) + \frac{K}{(n_{i+1} - n_i) / n_{max}} \left( \frac{G_i - G_{реж}}{G_{max}} \right),$$

где  $n_i$  – частота вращения ротора в текущем моменте времени;  $n_{i+1}$  – частота вращения ротора в последующий момент времени;  $n_{max}$  – частота вращения ротора на

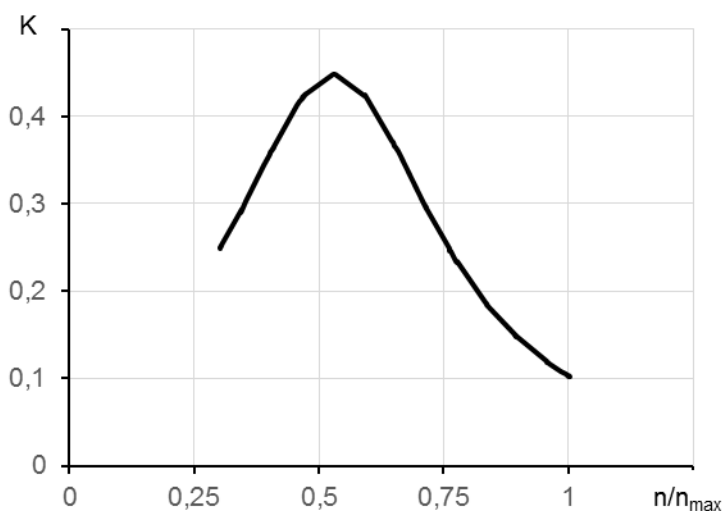
максимальном режиме;  $n_{реж}$  – частота вращения ротора на режиме, соответствующем текущему моменту времени;  $G_i$  – расход топлива в текущий момент времени;  $G_{max}$  – расход топлива на максимальном режиме;  $G_{реж}$  – расход топлива на режиме, соответствующем текущему моменту времени;  $K$  – коэффициент усиления двигателя, соответствующем текущему моменту времени.

Кроме этого постоянная времени идентифицировалась и при сбросе газа, когда режим МГТД изменялся с максимального да малого газа.

### 3. Результаты идентификации

#### 3.1. Результаты определения коэффициента усиления

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента усиления МГТД от режима работы двигателя.

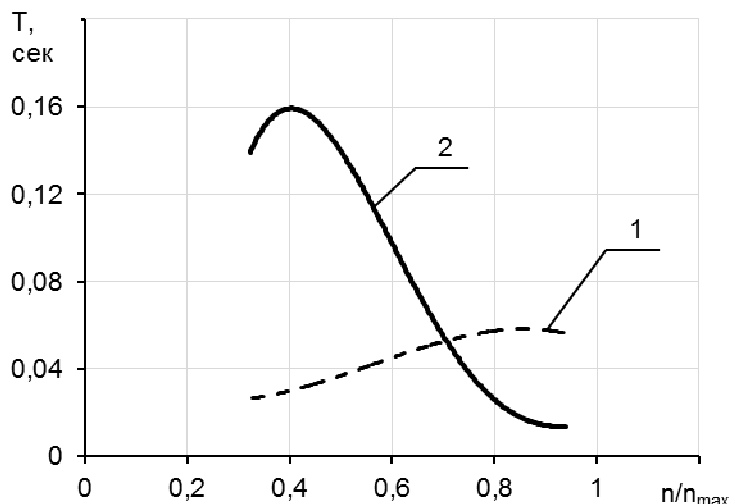


**Рис. 1.** Коэффициент усиления двигателя по расходу топлива в зависимости от режима работы МГТД по частоте вращения ротора двигателя.

Чувствительность двигателя к расходу топлива уменьшается с увеличением режима, что хорошо согласуется с известным динамическим поведением любого ГТД. Однако у рассматриваемого МГТД была обнаружена особенность: зависимость коэффициента усиления имеет максимум на режимах около малого газа, что, безусловно, нужно учитывать в дальнейшем при настройке быстродействия регулятора.

#### 3.2. Результаты определения постоянной времени

На рис. 2 представлена зависимость постоянной времени МГТД от режима работы двигателя. Однако изменение постоянной времени при увеличении режима работы для исследуемого МГТД не соответствует динамике обычного ГТД. Как правило, значение постоянной времени ГТД монотонно падает с увеличением режима работы двигателя. Между тем, анализ постоянной времени, полученной в ходе приемистости двигателя показал, что ее значение возрастает примерно в три раза. В тоже время поведение постоянной времени при сбросе газа совершенно иное. Наблюдается ее падение, при этом максимальное и минимальное значения различаются уже в 10 раз.



**Рис. 2.** Постоянная времени двигателя в зависимости от режима работы МГТД по частоте вращения ротора двигателя. 1 – при разгоне. 2 – при дресселировании.

Такое поведение постоянной времени может быть связано с большим влиянием тепловой инерционности объема камеры сгорания, величина которого в отличии от полноразмерного ГТД составляет более 70 % от общего объема двигателя.

### 3. Заключение

Проведена идентификация динамических характеристик малоразмерного газотурбинного двигателя Jet Cat P-60.

Показано, что коэффициент усиления МГТД по расходу топлива с увеличением режима работы двигателя уменьшается, при этом имеет максимум на частотах близких к малому газу, что не типично для полноразмерных ГТД.

Было обнаружено, что при приемистости и сбросе газа само значение инерционности двигателя, а также тренд ее изменения сильно отличаются. При приемистости наблюдается рост примерно в три раза, а при сбросе газа падение более чем в 10 раз.

### Список литературы

1. Горелочное устройство камеры сгорания: пат. на полез. мод. RU 217743 U1 Рос. Федерация: МПК F23D 14/02 В.Г. Смелов А.Г., Петрухин Д.И., Кустов А.А. Соколов; заявитель и патентообладатели федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», Публичное акционерное общество «ОДК-Кузнецов». № 2022133876. Дата регистрации. 20.12.2022 опубли. 14.04.2023.
2. Смелов А.Г., Кокарева В.В., Чупин П.В., Дмитриев Д.Н. Проектирование технологического процесса селективного лазерного сплавления жаропрочного сплава для изготовления горелочного устройства // Вестник московского авиационного института. 2023. Т. 30, № 1. С. 131-141.