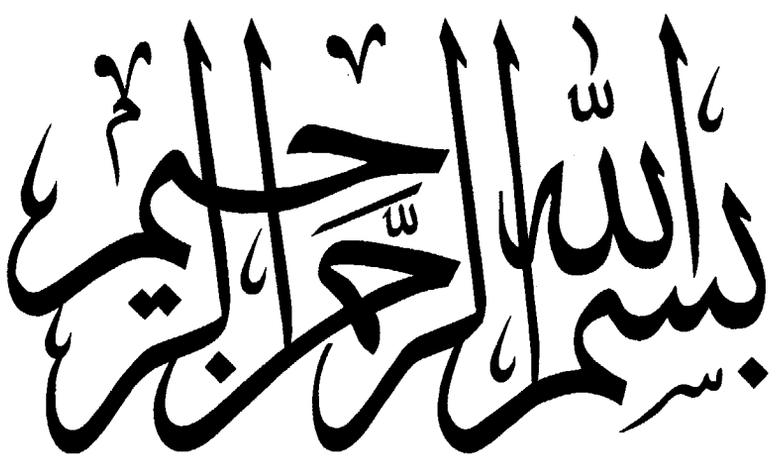

٢٧٩٩٩

مرکز اطلاعات مدارک علمی ایران
قسمت آرشیو

۵ /۱۱/ ۱۳۷۸

دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکدهٔ مکانیک

شبیه‌سازی سیستم کنترل سوخت موتور توربوجت

مجید فیض

5455

پایان‌نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد
در رشتهٔ مهندسی مکانیک

استاد راهنما: دکتر مرتضی منتظری

پائیز ۱۳۷۸

۲۷۹۹۹

تقـــدیم بـــه

پـــــدر و مـــادر

بـــزرگـــــوارم

به پاس قدردانی از زحمات بیدریغ ایشان

چکیده:

شبیه‌سازی سیستم کنترل سوخت موتورهای جت به کمک کامپیوتر مطالعه و پیش‌بینی عملکرد موتور در شرایط گذرا و بهینه‌سازی آنرا میسر می‌سازد. مطالعهٔ رفتار سیستم کنترل سوخت بعلت محدودیتهای عملکرد موتورهای جت ضروری می‌باشد. این محدودیت‌ها، ناشی از محدودیت‌های مواد در مقابل تنش‌های مکانیکی و تنش‌های حرارتی، به ترتیب حاصل از سرعت دورانی بالای موتور و دمای بالای گاز در ورود به توربین می‌باشد. ناپایداری موتور به دلیل وقوع پدیدهٔ سرج (Surge) در کمپرسور نیز از دیگر محدودیتهای عملکرد موتور می‌باشد. با توجه به عدم توانایی خلبان هواپیما در تنظیم کلیهٔ پارامترها در شرایط مختلف پروازی، این وظیفه بر عهدهٔ سیستم کنترل سوخت موتور می‌باشد و شبیه‌سازی سیستم کنترل سوخت موتور توربوجت امکان مطالعهٔ رفتار موتور و نحوهٔ کنترل آنرا میسر می‌سازد.

در این مقاله، معادلات ریاضی لازم برای مدلسازی سیستم کنترل سوخت موتور توربوجت ارائه گردیده و با استفاده از جعبه‌ابزار Simulink نرم‌افزار MATLAB رفتار حالت گذرای موتور شبیه‌سازی گردیده است. آنگاه با در نظر گرفتن روشهای مختلف کنترل سوخت و با فیدبک نسبت فشار کمپرسور، تغییر پاسخ گذرای موتور همراه با عمل گاز دادن (Throttling) و با توجه به محدودیتهای موتور مورد بررسی قرارگرفته است.

تقدیر و تشکر:

ضمن سپاس بیکران خداوند، برخود لازم می‌دانم، ازاستاد محترم جناب آقای دکتر مرتضی منتظری که با ارائه راهنمایی‌های مدبرانه و دلسوزانه خود، نظارت و سرپرستی این پروژه را به عهده داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از صنایع هواپیمایی ایران (صها) که امکانات لازم را جهت تحقیق بر روی این پروژه فراهم نموده‌اند سپاسگذارم. در پایان لازم می‌دانم که از اعضای هیات داوری بخاطر حضور در جلسهٔ دفاعیه و فراهم نمودن امکان ارائه پربار آن، صمیمانه تشکر نموده و سپاس خود را به حضورشان تقدیم می‌دارم.

آبان ۱۳۷۸

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

۱- فصل اول: مقدمه ۱

۱ -۱ - سیستم‌های کنترل سوخت ۲

۱ -۲ - پارامترهای سیستم کنترل سوخت ۳

۱ -۳ - مروری بر روش‌های ریاضی سیستم کنترل سوخت ۵

۱ -۳ -۱ - طراحی شکل و ترکیب سیستم کنترل ٦

۱ -۳ -۲ - طراحی سیستم کنترل تطبیقی (Adaptive Control) ۷

۱ -٤ - معرفی سیستم کنترل سوخت چند موتور هواپیما ۸

۱ -٤ -۱ - سیستم کنترل سوخت Pt-6 ..... ۸

۱ -٤ -۲ - سیستم کنترل سوخت JFC68 ..... ۹

۱ -٤ -۳ - سیستم کنترل سوخت WOODARD ۱۰

۱ -٤ -٤ - سیستمهای کنترل الکترونیکی ۱۱

۱ -٤ -٥ - سیستم کنترل سوخت دیجیتال Garrett ۱۲

۱ -٥ - رئوس مطالب رساله ۱۳

۲ فصل دوم: مدل‌سازی عملکرد موتور در حالت پایا(STEADY STATE) ۱٥

۲ -۱ - مقدمه: ۱٦

۲ -۲ - معرفی سیستم ۱۷

۲ -۳ - معادلات عملکرد موتور درحالت پایا (STEADY STATE) ۱۸

۲ -۳ -۱ - دهانهٔ ورودی ۱۸

۲ -۳ -۲ - کمپرسور ۱۸

۲ -۳ -۳ - میانیابی منحنی‌های مشخصهٔ کمپرسور ۲۰

۲ -۳ -٤ - محفظه احتراق ۲۱

۲ -۳ -٥ - توربین ۲۲

۲ -۳ -٦ - نازل خروجی ۲۳

۲ -۳ -۷ - محور کمپرسور- توربین ۲٥

۲ -٤ - الگوریتم حل معادلات در حالت پایا (STEADY STATE) ۲٦

فهرست مطالب

عنوان — صفحه

۲ -۵ - نتایج عملکرد موتور در حالت پایا (STEADY STATE) ۲۷

۳- فصل سوم : مدل‌سازی عملکرد موتور در حالت گذرا(TRANSIENT) ۳٤

۳ -۱ - مقدمه: ۳۵

۳ -۲ - معادلات حالت گذرای موتور با فرض حالت پایای محفظهٔ احتراق ۳٦

۳ -۳ - معادلات حاکم بر عملکرد موتور درحالت گذرا ٤٤

۳ -٤ - شبیه‌سازی حالت گذرای موتور توربوجت تک‌محوره با استفاده از نرم افزار SIMULINK ۵۱

۳ -٤ -۱ - تغییرات الگوریتم مدل حالت گذرا (الگوریتم BB) برای سازگار کردن آن جهت استفاده در نرم افزار Simulink ۵۱

۳ -۵ - نتایج شبیه‌سازی عملکرد گذرای موتورتوربوجت تک‌محوره ۵۳

٤- شبیه‌سازی سیستم کنترل سوخت موتور توربو جت ٦٦

٤ -۱ - مقدمه: ٦۷

٤ -۲ - اجزاء تشکیل دهندهٔ سیستم کنترل سوخت ٦۸

٤ -۳ - مدلسازی سیستم کنترل سوخت با استفاده از توابع خطی ۷۰

٤ -٤ - مدلسازی گاز دادن (THROTTLE) سیستم کنترل سوخت ۷۵

٤ -٤ -۱ - تغییر پاسخ حالت گذرا همراه با عمل گاز دادن ۷۷

٤ -۵ - محدود کردن دور موتور با استفاده از سیستم کنترل سوخت ۸۳

٤ -٦ - محدود کردن دمای ورود به توربین با استفاده از سیستم کنترل سوخت ۸٤

٤ -۷ - تغییر پاسخ حالت گذرا همراه با عمل گاز دادن و کنترل دما ۸۵

٤-۸- سیستم کنترل سوخت با در نظر گرفتن تابع تأخیر زمانی ۹۰

۵- فصل پنجم: بحث و نتیجه‌گیری ۹۸

۵ -۱ - پیشنهادهایی برای انجام پروژه‌های آتی ۱۰۷

فهرست مراجع ۱۰۸

فهرست تصاویر

عنوان | صفحه

شکل ۲-۱: شماتیک موتور توربوجت تک محوره ۱۷
شکل ۲-۲: منحنی مشخصهٔ کمپرسور ۱۹
شکل ۲-۳: چگونگی میانیابی خطی برای دورهای واسط منحنی مشخصهٔ کمپرسور ۲۰
شکل ۲-٤: منحنی مشخصهٔ توربین ۲۲
شکل ۲-۵: شماتیک نازل همگرای خروجی ۲۳
شکل ۲-٦: الگوریتم A مدل موتور در حالت پایا ۲۸
شکل ۲-۷: الگوریتم B مدل موتور در حالت پایا ۲۹
شکل ۲-۸: عملکرد موتور درحالت پایا (STEADY STATE) ۳۱
شکل ۲-۹: تغییرات نسبت فشار کمپرسور و دبی سوخت محفظهٔ احتراق در حالت پایا ۳۱
شکل ۲-۱۰: تغییرات دبی هوای ورودی نسبت به دبی سوخت محفظهٔ احتراق در حالت پایا ۳۲
شکل ۲-۱۱: تغییرات دمای محفظهٔ احتراق نسبت به دبی سوخت محفظهٔ احتراق در حالت پایا ۳۲
شکل ۲-۱۲: تغییرات دور موتور نسبت به دبی سوخت محفظهٔ احتراق در حالت پایا ۳۳
شکل ۳-۱ وشکل ۳-۲ نسبت فشار متناظر برروی منحنی مشخصهٔ کمپرسور و توربین ۳۹
شکل ۳-٤: الگوریتم AA مدل حالت گذرا با فرض حالت پایای محفظهٔ احتراق ٤۵
شکل ۳-۵: شماتیک محفظهٔ احتراق ٤٦
شکل ۳-٦: الگوریتم BB مدل حالت گذرای با صرفنظر کردن از تغییرات زمانی جرم محفظهٔ احتراق ۵۰
شکل ۳-۷: الگوریتم SIM مدل حالت گذرای سازگار با نرم‌افزار SIMULINK ۵٤
شکل ۳-۸: نمایش مدل حالت گذرای با استفاده از برنامهٔ SIMULINK ۵۵
شکل ۳-۹: تحریک سیستم توسط تابع پلهٔ دبی سوخت ۵٦
شکل ۳-۱۰: منحنی عملکرد گذرای موتور در حالت شتاب و کاهش شتاب ۵۷
شکل ۳-۱۱: تغییرات دمای محفظهٔ احتراق (دمای ورودی به توربین)درحالت شتاب وکاهش شتاب ۵۷
شکل ۳-۱۲: تغییرات دور موتور در حالت شتاب و کاهش شتاب موتور ۵۸
شکل ۳-۱۳: تغییرات نیروی رانش موتور با زمان ۵۸
شکل ۳-۱٤: تغییرات نسبت فشار کمپرسور در حالت شتاب و کاهش شتاب موتور ۵۹

فهرست تصاویر

عنوان — صفحه

شکل ۳-۱۵ : تغییرات دبی هوای ورودی به موتور در حالت شتاب وکاهش شتاب موتور ۵۹
شکل ۳-۱۶ : منحنی عملکرد موتور در حالت گذرا همراه با منحنی‌های مشخصهٔ کمپرسور ۶۰
شکل ۳-۱۷ : تحریک موتور با توابع نمایی دبی سوخت موتور همراه با افزایش وکاهش دبی سوخت ۶۱
شکل ۳-۱۸ : پاسخ گذرای موتور(منحنی عملکرد موتور در حالت شتاب و کاهش شتاب ۶۱
شکل ۳-۱۹ : تغییرات دمای ورودی به توربین در حالت شتاب و کاهش شتاب ۶۲
شکل ۳-۲۰ : تغییرات دور موتور بر حسب زمان ۶۲
شکل ۳-۲۱ : تغییرات نسبت فشار کمپرسور با زمان ۶۳
شکل ۳-۲۲ : تغییرات هوای ورودی به موتور با زمان ۶۳
شکل ۳-۲۳ : تغییرات نیروی رانش موتور در حالت شتاب و کاهش شتاب ۶۴
شکل ۳-۲۴ : منحنی‌های عملکرد گذرای موتور در حالت شتاب و کاهش شتاب همراه با منحنی‌های مشخصهٔ کمپرسور ۶۴
شکل ۳-۲۵ : تحریک سیستم بوسیلهٔ تابع سینوسی دبی سوخت ۶۵
شکل ۳-۲۶ : پاسخ گذرای موتور(منحنی عملکرد موتور در حالت گذرا) ۶۵
شکل ۴-۱: شماتیک سیستم کنترل سوخت ۶۸
شکل ۴-۲ : دیاگرام جعبه‌ای سیستم کنترل سوخت موتور توربوجت ۶۹
شکل ۴-۳: عملکرد سیستم کنترل سوخت با در نظر گرفتن توابع خطی ۷۰
شکل ۴-۴: سیستم کنترل سوخت با مدل خطی و با ورودی CDP ۷۲
شکل ۴-۵: تغییرات دبی سوخت موتور با در نظر گرفتن سیستم کنترل سوخت ۷۳
شکل ۴-۶: تغییرات نیروی جلوبرندهٔ موتور همراه با سیستم کنترل سوخت ۷۳
شکل ۴-۷: تغییرات دما، نسبت فشار، دبی هوای موتور و دور موتور نسبت به زمان با در نظر گرفتن سیستم کنترل ۷۴
شکل ۴-۸: تغییرات پاسخ گذرای موتور همراه با سیستم کنترل سوخت ۷۴
شکل ۴-۹: شماتیک سیستم کنترل سوخت همراه با سیستم گاز دادن(THROTTLE) ۷۶
شکل ۴-۱۰: تغییرات سینوسی زاویه دستهٔ گاز بر حسب زمان ۷۸
شکل ۴-۱۱ : پاسخ گذرای موتور حین عمل گاز دادن ۷۸

فهرست تصاویر

عنوان — صفحه

شکل ٤-٢٩ : تغییرات دور موتور حین گاز دادن با محدودیت دور تا 0.98.NDES ٧٩

شکل ٤-١٢: نمایش چند نوع تغییر زاویهٔ دستهٔ گاز برای مقایسه ٧٩

شکل ٤-١٣: تغییرات دبی سوخت موتور نسبت به زمان حین عمل گاز دادن ٨٠

شکل ٤-١٤: پاسخ گذرای موتور نسبت به سه حالت تغییر زاویهٔ دستهٔ گاز ٨٠

شکل ٤-١٥: تحریک دستهٔ گاز بصورت تابع پله..... ٨١

شکل ٤-١٦: تغییرات دبی سوخت خروجی از دریچهٔ گاز در مقایسه با سوخت خروجی از سیستم کنترل سوخت..... ٨١

شکل ٤-١٧: پاسخ حالت گذرای تحت تأثیر سیستم کنترل سوخت در مقایسه با بدون سیستم کنترل..... ٨٢

شکل ٤-١٨: تغییرات دمای ورودی به توربین تحت تأثیر سیستم کنترل در مقایسه با بدون سیستم کنترل..... ٨٣

شکل ٤-١٩:تغییرات دور، نیروی رانش موتور، دبی هوای ورودی به موتور و نسبت فشارکمپرسورتحت تأثیر سیستم کنترل سوخت در مقایسه با بدون سیستم کنترل..... ٨٣

شکل ٤-٢٠ : شماتیک سیستم کنترل سوخت همراه با کنترل دما و گاز دادن..... ٨٤

شکل ٤-٢١ : تغییرات زاویهٔ دستهٔ گاز با زمان ٨٦

شکل ٤-٢٢ : پاسخ گذرای موتور تحت کنترل دما توسط سیستم کنترل ٨٦

شکل ٤-٢٣ : تغییرات سوخت موتور تحت کنترل دما ٨٧

شکل ٤-٢٤ : تغییرات دمای ورودی به موتور(حد نهایی دمای ورودی به موتور برابر)..... ٨٧

شکل ٤-٢٥: دبی خروجی سیستم کنترل سوخت در مقایسه با بدون سیستم کنترل..... ٨٨

شکل ٤-٢٦: پاسخ حالت گذرا تحت تأثیر سیستم کنترل برای محدود کردن دما در مقایسه با حالت بدون سیستم کنترل..... ٨٨

شکل ٤-٢٧: تأثیر سیستم کنترل سوخت در محدود کردن دما در حد مجاز در مقایسه با سیستم فاقد کنترل سوخت..... ٨٩

شکل ٤-٢٨: تغییرات دور، نیروی جلوبرندهٔ موتور، دبی هوای ورودی به موتور و نسبت فشار کمپرسور تحت تأثیر سیستم کنترل سوخت در مقایسه با حالت بدون سیستم کنترل..... ٨٩

شکل ٤-٣٠ : شماتیک سیستم کنترل سوخت همراه با تابع تأخیر زمانی در خروجی سیستم کنترل..... ٩٠

شکل٤-٣١: شماتیک سیستم کنترل سوخت همراه با تابع تأخیر زمانی در خروجی مدل سیستم گاز..... ٩٠
شکل ٤-٣٢: تحریک دستهٔ گاز بصورت تابع پله ٩٢
شکل ٤-٣٣: مقایسهٔ دبی سوخت در خروجی از سیستم گاز(منحنی١)، خروجی از سیستم کنترل (منحنی٢) و خروجی از تابع تأخیر زمانی(منحنی٣)، منطبق بر شکل(٤-٣٠)..... ٩٢
شکل٤-٣٤: پاسخ حالت گذرا همراه با سیستم کنترل در دو وضعیت بدون تأخیر زمانی(منحنی با خطوط پر) و با تأخیر زمانی(منحنی خط‌چین)..... ٩٣
شکل ٤-٣٥: تغییرات دمای ورودی به توربین در مقایسه با در نظر گرفتن تأخیر زمانی سیستم کنترل(منحنی٢)..... ٩٣
شکل ٤-٣٦: مقایسهٔ دبی سوخت در خروجی از سیستم گاز(منحنی١)، خروجی از سیستم کنترل (منحنی٢) و خروجی از تابع تأخیر زمانی(منحنی٣)، منطبق بر شکل(٤-٣٠)..... ٩٤
شکل٤-٣٧: پاسخ حالت گذرا همراه با سیستم کنترل در دو وضعیت بدون تأخیر زمانی(منحنی با خطوط پر) و با تأخیر زمانی(منحنی خط‌چین)..... ٩٤
شکل ٤-٣٨: تغییرات دمای ورودی به توربین در مقایسه با در نظر گرفتن تأخیر زمانی سیستم کنترل(منحنی٢)..... ٩٥
شکل ٤-٣٩: تغییرات پارامترهای مختلف موتور در مقایسه با در نظر گرفتن تأخیر زمانی سیستم کنترل..... ٩٥
شکل ٤-٤٠: مقایسهٔ دبی سوخت در خروجی از سیستم گاز(منحنی١)، خروجی از تابع تأخیر زمانی(منحنی٢)، خروجی از سیستم کنترل(منحنی٣) و منطبق بر شکل(٤-٣١)..... ٩٦
شکل٤-٤١: پاسخ حالت گذرا همراه با سیستم کنترل در دو وضعیت بدون تأخیر زمانی(منحنی با خطوط پر) و با تأخیر زمانی(منحنی خط‌چین)..... ٩٦
شکل ٤-٤٢: تغییرات دمای ورودی به توربین در مقایسه با در نظر گرفتن تأخیر زمانی سیستم گاز(منحنی٢)..... ٩٧
شکل ٤-٤٣: تغییرات پارامترهای مختلف موتور در مقایسه با در نظر گرفتن تأخیر زمانی سیستم گاز(Throttle)..... ٩٧

فهرست جداول

عنوان صفحه

جدول ٢-١: مشخصات هندسی و ترمودینامیکی موتورتوربوجت..... ١٨

علائم اختصاری:

سطح مقطع	A
ظرفیت گرمای مخصوص	C_p, C_v
ظرفیت گرمایی سوخت	h_{PR}
ممان اینرسی روتور	I
دبی سوخت	m_f
عدد ماخ	$mach$
دور موتور	N
فشار سکون	P_t
دمای سکون	T_t
حجم محفظهٔ احتراق	V_{comb}
سرعت گاز	V
دبی هوای موتور	w

علائم یونانی:

نسبت گرمای مخصوص	γ
بازده	η
نسبت فشار	π
چگالی گاز	ρ
نسبت دما	τ
زاویهٔ دستهٔ گاز	Θ

زیر نویس:

اتمسفر	amb
کمپرسور	c
بحرانی	crit
توربین	t
آیزنتروپیک	is
مقاطع مختلف موتور	۱و۲....٦

فصل اول: مقدمه

فصل اول :

مقدمه

۱-۱ - سیستم‌های کنترل سوخت

بررسی و مطالعه سیستم‌های کنترل سوخت در موتورهای جت از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. کنترل تعداد زیادی پارامتر در موتور، محدودیتهای عملکرد موتور در شرایط مختلف پروازی، نیاز به ایجاد شتابهای مختلف ایمن برای موتور، همگی از عواملی می‌باشند که نیاز به وجود یک سیستم کنترل کارا برای موتورهای هواپیما را ضروری می‌سازنند. در سالهای اخیر عواملی چون مصرف اقتصادی سوخت، قابلیت اطمینان بالا و تضمین راندمان بالا نیز برای موتور به این عوامل اضافه شده‌اند.

ساده‌ترین سیستم کنترل سوخت برای موتورهای توربین گاز یک شیر کنترلی دستی می‌باشد. لکن استفاده از شیر دستی برای کنترل سوخت روش مناسبی نیست زیرا خلبان مجبور است مرتباً تنظیم‌های گوناگون را خود انجام دهد تا از آسیب موتور جلوگیری کند و آنرا در یک عملکرد صحیح با راندمان بالا نگه دارد. بروز چنین مسائلی با توجه به وظایف دیگر خلبان، امر کنترل هواپیما را با مشکل جدی روبرو می‌سازد.

سیستم‌های کنترل سوخت نقش اساسی را در عملکرد صحیح موتورهای جت ایفا می‌کنند. چنانچه میزان دبی سوخت ورودی به محفظهٔ احتراق موتور بطور صحیح تنظیم نگردد و با سرعت و فشار هوای ورودی به موتور متناسب نباشد، موتور عملکرد صحیحی نخواهد داشت. چنانچه سوخت اضافی وارد محفظهٔ احتراق موتور شود توربین به علت افزایش بیش از حد دما دچار آسیب دیدگی

خواهد شد و کمپرسور نیز بعلتِ فشار پشت (Back Pressure) محفظهٔ احتراق دچار سـرج (Surge) یا استال (Stall) می‌گردد و یا پدیدهٔ Rich Blowout رخ خواهد داد. این پدیدهٔ زمانی اتفـاق می‌افتـد که مخلوط به سوختن بسیار نزدیک شود. چنانچه سوخت به مـیزان کـم وارد محفظـهٔ احـتراق شـود پدیدهٔ Leandieout بوقوع می‌پیوند.

در این فصل مطالب زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- پارامترهایی که در یک سیستم کنترل سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- روشهای ریاضی که برای کنترل سوخت استفاد می‌شود.
- ارائهٔ چند نمونهٔ سیستم کنترل موتور.

۱-۲ - پارامترهای سیستم کنترل سوخت

پارامترهایی که می‌توان در یک سیستم کنترل سـوخت، بـرای تنظیـم جریـان سـوخت در یـک توربین گاز در نظر گرفت عبارتند از:

- فشار اتمسفر (Pamb)
- دمای ورودی به کمپرسور (CIT)
- دور موتور (rpm)
- سرعت هوای ورودی به کمپرسور
- فشار هوای ورودی به کمپرسور (CIP)
- فشار هوای خروجی از کمپرسور (CDP)
- دمای ورودی به توربین
- دمای Tail Pipe