

Leposa Norbert Krisztián<sup>1</sup> – Beneda Károly Tamás<sup>2</sup>

## TKT-1 GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ SZABÁLYOZÁSA TPR ALAPÚ SZABÁLYOZÓRENDSZER SEGÍTSÉGÉVEL<sup>3</sup>

*A gázturbinás sugárhajtóművek pontos szabályozása napjainkra elengedhetetlen követelménnyé nőtte ki magát, és a fejlesztések egyik legfőbb iránya az ilyen rendszerek fejlesztése lett. A régi hidromechanikus egységeket már elektronikus irányítással helyettesítik, hogy a hajtóművet még tökéletesebben lehessen vezérelni, ezáltal növelhető az élettartam, a megbízhatóság és számos más egyéb paraméter is javítható. Ezen munka keretében a legújabb szabályozási törvényszerűség került felhasználásra, ami a jelen technológiai szintet tekintve a TPR<sup>4</sup> alapján történik. Magát a szabályozási törvényszerűséget ugyan jelenleg nem alkalmazzák önálló szabályozási céllal az iparban, hanem csak egy korrigáló jel előállítására a feladata, illetve van egy hibadetektáló feladata is, mellyel jelentősen növeli a biztonságot még súlyos mechanika sérülések esetén is. A TPR segítségével azonban önálló szabályozórendszert is létre lehet hozni, és jelen munka keretében a TKT-1 gázturbinás sugárhajtóműre egy ilyen rendszer kifejlesztése volt a cél.*

### **REGULATION OF TKT-1 TURBOJET ENGINE WITH TPR-BASED CONTROL SYSTEM**

*Proper control of jet engine gas turbines has grown an indispensable requirement of our age while development purposes often mean the amelioration of control systems. Old hydro-mechanical units have almost completely been substituted by electronic control in order to achieve precise engine guidance, therefore increasing lifetime, reliability and improving a vague number of other parameters. In this thesis control was set up using the latest control rule, called Turbofan Power Ratio (TPR), which represents the present level of technology. However this control law is yet to be used in industry only in order to generate a correction signal to the gas turbine control, having an error detection function as well which increases safety in case of serious mechanical damages, TPR control law is capable of being the core of an independent control system. Developing a TPR-based FADEC system for the TKT-1 turbojet engine was the original purpose of this research.*

## GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰVEK SZABÁLYOZÓRENDSZEREI

A közlekedés, azon belül is a repülés a technikai fejlődés egyik legjelentősebb képviselőjévé vált napjainkra. Magának a repülésnek elengedhetetlen feltétele a szükséges tolóerő biztosítása. A nagyobb méretű utas- és teherszállító gépek meghajtásáról manapság szinte kizárólag valamilyen gázturbinás eszköz gondoskodik, ugyanis az áramlástechnikai elven működő gépek a repülésben számos előnnyel rendelkeznek a térfogat-kiszorítású dugattyús gépekkel szemben. A legjelentősebbek ezek közül a nagyobb teljesítménysűrűség és a kisebb homlokfelület, emiatt a légellenállás is kisebb, ami főleg a nagyobb teljesítmények esetén teszi ezeket az eszközöket nélkülözhetetlenné. Előnyei miatt ezen erőgépeknek igen nagy szerepük van a repülésben és éppen ezért elkerülhetetlen a folyamatos fejlesztésük, melynek legfőbb irányzata napjainkra a szabályozó rendszerek fejlesztése lett.

<sup>1</sup>Egyetemi MSc hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, leposa66@gmail.com

<sup>2</sup>Mérnök tanár, AEROK Repülőműszaki Oktató és Szolgáltató Kft, karoly.beneda@aerok.hu

<sup>3</sup>Lektorálta: Dr. Varga Béla alezredes, főiskolai docens, NKE Katonai Repülő Tanszék, varga.bela@uni-nke.hu

<sup>4</sup>TPR: Turbofan Power Ratio

## 1.1 Szabályozórendszerek

A gázturbinás sugárhajtóművek működtetéséhez minden esetben szükséges valamilyen szabályozórendszer megléte, melynek segítségével biztosítani lehet a megfelelő mértékű tolóerő generálását. A repülésben a biztonság és a költséghatékonyság különösen fontos szerepet tölt be, ezért a hajtóműveket a lehető legalacsonyabb tüzelőanyag-fogyasztás mellett kell üzemeltetni, ezzel párhuzamosan a meghibásodások kockázatát minimálisra kell csökkenteni. Mindezen igények kielégítésére pontos és megbízható szabályozórendszerekre van szükség.

### 1.1.1 Szabályozórendszerek fajtái [1]

A gázturbinás hajtóművek a kialakulásuk óta számos különböző szabályozórendszerrel lettek ellátva. A legkorábban alkalmazott eszköz a forgó folyadékoszlop centrifugális erejéből származó nyomást használta fel a szabályozáshoz. Ilyen típusú hidraulikus rendszert alkalmaztak például a VK-1-esnél is[2], ami azonban nem bizonyult kielégítő pontosságúnak, ugyanis a munkaközegnek alkalmazott tüzelőanyag hőmérsékletének változásának hatására a folyadék sűrűsége is változott, így a működés során jelentős mértékű pontatlanság léphetett fel.

A hidraulikus szabályozókat a hidromechanikus rendszerek váltották fel, melyeknél a fordulatszám érzékelése röpsúllyal történik. A beavatkozás azonban továbbra is hidraulikus marad, mely tolattyúk és szervomotorok segítségével történik meg. A hidromechanikus rendszerek két fő csoportra oszthatók, közvetlenre és közvetettre, az utóbbiakon belül megkülönböztetünk visszacsatolás nélküli, merev visszacsatolásos és ernyedő vagy más néven rugalmas visszacsatolásos szabályozót. A szabályozórendszereknél ügyelni kell, hogy mind a statikus tulajdonságaik (repülési magasság, sebesség változása), mind a dinamikus tulajdonságaik (HVK<sup>5</sup> pozíció változtatása) megfelelőek legyenek, így képesek legyenek biztosítani a megfelelő működést széles üzemmód tartományban, illetve kellően rövid idő alatt be lehessen avatkozni a kezelőszerven keresztül.

A fejlődés következő állomását a hibrid szabályozórendszerek jelentették. Ezek alapját egy hidromechanikus alaprendszer képezi, melyet az utazó és a felszálló üzemmód közötti tartományban korlátozott hatáskörrel rendelkező elektronikus ráségítéssel működtetnek, így kedvezőbb üzemelés biztosítható. Ilyen rendszer működik a CFM56-3 hajtóműnél, amely a Boeing 737 Classic repülőgépcsaládon teljesít szolgálatot. Ennek a rendszernek előnyei közé tartozik, hogy gyorsabb szabályozást biztosít, illetve, hogy megakadályozható a túl nagy mennyiségű tüzelőanyag befecskendezése, ezáltal a csökkenthető a maximális gázhőmérséklet. Az elektronika meghibásodása esetén, mivel a rendszer alapját hidromechanikus szabályozó képezi, továbbra is működőképes marad a hajtómű, azonban a rendszer reakcióideje hosszabb lesz, emiatt megnövekedett fogyasztás, illetve csökkent élettartam várható a nagyobb termikus és mechanikai terhelés miatt.

A szabályozórendszerek közül jelenleg a FADE(E)C<sup>6</sup> rendszerek a legfejlettebbek, melyek már teljes hatáskörrel rendelkeznek, vagyis az elektronika a teljes üzemmód tartományon módosítani tudja a tüzelőanyag-betáplálást. Mivel a szakirodalomban elterjedtebben alkalmazott jelölés a

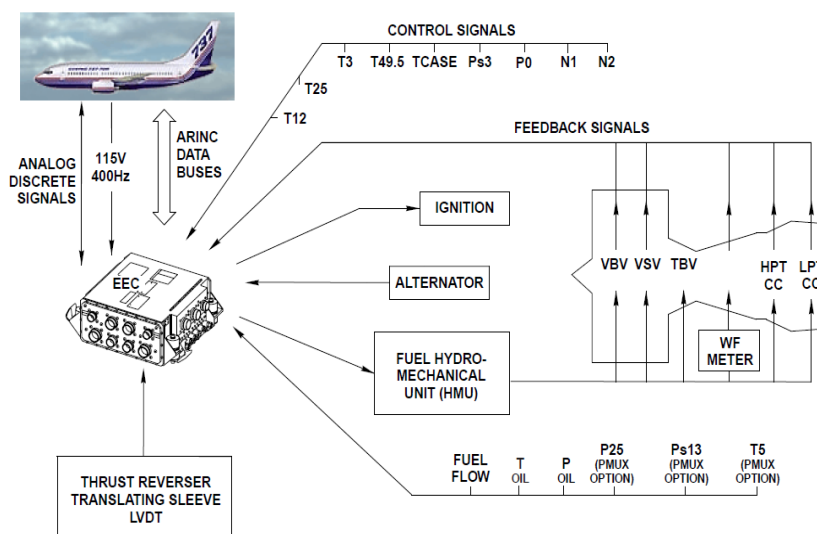
<sup>5</sup> HVK: Hajtómű Vezérlőkar

<sup>6</sup>FADE(E)C: Full Authority Digital Electronic (Engine) Control, magyarul teljes hatáskörű digitális elektronikus (hajtómű) szabályozás

FADEC, ezért a továbbiakban ez a rövidítés kerül alkalmazásra. A szabályozó fejlett mérő-adatgyűjtő rendszerrel van ellátva, mely a hajtómű aktuális állapotát és a személyzet oldaláról elvárt üzemmódot továbbítja a FADEC-nek. A rendszer számítógépes központi egysége dolgozza fel a kapott adatokat, majd kiszámítja a hajtómű által igényelt tüzelőanyag-mennyiséget, illetve a szükséges beavatkozás mértékét, majd a beavatkozó szerveken keresztül a parancsokat végrehajtja.

Az első ilyen teljes hatáskörrel bíró digitális szabályozórendszerek egycsatornás rendszerek voltak, ami azt jelenti, hogy csak egyetlen áramkör állt rendelkezésre, így ennek meghibásodása esetén rendeltetésszerű üzemeltetése nem volt lehetséges, a hajtómű leállása is bekövetkezhetett. Az elsőként megjelenő ilyen rendszer a Pratt & Whitney PW2000-es hajtóműveken teljesített szolgálatot 1984-től, mely később Dual FADEC-et kapott [3].

Az egycsatornás berendezéseket a kétszatornás rendszerek (Dual FADEC) váltották fel, melyek segítették növelni a repülés biztonságát, ugyanis itt már két, egymástól független külön áramkör biztosította a hajtómű vezérlését. Az első ilyen szabályozó rendszer a PW4000-es hajtóművön teljesített szolgálatot 1986-tól [3]. A kezdeti konstrukciónál a két csatorna eltért, az elsődleges pontosabb, finomabb szabályozási lehetőséget biztosított, míg a másodlagos csatorna csak az elsődleges meghibásodása esetén lépett működésbe. A mai korszerű gázturbinás repülőgép hajtóműveken a két csatorna megegyezik, az egyik aktív, a másik pedig úgynevezett meleg tartalék (hot standby). Ilyen szabályozórendszer található például a CFM56-5 és a CFM56-7-es hajtóműveken, melyek ma is szolgálatot teljesítenek az Airbus 320-as repülőgépcsalád, illetve a Boeing 737 NG repülőgépcsalád egyes gépein. A CFM56-7B típusú FADEC rendszerét mutatja be az 1. ábra.



1. ábra A CFM56-7B FADEC rendszere [4]

Általában a két csatorna minden indításkor szerepet cserél. A mérő-adatgyűjtő rendszer mind a két csatorna számára külön-külön biztosítja a hajtómű aktuális állapotának adatait, így a két központi egység minden esetben kiszámítja a szükséges beavatkozás mértékét, az eltérés csupán annyi, hogy a meleg tartalék nem küld jelet a beavatkozó szerveknek, de az aktív csatorna meghibásodása esetén azonnal be tud avatkozni késleltetés nélkül, ezáltal nagymértékben nő a repülés biztonsága. A technika jelenlegi színvonalán ezek a szabályozórendszerek a legfejlettebbek, de magukat a rendszereket folyamatosan fejlesztik most is.

### 1.1.2 Szabályozási törvényszerűségek

A gázturbinás sugárhajtóművek szabályozása a hajtómű mechanikai, áramlástanai és hőtani folyamatai alapján valósítható meg. A hajtómű elméleti működésének figyelembevételével a szabályozási törvényszerűségek felhasználásával biztosíthatjuk a kielégítően pontos vezérlést. Ennek alapját a fizikai jellemzők határozzák meg, melyek segítségével képesek vagyunk leírni a hajtóművek pontos működését.

A szabályozási törvényszerűség megválasztásánál a cél az, hogy a tolóerő értékét a lehető legnagyobb mértékben állandó értéken tudjuk tartani, azonban ez nem biztosítható közvetlenül, ugyanis repülés közben nem mérhető. További hiányossága, hogy nem hordoz információt a gázturbina különböző részeinek mechanikai és hőterheléséről. Ezért a szabályozást közvetett módon kell megvalósítani úgy, hogy a tolóerő állandóságát a lehető legpontosabban biztosítsuk, és emellett gondoskodjunk a hajtómű túlterhelésének illetve az egyéb káros jelenségek, mint a leválás elkerüléséről. Számos szabályozási törvényszerűség terjedt el, ezek alkalmazási területe jelentősen függ attól, hogy polgári vagy katonai célú hajtóművekről van szó. Léteznek egyparaméteresek, melyeknél a fűvócső geometriája állandó, ezek a törvényszerűségek mind egy, mind több forgórészes hajtóművekre érvényesek. A kétparamétereseknél tüzelőanyag betápláláson kívül a változtatható fűvócső geometria segítségével lehet szabályozni a hajtóművet. A háromparaméteres törvényszerűségeknek pedig, mint harmadik beavatkozó szerv a változtatható turbina állólapát-geometria az, ami további lehetőséget biztosít a beavatkozásra. Fontos megjegyezni, hogy a kompresszorok esetében alkalmazott változtatható geometria nem tartozik a szabályozási paraméterek közé, ugyanis ennek a pompázs, illetve a leválás elleni védelemben van kiemelt szerepe. Léteznek továbbá kombinált szabályozások is, ahol különböző repülési üzemmód-tartományokban más fajta törvényszerűségeket alkalmaznak, amennyiben egyetlen megoldás nem szolgáltatna kellő hatékonyságot vagy stabilitást [5].

A szabályozási törvényszerűségek egyik képviselője az állandó fordulatszám szerinti szabályozás volt. A szabályozás egyszerű, azonban a tolóerőt a fordulatszám és a turbina előtti hőmérséklet együttesen határozza meg és itt most a fordulatszám állandó, így a tolóerő állandósága nem biztosítható megfelelően. További problémát jelent, hogy ha túl nagy a turbina előtti hőmérséklet, akkor korlátozásra van szükség, ha viszont a hőmérséklet értéke túl alacsony, akkor a hajtómű nincs kellő mértékben kihasználva. Lehetőségünk van állandó turbina előtti hőmérséklet szerint szabályozni, azonban itt sem biztosítható a tolóerő állandósága. A hőmérséklet mérése nehézkes az inhomogén hőfokmező miatt, illetve a korszerű gázturbinákban a hőmérséklet értéke elérheti az 1700 K-t is, továbbá a hőmérő beállási idővel rendelkezik.

További megoldás lehetne az állandó átszámított fordulatszám (1) szerinti szabályozás, azonban a hőmérséklet mérése régebben elég nehéz problémának bizonyult.

$$n_a = n \cdot \sqrt{\frac{288}{T_0^*}} \quad (1)$$

- $n_a$  az átszámított fordulatszám
- $n$  a fizikai fordulatszám
- $T_0^*$  a környezeti torlóponti hőmérséklet



A lehetőségek jobb kihasználása végett, mivel a fent említett módszerek egyike sem bizonyult teljes mértékben kielégítőnek, így kombinált szabályozás segítségével az egyes törvényszerűségeket más-más üzemmód-tartományon alkalmazva hatékonyabb szabályozás valósítható meg.

Amennyiben a hajtómű rendelkezik változtatható geometriájú fűvócsóval, akkor az hatással van a szabályozásra, ugyanis ez egy további független változót jelent. Alapvetően két lehetőség adódik, az első, hogy a fordulatszámot és a turbina előtti hőmérsékletet tartjuk állandó értéken. A fordulatszámot a tüzelőanyag betáplálás segítségével, a turbina előtti hőmérsékletet pedig a fűvócsó keresztmetszetének változtatásával szabályozzuk. Mivel mind a kis, mind a nagy méretezési nyomásviszonyú kompresszoroknál az együtműködési görbéket a leválási határral párhuzamos irányba fordítja a szabályozás, így bővül a leválás mentes működési tartomány. Továbbá jó a tolóerő szerinti kihasználtsága is. Azonban a turbina előtti hőmérséklet érzékelés itt is problémát jelent.

A másik lehetőség a kétparaméteres szabályozás megvalósítására, hogy az átszámított fordulatszámot és a turbina előtti hőmérsékletet tartjuk állandó értéken. A szabályozás előnye, hogy a repülési sebesség növekedésével az együtműködési pont távolodik a leválási határtól. A fordulatszám itt azonban nem lesz állandó, így nem tudja megfelelő mértékben biztosítani a jó tolóerő szerinti kihasználtságot, illetve a másik hátrány itt is a hőmérséklet mérésével kapcsolatos probléma.

A kétparaméteres szabályozásnál is van lehetőség arra, hogy kombinált szabályozást valósítsunk meg. Kisebb repülési sebességek esetén a fordulatszámot és a turbina előtti hőmérsékletet tartjuk állandó értéken, míg a nagy sebességek esetén a fordulatszám helyett az átszámított fordulatszámot, így a teljes működési tartományban kellően távol maradhatunk a leválási határtól.

Két vagy több forgórészes hajtóművek esetén is lehetőség van egyparaméteres, kétparaméteres, háromparaméteres és kombinált szabályozásra is. A szabályozási törvényszerűségek továbbra is ugyanúgy érvényesek, mint az egy paraméteresnél. A több forgórészes gázturbináknál azonban valamivel nagyobb a szabályozási lehetőségek száma. A fordulatszám állandóságát alkalmazhatjuk a nagynyomású kompresszor tengelyére vagy a kisnyomású kompresszor tengelyére is. Ugyanez érvényes az átszámított fordulatszám szerinti szabályozás esetén is.

A szabályozási törvényszerűségek közül azonban kiemelkedik az úgynevezett  $EPR^7$  szerinti szabályozás, melynek meghatározó szerepe van a mai korszerű gázturbinás sugárhajtóművek vezérlésében. A tolóerő állandóságát ez a törvényszerűség biztosítja a legnagyobb mértékben. A hajtómű tolóereje adott repülési magasság, sebesség, hőmérséklet és rögzített gázkar-állás mellett:

$$F_t = f\left(\frac{p_6^*}{p_1^*}\right) = f(EPR) \quad (2)$$

- $p_1^*, p_6^*$  a kompresszor belépő és a fűvócsó előtti torlóponthoz tartozó nyomása

Tehát az  $EPR$ -ra érvényes összefüggés:

$$EPR = \frac{p_6^*}{p_1^*} \quad (3)$$

---

<sup>7</sup>  $EPR$ : Engine Pressure Ratio

A szabályozási törvényszerűség alapját tehát egy olyan kifejezés alkotja, ami a tolóerő nagyságával közvetlen összefüggésben van, így a tolóerő állandó értéken tartása nagyobb mértékben biztosítható. A szabályozáshoz szükséges két paraméter mérése is viszonylag egyszerűen kivitelezhető, ezért ez a törvényszerűség igen kedvező a gázturbinák szabályozásához.

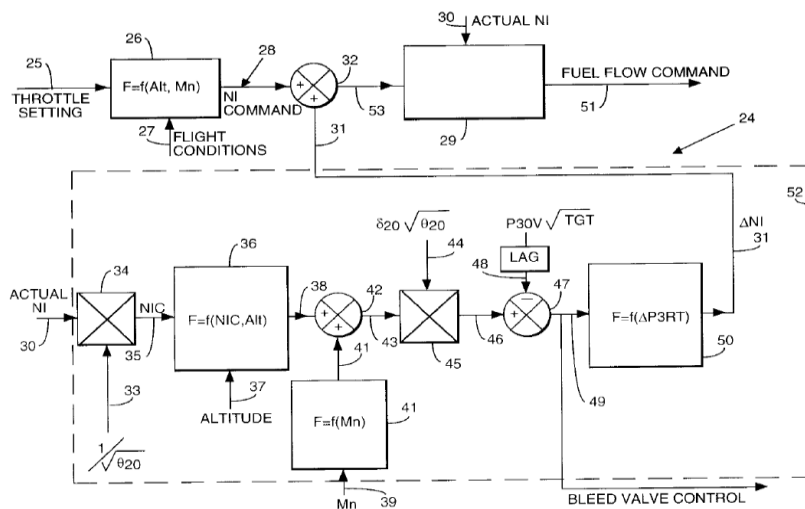
A szabályozási törvényszerűségek közül a TPR szerinti szabályozás [5] tekinthető a legmodernebb törvényszerűségnek, melynek alapegyenletét a 4. egyenlet írja le.

$$TPR = \frac{p_2^*}{p_1^*} \cdot \sqrt{\frac{T_g^*}{T_1^*}} \quad (4)$$

- $p_1^*, p_2^*$  a kompresszor be- és kilépő torlóponti nyomása
- $T_1^*, T_g^*$  a kompresszor és a turbina belépő torlóponti hőmérséklete

A törvényszerűséget a nagy kétáramúsági fokú, két vagy több forgórészes gázturbinás sugárhajtóművek szabályozásához fejlesztették ki, melyeknél a kompresszor első fokozata egy nagy nyomásviszony létrehozására alkalmas ventilátor. Alkalmazásra kerül a Rolls-Royce Trent900-as hajtóművön, ami az Airbus 380-ason, illetve a Rolls-Royce Trent1000-es hajtóművön, ami pedig a Boeing 787 repülőgépeken teljesít szolgálatot. Ez a szabályozási módszer alkalmas arra, hogy a tolóerő nagyságát állandó értéken tartsa, továbbá a korábbi EPR alapú szabályozással ellentétben képes a feladatát akkor is ellátni, ha a hajtómű mechanikai sérülést szenvedett. Ezzel a szabályozórendszer tovább növelni a repülés biztonságát, ami napjainkra kiemelkedően fontos szerepet tölt be. Egy a Rolls-Royce által kifejlesztett TPR alapú szabályozó blokkdiagramját mutatja a 2. ábra. Az ábrán a szaggatott téglalappal kiemelt rész a TPR jelének előállítását végző blokkot mutatja be.

Maga a szabályozó továbbra is az  $NI$  (kisnyomású forgórész átszámított fordulatszáma) jel alapján adja ki az utasítást a tüzelőanyag-adagoló rendszernek, azonban a TPR jelének alapján előállításra kerül egy  $\Delta NI$  jel, amit egy összegzőn keresztül hozzáadunk az eredeti  $NI$  jelhez, így a tüzelőanyag-adagoló számára egy, a szabályozás megvalósításához alkalmasabb jel kerül felhasználásra. Amint az a 2. ábrán is látható, mind az  $NI$  jel mind a  $\Delta NI$  jel kialakításában közre játszanak további paraméterek. Ezek közül néhány csak felsorolás szintjén megemlíthető: gázkar aktuális pozíciója, repülési magasság, repülés Mach-száma.



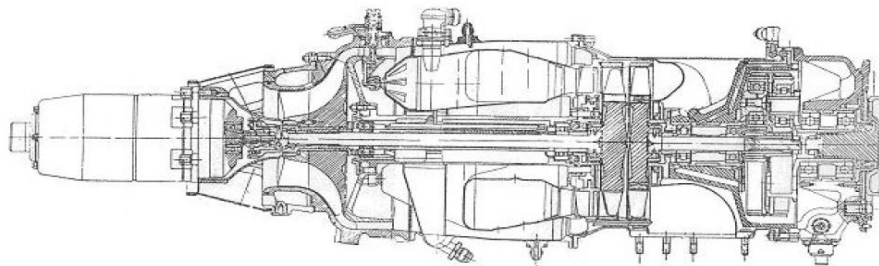
2. ábra TPR alapú szabályozórendszer blokkdiagramja [5]

A TPR alapú szabályozórendszer a hajtómű belső működését pontosabban írja le. Mechanikai sérülés esetén képes detektálni a hibát, továbbá alkalmas arra, hogy hajtómű szabályozható maradjon. Más szabályozórendszerek esetén, ha ventilátor lapátok sérülést szenvednek, kitörnek, akkor változatlan gázkar állás mellett a hajtómű nem lesz képes tartani a tolóerőt állandó értéken, illetve egyes esetekben hajtóműleállás következhet be.

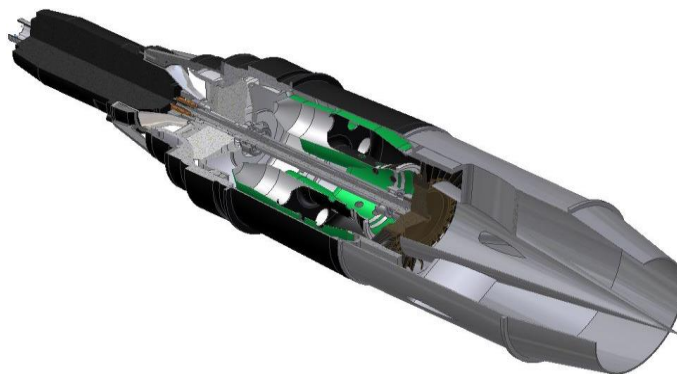
A TPR alapú szabályozás önmagában is megfelelőnek tűnik arra, hogy ne csak, mint egy fordulatszám-módosító modulként jelenjen meg egy gázturbinás hajtómű szabályozórendszerében, hanem önálló rendszerként kerüljön alkalmazásra.

## 1.2 TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű[1]

A TKT-1 (4. ábra) egyforgórészes, egyfokozatú centrifugálkompresszorral, egyfokozatú axiális turbinával és egyenáramú gyűrűs égéstérrel rendelkező egyáramú sugárhajtómű. A TKT-1-es egy TSz-21-es fedélzeti indító gázturbinából (3. ábra) lett kialakítva a munkaturbina és a hozzá tartozó kihajtás eltávolításával, melyek helyére egy megfelelő kialakítású fúvócső került. A későbbi fejlesztések során a hajtóműre fel lett szerelve egy GSF<sup>8</sup> redőnyzet is, melynek segítségével a hajtómű különböző terhelési állapotokban is vizsgálhatóvá vált.



3. ábraA TSz-21 fedélzeti indító gázturbina [6]



4. ábra A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű 3D-s modellje [7]

A TKT-1-es levegővel való ellátásnak biztosításához egy függőlegesen elhelyezett szívócsatorna került kialakításra. A szívócsatorna el lett látva egy DIN 5221 szerinti szabványos mérőperemmel, melynek segítségével mérhető az átáramlott közegmennyiség. A kedvező kialakításnak köszönhetően a nyomásveszteség értéke alacsony,  $\alpha = 0,955$ -re adódik.

A gázturbina elhelyezésére egy próbapad szolgál, melyen helyett kapott a hajtóműnek az összes

<sup>8</sup> GSF: Gázkiáramlás sebesség-fokozó

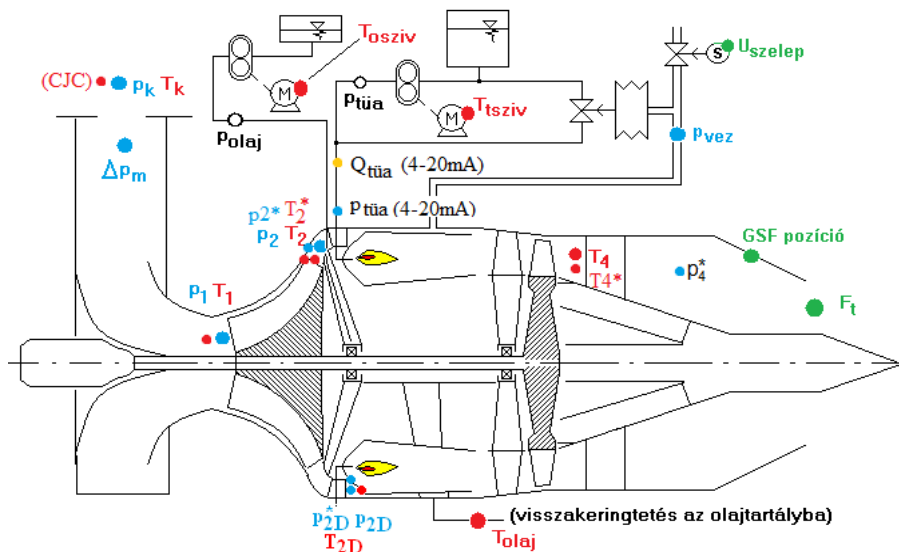
segédberendezése, továbbá a kezelőpult is. A zártszelvényekből kialakított állványon a hajtómű függesztve lóg, ezáltal biztosított egy kismértékű vízszintes elmozdulás, ennek megfelelően lehetőség nyílik a tolóerő mérésére is.

### 1.3 A szabályozás megvalósításához szükséges rendszerek[1]

A gázturbinák szabályozási feladatának ellátásához szükségesek mérő és adatgyűjtő rendszerek, továbbá kezelőszervek, illetve beavatkozó szervek. Ezen rendszerek együttes megléte esetén a szabályozás lehetősége adott.

A mérő és adatgyűjtő rendszer a hajtóműre jellemző fizikai paraméterek sokaságát méri, illetve elektromos jel formájában továbbítja a feldolgozó egységnek, ami például egy számítógép, vagy egyszerűbb esetben egy mikrokontroller. A mért adatok áramlási, hőtani és mechanikai jellemzők, melyek egy gázturbina esetén a nyomás, a hőmérséklet és a fordulatszám.

A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű szabályozásához szükséges ismerni a hajtómű állapotát leíró fizikai paramétereket. A működés lehető legpontosabb megismerése érdekében a lehető legtöbb helyen mérni kell a különböző fizikai mennyiségeket. A fejlesztések során, egyre több mérési hely lett kialakítva a TKT-1-en ezekről egy rövid áttekintést az 5. ábra ad.



5. ábra A TKT-1 mérési helyei [6]

Az 5. ábra jelöléseit alkalmazva a hajtómű jelen állapotában a következő fizikai mennyiségek, paraméterek mérése lehetséges:

- környezeti nyomás:  $p_k$
- környezeti hőmérséklet:  $T_k$
- beszívó mérőszáj nyomásesése:  $\Delta p_m$
- kompresszor előtti torlóponyi nyomás:  $p_1^*$
- kompresszor előtti statikus hőmérséklet:  $T_1$
- kompresszor utáni statikus nyomás:  $p_2$
- kompresszor utáni torlóponyi nyomás:  $p_2^*$
- kompresszor után, a diffúzorban mért torlóponyi nyomás:  $p_{2d}^*$



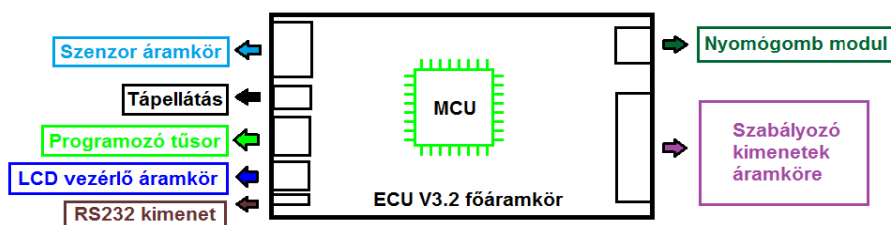
• kompresszor utáni statikus hőmérséklet:	$T_2$
• kompresszor utáni torlóponyi hőmérséklet:	$T_2^*$
• kompresszor után, a diffúzorban mért torlóponyi hőmérséklet:	$T_{2d}^*$
• turbina utáni torlóponyi nyomás:	$p_4^*$
• turbina utáni statikus hőmérséklet:	$T_4$
• turbina utáni torlóponyi hőmérséklet:	$T_4^*$
• hajtómű vezérlőkar pozíció:	HVK
• gázsebesség-fokozó pozíció:	GSF
• tolóerő:	$F_t$
• szelepfeszültség:	$U_{szelep}$
• vezérlőnyomás:	$p_{vez}$
• olajhőmérséklet a tartályban:	$T_{olaj}$
• tüzelőanyag-szivattyú motorjának hőmérséklete:	$T_{tsziv}$
• olajszivattyú motorjának hőmérséklete:	$T_{osziv}$

A mérőrendszer által a hajtómű összes, a működés szempontjából fontos adata begyűjthető, így részletes és pontos leírást kaphatunk, az áramlástechnikai gépen belül végbenő fizikai folyamatokról. A mért paraméterek széles választékának segítségével a TKT-1 gázturbinás sugárhajtóművön többféle szabályozás is megvalósítható. Az alfejezet további részében a mérőeszközök pontos leírása kerül tárgyalásra.

## 2. A SZABÁLYOZÓ RENDSZER HARDVERES ÉS SZOFTVERES FELÉPÍTÉSE

A TKT-1 gázturbinás sugárhajtóműre a jelenlegi cél egy teljes hatáskörű digitális elektronikus szabályozórendszer kifejlesztése, mely képes a TPR szerinti szabályozási törvényszerűség alapján vezérelni a hajtóművet. ECU, mely az Engine Control Unit kifejezés rövidítése, ezt a feladatot hivatott ellátni, melyet a modell gázturbinák, illetve a TKT-1 szabályozására fejlesztettek ki a VRHT<sup>9</sup> jogelődje a Repülőgépek és Hajók Tanszéken.

### 2.1 Az ECU V3.2



6. ábra Az ECU V3.2 moduláris kialakítása [8]

Az ECU V3.2 egy egycsatornás FADEC rendszer, mely képes ellátni minden mérési és vezérlési

<sup>9</sup>VRHT: Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék



feladatot, ami a TKT-1, illetve a modell sugárhajtóművek üzemeltetéséhez szükséges. A szabályozórendszer a korábbi kialakításoktól eltérően moduláris felépítésű, ezt mutatja a 6. ábra.

Felépítését tekintve tartalmaz egy Freescale MC9S08DN60, 8 bites Neumann architektúrájú CPU<sup>10</sup>-t, 60 kB FLASH programmemóriával, 2kB EEPROM<sup>11</sup>-al, 2db 16 bites számlálóval ellátott mikrokontrollert, mely rendelkezik még 12 bites A/D<sup>12</sup> átalakítóval is, ami 10 csatornás. A kijelzésért egy Raystar RC1602-es LCD<sup>13</sup> felel, mely két sorban 16 karakter megjelenítésére alkalmas. A rendszerbe be van építve egy 74HCT164 típusú SIPO IC<sup>14</sup>, ennek két adat bemenete, egy órajel vonala és nyolc kimenete van. A shiftregiszter segítségével, a mikrokontrollerrel történő LCD vezérléshez csak 3 vonalra van szükség, mint az előző verzióknál. A szabályozó működés közbeni megfigyelhetőségének és az esetleges beavatkozáshoz 4 nyomógomb került elhelyezésre. A nyomógombok segítségével a felhasználó és a rendszer között kétirányú kommunikáció valósítható meg.

Az ECU V3.2 további elemei a következő paraméterek mérésére alkalmas eszközök alkotják:

- |  |         |
|--|---------|
| • környezeti nyomás:                   | $p_k$   |
| • kompresszor előtti torlóponi nyomás: | $p_1^*$ |
| • kompresszor utáni torlóponi nyomás:  | $p_2^*$ |
| • turbina utáni torlóponi nyomás:      | $p_4^*$ |
| • környezeti hőmérséklet:              | $T_k$   |
| • turbina utáni torlóponi hőmérséklet: | $T_4^*$ |
| • hajtómű vezérlőkar pozíció:          | HVK     |
| • gázsebesség-fokozó pozíció:          | GSF     |

A környezeti nyomást egy MPXHZ6115-ös, 15–115 kPa-os méréstartományú abszolút nyomásérzékelő méri. A kompresszor előtti nyomást egy MPXV7002DP  $\pm 2$  kPa-os méréstartományú differencia nyomásérzékelő, míg a kompresszor utáni nyomást egy MPXHZ6400A 15–400 kPa-os méréstartományú abszolút nyomásérzékelő közvetíti a mikrokontrollernek. A turbina utáni nyomást pedig egy MPXV7025-ös,  $\pm 25$  kPa-os méréstartományú differencia nyomásérzékelő méri. Az alkalmazott nyomásérzékelők mindegyike piezorezisztív elven működik, hőmérséklet kompenzált és rendelkezik belső, lézerrel trimmelt erősítéssel, ami 0–5 V közötti kimenetet eredményez a néhány 10 mV helyett.

A környezeti hőmérsékletet a mikrokontrollerbe beépített hőmérő segítségével mérjük. A turbina utáni torlóponi hőmérséklet mérésére egy K-típusú, Kromel/Alumel (Nikkel-króm/Nikkel-alumínium) hőelem szolgál, melynek jele keresztülmegy egy belső erősítőn, ami 50-szeres erősítést produkál.

A GSF pozíció méréséhez potenciométer szolgáltatja az analóg jelet, mely aztán digitalizálásra kerül a mikrokontrollerben. A HVK pozíció PWM<sup>15</sup> jel formájában kerül feldolgozásra az

<sup>10</sup> CPU: Central Processing Unit

<sup>11</sup> EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

<sup>12</sup> A/D: Analóg/Digitális

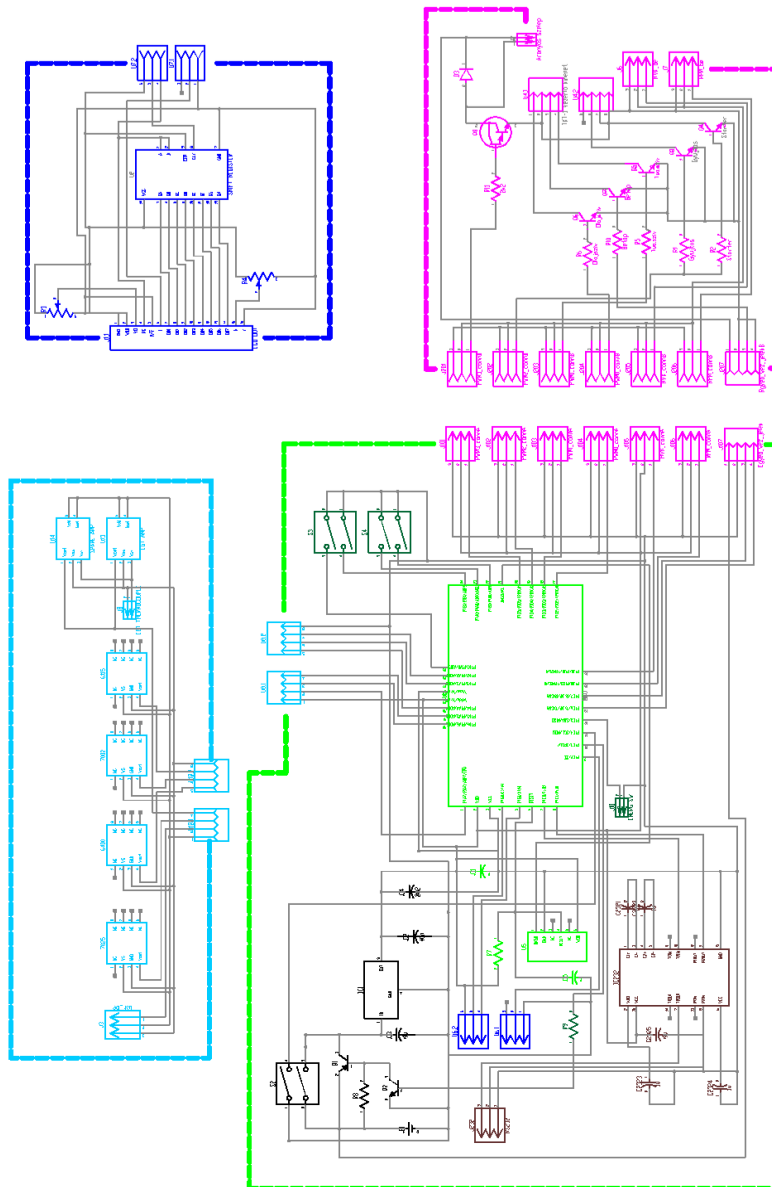
<sup>13</sup> LCD: Liquid Crystal Display

<sup>14</sup> SIPO IC: Serial In Parallel Out Integrated Circuit

<sup>15</sup> PWM: Pulse Width Modulation

MCU<sup>16</sup>-ban.

Az ECU V3.2 kapcsolási rajzát mutatja a 7. ábra, amelyen világoszölddel került feltüntetésre a mikrokontroller, fekete színnel a tápellátásért felelő rész, sötétkékkel pedig a kijelzésért felelős modul elemei. Az analóg bemenetek modulja világoskék színnel, a PWM kezelőszervei pedig rózsaszínnel jelöltek. Sötétbarna színben az RS232 szabványon alapuló kommunikáció működéséhez szükséges szintillesztő áramkör látható. Sötétzölddel a nyomógombok kerültek jelölésre.



7. ábra Az ECU V3 kapcsolási rajza [8]

A mikrokontroller programkódja C-ben, egyes részei Assemblyben kerültek megírásra Freescale CodeWarrior segédprogram segítségével. A forrásfájlok és feladataik a következők:

- main.c: ez maga a fő program
- asm\_main.asm: a kezdeti értékeket tartalmazza, illetve a feliratokat a kijelzéshez

<sup>16</sup> MCU: MicroController Unit



- `MCUinit.c`: ez felel az inicializálásért, a nyomógombokért, a PWM jelek generálásáért, és még sok más egyéb funkcióért is
- `MCUinit.h`: egy C header, mely az `MCUinit.c`-hez tartozó megszakítás kezelő függvények deklarációit tartalmazza
- `ECU3rutinok.c`: ez a forrásfájl a működést megvalósító függvények forráskódját tartalmazza

Az ECU V3.2 szabályozórendszert feszültség alá helyezve az első lépés a mikrokontroller inicializálása. Ennek végeztével az LCD kijelző inicializálása következik, ennek megtörténte után megjelenik egy üdvözlőképnyő. A bekapcsolási folyamat végeztével a nyomógombok segítségével lehetőség adódik az egyes menüpontok közötti navigációra, a működési paraméterek módosítására, illetve a szabályozási üzemmód kerülhet kiválasztására. Az ECU V3.2 segítségével lehetséges  $p_2^*$  törvényszerűség szerint,  $EPR$  és  $TPR$  alapján szabályozni, illetve a rendszer képes a GSF szerinti vezérlésre is, ami azt jelenti, hogy a GSF pozícióhoz egy fiktív HVK értéket rendel, a teljesen nyitott állásához alapjáratot, a zárt álláshoz a maximális fordulatszámot és a köztes pozíciókhoz a két véghelyzet között egy egyszerű lineáris összefüggéssel rendel HVK értékeket. A változtatható GSF-fel rendelkező hajtóműveknél általában egyértelmű  $GSF = f(HVK)$  függvény írja le az összefüggést, tehát nem függetlenek egymástól. A TKT-1 esetében azonban nincs lehetőség a GSF automatikus mozgatására, itt a felhasználó mozgatja a GSF-et és a rendszer ehhez rendeli a HVK értéket. A rendszernek van egy különleges üzemmódja is, ami azt jelenti, hogy egy a felhasználó által előre definiált közép feszültség mellett az arányos szelepre egy négyszögjelet vezérel ki a mikrokontroller, melynek amplitúdó nagysága szintén a felhasználóra van bízva. Az egyes almenükben beállíthatók a következő paraméterek:

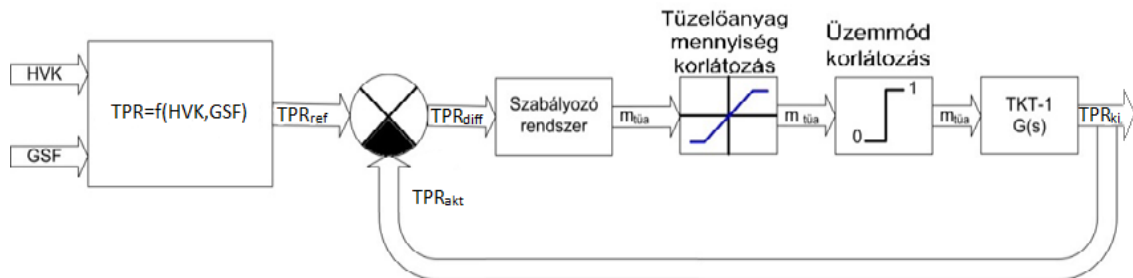
- $osztó$ :  $p_2^*$  törvényszerűség beállási idejét befolyásoló tényező
- $p_{2\ min}^*$ : a legkisebb kivezérelhető  $p_2^*$  érték
- $p_{2\ max}^*$ : a legnagyobb kivezérelhető  $p_2^*$  érték
- $EPR_{min}$ : a legkisebb kivezérelhető  $EPR$  érték
- $EPR_{max}$ : a legnagyobb kivezérelhető  $EPR$  érték
- $TPR_{min}$ : a legkisebb kivezérelhető  $TPR$  érték
- $TPR_{max}$ : a legnagyobb kivezérelhető  $TPR$  érték
- $P$ : a PID szabályozó arányos tagjának együtthatója
- $I$ : a PID szabályozó integrálós tagjának együtthatója
- $D$ : a PID szabályozó deriválós tagjának együtthatója

A szabályozórendszer, figyelembe véve, hogy FADEC rendszer, az üzemmód kiválasztása után képes a teljes indítási folyamat önálló elvégzésére. A hajtómű üzemmódra való kifutása után a beállított szabályozási törvényszerűség alapján a szabályozórendszer látja el a hajtómű vezérlési feladatait. Működés közben is lehetséges az egyes paraméterek módosítása, így könnyebb az egyes finomhangolási műveletek elvégzése. Az üzemeltetés során a felhasználó számára, az üzemmódtól függően megjelennek a kijelzőn a legfontosabb paraméterek, melyek alapján könnyen ellenőrizhető a gázturbina állapota. Az EEPROM-ban rögzítésre kerülnek az egyes üzemi idők, az indításkori maximális gázhő és más fontos adatok, melyek segítségével a gázturbina

életciklusa nyomon követhető. A soros vonalon keresztül adatok letöltése és feltöltése is lehetséges. Az ECU V3.2 beépített önellenőrző képességgel rendelkezik (Built-in Test Equipment, BITE), ez azt jelenti, hogy képes a rendszer kiszűrni a hibás bemenőjeleket. Így nem kerülhetnek be a rendszerbe negatív  $p_1^*$ ,  $p_2^*$ ,  $p_4^*$  nyomásértékek, illetve a HVK és GSF esetén, ha a megengedett tartományon kívül esik a pozíciójuk, akkor megtartják előző értelmes értéküket.

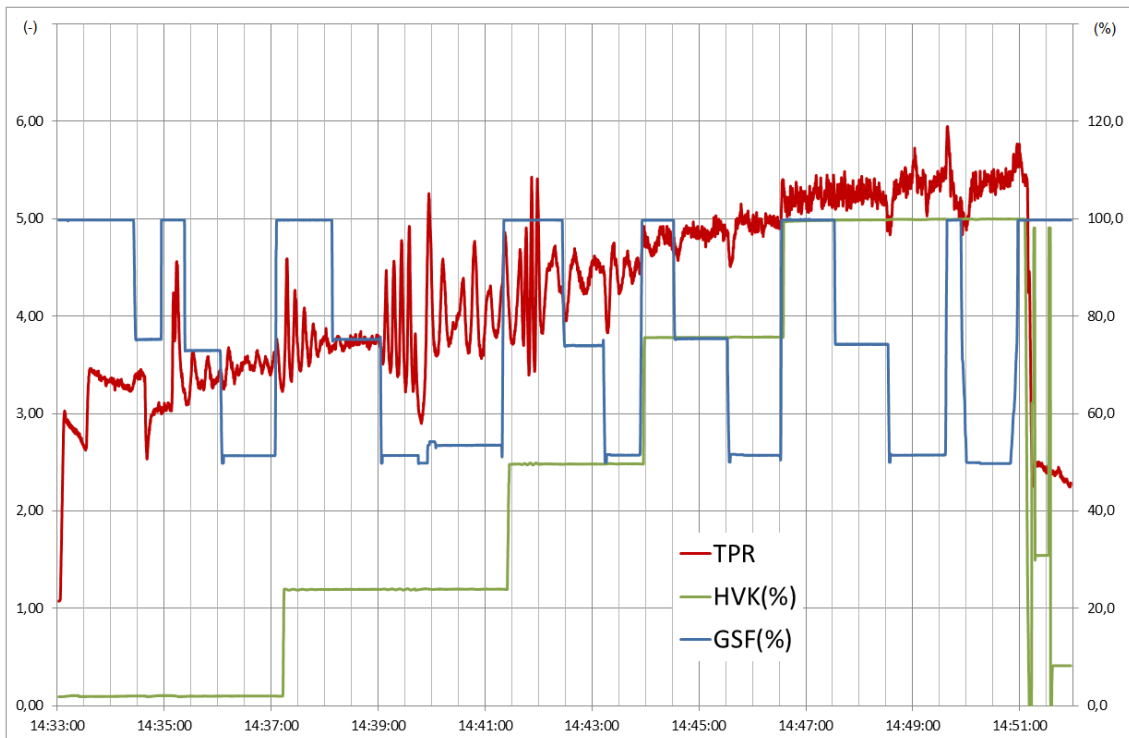
## 2.2 A szabályozórendszer [1]

Az ECU V3.2 segítségével a TKT-1 gázturbinás sugárhajtóművön TPR szabályozási törvényszerűség megvalósítása volt a cél. A szabályozás működésének alapját mutatja be a 8. ábra.



8. ábra A szabályozás blokkdiagramja [1]

Az első feladat a szabályozás gyakorlati kivitelezéséhez a hajtómű vezérlőkar, illetve a gázsebesség-fokozó és a TPR közötti jellegfelület meghatározása volt, mely alapján később a TPR referencia értékei meghatározásra kerülhetnek. Ennek a jellegfelületnek a meghatározásához az első lépés a hajtóművön végzett mérés volt, ennek eredményét a 9. ábra mutatja.

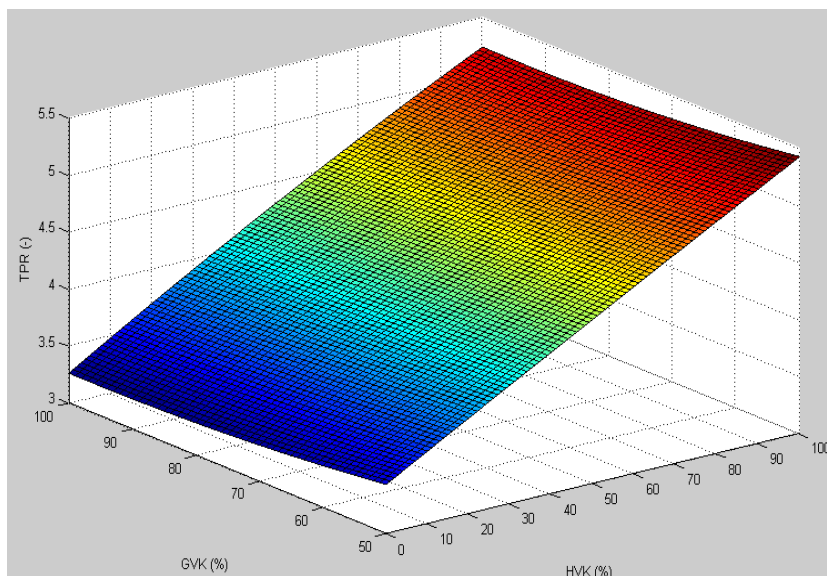


9. ábra HVK és GSF pozíciók hatása a TPR értékére [1]

A mérés során a tüzelőanyag-rendszer elégtelen működéséből fakadóan a beállási idő jelentősen hosszabb volt a szokásosnál, illetve a 0-50%-os HVK tartományban hosszú periódusú lengések voltak jelen, ami megnehezítette az adott vezérlőkar-pozíciókhoz tartozó értékek leolvasását, emiatt átlagolást kellett végezni az adott tartományokban. A 9. ábra alapján látható, hogy a mérés 50%-os, 75%-os és 100%-os GVK<sup>17</sup> pozíciókhoz lettek elvégezve 0%-os, 25%-os, 50%-os, 75%-os és 100%-os HVK pozíciók mellett. Így tehát a TPR jellegfelület meghatározásához 15 mérési pont volt adott. A mérésből látható, hogy a TPR értéke a fordulatszám növekedésére jelentős változást mutat, míg a GSF változtatására csak mérsékelt változást produkál. A közelítés a  $TPR = f(HVK, GVK)$  meghatározásához keresztregresszióval történt MATLAB program segítségével. A keresztregresszió lényege, hogy először a  $TPR = f(HVK)$  függvényeket vizsgáljuk meg, állandó GVK pozíciók mellett, majd figyelembe vesszük a GSF pozíciók változását is. A keresztregresszióval meghatározott kétváltozós függvény a következő alakban adódott:

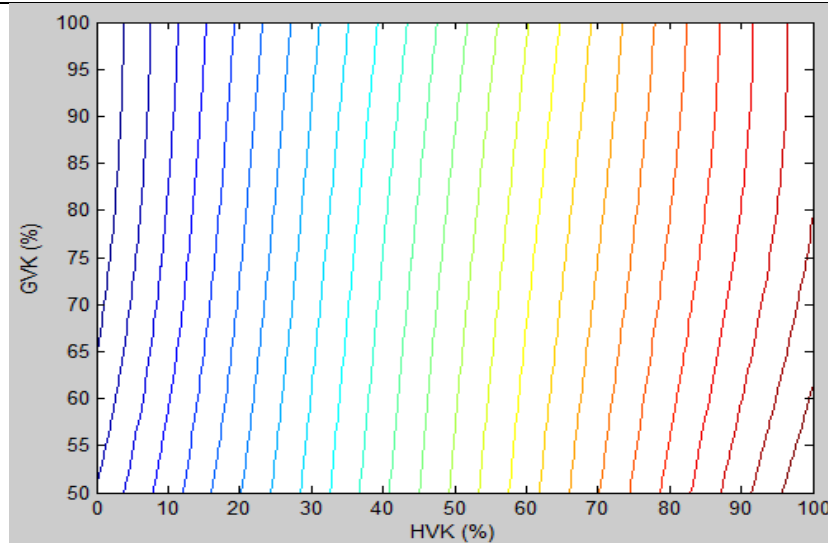
$$\begin{aligned}
 TPR(HVK, GVK) = & \frac{0,0369 \cdot GVK^2 - 5,8885 \cdot GVK + 197,22}{10^6} \cdot HVK^2 + \\
 & + \frac{-0,0035 \cdot GVK^2 + 0,5576 \cdot GVK + 1,3}{10^3} \cdot HVK + \\
 & + 0,0001 \cdot GVK^2 - 0,0148 \cdot GVK + 3,9794
 \end{aligned} \tag{5}$$

A kétváltozós függvény reprezentációit mutatja a 10. ábra és a 11. ábra.



10. ábra A TPR változása a HVK és a GVK függvényében [1]

<sup>17</sup> GVK: Gázsebesség-fokozó Vezérlőkar

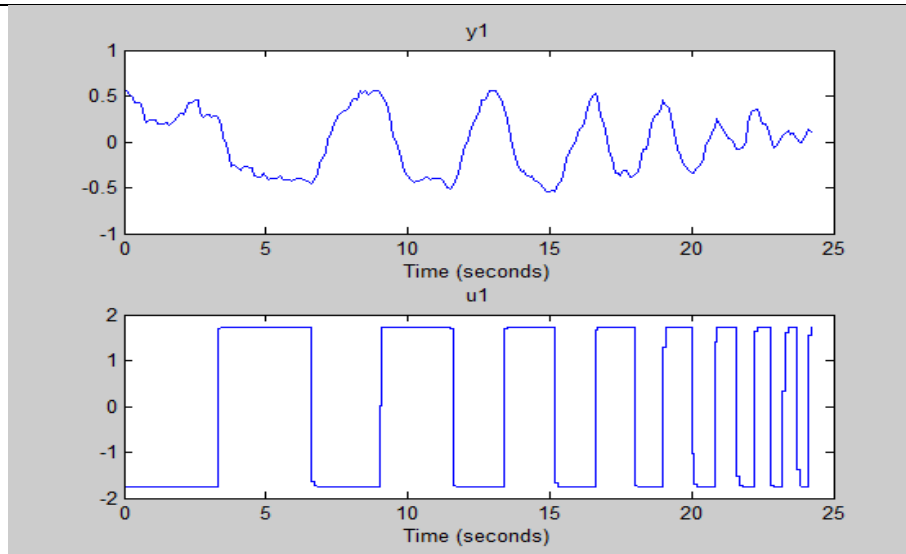


11. ábra A TPR szintvonalas ábrázolása a HVK és a GVK függvényében [1]

A  $TPR = f(HVK, GVK)$  függvény meghatározásával tehát minden adott hajtómű vezérlőkar és GSF vezérlőkar pozícióra meghatározható a referencia TPR értéke.

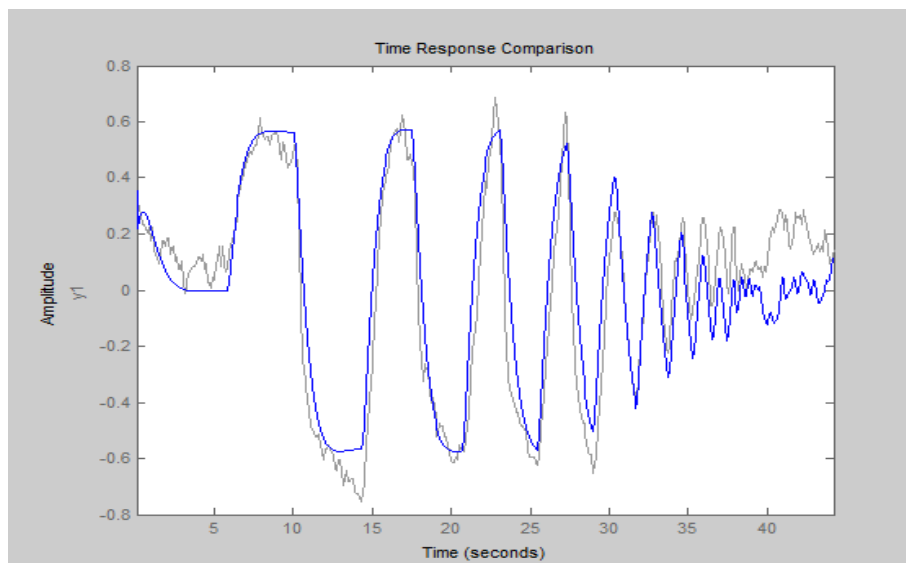
A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű szabályozásának alapját az képzi, hogy a referencia TPR értékét a rendszer összehasonlítja az éppen aktuálisan mért TPR értékkel, és a kettő különbségéből előállít egy differencia TPR értéket, ezt a különbséget folyamatosan csökkenti egészen addig, míg a referencia érték és a mért érték között nem lesz eltérés. Ezt egy PID szabályozó segítségével valósítja meg a szabályozó rendszer, melynek megtervezéséhez szükséges a TKT-1 átviteli függvényének ismerete, majd ennek függvényében a PID szabályozó megtervezhető.

Az átviteli függvény meghatározása a rendszer identifikációjának segítségével történt meg. Az identifikációs mérés a PELE V3 szabályozórendszer [6] kifejezetten erre a célra alkalmas „különleges üzemmódjával” történt meg. Ezen üzemmód esetén a szelepfeszültségre, mint bemenetre egy növekvő frekvenciájú négyszögjelet vezérlünk ki. A szelepfeszültségre a gázturbina által adott válasz TPR értékek rögzítésre kerültek, és ezen adatokból lett meghatározva a rendszerünk átviteli függvénye. Három mérést végeztünk, az eredmények megfelelőségének biztosítása érdekében. A turbina utáni torlóponyi hőmérséklet mért értékei jelentős szórást mutattak, emiatt a paraméterek felhasználhatósága érdekében a késleltetés mentes tízes periódusú mozgóátlaguk került felhasználásra a TPR meghatározásakor. Az első mérés 17V-os közép feszültség mellett lett elvégezve 1,5V-os amplitúdóval. A mérés után a hajtómű leállítására volt szükség egy apróbb műszaki hiba miatt, lecsúszott egy a szabályozáshoz szükséges nyomásmérő tömlő, majd a helyreállítás megtörténte után módosításra került a szelepfeszültség amplitúdója, változatlan 17V-os közép feszültség mellett 1,5V-ról 1,75V-ra lett emelve. A harmadik mérésnél sem a közép feszültségen, sem az amplitúdón nem történt változtatás, a mérés eredményét a 12. ábra mutatja, melyen látható, hogy mind a bemenet, mind a kimenet normalásra került, ugyanis a szabályozórendszer számára a differencia TPR értéke szükséges. A TPR középértékei a három mérésnél sorrendben 5.0296, 4.8678, 4.8542, az eltéréseket a gázturbina melegegedése okozta. Figyelembe véve, hogy a harmadik mérés elvégzése során a TKT-1 szerkezeti egységei közelítőleg már átmelegedtek, így a harmadik mérés eredményei, illetve egyéb számításai tekinthetőek a legpontosabbnak, ezért a továbbiakban az ehhez tartozó diagramok kerülnek feltüntetésre.



12. ábra A harmadik mérés bemenetének (lent) és kimenetének (fent) normáltjai

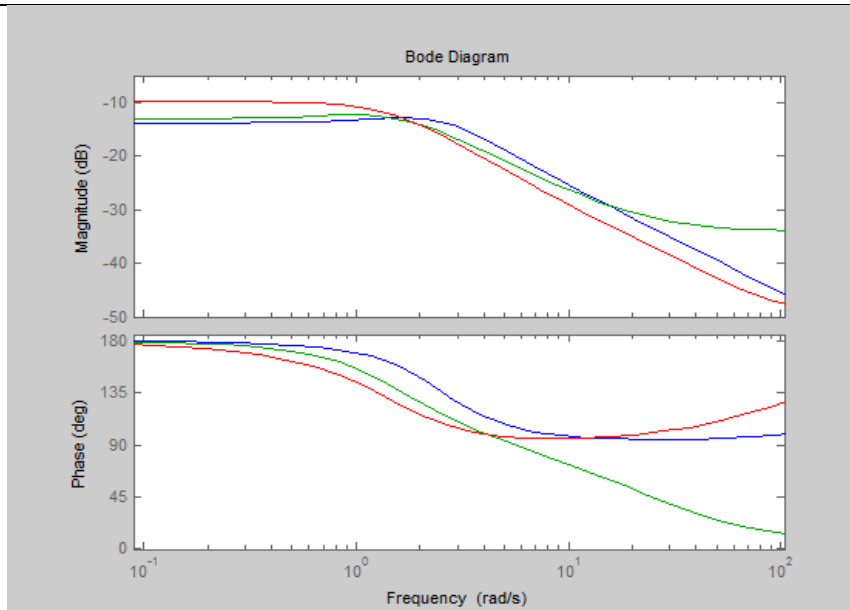
A mérések elvégzése után MATLAB környezetben található output error függvény segítségével meghatározásra kerültek az átviteli függvény közelítései. A kapott közelítő függvényeket összehasonlítva a rendszer mért válaszával kielégítő pontosságot kapunk, ezt mutatja a 13. ábra.



13. ábra A harmadik mérés (szürke) és közelítő függvénye (kék)

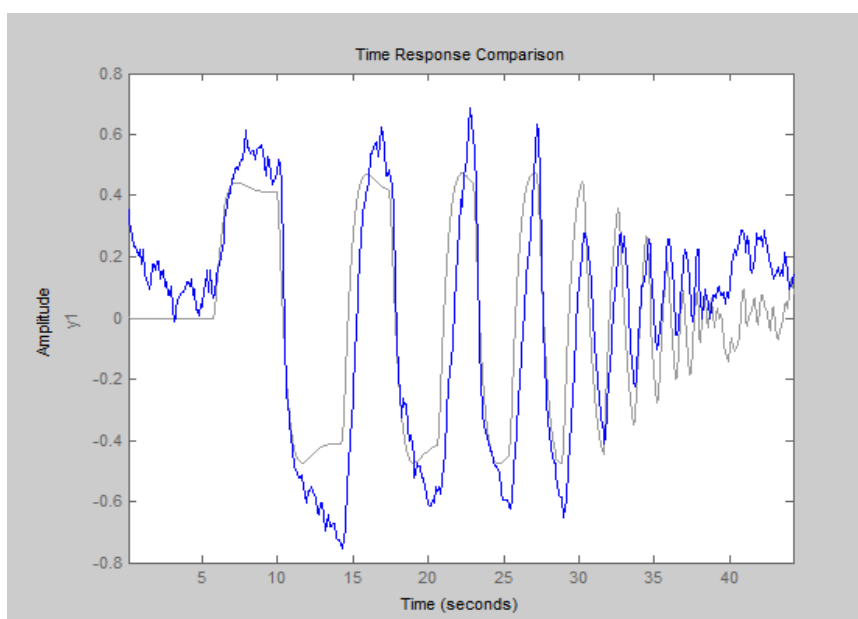
Az közelítések pontossága az output error becslést követően rendre 78,14%, 69,93% és 60,17% volt. Az így megállapított függvények diszkrét idejű függvények voltak, ezek Tustin módszerrel átkonvertálásra kerültek folytonos idejű átviteli függvényekké. Az így kapott folytonos átviteli függvények összehasonlításra kerültek, Bode diagramjaikat egy közös koordináta-rendszerben a 14. ábra ábrázolja.





14. ábra A közelítő átviteli függvények Bode diagramjai [1]

Látható, hogy a három méréshez tartozó átviteli függvények Bode diagramjai között a 10 Hz alatti tartományban nem mutatkozik jelentős eltérés, ebben az intervallumban a maximális különbség sem éri el a 4 dB-t. A 10 Hz feletti tartományt a gyakorlatban nem hasznosítjuk, ugyanis ez azt jelenteni, hogy a hajtómű vezérlőkarjának pozícióját másodpercenként tízszer változtatnánk meg, ami egy hajtómű üzemeltetésekor nem fordul elő. Azonban a rendszert legjobban jellemző átviteli függvényének meghatározása egy igen körültekintő eljárást igényelt. Több különböző módon kerültek meghatározásra átviteli függvények, melyek a hajtómű működését szimulálták, ezek alapos vizsgálatával a biztonság felé tévedve a rendszert jellemző átviteli függvénynek a harmadik mérés során adódó közelítő függvény lett felvéve. Az átviteli függvény válaszreakciója meg lett vizsgálva az adott méréshez tartozó bemenetek esetén, a harmadik mérésnél az összehasonlítást a 15. ábra mutatja.



15. ábra A harmadik mérés és a végleges átviteli függvény kimenetének összehasonlítása

A sugárhajtóművet modellező átviteli függvény válaszreakciója és a mért kimenet közötti illeszkedések rendre 53,7%-ra, 58,19%-ra és 54,45%-ra adódtak. A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű diszkrét átviteli függvényét a következő képlet írja le:

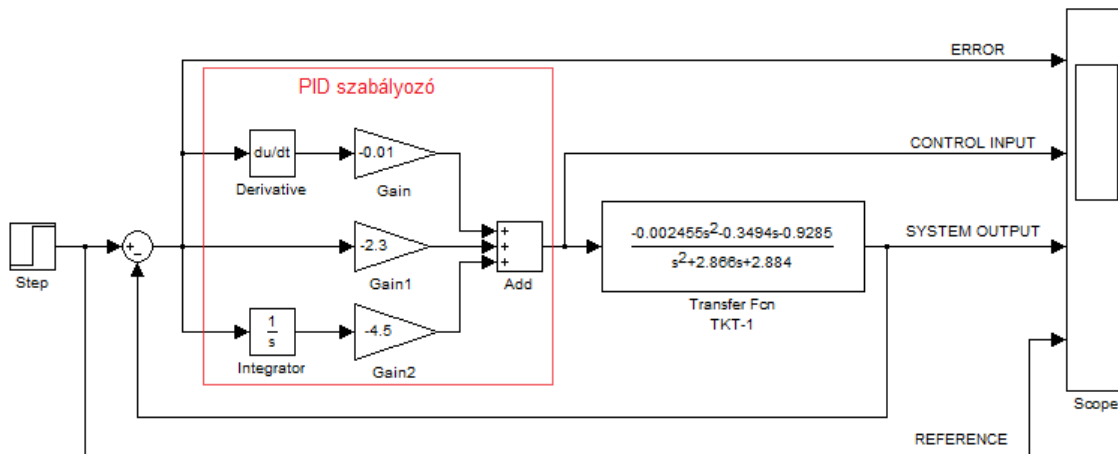
$$G(z) = \frac{-0,011934 \cdot z^2 + 0,0002328 \cdot z + 0,01103}{z^2 - 1,726 \cdot z + 0,7509} \quad (6)$$

A rendszer folytonos átviteli függvénye a Tustin módszerrel történő konverzió után:

$$G(s) = \frac{-0,002455 \cdot s^2 - 0,3494 \cdot s - 0,9285}{s^2 + 2,886 \cdot s + 2,884} \quad (7)$$

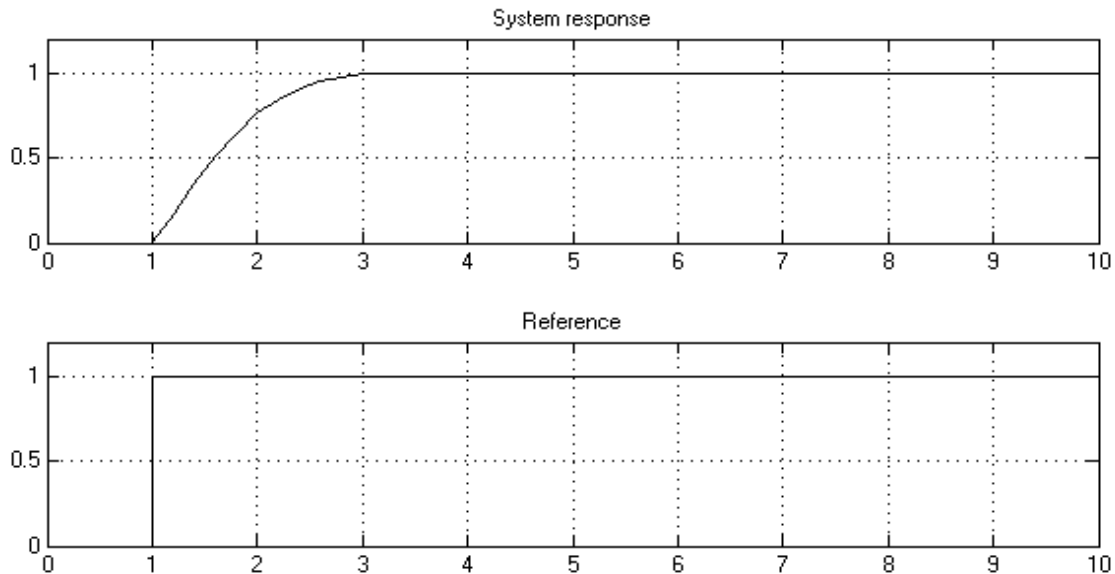
Ezzel tehát a TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű átviteli függvényének meghatározása megtörtént.

A következő lépés a rendszer elkészítéséhez a PID szabályozó megtervezése volt. A tervezés kivitelezése Simulink környezetében történt. A Simulink segítségével létrehozásra került a következő blokkvázlat, melyet a 16. ábra mutat be.



16. ábra A tervezett szabályozórendszer Simulink blokkvázlata [1]

Első közelítésben a PID szabályozó a Simulinkbe beépített automatikus tervező segítségével került meghatározásra, azonban a kapott szabályozó nem felelt meg a gázturbina által támasztott követelményeknek, mert jelentős túllendüléssel rendelkezett volna az így kapott szabályozó. A szabályozó beállási idejének csökkentéséhez és túllendülésének megszüntetéséhez az egyes alaptagok hangolása már a 16. ábra szerinti blokkvázlat alapján történt. A tervezett PID típusú szabályozó egy arányos, egy integráló és egy deriváló tag párhuzamos kapcsolásával került létrehozásra a hangolás megkönnyítése érdekében. A szabályozó elkészítésekor tekintettel kellett lenni arra, hogy a kivezérelt jelnek (az ábra jelölése szerint CONTROL INPUT) korlátosnak kell lennie, ugyanis a beavatkozáskor nem vezérelhető ki tetszőleges feszültségérték. A tervezett PID szabályozó nem rendelkezik túllendüléssel, beállási ideje 1.61 másodperc. A kimenet változását az idő függvényében a 17. ábra mutatja.



17. ábra A szabályozó kimenetének változása (fent) a bemenet (lent) függvényében [1]

A 8. ábra által mutatott szabályozás megvalósításához tehát rendelkezésre áll a referencia TPR, az átviteli függvény és a PID szabályozó is. A hajtómű vezérlése az alábbi folyamat eredményeképpen jön létre:

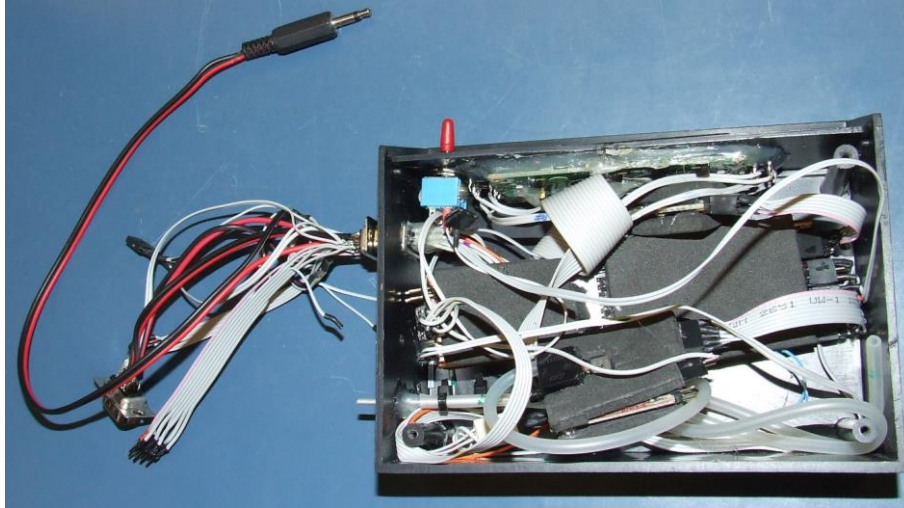
- adott HVK és GVK pozíciók esetén meghatározásra kerül a TPR referenciaértéke
- a mérőrendszer által mért adatokból meghatározásra kerül a TPR aktuális értéke
- az aktuális és a referencia TPR különbségéből adódik a differencia TPR értéke
- a PID szabályozó a differencia TPR-nak megfelelő szelepfeszültség jelet generál
- a szelepfeszültség változása miatt módosul a betáplált tüzelőanyag mennyisége
- a tüzelőanyag mennyiségének változására módosul a hajtómű üzemállapota
- az üzemállapot változása a TPR aktuális értékének változását okozza

A szabályozó a fenti ciklus ismétlésével valósítja meg a hajtómű vezérlését.

## ÖSSZEĞZÉS

A tervezett ECU V3.2 (18. ábra) FADEC rendszerű szabályozórendszer hardveres és szoftveres szempontból is készen áll a tesztelésre. Ennek során szükséges lesz megvizsgálni, hogy a szabályozó képes-e tartani a beállított referenciaértéket minden egyes üzemmód esetén, továbbá vizsgálni kell majd a beállási időt is, különös tekintettel arra, hogy a hajtómű előrelátható viselkedése az alacsony és a magas fordulatszámokon valószínűleg különbözni fog az eddigi tapasztalatok alapján a tüzelőanyag-rendszer kialakítása miatt. A dinamikus viselkedést mind a HVK, mind a GSF változtatásával meg kell vizsgálni, így teljes képet kaphatunk a kereszt regressziós jellegfelület által meghatározott referencia pontosságáról, illetve arról, hogy a szabályozás túllendülés nélkül megy végbe. A mérések során tapasztalható volt, hogy a GSF zárásakor a hirtelen és azonnali  $p_4^*$  változás miatt az EPR érzékenyen reagál, míg a TPR esetében a változás csekély, ugyanis a gázhő csak kismértékben nő meg és a hőmérsékletviszonynak is csak a gyöke szerepel a TPR összefüggésében (4. egyenlet), illetve a centrifugális kompresszor

karakterisztikájából adódóan a létrejövő nyomásviszony-változás is csekély mértékű. Elmondható tehát, hogy a TPR alapú szabályozásnál a HVK változására lesz érzékenyebb a rendszer, ellentétben az EPR-ral, ahol a GSF-re érzékenyebb. A statikus és a dinamikus viselkedés vizsgálata után szükséges vizsgálni, hogy a TPR alapon működő FADEC rendszer milyen mértékben lesz képes a tolóerő konstans étéken való megtartására, ugyanis a szabályozórendszernek ez az egyik legfontosabb minőségi tulajdonsága. A teljes körű vizsgálathoz hozzátartozik, hogy össze kell hasonlítani az EPR szerinti szabályozással, hogy pontos képet lehessen alkotni a tolóerő állandóságának mértékéről.



18. ábra Az ECU V3.2 belső kialakítása

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] LEPOSA Norbert Krisztián TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű szabályozása TPR alapján, Szakdolgozat, BME Vasúti járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, Budapest, 2013.
- [2] VK-1A sugárhajtómű műszaki leírása: re/183. Honvédelmi Minisztérium, Budapest, 1960.
- [3] JACKSON, Paul Jane's all the world's aircraft, 2010-2011. Jane's Information Group, Couldson, 2010.
- [4] CFM56-7B Engine systems, CFMI, 2000.
- [5] dr. SÁNTA Imre Repülőgép hajtóművek elmélete II. Előadásvázlat, BME, Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2010.
- [6] Arthur L. ROWE, Nikolaus KURZ Control System for a Ducted Fan Gas Turbine Engine, United Kingdom, 1997. október 30.
- [7] HORVÁTH Ádám Teljes hatáskörű digitális elektronikus szabályozórendszer tervezése kisméretű sugárhajtóműhöz. Diplomaterv, BME Repülőgépek és Hajók Tanszék, Budapest, 2013.
- [8] BENEDA Károly Tamás Épülő gázturbinás sugárhajtómű üzemi jellemzőinek vizsgálata matematikai modell segítségével, Diplomaterv, BME Repülőgépek és Hajók Tanszék, Budapest, 2006.
- [9] A TKT-1 kísérleti gázturbinás sugárhajtómű üzemeltetési kézikönyve. BME Repülőgépek és Hajók Tanszék, Budapest, 2013.