

Fékpadi mérőrendszer fejlesztése egyhengeres Formula Student belsőégésű motorhoz

Development of test-bench measuring system for one-cylinder Formula Student powertrain

Kiss Bátor Gábor¹ - Konstruktőr, Tóth Máté² - Tanszéki mérnök

¹Széchenyi István Egyetem, SZEngine, Hallgatói Motorfejlesztő KHE. 9026 Győr, Egyetem tér 1.
tel.: +36 70 297 8383, e-mail: bator.kiss@szengine.hu

²Széchenyi István Egyetem, Járműhajtás Technológia Tanszék, 9026 Győr, Egyetem tér 1. tel.: +36 96 613 76,
fax: +36 96 613677, e-mail: toth.mate@ga.sze.hu, <https://jhtt.sze.hu/>

Abstract

The current document describes the test-bench measurement system used by the SZEngine Formula Student Engine Development Team. It investigates the operation and complexity of the test-bench and details the specific measurement softwares which used. Investigation concludes the sensors and actuators which were used for experiments in high details. It describes their calibration and measurement location in the software, as well as the communication between systems. In this document test-bench environment and the corresponding measurement systems summerised as a technical report, while also concluding the optimisation process of the test-bench.

Keywords: Formula Student, SZEngine, Test-bench, ECU, Measurement system

Kivonat

A jelenlegi dokumentum bemutatja a SZEngine Hallgatói Motorfejlesztő csapat motorfékpadon használt mérőrendszerét. Ismerteti a fékpad működését, komplexitását, részletezi a konkrét mérőszoftvereket működését. Kitér a használt szenzorokra és aktuátorokra, működésükre és elhelyezésükre. Bemutatja ezek kalibrációját és mérési helyét az adott szoftverben, valamint kitér a rendszerek közötti kommunikációra is. Ezen tartalmakat összefoglalja a kiinduló állapotban, majd a fejlesztést követő optimalizált rendszert részletezi.

Kulcsszavak: Formula Student, SZEngine, Fékpad, Motorvezérlő, Méréstechnika

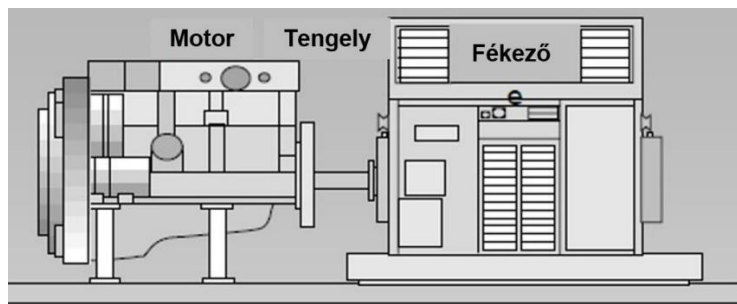
1. BEVEZETÉS

A SZEngine Motorfejlesztő Hallgatói csapat a Formula Student versenysorozatra fejleszt belsőégésű motort. Az elmúlt évekhez képest a nagyobb teljesítmény és hatásfok elérése érdekében egy turbófeltöltővel ellátott motor kerül fejlesztésre, ami a Formula Student Future versenysorozat, valamint a károsanyagkibocsátás csökkentés érdekében szintetikus tüzelőanyaggal fog működni. A fejlesztések megkönnyítése érdekében elengedhetetlenné vált egy még inkább kiterjesztett mérőrendszer kialakítása a csapat saját tervezésű motorfékpadján.

2. MOTORVIZSGÁLÓ PRÓBAPAD FELADATA, MŰKÖDÉSE

2.1. Általános jellemzők

A csapat által használt fékpad egy direkt fékpad, ami azt jelenti, hogy a fékgép közvetlenül kihajtás tengelyre kapcsolódik, ebből következően a belsőégésű motorok közvetlen mérésére alkalmas egy adott áttételen keresztül. Meleg- és hidegtesztelésre is egyaránt alkalmas a SZEngine által biztosított motorvizsgáló tesztpad. Ezen cikkben azonban melegtesztelési képességeinek kihasználására kerül sor, amely vizsgálat célja a belsőégésű motor teljesítményének- és nyomatékának vizsgálata, tüzelőanyag befecskendezés és adott gyújtási paraméterek mellett. A belsőégésű motor terhelése a jelen kutatásban alkalmazott aszinkron gép segítségével, illetve a fojtószelep állásával kerül meghatározásra szívó motor esetén. Feltöltött motor vizsgálata során, a terhelés szabályozása a feltöltési nyomás segítségével történik.



1. ábra: Egy általános fékgép és egy belsőégésű motor összeköttetése [1]

2.2. Aszinkron gép

A motorfékpad és motor ellenállás szorosan összefügg a vizsgálatok és tesztek során, amelyek, kapcsolata nélkülözhetetlen a sikeres tesztek és mérések kivitelezéséhez. Ebből következik, hogy elengedhetetlen egy adott fékgép használata, amely a belsőégésű motor legnagyobb teljesítményénél is képes elegendő ellenállást kifejteni. Az aszinkron gép, továbbiakban fékmotor, kiválasztása a Siemens 1PH7186-2MF03-0CJ3 típusra esett, ami 94 kW teljesítményt képes szolgáltatni [2].

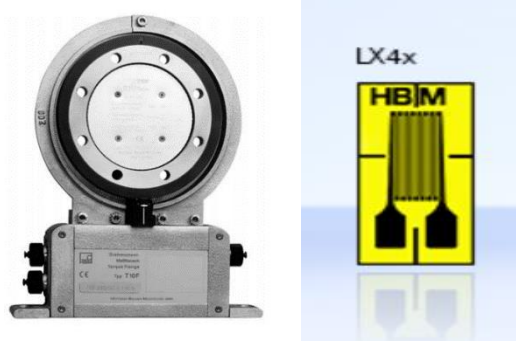
2.3. Frekvenciaváltó

A frekvenciaváltó azért fontos, mert ezen keresztül történik szoftveresen a fékmotor vezérlése. Ezen kutatásban egy ABB ACS880 típusú frekvenciaváltót került alkalmazásra [3]. A frekvenciaváltónak egy analóg 0-10 V feszültséget kerül szolgáltatásra és az alábbi jelből a fékmotor sebességének, illetve forgásirányának szabályozására kerül sor. Az analóg feszültség jellemzően a kívánt fordulatszámot reprezentálja.

3. MÉRŐRENDSZER ISMERTETÉSE

3.1. Nyomatékmérés

nyomatékmérésre egy HBM T10F/FS mérőtárcsa [4] kerül alkalmazásra, amely a mért nyomatékból analitikus számítás útján, teljesítmény értékét is meghatározza. A mérőtárcsa a fékmotort és a belsőégésű motort összekötő tengelyen helyezkedik el. Két részből áll, egy állórészből és egy forgórészből. A forgórészben nyúlásmérő bélyegek helyezkednek el és ezek egy jelet közvetítenek az állórésznek. Az állórészből már feszültségértékek érkeznek a felhasználó számára, amit egy analitikus számítással át lehet alakítani mért nyomatékká. A SZEngine által használt nyomatékmérő 500 Nm maximum nyomatékig mér. A nyomatékmérő által mért értékeket a fékmotor vezérlő programjában kapjuk meg, ám az adatok rögzítését CAN hálózaton keresztül a motorvezérlő végzi.



2. ábra: Az ábra bal oldalán egy HBM T10F/FS nyomatékmérő állórésze és a hozzá tartozó forgórész látható, a jobb oldalon pedig a forgórészben elhelyezett nyúlásmérőbélyeg ábrája [4-5].

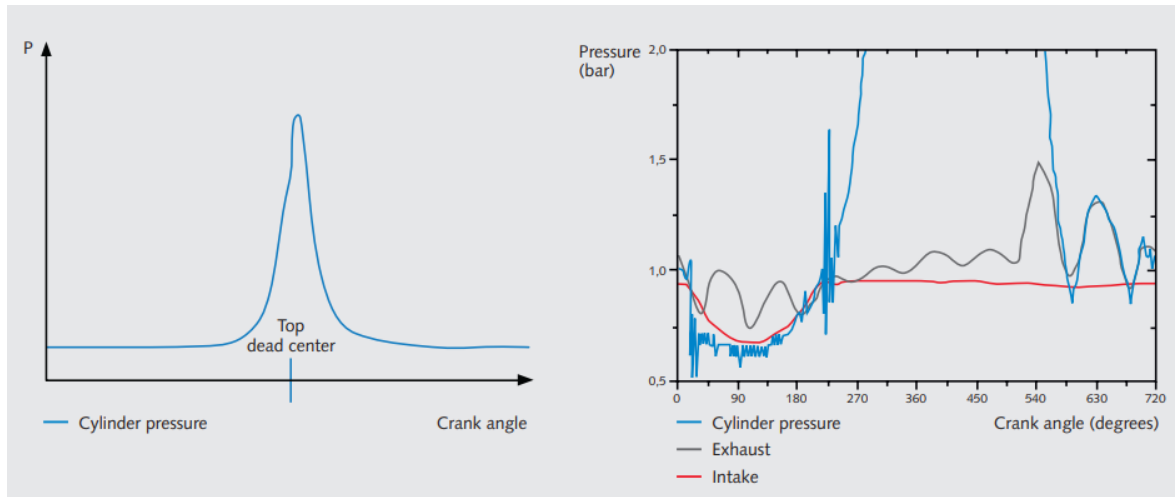
3.2. Motorvezérlő

Jelen kutatásban a MaxxECU PRO [6] motorvezérlő kerül bemutatásra. Számos, a vizsgálatokhoz fontos funkcióval rendelkezik, mint például az elektromos gázpedál kezelése, rajtprogram és a turbónyomás szabályozása. Hasznos funkciók közé tartozik még az USB és a Bluetooth kapcsolat és a belső adat rögzítés 22 analóg bemenettel és 10 digitális bemenettel rendelkezik, ami tökéletesen elég a csapat motoros szenzorhálózatának. A legfontosabb funkció a fékpad számára a Dual CAN bus [7], ami azt jelenti, hogy két különálló CAN busz esetén, ha az egyik busz esetleg meghibásodik, a szekunder busz továbbra is képes megfelelően működni. Ez azt jelenti, hogy magasabb a redundancia és a megbízhatóság szintje, ami kiemelten fontos a biztonság szempontjából. A

Dual CAN bus funkció lehetőség biztosít a motorvezérlő által olvasott adatok más mérő programból való rögzítésére, valamint az automata tesztek és a biztonsági szabályozások kivitelezésére.

3.3. Hengernyomás mérőrendszer

A hengernyomás, valamint a kipufogó- és szívócső nyomás piezoelektromos szenzorok segítségével kerül vizsgálatra. A szenzorok által érzékelt jelet a Kistler KiBox To Go [8] jelfeldolgozó és erősítő egység alakítja a kívánt formába, amit az egységhez tartozó Kibox Cockpit nevű szoftveren keresztül lehet szemléltetni és mérni. A hengernyomás vizsgálatát a Kistler 6056A [9] mérőkristály végzi. A program a mért hengernyomásból és a motor paramétereiből meg tudja állapítani az égés tulajdonságait, ezen belül azt, hogy a tüzelőanyag 10,50 és 90 százaléka mikor égett el. Az előbbieken említett számok azért fontosok, mert ezek alapján lehet meghatározni az égés időtartamát. 10 % elégett tüzelőanyagnál mondhatjuk azt, hogy az égés kezdete, mivel itt éri a lángfront azt a terjedelmet, ami után már gyorsan terjed. 50% az elégett tüzelőanyag fele, ha ezt az előgyújtással jó helyre időzítjük, hatásfokot tudunk növelni. 90%-nál már az égés nem szolgáltat kellő hasznos energiát, lassan vége az égésnek, hűl ki a lángfront. Ezen kívül a program képes detektálni a kopogásos égést is, ami az applikáció szempontjából nagyon fontos, hiszen ez a jelenség hosszútávon károsítja a belső alkatrészeket. A kipufogó nyomás mérésére azért van szükség, hogy a megfelelő kipufogórendszert lehessen megtervezni, ehhez elengedhetetlen a nyomás ciklusonkénti mintavételezése. A szívórendszerben fellépő nyomásértékek mérésével ellenőrizni lehet a rendszer megfelelő működését, valamint konklúziót lehet levonni, hogy melyik ponton lehet javítani a rendszeren.



3. ábra: A kép bal oldalán hengernyomás diagram, a jobb oldalán pedig az előbbi a kipufogó- és szívócsőnyomással kibővített változata [10]

3.4. Fékpad vezérlő

A fékpad vezérlése az NI CompactRIO 9036 [11], NI Linux Real -Time operációs rendszerrel rendelkező ipari számítógépen keresztül történik, ami LAN hálózaton keresztül van csatlakoztatva az asztali számítógéphez. Ennek fontos tulajdonsága, hogy modulárisan bővíthető, amely az egyedi igények miatt fontos. A CompactRIO-ba különböző bővítőkártyák elhelyezésére van lehetőség, amik külön-külön, más-más funkciót látnak el. Az NI termékeihez elérhető egy egyedi programtervező program, a LabVIEW [12], amely egy grafikus programozást tesz lehetővé. Ennek előnye, hogy egy sokkal átláthatóbb és jobban felépíthetőbb grafikus, ábrákkal ábrázolt programot lehet létrehozni benne, mint egy szekvenciális programozással. Ezen kívül létre lehet hozni benne automatizált mérő és szabályzó funkciókat is, amik elősegítik a pontos átlátható méréseket, valamint a fékmotor szabályzását és a vészfunkciók biztonságos integrálását a rendszerbe. A LabVIEW program a frekvenciaváltó segítségével szabályozza a fékmotort, ahogy a fentiekben már említésre került.

3.5. Használt szenzorok

A motor működéséhez szükséges szenzoroknál, amit a motorvezérlő olvas és autóban is alkalmazásban vannak a fő szempont a könnyű elhelyezés és a minél kisebb súly. Itt kifejezetten motorsportra kialakított szenzorok kerültek használatba. A csak fékpadon használt szenzorok, amiket a CompactRIO olvas, ipari alkalmazású szenzorok, ahol a fő szempont a pontos mérés, itt tehát az elhelyezés, a szenzorok mérete nem számít.

1. táblázat: A használt szenzorok csoportosítása működés, mért adat szerint mértékegységgel

Szenzor típusa	Működési elv	Mért adat	Mértékegység
NI CompactRIO által olvasott szenzorok			
HBM T10F	nyúlásmérő bélyeg	nyomaték	Nm
Frekvenciaváltó	számolt	fordulatszám	RPM
PT100	ellenállás változás	terem hőmérséklet	°C
Motorvezérlő által olvasott szenzorok			
Bosch PSTF-1	ellenállás változás	olajhőmérséklet	°C
Bosch PSTF-1	ellenállás változás	olajnyomás	kPa
Bosch PSTF-1	ellenállás változás	üzemanyag hőmérséklet	°C
Bosch PSTF-1	ellenállás változás	üzemanyag nyomás	kPa
Bosch 0 281 006 009	mágneses	főtengely jeladó	RPM
Bosch 0 986 280 453	mágneses	vezérműtengely jeladó	-
Bosch LSU 4.9	elektród, oxigénaktivitás különbség, feszültség változás	lambda	-
Bosch 0 280 130 092	ellenállás változás	beáramló levegő hőmérséklet	°C
Bosch 0280750148	potenciométer	fojtószelep állás	%
Bosch Motorsport	ellenállás változás	víz hőmérséklet	°C
K-típusú termoelem	feszültség változás	kipufogó hőmérséklet	°C
ECU-ba beépített szenzor	ellenállás változás	szívócső nyomás	kPa

4. A MÉRŐRENDSZER FEJLESZTÉSE

A fejlesztésnél a cél az volt, hogy egy olyan mérőrendszert legyen létrehozva, ami megkönnyíti a fékpadi méréseket majd az ez utáni használatot, minden adatot tartalmaz, ami hasznos ezen kutatási munka mérési adatainak meghatározása érdekében és a kiértékelést megkönnyítő formátumban kerül rögzítésre. Ehhez a következő irányelvek lettek meghatározva:

- Szenzorhálózat bővítése
- LabVIEW mérőszoftver létrehozása
- CAN hálózat fejlesztése

4.1. Szenzorhálózat bővítése

A meglévő szenzorok nem bizonyultak elegendőnek, így annak érdekében, hogy a fejlesztés a kívánt minőségben haladjon, új szenzorokat kellett használatba venni, amiket a 2. táblázat ismertet.

2. táblázat: A szenzorok csoportosítása, amikkel a fejlesztés érdekében bővítve lett a hálózat

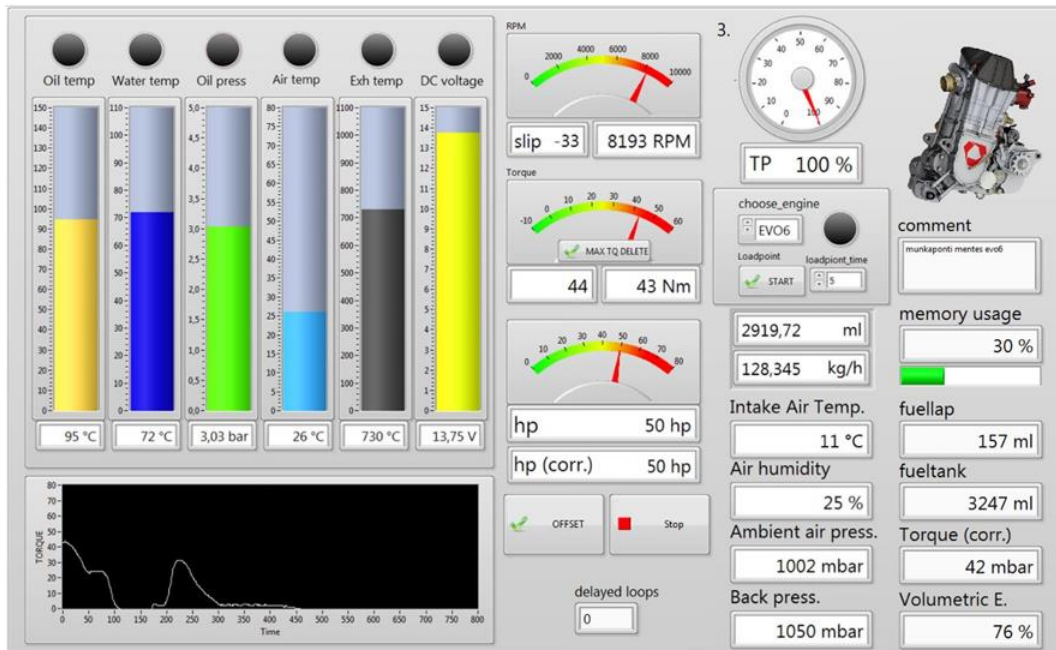
Sorszám	Szenzor típusa	Működési elv	Mért adat	Mértékegység
1	HIH-4000	kapacitív	páratartalom	%
2	AMS 5812	ellenállás változás	környezeti légnyomás	mbar
3	Kobold DON-210	ellenállás változás	üzemanyag átfolyás	l/h
4	MAF	ellenállás változás	beáramló levegő tömegáram	kg/h
5	HBM speed sensor	mágneses	fékmotor fordulatszám	RPM
6	Kistler 2614D	optikai érzékelés	főtengely pozíció	°CA

A táblázat alapján egyes és a kettős szenzor a fékpadi környezeti állapotok mérésére szolgál, ami sokat számít a nyomaték és a teljesítmény, valamint a korrekciós értékek pontos, későbbi megállapításánál. A hármas szenzor a motor tüzelőanyag fogyasztásának méréséhez szükséges, ami egy fontos adat, mivel a Formula Student [13] egyik versenyszámában azt mérik, hogy 22 km alatt melyik csapat abszolút

tüzelőanyag fogyasztása volt a legkevesebb. A Kobold Don-210 [14] az oválkereskes működése miatt pontosabb adatokat szolgáltat, mint a motorvezérlő által számolt közelítő érték. A négyes szenzor pedig a motor légnyelésének méréséért felel. Az ötös és hatos szenzor a villanymotor fordulatszámának és a főtengely pozíciójának pontos megállapításáért felel, amire azért van szükség, mert a hengernyomás méréséhez tizedpontosan meg kell állapítani a főtengely helyzetét, amire a kevés fogazású jeladótárcsa nem elég pontos.

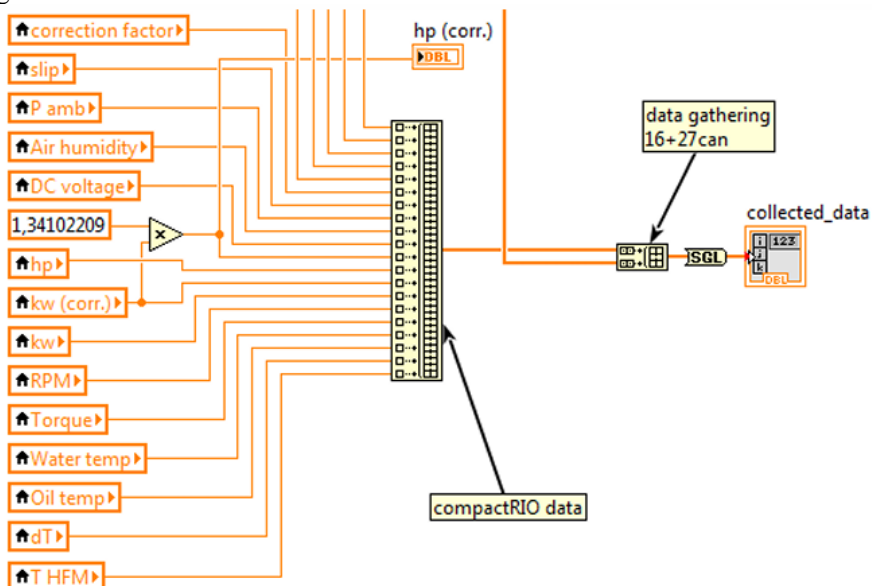
4.2. LabVIEW mérőprogram létrehozása

A mérőprogram létrehozása azért vált szükségessé, mert a motorvezérlő nem tud minden szenzort kezelni, és jelen kutatás adatanalízise szempontjából kedvezőtlen adatstruktúrában volt képes a mért adatok tárolására. Az elvárás tehát a programmal kapcsolatban az volt, hogy képes legyen a mérések értékeinek mentésére, a tesztek reprodukálhatóságára.



4. ábra: A mérőszoftver kezelőfelülete. [1]

A mérőszoftver valós időben méri a paramétereket és rögzíti a CompactRIO adattárolójára. A szoftver által mért adatokat két csoportra oszthatjuk. Az egyik a CompactRIO-ba közvetlenül csatlakoztatott szenzorok adatai, a másik pedig a MaxxECU motorvezérlőből a CAN hálózaton keresztül érkező adatok halmaza.



5. ábra: Kép a program egy részéről, ahol a beérkező CAN üzenetek feldolgozása zajlik. [1]

4.3. CAN hálózat

A MaxxECU és a NI által gyártott CAN bővítőkártya, az előzőekben említett CAN kommunikációval kommunikálnak. A kapcsolat egyirányú, tehát a motorvezérlő a kívánt adatokat küldi a programnak. Ezeket az adatokat két részre oszthatjuk aszerint, hogy mi az, amit csak mérni szeretnénk és mi az, amit a program biztonságtechnikai része. Az utóbbira azért van szükség, hogy a biztonságos járatás érdekében, egy esetleges probléma vagy hiba esetén, a program beavatkozik egy fordulatszám vagy befecskendezés és gyújtás elvételével. A Kibox és a mérőszoftver között is CAN kommunikáció van, így a hengernyomás indikálással mért adatokat, (a maximális hengernyomást, a kopogást és azt, hogy a tüzelőanyag 50%-a hány főtengelyfokkal a felső holtpont után égett el) is egy szoftverben lehet folyamatosan mintavételezni a többi adattal.

5. KONKLÚZIÓ ÉS DISZKUSSZIÓ

A mérőrendszer fejlesztésével a SZEngine csapat javított a mérések pontosságán és kiértékelhetőségén, valamint új szenzorok segítségével még több adat rögzítését tette lehetővé, amikkel a mérések és járatások közbeni stabilitás is nőtt. A CAN kommunikáció fejlesztése lehetővé tette a 3 rendszer (hengernyomás indikálás, motorvezérlő, fékpad vezérlő) összefűzését egy közös rendszerbe, amivel egy helyen lehet olvasni az összes rögzíteni kívánt adatot. Az összefűzött programban pedig olyan adatok számolására, majd mérésére került lehetőség, amiket két különböző szoftver adataiból lehet számolni. Ilyen például az effektív középnyomás, amit eddig mérés vagy járatás közben, elő adatként nem lehetett olvasni. Ezen kívül közelebb kerültünk az automata járatás és mérés lehetőségéhez, valamint a biztonságtechnikai szabályzás javításához. Így a fékpad olyan adathalmazzal tud szolgálni, amivel a csapat pontosabban tudja megtervezni a 2025-ös év fejlesztéseit.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002)

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Füleki Dániel, Szoftverfejlesztés motorvizsgáló próbapadhoz
- [2] Induction Motors 1PH7 SINAMICS S for production machines, datasheet, 05/2007
- [3] ACS880 Primary control program, datasheet, 2012
- [4] T10F, Torque Flange, Data sheet, B0121
- [5] Website: https://ipari-merestechika.hu/nyulasmero_belyegek_specialis_alkalmazasokra/
- [6] Website: <https://www.maxxecu.com/products/pro>
- [7] A Dual CAN busz előnyei és hátrányai a nagykereskedelmi BUS CAN táblagépben, 18/01/2024
- [8] Electronics & Software KiBox® To Go Measurement and Evaluation System for Combustion Analysis on Test Benches and in Vehicles, datasheet, Type 2893A
- [9] High Temperature Pressure Sensor for Cylinder Pressure Measurement in Glow Plug Adapter, Type 6056A
- [10] Innovative measurement technology for engine development, Application brochure 960-801e-08.17
- [11] cRIO-9036 Specifications, 14/06/2024
- [12] LabVIEW User Manual, 22/01/2025
- [13] Formula Student Rules 2025, Version: 1.0, Rev-dda49d6
- [14] Operating Instructions for Oval Gear Flow Meter Model: DON-..., datasheet