

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



MISKOLCI
E G Y E T E M
UNIVERSITY OF MISKOLC

**SZABÁLYOZÁSI PARAMÉTEREK
ÁTHELYEZHETŐSÉGÉNEK KUTATÁSA EMPIRIKUS ÉS
DIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREKKEL**

PHD ÉRTEKEZÉS

KÉSZÍTETTE:

Móré Ádám

Okleveles villamosmérnök

HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
TERMELÉSINFORMATIKA TÉMATERÜLET
MÉRÉS- ÉS IRÁNYÍTÁSTECHNIKAI INFORMÁCIÓS RENDSZEREK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

Prof. Dr. Kovács László József
egyetemi tanár

TUDOMÁNYOS VEZETŐK:

Dr. Trohák Attila
egyetemi docens

Dr. Rabab Benotsmane
egyetemi docens

Miskolc, 2026.

EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott Móre Ádám büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a SZABÁLYOZÁSI PARAMÉTEREK ÁTHELYEZHETŐSÉGÉNEK KUTATÁSA EMPIRIKUS ÉS DIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREKKEL című, a Miskolci Egyetemen működő Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskolába beadott PhD értekezés önálló munkám eredménye, az irodalmi hivatkozások egyértelműek és teljesek.

Kelt: Miskolc, 2026. április 6.

doktorjelölt

TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

Móré Ádám „Szabályozási paraméterek áthelyezhetőségének kutatása empirikus és diagnosztikai módszerekkel” című PhD-értekezéséhez

Móré Ádám kutatása az ipari automatizálás területén egy releváns és kihívást jelentő problémával foglalkozik, nevezetesen a vezérlőrendszerek viselkedésével és teljesítményével a PLC architektúra migrációja során.

A disszertáció strukturált és szigorú megközelítést mutat be mind az elemzés, mind a kísérletezés terén. Ádám egy átfogó diagnosztikai módszertant dolgozott ki a PI szabályozó paramétereinek migrálhatóságának értékelésére, amelyet szisztematikus kísérleti validáció támogat. A javasolt keretrendszer integrálja a stabilitáselemzést, a dinamikus viselkedés jellemzését és a kvantitatív értékelést egy egységes döntési térben, ami egy összetett kompatibilitási index megfogalmazásához vezet.

A munka eredményei tudományosak és gyakorlatiak is. Akadémiai szempontból a disszertáció világos, reprodukálható és megalapozott módszertant kínál a szabályozási viselkedés elemzésére különböző architektúrák között. Ipari szempontból egy valós mérnöki kihívást céloz meg, gyakorlati eszközöket és betekintést kínálva, amelyek támogathatják a mérnököket a rendszer megbízhatóságának és a döntéshozatalnak a vezérlőmigrációs folyamatok során.

A kutatás során Ádám erős analitikai képességekről, függetlenségről és kitartásról tett tanúbizonyságot. Számos konferenciakiadványban és egy folyóiratcikkben publikálta kutatási eredményeit, tükrözve a munka minőségét és relevanciáját.

Összességében ez a disszertáció megfelel a PhD értekezésekkel szemben támasztott elvárásoknak az eredetiség, a technikai mélység és a gyakorlati jelentőség tekintetében. Jelentős hozzájárulást jelent a vezérlőrendszerek és az ipari automatizálás területének fejlődéséhez. A benyújtott értekezés a PhD fokozatszerzés követelményeinek megfelel, így témavezetőként a dolgozat nyilvános védelemre bocsátását támogatjuk.

Miskolc, 2026.04.12.

Dr. Trohák Attila

intézetigazgató, egyetemi docens

Dr. Rabab Benotsmane

egyetemi docens

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

Rövidítés	Jelentése
ADC	Analóg–digitális átalakító (Analog-to-Digital Converter)
ADRC	Aktív zavarcsillapítású szabályozás (Active Disturbance Rejection Control)
CPU	Központi feldolgozó egység (Central Processing Unit)
DA	Digitális–analóg átalakító (Digital-to-Analog Converter)
DTW	Dinamikus időtorzítás (Dynamic Time Warping)
FW	Firmware
GA	Genetikus algoritmus (Genetic Algorithm)
IAE	Integrált abszolút hiba (Integral of Absolute Error)
IEC	Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság (International Electrotechnical Commission)
IMC	Belső modell alapú szabályozás (Internal Model Control)
IQE	Integrált négyzetes hiba (Integral of Quadratic Error)
I/O	Be- és kimenet (Input/Output)
MAE	Átlagos abszolút hiba (Mean Absolute Error)
MCDM	Többkritériumos döntéstámogatás (Multi-Criteria Decision Making)
NN	Neurális hálózat (Neural Network)
PCA	Főkomponens-analízis (Principal Component Analysis)
PI	Arányos–integráló szabályozó (Proportional–Integral controller)
PID	Arányos–integráló–deriváló szabályozó (Proportional–Integral–Derivative controller)
PLC	Programozható logikai vezérlő (Programmable Logic Controller)
PRISMA	Szisztematikus áttekintések és meta-analízisek preferált jelentési elemei (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)
PSO	Részecskeparaj-optimalizáció (Particle Swarm Optimization)
QFT	Kvantitatív visszacsatolás-elmélet (Quantitative Feedback Theory)

RC	Ellenállás–kondenzátor tag (Resistor–Capacitor element)
SLR	Szisztematikus irodalomkutatás (Systematic Literature Review)
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS többkritériumos döntési módszer)
ZN	Ziegler–Nichols (hangolási módszer)

Tartalomjegyzék

EREDETISÉGI NYILATKOZAT	I
TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS.....	II
RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	III
1. BEVEZETÉS.....	1
1.1. A TÉMA AKTUALITÁSA ÉS FONTOSSÁGA	1
1.2. MIÉRT NEM KEZELHETŐ KLASSZIKUSAN?	2
1.3. A DISSZERTÁCIÓ CÉLJA.....	3
1.4. AZ ÉRTEKEZÉS STRUKTÚRÁJA	4
2. IRODALMI HÁTTÉR ÉS A KUTATÁSI RÉSZ AZONOSÍTÁSA.....	5
2.1. SZABÁLYOZÁSTECHNIKAI HÁTTÉR	5
2.1.1. ALAPVETŐ SZABÁLYOZÁSTECHNIKAI FOGALMAK	5
2.1.2. PI ÉS PID SZABÁLYOZÓK IPARI ALKALMAZÁSA	7
2.1.3. A PI SZABÁLYOZÓ VÁLASZTÁSÁNAK INDOKLÁSA.....	8
2.2. KUTATÁSI KÉRDÉSEK MEGFOGALMAZÁSA.....	10
2.3. PI ÉS PID SZABÁLYOZÓK TUDOMÁNYOS ÉS IPARI RELEVÁNCIÁJA	11
2.4. A PARAMÉTERMIGRÁCIÓ, MINT TUDOMÁNYOS PROBLÉMA	13
2.4.1. A PLC MIGRÁCIÓ SZÜKSÉGESSÉGE ÉS IPARI REALITÁSA	13
2.4.2. PLC–PLC PROGRAMMIGRÁCIÓ ÉS SZABVÁNYALAPÚ ÁTALAKÍTÁS	14
2.4.3. PARAMÉTER-ÚJRAFELHASZNÁLÁS ÉS ANNAK KORLÁTAI	15
2.4.4. VÉGREHAJTÁSI CIKLUSIDŐ ÉS DINAMIKAI HATÁSOK	17
2.4.5. VALIDÁCIÓS MEGKÖZELÍTÉSEK MIGRÁCIÓ UTÁN.....	17
2.4.6. ÖSSZEGZŐ MEGÁLLAPÍTÁS	18
2.5. KLASSZIKUS ÉS ADAPTÍV SZABÁLYOZÓHANGOLÁSI MÓDSZEREK KORLÁTAI.....	19
2.5.1. KLASSZIKUS HANGOLÁSI MÓDSZEREK ÉRZÉKENYSÉGE.....	19
2.5.2. MODELLALAPÚ MEGKÖZELÍTÉSEK KORLÁTAI.....	20
2.5.3. ADAPTÍV ÉS ÖNHANGOLÓ ELJÁRÁSOK	20
2.5.4. KRITIKAI SZINTÉZIS MIGRÁCIÓS KONTEXTUSBAN	21
2.6. A TUDOMÁNY JELENLEGI ÁLLÁSA	21
2.7. A KUTATÁSI RÉSZ EXPLICIT MEGFOGALMAZÁSA	22
2.8. A VISELKEDÉSALAPÚ (UJLENYOMAT) MEGKÖZELÍTÉS ELVI INDOKLÁSA.....	23
2.9. TÖBBMETRIÁS KIÉRTÉKELÉS ÉS TÖBBKRITÉRIUMOS DÖNTÉSTÁMOGATÁS INDOKLÁSA	24
2.9.1. KUTATÁSI HIPOTÉZISEK	26
3. KÍSÉRLETI KERETRENDSZER ÉS MÓDSZERTAN	27
3.1. A KUTATÁS MÓDSZERTANI KONCEPCIÓJA.....	27
3.2. ALKALMAZOTT HARDVERESZKÖZÖK (PLC, I/O, FOLYAMATMODELL)	27
3.2.1. PLC KONFIGURÁCIÓ	27
3.2.2. MÉRÉST VÉGZŐ ÉS REFERENCIAJELET ELŐÁLLÍTÓ HARDVEREK	29

3.3.	SZOFTVERKÖRNYEZET ÉS IMPLEMENTÁCIÓ	30
3.4.	KÍSÉRLETI ELRENDEZÉS ÉS IZOLÁLÁSI ELV	30
4.	EMPIRIKUS MIGRÁCIÓS ADATBÁZIS	32
4.1.	A REFERENCIAARCHITEKTÚRA (BASIC RENDSZER) DEFINIÁLÁSA	32
4.2.	A FOLYAMATMODELL MATEMATIKAI LEÍRÁSA	33
4.2.1.	A PI-SZABÁLYOZÓ MATEMATIKAI MODELLJE	33
4.2.2.	A PI-PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA	34
4.2.3.	MÓDSZERTANI SZEREP ÉS ÉRTELMEZÉS	34
4.3.	VIZSGÁLT ARCHITEKTÚRAVÁLTOZATOK ÉS JELÖLÉSI RENDSZER	34
4.3.1.	VIZSGÁLT ARCHITEKTÚRAKONFIGURÁCIÓK ÁTTEKINTÉSE	35
4.4.	EMPIRIKUS MÉRÉSI ELJÁRÁS ÉS ADATGYŰJTÉSI FOLYAMAT	36
4.4.1.	MÉRÉSI FORGATÓKÖNYV	36
4.4.2.	MINTAVÉTELEZÉS ÉS ADATGYŰJTÉS	37
4.4.3.	REPRODUKÁLHATÓSÁG ÉS KONTROLL	37
4.5.	KIÉRTÉKELÉSI METRIÁK ALKALMAZÁSA AZ EMPIRIKUS ADATBÁZISBAN	38
4.5.1.	KIÉRTÉKELÉSI ADATKÉSZLET ÉS IDŐTARTOMÁNY	38
4.5.2.	HIBAJEL ÉS ALAPJEL-ELTÉRÉS	38
4.5.3.	AMPLITÚDÓ- ÉS SZÉLSŐÉRTÉK-ALAPÚ METRIÁK	38
4.5.4.	IDŐALAPÚ DINAMIKAI MUTATÓK	39
4.5.5.	HIBA METRIÁK	39
4.5.6.	ALKALMAZÁSI ELVEK AZ EMPIRIKUS ADATBÁZISBAN	40
4.6.	EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA ÉRTÉKKÖVETŐ VIZSGÁLATOK ALAPJÁN	40
4.6.1.	SZINUSZOS BEMENETI JELLEL VÉGZETT VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI ..	40
4.6.2.	NÉGYSZÖGJELES BEMENETI JELLEL VÉGZETT VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI	44
4.6.3.	EMPIRIKUS MEGÁLLAPÍTÁS AZ ÉRTÉKKÖVETŐ VIZSGÁLATOK ALAPJÁN	48
4.6.4.	MIGRÁCIÓS KATEGÓRIÁK EMPIRIKUS AZONOSÍTÁSA	48
4.7.	AZ EMPIRIKUS ADATBÁZIS SZEREPE A VALIDÁLÁSÁBAN	50
4.7.1.	MIGRÁLHATÓ ARCHITEKTÚRÁK	50
4.7.2.	KORLÁTOZOTTAN MIGRÁLHATÓ ARCHITEKTÚRÁK (FINOMHANGOLÁST IGÉNYLŐ ESETEK)	50
4.7.3.	NEM MIGRÁLHATÓ ARCHITEKTÚRÁK	51
4.7.4.	HATÁRHELYZETEK ÉS ÁTMENETI ESETEK	51
4.7.5.	ÖSSZEGZŐ MEGÁLLAPÍTÁS	52
4.8.	ÖSSZEFOGLALÁS	52
4.9.	FEJEZETHEZ TARTOZÓ TÉZIS	53
5.	UJJLENYOMAT-ALAPÚ DIAGNOSZTIKAI KERETRENDSZER	54
5.1.	A MÓDSZER POZICIONÁLÁSA	54
5.2.	DIAGNOSZTIKAI PARADIGMA (WHITE-BOX / BLACK-BOX)	55
5.3.	A HÁROMLÉPCSŐS DIAGNOSZTIKAI PIPELINE	56

5.3.1.	P_{KRIT} STABILITÁSI VIZSGÁLAT – STRUKTURÁLIS MIGRÁCIÓS ELŐSZŰRÉS	57
5.3.2.	P-ONLY DIAGNOSZTIKA – HATÁRSTABIL VISELKEDÉSI UJJLENYOMAT..	59
5.3.3.	I-ONLY DIAGNOSZTIKA – AZ INTEGRÁLÓ ÁG FELHALMOZÁSI UJJLENYOMATA FIX K_I MELLETT.....	61
5.4.	A HÁROMLÉPCSŐS DIAGNOSZTIKAI PIPELINE EMPIRIKUS EREDMÉNYEI.....	63
5.4.1.	P_{KRIT} VIZSGÁLAT EREDMÉNYEI	64
5.4.2.	P-ONLY DIAGNOSZTIKA EREDMÉNYEI	65
5.4.3.	I-ONLY DIAGNOSZTIKA EMPIRIKUS EREDMÉNYEI	67
5.5.	A HÁROM DIAGNOSZTIKAI VIZSGÁLAT ÖSSZEGZŐ ÉRTELMEZÉSE.....	70
5.6.	A FEJEZETHEZ KAPCSOLÓDÓ TÉZISEK	71
6.	MIGRÁLHATÓSÁG KVANTITATÍV DÖNTÉSTÁMOGATÁSA.....	72
6.1.	A FEJEZET CÉLJA ÉS MOTIVÁCIÓJA.....	72
6.2.	DIAGNOSZTIKAI METRIÁK FORMÁLIS DEFINIÁLÁSA ÉS KIÉRTÉKELÉSI PROTOKOLLJA	72
6.2.1.	P-ONLY VIZSGÁLAT METRIÁI	73
6.2.2.	I-ONLY VIZSGÁLAT METRIÁI	74
6.3.	MIGRÁLHATÓSÁG KVANTITATÍV DÖNTÉSTÁMOGATÓ FORMALIZÁLÁSA	75
6.3.1.	A TÖBBKRITÉRIUMOS DÖNTÉSI MODELL (MCDM) MATEMATIKAI FELÉPÍTÉSE	75
6.3.2.	MIGRÁLHATÓSÁGI ZÓNAHATÁROK ADATVEZÉRELT MEGHATÁROZÁSA	76
6.3.3.	NUMERIKUS EREDMÉNYEK ÉS MIGRÁLHATÓSÁGI KATEGÓRIÁK ÉRTELMEZÉSE.....	78
6.4.	A MIGRÁLHATÓSÁG TOPSIS-ALAPÚ KVANTITATÍV ÉRTÉKELÉSE.....	80
6.4.1.	A TOPSIS DÖNTÉSI MÁTRIXÁNAK ELŐÁLLÍTÁSA ÉS A SÚLYOZOTT NORMALIZÁLT FORMA	80
6.4.2.	POZITÍV ÉS NEGATÍV IDEÁLIS MEGOLDÁS MEGHATÁROZÁSA	80
6.4.3.	EUKLIDESZI TÁVOLSÁGOK, RELATÍV KÖZELSÉG ÉS RANGSOROLÁSI MECHANIZMUS	81
6.4.4.	A TOPSIS-ALAPÚ MIGRÁLHATÓSÁGI RANGSOR ÉS ZÓNASTRUKTÚRA.	83
6.5.	A MIGRÁLHATÓSÁGI DÖNTÉSI MODELLEK ÖSSZEHAONLÍTÓ ELEMZÉSE ÉS VALIDÁLÁSA	84
6.6.	A FEJEZETHEZ TARTOZÓ TÉZISEK	86
7.	ÖSSZEFOGLALÁS	88
8.	SUMMARY	91
9.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	94
10.	NEW SCIENTIFIC RESULTS.....	97
11.	IRODALOMJEGYZÉK.....	100
	SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA	106

1. BEVEZETÉS

1.1. A téma aktualitása és fontossága

A programozható logikai vezérlők (PLC-k) az ipari automatizálás meghatározó elemei az 1960-as évek végétől kezdődően. Eredeti céljuk a relés vezérlések kiváltása volt, elsősorban a rendszerátalakítás egyszerűsítése, a hibakeresési idő csökkentése és az állásidők minimalizálása érdekében [1], [2], [3]. Az évtizedek során a PLC-k folyamatos technológiai fejlődésen mentek keresztül, és a 21. századra az ipari folyamatirányítás egyik alapvető vezérlőplatformjává váltak. Megbízhatóságuk és robusztus felépítésük következtében a PLC-alapú rendszerek jellemzően hosszú időtávon, akár több, mint egy évtizeden keresztül is változatlan konfigurációban üzemelnek [4], [5]. A PLC-eket már a korai alkalmazási szakaszban is használták szabályozástechnikai feladatokra, így a szabályozók ipari környezetben történő implementációja régóta bevett gyakorlatnak számít. A hosszú üzemidő azonban együtt jár azzal, hogy a vezérlőhardverek idővel elavulnak, illetve a gyártók egyes CPU-kat, be- és kimeneti modulokat vagy firmware-verziókat kivonnak a forgalomból. Ennek következtében a működő ipari rendszerek korszerűsítése vagy javítása során elkerülhetlenné válik a PLC-k és a kapcsolódó perifériák cseréje, akár meghibásodás, akár funkcióbővítés vagy gyártósori integráció miatt [6].

A migrálhatóság fogalma az informatikában és a rendszertervezésben általánosan azt a képességet jelenti, hogy egy alkalmazás, adatbázis, hálózat, virtuális gép vagy egyéb rendszerkomponens milyen mértékben helyezhető át egyik környezetből a másikba úgy, hogy közben a működés csak minimális mértékben változzon, és az átállás a lehető legkisebb fennakadással járjon. Jelen értekezés értelmezésében ez a fogalom ipari szabályozási környezetre szűkíthető, ahol a migrálhatóság annak kérdését jelenti, hogy egy meglévő PLC-architektúrán megfelelően működő PI szabályozó paraméterei mennyiben vihetők át egy új hardver- és szoftverkörnyezetre a szabályozási viselkedés lényeges megváltozása nélkül.

Az ipari gyakorlatban általánosan alkalmazott megoldás, hogy az eredeti vezérlőprogramot és a hozzá tartozó PI szabályozó paramétereket változtatás nélkül migrálják az új PLC-architektúrára. Ezt a megközelítést a PLC-gyártók fejlesztői környezetei is támogatják, lehetővé téve a programkód és a paraméterkészletek automatikus átvitelét. A feltételezés ilyenkor az, hogy a szabályozási viselkedés az új környezetben is változatlan marad, mivel a folyamat és a vezérlési logika nem módosul. A gyakorlati tapasztalatok azonban azt mutatják, hogy a paraméterek változatlan átvitele gyakran eltérő szabályozási viselkedést eredményez. Egyes esetekben a rendszer teljesítménye javul, más esetekben kisebb paramétermódosítással elfogadható működés érhető el, azonban nem ritkán olyan jelentős eltérések is megfigyelhetők, amelyek a szabályozási minőség romlásához, túllövésekhez, megnövekedett beállási időkhöz vagy instabilitáshoz vezetnek. Ezek a jelenségek különösen kritikusak lehetnek olyan ipari környezetben, ahol a szabályozási hibák biztonságkritikus állapotokat idézhetnek elő [7], [8].

A migrációs problémák kezelése utólagos újrangolással számos esetben jelentős kockázatot hordoz. A rendszer eredeti beüzemelése során a szabályozó hangolása gyakran

semleges vagy alacsony kockázatú körülmények között történt, míg egy működő gyártósor esetében a kísérletezés már komoly üzemeltetési, pénzügyi és környezeti következményekkel járhat. A hibás működés selejttermék-képződéshez, veszélyes technológiai állapotok kialakulásához, valamint megnövekedett állásidőhöz vezethet, amely nagyipari környezetben jelentős gazdasági veszteséget okozhat. Mindezek alapján indokolt egy olyan módszertan kidolgozása, amely képes előre jelezni a PI szabályozó paramétereinek migrálhatóságát PLC-architektúraváltás esetén, anélkül, hogy a valós folyamaton kockázatos kísérleteket kellene végezni [9].

1.2. Miért nem kezelhető klasszikusan?

A PLC-architektúraváltás során fellépő szabályozási problémák klasszikus szabályozástechnikai módszerekkel történő kezelése számos esetben korlátozott vagy nem megvalósítható. A szabályozástechnika hagyományos megközelítése a vizsgált rendszer matematikai modelljére épül, amely jellemzően az átviteli függvény meghatározásán keresztül írja le a folyamat dinamikai viselkedését. A modell ismeretében különböző paraméterhangolási és optimalizálási eljárások alkalmazhatók, beleértve az analitikus, numerikus és adaptív módszereket is. Az ipari gyakorlatban azonban a pontos modellalkotás már önmagában is jelentős kihívást jelent. A valós ipari folyamatok dinamikája gyakran nem ismert teljes mértékben, időben változó, illetve számos nemlinearitást és bizonytalanságot tartalmaz. A szabályozási kör további bonyolultságát az jelenti, hogy a PLC-alapú rendszerek digitális, diszkrét idejű működésűek, míg a vizsgált fizikai folyamatok jellemzően analóg természetűek. Az analóg–digitális és digitális–analóg átalakítás során fellépő kvantálási hibák, késleltetések és mintavételi bizonytalanságok a rendszer viselkedését módosítják, és olyan hatásokat vezetnek be, amelyek a modellben csak közelítő módon jeleníthetők meg. A szabályozási kör teljes átviteli függvényének felírása elméletileg az előrecsatolt rendszer és a visszacsatolás kapcsolatán keresztül történik, amely magában foglalja a döntési logikát, a beavatkozó elemet, a fizikai folyamatot és a mérőrendszert. Ezen elemek mindegyike saját dinamikával rendelkezik, továbbá az egyes komponenseket alkotó elektronikai áramkörök paraméterei is gyártási szórást, hőmérsékletfüggést és öregedési hatásokat mutatnak. Ennek következtében a teljes szabályozási kör pontos átviteli függvényének meghatározása a valós ipari környezetben gyakorlatilag nem lehetséges, legfeljebb közelítő modellek állíthatók fel, amelyekből megbízható paramétermigrációs következtetések nem vonhatók le [10], [11], [12].

A probléma tovább erősödik PLC-architektúraváltás esetén. Bár a gyártói adatlapok alapján egy új be- vagy kimeneti modul azonos felbontással és névleges működési paraméterekkel rendelkezhet, a tényleges hardveres megvalósítás eltérő analóg–digitális átalakítókat, jelfeldolgozási láncokat és belső időzítéseket alkalmazhat. Ezzel párhuzamosan az új modulok és CPU-k gyakran eltérő firmware-verziókat igényelnek, ami a vezérlőprogram végrehajtási környezetének megváltozását eredményezi. Mindezek hatására a szabályozási hurok dinamikája akkor is módosulhat, ha a vezérlőprogram és a PI szabályozó paraméterei formálisan változatlanok maradnak [13], [14].

Felmerülhet alternatív megoldásként az adaptív vagy automatikus hangolási eljárások alkalmazása, amelyek célja a szabályozó paramétereinek önálló beállítása a rendszer viselkedése alapján. Ezek a módszerek azonban PLC-k esetén szintén korlátokba ütköznek. Kis időállandójú rendszerek esetén a gyors dinamikák nem minden esetben becsülhetők megbízhatóan a PLC mintavételi és számítási korlátai miatt, míg nagy időállandójú folyamatoknál a szükséges megfigyelési idő és az adatok tárolása jelent problémát. Ennek következtében az adaptív módszerek alkalmazása gyakran bizonytalan eredményt ad, különösen olyan rendszerekben, ahol a folyamat dinamikája széles időskálán változik [15].

Összességében megállapítható, hogy a klasszikus modellalapú és adaptív szabályozástechnikai módszerek PLC-architektúraváltás esetén nem képesek megbízható módon előre jelezni a szabályozó paramétereinek változatlan átviteléből adódó következményeket. A bizonytalan működés pedig – a korábban ismertetett ipari környezetben – jelentős üzemeltetési, gazdasági és biztonsági kockázatot hordoz. Ez indokolja egy olyan modellfüggetlen, empirikus alapú vizsgálati módszer kidolgozását, amely a szabályozó és a PLC együttes viselkedését közvetlenül képes értékelni.

1.3. A disszertáció célja

Kutatásom célja a PI szabályozók paramétereinek migrálhatóságának vizsgálata PLC-architektúraváltás esetén, különös tekintettel arra az ipari gyakorlatban gyakran alkalmazott esetre, amikor a vezérlőprogram és a szabályozó paraméterei változatlan formában kerülnek átvitelre az új hardverkörnyezetbe. A kutatás során azt vizsgálom, hogy a PLC és a szabályozó együttes viselkedése milyen mértékben változik meg különböző hardver- és firmware-konfigurációk esetén, valamint azt, hogy ezek a változások milyen hatással vannak a szabályozási minőségre.

Kutatásom további célja egy olyan modellfüggetlen, zárt hurkú vizsgálati módszer kidolgozása, amely nem igényli a fizikai folyamat explicit matematikai modelljének ismeretét. A módszer célja a szabályozó és a PLC viselkedésének izolált vizsgálata, ezáltal lehetővé téve a migrációs anomáliák azonosítását anélkül, hogy a valós ipari folyamaton kockázatos beavatkozásokat kellene végrehajtani.

A kutatás célkitűzései közé tartozik továbbá egy empirikus alapokon nyugvó kiértékelési rendszer kialakítása, amely numerikus metrikák segítségével képes jellemezni a különböző architektúrákhoz tartozó szabályozási viselkedést. E mutatók alapján célozom egy olyan döntéstámogató eljárás kidolgozását, amely objektív módon képes megítélni a szabályozó paramétereinek migrálhatóságát, valamint elkülöníteni a változtatás nélkül migrálható, a módosítással elfogadható és a nem migrálható eseteket.

Összességében kutatásom célja egy olyan gyakorlatorientált, ugyanakkor tudományosan megalapozott módszertan kidolgozása, amely támogatja az PLC-architektúraváltások során hozott mérnöki döntéseket, és hozzájárul a szabályozási kockázatok csökkentéséhez.

1.4. Az értekezés struktúrája

Az értekezés első fejezete bemutatja a kutatási probléma aktualitását, indokoltságát, valamint a disszertáció célkitűzéseit. A második fejezet a kutatási probléma értelmezéséhez szükséges rövid szabályozástechnikai keret felvázolása után bemutatja az irodalmi háttérrel, megfogalmazza a kutatási kérdéseket, azonosítja a kutatási rést, valamint rögzíti a disszertáció hipotéziseit. A harmadik fejezet ismerteti a kísérleti és módszertani keretrendszert. A negyedik fejezet az empirikus migrációs vizsgálatok eredményeit mutatja be. Az ötödik fejezet a folyamatfüggetlen, ujjlenyomat-alapú diagnosztikai keretrendszert vezeti be, míg a hatodik fejezet a migrálhatóság kvantitatív döntéstámogató formalizálását és validálását tárgyalja. Az értekezést a magyar és angol nyelvű összefoglalás, az új tudományos eredmények, az irodalomjegyzék, valamint a témához kapcsolódó saját publikációk listája zárja.

2. IRODALMI HÁTTÉR ÉS A KUTATÁSI RÉSZ AZONOSÍTÁSA

A jelen fejezet célja a PI és PID szabályozók paramétermigrációjával kapcsolatos szakirodalom kritikus elemzése, valamint a vizsgált probléma tudományos kontextusának és kutatási részének egyértelmű meghatározása. Az előző fejezetben bemutattam a kutatási probléma ipari és módszertani háttérét, valamint a klasszikus modellalapú megközelítések korlátait. Erre építve a fejezet elején röviden rögzítem a kutatás szempontjából szükséges szabályozástechnikai keretet, majd áttekintem a PI és PID szabályozók tudományos és ipari relevanciáját, a PLC-architektúraváltás és paramétermigráció szakirodalmi megközelítéseit, valamint a klasszikus és adaptív hangolási módszerek migrációs kontextusban értelmezhető korlátait.

Ezt követően összegzem a tudomány jelenlegi állását, explicit módon azonosítom a kutatási rést, és megindokolom a viselkedésalapú, ujjlenyomat-szemléletű, valamint a többmetriás döntéstámogató megközelítés alkalmazását. A fejezetet a kutatási hipotézisek megfogalmazása zárja, amelyek a későbbi empirikus, diagnosztikai és kvantitatív kiértékelési fejezetek kiindulópontját adják.

2.1. Szabályozástechnikai háttér

A PI szabályozóparaméterek PLC-architektúraváltás melletti migrálhatóságának vizsgálata csak megfelelő szabályozástechnikai keretben értelmezhető. Jelen fejezet célja ezért nem a klasszikus irányítástechnikai ismeretek teljes körű bemutatása, hanem azoknak a fogalmaknak és összefüggéseknek a rövid, célzott összefoglalása, amelyek közvetlenül kapcsolódnak a disszertáció kutatási problémájához. Ennek megfelelően a fejezet áttekinti a zárt hurkú szabályozás alapfogalmait, a PI és PID szabályozók ipari szerepét, valamint azt, hogy a jelen kutatás miért kifejezetten a PI szabályozók vizsgálatára épül.

A szabályozási paraméterek migrálhatóságának kérdése nem önmagában a szabályozó algoritmus elméleti alakjából vezethető le, hanem a szabályozó, a digitális megvalósítás és a végrehajtási környezet együttes viselkedéséből. Ennek következtében szükséges röviden rögzíteni azokat az alapfogalmakat, amelyekre a későbbi irodalmi elemzés, a kutatási rész azonosítása, valamint a diagnosztikai és döntéstámogató módszertan épül.

2.1.1. Alapvető szabályozástechnikai fogalmak

A disszertáció központi kérdése a PI szabályozóparaméterek migrálhatósága PLC architektúraváltás esetén. Ennek értelmezéséhez szükséges röviden rögzíteni azokat az alapfogalmakat, amelyek a későbbi irodalmi elemzés, a kutatási rész meghatározása, valamint a diagnosztikai és döntéstámogató módszertan alapját képezik. Jelen fejezet ezért nem általános szabályozástechnikai összefoglalást ad, hanem kizárólag a témához közvetlenül kapcsolódó fogalmakat emeli ki.

Az irányítástechnikai feladatok alapvetően vezérlésre és szabályozásra oszthatók. Vezérlés esetén a beavatkozó jel előre meghatározott logika alapján jön létre, a rendszer tényleges kimenetének figyelembevétele nélkül, ezért ez nyílt hurkú irányítási módnak tekinthető. Szabályozás esetén ezzel szemben a rendszer kimenete visszacsatolásra kerül, és

a beavatkozás a kívánt és a mért állapot különbsége alapján módosul. A jelen kutatás szempontjából ez a megkülönböztetés alapvető, mert a PLC-architektúraváltás hatása nem pusztán a programlogikában, hanem elsősorban a zárt hurkú viselkedésben jelenik meg [16], [17].

Nyílt hurkú irányításnál a rendszer kimenete kizárólag az előreccsatolt ág tulajdonságaitól függ, ezért a zavarások és paraméterváltozások kompenzálása korlátozott. Zárt hurkú irányítás esetén a szabályozó a referenciajel és a kimeneti jel különbségéből képzett hibajel alapján működik. A hibajel definíciója [18]:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

ahol $e(t)$ a hibajel, $r(t)$ a referenciajel, míg $y(t)$ a rendszer kimeneti jele. A zárt hurkú struktúra előnye, hogy lehetővé teszi a zavarások elnyomását és a referenciaérték követését, ugyanakkor a rendszer viselkedése összetettebbé válik, mert azt nemcsak a folyamat, hanem a szabályozó, a visszacsatolás, valamint a megvalósítás módja is meghatározza. Ennek általános leírását adja a zárt hurkú szabályozási kör eredő átviteli függvénye [18]:

$$G_{cl}(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2)$$

ahol a $G_{cl}(s)$ a szabályozó, $G(s)$ az előreccsatolt ág és $H(s)$ pedig a visszacsatolási ág átviteli függvénye. A szabályozási kör működésének kiindulópontja a referenciajel vagy alapjel, amely a kívánt működési állapotot írja elő. Ha ez az érték időben állandó, akkor értéktartó szabályozásról beszélünk; ha pedig időben változó, akkor értékkövető szabályozásról. A kettő közötti különbség a jelen disszertáció szempontjából lényeges, mert az architektúraváltásból eredő dinamikai eltérések időben változó gerjesztések mellett láthatóbbak, mint állandó alapjel esetén. Emiatt a későbbi vizsgálatok döntően értékkövető jellegűek [19], [20], [21].

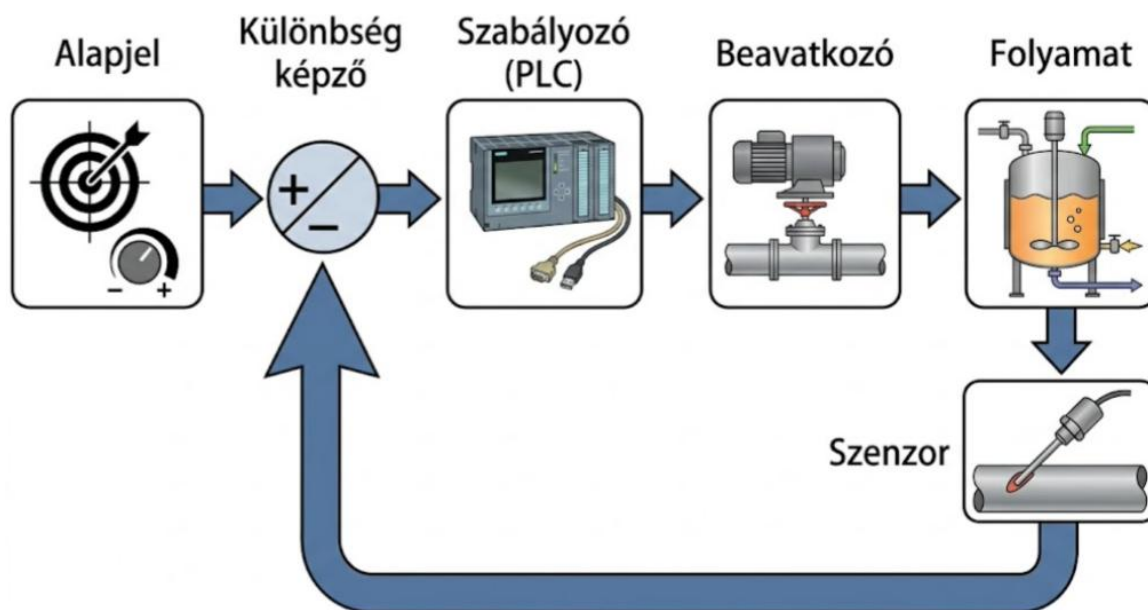
Digitális, PLC-alapú megvalósítás esetén a referenciajel és a kimeneti jel mintavételezett formában jelenik meg, ezért a hibajel diszkrét idejű alakban írható fel [17]:

$$e[k] = r[k] - y[k] \quad (3)$$

A mintavételi idő, a kvantálás, valamint a végrehajtási ciklus sajátosságai közvetlenül befolyásolják a zárt hurkú válasz minőségét. Ez különösen fontos PLC-architektúraváltás esetén, mert a hardver- és firmware-különbségek akkor is módosíthatják a szabályozási viselkedést, ha a vezérlőprogram és a szabályozó paraméterei formálisan változatlanok maradnak.

A zárt hurkú szabályozási kör általános felépítését a referenciajel, a szabályozó, a beavatkozó elem, a folyamat, valamint a mérési és visszacsatolási lánc együttese adja, ahogyan azt a 2.1. ábra szemlélteti. PLC-alapú rendszerekben a szabályozó digitális algoritmusként valósul meg, míg a mérési és beavatkozási oldal analóg–digitális, illetve digitális–analóg átalakításokon keresztül kapcsolódik a folyamathoz. Ennek megfelelően a szabályozási viselkedést nem lehet kizárólag a folyamat dinamikájára visszavezetni; a PLC

végrehajtási környezete, az I/O modulok jellemzői és a mintavételi struktúra szintén a teljes zárt hurkú rendszer részét képezik [22], [23].



2.1. Ábra PLC-alapú zárt hurkú szabályozási lánc komponensei

A fenti fogalmi keret közvetlenül kapcsolódik a disszertáció további részeihez. A kutatás nem általános szabályozástechnikai kérdést vizsgál, hanem azt, hogy a zárt hurkú rendszer viselkedése milyen mértékben marad meg PLC-architektúraváltás után, azonos PI-paraméterek mellett. Ez indokolja, hogy a következő alfejezetek már kifejezetten a PI és PID szabályozók ipari szerepére, illetve a PI-fókusz módszertani indokolására térjenek át.

2.1.2. PI és PID szabályozók ipari alkalmazása

A zárt hurkú ipari szabályozási feladatok megoldásában a legszélesebb körben alkalmazott klasszikus algoritmusok közé tartoznak a PI és PID szabályozók. Elterjedtségük elsősorban abból fakad, hogy szerkezetük egyszerű, működésük jól értelmezhető és digitális vezérlőplatformokon, így PLC-alapú rendszerekben is viszonylag könnyen implementálhatók. A szabályozó kimenete a referenciajel és a mért kimeneti jel különbségeként értelmezett hibajel alapján képződik [24].

A PI szabályozó folytonos idejű alakja az alábbi formában írható fel [24]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (4)$$

ahol K_p az arányos erősítés, K_i pedig az integráló erősítés. Az arányos tag a hibajel aktuális értékére reagál, míg az integráló tag feladata az állandósult hiba csökkentése, illetve megszüntetése. Emiatt a PI szabályozó különösen alkalmas olyan ipari folyamatok esetén, ahol a stabil működés, a robusztusság és a zavarások kompenzálása elsődleges szempont.

A PID szabályozó a PI szerkezetet a deriváló taggal egészíti ki, amely a hibajel változási sebességét is figyelembe veszi. Általános alakja [25]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

ahol K_p az arányos erősítés, K_i az integráló erősítés, míg K_d a deriváló erősítés. Elméleti szempontból a deriváló tag javíthatja az átmeneti viselkedést, mérsékelheti a túllövést és gyorsíthatja a szabályozási választ. Ipari környezetben azonban ennek alkalmazhatósága korlátozott, különösen digitális, PLC-alapú megvalósítás esetén. Ennek oka, hogy a deriváló hatás érzékeny a nagyfrekvenciás komponensekre, ezért a mérési zaj, a kvantálási lépcsők, valamint a mintavételi időből adódó numerikus bizonytalanságok jelentősen befolyásolhatják a működését [25].

PLC-környezetben a szabályozó nem folytonos idejű, hanem diszkrét idejű módon valósul meg. Emiatt a szabályozó tényleges viselkedését nemcsak az elméleti algoritmus szerkezete, hanem a mintavételi idő, a számítási ciklus, az analóg be- és kimeneti átalakítás, valamint a numerikus reprezentáció sajátosságai is alakítják. Ez különösen a PID deriváló tagjánál jelent problémát, mivel a differenciálás a gyakorlatban gyakran zajfelerősítő hatással jár. Ennek következtében számos ipari alkalmazásban a PID szabályozó deriváló része erősen szűrt formában kerül alkalmazásra, vagy elhagyásra kerül, ami a gyakorlati működést a PI szabályozók viselkedéséhez közelíti [25], [29], [31].

Ennek megfelelően a PI és PID szabályozók ipari alkalmazása nem azonos mérnöki súllyal jelenik meg minden környezetben. Míg elméletileg a PID szabályozó általánosabb szerkezetet képvisel, addig a gyakorlatban a PI szabályozó sok esetben kedvezőbb kompromisszumot nyújt a szabályozási teljesítmény, az egyszerű implementálhatóság és a robusztus működés között. Ez különösen igaz PLC-alapú rendszerekben, ahol a végrehajtási és mérési környezet sajátosságai közvetlen hatással vannak a szabályozó dinamikájára.

A disszertáció szempontjából ez azért lényeges, mert a PLC-architektúraváltás során nem pusztán egy elméleti szabályozóstruktúra kerül át egyik környezetből a másikba, hanem annak konkrét digitális implementációja is. Emiatt a PI és PID szabályozók ipari alkalmazásának kérdése a jelen kutatásban nem általános szabályozástechnikai háttérként jelenik meg, hanem a migrálhatósági probléma közvetlen előzményeként.

2.1.3. A PI szabályozó választásának indoklása

A jelen disszertáció nem általában a klasszikus szabályozók összehasonlítására irányul, hanem kifejezetten arra a kérdésre, hogy a PLC-architektúraváltás milyen hatást gyakorol a szabályozóparaméterek változtatás nélküli migrálhatóságára. E probléma vizsgálatához olyan szabályozóstruktúra kiválasztása indokolt, amely iparilag széles körben alkalmazott, ugyanakkor dinamikai viselkedése kellően jól értelmezhető ahhoz, hogy az architektúrafüggő eltérések egyértelműen kimutathatók legyenek. E szempontok alapján a kutatás a PI szabályozóra épül.

A PI szabályozó átviteli függvénye az alábbi alakban írható fel [26]:

$$G_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (6)$$

ahol K_p az arányos erősítés, T_i pedig az integrálási idő. Az arányos tag biztosítja a szabályozó közvetlen reakcióját a hibajelre, míg az integráló tag az állandósult hiba megszüntetésében játszik szerepet. Ez a szerkezet a legtöbb ipari alkalmazás szempontjából megfelelő kompromisszumot jelent a dinamikai teljesítmény, a robusztusság és az egyszerű implementálhatóság között.

A PI szabályozó alkalmazása a zárt hurkú rendszer szempontjából is kedvező kiindulópontot biztosít. A szabályozó és a folyamat együttes viselkedése az alábbi általános alakban írható le [25]:

$$G_{cl}(s) = \frac{G_{PI}(s)G_p(s)}{1 + G_{PI}(s)G_p(s)} \quad (7)$$

ahol $G_{cl}(s)$ a szabályozó, $G_p(s)$ pedig a folyamat átviteli függvénye. A zárt hurkú rendszer viselkedését tehát nem kizárólag a fizikai folyamat dinamikája, hanem a szabályozó szerkezete és annak megvalósítása is meghatározza. A jelen kutatás szempontjából ez különösen fontos, mert PLC-architektúraváltás esetén éppen ez a megvalósítási környezet módosul, miközben a szabályozó paraméterei formálisan változatlanok maradnak.

A PID szabályozó elméletileg általánosabb esetet képvisel, azonban a deriváló tag jelenléte a migrálhatósági vizsgálat értelmezését jelentősen bonyolítaná. A deriváló rész működése érzékeny a mintavételi időre, a mérési zajra, a kvantálási lépcsőkre és a numerikus differenciálásból eredő bizonytalanságokra. Emiatt a PID szabályozó viselkedésében megjelenő eltérések nem minden esetben vezethetők vissza egyértelműen az architektúraváltás strukturális hatásaira, mert azokat a deriváló ág zajérzékenysége önmagában is erősen torzíthatja [25], [29], [31].

Ezzel szemben a PI szabályozó egyszerűbb szerkezete lehetővé teszi, hogy a zárt hurkú viselkedésben megfigyelhető eltérések nagyobb bizonyossággal legyenek a PLC-architektúra, a végrehajtási ciklus, az analóg I/O-kezelés és a numerikus megvalósítás sajátosságaira visszavezethetők. A PI szabályozó választása ezért nem csupán ipari gyakorlati okokból indokolt, hanem módszertanilag is előnyös, mert csökkenti a vizsgálatot zavaró tényezők számát, és tisztább értelmezési keretet biztosít a migrálhatósági probléma elemzéséhez.

A PI-fókusz mellett szól az is, hogy a kutatás célja nem új szabályozótervezési eljárás kidolgozása, hanem egy már működő, validált paraméterkészlet architektúraközi viselkedésének vizsgálata. Ehhez olyan szabályozó szükséges, amely a gyakorlatban valóban széles körben előfordul, és amelynél a változatlan paraméterátvitel ipari szempontból reális mérnöki helyzetet modellez. A disszertáció ezért a PI szabályozót nem egyszerűsítő feltételezésként, hanem tudatosan választott, iparilag és módszertanilag is indokolt vizsgálati alapként kezeli.

2.2. Kutatási kérdések megfogalmazása

A PLC-architektúraváltás során alkalmazott PI szabályozóparaméterek változtatás nélküli migrációja ipari gyakorlatban gyakran előforduló, ugyanakkor tudományosan nem kellően feltárt jelenség. A disszertáció célja annak vizsgálata, hogy a zárt hurkú szabályozási viselkedés milyen mértékben őrizhető meg különböző PLC-architektúrák között azonos PI paraméterek alkalmazása mellett. Ennek megalapozásához a következő kutatási kérdéseket fogalmazom meg.

RQ1.

Domináns és tudományosan aktívan kutatott megközelítésnek tekinthető-e a PI szabályozás a PID-del szemben napjainkban?

E kérdés célja annak igazolása, hogy a PI szabályozás nem marginális vagy elavult megközelítés, hanem iparilag releváns és kutatásban is aktívan vizsgált terület, így a migrációs probléma tudományos jelentőséggel bír.

RQ2.

Megjelenik-e a szakirodalomban a PI szabályozóparaméterek változtatás nélküli migrációja, mint explicit, zárt hurkú dinamikai vizsgálat tárgya?

Ez a kérdés a kutatási rés azonosítására irányul. Annak vizsgálata a cél, hogy a szakirodalom foglalkozik-e kifejezetten a paraméterek invarianciájával PLC-architektúraváltás esetén, vagy a migráció implicit módon, újrhangolási vagy optimalizálási problémaként jelenik meg.

RQ3.

Alkalmasak-e a klasszikus, adaptív vagy optimalizációs alapú hangolási módszerek a változatlan paraméterű migráció előzetes értékelésére?

A kérdés annak kritikai elemzésére irányul, hogy a jelenleg alkalmazott szabályozóhangolási megközelítések képesek-e a migrációból eredő viselkedésváltozások előzetes, folyamatfüggetlen értékelésére, vagy módszertani alapfeltevéseik miatt szükségszerűen paramétermódosítást igényelnek.

RQ4.

Okoz-e mérhető, architektúrafüggő változást a zárt hurkú viselkedésben a PI paraméterek változtatás nélküli migrációja?

Ez a kérdés empirikus vizsgálatra irányul. Célja annak meghatározása, hogy azonos PI paraméterek alkalmazása mellett a zárt hurkú szabályozási viselkedés invariáns marad-e különböző PLC-architektúrák esetén, vagy mérhető eltérések jelentkeznek.

RQ5.

Hogyan jellemezhető objektíven a migrálhatóság mértéke többdimenziós viselkedési jellemzők alapján?

A kérdés arra irányul, hogy a migrálhatóság nem bináris jelenségként, hanem fokozatos viselkedési eltérésként értelmezhető-e, és hogy a zárt hurkú válasz több metria együttes vizsgálata alapján objektíven leírható-e.

A fenti kutatási kérdések logikai láncot alkotnak: az első kérdés a téma relevanciáját, a második a kutatási rés létezését, a harmadik a meglévő módszerek korlátait, a negyedik a jelenség empirikus vizsgálhatóságát, míg az ötödik az objektív értékelés lehetőségét vizsgálja. A következő alfejezetek ezen kérdések mentén elemzik a szakirodalmat, és megalapozzák a disszertáció hipotéziseit.

2.3. PI és PID szabályozók tudományos és ipari relevanciája

A PI szabályozóparaméterek migrálhatóságának vizsgálata előtt szükséges annak igazolása, hogy a PI szabályozás napjainkban is tudományosan releváns és iparilag széles körben alkalmazott megoldás. Ennek érdekében a publikációs trendeket két nagy nemzetközi adatbázisban vizsgáltam: IEEE Xplore és Scopus (Elsevier). A keresést a „PI controller” és „PID controller” kifejezésekre végeztem, teljes szövegmezős (Title–Abstract–Keywords) kereséssel. A konferenciacikkeket is figyelembe vettem, mivel az irányítástechnikai kutatások jelentős része konferenciakiadványokban jelenik meg. A nyers találati számok mellett szűrt adatokat is rögzítettem, amelyek kizárólag mérnöki és irányítástechnikai területre korlátozott publikációkat tartalmaznak.

2.1 Táblázat PI és PID szabályozókkal kapcsolatos publikációk éves száma az IEEE Xplore és Elsevier adatbázisok alapján (2015–2025)

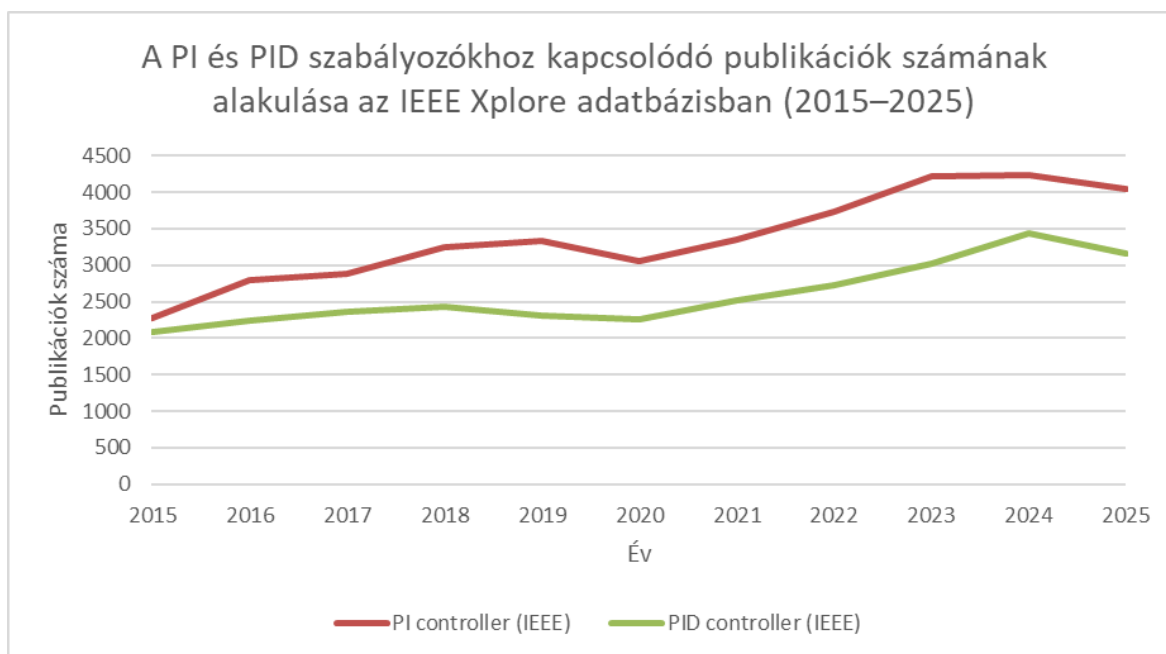
Év	PI controller (IEEE)	PID controller (IEEE)	PI controller (Elsevier)	PID controller (Elsevier)
2015.	2283	2086	874	1288
2016.	2794	2236	965	1392
2017.	2878	2363	1060	1600
2018.	3241	2440	1184	1803
2019.	3336	2315	1063	1740
2020.	3051	2251	1304	1950
2021.	3351	2519	1244	1993
2022.	3732	2729	1655	2372
2023.	4211	3019	1620	2508
2024.	4238	3465	1856	2796
2025.	4042	3161	1952	3112

A 2.1. táblázat tartalmazza a 2015–2025 közötti időszak éves publikációs adatait IEEE és Elsevier adatbázisok szerint, míg a 2.2. ábra az IEEE adatbázis időbeli trendjeit szemlélteti. A táblázat alapján megállapítható, hogy az IEEE adatbázisban a PI szabályozással foglalkozó publikációk száma a vizsgált időszak egészében meghaladja a

PID szabályozással kapcsolatos közlemények számát, míg az Elsevier adatbázisban a PID témájú publikációk száma minden évben magasabb. Mindazonáltal a PI szabályozás publikációs aktivitása mindkét adatbázisban tartósan magas, ami alátámasztja tudományos és ipari relevanciáját.

A Scopus adatbázis eredményei különösen megerősítik ezt a megfigyelést, mivel a teljes szövegmezős keresés szélesebb körű lefedettséget biztosít. A szűrt adatok alapján megállapítható, hogy a PI szabályozás továbbra is önálló kutatási fókuszként jelenik meg, nem pusztán a PID egyik speciális eseteként kezelik. A publikációs aktivitás azt jelzi, hogy a PI szabályozás nem szorult háttérbe a komplexebb vagy intelligens szabályozási módszerekkel szemben, hanem önálló fejlesztési és alkalmazási terület maradt.

Az éves bontású trendek szemléletes bemutatását a 2.2. ábra segíti, amely a PI és PID szabályozókhöz kapcsolódó publikációk számának időbeli alakulását mutatja be az IEEE Xplore adatbázis alapján.



2.2. Ábra A PI és PID szabályozókkal kapcsolatos publikációk számának időbeli alakulása az IEEE Xplore adatbázisban (2015–2025)

A PI és PID szabályozók ipari alkalmazása szorosan összefügg a PLC-alapú vezérlőrendszerek elterjedésével, amelyek determinisztikus működésük és robusztus felépítésük révén alkalmasak klasszikus visszacsatolt szabályozók megbízható megvalósítására. PLC-alapú rendszerekben a PI és PID algoritmusok jellemzően előre definiált funkcióblokkokként jelennek meg, amelyek ipari környezetben validált struktúrát biztosítanak [16].

P. Panchal, A. Patel és J. Barve PLC és LabVIEW alapú SCADA rendszeren végzett szintszabályozási vizsgálataik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a PI szabályozó önmagában is képes stabil és pontos szabályozást biztosítani ipari környezetben, miközben egyszerű paraméterezhetsége és átlátható viselkedése kifejezetten előnyös a gyakorlati

megvalósítás során. A szerzők eredményei azt sugallják, hogy számos ipari alkalmazás esetében a PID teljes struktúrája nem feltétlenül szükséges a kívánt szabályozási teljesítmény eléréséhez [17].

A PID szabályozók gyakorlati alkalmazásának korlátaira több ipari és kísérleti munka is rámutat. M. Huba, P. Bisták és T. Huba vizsgálataik során kimutatták, hogy a deriváló tag alkalmazása jelentős zajérzékenységet eredményezhet diszkrét mintavételezésű rendszerekben, ezért a PID szabályozók ipari környezetben gyakran szűrt deriváló taggal vagy annak részleges elhagyásával kerülnek megvalósításra [18]. A bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy a szűrés mértékének növelésével a PID szabályozó viselkedése fokozatosan PI-szerűvé válik, miközben a stabilitás megőrizhető.

S. A. Yusuf PLC és SCADA alapú hőmérsékletszabályozási rendszerrel végzett kutatásában hangsúlyozta, hogy az ipari alkalmazásokban a szabályozó algoritmus kiválasztásánál elsődleges szempont a megbízhatóság és a karbantarthatóság, nem pedig az algoritmikus komplexitás [19]. E megközelítés összhangban van azzal a gyakorlattal, hogy a PID szabályozók fejlettebb változatai ellenére a PI struktúra továbbra is széles körben alkalmazott marad.

M. Huba ipari szabályozási környezetre irányuló vizsgálataiban azt mutatta ki, hogy a PID szabályozók gyakorlati alkalmazhatóságát jelentősen befolyásolja a deriváló tag zajérzékenysége, ezért a stabil és reprodukálható működés biztosítása érdekében a deriváló hatás szűrése kiemelt szerepet kap [20]. Eredményei alapján a szűrés nem pusztán kiegészítő elem, hanem a gyakorlati PID implementáció szerves része, különösen mérési zajjal terhelt rendszerekben. Ez a megközelítés alátámasztja azt a tapasztalatot, hogy ipari környezetben a PID szabályozók sok esetben nem ideális deriváló taggal, hanem korlátozott vagy szűrt deriváló hatással működnek, ami viselkedésüket a PI szabályozókhoz közelítheti.

Összességében a vizsgált PLC-alapú ipari alkalmazások és irodalmi eredmények alapján megállapítható, hogy a PI szabályozók dominanciája nem elméleti redukció eredménye, hanem ipari implementációs és robusztussági megfontolásokból fakadó mérnöki döntés. A PID szabályozók alkalmazása továbbra is releváns, azonban a deriváló tag használata jellemzően korlátozott, ami a gyakorlatban gyakran PI-alapú viselkedéshez vezet. Ez a megfigyelés közvetlenül megalapozza a disszertáció további fejezeteiben tárgyalt PI-alapú migrációs és architektúraváltási vizsgálatok relevanciáját.

2.4. A paramétermigráció, mint tudományos probléma

2.4.1. A PLC migráció szükségessége és ipari realitása

A PLC-architektúraváltás az ipari irányítórendszerek életciklusának természetes velejárója. A szakirodalom egyértelműen rámutat arra, hogy a migráció elsődleges mozgatórugója nem funkcionális meghibásodás, hanem hardverelavulás és támogatottsági korlátok. Sergejev et al. az Allen Bradley PLC-5 rendszer ControlLogix platformra történő átalakítását elemezve hangsúlyozzák, hogy a régi hardverek frissítése akkor válik szükségessé, amikor az ipari követelmények meghaladják az eredeti telepítési specifikációkat [21]. Hasonló következtetésre jut Holtrop et al., akik a DIII-D kriogén

létesítményben két elavult PLC cseréjét dokumentálják, megjegyezve, hogy a migráció oka az eszközök elavulása és támogatásának megszűnése volt [22].

Nascimento tovább árnyalja a képet azzal, hogy a legacy PLC-alapú rendszerek hosszú élettartama gazdasági és szervezeti tényezőkkel is összefügg [23], míg Alqoud et al. rámutatnak, hogy a teljes rendszer cseréje gyakran nem finanszírozható, ezért retrofit vagy részleges modernizáció válik szükségessé [24]. A PLC migráció tehát nem elszigetelt műszaki kérdés, hanem ipari realitás.

E megállapítások alapján azt a következtetést vonom le, hogy a PLC-architektúraváltás nem kivételes esemény, hanem az ipari rendszerek evolúciójának strukturális eleme. A migráció nem opcionális fejlesztési döntés, hanem hosszú távon elkerülhetetlen folyamat, amelyet technológiai, gazdasági és támogatottsági tényezők együttesen determinálnak. Ebből következően a szabályozóprogramok és paraméterek átvitelének kérdése nem speciális esettanulmányokhoz kötött, hanem az ipar széles területeit érintő problémakör.

A szakirodalom ugyanakkor elsősorban a programstruktúra és a funkcionalitás migrációjára koncentrálnak, és kevésbé vizsgálja a migráció dinamikai következményeit. Megfigyelhető, hogy a PLC-cserét gyakran „technikai átállásként” kezelik, miközben implicit módon feltételezik, hogy a szabályozási viselkedés azonos marad, amennyiben a programlogika változatlanul kerül át az új platformra. E feltételezés azonban mérnöki szempontból nem magától értetődő, különösen akkor, ha az új architektúra végrehajtási ciklusideje, numerikus reprezentációja vagy I/O moduljai eltérnek az eredetitől.

Álláspontom szerint a PLC migráció vizsgálatakor nem elegendő a programkód strukturális átvitelét tekinteni sikeres migrációnak. A zárt hurkú viselkedés megőrzése legalább ilyen jelentőségű kérdés. Amennyiben a hardvercsere a szabályozási dinamika mérhető változását eredményezi, a migráció nem tekinthető teljes mértékben egyenértékűnek, még akkor sem, ha a logikai struktúra formálisan azonos marad. Ez a felismerés indokolja a migráció dinamikai aspektusának önálló, explicit vizsgálatát a disszertáció további részeiben.

2.4.2. PLC–PLC programmigráció és szabványalapú átalakítás

A PLC platformok közötti programmigráció módszertanát Sergejev et al. részletesen bemutatják az RSLogix 5 → RSLogix 5000 konverzió kapcsán [21]. A folyamat nem teljesen automatizált: a migrációs eszköz részleges konverziót biztosít, de bizonyos blokkok – például időzítők és speciális adatátviteli utasítások – manuális javítást igényelnek. Ez már önmagában jelzi, hogy a platformváltás nem pusztán szintaktikai kérdés.

A szerzők leírása alapján a migráció többlépcsős validációs és javítási folyamatot igényel, amelyben a programlogika szerkezeti megfeleltetése mellett az utasítások implementációs különbségeit is kezelni kell [21]. Ez arra utal, hogy még azonos gyártó platformjai között is jelentkeznek olyan szemantikai eltérések, amelyek a működés szintjén relevánsak lehetnek. Ebből azt a következtetést vonom le, hogy a PLC–PLC migráció nem tekinthető mechanikus konverzióknak: a program viselkedésének tényleges megőrzése aktív mérnöki beavatkozást igényel.

Holtrop et al. esettanulmányában a Sattcon és Westinghouse PLC-kről Siemens TI555 rendszerre történő migráció során a PID szabályozási hurkok „alapjainak kiterjedt módosítására” volt szükség [25]. Ez különösen jelentős, mert explicit módon kimondja, hogy a szabályozói viselkedés nem tekinthető automatikusan invariánsnak platformváltás esetén. A tanulmányból az is kiderül, hogy a migrációt követően a szabályozási struktúra finomhangolása nem opcionális lépés volt, hanem a megfelelő teljesítmény elérésének előfeltétele [25]. Ez a megfigyelés egyértelműen jelzi, hogy a paraméterek és a végrehajtási környezet között implicit, de erős kapcsolat áll fenn.

A PLC–PLC migráció tehát nem kizárólag programstruktúra-átvitel, hanem implementációs és dinamikai újrakonfiguráció is lehet. Megfigyelhető, hogy a szakirodalom a migráció sikerét elsősorban a program funkcionalitásának helyreállításával méri, miközben a zárt hurkú viselkedés invarianciája ritkán kerül explicit vizsgálat tárgyává. Álláspontom szerint ez metodológiai hiányosság: a logikai megfeleléség nem garantálja a dinamikai ekvivalenciát.

A szabványváltás (IEC 61131-3 → IEC 61499) szintén intenzíven kutatott terület. Dai et al. szemantikus web alapú migrációs módszert javasolnak, amely a programstruktúra rekonstruálására és funkcióblokkokba történő leképezésére koncentrálnak [26]. Campanelli et al. hangsúlyozzák, hogy automatizált eszközök mellett is újra mérnöki beavatkozás szükséges [27], ami azt jelzi, hogy a migráció során a formális megfeleltetés nem teljes körű.

Az IEC 61131-3 és IEC 61499 közötti különbség nem csupán szintaktikai, hanem végrehajtási modellbeli eltérés is. Míg az IEC 61131-3 tipikusan ciklikus scan-alapú végrehajtási modellt alkalmaz, addig az IEC 61499 eseményvezérelt architektúrát támogat. Ez a különbség a szabályozási hurkok időzítési karakterisztikájára is hatással lehet. Bár a hivatkozott munkák elsődlegesen a programstruktúra transzformációjára koncentrálnak [26], [27], a végrehajtási modell megváltozása potenciálisan befolyásolhatja a PID algoritmus diszkrét idejű implementációját. Ezt a szakirodalom csak implicit módon kezeli, és nem ad kvantitatív módszertant a viselkedési eltérések mérésére. A PLC–PLC és szabványalapú migrációs tanulmányok összességében azt mutatják, hogy a programkód átvihetősége technikailag megoldható, de a dinamikai ekvivalencia nem garantált. A migráció sikerét többnyire funkcionalitási és kompatibilitási szempontból értékelik, nem pedig zárt hurkú viselkedési metrikák alapján. Ez a megközelítés ipari gyakorlatban érthető, ugyanakkor tudományos szempontból hiányos.

A disszertáció szempontjából e megfigyelések kulcsfontosságúak: a szakirodalom igazolja a PLC migráció szükségességét és megvalósíthatóságát, azonban nem kínál olyan általános, kvantitatív keretrendszert, amely a PI/PID paraméterek változtatás nélküli migrációjának dinamikai következményeit rendszerszinten vizsgálná. Ez a hiány indokolja a további fejezetekben alkalmazott, viselkedésalapú megközelítést.

2.4.3. Paraméter-újrafelhasználás és annak korlátai

A szabályozóparaméterek újrahaználhatósága migráció során kritikus kérdés. Ipari gyakorlatban a PI és PID paraméterek gyakran hosszabb validációs és üzemeltetési periódus eredményeként kerülnek véglegesítésre. Ezek a paraméterek nem csupán számértékek,

hanem az adott rendszer dinamikájára, mintavételi feltételeire és végrehajtási környezetére illesztett beállítások. Ennek következtében a migráció során felmerülő egyik alapvető kérdés az, hogy e paraméterek változtatás nélküli átvitele mennyiben tekinthető megalapozottnak.

Holtrop et al. dokumentálják, hogy a PID paraméterek jelentős módosítást igényeltek platformváltás után [25]. A tanulmányból az derül ki, hogy a paraméterek újrahangolása nem opcionális finomítás volt, hanem a megfelelő szabályozási teljesítmény visszaállításának feltétele. Ez arra utal, hogy a paraméterek implicit módon függenek az adott platform implementációs sajátosságaitól, még akkor is, ha az algoritmus formálisan azonos.

Sergeyev et al. rámutatnak arra is, hogy bizonyos blokkok paraméterei – különösen időzítők és speciális adatátviteli egységek – nem kerülnek át megfelelően automatizált migrációs eszközökkel [21]. Ez azt jelenti, hogy a paramétermegőrzés még strukturális migráció esetén sem garantált. A konverziós folyamat részleges automatizáltsága miatt manuális ellenőrzésre és validációra van szükség, ami már önmagában megkérdőjelezi a paraméterek architektúrafüggetlenségét.

Dai et al. és Campanelli et al. munkái elsősorban a programstruktúra rekonstruálására és leképezésére koncentrálnak [26], [27]. Bár módszereik képesek a funkcionális blokkok és szerkezeti elemek átalakítására, a konkrét paraméterértékek és adattípusok kezelése külön figyelmet igényel. A migráció során az adattípus-konverzió, a numerikus reprezentáció és a blokkimplementáció különbségei mind hatással lehetnek a paraméterek értelmezésére. Ebből azt a következtetést vonom le, hogy a paraméter-újrafelhasználás nem pusztán értékátvitel, hanem kontextusfüggő értelmezési folyamat.

Fontos megfigyelni, hogy a szakirodalom a paraméter-újrafelhasználást jellemzően implementációs vagy kompatibilitási problémaként kezeli, nem pedig dinamikai kérdésként. A paraméterek helyes átvitele technikai értelemben megvalósítható, azonban az nem kerül explicit vizsgálatra, hogy az átvitt paraméterek az új architektúrán azonos zárt hurkú viselkedést eredményeznek-e. A legtöbb migrációs tanulmány a működőképesség visszaállítását tekinti sikernek, nem pedig a dinamikai ekvivalencia bizonyítását.

Álláspontom szerint ez a megközelítés mérnöki szempontból érthető, de tudományos szempontból hiányos. A PI és PID paraméterek diszkrét idejű implementációkban eleve kötődnek a mintavételi periódushoz, a numerikus felbontáshoz és a végrehajtási ciklusidőhöz. Ha e környezeti feltételek megváltoznak, a paraméterek hatása is módosulhat, még akkor is, ha az algoritmus és a programkód változatlan marad. A paraméter-újrafelhasználás tehát nem tekinthető univerzálisan érvényes eljárásnak.

A migráció során alkalmazott manuális validációs és újrahangolási gyakorlatok azt jelzik, hogy az ipari gyakorlat implicit módon elismeri a paraméterek architektúrafüggőségét. Ugyanakkor a szakirodalomban nem található olyan általános, kvantitatív módszertan, amely előzetesen, strukturált módon értékelné a paraméterek változtatás nélküli migrálhatóságát. A paramétermegőrzés kérdése tehát nem lezárt technikai részlet, hanem nyitott dinamikai probléma, amely indokolja a további, viselkedésalapú vizsgálatot.

2.4.4. Végrehajtási ciklusidő és dinamikai hatások

A PLC végrehajtási ciklusideje a digitális PID implementáció alapvető paramétere. A diszkrét idejű szabályozás során a mintavételi periódus közvetlenül meghatározza az integráló és deriváló tag numerikus megvalósítását, így a szabályozó hatásának dinamikai karakterét. A PID algoritmus folytonos idejű formulájának diszkrét approximációja eleve a végrehajtási ciklusidőhöz kötött, ezért annak megváltozása a szabályozási viselkedés módosulását eredményezheti, még változatlan erősítési paraméterek esetén is.

Geng és Li kimutatták, hogy hálózatos irányítórendszerekben a funkcióblokkok végrehajtási ideje domináns hatással van a zárt hurkú teljesítményre [28]. Vizsgálataik során empirikusan igazolták, hogy a PID szabályozás dinamikai jellemzői – például a lépcsőválasz, a túllövés és a beállási idő – érzékenyek a végrehajtási időzítés változásaira. Eredményeik arra utalnak, hogy a szabályozási teljesítmény romlása nem kizárólag kommunikációs késleltetésekből vagy hálózati torlódásból fakad, hanem magából a vezérlőplatform végrehajtási struktúrájából is.

Ez a megfigyelés különösen releváns PLC migráció esetén. Amennyiben az új architektúra eltérő scan ciklusidővel, eltérő jitterrel vagy eltérő feladatütemezési logikával működik, a diszkrét PID algoritmus effektív mintavételi periódusa is megváltozik. Mivel az integráló tag tipikusan a hibajel időbeli összegzésén alapul, a mintavételi idő növekedése vagy csökkenése a kumulatív hatást is módosítja. Hasonlóképpen, a deriváló tag numerikus differenciálása közvetlenül függ az egymást követő minták közötti időintervallumtól.

Holtrop et al. migrációs esettanulmánya közvetetten szintén alátámasztja ezt az összefüggést: a PID hurkok alapvető módosítását követelte meg az új platform [25]. Bár a tanulmány nem ad explicit időzítési modell-analízist, a platformváltás utáni újrahangolási igény összhangban van a diszkrét idejű PID algoritmus mintavételi periódus-függőségével. A paraméterek módosítása tehát nem csupán gyakorlati finomhangolásként értelmezhető, hanem az implementációs környezet változásából fakadó dinamikai adaptációként is.

Álláspontom szerint a végrehajtási ciklusidő kérdése a PLC migráció egyik legkritikusabb, ugyanakkor a szakirodalomban csak részben tárgyalt tényezője. A migrációs tanulmányok jellemzően dokumentálják a paraméterek módosítását, de nem adják meg annak rendszerszintű, kvantitatív elemzését, hogy a mintavételi periódus változása milyen mértékben befolyásolja a zárt hurkú stabilitást és teljesítményt. Ez a hiány különösen jelentős a PI szabályozók esetében, ahol az integráló tag domináns szerepet játszik az állandósult hiba eliminálásában.

A végrehajtási ciklusidő tehát nem implementációs részlet, hanem a digitális szabályozás strukturális paramétere. Migráció során a hardvercsere által bevezetett időzítési eltérések közvetlen hatással lehetnek a zárt hurkú viselkedésre, ami indokolja e tényező explicit vizsgálatát a disszertáció további fejezeteiben.

2.4.5. Validációs megközelítések migráció után

A migráció utáni szabályozói viselkedés validálásának módszertana a szakirodalomban heterogén és kontextusfüggő. Holtrop et al. empirikus és iteratív hangolási megközelítést alkalmaztak a DIII-D kriogén rendszer migrációja során [25]. A PID hurkok viselkedését a

platformváltás után működés közben értékelték, majd a tapasztalt eltérések alapján módosították a paramétereket. Ez a gyakorlat jól tükrözi az ipari mérnöki megközelítést: a validáció a működőképesség helyreállítására és a teljesítmény javítására irányul, nem pedig a viselkedési ekvivalencia formális bizonyítására.

Biztonságkritikus környezetben a validáció strukturáltabb formát ölt. Calafiori et al. a CERN CMS rendszer frissítése során kiterjedt telepítés előtti tesztelési eljárásokat alkalmaztak [25], [27]. A migráció nem egyszerű átvitelként, hanem kontrollált, többfázisú validációs folyamatként jelent meg, amely magában foglalta a funkcionális ellenőrzést, az interfész-kompatibilitás vizsgálatát és a rendszerintegrációs teszteket. E megközelítés előnye a magas megbízhatóság, ugyanakkor a validáció továbbra is konkrét rendszerre és adott architektúrára szabott eljárás marad.

Salman et al. egy strukturált, metriákon alapuló migrációs módszertant javasolnak komplex valós idejű rendszerekre [29]. Megközelítésük a szoftverarchitektúra feltárásán, a célplatform követelményeinek szintézisének és az adaptációs transzformáción alapul. A módszer hangsúlyozza a mérhető teljesítménymutatók alkalmazását, valamint a migráció utáni viselkedés objektív értékelését. Ugyanakkor a javasolt keretrendszer nem specifikusan szabályozástechnikai dinamikára, hanem általános szoftverarchitektúra-migrációra fókuszál.

A vizsgált tanulmányok alapján megállapítható, hogy a migráció utáni validáció jellemzően három fő formában jelenik meg:

- (1) empirikus, iteratív újrahangolás,
- (2) kiterjedt rendszer- és integrációs tesztelés,
- (3) strukturált, metriákon alapuló szoftvermigrációs keretrendszer.

E megközelítések közös jellemzője, hogy a validáció rendszer- és alkalmazáspecifikus. A hangsúly a működőképesség és megbízhatóság visszaállításán van, nem pedig a szabályozói viselkedés architektúrafüggetlen, kvantitatív összehasonlításán.

Álláspontom szerint a migráció utáni validáció jelenlegi gyakorlata implicit módon elismeri, hogy a szabályozói viselkedés megváltozhat platformváltás esetén. Ugyanakkor a szakirodalomban nem található olyan általános, folyamatfüggetlen, zárt hurkú dinamikai keretrendszer, amely előzetesen vagy utólag objektíven értékelné a PI/PID paraméterek változtatás nélküli migrálhatóságát. A validáció módszertana jellemzően reakciós jellegű: a migráció után tapasztalt eltérések alapján történik a korrekció.

A disszertáció szempontjából ez a megfigyelés különösen jelentős. Amennyiben a migráció utáni validáció kizárólag empirikus vagy rendszerfüggő, akkor hiányzik az a módszertani eszköz, amely lehetővé tenné a migrálhatóság előzetes, objektív és összehasonlítható vizsgálatát. Ez a hiány indokolja a további fejezetekben alkalmazott, metriákon és viselkedési jellemzőkön alapuló megközelítés kidolgozását.

2.4.6. Összegző megállapítás

A szakirodalom egyértelműen igazolja, hogy a PLC programmigráció aktívan kutatott és iparilag releváns terület. Foglalkoznak platformok közötti átalakítással [21], [26],

szabványváltással [26], [30], legacy rendszerek integrációjával, valamint időzíteni hatásokkal. A vizsgált tanulmányok részletesen bemutatják a programstruktúra konverzióját, a kompatibilitási kérdéseket, az automatizált migrációs eszközök korlátait, valamint a migráció utáni validáció különböző formáit.

Megfigyelhető azonban, hogy e munkák elsődlegesen implementációs, strukturális vagy rendszerintegrációs kérdésekre koncentrálnak. A migráció sikerét jellemzően a program működőképességének helyreállításával, a funkcionalitás megőrzésével vagy a kompatibilitás biztosításával mérik. A zárt hurkú szabályozási viselkedés kvantitatív, architektúrafüggő elemzése nem jelenik meg önálló kutatási irányként, hanem legfeljebb empirikus újrhangolási igény formájában, implicit módon.

A paraméter-újrafelhasználás kérdése a vizsgált szakirodalomban kritikus, de alulrészletezett aspektusként jelenik meg. Dokumentálták, hogy a PID paraméterek módosítást igényelhetnek platformváltás után, illetve azt, hogy bizonyos blokkok paraméterei nem kerülnek át teljes mértékben automatizált eszközökkel. Ugyanakkor nem található olyan általános, folyamatfüggetlen, zárt hurkú dinamikai keretrendszer, amely a PI/PID paraméterek változtatás nélküli migrálhatóságát objektív, összehasonlítható metrikák mentén vizsgálná.

A végrehajtási ciklusidő, a numerikus reprezentáció és az I/O jellemzők szerepe ugyan több tanulmányban megjelenik, azonban ezek vizsgálata jellemzően konkrét rendszerekre vagy alkalmazási kontextusokra korlátozódik. A diszkrét idejű implementáció és az architektúraváltás közötti kapcsolat szisztematikus, kvantitatív elemzése hiányzik a PLC migrációs irodalomból.

Álláspontom szerint a PLC migráció vizsgálatában elengedhetetlen a programstruktúra- és kompatibilitás-orientált megközelítéstől a dinamikai viselkedésorientált megközelítés felé történő elmozdulás. A migráció nem tekinthető teljes értékűnek pusztán a működőképesség helyreállítása alapján, amennyiben a zárt hurkú szabályozási teljesítmény mérhető módon módosul. A szakirodalom jelenlegi állása indokolttá teszi egy olyan módszertani keretrendszer kidolgozását, amely a PI szabályozóparaméterek változtatás nélküli migrálhatóságát objektív, kvantitatív és folyamatfüggetlen módon vizsgálja.

E megállapítás közvetlenül megalapozza a következő alfejezetben tárgyalt módszertani kritikai elemzést, amely a klasszikus és adaptív szabályozóhangolási eljárások migrációs kontextusban való alkalmazhatóságát vizsgálja.

2.5. Klasszikus és adaptív szabályozóhangolási módszerek korlátai

2.5.1. Klasszikus hangolási módszerek érzékenysége

A PID hangolási módszerek történetileg a folytonos idejű modellalapú megközelítésekből fejlődtek ki, amelyek a folyamat dinamikájára és annak paramétereire támaszkodnak. A Ziegler–Nichols (Z–N) módszer az ultimate gain és ultimate period meghatározásán alapul, amely közvetlenül függ a rendszer dinamikai karakterisztikájától és a mintavételi feltételektől. Tran et al. és Naşcu et al. rámutatnak, hogy a Z–N módszer teljesítménye

érzékeny az alkalmazási környezetre, különösen a holtidőre és a rendszer nemlinearitására [31], [32].

A digitális implementáció további érzékenységet vezet be. Lima et al. kimutatták, hogy a diszkrét PID differenciaegyenlet együtthatói közvetlenül a mintavételi periódustól (T_s) függenek. Ennek következtében a mintavételi idő megváltozása módosítja az effektív erősítéseket, még akkor is, ha a P, I és D paraméterek numerikus értékei változatlanok maradnak. Ez a jelenség közvetlen relevanciával bír PLC-architektúraváltás esetén, ahol a végrehajtási ciklusidő eltérhet az eredeti platformétól [33].

Shirazi et al. tovább hangsúlyozzák, hogy a digitális frekvenciabecslés pontossága és a limit cycling jelenség szorosan összefügg a mintavételi frekvenciával és a digitális felbontással [34]. E megfigyelések alapján megállapítható, hogy a klasszikus hangolási módszerek implicit módon rögzített időzítési és implementációs feltételeket feltételeznek. Migráció esetén ezek a feltételek nem feltétlenül teljesülnek.

Álláspontom szerint a klasszikus hangolási módszerek nem tekinthetők architektúrafüggetlennek. Ezek a módszerek a folyamat adott dinamikai állapotára és adott implementációs környezetre optimalizálnak, nem pedig paraméter-invarianciára törekednek.

2.5.2. Modellalapú megközelítések korlátai

Az IMC-alapú PID hangolás (Li et al., Naşcu et al.) a folyamatmodell paramétereire támaszkodik. A vezérlő paraméterei közvetlenül a modell erősítéséből, időállandójából és holtidejéből származnak. Modellpontatlanság esetén a zárt hurkú teljesítmény romlik vagy instabilitás is felléphet [32], [35].

Chan et al. rámutatnak, hogy modellbizonytalanság esetén adatvezérelt korrekció szükséges. Ez azt jelenti, hogy a modellalapú módszerek implicit módon feltételezik a rendszerparaméterek stabilitását és pontosságát. PLC migráció esetén azonban az implementációs különbségek – például mintavételi idő, numerikus reprezentáció – a modellparaméterek effektív jelentését is módosíthatják [36].

Következésképpen a modellalapú hangolás nem alkalmas a paraméterek változtatás nélküli migrációjának előzetes értékelésére, mivel maga a módszer is újraszámítja a paramétereket a célrendszer modellje alapján.

2.5.3. Adaptív és önhangoló eljárások

Az adaptív PID rendszerek (Hsu et al., Ganjefar & Farahani,) folyamatos paraméterfrissítést igényelnek. A neurális és fuzzy alapú kiegészítések adatintenzívek, és valós idejű mérési hozzáférést feltételeznek. Lebreton et al. kimutatták, hogy NN-alapú auto-tuning javíthatja a hibát, azonban folyamatos adatgyűjtést és számítási kapacitást igényel [37], [38].

PSO- és GA-alapú megközelítések (Chopra et al., Ahmad et al., Wu et al.) szintén iteratív optimalizációra épülnek [39], [40], [41]. A fitness függvény értékelése modell- vagy folyamatfüggő, a módszerek gyakran offline szimulációra vagy több próbára támaszkodnak. Shiohara & Maeda hangsúlyozzák, hogy valós rendszeren történő optimalizáció jelentős számú kísérletet igényelhet [42].

Az adaptív és intelligens módszerek közös jellemzője, hogy nem a paraméter-invariancia vizsgálatára törekednek, hanem kifejezetten paraméter-módosítást hajtanak végre a teljesítmény optimalizálása érdekében. Migrációs kontextusban ez azt jelenti, hogy ezek a módszerek implicit módon elismerik a paraméterek architektúrafüggőségét.

2.5.4. Kritikai szintézis migrációs kontextusban

A vizsgált klasszikus, modellalapú, adaptív és intelligens PID hangolási módszerek közös jellemzője a folyamat- és implementációfüggőség. A paraméterek kiválasztása a folyamat dinamikájától, a mintavételi időtől, a numerikus implementációtól függ és gyakran valós folyamat-hozzáférést igényel.

E módszerek célja a teljesítmény optimalizálása adott környezetben, nem pedig a paraméterek változtatás nélküli migrálhatóságának vizsgálata. Egyik megközelítés sem kínál olyan keretrendszert, amely előzetesen megmondaná, hogy egy adott PI paraméterkészlet más architektúrán milyen dinamikai eltérést fog eredményezni.

Álláspontom szerint ez alapvető metodológiai hiányosság migrációs kontextusban. A hangolási módszerek a paraméterek újraszámítására koncentrálnak, miközben nem vizsgálják a paraméterek architektúrafüggetlenségének kérdését. Ez közvetlenül indokolja egy olyan vizsgálati megközelítés kidolgozását, amely a zárt hurkú viselkedést többdimenziós metriák mentén értékeli anélkül, hogy a paramétereket módosítaná.

2.6. A tudomány jelenlegi állása

A 2.2 fejezetben megfogalmazott kutatási kérdések mentén a 2.3–2.5 fejezetekben áttekintettem a PI/PID szabályozás relevanciáját, a PLC-architektúraváltás irodalmát, valamint a klasszikus és adaptív hangolási módszerek korlátait. Az alábbiakban ezek szintézisét adom meg a tudomány jelenlegi állásának meghatározása céljából.

A 2.3 fejezet publikációs elemzése alapján megállapítható, hogy a PI szabályozás napjainkban is aktívan kutatott és iparilag széles körben alkalmazott megoldás. Az IEEE adatbázis alapján a PI szabályozással kapcsolatos publikációk száma stabil, és több évben meghaladja a PID-re vonatkozó közlemények számát. Az ipari alkalmazások elemzése azt mutatja, hogy a PI struktúra robusztus, determinisztikus és implementációs szempontból kedvező megoldás, különösen PLC-alapú rendszerekben. Ebből következően a PI paraméterek migrációjának kérdése nem marginális, hanem széles körben érintett ipari probléma.

A 2.4 fejezetben bemutattam, hogy a PLC programmigráció és architektúraváltás aktívan kutatott terület. A szakirodalom foglalkozik PLC–PLC migrációval [32],[36], IEC 61131-3 → IEC 61499 átalakítással [37],[41], legacy rendszerek modern integrációjával [34],[35], valamint végrehajtási időzítési hatásokkal [39]. A migrációs tanulmányok részletesen tárgyalják a programstruktúra konverzióját, a kompatibilitási kérdéseket és a validációs módszereket. Ugyanakkor a migráció sikerét jellemzően a működőképesség és funkcionalitás helyreállítása alapján értékelik.

A 2.4 és 2.5 fejezetek összevetése alapján megállapítható, hogy a szabályozóparaméterek kérdése a migrációs irodalomban implicit módon jelenik meg. Dokumentálták, hogy a PID paraméterek módosítást igényelhetnek platformváltás után [36], illetve azt, hogy automatizált eszközök mellett is manuális validáció szükséges [32],[37]. A végrehajtási ciklusidő és diszkrét implementáció szerepét több tanulmány is érinti [36], [39], azonban ezek nem adnak általános, kvantitatív keretrendszert a paraméterek architektúrafüggő viselkedésének értékelésére.

A 2.5 fejezetben elemzett hangolási módszerek – klasszikus (Ziegler–Nichols), modellalapú (IMC–PID), adaptív, valamint optimalizációs és intelligens eljárások – közös jellemzője, hogy a paraméterek újraszámítására vagy adaptív módosítására épülnek. E módszerek célja az adott folyamatdinamikához és implementációs környezethez illeszkedő optimális paraméterkészlet meghatározása. Nem vizsgálják explicit módon azt a kérdést, hogy egy adott, már validált PI paraméterkészlet más architektúrán változtatás nélkül megőrzi-e zárt hurkú dinamikai tulajdonságait.

Összességében a tudomány jelenlegi állása a következőképpen foglalható össze:

- A PI szabályozás iparilag releváns és aktívan kutatott terület.
- A PLC migráció strukturális és implementációs szempontból jól dokumentált.
- A paraméter-újrahangolás és adaptív módszerek széles körben alkalmazottak.
- A végrehajtási ciklusidő és digitális implementáció hatásai ismertek, de rendszerint specifikus kontextusban vizsgálják őket.
- Nem azonosítható olyan általános, folyamatfüggetlen, zárt hurkú dinamikai keretrendszer, amely a PI paraméterek változtatás nélküli migrálhatóságát objektíven értékelné.

A fenti megállapítások alapján kijelenthető, hogy a PI szabályozóparaméterek PLC-architektúraváltás során történő migrációja dinamikai szempontból releváns, de explicit, kvantitatív vizsgálata a szakirodalomban nem jelenik meg önálló kutatási irányként. Ez a tudományos állapot indokolja a disszertációban alkalmazott, viselkedésalapú és metriákon alapuló megközelítés kidolgozását, amely a migrálhatóság objektív értékelésére törekszik.

2.7. A kutatási rés explicit megfogalmazása

A 2.3–2.6 fejezetekben bemutatott szakirodalmi áttekintés alapján megállapítható, hogy a PI szabályozás iparilag releváns és tudományosan aktívan vizsgált terület, a PLC-architektúraváltás strukturális és implementációs kérdései jól dokumentáltak, valamint a klasszikus és adaptív hangolási módszerek széles körben alkalmazottak.

Ugyanakkor a vizsgált szakirodalomban nem azonosítható olyan módszertani keretrendszer, amely a PI szabályozó paramétereinek változtatás nélküli migrálhatóságát zárt hurkú viselkedés alapján, folyamatfüggetlen módon, kvantitatív metriák mentén vizsgálná.

A PLC migrációs tanulmányok dokumentálják a programstruktúra átalakítását, a kompatibilitási kérdéseket és a migráció utáni validáció különböző formáit, azonban a zárt hurkú dinamikai ekvivalencia nem jelenik meg explicit vizsgálati tárgyként. A paraméterek módosítását több esetben empirikus szükségszerűségként kezelik, de nem elemzik rendszerszinten, hogy a paraméterek architektúrafüggősége milyen mértékben és milyen feltételek mellett jelentkezik.

A hangolási módszerek – legyenek klasszikus, modellalapú, adaptív vagy optimalizációs megközelítések – a paraméterek újraszámítására vagy adaptív módosítására épülnek. Nem vizsgálják azt a kérdést, hogy egy adott, már validált PI paraméterkészlet más architektúrán változtatás nélkül megőrzi-e zárt hurkú dinamikai tulajdonságait.

Ebből következően a szakirodalomban hiányzik egy olyan, architektúrafüggetlen, viselkedésalapú diagnosztikai keretrendszer, amely:

- a PI paraméterek migrálhatóságát előzetesen vagy utólag objektíven értékeli,
- a vizsgálatot nem köti konkrét folyamatmodellhez,
- és nem igényli a paraméterek újrahangolását.

Álláspontom szerint a PI paraméterek migrálhatóságának kérdése nem pusztán implementációs vagy hangolási probléma, hanem dinamikai ekvivalencia-probléma. A migráció akkor tekinthető valóban sikeresnek, ha a zárt hurkú viselkedés meghatározott metriák mentén elfogadható határok között megőrizhető.

A disszertáció célja e módszertani hiány pótlása egy olyan viselkedésalapú, metriákon és objektív kiértékelésen alapuló megközelítés kidolgozásával, amely a PI szabályozóparaméterek változtatás nélküli migrálhatóságát kvantitatív módon vizsgálja.

2.8. A viselkedésalapú (ujjlenyomat) megközelítés elvi indoklása

A 2.7 fejezetben azonosított kutatási rés alapján olyan módszertani keretrendszer szükséges, amely a PI szabályozóparaméterek változtatás nélküli migrálhatóságát zárt hurkú viselkedés alapján, folyamatfüggetlen módon képes értékelni. E cél eléréséhez a dinamikus rendszerek viselkedésalapú azonosításának és ujjlenyomat olvasó módszereinek koncepcionális keretrendszerére támaszkodom.

A rendszer-ujjlenyomat olvasó elméleti alapjai szerint egy rendszer megfigyelhető kimeneteiből olyan diszkriminatív jellemzők halmaza képezhető, amely az adott rendszerre jellemző „aláírásként” szolgál (Yadav et al., Bouchaud et al.). Az ujjlenyomat olvasó megközelítések között megkülönböztethető white-box és black-box paradigma. A black-box ujjlenyomat olvasó kizárólag a rendszer külső válaszjeleire támaszkodik, belső modellismeret nélkül. Ez a megközelítés koncepcionálisan közvetlenül transzferálható a zárt hurkú szabályozórendszerek vizsgálatára [43], [44].

A zárt hurkú válasz természeténél fogva tartalmazza a folyamat és a szabályozó dinamikai kölcsönhatását. Amennyiben a rendszer válasza determinisztikus gerjesztés mellett reprodukálható, úgy az időtartománybeli és frekvenciatartománybeli jellemzők kombinációja viselkedési aláírásként értelmezhető. Sundaramoorthy és Ramasamy

kimutatták, hogy teljesítménymutatók – például az IAE vagy érzékenységi csúcserőtelvények – modellismeret nélkül is alkalmasak rendszerkarakterizálásra. Song et al. és Deulofeu et al. spektrális ujjlenyomat olvasó megközelítései tovább erősítik azt a koncepcionális állítást, hogy dinamikai rendszerek válaszelei magas dimenziójú, de strukturált jellemzőtérben reprezentálhatók. Az ujjlenyomat olvasó megközelítés egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy nem feltételezi a rendszer explicit matematikai modelljét. Ez különösen releváns PLC-migrációs kontextusban, ahol a cél nem a folyamat újraazonosítása vagy a paraméterek újraszámítása, hanem annak vizsgálata, hogy a már validált paraméterkészlet más architektúrán milyen mértékben őrzik meg dinamikai tulajdonságait [45], [46].

Ugyanakkor az ujjlenyomat olvasó módszerek korlátai is ismertek. A jellemzők kiválasztása üzemiállapot- és gerjesztésfüggő (Yadav et al.) a spektrális aláírás érzékeny a mintavételi feltételekre (Bouchaud et al.) és a diszkriminatív teljesítmény erősen függ a rendelkezésre álló adatmennyiségtől. Ezek a megfigyelések rámutatnak arra, hogy a viselkedésalapú megközelítés nem önmagában garancia a robusztusságra, hanem gondosan definiált gerjesztési és kiértékelési protokollt igényel. Álláspontom szerint a PLC-architektúraváltás vizsgálata során a zárt hurkú válasz viselkedési aláírásként való értelmezése módszertanilag megalapozott. A migráció dinamikai következményei nem feltétlenül jelennek meg strukturális vagy implementációs szinten, azonban kimutathatók a válaszelek finom metriai eltéréseiben. Az ujjlenyomat olvasó paradigma lehetővé teszi e különbségek kvantitatív rögzítését anélkül, hogy a paraméterek módosítását feltételeznék.

A disszertációban alkalmazott viselkedésalapú megközelítés tehát nem önkényes módszerválasztás, hanem a dinamikus rendszerek azonosításának és modellmentes értékelésének nemzetközileg elfogadott koncepcionális keretrendszerére épülő adaptáció PLC-migrációs kontextusban. E megközelítés biztosítja annak lehetőségét, hogy a PI paraméterek változtatás nélküli migrálhatóságát objektív, zárt hurkú viselkedésen alapuló módon értékeljem.

2.9. Többmetriás kiértékelés és többkritériumos döntéstámogatás indoklása

A 2.8 fejezetben bemutatott viselkedésalapú megközelítés eredményeként a PI szabályozó migrációját nem egyetlen teljesítménymutató, hanem többdimenziós viselkedési jellemzőtér írja le. A zárt hurkú válasz időtartománybeli és frekvenciatartománybeli metriái – például túllövés, beállási idő, integrált hibamutatók, amplitúdó- és egyéb dinamikai jellemzők – a rendszer viselkedésének eltérő aspektusait reprezentálják. Ezek a metriák egymással részben korrelálhatnak, ugyanakkor különböző kompromisszumokat is tükrözhetnek. A szabályozórendszerek teljesítménye strukturálisan többkritériumos jellegű. Egy olyan architektúra, amely kedvezőbb beállási időt mutat, nagyobb túllövéssel járhat; egy másik konfiguráció kisebb integrált hibát produkálhat, de nagyobb amplitúdóingadozást eredményezhet. A metriák közötti trade-off jelleg a probléma természetéből fakad, nem pedig módszertani hiányosság.

A szakirodalom a többkritériumos mérnöki döntési problémák kezelésére a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) keretrendszert alkalmazza (Bohra és Anvari-Moghaddam,

Kahraman et al.). Az MCDM célja több, gyakran egymással konfliktusban álló kritérium egyidejű integrálása és az alternatívák objektív rangsorolása. A jelen disszertációban a PI szabályozó különböző architektúrákon mért viselkedési ujjlenyomat olvasók tekinthetők alternatíváknak, míg a számított dinamikai metriák képezik a döntési kritériumokat [47], [48].

Fontos hangsúlyozni, hogy a vizsgált metriák determinisztikus, számszerűsített mennyiségek. Nem bizonytalan nyelvi változókról vagy szubjektív preferenciákról van szó, hanem mérési adatokból származtatott objektív értékekről. Ennek megfelelően a fuzzy MCDM megközelítések alkalmazása nem indokolt, mivel azok tagsági függvényeken és szubjektív paraméterezésen alapulnak, ami a reprodukálhatóságot csökkentené [49].

Az AI és gépi tanulás alapú rangsorolási módszerek jellemzően nagy adathalmazt és tanítóadatot igényelnek, valamint prediktív osztályozási problémákra optimalizáltak [50]. A jelen vizsgálat célja nem új szabályozók predikciója vagy osztályozása, hanem adott, korlátozott számú architektúra objektív összehasonlítása. A mintaszám viszonylag alacsony, a döntési kritériumok száma közepes, ami tipikusan MCDM-problémának felel meg, nem pedig gépi tanulási feladatnak.

A különböző MCDM módszerek közül a TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) került kiválasztásra. A TOPSIS geometriai alapú módszer, amely az alternatívák távolságát vizsgálja a pozitív ideális és negatív ideális megoldástól [51]. A módszer előnye, hogy:

- matematikailag egyszerű és transzparens,
- többdimenziós térben értelmezhető,
- a metriák normalizálását követően közvetlen távolságalapú összehasonlítást tesz lehetővé,
- reprodukálható és determinisztikus.

A jelen disszertációban a döntési kritériumok egyenlő súllyal kerülnek figyelembevételre, mivel a vizsgált dinamikai metriák azonos fontosságú jellemzőknek tekinthetők a migrálhatóság értékelése során. Ez a megközelítés elkerüli a szubjektív súlymeghatározást, és biztosítja az objektív, adatvezérelt rangsorolást.

A döntéstámogató keretrendszer tehát három lépésből áll:

1. A zárt hurkú viselkedési metriák kiszámítása (ujjlenyomat olvasó).
2. A metriák normalizálása és döntési mátrixba rendezése.
3. TOPSIS-alapú rangsorolás az ideális és negatív ideális referenciaértékekhez viszonyított távolság alapján.

E megközelítés lehetővé teszi, hogy a PI paraméterek változtatás nélküli migrálhatóságát többdimenziós, objektív és reprodukálható módon értékeljem anélkül, hogy a paramétereket módosítanám vagy újrarendelném.

2.9.1. Kutatási hipotézisek

A 2. fejezetben feltárt szakirodalmi eredmények és az azonosított kutatási rés alapján a disszertáció empirikus vizsgálatai az alábbi hipotézisek tesztelésére irányulnak.

H1.

A PI szabályozóparaméterek változtatás nélküli migrációja PLC-architektúraváltás esetén mérhető eltérést okoz a zárt hurkú dinamikai viselkedésben.

H2.

A zárt hurkú viselkedés eltérései többdimenziós jellegűek, és nem írhatók le egyetlen teljesítménymutató alapján.

H3.

A klasszikus és adaptív hangolási módszerek nem alkalmasak a PI paraméterek változtatás nélküli migrálhatóságának előzetes, folyamatfüggetlen értékelésére.

H4.

A zárt hurkú válasz viselkedési ujjlenyomat olvasója alkalmas az architektúrafüggő dinamikai eltérések kvantitatív jellemzésére.

H5.

A többmetriás, TOPSIS-alapú döntéstámogató keretrendszer képes objektíven rangsorolni a PI paraméterek migrálhatóságát különböző PLC-architektúrák esetén.

3. KÍSÉRLETI KERETRENDSZER ÉS MÓDSZERTAN

A fejezet célja a disszertációban alkalmazott kísérleti és módszertani keretrendszer bemutatása, beleértve a felhasznált hardvereszközöket, a mérési elrendezés kialakítását, valamint a vizsgálatok végrehajtásához alkalmazott szoftverkönyezetet. A fejezetben ismertetett eszközök és beállítások a disszertáció valamennyi mérésénél egységesen alkalmazásra kerülnek, függetlenül attól, hogy empirikus migrációs vizsgálatról vagy ujjlenyomat-alapú diagnosztikai eljárásról van szó. A módszertani megközelítés központi eleme a mérési feltételek kontrollálása és a vizsgálatok reprodukálhatóságának biztosítása, amely lehetővé teszi az egyes mérési eredmények objektív összehasonlítását. Az egyes későbbi fejezetekben bemutatott vizsgálatok esetén kizárólag az adott eljáráshoz szükséges specifikus beállítások kerülnek részletezésre, miközben az alapvető kísérleti infrastruktúra változatlan marad.

3.1. A kutatás módszertani koncepciója

A disszertációban alkalmazott módszertani megközelítés célja nem a szabályozó algoritmusok optimalizálása, hanem egy olyan egyszerű, jól értelmezhető és izolált vizsgálati környezet kialakítása, amely alkalmas a PLC-architektúraváltás során fellépő szabályozási jelenségek kimutatására és diagnosztikai elemzésére. A vizsgálatok empirikus szemléletre épülnek, ahol a szabályozási kör viselkedése közvetlen mérési adatok alapján kerül értékelésre, modellalapú feltételezések alkalmazása nélkül. A módszertani koncepció központi eleme a mérési feltételek egységesítése és a zavaró tényezők minimalizálása annak érdekében, hogy a különböző hardver- és firmware-konfigurációk közötti eltérések egyértelműen azonosíthatók legyenek. A kialakított megközelítés lehetővé teszi, hogy a megfigyelt eltérések elsődlegesen a PLC-architektúra és a digitális megvalósítás sajátosságaira legyenek visszavezethetők, ezáltal megalapozva a disszertáció későbbi fejezeteiben bemutatott empirikus adatbázist és ujjlenyomat-alapú diagnosztikai módszert.

3.2. Alkalmazott hardvereszközök (PLC, I/O, folyamatmodell)

3.2.1. PLC konfiguráció

A kísérleti vizsgálatok során alkalmazott PLC CPU-k és analóg I/O modulok főbb hardverjellemzőit a 3.1–3.3 táblázatok foglalják össze. A táblázatok célja a vizsgált architektúrák közötti különbségek egyértelmű, összehasonlítható bemutatása, különös tekintettel azokra a paraméterekre, amelyek a digitális megvalósítás és a szabályozási viselkedés szempontjából relevánsak.

3.1 Táblázat Alkalmazott PLC CPU-k főbb hardverjellemzői

Jellemző	PFC100 (750-8101)	PFC200 (750-8212)
CPU architektúra	Cortex-A8	Cortec-A8
Órajel	600 MHz	1 GHz
RAM	256 MB	512 MB
Flash memória	256 MB	4096 MB
PLC generáció	1. generáció	2. generáció

3.2 Táblázat Analóg bemeneti modulok hardverjellemzői (0–10 V)

Bemeneti modul típusa	750-459	750-478
Felbontás	12 bit	16 bit
Feszültségtartomány	0-10 V	0-10 V
Konverziós idő	10 ms	80 ms
Alap mérési hiba	±0,1 %	±0,1 %
Hőmérsékleti referencia	25 °C	25 °C
Hőmérsékletfüggés	0,01 %/K	0,01 %/K

3.3 Táblázat Analóg kimeneti modulok hardverjellemzői (0–10 V)

Kimeneti modul típusa	750-550	750-560	750-562
Felbontás	12 bit	10 bit	16 bit
Feszültségtartomány	0-10 V	0-10 V	0-10 V
Konverziós idő	2 ms	10 ms	5 ms
Alap mérési hiba	±0,1%	±0,2%	±0,05%
Hőmérsékleti referencia	25 °C	25 °C	25 °C
Hőmérséklet függés	0,02 %/K	0,02 %/K	0,02 %/K

A kísérleti környezet részeként egy egyszerű, soros kapcsolású ellenállás–kondenzátor (RC) tag került alkalmazásra, mint vizsgált folyamatmodell. Fontos hangsúlyozni, hogy ez a fizikai folyamat kizárólag az empirikus migrációs adatbázis kialakításához, azaz a 4. fejezetben bemutatott vizsgálatok során került felhasználásra. A disszertáció módszertani megközelítésének további részei – különösen az ujjlenyomat-alapú diagnosztikai módszer – folyamatfüggetlenek, és nem támaszkodnak a fizikai rendszer specifikus dinamikájára. Ez a szétválasztás biztosítja, hogy a későbbi fejezetekben bemutatott eredmények a PLC-architektúra és a digitális megvalósítás sajátosságait tükrözzék, ezáltal erősítve a vizsgálatok izoláltságát és általános érvényességét.

A kísérleti vizsgálatok során alkalmazott hardveres mérőrendszer meghatározó eleme egy Hantek6254BD típusú digitális oszcilloszkóp volt, amely 250 MHz sávszélességgel és 1 GSa/s mintavételi sebességgel rendelkezik. Az eszköz lehetővé tette a vizsgált jelek nagy időfelbontású, torzításmentes rögzítését, valamint a dinamikus jelenségek – különösen a

tranzien viselkedés, túllövés és oszcilláció – pontos megfigyelését. Az oszcilloszkóp csatlakoztatása a PLC-alapú szabályozási kör két kulcspontján történt: egyrészt a PLC analóg bemenetére érkező jel mérésére, amely a függvénygenerátorból származó referencia- vagy gerjesztő jel volt, másrészt a PLC analóg kimenetére, amely a PI szabályozó beavatkozó jeleként funkcionált, és egyben a zárt hurkú visszacsatolás részeként is szolgált.

Ez a konfiguráció lehetővé tette a bemeneti és kimeneti jelek egyidejű, szinkronizált vizsgálatát, így a szabályozási kör teljes dinamikai viselkedése közvetlenül elemezhetővé vált. Az oszcilloszkóp alkalmazása nem csupán a mérési paraméterek – például amplitúdó, időalap, triggerelési feltételek – precíz beállítását biztosította, hanem a rendszer működésének folyamatos monitorozását is, ami különösen fontos volt az architektúraváltások során jelentkező finom eltérések detektálásában. A mérési eredmények rögzítése és archiválása szintén ezen eszköz segítségével történt, így a nyers jelalakok nagy pontossággal visszaellenőrizhetők és utólagosan feldolgozhatók voltak.

A mérőrendszer ilyen kialakítása biztosította, hogy a vizsgálatok során kizárólag a PLC-architektúra és az analóg I/O modulok különbségeiből eredő hatások jelenjenek meg a rögzített jelalakokban, miközben a külső mérési bizonytalanság minimalizálható maradt. Ennek eredményeként a kísérleti adatbázis megbízható alapot szolgáltatott a szabályozási viselkedés objektív összehasonlító elemzéséhez.

3.2.2. Mérést végző és referenciajelet előállító hardverek

A szabályozási mérések során a referenciajel előállítását és a jelalakok reprodukálható generálását dedikált mérőműszer biztosította. A referenciajel-generáláshoz Agilent 33521A típusú, egycsatornás függvénygenerátort alkalmaztam, amely 250 MSa/s maximális mintakiadási sebességgel és 30 MHz sávszélességgel rendelkezik. A függvénygenerátor kizárólag az alapjel előállítására szolgált; a szabályozókör többi eleme (PLC, I/O modulok, folyamatmodell) változatlan maradt a teljes kísérletsorozat során.

A függvénygenerátor kimenete 0–10 V feszültségtartományban került beállításra, árnyékolt laboratóriumi kábelezéssel csatlakoztatva a rendszerhez, minimalizálva a külső elektromágneses zavarok hatását. A referenciajel egyidejűleg a PLC referencia-bemenetére és egy mérőcsatornára is csatlakoztatásra került, lehetővé téve annak ellenőrzését, hogy a bemeneti jel minden mérés során numerikusan azonos legyen. A kísérletek során két alapjelalak került alkalmazásra: szinusz- és négyszögjel. A jelalakoktól függetlenül minden mérésnél azonos numerikus paraméterek kerültek beállításra: a frekvencia 0,08 Hz (12,5 s periódusidő), a magas szint 2,0 V, az alacsony szint 1,2 V volt. E beállítások eredményeként a jel a teljes ipari 0–10 V tartományon belül maradt, elkerülve a bemeneti és kimeneti modulok telítési tartományát, ugyanakkor kellően nagy amplitúdót biztosítva a szabályozási eltérések kimutatásához.

A függvénygenerátor beállításai minden mérés előtt rögzített presetekből kerültek betöltésre, így a referenciajel alakja, szintje és időzítése futásról futásra változatlan maradt. Ez a megoldás biztosította, hogy az egyes architektúrák közötti különbségek kizárólag a vezérlőoldali hardver- és firmware-módosításokból származzanak, és ne a bemeneti jel előállításának eltéréseiből. A referenciajel ilyen módon történő előállítása és ellenőrzése

kulcsszerepet játszott a mérések reprodukálhatóságának és összehasonlíthatóságának biztosításában.

3.3. Szoftverkörnyezet és implementáció

A kísérleti vizsgálatok során alkalmazott PLC-programozás és adatgyűjtés a WAGO e!COCKPIT fejlesztőkörnyezetben történt (verzió: 1.11.3.1; CODESYS runtime: 3.5 SP17). A környezet egységesen biztosította a hardverkonfiguráció kezelését, a vezérlőprogram futtatását, valamint a mérési adatok rögzítését különböző CPU- és firmware-verziók esetén, a programkód módosítása nélkül. Ez lehetővé tette, hogy az architektúráváltások során kizárólag a hardver- és firmware-különbségek hatása jelenjen meg a mérésekben.

A mérési adatok rögzítése nem a PLC belső trendfunkciójával történt, hanem külső digitális oszcilloszkóp alkalmazásával. A teljes empirikus adatbázis, valamint a P-only és I-only vizsgálatok során a jelek rögzítése Hantek 6000 sorozatú oszcilloszkóppal történt, a gyártó által biztosított Hantek6000 PC-alapú szoftverkörnyezetben. A mérési konfiguráció minden architektúra esetén azonos volt. A mintavételi frekvencia 125 mintavétel/s értékre került beállításra, a rögzítési hossz minden esetben 4096 minta volt. A mérés indítása, leállítása, valamint a mintavételi paraméterek konfigurálása a Hantek szoftveren keresztül történt. A PLC nem végzett belső adatmentést vagy adatbázis-kezelést.

A rögzített adatsorok CSV formátumban kerültek exportálásra, és ezek képezték a további feldolgozás alapját. Az adatfeldolgozás Microsoft Excel környezetben történt, makrók alkalmazásával. A különböző mérési típusok (empirikus vizsgálat, P-only, I-only) esetén a rögzített 4096 mintából az elemzéshez szükséges ablak kivágása automatizált Excel-makró segítségével történt. Az adatok numerikus kiértékelése (metriaszámítás, átlagolás, eltérések meghatározása) teljes egészében az exportált CSV-adatok alapján történt. A feldolgozási folyamat determinisztikus és reprodukálható módon, manuális beavatkozás nélkül zajlott. A mérési konfiguráció és a mintavételi paraméterek minden architektúra esetén változatlanok maradtak, így biztosított az architektúrák közötti közvetlen és torzításmentes összehasonlíthatóság.

3.4. Kísérleti elrendezés és izolálási elv

A kísérleti vizsgálatok során két eltérő, de módszertanilag egységes kísérleti elrendezés került alkalmazásra: az empirikus migrációs adatbázis létrehozását szolgáló elrendezés, valamint az ujjlenyomat-alapú diagnosztikai vizsgálatokhoz kialakított izolált elrendezés. A két konfiguráció közös célja az volt, hogy a mérések során a szabályozási viselkedést kizárólag a PLC-architektúra, illetve annak módosításai határozzák meg, miközben minden egyéb tényező kontrollált vagy változatlan marad.

Az empirikus adatbázis kialakításához alkalmazott elrendezésben egy egyszerű, elsőrendű RC-tag szolgált folyamatmodellként. Ebben a konfigurációban a PLC analóg kimenete a kondenzátor feszültségét állította be, míg a kimeneti jel a PLC analóg bemenetén került visszacsatolásra. A folyamatmodell paraméterei, a jelút, valamint a mérési feltételek a teljes kísérletsorozat során változatlanok maradtak; a módosítások kizárólag a

vezérlőoldali architektúrát érintették (CPU-modul, firmware, analóg I/O felbontás). Ez az elrendezés tette lehetővé az architektúraváltás hatásának empirikus, folyamatoldali torzításoktól mentes vizsgálatát.

Az ujjlenyomat-alapú diagnosztikai vizsgálatok esetében a kísérleti elrendezés tovább egyszerűsítésre került: a fizikai folyamatmodell elhagyásával a PLC zárt hurkú, folyamatfüggetlen konfigurációban működött, ahol a kimeneti jel közvetlenül visszacsatolásra került a bemenetre. Ebben az elrendezésben a rendszer viselkedését kizárólag a vezérlő belső működése, a számítási környezet és az I/O-kezelés sajátosságai határozták meg. Ez az izolált kialakítás biztosította, hogy a rögzített ujjlenyomatok a PLC-architektúra dinamikai jellemzőit tükrözzék, függetlenül bármilyen folyamatoldali hatástól.

A kísérletek egyértelmű azonosíthatósága és reprodukálhatósága érdekében minden mérési konfiguráció egyedi azonosítót kapott. A referencia-rendszer Basic megjelöléssel szerepel, amely a PFC100 CPU-val és 12 bites bemeneti és kimeneti felbontással rendelkező alaparchitektúrát jelöli. A további konfigurációk a Case1, Case2, ... jelöléssel kerültek definiálásra, ahol minden eset egy jól meghatározott architektúramódosítást reprezentál. Ez a jelölési rendszer lehetővé teszi, hogy az egyes mérési eredmények egyértelműen hozzárendelhetők legyenek a vizsgált hardver- és firmware-konfigurációkhoz, és biztosítja az empirikus adatbázis strukturált feldolgozását a későbbi fejezetekben.

4. EMPIRIKUS MIGRÁCIÓS ADATBÁZIS

A disszertáció korábbi fejezetei bemutatták a PI szabályozók ipari alkalmazásának hátterét, a modellalapú megközelítések korlátait, valamint azt a módszertani és kísérleti keretrendszert, amely lehetővé teszi a PLC-architektúraváltás hatásainak izolált vizsgálatát. A jelen fejezet az empirikus vizsgálatok bemutatására fókuszál, és a kutatás első, kifejezetten bizonyító jellegű szakaszát képezi.

A fejezet elsődleges célja annak kísérleti igazolása, hogy a PI-szabályozóparaméterek változtatás nélküli migrációja PLC-architektúraváltás esetén nem tekinthető általánosan érvényes és biztonságos eljárásnak, még egyszerű, jól kontrollált szabályozóköri körben sem. A vizsgálatok során egy olyan laboratóriumi mérőrendszer került kialakításra, amelyben a szabályozási kör minden nem a PLC-hez kötődő eleme változatlan maradt, így a megfigyelt viselkedésváltozások egyértelműen a vezérlőarchitektúra módosítására vezethetők vissza.

A fejezet másodlagos, de módszertanilag kiemelten fontos célja egy empirikus referenciaadatbázis létrehozása. Ez az adatbázis később viszonyítási alapként szolgál a disszertáció következő fejezeteiben bemutatott, újjelenyomat-alapú diagnosztikai módszer validálásához. Az empirikus vizsgálatok folyamatfüggőek, azonban szándékosan egyszerű, szenzormentes és elsőrendű modellre épülnek, így alkalmasak annak kimutatására, hogy a migrációs probléma már ebben az idealizált környezetben is megjelenik. A későbbi fejezetek célja ennek a jelenségnek a folyamatfüggetlen, biztonságos és általánosítható kimutatása.

A fejezet nem egy új szabályozási algoritmus bemutatására vagy optimalizálására törekszik, hanem kizárólag arra, hogy empirikus bizonyítékot szolgáltatson a migrációs jelenség létezésére, és mérnöki szempontból értelmezhető kategóriákba sorolja az eltérő architektúrák viselkedését azonos PI-paraméterek mellett.

4.1. A referenciaarchitektúra (Basic rendszer) definiálása

Az empirikus migrációs vizsgálatok során alkalmazott összehasonlítási alap egy rögzített referenciaarchitektúra, amelyet a továbbiakban Basic rendszerként jelölök. A Basic rendszer célja egy olyan determinisztikus, reprodukálható szabályozóköri definiálása, amelyben a PI-szabályozóparaméterek viselkedése egyértelműen értelmezhető, és amelyhez képest a PLC-architektúra módosításából eredő eltérések objektív módon kimutathatók.

A Basic rendszer kialakításánál elsődleges szempont volt, hogy a szabályozási kör szerkezete a lehető legegyszerűbb legyen, ugyanakkor a PI-szabályozás szempontjából releváns dinamikai jelenségek mérhető formában jelenjenek meg. Ennek megfelelően a rendszer egy zárt hurkú, értékkövető PI-szabályozást valósít meg, ahol a szabályozott folyamat egy lineáris, elsőrendű dinamikájú RC-tag, a visszacsatolás pedig közvetlenül a PLC analóg bemeneti kártyáján keresztül történik.

4.2. A folyamatmodell matematikai leírása

A szabályozott folyamat egy soros ellenállás–kondenzátor (RC) tag, amelynek paraméterei a teljes vizsgálatsorozat során rögzítettek voltak. Az alkalmazott ellenállás 10 k Ω , a kapacitás 100 μ F, így a rendszer időállandója 1 s. A vizsgált folyamat statikus erősítését 1-nek vettem. A folyamat dinamikáját az alábbi differenciálegyenlet írja le:

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K \cdot u(t) \quad (8)$$

ahol $u(t)$ a beavatkozó jel (PLC analóg kimenet), $y(t)$ a folyamat kimeneti jele (a kondenzátor feszültsége).

A kondenzátor feszültségének mérése közvetlenül a PLC analóg bemeneti kártyáján történik, külső szenzor alkalmazása nélkül. Ez a szenzormentes kialakítás módszertanilag kiemelt jelentőségű, mivel a mérési láncból teljes mértékben kizárja a szenzorokhoz köthető zaj-, késleltetési és kalibrációs bizonytalanságokat. A visszacsatolt jel így kizárólag az analóg bemeneti kártya kvantálási, konverziós és időzítési sajátosságait tükrözi. Ennek következtében a szabályozókörben megfigyelhető eltérések közvetlenül a PLC-architektúra (CPU, firmware, AD/DA felbontás) tulajdonságaira vezethetők vissza.

4.2.1. A PI-szabályozó matematikai modellje

A Basic rendszerben alkalmazott szabályozó diszkrét idejű, párhuzamos (pozíciós) PI-algoritmus, amely minden PLC-ciklusban az alábbi összefüggés szerint számítja a beavatkozó jelet [52]:

$$u[n] = K_p \cdot e[n] + K_i \cdot \frac{T_s}{T_i} \sum_{k=0}^n e[k] \quad (9)$$

ahol

$$e[n] = r[n] - y[n] \quad (10)$$

a hibajel, $r[n]$ a referencijel, $y[n]$ a mért kimeneti jel, K_p a proporcionális erősítés, K_i integráló erősítése, T_i az integrálási időállandó, $T_s = 50$ ms a mintavételi idő.

A szabályozó algoritmus minden számítást REAL adattípuson végez, és minden PLC-ciklusban frissül. Anti-windup mechanizmus szándékosan nem került alkalmazásra, mivel a vizsgálatok célja nem a szabályozási minőség javítása, hanem az architektúra-függő dinamikai jelenségek – például túllövés, helyreállási idő és integrált hibák – torzításmentes megfigyelése.

A szabályozó nyers kimeneti értéke numerikus szaturáláson esik át a túlcsoordulás elkerülése érdekében:

$$u_{\text{lim}}[n] = \min(\max(u[n], -32000), +32000) \quad (11)$$

Ez a tartomány kompatibilis a 16 bites előjeles numerikus ábrázolással, és biztonságos távolságot tart a szélső értékektől, elkerülve a firmware-függő numerikus instabilitásokat.

4.2.2. A PI-paraméterek meghatározása

A Basic rendszer PI-paraméterei kísérleti úton, Ziegler–Nichols módszer alkalmazásával kerültek meghatározásra. A kritikus erősítés (K_u) és az oszcillációs periódus (P_u) mérését követően a PI-szabályozóra vonatkozó klasszikus összefüggések kerültek alkalmazásra:

$$K_p = 0,45 \cdot K_u, \quad T_i = 0,8 \cdot P_u \quad (12)$$

A mérési eljárás eredményeként a vizsgálatok során rögzített paraméterértékek:

$$K_p = 3,0, \quad T_i = 0,25 \text{ s} \quad (13)$$

Ezek az értékek a teljes empirikus vizsgálat sorozat során változatlanok maradtak. A hangolás célja nem optimális vagy robusztus ipari beállítás elérése volt, hanem egy stabil, ugyanakkor az architektúraváltás hatásaira érzékeny referenciaállapot létrehozása, amely alkalmas a migrációs jelenségek kimutatására.

4.2.3. Módszertani szerep és értelmezés

A Basic rendszer nem ipari „best practice” megoldásként, hanem mérési etalonként funkcionál. Tudatosan leegyszerűsített, elsőrendű és szenzormentes kialakítása kizárja a folyamatoldali és mérőlánc-eredetű bizonytalanságokat. Ennek eredményeként, ha azonos PI-paraméterek mellett eltérő szabályozási viselkedés figyelhető meg különböző PLC-architektúrákon, akkor ez az eltérés egyértelműen a vezérlőarchitektúra különbségeiből ered.

Ez a referenciaarchitektúra képezi alapját a fejezet további alfejezeteiben bemutatott empirikus összehasonlításoknak, valamint később – validációs szerepben – a folyamatfüggetlen, ujjlenyomat-alapú diagnosztikai módszernek. A Basic rendszer tehát nem önmagában hordoz tudományos újdonságot, hanem azt a stabil, ellenőrizhető kiindulópontot biztosítja, amely nélkül a migrációs jelenségek objektív értelmezése nem lenne lehetséges.

4.3. Vizsgált architektúraváltozatok és jelölési rendszer

Az empirikus migrációs vizsgálatok során a referenciaarchitektúrához (Basic rendszer) képest összesen tizenöt (15) eltérő PLC-konfigurációt vizsgáltam numerikusan. Ezek a konfigurációk a továbbiakban a Case1–Case15 jelöléssel szerepelnek. A jelölési rendszer célja kizárólag az egyes architektúraváltozatok egyértelmű, visszakövethető azonosítása, nem pedig azok előzetes minősítése vagy rangsorolása.

A Basic rendszer a rögzített referenciaállapotot képviseli, amelynek hardver- és szoftverkonfigurációja, PI-paraméterei, mintavételi ideje és jelútja a teljes vizsgálat sorozat során változatlan maradt (lásd 4.1 alfejezet). Minden további Case-konfiguráció ettől a referenciaállapottól tér el pontosan dokumentált módon, kizárólag a vezérlőoldali architektúra módosításával.

A Case-jelölés sorszám-alapú, és nem hordoz semmilyen implicit információt a módosítás típusáról vagy annak hatásáról. A Case1–Case15 elnevezés kizárólag azt jelzi, hogy az adott konfiguráció eltér a Basic rendszertől, és része a numerikus összehasonlító

vizsgálatnak. A szabályozási viselkedés értékelése minden esetben csak a későbbi alfejezetekben, azonos metriák mentén történik meg.

A vizsgált konfigurációk három alapvető architektúraváltoztatási dimenzió mentén különböznek egymástól:

- a PLC CPU-modul típusa (PFC100 / PFC200),
- a firmware-verzió,
- az analóg bemeneti és/vagy kimeneti modul felbontása és konverziós jellemzői.

Egyes Case-ek egy, míg mások több architektúra-elem módosítását tartalmazzák. A módosítások minden esetben explicit módon, táblázatos formában kerülnek rögzítésre annak érdekében, hogy az empirikus eredmények később egyértelműen visszavezethetők legyenek az alkalmazott hardver- és firmware-konfigurációkra.

4.3.1. Vizsgált architektúrakonfigurációk áttekintése

A 4.1 táblázat összefoglalja a referencia- és a Case-konfigurációk főbb jellemzőit. A táblázat a numerikus vizsgálatok strukturális alapját képezi: minden későbbi eredmény, metria és összehasonlítás ehhez a jelölési rendszerhez kötötten értelmezhető.

4.1. Táblázat *A kísérleti vizsgálatok során alkalmazott PLC hardverkonfigurációk összefoglalása (CPU-típus és analóg I/O felbontások szerint)*

Kísérleti hardver konfiguráció	CPU verzió	Input (bits)	Output (bits)
Basic	PFC100	12	12
Case1	PFC100	12	10
Case2	PFC100	16	12
Case3	PFC100	16	10
Case4	PFC100 FW	12	12
Case5	PFC100 FW	12	10
Case6	PFC100 FW	12	16
Case7	PFC100 FW	16	12
Case8	PFC100 FW	16	10
Case9	PFC100 FW	16	16
Case10	PFC200	12	12
Case11	PFC200	12	10
Case12	PFC200	12	16
Case13	PFC200	16	12
Case14	PFC200	16	10
Case15	PFC200	16	16

(A konkrét firmware-verziók és modulazonosítók részletesen a 3. fejezetben kerültek rögzítésre.)

A 4.1 táblázat alapján megállapítható, hogy a numerikus vizsgálatok összesen 16 konfigurációt fednek le (1 Basic + 15 Case), amelyek lefedik a tipikus ipari migrációs forgatókönyveket: tisztán I/O-oldali módosításokat, firmware-frissítést, CPU-generációváltást, valamint ezek kombinációit. A jelölési rendszer és a konfigurációs táblázat

biztosítja, hogy az empirikus eredmények értelmezése során a szabályozási viselkedésben megjelenő eltérések nem általánosított módon, hanem konkrét architektúraváltozásokhoz kötötten kerüljenek elemzésre. Ez a strukturált megközelítés teszi lehetővé a későbbi fejezetekben a migrációs kategóriák objektív meghatározását, valamint az ujjlenyomat-alapú módszer empirikus validálását.

4.4. Empirikus mérési eljárás és adatgyűjtési folyamat

Az empirikus migrációs vizsgálatok célja az volt, hogy azonos PI-szabályozóparaméterek mellett, kontrollált és determinisztikus mérési környezetben rögzítsem a PLC-architektúraváltásból eredő szabályozási viselkedésváltozásokat. Ennek érdekében a mérési eljárás minden konfiguráció esetén azonos protokoll szerint zajlott, és kizárólag a 4.3 alfejezetben definiált architektúraváltozások kerültek bevezetésre. A mérési folyamat során sem a szabályozó algoritmus, sem a PI-paraméterek, sem a folyamatmodell, sem a bemeneti gerjesztések nem változtak. A mérési eljárás alapelve az izolált összehasonlíthatóság volt: minden Case-konfiguráció ugyanazon referenciajel-készlettel, azonos PLC ciklusidő mellett, azonos külső mintavételi konfigurációval és azonos numerikus feldolgozással került vizsgálatra. A mérési infrastruktúra részletes hardver- és szoftverleírását a 3. fejezet tartalmazza; a jelen alfejezet kizárólag a mérési lépések sorrendjét és az adatgyűjtés logikáját rögzíti.

4.4.1. Mérési forgatókönyv

Minden architektúrakonfiguráció esetén a mérési eljárás az alábbi lépésekből állt:

- a megfelelő Case-konfiguráció hardveres beállítása (CPU, firmware, analóg I/O modulok),
- a változatlan vezérlőprogram és PI-algoritmus betöltése,
- a belső állapotváltozók inicializálása (integrátor, előző hibajel, kimeneti érték),
- a referenciajel generálásának indítása,
- a zárt hurkú szabályozási válasz rögzítése külső oszcilloszkóppal,
- a mérési adatok archiválása CSV formátumban.

A mérések indításakor minden belső állapot nullázásra került, így biztosított volt, hogy a rendszer minden esetben azonos kezdeti feltételekből induljon. Ez különösen fontos volt az integráló tagot tartalmazó PI-szabályozás esetén, mivel az előző futásokból származó integrátorállapot torzíthatta volna az összehasonlítást.

A vizsgálatok értékkövető szabályozási feladatként kerültek végrehajtásra. Minden Case-konfiguráció esetén két, egymást kiegészítő referenciajel-típus került alkalmazásra:

- szinuszos bemeneti jel,
- négyszögjeles bemeneti jel.

A referenciajelek numerikus paraméterei minden mérés során azonosak voltak:

- frekvencia: $f = 0,08$ Hz
- periódusidő: $T = 12,5$ s

- magas szint: 2,0 V
- alacsony szint: 1,2 V

Ezek a beállítások biztosították, hogy a jel a 0–10 V ipari tartományon belül maradjon, elkerülve az analóg I/O modulok telítési tartományát, miközben elegendő dinamikai tartalékot biztosított a különbségek kimutatásához.

A szinuszos jel a rendszer kvázi-stacionárius harmonikus viselkedésének vizsgálatára szolgált, míg a négyszögjel a gyors átmenetekre adott válasz, valamint az időzítési és kvantálási hatások érzékeny feltárását tette lehetővé. A két jel együttes alkalmazása biztosította, hogy mind az amplitúdó- és fázisjellegű, mind a tranziens dinamikai eltérések megfigyelhetők legyenek.

4.4.2. Mintavételezés és adatgyűjtés

A PLC szabályozó ciklusideje a teljes mérési sorozat során $T_s = 50$ ms volt. A mérési adatok rögzítése nem a PLC belső trend- vagy adatnaplózó funkcióival történt, hanem külső digitális oszcilloszkóppal. A jeltörzítés Hantek 6000 sorozatú oszcilloszkóppal, a Hantek6000 PC-alapú szoftverkörnyezetben zajlott.

A külső mintavételi paraméterek:

- mintavételi frekvencia: 125 mintavétel/s,
- mintavételi idő: 8 ms,
- rögzítési hossz: 4096 minta.

A mérés indítása, leállítása és konfigurálása kizárólag a mérőszoftverben történt. A PLC nem végzett belső adatmentést, adatbázis-kezelést vagy időbélyeg-alapú archiválást.

A mintavételi frekvencia (8 ms) kisebb volt, mint a PLC ciklusidő (50 ms), így a mérési rendszer időbázisa független volt a vezérlő végrehajtási ütemétől. Ez biztosította, hogy a rögzített jelalak kizárólag a zárt hurkú rendszer dinamikai viselkedését tükrözze, és ne tartalmazzon PLC-belső adatgyűjtési torzításokat vagy firmware-specifikus időzítési eltéréseket. A rögzített jelek CSV formátumban kerültek exportálásra. A további feldolgozás Microsoft Excel környezetben történt (verzió: 2601 (build: 19628.20204)).

Az empirikus, vizsgálatok esetében a 4096 mintából az elemzéshez szükséges időablak kivágása automatizált Excel-makró segítségével történt. Az ablakolás minden Case-konfiguráció esetén azonos logika szerint zajlott, biztosítva az összehasonlíthatóságot. A numerikus metrikák számítása (minimum, maximum, amplitúdó, túllövés, átlagos hiba, integrált hiba, beállási idő stb.) kizárólag a CSV-adatok alapján történt, determinisztikus képletekkel. A feldolgozási folyamat manuális beavatkozást nem igényelt.

4.4.3. Reprodukálhatóság és kontroll

A mérési eljárás során semmilyen adaptív vagy automatikus paraméterhangolás nem történt. A PI-paraméterek, a PLC ciklusidő, a referenciajel-készlet, a külső mintavételi konfiguráció és a numerikus feldolgozás minden konfiguráció esetén változatlan maradt.

Ennek eredményeként a különböző Case-konfigurációk között megfigyelt eltérések kizárólag a PLC-architektúra módosításából származhatnak.

A mérési eljárás determinisztikus és reprodukálható: azonos hardver- és firmware-konfiguráció mellett az eredmények ismételt futtatás esetén is konzisztens viselkedést mutattak. Ez a tulajdonság alapvető feltétele annak, hogy az empirikus adatbázis referenciaként és validációs alapként szolgálhasson a disszertáció további fejezeteiben bemutatott diagnosztikai és döntéstámogató módszerek számára.

4.5. Kiértékelési metriák alkalmazása az empirikus adatbázisban

Az empirikus migrációs adatbázis kiértékelése során a szabályozási viselkedés összehasonlítása egységes, numerikus metriák mentén történt. A metriák kiválasztásának célja az volt, hogy a különböző PLC-architektúrákhoz tartozó válaszjelek közötti eltérések objektíven, számszerűen és reprodukálható módon legyenek kimutathatók, azonos PI-paraméterek mellett. A metriák definíciói és általános szabályozástechnikai értelmezése a 4.5 fejezetben kerültek részletezésre. A jelen alfejezet kizárólag azt rögzíti, hogyan és milyen feltételek mellett kerültek ezek a metriák alkalmazásra az empirikus migrációs vizsgálatokban.

4.5.1. Kiértékelési adatkészlet és időtartomány

Minden mérési futás során a szabályozási kör diszkrét idejű mintasorozatként került rögzítésre, azonos mintavételi idővel $T_s = 50$ ms. Az összehasonlíthatóság biztosítása érdekében minden mérési futásból az első $N = 4100$ mintát használtam fel a kiértékeléshez. Ez az időszeglet elegendő hosszúságú volt ahhoz, hogy a tranziens és az állandósult szakasz egyaránt szerepeljen benne, mind szinuszos, mind négyszögjeles gerjesztés esetén. A kiértékelés minden Case-konfigurációra azonos módon történt; a referencijel $r[n]$ és a mért kimeneti jel $y[n]$ közötti eltérést a teljes ablakon vizsgáltam.

4.5.2. Hibajel és alapjel-eltérés

A diszkrét idejű hibajel definíciója [52]:

$$e[n] = r[n] - y[n] \quad (14)$$

ahol $r[n]$ a referencijel, $y[n]$ pedig a PLC analóg bemenetén mért kimeneti jel az n -edik mintavételi ciklusban.

A további metriák minden esetben erre a hibajelre, illetve a kimeneti jel időbeli alakulására épülnek.

4.5.3. Amplitúdó- és szélsőérték-alapú metriák

A kimeneti jel maximális és minimális értékei a teljes kiértékelési ablakban [53]:

$$y_{\max} = \max_{n \in [0, N]} y[n], y_{\min} = \min_{n \in [0, N]} y[n] \quad (15)$$

Ezek a mutatók különösen alkalmasak a túllövés, alullendülés és jelalak-torzulás kimutatására, különösen négyszögjeles gerjesztés esetén.

Az első maximum ideje [53] :

$$t_{\max} = n_{\max} \cdot T_s \quad (16)$$

ahol n_{\max} az első olyan index, amelyre $y[n]$ lokális maximumot vesz fel. Ez a mutató a tranziens szakasz időzítésének összehasonlítására szolgál.

4.5.4. Időalapú dinamikai mutatók

Az emelkedési idő (rise time) a kimeneti jel azon időtartama, amely alatt a jel először eléri a referenciaértéket [53]:

$$T_r = t(y(t) = r(t)) - t_0 \quad (17)$$

ahol t_0 a gerjesztés kezdetének időpontja.

A robusztusabb összehasonlítás érdekében alkalmaztam a 10–90%-os emelkedési időt [53]:

$$T_{r,10-90} = t(y = 0.9 r) - t(y = 0,1 r) \quad (18)$$

amely kevésbé érzékeny a túllövésre és a kezdeti zajokra.

A beállási idő T_s definíciója [53]:

$$T_s = \min \{t \mid |y(t) - r(t)| \leq \Delta \forall t' \geq t\} \quad (19)$$

ahol a tűrési sáv a vizsgálatok során $\Delta = \pm 5\%$ volt és minden olyan t' időpontra, amely nagyobb vagy egyenlő, mint t . Ez a metria a hosszabb távú stabilitás és dinamikai megfelelés értékelésére szolgál.

4.5.5. Hiba metriák

4.5.5.1 Állandósult hiba

Az állandósult hiba az állandósult szakaszban mért átlagos eltérés[53]:

$$e_{ss} = \frac{1}{N_{ss}} \sum_{n=N_{ss}}^N e[n] \quad (20)$$

ahol N_{ss} az állandósult állapot kezdetét jelöli. Ez a mutató különösen érzékeny az integráló ág viselkedésére és a kvantálási hatásokra.

4.5.5.2 Integrált hibamértékek

A szabályozási teljesítmény időbeli összegzett jellemzésére két klasszikus integrált hibamértéket alkalmaztam.

Az integrált abszolút hiba (IAE) [53]:

$$IAE = \sum_{n=0}^N |e[n]| \cdot T_s \quad (21)$$

Az integrált négyzetes hiba (IQE) [53]:

$$IQE = \sum_{n=0}^N e^2 [n] \cdot T_s \quad (22)$$

Az IAE a teljes hibatartalom nagyságát méri, míg az IQE a nagy amplitúdójú eltéréseket négyzetes súlyozással hangsúlyozza. A két metria együttes alkalmazása lehetővé teszi, hogy az architektúraváltás hatása ne csak lokális jelalak-eltérésekben, hanem globális teljesítményromlásban is kimutatható legyen.

4.5.6. Alkalmazási elvek az empirikus adatbázisban

A felsorolt metriák minden Case-konfigurációra, azonos módon kerültek kiszámításra. Nem történt normalizálás, súlyozás vagy előzetes kategorizálás; a nyers metriaértékek szolgálták alapul az empirikus összehasonlításhoz. Ez a megközelítés biztosítja, hogy a mért eltérések közvetlenül a PLC-architektúra módosításából származzanak, és ne a kiértékelési eljárás mellékhatásai legyenek. A metriák együttes alkalmazása lehetővé tette, hogy a migrációs viselkedés nem egyetlen jellemző mentén, hanem időbeli, amplitúdó- és hibaalapú szempontok szerint is értelmezhető legyen. Ezek az eredmények képezik az alapját a 4.6–4.7 alfejezetekben bemutatott empirikus összehasonlításoknak és migrációs kategorizálásnak.

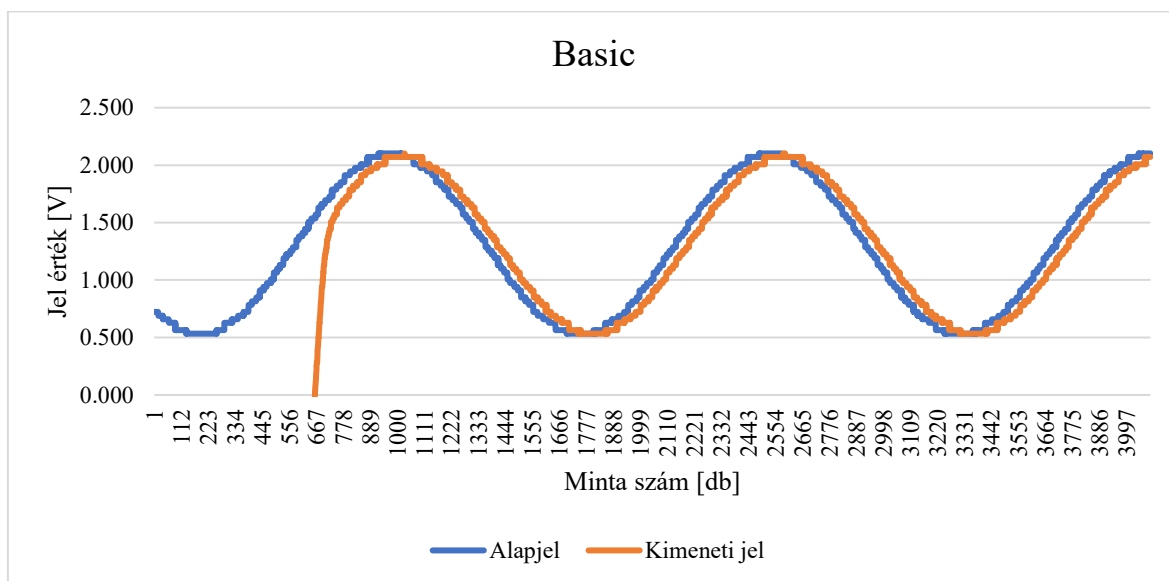
4.6. Eredmények bemutatása értékkövető vizsgálatok alapján

Az empirikus migrációs adatbázis kiértékelése során a 4.3 alfejezetben definiált 15 Case-konfiguráció szabályozási viselkedése került összehasonlításra a Basic referenciaarchitektúrával, minden esetben azonos PI-paraméterek, azonos mérési eljárás és azonos bemeneti gerjesztés alkalmazása mellett. A jelen alfejezet célja annak részletes bemutatása, hogy az így rögzített mérési eredmények grafikus és numerikus formában egyaránt igazolják: a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja nem minden vizsgált PLC-architektúra esetén valósítható meg. Fontos hangsúlyozni, hogy a bemutatott eredmények nem egyedi mérési anomáliák, hanem reprodukálható, architektúrafüggő viselkedésmintázatok. A mérések során sem a szabályozó algoritmus, sem a PI-paraméterek, sem a folyamatmodell nem változott; a megfigyelt eltérések kizárólag a PLC-architektúra (CPU, firmware, AD/DA felbontás) módosításához köthetők. Ennek következtében az alfejezetben bemutatott eredmények közvetlen empirikus bizonyítékként szolgálnak a migrálhatósági probléma létezésére. Az értékkövető vizsgálatok két, egymástól független gerjesztési módban kerültek végrehajtásra: szinuszos, illetve négyszögjeles bemeneti jellel. A két vizsgálat típus külön alfejezetben, azonos értelmezési logika mentén kerül bemutatásra. A cél mindkét esetben az, hogy az adott gerjesztés mellett önmagában, numerikus és grafikus összehasonlítással kimutatható legyen a migrálhatóság korlátozottsága.

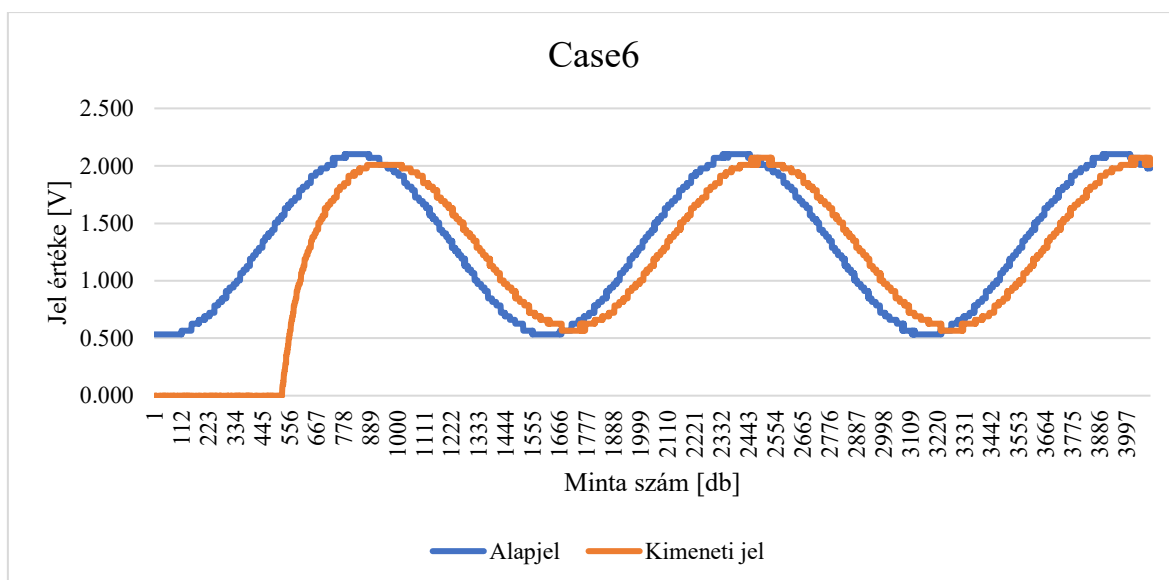
4.6.1. Szinuszos bemeneti jellel végzett vizsgálatok eredményei

A szinuszos bemeneti jel alkalmazása a szabályozási kör harmonikus, kvázi stacionárius viselkedésének vizsgálatát tette lehetővé. Mivel a szinuszos jel egyetlen domináns frekvenciát tartalmaz, a rendszer válasza jól jellemezhető amplitúdó-, fázis- és integrált

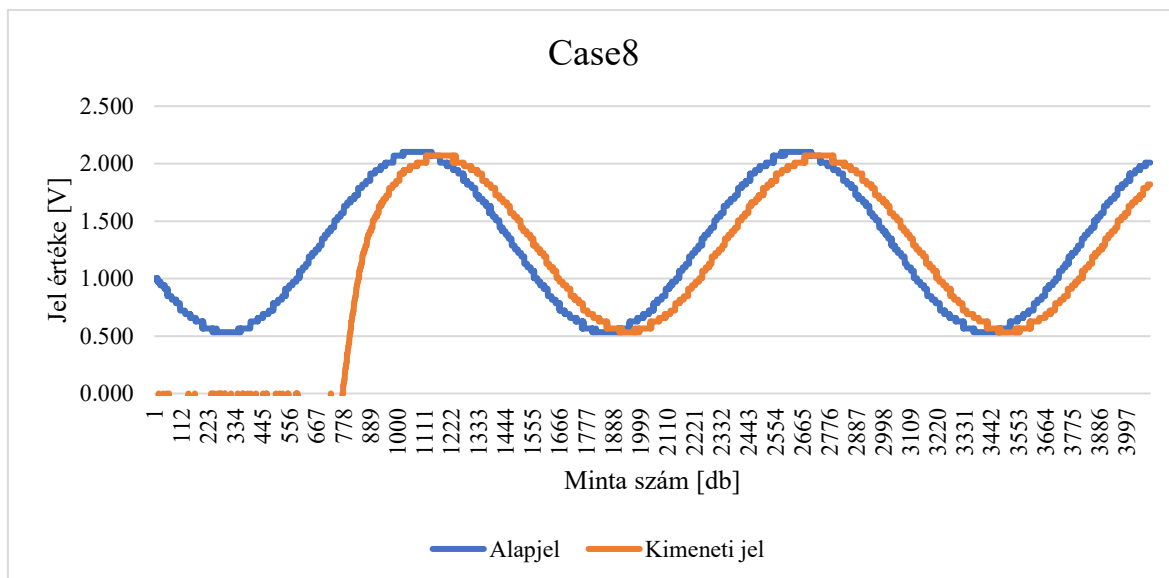
hibamértékek mentén. Ez a vizsgálat különösen alkalmas annak megállapítására, hogy azonos PI-paraméterek mellett a szabályozó mennyire képes megőrizni követési képességét különböző PLC-architektúrákon.



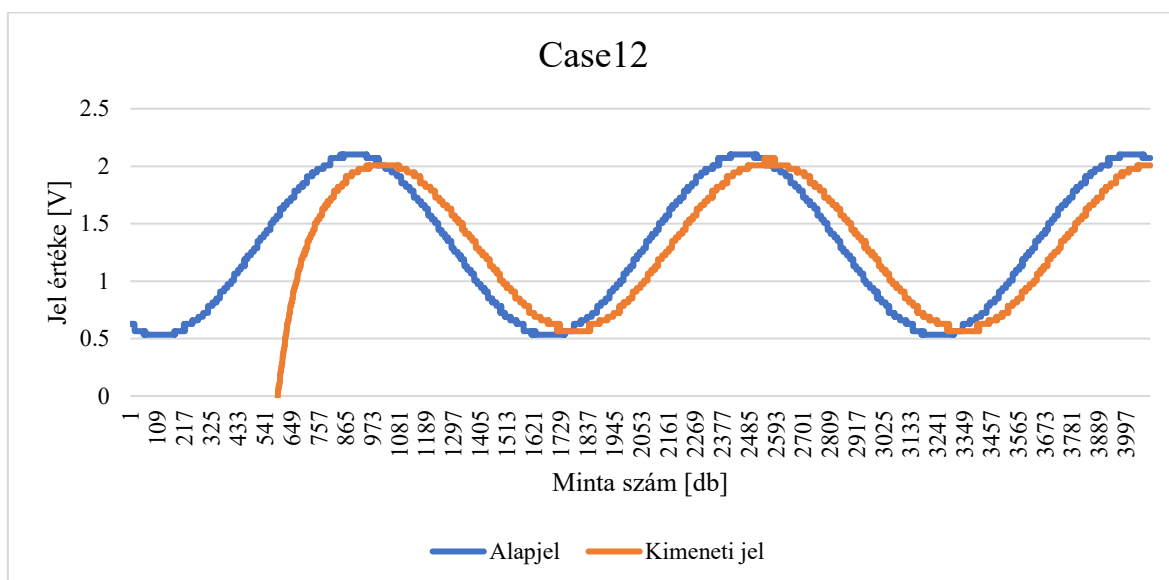
4.1. *Ábra* A Basic rendszer szinuszos referencijelre adott válaszáának empirikus vizsgálata



4.2. *Ábra* A Case 6 rendszer szinuszos referencijelre adott válaszáának empirikus vizsgálata



4.3. Ábra A Case 8 rendszer szinuszos referenciajelre adott válaszáinak empirikus vizsgálata



4.4. Ábra A Case 12 rendszer szinuszos referenciajelre adott válaszáinak empirikus vizsgálata

A grafikus eredmények alapján (4.1-4.4 ábra) már első ránézésre megfigyelhető, hogy a Case-konfigurációk egy részénél a kimeneti jel nem esik egybe a Basic referenciaarchitektúra válaszával. Egyes esetekben csökkent amplitúdó, más esetekben fáziskésés, illetve az indulási tranzienst eltérő lefutása figyelhető meg. Ezek a jelenségek ugyan nem minden konfiguráció esetén drasztikusak, azonban következetesen ugyanazon Case-eknél jelennek meg, ami arra utal, hogy nem véletlenszerű mérési zajról van szó.

A grafikus megfigyeléseket numerikus kiértékelés támasztja alá. A szinuszos vizsgálatokhoz tartozó metriák – beleértve a szélsőértékeket, az időalapú mutatókat és az integrált hibamértékeket – minden Case-re kiszámításra kerültek, és az alábbi táblázat foglalja össze az eredményeket.

4.2. Táblázat A szinuszos gerjesztéssel végzett empirikus vizsgálatok eredményei a vizsgált rendszerek esetén

	Maximum [V]	σ : First max [s]	Tp: Ramp time [s]	Minimum [V]	Konstans hiba	IQE	IAE
Basic	2,102	0	4,54	0,53	270,56	379,43	422,09
Case1	2,102	0	4,47	0,53	270,09	378,51	422,82
Case2	2,102	0	4,17	0,53	275,87	386,47	399,85
Case3	2,102	0	4,22	0,53	261,49	375,18	395,77
Case4	2,102	0	4,216	0,53	261,49	375,18	395,77
Case5	2,102	0	4,45	0,53	130,35	322,58	303,73
Case6	2,0078	-0,0942	4,37	0,56	299,08	497,90	602,33
Case7	2,102	0	4,33	0,53	273,48	381,82	400,79
Case8	2,102	0	4,33	0,53	273,48	381,82	400,79
Case9	2,0706	-0,0314	4,33	0,53	294,28	481,11	562,96
Case10	2,102	0	2,23	0,53	265,98	377,99	420,34
Case11	2,0706	-0,0314	3,90	0,50	272,03	379,85	422,82
Case12	2,0078	-0,0942	4,44	0,56	310,87	503,70	603,65
Case13	2,102	0	4,13	0,53	271,43	398,00	432,39
Case14	2,102	0	3,47	0,53	295,15	389,79	431,07
Case15	2,102	0	4,07	0,53	295,15	389,79	431,07

A táblázat alapján megállapítható, hogy a Maximum és Minimum értékek a legtöbb konfigurációban a Basic referenciaértékhez közeli tartományban maradnak (jellemzően $\pm 2\%$ eltérésen belül). Ez arra utal, hogy a szinuszos jel amplitúdója önmagában sok esetben viszonylag stabil marad architektúraváltás esetén is. Ugyanakkor a Case6 és Case12 esetében a maximum érték csökkenése és a minimum érték növekedése egyértelmű amplitúdócsillapodásra utal, ami már a szabályozási dinamika módosulását jelzi.

A Ramp time értékek vizsgálata alapján több Case-konfiguráció esetén a felfutási idő számottevően eltér a Basic referenciaértéktől. Különösen a Case2, Case3, Case9 és Case14 esetében figyelhető meg akár 0,5–1 s nagyságrendű növekedés, ami lassabb dinamikára és növekvő fáziskésésre utal. Ezek az eltérések már önmagukban azt jelzik, hogy a szabályozó időbeli válasza nem invariáns a PLC-architektúra módosítására.

A konstans hiba az egyik legérzékenyebb metria, mivel a PI szabályozó integráló ágának elsődleges feladata az állandósult hiba minimalizálása. A Basic rendszerhez tartozó értékek 270–275 közötti tartományban helyezkednek el. Ehhez képest a Case5 extrém alacsony értéke (≈ 130) jelentős integrátorműködési eltérésre utal, míg a Case6 és Case12 esetében a konstans hiba jelentős növekedése (>300) figyelhető meg. Ezek az eltérések már numerikusan is azt jelzik, hogy az integráló hatás architektúrafüggő módon módosul.

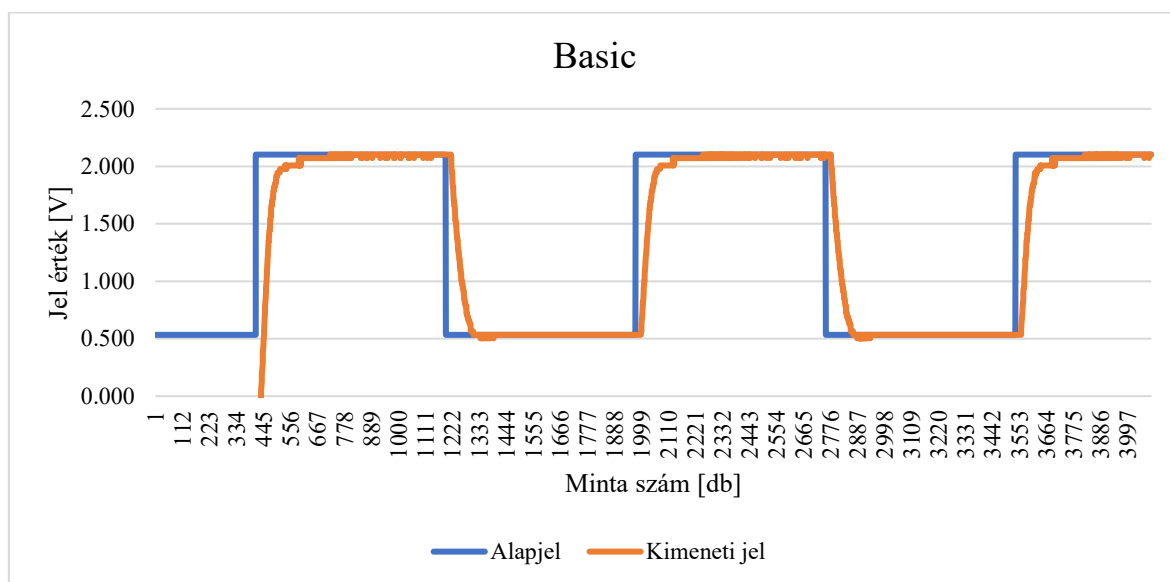
Az IQE és IAE mutatók a teljes mérési ablakon felhalmozódó hiba nagyságát jellemzik. A Basic rendszerhez tartozó IQE ≈ 380 –420 és IAE ≈ 400 –430 tartományához képest a Case6

és Case12 kiugróan magas értékeket mutat ($IQE > 490$, $IAE > 600$). Ezek az értékek már nem tekinthetők kisebb minőségromlásnak, hanem a teljes szabályozási ciklus során fennálló, jelentős eltérésre utalnak. Ez a szinuszos vizsgálat alapján potenciálisan nem migrálható eseteket jelez.

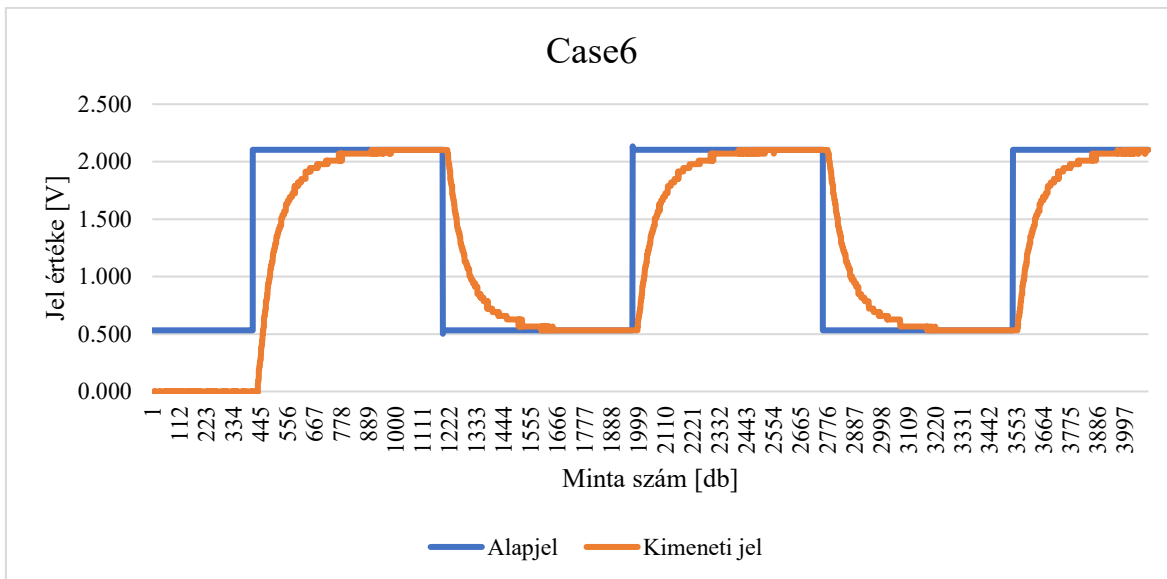
Összességében a szinuszos bemeneti jellel végzett vizsgálatok numerikus és grafikus eredményei egyaránt azt mutatják, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli átvitele nem garantálja a harmonikus követési viselkedés megőrzését minden PLC-architektúra esetén.

4.6.2. Négyszögjeles bemeneti jellel végzett vizsgálatok eredményei

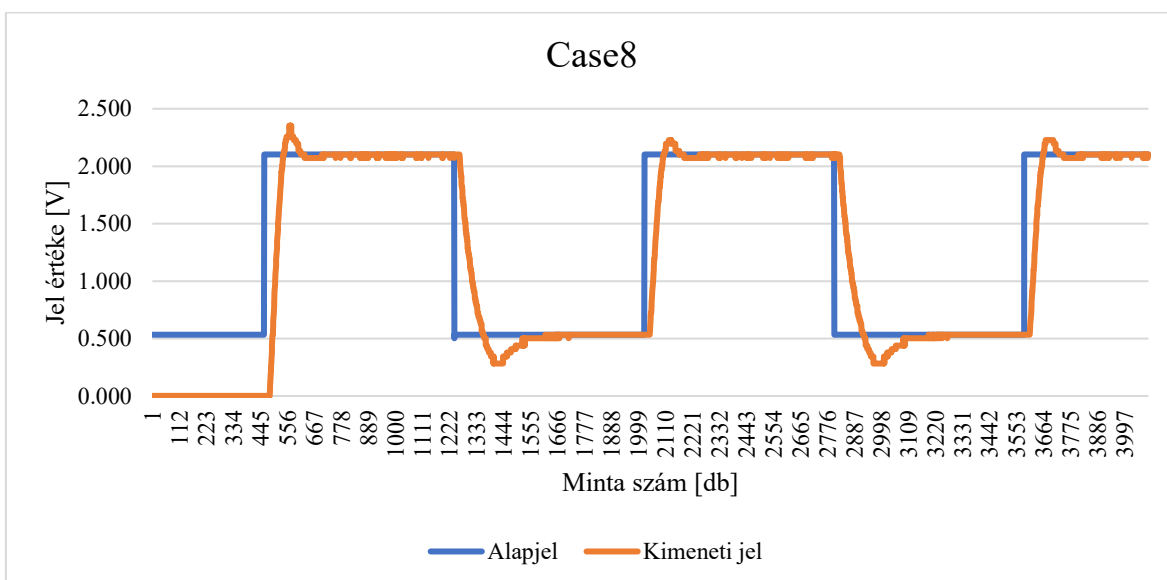
A négyszögjeles bemeneti gerjesztés a szabályozási kör tranziens viselkedésének vizsgálatára szolgált. A gyors szintváltások érzékenyen tárják fel a rendszer időzítési, kvantálási és numerikus feldolgozási sajátosságait, ezért ez a vizsgálat különösen alkalmas a migrációs problémák empirikus kimutatására.



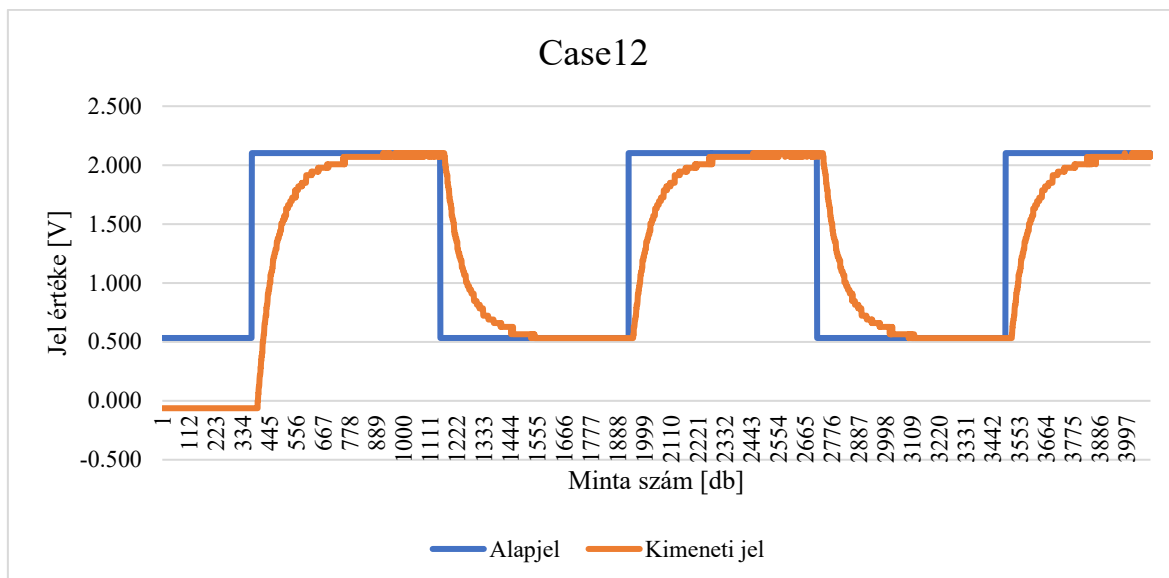
4.5. Ábra A Basic rendszer négyszög referencijelre adott válaszáinak empirikus vizsgálata



4.6. *Ábra* A Case 6 rendszer négyszög referenciajelre adott válaszáának empirikus vizsgálata



4.7. *Ábra* A Case 8 rendszer négyszög referenciajelre adott válaszáának empirikus vizsgálata



4.8. Ábra A Case 12 rendszer négyzög referencijelre adott válaszának empirikus vizsgálata

A grafikus eredmények (4.5-4.8 ábra) ebben az esetben még markánsabb eltéréseket mutatnak. Több Case-konfiguráció esetén megfigyelhető a túllövés növekedése, az emelkedési és beállási idők jelentős meghosszabbodása, valamint a jelalak torzulása az átmeneti szakaszban. Ezek a jelenségek közvetlen hatással vannak a szabályozási minőségre, és ipari környezetben potenciálisan kockázatos működést eredményezhetnek. Az kiértékelt eredményeket a 4.3 táblázat mutatja be.

4.3. Táblázat A négyszög gerjesztéssel végzett empirikus vizsgálatok eredményei a vizsgált rendszerek esetén

	Maximum [V]	σ : First max [s]	Tp: Ramp time [s]	Setup time [s]	Minimum [V]	TR [s]	TR10-90 [s]	Konstan s hiba	IQE	IAE
Basic	2,10	0,00	2,26	0,49	0,50	0,42	0,30	129,0	321,0	299,8
Case1	2,10	0,00	2,13	0,45	0,50	0,40	0,28	127,7	319,5	299,5
Case2	2,26	0,16	0,58	0,35	0,28	0,33	0,21	136,2	372,9	351,7
Case3	2,26	0,16	0,62	0,36	0,28	0,34	0,22	126,9	343,5	332,9
Case4	2,10	0,00	1,90	0,48	0,50	0,41	0,29	124,7	319,8	296,1
Case5	2,10	0,00	2,17	0,48	0,50	0,43	0,31	130,4	322,6	303,7
Case6	2,10	0,00	3,74	1,57	0,55	1,31	1,06	155,7	459,4	475,0
Case7	2,26	0,16	0,63	0,37	0,28	0,34	0,22	146,1	337,6	361,9
Case8	2,35	0,25	0,64	0,37	0,28	0,35	0,22	125,2	337,6	330,6
Case9	2,10	0,00	2,86	1,18	0,53	1,02	0,78	154,5	473,4	436,6
Case10	2,10	0,00	2,23	0,49	0,50	0,42	0,30	128,9	300,0	289,3
Case11	2,10	0,00	2,18	0,49	0,50	0,43	0,31	130,7	315,9	301,0
Case12	2,10	0,00	4,14	1,59	0,53	1,34	1,09	177,0	477,4	483,7
Case13	2,26	0,16	0,56	0,34	0,28	0,32	0,21	135,7	384,2	355,4
Case14	2,32	0,22	0,60	0,37	0,28	0,33	0,22	129,9	356,9	341,2
Case15	2,10	0,00	2,52	1,22	0,53	0,97	0,73	152,6	491,2	441,1

A Ramp time, TR és TR10–90 értékek elemzése alapján a Case6, Case8 és Case12 esetében a tranziens szakasz jelentősen elnyúlik a Basic referenciaértékhez képest. A beállási idő (Ts) ezekben az esetekben akár háromszorosára is növekedhet, ami a szabályozási sávszélesség csökkenésére és a rendszer tehetetlenségének növekedésére utal.

A konstans hiba, valamint az IQE és IAE értékek a négyszögjeles vizsgálatok során még nagyobb szórást mutatnak, mint a szinuszos esetben. Különösen a Case6, Case8 és Case11 konfigurációkban figyelhető meg kiugró integrált hiba (IQE \approx 450–490, IAE \approx 470–500), ami azt jelzi, hogy a gyors átmenetek során a szabályozó jelentős mértékben eltér a referencia viselkedéstől.

A négyszögjeles vizsgálatok így egyértelműen rámutatnak arra, hogy bizonyos PLC-architektúrák esetében a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja nemcsak minőségromlást, hanem érdemi dinamikai kockázatot is jelent.

4.6.3. Empirikus megállapítás az értékkövető vizsgálatok alapján

A szinuszos és négyszögjeles értékkövető vizsgálatok eredményei önállóan és egymástól függetlenül is azt igazolják, hogy a PLC-architektúra módosítása azonos PI-paraméterek mellett mérhető, reprodukálható és konzisztens eltéréseket okoz a szabályozási viselkedésben. Ezek az eltérések nem vezethetők vissza a folyamatmodell, a szenzorok vagy a mérési eljárás változására, hanem kizárólag a vezérlőarchitektúra (CPU, firmware, AD/DA felbontás) sajátosságainak tulajdoníthatók.

A bemutatott empirikus eredmények így egyértelműen alátámasztják, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja nem tekinthető általánosan alkalmazható eljárásnak, még egyszerű, szenzormentes, elsőrendű szabályozó kör esetén sem. Ez a fejezet megalapozza a 4.6.4 alfejezetben bemutatott migrációs kategóriák empirikus azonosítását.

4.6.4. Migrációs kategóriák empirikus azonosítása

Az empirikus migrációs adatbázis kiértékelése során a 4.3 alfejezetben definiált tizenöt Case-konfiguráció szabályozási viselkedése került összehasonlításra a Basic referenciaarchitektúrával. A vizsgálatok minden esetben azonos PI-paraméterekkel, azonos mérési protokoll mellett, értékkövető szabályozási feladatban történtek, így a megfigyelt eltérések kizárólag a PLC-architektúra módosításából származhatnak. A jelen alfejezet célja nem egy formális döntési szabályrendszer felállítása, hanem annak empirikus bemutatása, hogy az azonos PI-paraméterekkel végrehajtott migráció a gyakorlatban különböző mértékű és jellegű változásokat eredményezhet a szabályozási viselkedésben.

A grafikus és numerikus eredmények együttes értelmezése alapján megállapítható, hogy a vizsgált Case-ek nem homogén módon viselkednek. Egyes konfigurációk esetében a szabályozási jellemzők lényegében változatlanok maradnak, sőt bizonyos metriák mentén kismértékű javulás is megfigyelhető. Más konfigurációknál a szabályozási viselkedés romlik ugyan, de az eltérés mértéke korlátozott, és mérnöki szempontból még kezelhetőnek tekinthető. Végül az empirikus adatbázis tartalmaz olyan eseteket is, ahol a szabályozási viselkedés jelentős mértékben eltér a referenciaértékektől, és az azonos PI-paraméterekkel történő működés már nem tekinthető elfogadhatónak.

A migrálható esetek körébe sorolhatók azok a konfigurációk, ahol a numerikus metriák a Basic referenciaértékekhez képest csak elhanyagolható mértékben változnak. Ezekben az esetekben az amplitúdó- és jelalak-alapú mutatók, az időtényezők, valamint az integrált hibamértékek jellemzően a referencia ± 5 – 10% -os tartományán belül maradnak. A szinuszos vizsgálatok során több ilyen Case azonosítható, ahol az IAE és IQE értékek gyakorlatilag megegyeznek a Basic rendszerhez tartozó értékekkel, miközben a ramp time és az állandósult hiba változása nem haladja meg a mérési szórásból adódó eltérést. Ezekben az esetekben az architektúraváltás nem okoz érdemi dinamikai romlást, így a PI-paraméterek változtatás nélküli átvitele mérnöki szempontból elfogadhatónak tekinthető.

Érdekes megfigyelés, hogy bizonyos konfigurációkban a szabályozási teljesítmény egyes metriák mentén kismértékben javul a referenciaarchitektúrához képest. Ez elsősorban az integrált hibamértékek (IAE, IQE) enyhe csökkenésében, illetve a felfutási idő mérsékelt rövidülésében jelenik meg. Ezek a javulások azonban nem tekinthetők általános optimalizációnak; sokkal inkább arra utalnak, hogy az adott architektúra numerikus és időzítési sajátosságai kedvezőbben illeszkednek az eredetileg meghatározott PI-paraméterekhez. Fontos hangsúlyozni, hogy ezek az esetek sem jelentenek garanciát arra, hogy a migráció minden üzemállapotban problémamentes lesz, ugyanakkor empirikusan igazolják, hogy a migráció nem szükségszerűen vezet romláshoz.

A korlátozottan migrálható, vagy másként fogalmazva *finomhangolást igénylő* esetek azok a konfigurációk, ahol a szabályozási viselkedés romlása már egyértelműen kimutatható, de mértéke még nem tekinthető kritikussá. Ezekben az esetekben a numerikus metriák jellemzően a Basic referenciaértékekhez képest 10–30% közötti eltérést mutatnak. Tipikus jelenség a ramp time és a beállási idő növekedése, valamint az IAE és IQE értékek mérsékelt emelkedése. A szinuszos vizsgálatok során ezek az eltérések gyakran csak enyhe fáziskésés vagy amplitúdócsökkenés formájában jelennek meg, míg a négyszögjeles vizsgálatoknál már érzékelhetőbbé válik a tranzienst viselkedés romlása.

A 10% körüli eltérés, mint alsó határ empirikus alapon indokolható: az ennél kisebb változások a vizsgált rendszerben gyakran nem járnak együtt érzékelhető minőségromlással, és a szabályozó gyakorlati működése stabil marad. A 10–30% közötti tartományban azonban már olyan eltérések jelennek meg, amelyek hosszabb távon vagy szélsőségesebb üzemi körülmények között problémát okozhatnak. Ezekben az esetekben a PI-paraméterek kisebb mértékű manuális módosítása – például az arányos erősítés vagy az integrálási idő finomhangolása – jellemzően elegendő lehet a megfelelő működés helyreállításához.

Az empirikus adatbázis ugyanakkor egyértelműen tartalmaz nem migrálható eseteket is. Ezekben a konfigurációkban a szabályozási viselkedés jelentős mértékben eltér a referenciaarchitektúrától, és az eltérés több metria mentén egyszerre jelenik meg. Tipikus jellemző a nagymértékű integrált hibanövekedés, a beállási idő drasztikus meghosszabbodása, valamint a túllövés és alullendülés kifejezett növekedése, különösen a négyszögjeles vizsgálatok során. Ezekben az esetekben az IAE és IQE értékek gyakran meghaladják a referenciaértékek 30–40%-át, ami már nem tekinthető pusztán minőségromlásnak, hanem a szabályozási dinamika alapvető megváltozására utal. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy bizonyos PLC-architektúrák esetén az eredeti PI-paraméterek egyszerű átvitele nemcsak nem optimális, hanem potenciálisan veszélyes is lehet. Az ilyen konfigurációk újrahangolás nélkül nem alkalmasak a stabil és megbízható működésre, különösen olyan ipari környezetben, ahol gyors referencia-változások vagy zavarások fordulhatnak elő. Az empirikus adatok alapján ezek az esetek már nem sorolhatók a migrálható vagy finomhangolható kategóriába, hanem egyértelműen újraparaméterezést igényelnek.

Összefoglalva megállapítható, hogy az empirikus migrációs vizsgálatok nem bináris eredményt adnak, hanem folytonos átmenetet rajzolnak ki a jól migrálható és a nem migrálható esetek között. A grafikus és numerikus eredmények együttesen azt mutatják,

hogyan a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja bizonyos architektúrák esetén elfogadható, más esetekben csak korlátozottan alkalmazható, míg egyes konfigurációknál egyértelműen nem javasolható. Ez a fokozatos kép indokolja, hogy a következő alfejezetben az empirikus eredmények alapján explicit migrációs kategóriák kerüljenek meghatározásra, amelyek már konkrét mérnöki döntéstámogatást tesznek lehetővé.

4.7. Az empirikus adatbázis szerepe a validálásában

A 4.6 alfejezetben bemutatott empirikus eredmények alapján megállapítható, hogy a PI-szabályozóparaméterek migrálhatósága PLC-architektúraváltás esetén nem írható le bináris módon. Az azonos PI-paraméterekkel végrehajtott mérések nem egységes viselkedést mutatnak: a vizsgált konfigurációk egy része a referenciaarchitektúrához hasonlóan működik, más esetekben mérsékelt romlás figyelhető meg, míg bizonyos konfigurációknál a szabályozási viselkedés jelentős mértékben eltér.

Ennek megfelelően az empirikus adatbázis értelmezéséhez olyan kategóriarendszer szükséges, amely képes kezelni a folytonos átmenetet a jól migrálható és a nem migrálható esetek között. A jelen alfejezet célja ezen kategóriák empirikus alapon történő meghatározása, kizárólag a mért numerikus és grafikus jellemzőkre támaszkodva.

A kategorizálás során nem abszolút teljesítményértékek kerültek figyelembevételre, hanem a Basic referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérések. Ez a megközelítés összhangban van a vizsgálat céljával: nem azt kívánja eldönteni, hogy egy szabályozás „jó” vagy „rossz”, hanem azt, hogy az adott PI-paraméterkészlet mennyiben őrzi meg eredeti viselkedését egy új PLC-architektúrában.

4.7.1. Migrálható architektúrák

A migrálható kategóriába azok a konfigurációk sorolhatók, amelyek esetében a szabályozási viselkedés a vizsgált metrikák mentén csak elhanyagolható mértékben tér el a Basic referenciaértékektől. Ezekben az esetekben az amplitúdó- és jelalak-alapú mutatók, az időtényezők, valamint az integrált hibamértékek változása jellemzően a $\pm 5\text{--}10\%$ -os tartományon belül marad.

Empirikus szempontból ezek az eltérések nem járnak együtt érzékelhető dinamikai romlással. A szinuszos vizsgálatok során a követési viselkedés gyakorlatilag változatlan marad, míg a négyszögjeles gerjesztés esetén sem jelennek meg kifejezett túllövések vagy jelentős beállásiidő-növekedések. Ezekben az esetekben a PI-paraméterek változtatás nélküli átvitele mérnöki szempontból elfogadhatónak tekinthető.

Fontos hangsúlyozni, hogy a migrálható kategória nem jelent optimalizált működést, hanem azt, hogy az eredeti szabályozási viselkedés megmarad a gyakorlati toleranciákon belül.

4.7.2. Korlátozottan migrálható architektúrák (finomhangolást igénylő esetek)

A második kategóriába azok a konfigurációk tartoznak, amelyeknél a szabályozási viselkedés romlása egyértelműen kimutatható, azonban mértéke még nem tekinthető kritikusnak. Ezekben az esetekben a Basic referenciaértékekhez viszonyított eltérések

jellemzően a 10–30% közötti tartományba esnek, és több metria mentén egyszerre jelennek meg.

Tipikus jelenség ebben a kategóriában a felfutási és beállási idők növekedése, az integrált hibamértékek mérsékelt emelkedése, valamint a fáziskésés erősödése. A szinuszos vizsgálatok során ezek az eltérések gyakran csak enyhe követési romlásként jelennek meg, míg a négyszögjeles gerjesztés már érzékenyebben feltárja a tranziens viselkedés megváltozását.

Az empirikus eredmények alapján ezek az esetek nem tekinthetők problémamentes migrációnak, ugyanakkor a szabályozási viselkedés még nem sérül olyan mértékben, hogy az eredeti PI-paraméterkészlet teljes elvetése indokolt lenne. Gyakorlati szempontból ezek a konfigurációk jó migrációs alapot jelentenek: kisebb mértékű manuális paraméterkorrekcióval (például az arányos erősítés vagy az integrálási idő finomhangolásával) a megfelelő működés jellemzően helyreállítható.

A 10% körüli alsó határ ebben a kategóriában empirikusan indokolható: az ennél kisebb eltérések a vizsgált rendszerben nem eredményeztek érdemi minőségromlást, míg a 10–30%-os tartományban már megjelentek olyan dinamikai változások, amelyek hosszabb távon vagy szélsőségesebb üzemi körülmények között kockázatot hordozhatnak.

4.7.3. Nem migrálható architektúrák

A nem migrálható kategóriába azok a konfigurációk sorolhatók, ahol a szabályozási viselkedés jelentős és többdimenziós eltérést mutat a Basic referenciaarchitektúrához képest. Ezekben az esetekben a romlás nem egyetlen metria mentén jelenik meg, hanem egyszerre figyelhető meg az integrált hibamértékek nagymértékű növekedése, a tranziens szakasz elnyúlása, valamint a túllövés és alullendülés kifejezett erősödése.

Az empirikus adatbázis alapján ezekben a konfigurációkban az IAE és IQE értékek gyakran 30–40%-ot meghaladó eltérést mutatnak, miközben a beállási idők többszörösükre növekednek a referenciaértékekhez képest. Ez már nem tekinthető pusztán minőségromlásnak, hanem a szabályozási dinamika alapvető megváltozására utal.

Ezekben az esetekben az eredeti PI-paraméterkészlet változtatás nélküli alkalmazása nemcsak nem ajánlott, hanem ipari környezetben potenciálisan veszélyes is lehet. A szabályozási viselkedés újrahangolás nélkül nem felel meg a stabilitási és dinamikai követelményeknek, különösen gyors referencia-változások vagy zavarások esetén. Empirikus alapon ezek a konfigurációk egyértelműen újraparaméterezést igényelnek, és nem sorolhatók a migrálható vagy korlátozottan migrálható kategóriába.

4.7.4. Határhelyzetek és átmeneti esetek

Az empirikus vizsgálatok során olyan konfigurációk is megfigyelhetők, amelyek a fenti kategóriák határán helyezkednek el. Ezekben az esetekben egyes metriák a migrálható tartományba esnek, míg más jellemzők már a korlátozottan migrálható vagy akár a nem migrálható viselkedés irányába mutatnak.

Ezek az átmeneti esetek különösen fontosak módszertani szempontból, mivel rámutatnak arra, hogy a migrálhatóság nem éles küszöbértékek mentén dől el, hanem többdimenziós

jellemzők együttes értelmezését igényli. Ez a megfigyelés közvetlenül megalapozza a disszertáció későbbi fejezeteiben bemutatott, ujjlenyomat-alapú és döntéstámogató módszerek szükségességét.

4.7.5. Összegző megállapítás

Az empirikus adatbázis alapján meghatározott migrációs kategóriák azt mutatják, hogy a PI-szabályozóparaméterek migrálhatósága PLC-architektúraváltás esetén fokozatos jellegű, és nem dönthető el kizárólag elméleti megfontolások vagy egyetlen metria alapján. A kategorizálás kizárólag a mért viselkedésre épül, és világosan elkülöníti a változtatás nélkül migrálható, a finomhangolást igénylő, valamint a nem migrálható eseteket.

Ez a kategóriarendszer egyrészt közvetlen mérnöki értelmezést tesz lehetővé az empirikus eredmények számára, másrészt stabil alapot biztosít a következő fejezetben bemutatott ujjlenyomat-alapú diagnosztikai módszer validálásához, amely a migrálhatóság megítélését már folyamatfüggetlen módon kívánja elvégezni.

4.8. Összefoglalás

A jelen fejezetben bemutatott empirikus migrációs vizsgálatok egy kontrollált, reprodukálható mérési környezetben igazolták, hogy a PI-szabályozóparaméterek változtatás nélküli migrációja PLC-architektúraváltás esetén nem tekinthető általánosan érvényes eljárásnak. Az azonos PI-paraméterkészlettel végrehajtott mérések alapján egyértelműen kimutatható, hogy a szabályozási viselkedés a vezérlőarchitektúra módosítására érzékenyen reagál, és az eltérések mind grafikus, mind numerikus formában megjelennek. Az empirikus adatbázis azt is megmutatta, hogy a migrálhatóság nem bináris tulajdonság, hanem fokozatos jellegű: a jól migrálható, a korlátozottan migrálható és a nem migrálható esetek között folytonos átmenet figyelhető meg, amelyet több metria együttes értelmezése alapján lehet megbízhatóan jellemezni.

A vizsgálatok eredményei ugyanakkor világosan kijelölik az empirikus megközelítés érvényességi tartományát is. A bemutatott mérések folyamatfüggőek, egy egyszerű, elsőrendű RC-tagra épülnek, és laboratóriumi környezetben kerültek végrehajtásra. Bár ez a kialakítás módszertanilag alkalmas volt a migrációs jelenségek izolált feltárására, ipari környezetben nem minden esetben áll rendelkezésre lehetőség hasonló jellegű vizsgálatok elvégzésére. A mérési eljárás idő- és erőforrás-igényes, továbbá a vizsgált folyamat fizikai megvalósítása és üzemi körülményei is befolyásolhatják a mért viselkedést. Ezek a korlátok nem csökkentik az empirikus eredmények érvényességét, ugyanakkor rámutatnak arra, hogy a migrálhatóság gyakorlati megítéléséhez olyan megközelítésre van szükség, amely nem igényli a fizikai folyamat közvetlen bevonását.

Az empirikus migrációs adatbázis ebben a formában megbízható referenciát szolgáltat arra, hogy milyen szabályozási viselkedések tekinthetők elfogadhatónak, illetve problémásnak azonos PI-paraméterek mellett. Ez a referencia alapvető jelentőségű a további fejezetek szempontjából, mivel lehetővé teszi, hogy a később bemutatott módszerek eredményei empirikusan alátámasztott viszonyítási alaphoz legyenek kötve. A következő fejezet ennek megfelelően egy olyan, folyamatfüggetlen diagnosztikai megközelítést mutat

be, amely az itt empirikusan azonosított migrációs jelenségek numerikus megfelelőjét kívánja létrehozni, és amely alkalmas a migrálhatóság vizsgálatára akkor is, amikor a fizikai folyamaton végzett kísérletek nem, vagy csak korlátozottan végezhetők el.

4.9. Fejezethez tartozó tézis

Tézis I.

A referenciaarchitektúrához viszonyított 15 migrált konfiguráció vizsgálata alapján empirikus mérésekkel igazoltam, hogy azonos PI-szabályozóparaméterek alkalmazása mellett a zárt hurkú szabályozási viselkedés PLC-architektúraváltás esetén mérhető és reprodukálható módon módosul, még elsőrendű folyamatmodell esetén is.

A szinuszos és négyszögjeles értékkövető vizsgálatok alapján kimutattam, hogy a migráció hatása nem egyetlen teljesítménymutató mentén jelentkezik, hanem amplitúdó-, idő- és hibaalapú metriák együttes eltérésében jelenik meg. Ezzel bizonyítottam, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja nem tekinthető általánosan érvényes eljárásnak, és a migrálhatóság empirikusan több kategóriába sorolható (migrálható, korlátozottan migrálható, nem migrálható), az elsőrendű folyamatmodellen végzett empirikus validáció keretei között. [S3], [S4], [S5], [S6], [S7], [S9]

5. UJJLENYOMAT-ALAPÚ DIAGNOSZTIKAI KERETRENDSZER

A jelen fejezet az empirikus migrációs vizsgálatok (4. fejezet) eredményeire építve egy olyan folyamatfüggetlen, zárt hurkú diagnosztikai keretrendszert vezet be, amely a PI szabályozóparaméterek PLC-architektúraváltás melletti migrálhatóságának objektív értékelését készíti elő. A fejezet célja, hogy a migrálhatóság problémáját módszertani szinten értelmezhetővé tegye: rögzítse a diagnosztikai megközelítés elvi alapjait, a vizsgálati logikát, valamint azt a struktúrát, amely mentén a későbbiekben a numerikus metriák és a döntéstámogató eljárás felépíthető. Ennek megfelelően a fejezet a módszer pozicionálásával indul, majd fokozatosan átvezet a diagnosztikai vizsgálatok és az ujjlenyomat-szemlélet felé, előkészítve a következő fejezetek kvantitatív kiértékelési és döntési lépéseit.

5.1. A módszer pozicionálása

A jelen fejezetben bevezetett ujjlenyomat-alapú diagnosztikai keretrendszert nem önálló algoritmusként, hanem a disszertáció logikai ívébe illesztett módszertani válaszként pozicionálok. A 2. fejezet szisztematikus irodalomkutatása során azt állapítottam meg, hogy a PI/PID paraméterek változtatás nélküli migrációja, mint zárt hurkú dinamikai probléma nem jelenik meg explicit kutatási területként, míg a klasszikus és adaptív hangolási módszerek a paraméterek módosítását tekintik alapfeltevésnek. A 4. fejezet empirikus vizsgálatai ezt a hiányt gyakorlati oldalról is alátámasztották: azonos PI-paraméterek mellett a zárt hurkú viselkedés architektúrafüggő módon módosult, és a migrálhatóság nem bináris jelenségként, hanem fokozatos eltérésként jelent meg. Ebből következően a migráció problémáját nem tekintem pusztán hangolási vagy implementációs kérdésnek, hanem olyan viselkedési kompatibilitási problémának, amely a vezérlőarchitektúra és a szabályozó együttes működéséből ered.

A módszer pozicionálása során tudatosan elhatárolom azt mind a klasszikus modellalapú megközelítésektől, mind a kizárólag empirikus újrhangoláson alapuló mérnöki gyakorlattól. Nem vállalom azt a feltételezést, hogy a fizikai folyamat teljes és pontos matematikai modellje rendelkezésre áll, továbbá nem tekintem elfogadható alapértelmezett megoldásnak a működő rendszer utólagos, kísérleti paraméterkorrekcióját. A módszert ezért egy kontrollált, zárt hurkú, de folyamatfüggetlen diagnosztikai elrendezésre építem, amelyben a vizsgálat tárgya nem a technológiai folyamat, hanem a PLC-architektúra és a PI-szabályozó együttes numerikus és dinamikai viselkedése. Ezzel a megközelítéssel a migrálhatóságot nem funkcionális megfelelésként, hanem viselkedési ekvivalenciaként értelmezem: azt vizsgálom, hogy az adott paraméterkészlet mennyiben őrzi meg a referenciaarchitektúrán tapasztalt zárt hurkú karaktert.

A módszertan alapfelvétele, hogy a zárt hurkú viselkedés reprodukálható mintázatként ragadható meg, amely több dinamikai és hibaalapú jellemző együtteséből áll. Ezt a mintázatot ujjlenyomatként definiálok, amely nem egyetlen skalár mérőszám, hanem strukturált jellemzővektor. A módszer pozicionálása tehát három kulcselemre épül: (1) zárt hurkú működésben vizsgálom a rendszert, mert a migráció szempontjából releváns jelenségek csak visszacsatolt konfigurációban aktiválódnak; (2) folyamatfüggetlen

diagnosztikai környezetet alkalmazok, mert a cél a vezérlőoldali eltérések izolálása; (3) többdimenziós, metriaalapú reprezentációt használok, mert az empirikus eredmények szerint az eltérések nem egyetlen jellemző mentén jelentkeznek. A módszer így köztes pozíciót foglal el az empirikus mérés és a döntéstámogató eljárás között: nem pusztán jelenséget mutat ki, hanem strukturált, kvantitatív alapot teremt a későbbi döntési mechanizmus számára.

A fejezet további részeiben ezért nem új szabályozóstruktúrát vezetek be, hanem a migrálhatóság értelmezésének módszertani keretét rögzítem. Először a diagnosztikai megközelítés elvi alapjait és határait tisztázom, majd definiálom a stabilitási határhoz kötött P_{krit} vizsgálatot, valamint a P-only és I-only próbákat, amelyek együtt alkotják a viselkedési ujjlenyomatot. Ezzel a pozicionálással az 5. fejezet a disszertáció szerkezetében fordulópontot képez: az empirikus bizonyítás szintjéről átvezeti a vizsgálatot egy formalizált, általánosítható diagnosztikai keretrendszer felé, amely a következő fejezetben numerikus kiértékeléssel és döntéstámogató feldolgozással válik teljessé.

5.2. Diagnosztikai paradigma (white-box / black-box)

A migrálhatóság vizsgálatának módszertani kerete csak akkor értelmezhető pontosan, ha egyértelműen rögzítem, hogy a vizsgálat milyen diagnosztikai paradigmába illeszkedik. Az 5.1 alfejezetben pozicionáltam a módszert, mint viselkedésalapú, zárt hurkú megközelítést; a jelen alfejezet célja annak tudományos tisztázása, hogy ez a megközelítés miként viszonyul a klasszikus white-box és black-box rendszerszemléletekhez.

A white-box paradigma a rendszer belső szerkezetének, paramétereinek és matematikai modelljének explicit ismeretére épül. Szabályozástechnikai értelemben ez tipikusan az átviteli függvény meghatározását, állapotér-modell felírását vagy részletes fizikai modellalkotást jelent. A white-box diagnosztika előnye az elméleti pontosság és az analitikus következtetések lehetősége, ugyanakkor alapfeltevése, hogy a vizsgált rendszer teljes dinamikája megbízhatóan modellezhető. A 2. fejezet irodalomkutatása rámutatott arra, hogy PLC-architektúraváltás esetén ez a feltételezés nem teljesül: a CPU-időzítés, a firmware-implementáció, az analóg–digitális konverzió és a ciklikus végrehajtás belső mechanizmusai nem írhatók le olyan pontossággal, amely a migrálhatóság előrejelzését lehetővé tenné. Ennek következtében a klasszikus white-box megközelítés a jelen kutatási kérdés szempontjából módszertanilag korlátozott.

A black-box paradigma ezzel szemben a rendszer belső struktúrájától függetlenül, kizárólag a bemeneti–kimeneti viselkedés alapján végzi az elemzést. A hangsúly nem a modellparamétereken, hanem a válaszjel karakterisztikáján van. Ez a megközelítés különösen akkor indokolt, ha a rendszer belső működése nem teljes mértékben ismert vagy nem hozzáférhető. A PLC-alapú rendszerek esetében – különösen generációváltás vagy firmware-módosítás során – a vezérlő belső működése részben zárt, gyártóspecifikus és dokumentációval csak korlátozottan lefedett. Ilyen környezetben a black-box szemlélet nem módszertani kompromisszum, hanem racionális választás.

A jelen disszertációban alkalmazott diagnosztikai paradigma azonban nem tisztán black-box jellegű. A módszer nem tekinti a rendszert teljesen ismeretlen entitásnak, mivel a

vizsgálat során tudatosan kontrollálom a gerjesztést, a működési tartományt és a zárt hurkú konfigurációt. A diagnosztikai elrendezés determinisztikus, reprodukálható és strukturált; a vizsgálat tárgya nem a teljes technológiai rendszer, hanem a PLC-architektúra és a PI-szabályozó együttes viselkedése. Ennek megfelelően a módszert kontrollált, zárt hurkú black-box diagnosztikaként értelmezem.

Ez a megközelítés a következő jellemzőkkel írható le:

- a vizsgálat zárt hurkú működésben történik, mivel a migrálhatóság szempontjából releváns jelenségek csak visszacsatolt konfigurációban jelennek meg,
- a fizikai folyamat explicit modellje nem része a diagnosztikának, így a módszer folyamatfüggetlen,
- a rendszer belső implementációja (CPU, firmware, I/O-kezelés) nem kerül modellként felírásra, hanem viselkedésalapú módon kerül értelmezésre,
- a bemeneti gerjesztés és a működési pont kontrollált módon kerül megválasztásra, biztosítva a reprodukálhatóságot.

A white-box és black-box paradigmák közötti elhatárolás tehát nem pusztán elméleti kérdés, hanem a migrálhatóság értelmezésének alapja. A white-box megközelítés a paraméterek újratervezésére és optimalizálására alkalmas, míg a jelen módszer célja nem új paraméterek meghatározása, hanem a meglévő paraméterkészlet viselkedési kompatibilitásának vizsgálata. Ebben az értelemben a diagnosztikai paradigma a kompatibilitásvizsgálat irányába mozdul el, nem pedig a klasszikus szabályozótervezés irányába.

A 2. fejezetben feltárt irodalmi hiány – miszerint a PI/PID paraméterek változtatás nélküli migrációja nem jelenik meg önálló kutatási problémaként – tovább erősíti a black-box alapú viselkedési diagnosztika indokoltságát. Amennyiben a migráció kérdését nem paraméterhangolási, hanem viselkedési ekvivalencia-problémaként értelmezem, akkor a vizsgálat természetes eszköze a zárt hurkú bemeneti–kimeneti válasz strukturált elemzése.

A jelen fejezetben definiált diagnosztikai paradigma így egyértelműen elkülönül a modellalapú szabályozótervezéstől, ugyanakkor nem esik át a kontrollálatlan, tisztán empirikus vizsgálat csapdájába. A módszer erőssége abban rejlik, hogy a black-box szemléletet kontrollált, reprodukálható és többdimenziós metriaalapú kiértékeléssel ötvözi. Ez teremti meg azt a módszertani alapot, amelyre a következő alfejezetekben bemutatott P_{krit} , P-only és I-only diagnosztikai próbák, valamint a numerikus ujjlenyomat-képzés épül.

5.3. A háromlépcsős diagnosztikai pipeline

A diagnosztikai keretrendszer nem egyetlen mérési próbára, hanem három egymásra épülő vizsgálati lépcsőre alapozom. Ezt a struktúrát tudatosan pipeline-logika mentén alakítom ki, mivel a migrálhatóság problémája nem redukálható egyetlen dinamikai jellemzőre, hanem stabilitási, arányos és integráló viselkedési aspektusok együttes értelmezését igényli. A három lépcső sorrendje nem önkényes: a stabilitási tartalék vizsgálata előszűrő (gate) szerepet tölt be, amelyet az arányos ág dinamikai karakterének

feltárása követ, majd az integráló hatás hosszú távú viselkedése zárja a diagnosztikai folyamatot.

Formálisan a pipeline három komponense:

1. P_{krit} stabilitási vizsgálat – strukturális migrációs előszűrés
2. P-only diagnosztika – arányos ág dinamikai ujjlenyomat
3. I-only diagnosztika – integráló ág felhalmozási ujjlenyomat

Az alábbiakban mindhárom lépcsőt formálisan definiálom.

5.3.1. P_{krit} stabilitási vizsgálat – strukturális migrációs előszűrés

A háromlépcsős diagnosztikai pipeline első eleme a P_{krit} stabilitási vizsgálat, amelyet strukturális migrációs előszűrőként (gate) definiálok. A vizsgálat célja annak meghatározása, hogy az adott PLC-architektúra mellett az arányos erősítés kritikus értéke milyen mértékben tér el a referenciaarchitektúrán meghatározott stabilitási határtól.

A módszer alapja a klasszikus határstabilitási (ultimate gain) elv, azonban itt nem hangolási célból alkalmazom, hanem architektúrafüggő stabilitási eltolódás detektálására. A továbbiakban a kiindulási diszkrét PI-modell redukcióját mutatom be.

A teljes diszkrét PI szabályozó [52]:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] \quad (23)$$

Rekurzív formában:

$$I[k] = I[k - 1] + K_i T_s e[k] \quad (24)$$

$$u[k] = K_p e[k] + I[k] \quad (25)$$

A P_{krit} vizsgálat során az integráló tagot kikapcsolom, azaz: $K_i = 0$

Ekkor a szabályozó belső állapota az alábbi alakra egyszerűsödik:

$$I[k] = 0 \quad (26)$$

$$u[k] = K_p e[k] \quad (27)$$

A szabályozó így tisztán arányos formára redukálódik. Jelölje a PLC-architektúra által realizált effektív diszkrét rendszert $G(z)$. A zárt hurkú átviteli függvény [52]:

$$T(z) = \frac{K_p G(z)}{1 + K_p G(z)} \quad (28)$$

A karakterisztikus egyenlet [52]:

$$1 + K_p G(z) = 0 \quad (29)$$

A rendszer stabil, ha a karakterisztikus egyenlet minden gyökére teljesül, hogy $|z_i| < 1$. Határstabilitás akkor következik be, amikor $|z_i| = 1$. Az ehhez tartozó arányos erősítést $K_{p,crit}$ -ként definiálom. Miért architektúrafüggő a P_{krit} ?

A PLC-architektúra a következő elemekben módosítja az effektív dinamikát:

- ciklusidő T_s^{eff} ,
- AD/DA konverziós késleltetés,
- kvantálási lépcső Δ_q ,
- numerikus adattípus (REAL implementáció),
- firmware-beli végrehajtási ütemezés.

Ezek a hatások együtt módosítják a rendszer effektív diszkrét átviteli függvényét, azaz $G(z) \rightarrow G_{arch}(z)$. Ennek következtében a (29) karakterisztikus egyenlet architektúrafüggő alakot vesz fel, így általában teljesül, hogy:

$$K_{p,krit}^{(arch)} \neq K_{p,krit}^{(ref)} \quad (30)$$

Mindez akkor is fennáll, ha a fizikai folyamat változatlan marad. A $K_{p,krit}$ értéket empirikus, iteratív módon határozom meg az alábbi lépések szerint:

1. $K_{p,krit}$ fokozatos növelése.
2. Zárt hurkú válasz rögzítése.
3. Tartós, nem csillapodó oszcilláció detektálása.

Az a legnagyobb arányos erősítés, amely mellett még teljesül, hogy:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |y[k]| < \infty \quad (31)$$

Ebben az esetben a rendszer csillapítása zérusnak tekinthető, ami a határstabil állapotnak, azaz a stabilitási határnak felel meg. Migrációs mutató jelölje a referenciaarchitektúra kritikus erősítését $K_{p,krit}^{(ref)}$, míg az adott architektúrához tartozó kritikus erősítést $K_{p,krit}^{(case)}$. A relatív eltérés:

$$\Delta P_{crit} = \frac{K_{p,krit}^{(case)} - K_{p,krit}^{(ref)}}{K_{p,krit}^{(ref)}} \quad (32)$$

Ez dimenziótlan stabilitási eltolódás.

- **Értelmezés**

Ha:

$$\Delta P_{crit} < 0,1 \quad (33)$$

az architektúra stabilitási tartaléka ekvivalens.

Ha:

$$0,1 \leq \Delta P_{crit} < 0,3 \quad (34)$$

a stabilitási struktúra érdemben eltolódott.

Ha:

$$\Delta P_{crit} \geq 0,3 \quad (35)$$

strukturális migrációs inkompatibilitás gyanítható.

Fontos: itt még nem döntök migrálhatóságról. Ez a lépés csupán előszűrő szerepet tölt be. A stabilitási határ a rendszer legérzékenyebb működési pontja. Ha már itt jelentős eltérés mutatkozik, akkor:

- a ciklusidő effektív változása,
- a kvantálási torzítás,
- a végrehajtási struktúra

olyan mértékben módosítja a dinamikát, hogy az azonos PI-paraméterekkel történő migráció eleve kockázatos.

Ezért a pipeline logikája:

$$P_{krit} \rightarrow P\text{-only} \rightarrow I\text{-only}$$

Ha a P_{krit} lépcső jelentős eltérést mutat, a további vizsgálatok interpretációja már előre terhelt. A P_{krit} vizsgálat tudományos jelentősége abban áll, hogy nem hangolási, nem optimalizálási és nem teljesítményjavítási célt szolgál, hanem a stabilitási kompatibilitás vizsgálatára irányul. Ez a lépcső biztosítja, hogy a migrálhatóság kérdését ne pusztán jelalakbeli hasonlóság alapján értékeljem, hanem a rendszer stabilitási struktúráját is figyelembe vegyem.

5.3.2. P-only diagnosztika – határstabil viselkedési ujjlenyomat

A P-only diagnosztika a P_{krit} vizsgálattal szoros egységet alkot, ugyanakkor attól módszertanilag elkülönül. A P_{krit} lépcsőben a kritikus arányos erősítést határozom meg, amely mellett a zárt hurkú rendszer éppen a stabilitási határon működik. A P-only diagnosztika ezzel szemben nem a kritikus erősítés meghatározására, hanem a határstabil működéshez tartozó viselkedési karakter rögzítésére szolgál.

A vizsgálat során az integráló tagot teljes mértékben kikapcsolom, tehát $K_i = 0$, így a diszkrét szabályozó tisztán arányos formára redukálódik, amelyet korábban a (27) egyenlet adott meg. A hibajel definíciója változatlan, tehát továbbra is a (14) egyenlet szerint

értelmezhető [63]. Jelölje az adott architektúra által realizált effektív diszkrét rendszert $G_{case}(z)$. Ekkor a zárt hurkú rendszer karakterisztikus egyenlete az alábbi alakban írható fel:

$$1 + K_p G_{case}(z) = 0 \quad (36)$$

A P_{krit} vizsgálat során meghatározom azt a $K_{p,crit}$ értéket, amely mellett a rendszer határstabil állapotba kerül, azaz a karakterisztikus gyökök az egységkörre esnek: $|z_i| = 1$

A P-only diagnosztika lényegi mozzanata az, hogy a rendszer viselkedését ebben az állapotban rögzítem. Nem kisebb erősítésnél, nem optimalizált működésnél, hanem ott, ahol a rendszer dinamikai érzékenysége maximális.

A határstabil működés sajátossága, hogy a rendszer csillapítása zérushoz közelít, az amplitúdó nem csillapodik, de még nem divergens. Formálisan a válasz:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |y[k]| = C \quad (37)$$

ahol C nem növekvő, de nem is csökkenő amplitúdót jelent. Ez az állapot különösen érzékeny az architektúrafüggő eltérésekre, mivel a legkisebb numerikus vagy időzítési módosulás is:

- amplitúdóváltozást,
- oszcillációs frekvencia-eltolódást,
- vagy instabilitást okozhat.

A P-only diagnosztika tehát nem általános dinamikai karakterizálás, hanem a határstabil működéshez tartozó ujjlenyomat rögzítése. Ebben az állapotban a rendszer viselkedése közvetlenül tükrözi az architektúra által realizált effektív diszkrét dinamikát, amely a következő tényezőkből áll össze:

- effektív mintavételi idő T_s^{eff} ,
- firmware-alapú végrehajtási késleltetés,
- analóg–digitális konverziós késleltetés,
- kvantálási lépcső,
- numerikus reprezentáció.

Mivel az integráló ág nincs jelen, a viselkedés nem tartalmaz felhalmozási torzítást, így a rögzített oszcilláció közvetlenül a diszkrét végrehajtás struktúráját reprezentálja. Két különböző architektúra esetén a határstabil oszcilláció:

- frekvenciája,
- amplitúdója,
- jelalakja,
- valamint az oszcillációs periódusidő

eltérő lehet, még akkor is, ha a fizikai folyamat és a referencijel változatlan.

Az oszcillációs periódusidő diszkrét formában:

$$T_{osc} = N_{osc} \cdot T_s \quad (38)$$

ahol N_{osc} az egy periódushoz tartozó mintaszám. Ennek architektúrafüggő eltérése közvetlen bizonyítéka annak, hogy az effektív diszkrét dinamika nem invariáns.

A P-only vizsgálat tehát nem új metriák számítását jelenti, hanem a stabilitási határon rögzített dinamikai viselkedés strukturális összehasonlítását. Ez a lépcső biztosítja, hogy a migrálhatóság vizsgálata ne pusztán stabil-instabil dichotómián alapuljon, hanem a határstabil működés karakterének összevetésén is. Amennyiben a referenciaarchitektúra és az új architektúra határstabil oszcillációja lényegesen eltér, akkor a paraméterek változtatás nélküli migrációja dinamikailag nem tekinthető ekvivalensnek, még akkor sem, ha a rendszer formálisan stabil marad.

Ebben az értelemben a P_{krit} és a P-only vizsgálat egy kontinuum két pontja: az első a kritikus erősítést rögzíti, a második a kritikus állapot viselkedési karakterét. Ez a megközelítés szerves egységet képez a pipeline logikájában, és előkészíti az I-only vizsgálatot, ahol már nem a stabilitási határ, hanem a felhalmozási dinamika kerül előtérbe.

5.3.3. I-only diagnosztika – az integráló ág felhalmozási ujjlenyomata fix K_i mellett

Az I-only diagnosztika célja az integráló ág architektúrafüggő viselkedésének izolált vizsgálata zárt hurkú konfigurációban. Míg a P_{krit} vizsgálat a stabilitási határ eltolódását, a P-only pedig a határstabil dinamikai karaktert rögzíti, az I-only diagnosztika kifejezetten az integráló tag numerikus és időzítési sajátosságait teszi vizsgálhatóvá. A migrálhatóság szempontjából ez különösen kritikus, mivel az integráló ág a hibajel időbeli felhalmozásán keresztül hosszú távú, kumulatív hatást fejt ki, így érzékenyen reagál az architektúrában bekövetkező legkisebb változásokra is.

A vizsgálat során az arányos tagot teljes mértékben kikapcsolom, azaz $K_p = 0$, míg az integráló erősítést rögzített, kis értékre állítom $K_i = 0,01$. Ebben a konfigurációban a szabályozó működését a korábban a (24) egyenlettel megadott integráló rekurzió írja le. Mivel az arányos ág nem aktív, a szabályozó kimenetét kizárólag az integráló tag határozza meg.

A zárt hurkú rendszer tehát tisztán integráló szabályozással működik, amelynek dinamikáját közvetlenül meghatározza az effektív mintavételi idő, a numerikus reprezentáció és a kvantálási struktúra.

Az integráló tag lényegi tulajdonsága, hogy a hibajel időbeli összegzését végzi. Ideális, folytonos idejű esetben [52]:

$$u(t) = K_i \int e(t) dt \quad (39)$$

Diszkrét implementációban azonban a felhalmozás lépcsőzetes [52]:

$$u[k] = K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] \quad (40)$$

Amennyiben az architektúra az effektív mintavételi időt módosítja:

$$T_s \rightarrow T_s^{eff} \quad (41)$$

akkor az integráló felhalmozás mértéke arányosan változik:

$$u[k] \propto K_i T_s^{eff} \quad (42)$$

Ez azt jelenti, hogy két architektúra azonos K_i mellett eltérő effektív integrálási sebességet valósíthat meg. Az eltérés nem azonnal, hanem időben felhalmozódva jelenik meg, ezért az I-only diagnosztika hosszabb időablakban rögzített válaszfüggvény elemzésére épül.

A kvantálási hatás különösen jelentős ebben a konfigurációban. A mért kimenet:

$$y_q[k] = Q(y[k]) \quad (43)$$

ahol $Q(\cdot)$ a kvantálási operátor. A kvantált hibajel [52]:

$$e_q[k] = r[k] - y_q[k] \quad (44)$$

Az integráló tag ezt a kvantált hibát halmozza fel:

$$I[k] = I[k - 1] + K_i T_s e_q[k] \quad (45)$$

Ha a kvantálási lépcső Δ_q eltér az architektúrák között, akkor a felhalmozott hiba diszkrét ugrások formájában jelenik meg, amely a válaszfüggvényben driftként, túllövésben vagy beállási időbeli különbségben manifesztálódhat.

Az I-only diagnosztikában rögzítem a teljes válaszfüggvényt rögzített $K_i = 0,01$ mellett, majd a viselkedést nem pusztán stabil–instabil dichotómiában értelmezem, hanem a következő jelenségek mentén:

- felhalmozási sebesség,
- állandósult hiba nagysága,
- beállási idő,
- túllövés mértéke,
- esetleges oszcilláció vagy numerikus drift.

Az állandósult hiba diszkrét alakban [53]:

$$e_{ss} = \lim_{k \rightarrow \infty} e[k] \quad (46)$$

Az integrált abszolút hiba [53]:

$$IAE = \sum_{k=1}^N |e[k]| T_s \quad (47)$$

A beállási idő a toleranciasávon belüli első tartós belépés időpontjaként definiálható:

$$T_s^{settling} = k_{settling} \cdot T_s \quad (48)$$

ahol $k_{settling}$ az első olyan index, amelytől kezdve

$$|e[k]| \leq \varepsilon \quad (49)$$

ahol a ε a megengedett toleranciasáv fél szélességét jelöli.

Az I-only vizsgálat különösen érzékeny az architektúrafüggő numerikus implementációra, mivel az integráló ág minden ciklusban újabb összeadást végez. A lebegőpontos aritmetika, a belső regiszterkezelés és a firmware-időzítés mind hatással lehetnek a hosszú távú viselkedésre. Ennek következtében az I-only ujjlenyomat a migrálhatóság egyik legerősebb indikátora: ha két architektúra azonos K_i mellett eltérő felhalmozási dinamikát mutat, akkor a paraméterek változtatás nélküli migrációja nem tekinthető dinamikailag ekvivalensnek.

Az I-only diagnosztika tehát a pipeline harmadik, záró eleme, amely a rövid távú dinamikai karakter (P-only) után a hosszú távú felhalmozási viselkedést is bevonja az értékelésbe. A három lépcső együtt adja a rendszer teljes viselkedési ujjlenyomatát: a stabilitási struktúrát (P_{krit}), a határstabil dinamikai karaktert (P-only), valamint a felhalmozási és állandósult viselkedést (I-only). Ez a kombináció teremti meg a lehetőségét annak, hogy a migrálhatóság kérdését többdimenziós, strukturált és kvantitatív módon értelmezzem.

5.4. A háromlépcsős diagnosztikai pipeline empirikus eredményei

A jelen alfejezetben az 5.3 pontban definiált háromlépcsős diagnosztikai pipeline empirikus eredményeit mutatom be. A cél nem újabb módszertani elemzés, hanem annak demonstrálása, hogy a P_{krit} , a P-only és az I-only vizsgálatok gyakorlati alkalmazása során milyen, architektúrafüggő eltérések figyelhetők meg az alap (referencia) architektúrához viszonyítva.

Elsőként a P_{krit} vizsgálat eredményeit ismertetem egy összefoglaló táblázatban, amely tartalmazza a referenciaarchitektúra kritikus arányos erősítésének értékét, valamint az egyes vizsgált architektúrákhoz tartozó $K_{p,crit}$ értékeket. A táblázat célja annak szemléltetése, hogy a stabilitási határ milyen mértékben tolódik el architektúraváltás esetén, és ez milyen előszűrő (gate) szerepet tölt be a migrálhatóság értékelésében.

Ezt követően a P-only diagnosztika eredményeit mutatom be reprezentatív válaszfüggvények formájában. A diagramokon az alap architektúra és néhány jellemző eset választ ábrázolom azonos K_p mellett, a határstabil működési tartományban. A jelalakok rövid elemzésével rávilágítok a dinamikai karakter, az oszcillációs viselkedés és az amplitúdóeltérések különbségeire, majd ezekből következtetéseket vonok le az arányos ág architektúrafüggő sajátosságaira vonatkozóan.

Hasonló logika mentén kerül bemutatásra az I-only diagnosztika eredménye is. A rögzített $K_i = 0,01$ érték mellett felvett válaszfüggvények diagramjai szemléltetik az integráló ág felhalmozási karakterének eltéréseit, különös tekintettel a beállási időre, az állandósult hibára és a hosszú távú viselkedésre. Az I-only vizsgálat eredményeinek rövid értelmezése rámutat arra, hogy az integráló hatás különösen érzékeny az architektúrafüggő numerikus és időzítési különbségekre.

5.4.1. P_{krit} vizsgálat eredményei

A P_{krit} vizsgálat során minden architektúra esetében meghatároztam azt a kritikus arányos erősítést, amely mellett a zárt hurkú rendszer határstabil állapotba került. A referenciaarchitektúra (Basic: PFC1001212) esetében a mért kritikus érték:

$$K_{p,crit}^{ref} = 0,95 \quad (50)$$

Az egyes vizsgált architektúrákhoz tartozó kritikus erősítések az 5.1. táblázatban kerülnek összefoglalásra.

5.1. Táblázat P_{krit} vizsgálat eredményeit összefoglaló táblázat

Mérési konfiguráció	P_{krit} értéke
Basic	0,95
Case1	0,93
Case2	1,67
Case3	1,6
Case4	0,75
Case5	0,78
Case6	1,65
Case7	0,85
Case8	0,82
Case9	1,59
Case10	0,85
Case11	0,86
Case12	1,64
Case13	0,9
Case14	0,87
Case15	1,66

A táblázat alapján a stabilitási határ eltolódását a referenciaértékhez viszonyított relatív eltéréssel értelmeztem, amelyet korábban a (32) egyenlet definiált. Az eredmények alapján a vizsgált architektúrák három jól elkülöníthető csoportba rendeződnek.

Az első csoportba azok a konfigurációk tartoznak, amelyek esetében a kritikus erősítés a referenciaértékhez közeli tartományban marad (0,85–0,93). Ezekben az esetekben a relatív eltérés jellemzően

$$|\Delta P_{crit}| < 0,15 \quad (51)$$

ami mérsékelt stabilitási eltolódást jelent. Itt a zárt hurkú stabilitási struktúra lényegében megőrződött.

A második csoportba sorolhatók a Case4 és Case5 konfigurációk, ahol a kritikus erősítés jelentősen csökkent (0,75, illetve 0,78). Például a Case4 esetében:

$$\Delta P_{crit}^{Case4} = \frac{0,75 - 0,95}{0,95} \approx -0,21 \quad (52)$$

Ez hozzávetőleg 21%-os stabilitási tartománycsökkenést jelent, ami arra utal, hogy az adott architektúra mellett a rendszer kisebb arányos erősítésnél éri el a határstabil állapotot, azaz a stabilitási tartalék beszűkül.

A harmadik, jól elkülöníthető csoportba tartoznak azok az architektúrák (Case2, 3, 6, 9, 12 és 15), ahol a kritikus erősítés jelentősen megnövekedett (1,59–1,67 tartomány). Például a Case2 esetében:

$$\Delta P_{crit}^{Case2} = \frac{1,67 - 0,95}{0,95} \approx 0,76 \quad (53)$$

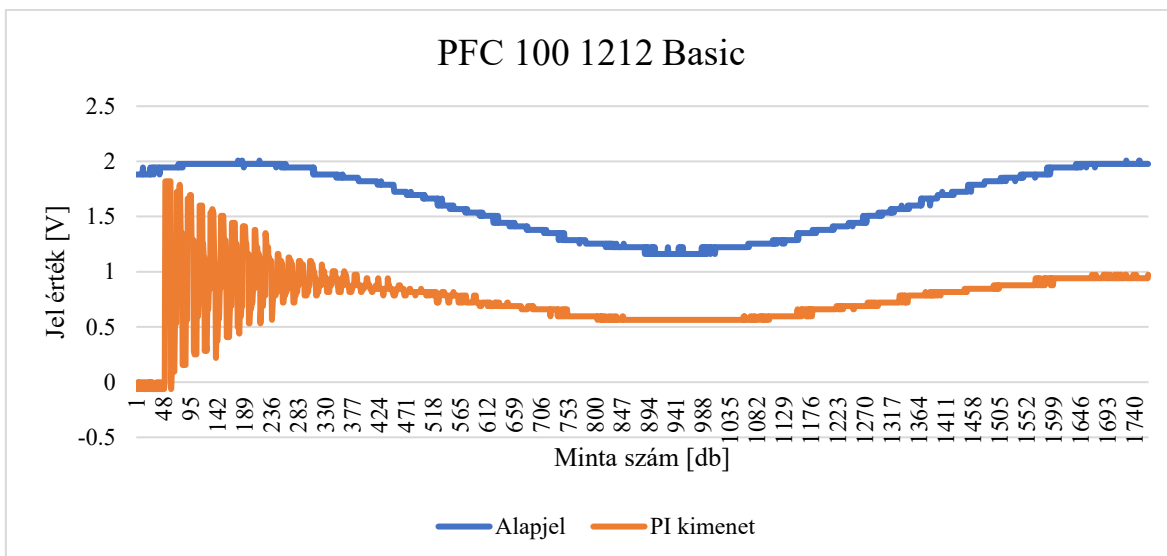
ami mintegy 76%-os növekedést jelent a referenciaarchitektúrához képest. Ez a nagyságrend már nem tekinthető csekély implementációs eltérésnek, hanem a diszkrét zárt hurkú dinamika strukturális módosulására utal.

Az 5.1. táblázatból egyértelműen látható, hogy az architektúrák nem véletlenszerű szórást mutatnak, hanem klaszterszerűen rendeződnek. Különösen figyelemre méltó, hogy a legnagyobb pozitív eltérések minden esetben olyan konfigurációkhoz kapcsolódnak, ahol a bemeneti és/vagy kimeneti felbontás 16 bites irányba tolódott. Ez arra utal, hogy a felbontás növekedése nem csupán mérési pontosságot jelent, hanem az effektív diszkrét dinamika módosulását is maga után vonhatja, amely a kritikus erősítés értékében közvetlenül megjelenik.

A P_{krit} vizsgálat eredményei tehát már a pipeline első lépcsőjében igazolják, hogy a PLC-architektúraváltás a stabilitási határt nem egységes módon módosítja. A referenciaértékhez közeli esetek mellett egyértelműen azonosíthatók olyan konfigurációk, amelyeknél a stabilitási tartomány beszűkül, illetve olyanok is, ahol jelentős mértékben kitolódik. Ez a jelenség megerősíti, hogy a migrálhatóság kérdése a stabilitási struktúra architektúrafüggő átalakulásával járó dinamikai probléma.

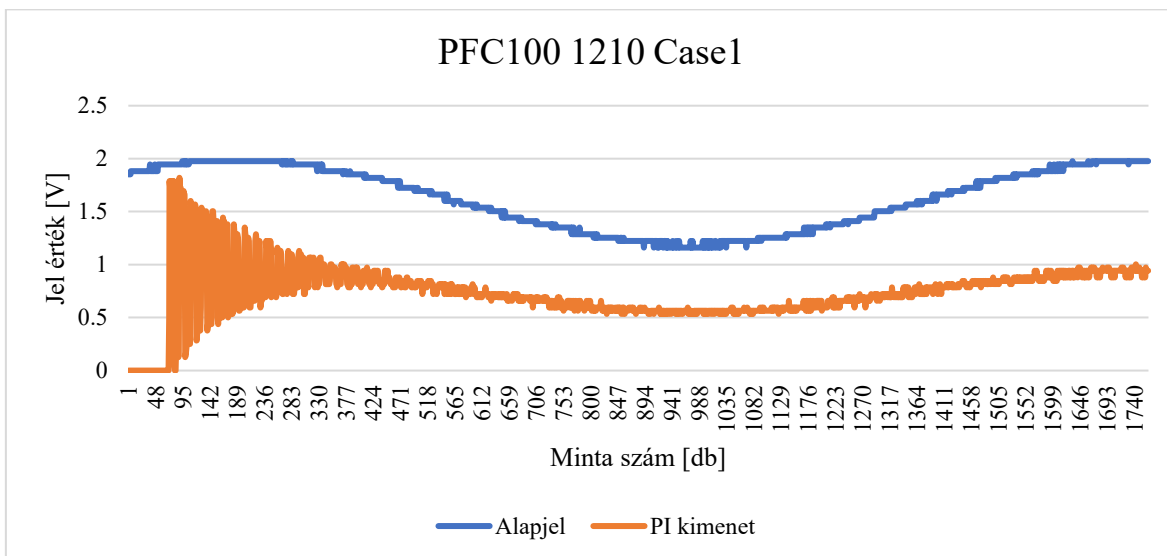
5.4.2. P-only diagnosztika eredményei

A P-only vizsgálat során a rendszer viselkedését a P_{krit} értéknél, azaz határstabil működési tartományban rögzítettem, integráló ág nélkül ($K_i = 0$). A cél annak vizsgálata volt, hogy a stabilitási határon megjelenő dinamikai karakter milyen mértékben módosul az architektúraváltás hatására.



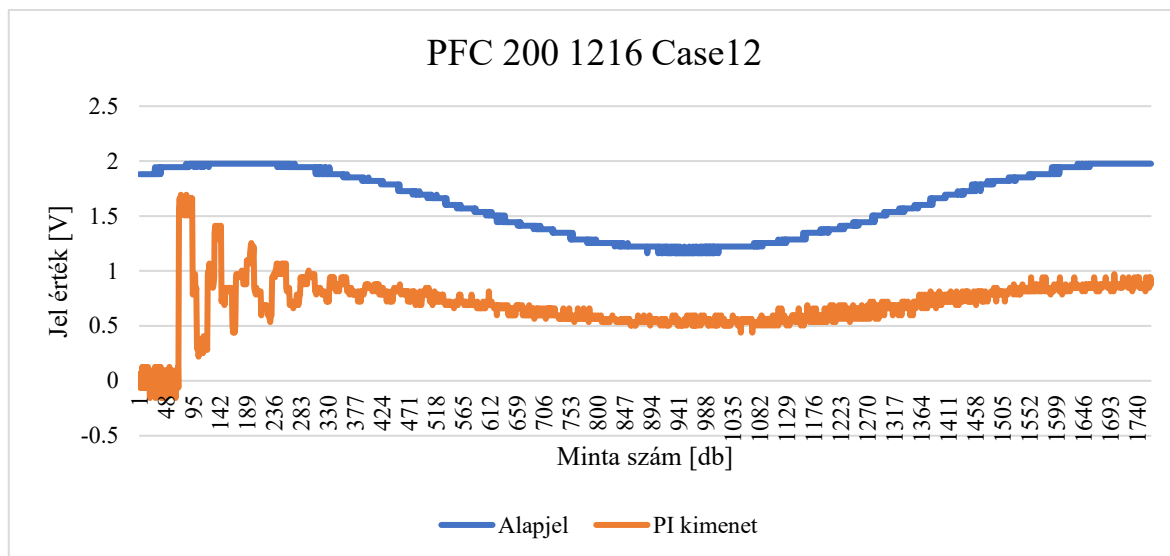
5.1. Ábra A referenciaarchitektúra (PFC100 12–12 Basic) határstabil válasza P-only vizsgálat során

Az 5.1. ábra a referenciaarchitektúra (PFC100 1212 Basic) határstabil válaszát mutatja. A jelalak jól csillapodó oszcillációt követően közel állandó amplitúdójú, strukturált viselkedést mutat. Az oszcilláció periódusa és a csillapodási karakter a referencia dinamikai ujjlenyomatát definiálja.



5.2. Ábra A PFC100 1210 Case1 konfiguráció határstabil válasza P-only vizsgálat során

Az 5.2. ábra a Case1 (PFC100 1210) konfiguráció válaszát ábrázolja, amely a P_{krit} vizsgálat alapján a referenciaértékhez közeli kritikus erősítést mutatott. A jelalak összehasonlítása alapján megfigyelhető, hogy az oszcillációs struktúra, az amplitúdó és a lecsengési karakter közel azonos a referenciaarchitektúrával. Bár kisebb amplitúdó- és zajszintbeli eltérések láthatók, a dinamikai karakter alapvetően megőrződik. Ez összhangban áll a korábban számított mérsékelt relatív eltéréssel: $|\Delta P_{crit}| < 0,05$



5.3. Ábra A PFC200 12–16 Case 12 konfiguráció határstabil válasza P-only vizsgálat során

Az 5.3. ábra a Case6 (PFC200 1216) konfiguráció határstabil viselkedését mutatja, amely a P_{krit} vizsgálat alapján jelentős pozitív eltérést mutatott ($K_{p,crit} = 1,65$). A jelalak egyértelműen eltér a referenciaarchitektúráétól. Az oszcillációs amplitúdó jelentősen megnövekedett, a jel karaktere szabálytalanabb, és az oszcillációs periódus is módosult. A csillapodási viselkedés nem illeszkedik a referenciaarchitektúra dinamikai mintázatához, ami arra utal, hogy az effektív diszkrét dinamika strukturálisan megváltozott. Fontos megfigyelni, hogy a jelentős P_{krit} -eltolódást mutató architektúrák esetében a P-only határstabil válasz nem pusztán amplitúdóban tér el, hanem a teljes oszcillációs struktúra módosul. Ez arra utal, hogy az architektúra nemcsak a stabilitási határt tolja el, hanem a zárt hurkú pólusstruktúrát is átrendezi. A diszkrét pólusok elhelyezkedése az egységkör közelében megváltozik, ami a periódusidő és az oszcillációs forma eltéréseiben manifesztálódik.

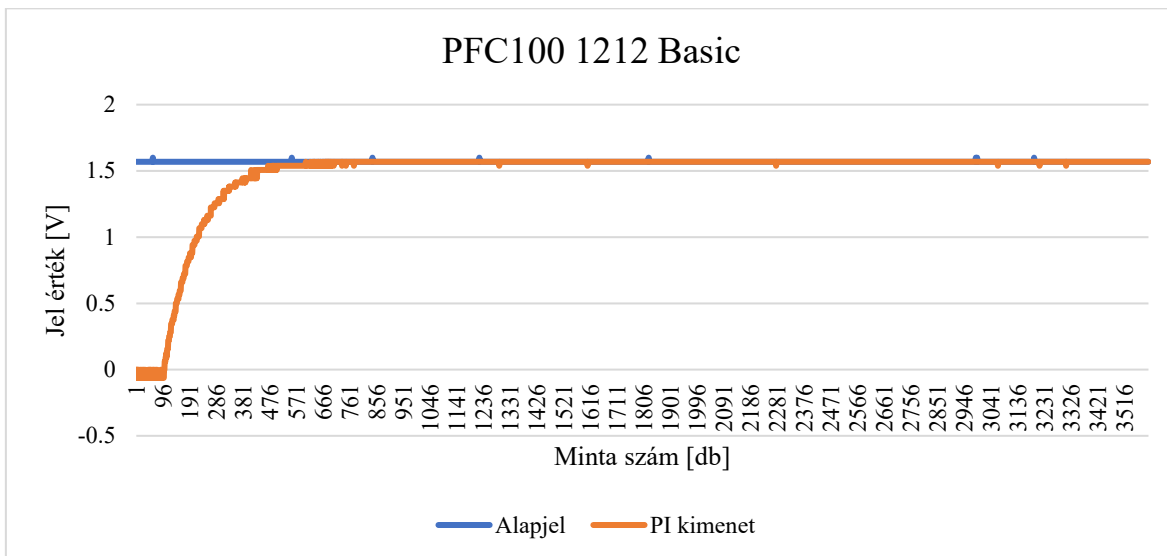
A három vizsgált eset összevetése alapján megállapítható, hogy a P-only határstabil ujjlenyomat jól korrelál a P_{krit} vizsgálat eredményeivel. Azok az architektúrák, amelyek kritikus erősítése közel marad a referenciaértékhez, dinamikai karakterükben is hasonló viselkedést mutatnak. Ezzel szemben a jelentős stabilitási eltolódást mutató konfigurációk határstabil válasza markánsan eltér a referenciaarchitektúráétól.

A P-only diagnosztika tehát nem csupán a stabilitási határ megerősítésére szolgál, hanem annak kvantitatív és dinamikai értelmezését is lehetővé teszi. A határstabil válasz jelalakja olyan viselkedési ujjlenyomatot képez, amely az architektúra diszkrét implementációjának sajátosságait közvetlenül tükrözi. Ez a lépcső így megerősíti, hogy a migrálhatóság kérdése nem kizárólag stabilitási, hanem dinamikai kompatibilitási probléma is.

5.4.3. I-only diagnosztika empirikus eredményei

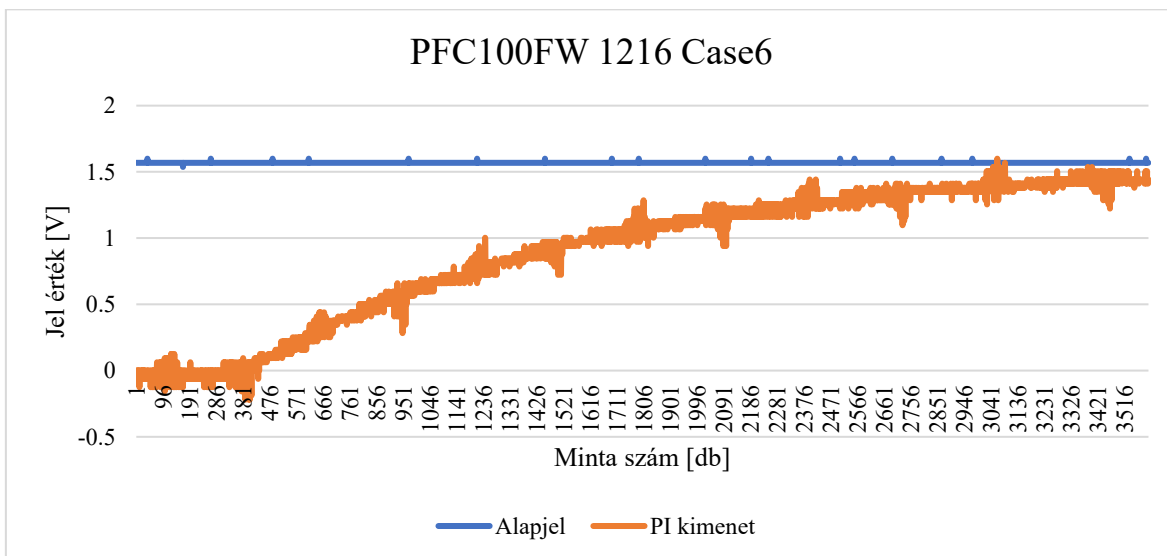
Az I-only vizsgálat során az arányos tagot kikapcsoltam ($K_p = 0$), míg az integráló erősítést rögzített, kis értékre állítottam ($K_i = 0,01$). Ebben a konfigurációban a szabályozó kimenetét kizárólag az integráló ág határozza meg, ezért a diszkrét idejű működést a

korábban a (24) egyenletben megadott integráló rekurzió írja le. A rendszer válasza így kizárólag az integráló ág felhalmozási karakterét tükrözi. A vizsgálat célja annak feltárása volt, hogy az architektúraváltás milyen mértékben módosítja a felhalmozás sebességét, az állandósult értékhez való közeledés dinamikáját, valamint a hosszú távú viselkedés stabilitását.



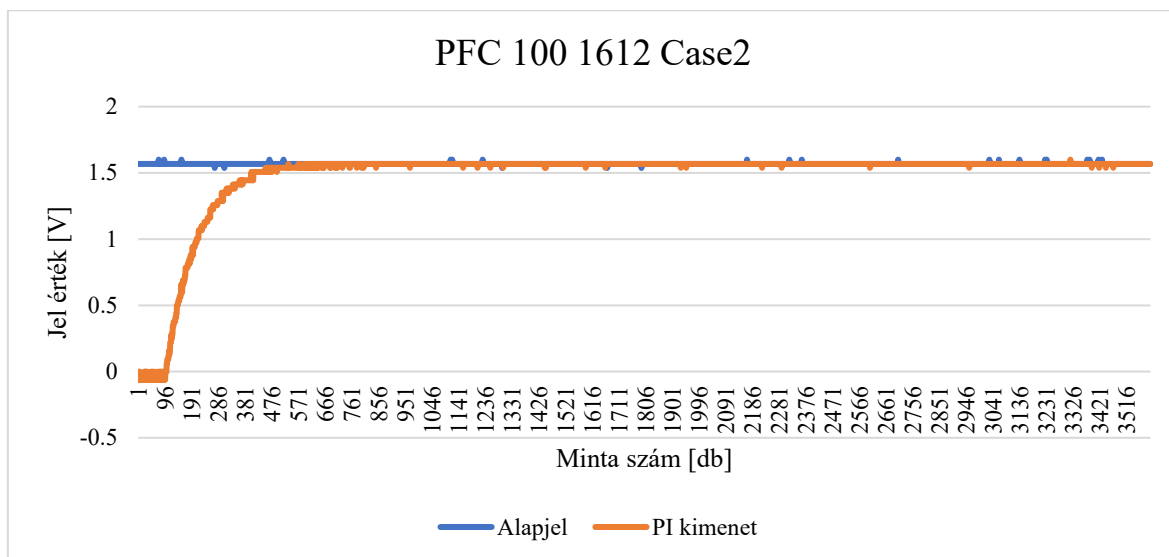
5.4 Ábra A referenciaarchitektúra (PFC100 12–12 Basic) I-only vizsgálat során mért dinamikai válasza

Az 5.4. ábra a referenciaarchitektúra (PFC100 1212 Basic) I-only válaszát mutatja. A jelalak jól definiált, monoton növekedést mutat a referenciaérték irányába, amely viszonylag rövid idő alatt eléri az állandósult tartományt. A válasz karaktere sima, a felhalmozás egyenletes, az állandósult hiba gyakorlatilag elhanyagolható. Ez a viselkedés definiálja az integráló ág referencia-ujjlenyomatát.



5.5 Ábra A PFC100FW 12–16 Case 6 konfiguráció I-only vizsgálat során mért dinamikai válasza

Az 5.5. ábra a Case6 (PFC100FW 1216) konfiguráció I-only válaszát mutatja. A jelalak egyértelműen eltér a referenciaarchitektúra viselkedésétől. A felhalmozás sebessége csökkent, a jel lépcsőzetesebb karaktert mutat, valamint jelentős zajszerű fluktuációk jelennek meg a teljes átmeneti tartományban. Az állandósult érték elérése lassabb, és a jel környezetében nagyobb amplitúdójú ingadozások figyelhetők meg. Ez arra utal, hogy az effektív mintavételi idő, illetve a kvantálási struktúra az integráló hatás kumulatív működését érdemben módosítja.



5.6 Ábra A PFC100 16–12 Case 2 konfiguráció I-only vizsgálat során mért dinamikai válasza

Az 5.6. ábra a Case2 (PFC100 1612) konfiguráció választ ábrázolja. Ebben az esetben a felhalmozási karakter közelebb áll a referenciaarchitektúrához, ugyanakkor kisebb, de jól azonosítható eltérések figyelhetők meg az átmeneti szakasz meredekségében és az állandósult tartomány stabilitásában. A válasz gyors, de a jel felső tartományában enyhe kvantálási jellegű oszcillációk jelennek meg, amelyek a referenciaarchitektúrán nem figyelhetők meg ilyen mértékben. Az I-only vizsgálatok összehasonlítása alapján megállapítható, hogy az integráló ág különösen érzékeny az architektúrafüggő numerikus és időzítési különbségekre. Mivel az integráló tag minden mintavételi ciklusban hozzáad egy $K_i T_s e[k]$ értéket a korábbi állapothoz, az effektív mintavételi idő vagy a kvantálási lépcső legkisebb változása is időben felhalmozódva jelenik meg. Ez a hatás a beállási idő növekedésében, az állandósult hiba ingadozásában, valamint a jel simaságának romlásában manifesztálódik.

A három vizsgált eset összevetése alapján látható, hogy az integráló ág viselkedése erősebben differenciálja az architektúrákat, mint a P-only vizsgálat. Míg a referenciaértékhez közeli P_{krit} eseteknél a P-only jelalak még hasonló lehet, az I-only konfiguráció már markáns eltéréseket mutathat. Ez azt jelzi, hogy a migrálhatóság megítélésében az integráló ág vizsgálata kulcsszerepet játszik, mivel a hosszú távú, kumulatív dinamika érzékenyebb indikátora az architektúrafüggő implementációs különbségeknek.

Az I-only diagnosztika tehát megerősíti, hogy az architektúraváltás nem csupán a stabilitási határt vagy a határstabil dinamikai karaktert módosíthatja, hanem az integráló felhalmozási mechanizmus működését is. Ez a jelenség közvetlenül alátámasztja a migrálhatóság többdimenziós értelmezésének szükségességét, amely a következő fejezetben metriaalapú és döntéstámogató formában kerül formalizálásra.

5.5. A három diagnosztikai vizsgálat összegző értelmezése

A P_{krit} , a P-only és az I-only vizsgálatok empirikus eredményei együttesen értelmezve koherens és strukturált képet adnak a PI paraméterek architektúrafüggő migrálhatóságáról. A három diagnosztikai lépcső nem egymástól független megfigyeléseket eredményezett, hanem konzisztens mintázatot mutatott a vizsgált konfigurációk között.

A P_{krit} vizsgálat során kimutattam, hogy a kritikus arányos erősítés architektúránként jelentős mértékben eltérhet a referenciaértéktől. A stabilitási határ eltolódása klaszterszerűen jelent meg: egyes konfigurációk esetében a kritikus erősítés közel maradt a referenciaarchitektúrához, míg más esetekben akár 70–80%-os eltérés is megfigyelhető volt. Ez a jelenség már önmagában azt jelzi, hogy a PLC-architektúraváltás a zárt hurkú stabilitási struktúrát módosítja, még változatlan szabályozóparaméterek mellett is.

A P-only diagnosztika a határstabil működés dinamikai karakterét tette vizsgálhatóvá. Azoknál az architektúráknál, amelyek kritikus erősítése közel maradt a referenciaértékhez, a határstabil oszcilláció jelalakja és periódusa is hasonló karaktert mutatott. Ezzel szemben a jelentős P_{krit} -eltolódást mutató konfigurációk esetében a határstabil válasz struktúrája is markánsan eltért: módosult az oszcillációs periódusidő, az amplitúdó, valamint a jelalak szabályossága. Ez azt mutatja, hogy a stabilitási határ eltolódása nem elszigetelt numerikus jelenség, hanem a teljes diszkrét pólusstruktúra átrendeződésének következménye.

Az I-only vizsgálat tovább erősítette ezt a képet. Az integráló ág fix $K_i = 0,01$ mellett rögzített válaszai azt mutatták, hogy az architektúraváltás nem csupán a stabilitási határt és a határstabil dinamikai karaktert módosítja, hanem a felhalmozási mechanizmus működését is. A referenciaarchitektúrához közeli esetekben az integráló válasz sima, gyorsan beálló és stabil volt, míg a jelentős P_{krit} -eltolódást mutató konfigurációk esetében a felhalmozási sebesség, a beállási idő és az állandósult tartomány viselkedése érdemben eltért. Ez arra utal, hogy az effektív mintavételi idő, a kvantálási struktúra és a firmware-végrehajtás különbségei kumulatív módon befolyásolják a zárt hurkú működést.

A három diagnosztikai lépcső eredményei tehát nem ellentmondanak egymásnak, hanem egymást megerősítik. Azok az architektúrák, amelyek a P_{krit} vizsgálatban jelentős eltérést mutattak, a P-only és I-only vizsgálatokban is markáns dinamikai különbségeket eredményeztek. Ezzel szemben a referenciaértékhez közeli kritikus erősítést mutató konfigurációk a dinamikai ujjlenyomat tekintetében is hasonló viselkedést produkáltak.

Ez az összefüggés megerősíti, hogy a migrálhatóság nem redukálható egyetlen paraméterre vagy egyetlen mérőszámra. A stabilitási határ, a határstabil dinamikai karakter és az integráló felhalmozási viselkedés együttes vizsgálata szükséges a strukturált értelmezéshez. A diagnosztikai pipeline alkalmazásával így lehetőség nyílik a migrálhatóság

többdimenziós, viselkedésalapú értelmezésére, amely megalapozza a következő fejezetben bemutatott metriaalapú formalizálást és döntéstámogató keretrendszert.

5.6. A fejezethez kapcsolódó tézisek

Tézis II.

Kidolgoztam és empirikusan validáltam egy folyamatfüggetlen, zárt hurkú, háromlépcsős diagnosztikai módszert (Pkrit–P-only–I-only), amely alkalmas a PI szabályozóparaméterek PLC-architektúraváltás melletti migrálhatóságának strukturált vizsgálatára.

II/1. altézis.

Kimutattam, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja PLC-architektúraváltás esetén a zárt hurkú diszkrét rendszer stabilitási határát architektúrafüggő módon módosíthatja. A kritikus arányos erősítés empirikus meghatározásával 16 PLC-konfiguráció esetében igazoltam, hogy a Pkrit vizsgálat a diagnosztikai módszer strukturális előszűrő elemeként alkalmazható.

II/2. altézis.

Igazoltam, hogy a határstabil dinamikai karakter P-only konfigurációban a referencia- és célarchitektúra között eltérhet, ami a zárt hurkú diszkrét pólusstruktúra és az effektív dinamika architektúrafüggő módosulására utal. A határstabil válasz jelalakja, oszcillációs karaktere és dinamikai mintázata diagnosztikai ujjlenyomatként használható a migrálhatóság vizsgálatában.

II/3. altézis.

Kimutattam, hogy az integráló ág felhalmozási viselkedése I-only konfigurációban érzékenyen reagál az architektúrafüggő mintavételi, kvantálási és numerikus megvalósítási különbségekre. A felhalmozási dinamika és az állandósult viselkedés eltéréseinek feltárásával a diagnosztikai módszer kiemelten informatív harmadik elemét képezi.

A fentiek alapján igazoltam, hogy a módszer a stabilitási viszonyok, a határstabil dinamikai karakter és az integráló ág felhalmozási viselkedésének elkülönített vizsgálata révén reprodukálható és differenciáló diagnosztikai képet ad a vizsgált architektúrákról. [S1], [S2], [S3], [S8]

6. MIGRÁLHATÓSÁG KVANTITATÍV DÖNTÉSTÁMOGATÁSA

6.1. A fejezet célja és motivációja

A 4. fejezet empirikus vizsgálatai igazolták, hogy azonos PI-szabályozóparaméterek alkalmazása mellett a zárt hurkú szabályozási viselkedés PLC-architektúraváltás esetén mérhető és reprodukálható módon módosul. A migrálhatóság nem bináris jelenségként jelent meg, hanem több metria mentén eltérő mértékű viselkedésváltozásként. Az 5. fejezetben bevezetett háromlépcsős diagnosztikai pipeline (P_{krit} – P-only – I-only) strukturált módon tette vizsgálhatóvá a stabilitási határ eltolódását, a határstabil dinamikai karaktert, valamint az integráló ág felhalmozási viselkedését. Ezzel a migrálhatóság problémája viselkedésalapú, folyamatfüggetlen diagnosztikai keretbe került.

Ugyanakkor a diagnosztikai eredmények önmagukban még nem jelentenek mérnöki döntést. A különböző architektúrákhoz tartozó metriák többdimenziós eltéréseket mutatnak, amelyek együttes értelmezést igényelnek. Egy adott konfiguráció kedvezőbb lehet stabilitási tartalék szempontjából, miközben kedvezőtlenebb integrált hibamértékeket mutat, vagy fordítva. A migrálhatóság tehát strukturálisan többkritériumos döntési problémaként jelenik meg.

A jelen fejezet célja az 5. fejezetben rögzített diagnosztikai metriák kvantitatív döntési térbe rendezése, valamint olyan többkritériumos döntéstámogató eljárás kialakítása, amely képes az architektúrák objektív rangsorolására a migrálhatóság szempontjából. A fejezetben bemutatásra kerül a döntési mátrix felépítése, a metriák normalizálása, valamint két többkritériumos módszer – egy súlyozott aggregációs modell (MCDM) és a TOPSIS eljárás – alkalmazása. A cél nem új szabályozóparaméterek meghatározása és nem optimalizáció végrehajtása, hanem annak eldöntése, hogy az adott PI-paraméterkészlet milyen mértékben tekinthető kompatibilisnek az új PLC-architektúrával. A fejezet végén a numerikus eredmények visszacsatolásra kerülnek a 4. fejezet empirikus megállapításaihoz, biztosítva a döntési modell validálását.

6.2. Diagnosztikai metriák formális definiálása és kiértékelési protokollja

Az 5. fejezetben bemutatott háromlépcsős diagnosztikai pipeline (P_{krit} – P-only – I-only) kvalitatív és kvantitatív módon tárta fel az architektúrafüggő viselkedési eltéréseket. A jelen fejezet célja ezen diagnosztikai vizsgálatok során alkalmazott metriák formális, matematikai rögzítése, valamint azok egységes kiértékelési protokolljának dokumentálása. Ez a lépés elengedhetetlen ahhoz, hogy a metriák a következő alfejezetben többkritériumos döntési térbe rendezhetők legyenek.

A metriák számítása minden esetben diszkrét idejű mintasorozaton történt. A jelölések az alábbiak:

- $y[k]$ – a mért kimeneti jel az k -edik mintában,
- $r[k]$ – referenciajel,
- $e[k] = r[k] - y[k]$ – hibajel,
- T_s – mintavételi idő,
- N – kiértékelési ablak mintaszáma.

A P-only és az I-only vizsgálatok eltérő dinamikai jellegűek, ezért a metriák és az alkalmazott mintaszámok is eltérnek. A következőkben külön kerülnek definiálásra.

6.2.1. P-only vizsgálat metriái

A P-only diagnosztika a határstabil működés dinamikai karakterének rögzítésére szolgál. Ebben az esetben az integráló ág kikapcsolásra került, és a rendszer viselkedése kizárólag az arányos hatás és az architektúra diszkrét implementációjának függvénye.

Az alkalmazott metriákat a 6.1 táblázatban foglaltam össze [54], [55], [56]:

6.1 Táblázat P-only vizsgálatra alkalmazott metriák összefoglaló táblázata

P-only metriák	
Megnevezés	Képlet
Minimum érték	$Y_{\min} = \min_{k \in [1, N]} y[k]$ (54)
Maximum érték	$Y_{\max} = \max_{k \in [1, N]} y[k]$ (55)
Átlagos kimeneti érték	$Y_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y[k]$ (56)
Amplitúdó	$A = Y_{\max} - Y_{\min}$ (57)
Átlagos abszolút hiba (MAE)	$MEA = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e[k] $ (58)
Integrált abszolút hiba (IAE)	$IAE = \sum_{k=1}^N e[k] \cdot T_s$ (59)
Túllövés (Overshoot)	$OS = \frac{Y_{\max} - r_{\text{ref}}}{r_{\text{ref}}} \cdot 100\%$ (60)
Első maximum ideje (First time max)	$T_p = k_{\text{first max}} \cdot T_s$ (61)

A P-only vizsgálat esetén minden architektúra esetében egységesen 1762 mintát vágtam ki a rögzített jelsorozatból:

$$N_{P\text{-only}} = 1762$$

Ennek indoklása a következő:

- A P-only diagnosztika célja a határstabil dinamikai karakter vizsgálata.
- A leginformatívabb szakasz az első teljes oszcillációs periódus.

- A referenciajel frekvenciájából és a mintavételi időből számítva egy teljes periódus 1762 mintának felel meg.
- Így minden architektúra azonos dinamikai tartományban kerül összehasonlításra.

Ez biztosítja, hogy az amplitúdó-, idő- és hibaalapú metriák közvetlenül összehasonlíthatók legyenek, és ne torzítsa az eredményeket eltérő időszakasz elemzése.

6.2.2. I-only vizsgálat metriái

Az I-only diagnosztika az integráló ág felhalmozási karakterét vizsgálja fix K_i mellett, arányos tag nélkül. Ebben a konfigurációban a rendszer viselkedése érzékenyen reagál az architektúrafüggő mintavételi, kvantálási és numerikus implementációs különbségekre.

Az alkalmazott metriákat a 6.2-es táblázatban foglaltam össze [53], [54], [55], [56]:

6.2 Táblázat I-only vizsgálatra alkalmazott metriák összefoglaló táblázata

I-only metirák	
Megnevezés	Képlet
Kezdeti érték	$Y_0 = y[1]$ (62)
Minimum érték	$Y_{\min} = \min_{k \in [1, N]} y[k]$ (63)
Maximum érték	$Y_{\max} = \max_{k \in [1, N]} y[k]$ (64)
Amplitúdó	$A = Y_{\max} - Y_{\min}$ (65)
Átlagos abszolút hiba (MAE)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e[k] $ (66)
Integrált abszolút hiba (IAE)	$IAE = \sum_{k=1}^N e[k] \cdot T_s$ (67)
Első maximum ideje	$T_p = k_{\text{first max}} \cdot T_s$ (68)
Beállási idő	$T_s^{\text{settling}} = \min \{k \cdot T_s \mid y[k] - r \leq 0,05r \forall j \geq k\}$ (69)

A 6.2 táblázatban szereplő beállási idő definíciójában k az első olyan mintaindexet jelöli, amelytől kezdve a kimeneti jel minden további $j \geq k$ mintára a referenciaérték körüli $\pm 5\%$ -os toleranciasávon belül marad. Ennek megfelelően a $0,05r$ tag a referenciajelhez viszonyított megengedett eltérés nagyságát fejezi ki, míg a $\forall j \geq k$ feltétel biztosítja, hogy a rendszer ne csak átmenetileg lépjen be a toleranciasávba, hanem ott tartósan is maradjon.

Az I-only diagnosztika esetén minden architektúra esetében **3602 mintát** vágtam ki:

$$N_{I\text{-only}} = 3602$$

Ennek indoklása:

- Az integráló ág felhalmozási karakterének vizsgálata hosszabb időablakot igényel.
- A rövid ablak torzítaná a settling time és az állandósult hiba számítását.
- A kivágott 3602 minta tartalmazza:
 - a kezdeti tranziens szakaszt,
 - a felhalmozási folyamatot,

- o valamint az állandósult tartományt.

Ez biztosítja, hogy az integráló dinamikát leíró metriák torzításmentesen és architektúránként összehasonlítható módon kerüljenek meghatározásra.

6.3. Migrálhatóság kvantitatív döntéstámogató formalizálása

6.3.1. A többkritériumos döntési modell (MCDM) matematikai felépítése

Az 5. fejezetben bemutatott háromlépcsős diagnosztikai pipeline (P_{krit} , P-only, I-only) eredményeként minden vizsgált PLC-architektúrához egy többdimenziós viselkedési jellemzőhalmaz rendelhető. Ezek a metriák a zárt hurkú rendszer stabilitási határát, dinamikai karakterét, valamint az integráló ág felhalmozási viselkedését írják le. Mivel a migrálhatóság nem egyetlen mutató mentén értelmezhető, hanem több, egymással részben korreláló, részben konfliktusos kritérium együttes vizsgálatát igényli, a probléma természeténél fogva többkritériumos döntési feladatként (Multi-Criteria Decision Making, MCDM) formalizálható.

Legyen az alternatívák halmaza $A = \{A_0, A_1, A_2, \dots, A_n\}$, ahol A_0 a referenciaarchitektúra (Basic), míg A_i az i -edik vizsgált PLC-konfiguráció. Legyen a diagnosztikai metriák halmaza $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$, ahol m a P_{krit} , P-only és I-only vizsgálatok során alkalmazott összes metria száma. Ekkor a döntési mátrix definiálható mint,

$$X = [x_{ij}] \in \mathbb{R}^{(n+1) \times m} \quad (70)$$

ahol, x_{ij} az i -edik architektúra j -edik metriájának értéke [57].

A migrálhatóság értelmezése során nem az abszolút metriaértékek, hanem a referenciaarchitektúrához viszonyított eltérések relevánsak. Ennek megfelelően minden metriára relatív eltérést definiálok [57]:

$$\delta_{ij} = \frac{|x_{ij} - x_{0j}|}{|x_{0j}|}, \quad (71)$$

ahol, x_{0j} a referenciaarchitektúrához tartozó metriaérték. A definícióból következik, hogy a referenciaarchitektúra esetén minden $\delta_{0j} = 0$. A relatív eltérés dimenziótlan mennyiség, amely lehetővé teszi különböző fizikai jelentésű és nagyságrendű metriák közös döntési térben történő kezelését.

Mivel az eltérések metrínként eltérő tartományban vehetnek fel értéket, a döntési mátrix oszloponként normalizálásra kerül. Legyen az adott metriára vonatkozó maximális eltérés [58]:

$$\delta_j^{\max} = \max_i (\delta_{ij}). \quad (72)$$

Ekkor a normalizált eltérés

$$r_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{\delta_j^{\max}} \quad (73)$$

amelyre, teljesül, hogy $0 \leq r_{ij} \leq 1$. A normalizálás után minden metria azonos skálán szerepel, ahol a 0 érték a referenciaarchitektúrával való teljes egyezést, az 1 érték pedig az adott metria mentén tapasztalt legnagyobb eltérést jelenti.

Az MCDM keretrendszerben a kritériumok súlyozása elengedhetetlen lépés. A jelen vizsgálatban a diagnosztikai metriák azonos jelentőségűnek tekintendők, mivel mindegyik a zárt hurkú viselkedés eltérő, de egyenrangú aspektusát reprezentálja. Ennek megfelelően egyenlő súlyozást alkalmazok [58]:

$$w_j = \frac{1}{m} \quad (74)$$

ahol, m a metriák száma, és teljesül, hogy $\sum_{j=1}^m w_j = 1$. A súlyozott normalizált mátrix elemei [58]:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (75)$$

Az i -edik architektúrához tartozó aggregált migrálhatósági index az MCDM alapelvének megfelelően a súlyozott normalizált eltérések összegeként definiálható [58]:

$$C_i = \sum_{j=1}^m v_{ij} \quad (76)$$

A súlyozás normalizáltsága miatt teljesül, hogy $0 \leq C_i \leq 1$. A C_i érték így a referenciaarchitektúrától való globális, többkritériumos eltérés mértékét fejezi ki. A $C_i = 0$ érték teljes viselkedési ekvivalenciát jelent, míg a növekvő C_i érték egyre jelentősebb architektúrafüggő dinamikai eltérést jelez. Az így definiált C_i mennyiség nem teljesítményoptimalizálási mutató, hanem viselkedési kompatibilitási index, amely a háromlépcsős diagnosztikai pipeline eredményeinek strukturált, többkritériumos (MCDM-alapú) formalizált összegzése. A következő alfejezetben ezen C_i értékek alapján kerülnek meghatározásra az adatvezérelt migrálhatósági zónahatárok [58].

6.3.2. Migrálhatósági zónahatárok adatvezérelt meghatározása

A 6.3.1 alfejezetben definiált többkritériumos döntési modell eredményeként minden vizsgált architektúrához egyetlen skalár migrálhatósági index, $C_i \in [0,1]$ rendelhető. Ez az érték a referenciaarchitektúrától való globális, súlyozott és normalizált viselkedési eltérést fejezi ki. A következő lépés annak meghatározása, hogy ezen kontinuus értékek miként alakíthatók át mérnökiileg értelmezhető migrálhatósági kategóriákká.

A migrálhatóság empirikus vizsgálatai (4. fejezet) azt mutatták, hogy az architektúrák nem homogén módon viselkednek, hanem klaszterszerű eloszlást mutatnak a viselkedési eltérések mentén. Ennek megfelelően a kategorizálás nem önkényes küszöbértékeken, hanem az adatok statisztikai szerkezetén alapul.

Legyen a migrálhatósági indexek halmaza:

$$\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} \quad (77)$$

A zónahatárok meghatározásához a robusztus statisztikai mutatók közül a mediánt és a kvartiliseket alkalmazom, mivel ezek kevésbé érzékenyek szélsőértékekre, és nem feltételeznek normális eloszlást.

A medián definíciója:

$$\tilde{C} = \text{medián}(\mathcal{C}) \quad (78)$$

az első kvartilis:

$$Q_1 = \text{kvartilis}_{0,25}(\mathcal{C}) \quad (79)$$

a harmadik kvartilis:

$$Q_3 = \text{kvartilis}_{0,75}(\mathcal{C}) \quad (80)$$

Ezen mennyiségek a migrálhatósági tér természetes töréspontjait reprezentálják. A kvartilis-alapú felosztás előnye, hogy az architektúrák relatív elhelyezkedését veszi figyelembe a teljes minta eloszlásán belül, nem pedig abszolút, előre rögzített határértékekhez köti a kategóriákat.

A négyzónás migrálhatósági struktúra az alábbi módon kerül definiálásra.

Az első zóna (Z1) azon architektúrákat tartalmazza, amelyek migrálhatósági indexe nem haladja meg az első kvartilist:

$$C_i \leq Q_1 \quad (81)$$

Ez a tartomány a referenciaarchitektúrához legközelebb álló viselkedési kompatibilitást jelenti. Ezek az architektúrák a diagnosztikai metriák többsége mentén csak minimális eltérést mutatnak.

A második zóna (Z2) a medián alatti, de az első kvartilist meghaladó értékeket tartalmazza:

$$Q_1 < C_i \leq \tilde{C} \quad (82)$$

Ebben a tartományban a migrálhatóság továbbra is kedvező, azonban már mérhető eltérések jelennek meg bizonyos metriák mentén.

A harmadik zóna (Z3) a medián és a harmadik kvartilis közötti tartomány:

$$\tilde{C} < C_i \leq Q_3 \quad (83)$$

Ezen architektúrák esetében a viselkedési eltérés strukturálisan jelentősebb, és a migráció csak korlátozott feltételek mellett tekinthető elfogadhatónak.

A negyedik zóna (Z4) a harmadik kvartilis feletti értékeket tartalmazza:

$$C_i > Q_3 \quad (84)$$

Ez a tartomány a legnagyobb globális viselkedési eltérést mutató architektúrákat jelenti, ahol a diagnosztikai pipeline több dimenzió mentén is markáns különbséget azonosított. Ezek az esetek strukturális migrációs inkompatibilitásra utalnak.

A kvartilis-alapú felosztás módszertani indokoltsága abban rejlik, hogy a migrálhatósági index nem előre definiált fizikai határértékhez kötődik, hanem a vizsgált architektúrák relatív eloszlásából származik. Ez biztosítja, hogy a zónák a tényleges adatstruktúrát tükrözzék, és ne mesterséges kategorizálás eredményeként jöjjenek létre.

Fontos hangsúlyozni, hogy a zónahatárok nem abszolút minőségi küszöbök, hanem relatív kompatibilitási osztályok. A kategorizálás célja nem a rendszer teljesítményének minősítése, hanem a referenciaarchitektúrához viszonyított viselkedési eltérés strukturált értelmezése. A következő alfejezetben bemutatásra kerül, hogy a számított C_i értékek és az ezek alapján meghatározott zónák milyen mértékben egyeznek az 5. fejezet empirikus migrációs kategóriáival, ezzel validálva a döntési modell konzisztenciáját.

6.3.3. Numerikus eredmények és migrálhatósági kategóriák értelmezése

A 6.3.1 alfejezetben definiált többkritériumos döntési modell eredményeként minden vizsgált PLC-architektúrához egy aggregált migrálhatósági index C_i került meghatározásra. A 6.3.2 alfejezetben ezen indexek statisztikai szerkezetére építve kvartilis-alapú, négyzónás migrálhatósági struktúra került definiálásra. A jelen alfejezet célja a konkrét numerikus eredmények bemutatása, valamint azok empirikus validálása a 4. fejezet migrációs megállapításaival szemben. A számított C_i értékek az architektúrák teljes diagnosztikai ujjlenyomatának normalizált, súlyozott és aggregált eltérését reprezentálják a referenciaarchitektúrához viszonyítva. Az értékek eloszlása nem egyenletes, hanem klaszterszerű mintázatot mutat, amely összhangban áll a stabilitási és dinamikai vizsgálatok során tapasztalt különbségekkel.

6.3. Táblázat A vizsgált architektúrák migrálhatósági indexe (C_i) és zónabesorolása

PLC konfiguráció	C_i összegzett érték	Zóna
Basic: PFC1001212	0	
Case1: PFC100 1210	0,05366	Z1
Case2: PFC100 1612	0,5739	Z4
Case3: PFC100 1610	0,3870	Z3
Case4: PFC100FW 1212	0,3112	Z3
Case5: PFC100FW 1210	0,1823	Z1
Case6: PFC100FW 1216	0,5380	Z4
Case7: PFC100FW 1612	0,2078	Z2
Case8: PFC100FW 1610	0,2953	Z2
Case9: PFC100FW 1616	0,4802	Z4
Case10: PFC200 1212	0,1995	Z1
Case11: PFC200 1210	0,2504	Z2
Case12: PFC200 1216	0,4312	Z3
Case13: PFC200 1612	0,1995	Z1
Case14: PFC200 1610	0,2551	Z2
Case15: PFC200 1616	0,4461	Z4

A 6.3 táblázatban szereplő eredmények alapján megfigyelhető, hogy a migrálhatósági indexek négy, jól elkülöníthető tartományba rendeződnek. A Z1 zónába tartozó architektúrák alacsony C_i értékkel rendelkeznek, ami azt jelzi, hogy a referenciaarchitektúrához viszonyított globális viselkedési eltérés minimális. Ezek az esetek összhangban állnak a 4. fejezetben empirikusan migrálhatónak minősített konfigurációkkal, ahol sem a stabilitási határ, sem a P-only, sem az I-only vizsgálat nem mutatott érdemi romlást.

A Z2 zónába sorolt architektúrák esetében a C_i érték mérsékelt növekedést mutat. Ezek a konfigurációk az empirikus vizsgálatok során finomhangolást igénylő esetekként jelentek meg. A döntési modell tehát nem pusztán numerikus eltérést jelez, hanem visszaigazolja a korábban kvantitatívan azonosított migrációs kategóriát.

A Z3 zóna architektúrái már strukturálisan nagyobb eltérést mutatnak a referenciaarchitektúrához képest. A diagnosztikai pipeline eredményei alapján ezekben az esetekben több dimenzió mentén egyidejű romlás figyelhető meg, különösen az integrált hibamértékek és az időalapú mutatók tekintetében. A döntési modell ezen konfigurációkat a középső tartomány felső részébe sorolja, amely konzisztens az empirikus „korlátozottan migrálható” kategóriával.

A Z4 zónába tartozó architektúrák rendelkeznek a legnagyobb C_i értékekkel. Ezek az esetek a 4. fejezetben bemutatott empirikus eredmények alapján is a legmarkánsabb dinamikai eltérést mutatták, mind a stabilitási határ, mind a P-only és I-only vizsgálatok során. A döntési modell ezen konfigurációkat a legmagasabb globális eltérési tartományba helyezi, ami megerősíti a strukturális migrációs inkompatibilitás fennállását.

Különösen fontos megfigyelés, hogy a kvartilis-alapú zónahatárok nem mesterségesen erőltetett kategóriákat eredményeznek, hanem természetes töréspontokat rajzolnak ki az C_i értékek eloszlásában. A klaszterszerű elrendeződés azt mutatja, hogy a migrálhatóság többkritériumos, MCDM-alapú formalizálása nem torzítja az empirikus viselkedési mintázatot, hanem numerikusan is reprodukálja azt.

Ez a konzisztencia a modell egyik legerősebb validációs eleme. A 4. fejezetben empirikus, mérnöki értelmezés alapján azonosított migrációs kategóriák és a 6. fejezetben formalizált, többkritériumos döntési modell által generált zónák között egyértelmű megfeleltetés áll fenn. Ez azt jelenti, hogy a migrálhatósági index nem absztrakt matematikai konstrukció, hanem a valós, zárt hurkú viselkedési eltérések strukturált leképezése.

Összefoglalva megállapítható, hogy a többkritériumos döntési modell (MCDM) alkalmazása lehetővé tette a migrálhatóság kvantitatív, reprodukálható és objektív értékelését. A módszer a háromlépcsős diagnosztikai pipeline eredményeit egyetlen kompatibilitási indexbe integrálja, majd adatvezérelt módon migrálhatósági zónákba rendezi az architektúrákat. Ez a formalizált döntési keret közvetlen mérnöki alkalmazhatóságot biztosít, miközben megőrzi a disszertáció korábbi fejezeteiben bemutatott empirikus eredményekkel való konzisztenciát.

6.4. A migrálhatóság TOPSIS-alapú kvantitatív értékelése

6.4.1. A TOPSIS döntési mátrixának előállítás és a súlyozott normalizált forma

A TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) eljárás a többkritériumos döntéstámogatás (MCDM) geometriai alapú módszerei közé tartozik. A módszer alkalmazásának előfeltétele egy olyan döntési mátrix előállítása, amelyben az alternatívák a vizsgált PLC-architektúrák, a kritériumok pedig a diagnosztikai pipeline ($P_{\text{krit}} - P\text{-only} - I\text{-only}$) során meghatározott kvantitatív metrikák. A jelen disszertációban a TOPSIS bemeneti tere szándékosan azonos a 6.3 fejezetben alkalmazott döntési térrel, mivel a cél nem új metrikáskészlet kialakítása, hanem a migrálhatóság alternatív, geometriai rangsorolása ugyanazon diagnosztikai információ felhasználásával.

A TOPSIS-alapú értékelés bemeneti tere megegyezik a 6.3.1 alfejezetben definiált többkritériumos döntési térrel. Ennek megfelelően a vizsgált architektúrákhoz tartozó döntési mátrix, a referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérések, valamint ezek normalizált és súlyozott alakja a korábban a (70)–(75) egyenletek szerint kerültek meghatározásra. A TOPSIS módszer ehhez képest nem új döntési teret vezet be, hanem ugyanennek a térnek a geometriai alapú rangsorolását végzi el az ideális és negatív ideális megoldásokhoz viszonyított távolság alapján.

6.4.2. Pozitív és negatív ideális megoldás meghatározása

A 6.4.1 alfejezetben előállított súlyozott normalizált döntési mátrix képezi a TOPSIS geometriai rangsorolás alapját. A módszer lényege, hogy minden alternatíva relatív pozícióját vizsgálja egy pozitív ideális és egy negatív ideális referenciaállapothoz képest. A migrálhatóság értelmezésében az ideális állapot a referenciaarchitektúrához legközelebb álló viselkedést, míg a negatív ideális állapot a legnagyobb globális eltérést reprezentálja. Mivel

a jelen döntési térben minden kritérium költségjellegű (a kisebb eltérés kedvezőbb migrálhatóságot jelent), a pozitív ideális megoldás a metriánkénti minimális súlyozott eltérésvektor [59]:

$$A^+ = \{A_1^+, A_2^+, \dots, A_m^+\} \quad (85)$$

ahol

$$A_j^+ = \min_i (v_{ij}) \quad (86)$$

Ez a vektor minden dimenzióban a legkisebb eltérést tartalmazza a vizsgált architektúrák között. A referenciaarchitektúra esetében, ahol minden relatív eltérés zérus, teljesül: $v_{0j} = 0$, így az ideális pont több dimenzióban közvetlenül a referenciaarchitektúrához kötődik. Ez összhangban van a migrálhatóság definíciójával, hiszen a teljes viselkedési ekvivalencia az ideális állapot.

A negatív ideális megoldás ezzel szemben a metriánkénti maximális súlyozott eltérésvektor [59]:

$$A^- = \{A_1^-, A_2^-, \dots, A_m^-\} \quad (87)$$

ahol

$$A_j^- = \max_i (v_{ij}) \quad (88)$$

Ez a pont a döntési tér azon szélső állapotát reprezentálja, amely minden kritérium mentén a legnagyobb globális eltérést mutatja a referenciaarchitektúrától. A negatív ideális pont nem konkrét architektúrát jelent, hanem a vizsgált alternatívák közötti legkedvezőtlenebb kombinációt dimenzióként. A TOPSIS geometriai értelmezése szerint minden architektúra egy m -dimenziós tér pontjaként reprezentálható. A pozitív ideális és a negatív ideális pont ezen tér két szélső referenciapontja. A migrálhatóság kérdése így átfordul egy távolságmérési problémába: mennyire közel helyezkedik el az adott architektúra az ideális viselkedési állapothoz, és mennyire távolodik el a legrosszabb kombinációtól.

Fontos hangsúlyozni, hogy az ideális és negatív ideális pont meghatározása nem külső referenciaértékhez kötött, hanem a vizsgált architektúrák relatív szerkezetéből adódik. Ez biztosítja, hogy a módszer adatvezérelt maradjon, és nem tartalmaz előre rögzített, szubjektív határértékeket. Az így definiált referenciapontok képezik a következő alfejezetben bevezetett euklideszi távolságszámítás alapját.

6.4.3. Euklideszi távolságok, relatív közelség és rangsorolási mechanizmus

A 6.4.2 alfejezetben meghatározott pozitív ideális A^+ és negatív ideális A^- referenciapontok után a TOPSIS módszer következő lépése az alternatívák geometriai elhelyezkedésének kvantitatív meghatározása a döntési térben. A súlyozott normalizált mátrix $V = [v_{ij}]$ minden sora egy m -dimenziós pontként értelmezhető, ahol m a

diagnosztikai metrikák száma. A migrálhatóság így egy többdimenziós térben értelmezett kompatibilitási probléma.

Az i -edik architektúra pozitív ideális ponttól mért euklideszi távolsága [60]:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (89)$$

Ez a mennyiség azt méri, hogy az adott architektúra mennyire tér el az ideális, azaz referencia-közeli viselkedéstől. Minél kisebb S_i^+ , annál közelebb áll az architektúra a migrálhatóság szempontjából optimális állapothoz.

A negatív ideális ponttól mért távolság [60]:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad (90)$$

Ez a mennyiség azt fejezi ki, hogy az adott architektúra mennyire távolodik el a legkedvezőtlenebb viselkedési kombinációtól. Minél nagyobb S_i^- , annál távolabb esik az architektúra a legrosszabb állapottól.

A TOPSIS rangsorolás alapja a relatív közelségi mutató, amely a két távolság arányából származik [60]:

$$T_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (91)$$

Teljesül: $0 \leq T_i \leq 1$. Ha $S_i^+ = 0$, azaz az architektúra egybeesik az ideális ponttal, akkor $T_i = 1$. Ha $S_i^- = 0$, azaz az architektúra egybeesik a negatív ideális ponttal, akkor $T_i = 0$. A relatív közelségi mutató tehát normalizált formában fejezi ki az alternatíva pozícióját az ideális és a legrosszabb állapot között [60].

A módszer geometriai értelmezése szerint az architektúrák egy m -dimenziós kompatibilitási térben helyezkednek el, ahol az ideális pont a referenciaarchitektúra viselkedési karakteréhez legközelebb eső állapot, míg a negatív ideális pont a legnagyobb eltérést reprezentálja. A relatív közelségi mutató nem lineáris aggregáció, hanem euklideszi normán alapuló távolságmérés eredménye, amely a kritériumok közötti kölcsönhatást és a domináns eltérések hatását négyzetes formában veszi figyelembe.

Fontos hangsúlyozni, hogy a TOPSIS nem optimalizációs eljárás, hanem rangsorolási mechanizmus. A módszer nem módosítja a PI-paramétereket, és nem törekszik új beállítás meghatározására, hanem kizárólag a meglévő paraméterkészlet migrálhatósági kompatibilitását értékeli többdimenziós távolságmérés segítségével. A döntési szabály egyszerű: a nagyobb T_i értékkel rendelkező architektúra kedvezőbb migrálhatóságot mutat.

A relatív közelségi mutatók alapján az architektúrák csökkenő sorrendben rangsorolhatók: $T_{(1)} \geq T_{(2)} \geq \dots \geq T_{(n)}$. Ez a rangsor képezi a migrálhatóság TOPSIS-alapú

kvantitatív sorrendjét. A következő alfejezetben ezen numerikus eredmények kerülnek bemutatásra és zónákba rendezésre.

6.4.4. A TOPSIS-alapú migrálhatósági rangsor és zónastruktúra

A 6.4.3 alfejezetben definiált relatív közelségi mutatók T_i minden vizsgált architektúrára kiszámításra kerültek. Az így kapott értékek a diagnosztikai metrikák többdimenziós terében mért geometriai közelséget fejezik ki az ideális migrálhatósági állapothoz.

A kapott T_i értékek eloszlása nem lineáris, hanem klaszterszerű szerkezetet mutat, amely lehetővé teszi a migrálhatóság kvartilis-alapú zónákba rendezését. A statisztikai határértékek:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 25\% \text{ kvartilis}(T_i), \\ \tilde{T} &= \text{medián}(T_i), \\ Q_3 &= 75\% \text{ kvartilis}(T_i). \end{aligned}$$

Mivel a TOPSIS esetében a nagyobb T_i érték kedvezőbb migrálhatóságot jelent, a zónák az alábbi 6.5 táblázatban kerülnek definiálásra:

6.4. Táblázat Migrálhatósági zónák definiálása a TOPSIS T_i mutató alapján

Migrálhatósági zóna	Zóna definiálása
Z1 (erősen migrálható)	$T_i \geq Q_3$
Z2 (migrálható)	$\tilde{T} \leq T_i < Q_3$
Z3 (korlátozottan migrálható)	$Q_1 \leq T_i < \tilde{T}$
Z4 (nem migrálható)	$T_i < Q_1$

6.5. Táblázat *A vizsgált PLC-architektúrák TOPSIS-alapú relatív közelségi mutatója és zónabesorolása*

Konfiguráció	T_i	Zóna
Basic: PFC1001212	1	Z1
Case1: PFC100 1210	0,922965	Z1
Case2: PFC100 1612	0,564559	Z2
Case3: PFC100 1610	0,737798	Z1
Case4: PFC100FW 1212	0,606645	Z1
Case5: PFC100FW 1210	0,903083	Z1
Case6: PFC100FW 1216	0,109924	Z4
Case7: PFC100FW 1612	0,496285	Z3
Case8: PFC100FW 1610	0,490976	Z3
Case9: PFC100FW 1616	0,169645	Z4
Case10: PFC200 1212	0,49033	Z3
Case11: PFC200 1210	0,500858	Z2
Case12: PFC200 1216	0,125069	Z4
Case13: PFC200 1612	0,521934	Z2
Case14: PFC200 1610	0,496479	Z3
Case15: PFC200 1616	0,126386	Z4

A kapott rangsor alapján (6.6 táblázat) megfigyelhető, hogy az architektúrák a migrálhatósági térben négy jól elkülöníthető tartományba rendeződnek. A legnagyobb T_i értékekkel rendelkező konfigurációk viselkedése közel esik az ideális ponthoz, míg a legkisebb értékek jelentős globális eltérést jeleznek a referenciaarchitektúrához képest. A TOPSIS-alapú zónastruktúra így önálló, geometriai elven működő migrálhatósági besorolást eredményez, amely a diagnosztikai metrikák többdimenziós szerkezetét egyetlen rangsorolási rendszerben integrálja.

6.5. A migrálhatósági döntési modellek összehasonlító elemzése és validálása

A 6.3. fejezetben a migrálhatóság többkritériumos, lineáris aggregációra épülő MCDM-formalizálását dolgoztam ki, míg a 6.4. fejezetben a TOPSIS módszer alkalmazásával egy geometriai alapú rangsorolási keretet állítottam fel. Jelen alfejezet célja annak vizsgálata, hogy e két döntési modell milyen mértékben képes visszaadni a 4. fejezetben empirikus úton azonosított migrációs kategóriákat, valamint mennyiben áll összhangban az 5.4.1. alfejezetben bemutatott P_{krit} stabilitási eredményekkel. Elemzésem célja tehát nem pusztán két matematikai módszer összevetése, hanem annak igazolása, hogy a javasolt döntési modellek közül melyik tekinthető a migrálhatóság szempontjából strukturálisan konzisztens, robusztus és mérnökileg is indokolható értékelési keretnek.

A 4. fejezetben végzett empirikus vizsgálataim alapján az egyes architektúrákat három kategóriába soroltam: migrálható, korlátozottan migrálható és nem migrálható csoportba. E

besorolás kizárólag a zárt hurkú viselkedésből származó mérőszámok, válaszfüggvények és stabilitási jelenségek alapján történt, tehát abban a szakaszban még nem alkalmaztam formális döntéstámogató modellt. Éppen ezért különösen fontos eredménynek tartom, hogy a 6.3. fejezetben bevezetett MCDM-alapú kompatibilitási index és annak négyzónás struktúrája ezt az empirikus kategóriarendszert nagyfokú egyezéssel reprodukálta. A Z4 zónába tartozó architektúrák rendre azok közül kerültek ki, amelyek a 4. fejezetben is egyértelműen nem migrálhatónak bizonyultak, mivel jelentős dinamikai romlást, nagy relatív hibát, számottevő beállásiidő-növekedést és stabilitási határ-eltolódást mutattak. Ezzel szemben a Z1 zónába jellemzően azok a konfigurációk kerültek, amelyek empirikusan is a referenciaarchitektúrához közeli zárt hurkú viselkedést adtak, tehát migrálhatónak voltak tekinthetők. A Z2 és Z3 zónák a korlátozottan migrálható esetek numerikus megfelelőiként értelmezhetők, ugyanakkor nem pusztán visszaadták a köztes kategóriát, hanem finomabb szerkezetben is elkülönítették annak belső határait. Ennek alapján megállapítottam, hogy az MCDM-modell nem egyszerűen utólag ráillesztette a kvantitatív struktúrát az empirikus eredményekre, hanem ténylegesen képes volt azokat reprodukálni és tovább differenciálni.

A döntési modell validálásában kiemelt szerepet tulajdonítottam az 5.4.1. alfejezetben bevezetett P_{krit} vizsgálatnak is. A kritikus arányos erősítés relatív eltérése a stabilitási struktúra architektúrafüggő eltolódását fejezi ki, ezért a pipeline első, előszűrő elemének tekintetem. Vizsgálataim során azt tapasztaltam, hogy a nem migrálható kategóriába sorolt architektúrák esetében a P_{krit} eltérések minden esetben számottevőek voltak, és ezek az eltérések a globális kompatibilitási indexben is magas értékkel jelentek meg. Másként fogalmazva: minél nagyobb volt a stabilitási határ eltolódása, annál nagyobb inkompatibilitást jelzett az MCDM-index is. Ezt azért tartom különösen fontosnak, mert így a P_{krit} eredmény nem elszigetelt stabilitási információként jelenik meg, hanem a teljes döntési tér szerves részévé válik. Ez a kapcsolat tudományosan is megerősíti, hogy a lineáris aggregációra épülő kompatibilitási index nem önkényes metriaösszegzés, hanem a stabilitási és dinamikai eltérések strukturálisan konzisztens leképezése.

A TOPSIS módszer eredményeit ugyancsak összevettem mind az empirikus kategóriákkal, mind az MCDM-rangsorral. Megállapítottam, hogy a TOPSIS különösen a szélső, kedvezőtlen esetek azonosításában adott hasznos és többnyire konzisztens eredményt. A nem migrálható architektúrák nagy része itt is a legkedvezőtlenebb tartományba került, vagyis a módszer alkalmasnak bizonyult arra, hogy a markánsan inkompatibilis konfigurációkat kiemelje. Ugyanakkor a migrálható és a korlátozottan migrálható architektúrák elkülönítése már kevésbé bizonyult stabilnak. A középmezőnyben és a kedvezőbb konfigurációk között több esetben is olyan átrendeződés jelent meg, amely kevésbé követte a 4. fejezet empirikus tapasztalatait. Ennek okát matematikailag azzal magyaráztam, hogy míg az MCDM lineáris aggregációja kiegyensúlyozottabban kezeli a diagnosztikai dimenziókat, addig a TOPSIS euklideszi távolságon alapuló szerkezete érzékenyebben reagál egyes domináns eltérésekre. Ennek következtében a TOPSIS jól ragadja meg a súlyosan nem migrálható eseteket, de kevésbé alkalmas arra, hogy a teljes migrálhatósági spektrumot a pipeline logikájával összhangban, stabilan strukturálja.

Mindezek alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a disszertáció elsődleges döntési modelljeként az MCDM-alapú kompatibilitási index tekinthető megfelelőnek. Ennek fő oka

az, hogy ez a modell nemcsak kvantitatív módon írja le a migrálhatóságot, hanem közvetlenül vissza is igazolja a 4. fejezetben empirikus úton megállapított kategóriákat. A négyzónás felosztás megfelelő érzékenységgel különítette el a migrálható, a korlátozottan migrálható és a nem migrálható konfigurációkat, miközben a köztes esetekre is értelmezhető határteret adott. A TOPSIS módszert ezzel szemben nem elsődleges döntési keretnek, hanem kiegészítő validációs eszköznek tartom: hasznos a nem migrálható architektúrák felismerésében, de a migrálhatóság teljes körű, differenciált megítélésére kevésbé bizonyult alkalmasnak. Ennek megfelelően a jelen disszertációban a migrálhatóság értékelésének fő keretét az MCDM-alapú kompatibilitási index adja, míg a TOPSIS annak geometriai szemléletű, részleges megerősítésére szolgál.

6.6. A fejezethez tartozó tézisek

Tézis III.

Az általam kidolgozott diagnosztikai módszerből származó metriák egységes döntési térbe rendezésével formalizáltam a PI szabályozóparaméterek PLC-architektúraváltás melletti migrálhatóságának kvantitatív értékelését.

Igazoltam, hogy a referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérések alapján globális kompatibilitási index képezhető, amely alkalmas a vizsgált architektúrák migrálhatóságának objektív, reprodukálható és folyamatfüggetlen jellemzésére. [S2]

III/1. altézis.

Kimutattam, hogy a Pkrit, P-only és I-only diagnosztikai vizsgálatokból származó stabilitási, dinamikai és hibaalapú jellemzők egységes metriatérbe rendezhetők. Igazoltam, hogy a különböző fizikai jelentésű metriák referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérésként történő felírása lehetővé teszi azok közös, összehasonlítható és normalizálható kezelését. [S2]

III/2. altézis.

Igazoltam, hogy a normalizált diagnosztikai eltérésekből többkritériumos kompatibilitási index képezhető, amely a vizsgált architektúrák globális viselkedési eltérését egyetlen kvantitatív mutatóban fejezi ki. Kimutattam, hogy ez az index a migrálhatóságot nem egyedi metriák mentén, hanem a teljes diagnosztikai viselkedés összegzett szerkezete alapján értékeli. [S2]

III/3. altézis.

16 PLC-konfiguráció vizsgálata alapján igazoltam, hogy a kompatibilitási index adatvezérelt zónastruktúrába rendezhető, ahol a kvartilis-alapú határképzés a diagnosztikai tér természetes eloszlását tükrözi. Kimutattam, hogy a kialakult zónák

konzisztensen reprodukálták az empirikusan azonosított architektúrák közötti különbségeket, ezáltal folyamatfüggetlen osztályozási keretrendszert adnak a migrálhatóság értékelésére. [S2]

Tézis IV.

Bizonyítottam, hogy a lineáris, súlyozott többkritériumos döntési modell (MCDM) a migrálhatóság értékelésére strukturálisan stabilabb és módszertanilag konzisztensebb kompatibilitási formalizálást biztosít, mint a geometriai normán alapuló TOPSIS-rangsorolás. A lineáris modell a diagnosztikai pipeline logikájával összhangban marad és a döntési tér egészében stabilabb döntési struktúrát eredményez.

Kimutattam, hogy míg a TOPSIS a szélső inkompatibilis esetek azonosításában megerősítő szerepet tölt be, addig a geometriai norma-alapú megfogalmazás miatt a zónahatárok környezetében rangsorolási torzítást eredményezhet, amely eltérítheti a rangsort a viselkedési kompatibilitás diagnosztikai módszer által megalapozott strukturális értelmezésétől. Ezért a lineáris kompatibilitási index a migrálhatóság értékelésére módszertanilag indokoltabb és reprodukálhatóbb elsődleges döntési keretet ad.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Disszertációmban a PI szabályozók paraméter migrálhatóságának problémáját vizsgáltam PLC-architektúraváltás esetén, modellfüggetlen módszertani keretben. Kutatásom kiindulópontját az a széles körben alkalmazott ipari gyakorlat jelentette, hogy egy működő rendszer vezérlőprogramját és a hozzá tartozó PI-paramétereket a mérnöki gyakorlat sok esetben változtatás nélkül viszi át új hardver- és firmware-környezetbe. Szisztematikus irodalmi áttekintésem alapján megállapítottam, hogy bár a szakirodalom részletesen foglalkozik a PLC-programmigráció, a szabályozóhangolás, valamint a klasszikus és adaptív szabályozási módszerek kérdésével, a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációját, mint zárt hurkú dinamikai kompatibilitási problémát nem kezeli önálló kutatási területként. E felismerés alapján a migrálhatóságot nem egyszerű implementációs mellékkérdésként, hanem a vezérlőarchitektúra és a szabályozó együttes viselkedéséből fakadó, tudományosan formalizálható kompatibilitási problémaként értelmeztem.

A kutatás empirikus szakaszában kontrollált és reprodukálható laboratóriumi környezetet alakítottam ki, amelyben a szabályozási kör minden, a PLC-től független eleme változatlan maradt, így a megfigyelt eltérések egyértelműen a vezérlőoldali architektúraváltásra vezethetők vissza. A referenciaarchitektúrához viszonyítva több CPU-, firmware- és analóg I/O-felbontásbeli konfigurációt vizsgáltam azonos PI-paraméterek, azonos ciklusidő és azonos gerjesztések mellett. Szinuszos és négyszögjeles értékkövető vizsgálatokkal igazoltam, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja még egyszerű, elsődrendű, szenzormentes folyamatmodell esetén sem tekinthető általánosan érvényes eljárásnak: a zárt hurkú válasz amplitúdója, időkarakterisztikája, valamint az integrált hibamértékek architektúrafüggően módosulnak. Eredményeim azt is megmutatták, hogy a migrálhatóság nem bináris tulajdonság, hanem fokozatos jelenség; ennek megfelelően a vizsgált konfigurációk migrálható, korlátozottan migrálható és nem migrálható csoportokba rendezhetők.

Az empirikus vizsgálatokból egy másik fontos következtetés is adódott: a fizikai folyamatra épülő laboratóriumi mérés alkalmas ugyan a jelenség bizonyítására, de ipari környezetben nem minden esetben végezhető el kockázatmentesen és gazdaságosan. Ennek alapján dolgoztam ki egy folyamatfüggetlen, zárt hurkú, viselkedésalapú diagnosztikai keretrendszert, amelyben a migrálhatóságot nem a technológiai folyamat explicit modelljén keresztül, hanem a szabályozó és a PLC együttes dinamikai ujjlenyomatán keresztül vizsgáltam. A módszer lényege, hogy a migráció szempontjából releváns eltérések nem egyetlen mérőszámban, hanem a zárt hurkú viselkedés többdimenziós szerkezetében jelennek meg, ezért a probléma csak metrialapú, strukturált megközelítésben ragadható meg érdemben. Ezzel a dolgozat egyik központi állítása az lett, hogy a paramétermigráció nem pusztán stabilitási vagy funkcionális kérdés, hanem viselkedési ekvivalencia- és kompatibilitási probléma.

E szemléletre építve bevezettem és empirikusan validáltam a háromlépcsős diagnosztikai pipeline-t, amely a P_{krit} , a P-only és az I-only vizsgálatok egymásra épülő logikáján alapul. A P_{krit} vizsgálat kimutattam, hogy a kritikus arányos erősítés architektúraváltás hatására

jelentősen eltolódhat, vagyis a stabilitási határ önmagában sem invariáns. A P-only diagnosztika megmutatta, hogy a határstabil működéshez tartozó dinamikai karakter, az oszcillációs szerkezet és a diszkrét pólusviselkedés szintén architektúrafüggő. Az I-only vizsgálat pedig igazolta, hogy az integráló ág felhalmozási mechanizmusa különösen érzékenyen reagál a mintavételi, kvantálási és numerikus implementációs különbségekre. E három vizsgálat együttesen bizonyította, hogy a PLC-architektúraváltás nem egyszerűen kis amplitúdójú teljesítményromlást okozhat, hanem a zárt hurkú effektív diszkrét dinamika strukturális átrendeződését is eredményezheti.

A disszertáció következő lépéseként a migrálhatóság problémáját kvantitatív döntéstámogatási feladattá formalizáltam. A diagnosztikai pipeline során kapott metriákat a referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérésként definiáltam, normalizáltam, majd egységes döntési térbe rendeztem. Ennek eredményeként létrehoztam egy globális kompatibilitási indexet, amely a stabilitási határ, a határstabil dinamikai karakter és az integráló ág viselkedésének együttes eltérését fejezi ki. Kimutattam, hogy ez az index adatvezérelt módon zónákba rendezhető, és a kapott zónastruktúra konzisztensen reprodukálja az empirikus vizsgálatok során azonosított migrációs kategóriákat. Ezzel a migrálhatóságot sikerült mérnöki intuíció helyett objektív, reprodukálható és többkritériumos döntési keretben értelmezni.

A kvantitatív döntési modellek összehasonlítása során a lineáris, súlyozott MCDM-megközelítést és a TOPSIS-alapú geometriai rangsorolást is alkalmaztam. Eredményeim alapján a TOPSIS hasznos megerősítést adott a szélső, egyértelműen inkompatibilis esetek azonosításához, ugyanakkor a középmezőnyben normageometriai torzítást okozhatott. Ezzel szemben a lineáris kompatibilitási index stabilabban, a diagnosztikai pipeline logikájával szorosabb összhangban és mérnöki szempontból értelmezhetőbben képezte le a migrálhatóság szerkezetét. A dolgozat egyik fontos eredménye ezért az, hogy a PI-paraméterek migrálhatósága nemcsak empirikusan kimutatható és diagnosztikailag leírható, hanem matematikailag formalizálható és döntéstámogatási szinten is kezelhető. Ez a megközelítés közvetlen gyakorlati jelentőséggel bír, mert elősegítheti a PLC-cserékhez kapcsolódó szabályozási kockázatok, állásidők és újrarahangolási bizonytalanságok csökkentését.

Összességében a disszertáció legfontosabb eredményének azt tekintem, hogy a PI-paraméterek PLC-architektúraváltás melletti migrálhatóságát sikerült az eseti mérnöki tapasztalat szintjéről egy egységes, többlépcsős, modellfüggetlen és kvantitatívan értelmezhető tudományos keretrendszerbe emelni. Az empirikus bizonyítás, a viselkedésalapú diagnosztika és a többkritériumos döntéstámogatás egymásra épülő rendszere azt mutatja meg, hogy a migrálhatóság kérdése nem mellékes implementációs részlet, hanem önálló, iparilag releváns és tudományosan is megalapozott vizsgálati probléma.

A kutatás továbbfejlesztésének irányaként indokoltnak tartom a módszer kiterjesztését további PLC-családokra, eltérő gyártói architektúrákra és komplexebb ipari folyamatokra, mivel ez teremtheti meg a módszer szélesebb körű általánosíthatóságát. Célszerű lenne a jelenlegi PI-fókuszú PID-, kaszkád- és fejlettebb ipari szabályozási struktúrák felé bővíteni,

továbbá a valós üzemi környezetből származó zavarások, mérési zajok, kommunikációs késleltetések és hálózati jitter hatását is bevonni a vizsgálatba. További kutatási irányt jelenthet egy automatikus migrációs döntéstámogató szoftvereszköz kialakítása, amely a diagnosztikai ujjlenyomat alapján előre jelzi a paramétermigráció várható kockázatát, és szükség esetén javaslatot ad a finomhangolás szükségességére. Hosszabb távon a módszer digitális ikerrel vagy online diagnosztikai modullal történő összekapcsolása is indokolt lehet, mert ez tehetné lehetővé, hogy a PLC-architektúraváltás ne utólagos hibakeresési, hanem előzetesen értékelhető és mérnökiileg kontrollálható folyamattá váljon.

8. SUMMARY

This dissertation addresses an industrially consequential yet methodologically underexplored problem: the cross-platform portability of PI controller parameters during PLC-architecture migration. The work is motivated by a common engineering practice in which validated control software and its associated PI settings are transferred unchanged to a new hardware and firmware environment. In industrial settings, this procedure is often treated as technically convenient and operationally reasonable, especially when the physical process and the high-level control logic remain unchanged. The dissertation demonstrates, however, that such unchanged parameter transfer cannot be assumed to preserve closed-loop behavior by default; rather, it must be examined as a problem of dynamic compatibility between the controller and the target PLC-architecture.

The literature review establishes the broader scientific context of the problem. PI control remains highly relevant both in industrial practice and in the research literature, particularly in PLC-based control environments, where robustness, determinism, and implementation simplicity continue to favor PI structures over more complex alternatives in many applications. At the same time, PLC migration itself is a well-documented topic, with prior studies focusing primarily on code conversion, platform compatibility, standards-based transformation, and post-migration validation. What is missing from the literature is a general, process-independent, quantitative framework for assessing whether an already validated set of PI parameters preserves its closed-loop dynamic properties when transferred unchanged to a different PLC-architecture. This gap is significant, because existing tuning approaches—whether classical, model-based, adaptive, or optimization-driven—presuppose parameter recalculation or adjustment rather than evaluating the invariance of an existing parameter set across architectures.

To address this gap, the dissertation develops a model-independent, closed-loop methodology for evaluating parameter portability without requiring an explicit mathematical model of the physical process. A controlled and reproducible experimental environment was constructed in which all non-PLC elements of the control loop were kept unchanged, thereby allowing the observed differences to be attributed to the controller-side architectural change itself. Within this framework, multiple CPU, firmware, and analog I/O configurations were examined under identical PI parameters and identical reference conditions. The empirical results show that even for a simple first-order process, unchanged PI parameter transfer can lead to measurable and reproducible modifications in closed-loop behavior. These differences do not appear along a single performance axis; rather, they emerge jointly in amplitude-based, time-domain, and error-based metrics obtained from sinusoidal and square-wave tracking experiments. The findings therefore demonstrate that parameter portability is not a universally valid engineering assumption, and that migrated configurations can be empirically distinguished as portable, conditionally portable, or non-portable.

Building on the empirical database, the dissertation introduces a process-independent, fingerprinting-based diagnostic framework that interprets parameter portability as a

multidimensional closed-loop behavioral compatibility problem. The core methodological contribution is a three-stage diagnostic pipeline based on P_{crit} , P-only, and I-only analyses. The first stage examines the shift in the critical proportional gain and shows that the stability boundary itself is architecture-dependent. The second stage analyzes marginally stable behavior in proportional-only operation and reveals changes in the dynamic character of the closed loop. The third stage isolates the accumulation behavior of the integral branch and demonstrates its sensitivity to implementation-level differences such as sampling, quantization, and numerical execution effects. Taken together, these three diagnostic stages show that PLC-architecture migration may alter not only overall control quality, but also the effective discrete-time structure of the closed loop. In this sense, portability cannot be reduced to simple functional correctness or binary stability; it must be understood as a structured form of behavioral compatibility.

The dissertation then formalizes this compatibility problem in quantitative decision-support terms. The diagnostic outputs are expressed as relative deviations with respect to a reference architecture, normalized, and organized into a unified decision space. On this basis, a global compatibility index is constructed to represent the combined effect of stability-boundary displacement, marginal dynamic distortion, and integral-branch deviation. A further important result is that this index does not support a binary view of migration outcomes. Instead, the analysis shows that portability forms a graded compatibility continuum that can be organized into data-driven zones. The resulting zone structure reproduces the migration categories identified empirically and provides a generalized, process-independent classification framework for PLC-architecture change. In this way, the dissertation moves the subject from informal engineering judgment toward an objective, reproducible, and metrically grounded evaluation methodology.

A further contribution of the work lies in the comparison of alternative quantitative decision models. The results show that a linear weighted multi-criteria decision model provides a more structurally stable and methodologically consistent formalization of portability than TOPSIS-based ranking. While TOPSIS is useful as a complementary geometric validation tool—especially for confirming clearly incompatible extreme cases—it may introduce norm-geometric distortion in the middle range of the ranking. By contrast, the linear compatibility index remains more closely aligned with the internal logic of the diagnostic pipeline and yields a more interpretable engineering basis for migration assessment. Overall, the dissertation demonstrates that unchanged PI parameter transfer under PLC-architecture migration is not merely a practical tuning inconvenience, but a scientifically well-defined and industrially relevant compatibility problem that can be empirically demonstrated, diagnostically decomposed, and mathematically formalized.

Taken as a whole, the dissertation elevates PI parameter portability from a tacit engineering assumption to a coherent scientific framework that integrates empirical evidence, behavior-based diagnostics, and quantitative decision support. Its practical relevance is direct: the proposed methodology can support engineering decisions during PLC replacement and modernization projects, reduce migration-related control risks, and help identify cases in which unchanged parameter reuse is acceptable, marginal, or unsafe.

Several directions for further development follow naturally from the present results. The methodology should be extended to additional PLC families, cross-vendor migration scenarios, and more complex industrial processes in order to test its broader generalizability. It would also be worth expanding the framework beyond PI controllers toward PID, cascade, and other industrial control structures, while explicitly incorporating measurement noise, communication delays, execution jitter, and networked control effects. A particularly valuable next step would be the development of an automated migration-assessment software tool capable of generating a behavioral fingerprinting, estimating migration risk in advance, and indicating whether retuning is likely to be necessary. In the longer term, integration with digital-twin environments or online diagnostic modules could make PLC-architecture migration a predictively assessable and engineeringly controllable process rather than a largely post hoc validation task.

9. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Tézis I.

A referenciaarchitektúrához viszonyított 15 migrált konfiguráció vizsgálata alapján empirikus mérésekkel igazoltam, hogy azonos PI-szabályozóparaméterek alkalmazása mellett a zárt hurkú szabályozási viselkedés PLC-architektúraváltás esetén mérhető és reprodukálható módon módosul, még elsőrendű folyamatmodell esetén is.

A szinuszos és négyszögjeles értékkövető vizsgálatok alapján kimutattam, hogy a migráció hatása nem egyetlen teljesítménymutató mentén jelentkezik, hanem amplitúdó-, idő- és hibaalapú metriák együttes eltérésében jelenik meg. Ezzel bizonyítottam, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja nem tekinthető általánosan érvényes eljárásnak, és a migrálhatóság empirikusan több kategóriába sorolható (migrálható, korlátozottan migrálható, nem migrálható), az elsőrendű folyamatmodellen végzett empirikus validáció keretei között. [S3], [S4], [S5], [S6], [S7], [S9]

Tézis II.

Kidolgoztam és empirikusan validáltam egy folyamatfüggetlen, zárt hurkú, háromlépcsős diagnosztikai módszert (Pkrit–P-only–I-only), amely alkalmas a PI szabályozóparaméterek PLC-architektúraváltás melletti migrálhatóságának strukturált vizsgálatára.

II/1. altézis.

Kimutattam, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja PLC-architektúraváltás esetén a zárt hurkú diszkrét rendszer stabilitási határát architektúrafüggő módon módosíthatja. A kritikus arányos erősítés empirikus meghatározásával 16 PLC-konfiguráció esetében igazoltam, hogy a Pkrit vizsgálat a diagnosztikai módszer strukturális előszűrő elemeként alkalmazható.

II/2. altézis.

Igazoltam, hogy a határstabil dinamikai karakter P-only konfigurációban a referencia- és célarchitektúra között eltérhet, ami a zárt hurkú diszkrét pólusstruktúra és az effektív dinamika architektúrafüggő módosulására utal. A határstabil válasz jelalakja, oszcillációs karaktere és dinamikai mintázata diagnosztikai ujjlenyomatként használható a migrálhatóság vizsgálatában.

II/3. altézis.

Kimutattam, hogy az integráló ág felhalmozási viselkedése I-only konfigurációban érzékenyen reagál az architektúrafüggő mintavételi, kvantálási és numerikus megvalósítási különbségekre. A felhalmozási dinamika és az állandósult viselkedés eltéréseinek feltárásával a diagnosztikai módszer kiemelten informatív harmadik elemét képezi.

A fentiek alapján igazoltam, hogy a módszer a stabilitási viszonyok, a határstabil dinamikai karakter és az integráló ág felhalmozási viselkedésének elkülönített vizsgálata révén reprodukálható és differenciáló diagnosztikai képet ad a vizsgált architektúrákról. [S1], [S2], [S3], [S8]

Tézis III.

Az általam kidolgozott diagnosztikai módszerből származó metriák egységes döntési térbe rendezésével formalizáltam a PI szabályozóparaméterek PLC-architektúraváltás melletti migrálhatóságának kvantitatív értékelését.

Igazoltam, hogy a referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérések alapján globális kompatibilitási index képezhető, amely alkalmas a vizsgált architektúrák migrálhatóságának objektív, reprodukálható és folyamatfüggetlen jellemzésére. [S2]

III/1. altézis.

Kimutattam, hogy a Pkrit, P-only és I-only diagnosztikai vizsgálatokból származó stabilitási, dinamikai és hibaalapú jellemzők egységes metriatérbe rendezhetők. Igazoltam, hogy a különböző fizikai jelentésű metriák referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérésként történő felírása lehetővé teszi azok közös, összehasonlítható és normalizálható kezelését. [S2]

III/2. altézis.

Igazoltam, hogy a normalizált diagnosztikai eltérésekből többkritériumos kompatibilitási index képezhető, amely a vizsgált architektúrák globális viselkedési eltérését egyetlen kvantitatív mutatóban fejezi ki. Kimutattam, hogy ez az index a migrálhatóságot nem egyedi metriák mentén, hanem a teljes diagnosztikai viselkedés összegzett szerkezte alapján értékeli. [S2]

III/3. altézis.

16 PLC-konfiguráció vizsgálata alapján igazoltam, hogy a kompatibilitási index adatvezérelt zónastruktúrába rendezhető, ahol a kvartilis-alapú határképzés a diagnosztikai tér természetes eloszlását tükrözi. Kimutattam, hogy a kialakult zónák konzisztensen reprodukálták az empirikusan azonosított architektúrák közötti

különbségeket, ezáltal folyamatfüggetlen osztályozási keretrendszert adnak a migrálhatóság értékelésére. [S2]

Tézis IV.

Bizonyítottam, hogy a lineáris, súlyozott többkritériumos döntési modell (MCDM) a migrálhatóság értékelésére strukturálisan stabilabb és módszertanilag konzisztensebb kompatibilitási formalizálást biztosít, mint a geometriai normán alapuló TOPSIS-rangsorolás. A lineáris modell a diagnosztikai pipeline logikájával összhangban marad és a döntési tér egészében stabilabb döntési struktúrát eredményez.

Kimutattam, hogy míg a TOPSIS a szélső inkompatibilis esetek azonosításában megerősítő szerepet tölt be, addig a geometriai norma-alapú megfogalmazás miatt a zónahatárok környezetében rangsorolási torzítást eredményezhet, amely eltérítheti a rangsort a viselkedési kompatibilitás diagnosztikai módszer által megalapozott strukturális értelmezésétől. Ezért a lineáris kompatibilitási index a migrálhatóság értékelésére módszertanilag indokoltabb és reprodukálhatóbb elsődleges döntési keretet ad.

10. NEW SCIENTIFIC RESULTS

Thesis I

I empirically demonstrated that, even in the case of a first-order process model, closed-loop control behavior changes in a measurable and reproducible manner during PLC architecture migration when identical PI controller parameters are applied across 15 migrated configurations relative to a reference architecture.

Based on sinusoidal and square-wave tracking tests, I showed that the effect of migration does not appear along a single performance indicator; rather, it is manifested in the combined deviation of amplitude-, time-, and error-based metrics. In this way, I proved that migration of PI parameters without retuning is not universally applicable, and that migratability was empirically classified into multiple categories (migratable, conditionally migratable, non-migratable), within the scope of empirical validation performed on a first-order process model. [S3], [S4], [S5], [S6], [S7], [S9]

Thesis II. – Main

I developed and empirically validated a process-independent, closed-loop, three-stage diagnostic method (Pcrit-P-only-I-only) for the structured assessment of the migratability of PI controller parameters in the context of PLC architecture migration.

Sub-thesis II/1.

I demonstrated that migration of PI parameters without modification may alter the stability limit of the closed-loop discrete system in an architecture-dependent manner during PLC architecture migration. By determining the critical proportional gain across 16 PLC configurations, I verified that the Pcrit test can be applied as a structural pre-screening element of the diagnostic method.

Sub-thesis II/2.

I verified that the marginally stable dynamic character in the P-only configuration may differ between the reference and target architectures, thereby indicating an architecture-dependent modification of the closed-loop discrete pole structure and the effective dynamics. The waveform, oscillatory character, and dynamic pattern of the marginally stable response can be used as a diagnostic fingerprint in migratability assessment.

Sub-thesis II/3.

I demonstrated that the accumulation behavior of the integral component in the I-only configuration reacts sensitively to architecture-dependent differences in sampling, quantization, and numerical implementation. By revealing deviations in accumulation dynamics and steady-state behavior, the I-only test constitutes a highly informative third element of the diagnostic method.

Based on the above, I verified that the method provides a reproducible and discriminative diagnostic representation of the investigated architectures through the separate examination of stability conditions, marginally stable dynamic character, and the accumulation behavior of the integral component. [S1], [S2], [S3], [S8]

Thesis III. – Main

By organizing the metrics derived from the diagnostic method I developed into a unified decision space, I formalized the quantitative evaluation of the migratability of PI controller parameters under PLC architecture migration.

I verified that, on the basis of relative deviations with respect to the reference architecture, a global compatibility index can be constructed that is suitable for the objective, reproducible, and process-independent characterization of the migratability of the investigated architectures. [S2]

Sub-thesis III/1.

I demonstrated that the stability-, dynamic-, and error-based characteristics derived from the Pcrit, P-only, and I-only diagnostic tests can be arranged into a unified metric space. I verified that expressing metrics with different physical meanings as relative deviations with respect to the reference architecture makes it possible to handle them jointly in a comparable and normalizable form. [S2]

Sub-thesis III/2.

I verified that a multicriteria compatibility index can be constructed from the normalized diagnostic deviations, expressing the global behavioral deviation of the investigated architectures in a single quantitative indicator. I demonstrated that this index evaluates migratability not along individual metrics, but on the basis of the aggregated structure of the overall diagnostic behavior. [S2]

Sub-thesis III/3.

I verified through 16 PLC architectures that the compatibility index can be organized into a data-driven zone structure in which quartile-based boundary formation reflects the natural distribution of the diagnostic space. I demonstrated that

the resulting zones consistently reproduced the empirically identified differences among the investigated architectures, thereby providing a process-independent classification framework for the evaluation of migratability. [S2]

Thesis IV.

I demonstrated that the linear weighted multicriteria decision model (MCDM) provides a structurally more stable and methodologically more consistent formalization of compatibility for migratability assessment than TOPSIS ranking based on geometric norms. The linear model remains aligned with the logic of the diagnostic pipeline and yields a more stable decision structure across the decision space.

I showed that, while TOPSIS effectively identifies extremely incompatible cases, it may produce ranking distortions near zone boundaries due to its geometric norm formulation. These distortions can shift the ranking away from the structural interpretation of behavioral compatibility established by the diagnostic method. Therefore, the linear compatibility index provides a more methodologically justified and more reproducible primary decision framework for migratability assessment.

11. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] K. C. Yao, C. L. Lin, és C. H. Pan, „Industrial Sustainable Development: The Development Trend of Programmable Logic Controller Technology”, *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 6230, vol. 16, no. 14, pp. 6230, júl. 2024, <https://doi.org/10.3390/su16146230>
- [2] M. Foster és C. Hammerquist, „A review of Programmable Logic Controllers in control systems education”, *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2010, <https://doi.org/10.18260/1-2--16238>
- [3] A. C. Renfrew, „Book Review: Programmable Controllers—Operation and Application”, *International Journal of Electrical Engineering & Education*, vol. 27, no. 2, pp. 185–185, ápr. 1990, <https://doi.org/10.1177/002072099002700227>
- [4] G. Rajendran, R. Raute, C. Caruana, és D. Andriukaitis, „Bridging Innovation and Sustainability: The Strategic Role of High-Efficiency Motors in Advancing Industry 5.0”, *Energies* 2026, Vol. 19, Page 1003, vol. 19, no. 4, pp. 1003, febr. 2026, <https://doi.org/10.3390/en19041003>
- [5] Ya. A. Zotov, „Issues of Development of Automated Testing System of Software for Technical Complexes of Automated Process Control Systems”, *Programmnyaya Ingeneria*, vol. 16, no. 3, pp. 122–133, márc. 2025, <https://doi.org/10.17587/prin.16.122-133>
- [6] E. L. Cesar, G. S. Fernandes, M. T. N. Kagami, és T. N. Calisto, „Technological obsolescence management of electrical equipment and automation systems”, *2019 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference, PCIC 2019*, pp. 303–310, szept. 2019, <https://doi.org/10.1109/PCIC30934.2019.9074525>.
- [7] K. C. Yao, C. L. Lin, és C. H. Pan, „Industrial Sustainable Development: The Development Trend of Programmable Logic Controller Technology”, *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 6230, vol. 16, no. 14, pp. 6230, júl. 2024, <https://doi.org/10.3390/su16146230>
- [8] W. Alsabbagh és P. Langendoerfer, „A New Injection Threat on S7-1500 PLCs - Disrupting the Physical Process Offline”, *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 3, pp. 146–162, 2022, <https://doi.org/10.1109/OJIES.2022.3151528>
- [9] S. Skogestad, „Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning”, *J. Process Control*, vol. 13, no. 4, pp. 291–309, jún. 2003, [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(02)00062-8)
- [10] D. F. Delchamps, „Stabilizing a Linear System with Quantized State Feedback”, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 35, no. 8, pp. 916–924, 1990, <https://doi.org/10.1109/9.58500>

- [11] W. Zhang, M. S. Branicky, és S. M. Phillips, „Stability of networked control systems”, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, no. 1, pp. 84–97, 2001, <https://doi.org/10.1109/37.898794>
- [12] A. O’Dwyer, „Handbook of PI and PID controller tuning rules”, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, pp. 1–608, jan. 2009, <https://doi.org/10.1142/P575>
- [13] W. Yu, D. I. Wilson, és B. R. Young, „Control performance assessment in the presence of sampling jitter”, *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 90, no. 1, pp. 129–137, jan. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.06.007>
- [14] G. Dhanabalan, S. T. Selvi, és M. Mahdal, „Scan Time Reduction of PLCs by Dedicated Parallel-Execution Multiple PID Controllers Using an FPGA”, *Sensors 2022, Vol. 22, Page 4584*, vol. 22, no. 12, pp. 4584, jún. 2022, <https://doi.org/10.3390/s22124584>
- [15] K. H. Kim, J. E. Bae, S. C. Chu, és S. W. Sung, „Improved Continuous-Cycling Method for PID Autotuning”, *Processes 2021, Vol. 9, Page 509*, vol. 9, no. 3, o. 509, márc. 2021, <https://doi.org/10.3390/pr9030509>
- [16] J. E. M. G. Pinto and mtsai., „PLC Implementation of Piecewise Affine PI Controller Applied to Industrial Systems with Constraints”, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems 2019 30:3*, vol. 30, no. 3, pp. 311–322, febr. 2019, <https://doi.org/10.1007/s40313-019-00456-z>
- [17] P. Panchal, A. Patel, és J. Barve, „PI control of level control system using PLC and LabVIEW based SCADA”, *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control, ICIC 2015*, o. 1196–1201, júl. 2015, <https://doi.org/10.1109/IIC.2015.7150929>
- [18] M. Huba, „Filter choice for an effective measurement noise attenuation in PI and PID controllers”, *Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2015*, pp. 46–51, ápr. 2015, <https://doi.org/10.1109/ICMECH.2015.7083946>
- [19] C. Yılmaz, E. N. Yılmaz, M. F. Işık, M. A. S. Usalan, Y. Sönmez, és V. Özdemir, „Design and implementation of real-time monitoring and control system supported with IOS/Android application for industrial furnaces”, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 13, no. 9, pp. 1236–1244, szept. 2018, <https://doi.org/10.1002/tee.22689>
- [20] M. Huba, „Filter choice for an effective measurement noise attenuation in PI and PID controllers”, *Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2015*, pp. 46–51, ápr. 2015, <https://doi.org/10.1109/ICMECH.2015.7083946>
- [21] A. Sergejev, S. Thompson, L. Stambeck, A. Posa, and P. Hazaveh, „Efficient Way of Converting outdated Allen Bradley PLC-5 System into Modern ControlLogix 5000 suit”, júl. 2020, <https://doi.org/10.18260/1-2-370.620-35989>
- [22] K. L. Holtrop, P. A. Anderson, és P. S. Mauzey, „Improvements to the cryogenic control system on DIII-D”, *Proceedings - Symposium on Fusion Engineering*, pp. 401–404, 2003, <https://doi.org/10.1109/fusion.2003.1426669>

- [23] E. V. Nascimento, V. dos Santos, és R. V. Aroca, „An Applied Approach for Integrating Legacy PLC-Based Systems into Industry 4.0 Environments using Low-Code Platforms”, jan. 2026, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8503985/v1>
- [24] A. Alqoud, D. Schaefer, és J. Milisavljevic-Syed, „Industry 4.0: a systematic review of legacy manufacturing system digital retrofiting”, *Manuf. Rev. (Les. Ulis).*, vol. 9, pp. 32, 2022, <https://doi.org/10.1051/mfreview/2022031>
- [25] K. L. Holtrop, P. A. Anderson, és P. S. Mauzey, „Improvements to the cryogenic control system on DIII-D”, *Proceedings - Symposium on Fusion Engineering*, pp. 401–404, 2003, <https://doi.org/10.1109/fusion.2003.1426669>
- [26] S. Campanelli, P. Foglia, és C. A. Prete, „An architecture to integrate IEC 61131-3 systems in an IEC 61499 distributed solution”, *Comput. Ind.*, vol. 72, pp. 47–67, szept. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.04.002>
- [27] D. Raphael Da Silva Di Calafiori, D. Di Calafiori, G. Dissertori, R. Jimenez Estupiñán, W. Lustermann, és S. Zelepoukine, „Status report on the architecture and future upgrades of the CMS Electromagnetic Calorimeter Control and Safety Systems”, 2018. október 26. Elérand: 2026. március 11. [Online]. Elérhető: <https://cds.cern.ch/record/2650036>
- [28] G. Liang és W. Li, „Some Thoughts és Practice on Performance Improvement in Distributed Control System Based on Fieldbus and Ethernet”, *Measurement and Control (United Kingdom)*, vol. 49, no. 3, pp. 109–118, ápr. 2016, <https://doi.org/10.1177/0020294016640557>
- [29] S. M. Salman, A. V. Papadopoulos, S. Mubeen, és T. Nolte, „A systematic migration methodology for complex real-Time software systems”, *Proceedings - 2020 IEEE 23rd International Symposium on Real-Time Distributed Computing, ISORC 2020*, pp. 192–200, máj. 2020, <https://doi.org/10.1109/ISORC49007.2020.00041>
- [30] W. W. Dai, V. N. Dubinin, és V. Vyatkin, „Migration from PLC to IEC 61499 Using Semantic Web Technologies”, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. 44, no. 3, pp. 277–291, márc. 2014, <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2013.2264671>
- [31] H. N. Tran, T. T. Nguyen, H. Q. Cao, T. H. Nguyen, H. X. Nguyen, és J. W. Jeon, „Auto-Tuning Controller Using MLP SO with K-Means Clustering and Adaptive Learning Strategy for PMSM Drives”, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 18820–18831, 2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3150777>
- [32] I. Naşcu, R. De Keyser, S. Folea, és T. Buzdugan, „Development and evaluation of a PID auto-tuning controller”, *2006 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR*, o. 122–127, 2006, <https://doi.org/10.1109/AQTR.2006.254510>
- [33] J. Lima, R. Menotti, J. M. P. Cardoso, és E. Marques, „A methodology to design FPGA-based PID controllers”, *Conf. Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, vol. 3, o. 2577–2583, 2006, <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.385252>

- [34] M. Shirazi, R. Zane, D. Maksimovic, L. Corradini, és P. Mattavelli, „Autotuning techniques for digitally-controlled point-of-load converters with wide range of capacitive loads”, *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, o. 14–20, 2007, <https://doi.org/10.1109/APEX.2007.357490>
- [35] Y. Li, K. H. Ang, és G. C. Y. Chong, „Patents, Software, and Hardware for PID Control: An Overview and Analysis of the Current Art”, *IEEE Control Syst.*, vol. 26, no. 1, o. 42–54, 2006, <https://doi.org/10.1109/MCS.2006.1580153>
- [36] L. L. T. Chan, T. Chen, és J. Chen, „PID based nonlinear processes control model uncertainty improvement by using Gaussian process model”, *J. Process Control*, vol. 42, o. 77–89, jún. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.03.006>
- [37] S. Ganjefar és M. Farahani, „Damping of subsynchronous resonance using self-tuning PID and wavelet neural network”, *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 31, no. 4, o. 1259–1276, júl. 2012, <https://doi.org/10.1108/03321641211227537>
- [38] C. F. Hsu, C. J. Chiu, és J. Z. Tsai, „Auto-tuning PID controller design using a sliding-mode approach for DC servomotors”, *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, vol. 4, no. 1, o. 93–110, márc. 2011, <https://doi.org/10.1108/17563781111115813>
- [39] V. Chopra, S. K. Singla, és L. Dewan, „Comparative Analysis of Tuning a PID Controller using Intelligent Methods”, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 11, no. 8, o. 235–249, 2014, <https://doi.org/10.12700/APH.11.08.2014.08.13>
- [40] X. Wu, J. Shen, Y. Li, és K. Y. Lee, „Steam power plant configuration, design, and control”, *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.*, vol. 4, no. 6, o. 537–563, nov. 2015, <https://doi.org/10.1002/wene.161>
- [41] M. H. Ahmad, K. Osman, és S. I. Samsudin, „Design of proportional integral and derivative controller using particle swarm optimization technique for gimbal system”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 26, no. 2, o. 714–722, máj. 2022, <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v26.i2.pp714-722>
- [42] T. Shiohara és Y. Maeda, „Enhanced Auto-Tuning of Feedback Controllers with Aggressive Search Ensuring Stability and Its Application to Galvano Scanner”, *IEEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 13, no. 5, o. 539–546, szept. 2024, <https://doi.org/10.1541/ieejia.23013778>
- [43] P. Yadav, A. Feraudo, B. Arief, S. F. Shahandashti, és V. G. Vassilakis, „Position paper: A systematic framework for categorising IoT device fingerprinting mechanisms”, *AIChallengeIoT 2020 - Proceedings of the 2020 2nd International Workshop on Challenges in Artificial Intelligence and Machine Learning for Internet of Things*, vol. 20, o. 62–68, nov. 2020, <https://doi.org/10.1145/3417313.3429384>
- [44] O. Lountain, J. Tuke, H. Brown, K. Redman, S. Wilczek, és M. A. Humphries, „A multivariate extension to the standard 4σ criterion for comparison of forensic glass

- evidence”, *Forensic Sci. Int.*, vol. 338, o. 111386, szept. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2022.111386>
- [45] N. S. Aghili, M. Rasekh, H. Karami, V. Azizi, és M. Gancarz, „Rapid identification of multiplex camellia oil adulteration based on lipidomic fingerprint using laser assisted rapid evaporative ionization mass spectrometry and data fusion combined with machine learning”, *LWT*, vol. 228, o. 118078, júl. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113863>
- [46] L. Dong, „Disturbance estimation és mitigation: Special issue editor’s note”, *ISA Trans.*, vol. 53, no. 4, o. 845, júl. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.02.008>
- [47] C. Kahraman, S. C. Onar, és B. Oztaysi, „Fuzzy Multicriteria Decision-Making: A Literature Review”, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 8, no. 4, o. 637–666, júl. 2015, <https://doi.org/10.1080/18756891.2015.1046325>
- [48] S. S. Bohra és A. Anvari-Moghaddam, „A comprehensive review on applications of multicriteria decision-making methods in power and energy systems”, *Int. J. Energy Res.*, vol. 46, no. 4, o. 4088–4118, márc. 2022, <https://doi.org/10.1002/er.7517>
- [49] X. Zhang, F. Li, H. Jin, és W. Mu, „Local Reversible Transformer for semantic segmentation of grape leaf diseases”, *Appl. Soft Comput.*, vol. 143, o. 110392, aug. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110392>
- [50] C. Benghi, „Automated verification for collaborative workflows in a Digital Plan of Work”, *Autom. Constr.*, vol. 107, o. 102926, nov. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102926>
- [51] E. M. Mohamed, B. Bouikhalene, F. Ouatik, és S. Safi, „AHP and TOPSIS methods applied in the field of scientific research”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 14, no. 3, o. 1382–1390, jún. 2019, <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v14.i3.pp1382-1390>
- [52] N. M. Yusop és R. Mamat, „Improved Event-Based Pi Controller for Limit Cycles Avoidance”, *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 13, no. 4, o. 63–76, ápr. 2021, Elérand: 2026. március 15. [Online]. Elérhető: <https://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/7264>
- [53] M. Ş. Ayas és E. Sahin, „Parameter effect analysis of particle swarm optimization algorithm in PID controller design”, *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, vol. 9, no. 2, o. 165–175, ápr. 2019, <https://doi.org/10.11121/ijocta.01.2019.00659>
- [54] M. A. Siddiqui, „Design of parallel cascade controller for nonlinear continuous stirred tank reactor”, *Scientific Reports 2025 15:1*, vol. 15, no. 1, o. 6210–, febr. 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89455-6>
- [55] C. Ismayil, R. S. Kumar, és T. K. Sindhu, „Optimal fractional order PID controller for automatic generation control of two-area power systems”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 12, o. 3329–3348, dec. 2015, <https://doi.org/10.1002/etep.2038>

- [56] H. Ali és S. Wadhvani, „Intelligent PID Controller Tuning for Higher Order Process System”, *International Journal of u- and e-Service, Science and Technology*, vol. 8, no. 6, o. 323–330, jún. 2015, <https://doi.org/10.14257/ijunesst.2015.8.6.32>
- [57] T. Van Dua, „Combination of Design of Experiments és Simple Additive Weighting Methods: a New Method for Rapid Multi-Criteria Decision Making”, *EUREKA, Physics and Engineering*, vol. 2023, no. 1, o. 120–133, jan. 2023, <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002733>
- [58] M. Ozcalici, „Asset allocation with multi-criteria decision making techniques”, *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, vol. 5, no. 2, o. 78–119, okt. 2022, <https://doi.org/10.31181/dmame0305102022o>
- [59] A. T. Gumus, „Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 2 PART 2, o. 4067–4074, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.03.013>
- [60] Wd. S. R. Naura, St. H. Mansyur, és P. Purnawansyah, „APPLICATION OF GROUP DECISION MAKING IN DETERMINING CULINARY TOURISM WITH TOPSIS AND BORDA METHODS”, *JITK (Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Komputer)*, vol. 9, no. 2, o. 236–246, febr. 2024, <https://doi.org/10.33480/jitk.v9i2.5017>

SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

A disszertációhoz köthető indexált publikációk:

- [S1] Á. Mór , R. Benotsmane, A. Trohák, “Evaluating the effects of PID control parameter migration in PLC upgrades,” *Pollack Periodica*, vol. 20, no. 3, pp. 96–102, May 2025, <https://doi.org/10.1556/606.2025.01213>
- [S2]  . M r , “A Closed-Loop Diagnostic Method for Evaluating PI Controller Parameter Migration Across Architectures,” *J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 39–44, 2025, <https://doaj.org/article/ae28e064ae5c4258b61646a9509c13dc>
- [S3] A. More, A. Trohak, “Examination of the possibility of adapting the PI algorithm,” *Proceedings of the 2023 24th International Carpathian Control Conference, ICCO 2023*, pp. 289–293, 2023, <https://doi.org/10.1109/ICCC57093.2023.10178954>
- [S4]  . M r  “PID algoritmus algoritmiz l sa ir nyit rendszerekben,” *Multidiszciplin ris Tudom nyok*, vol. 12, no. 1, pp. 46–57, May 2022, <https://doi.org/10.35925/j.multi.2022.1.4>

A disszert ci hoz k thet  egyéb publikációk:

- [S5]  . M r , A. Trohák, “PI algoritmus adopt l s nak vizsgálata intelligens adatgy jt  m dszerrel,” in *XXVI. Tavasz  Sz l Konferencia 2023*, Miskolc: Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ), 2023, pp. 413–423.
- [S6]  . M r , A. Trohák, “Szabályozandó szakasz digitális modelljének algoritmizálása ipari vezérlő környezetben,” in *Doktoranduszok fóruma*, Miskolc: Miskolci Egyetem Tudományos  s Nemzetközi Igazgatóság, Nov. 2024, pp. 75–78.
- [S7]  . M r , “Ipari automatizálás új szintje: Siemens S7-300  s S7-1500 PLC-k közötti migráció lehetőségei és kihívásai,” in *120 éves az Elektrotechnikai  s Elektronikai Intézeti Tanszék elnevezésű Jubileumi Konferencia kiadványa*, Miskolc, 2024, pp. 138–141.
- [S8]  . M r , B. L. B di, “PID szabályozó modellezése PLC kimeneti és bemeneti oldalain: k rtyacserre hatásának vizsgálata,” in *120 éves az Elektrotechnikai  s Elektronikai Intézeti Tanszék elnevezésű Jubileumi Konferencia kiadványa*, Miskolc, 2024, pp. 122–129.
- [S9]  . M r , A. Trohák, “PI, PID algoritmus paramétereinek adaptálásának vizsgálata genetikus algoritmussal,” in *PCS Science 2023 : Konferencia kiadvány*, Miskolc: Eclipse Solutions Ltd, 2023, pp. 49–56.