AZ ELMÉLETILEG ELÉRHETŐ LEGJOBB IRÁNYÍTÁS ALGORITMUSAINAK KUTATÁSA

Bevezetés

Ha valaki visszatekint az irányításelmélet fejlődésének elmúlt néhány évtizedére, akkor azt találja, hogy a kutatások mindig is az adott időszak érdeklődése és technikai lehetősége szerinti "legjobb" irányítás módszereinek, algoritmusainak a megtalálására irányultak. Egy mélyebb elemzés viszont már azt mutatja, hogy a "legjobb" tartalma hihetetlen mértékű változáson ment keresztül. Ezt a változást részletesen bemutattuk OTKA projektünk 2003-as pályázati anyagában. Eljutottunk oda, hogy a "legjobb" irányítási algoritmus keresése napjainkban az adott korlátozások mellett a legnagyobb sávszélességű (egyszerűsítve: a leggyorsabb) két-szabadságfokú irányítás meghatározását jelenti. Az adott korlátozások közül a "kemény" korlátozások azok, amelyek nem a szabályozást tervezőtől, tőlünk, hanem az alkalmazást lehetővétevő eszközök, illetve az irányítandó folyamat tulajdonságaitól függenek. Ezek a "kemény korlátok" tehát csak az eszközök illetve a folyamat megváltoztatásával, a technológia újra tervezésével, lényegesen új innovációval változtathatók meg. Ezért tűztünk ki célul olyan erős elméleti háttérrel megalapozott metodika kidolgozását, amellyel mindig meg tudnánk határozni, hogy a *fenti korlátozások mellett* mi az *elméletileg elérhető legjobb* irányítási algoritmus, amelyet referenciának, célnak illetve abszolut korlátnak is tekinthetünk. Az elméletileg elérhető legjobb irányítást - a nemzetközileg elfogadott elnevezés híján - az egyszerűség kedvéért határ-optimálisnak neveztük el.

A korábbi OTKA kutatási projektekben két olyan tudományos eredményre jutottunk, amely kellő megalapozottságot adott a kitűzött feladat megoldásához. Az egyik a két-szabadságfokú zárt szabályozási rendszerekre bevezetett *K-B-parametrizálás* (*Keviczky-Bányász*) és az ez alapján kidolgozott generikus irányítási séma (*GTDOF*: *Generic Two-Degree-Of-Freedom*), amely igen kedvezőnek bizonyult számos irányításelméleti kérdéskör megoldásában. Másrészt sikerült néhány alacsony fokszámú holtidős folyamatra a generikus séma keretén belül a minőségi jellemzők (relatív sávszélesség), a robusztussági jellemzők, a beavatkozó jelben létrejövő túllendülés, valamint a folyamat paraméterek között [*Robusztusság*=Függvény *(Minőség; Korlátozás; Folyamat)*] alakú összefüggéseket találni.

Generikus tudományos eredmények

Elméleti kutatási eredményeink gyökerei egy egyszerű, de érdekes észrevételre vezethetők vissza. Egy zárt szabályozási kör érzékenységi függvénye az alábbi módon lényeges összetevőkre bontható:

$$S=\underbrace{\left(1-R_{\mathrm{n}}\right)}_{S_{\mathrm{terv}}}+\overbrace{\underbrace{\left(R_{\mathrm{n}}-\hat{T}\right)}_{S_{\mathrm{real}}}-\underbrace{\left(T-\hat{T}\right)}_{S_{\mathrm{mod}}}}^{S_{\min}}=S_{\mathrm{terv}}+S_{\mathrm{real}}+S_{\mathrm{mod}}=\underbrace{\left(1-R_{\mathrm{n}}\right)}_{S_{\mathrm{terv}}}+\underbrace{\left(R_{\mathrm{n}}-T\right)}_{S_{\min}}=$$

$$=S_{\mathrm{terv}}+S_{\min}=\underbrace{\left(1-\hat{T}\right)}_{S_{\mathrm{szab}}}+S_{\mathrm{mod}}=\underbrace{\left(1-\hat{T}\right)}_{S_{\mathrm{terv}}+S_{\mathrm{real}}}+S_{\mathrm{mod}}=S_{\mathrm{szab}}+S_{\mathrm{mod}}$$

Itt R_{n} a zárt szabályozási kör minőségi tulajdonságaira megfogalmazott referencia modell, T a valódi ($S+T=1$), $\hat{T}$ a modell alapú ($\hat{S}+\hat{T}=1$) kiegészítő érzékenységi függvény. Továbbá $S_{\mathrm{terv}}=(1-R_{\mathrm{n}})$ a tervezés, $S_{\mathrm{real}}=\left(R_{\mathrm{n}}-\hat{T}\right)$ a realizálhatóság, $S_{\mathrm{mod}}=-\left(T-\hat{T}\right)=\hat{T}-T$ pedig a modellezés miatti veszteség (nem ideális alakulás) hozzájárulása az érzékenységi függvényhez. A másik felbontásban $S_{\mathrm{szab}}=\left(1-\hat{T}\right)$ a szabályozás, $S_{\mathrm{min}}=(R_{\mathrm{n}}-T)$ a minőség szerinti dekompozíciós tagot jelenti. Az egyes összetevők értelmezése egyszerű és könnyen magyarázható.

Az érzékenységi függvények fenti hármas dekompozíciója bepillantást nyújt a zárt szabályozási körök úgynevezett határ-optimalitásába, azaz az elérhető legjobb szabályozás jellemzésére. Ehhez olyan optimalitási kritériumot kell alkotnunk, amely a három tagra külön is megfogalmazható, azaz

$$
\begin{aligned}
J_{\mathrm{követés}} &\le J_{\mathrm{terv}}^{\mathrm{r}}+J_{\mathrm{real}}^{\mathrm{r}}+J_{\mathrm{mod}}^{\mathrm{r}}=\left\|S_{\mathrm{terv}}^{\mathrm{r}}\right\|+\left\|S_{\mathrm{real}}^{\mathrm{r}}\right\|+\left\|S_{\mathrm{mod}}^{\mathrm{r}}\right\| \\
J_{\mathrm{zavarel}} &\le J_{\mathrm{terv}}^{\mathrm{n}}+J_{\mathrm{real}}^{\mathrm{n}}+J_{\mathrm{mod}}^{\mathrm{n}}=\left\|S_{\mathrm{terv}}\right\|+\left\|S_{\mathrm{real}}\right\|+\left\|S_{\mathrm{mod}}\right\|
\end{aligned}
$$

mind a követés, mind pedig a zavarelhárítás feladatára. Itt a $\|\ldots\|$ jelölést (normát) használtuk az optimalitási kritérium kifejezésére.

A tervezési veszteség optimalizálása

Az első tag optimalizálása elsődlegesen az elérhető legjobb (leggyorsabb) $R_{\mathrm{r}}=R_{\mathrm{r}}^{\mathrm{opt}}$ és $R_{\mathrm{n}}=R_{\mathrm{n}}^{\mathrm{opt}}$ referencia modellek meghatározását jelenti. Ez az alábbi korlátozás melletti

$$
\begin{aligned}
R_{\mathrm{r}}^{\mathrm{opt}} &= \arg\left\{\min_{R_{\mathrm{r}}}\left(J_{\mathrm{terv}}^{\mathrm{r}}\right)\Big|_{u\in\mathbb{U}}\right\}=\arg\left\{\min_{R_{\mathrm{r}}}\left\|1-R_{\mathrm{r}}\right\|\Big|_{u\in\mathbb{U}}\right\} \\
R_{\mathrm{n}}^{\mathrm{opt}} &= \arg\left\{\min_{R_{\mathrm{n}}}\left(J_{\mathrm{terv}}^{\mathrm{n}}\right)\Big|_{u\in\mathbb{U}}\right\}=\arg\left\{\min_{R_{\mathrm{n}}}\left\|1-R_{\mathrm{n}}\right\|\Big|_{u\in\mathbb{U}}\right\}
\end{aligned}
$$

optimum feladat megoldását jelenti, ahol a választott $J_{\mathrm{terv}}^{\mathrm{r}}=\left\|1-R_{\mathrm{r}}\right\|$ és $J_{\mathrm{terv}}^{\mathrm{n}}=\left\|1-R_{\mathrm{n}}\right\|$ kritériumok azt fejezik ki, hogy mindegyik referencia modellnek az ideális egységet kell legjobban megközelítenie. Ezt a feladatot a szabályozó kimenetére vonatkozó $u\in\mathbb{U}$ korlátozás mellett kell megoldanunk. Itt $\mathbb{U}$ rendszerint az u megengedett tartományát jelenti, azaz az $\mathbb{U}:|u|\le 1$ amplitúdó korlátozást. Tehát ez a lépés az elérhető legjobb szabályozás tervezési célját biztosítja.

A realizálhatósági veszteség optimalizálása

Ezen feladat célja a $J_{\mathrm{real}}^{\mathrm{r}}$ és $J_{\mathrm{real}}^{\mathrm{n}}$ realizálhatósági veszteség tagok

$$
\begin{aligned}
G_{\mathrm{r}}^{\mathrm{opt}} &= \arg\left\{\min_{G_{\mathrm{r}}}\left(J_{\mathrm{real}}^{\mathrm{r}}\right)\right\}=\arg\left\{\min_{G_{\mathrm{r}}}\left\|R_{\mathrm{r}}-\hat{T}_{\mathrm{r}}\right\|\right\} \\
G_{\mathrm{n}}^{\mathrm{opt}} &= \arg\left\{\min_{G_{\mathrm{n}}}\left(J_{\mathrm{real}}^{\mathrm{n}}\right)\right\}=\arg\left\{\min_{G_{\mathrm{n}}}\left\|R_{\mathrm{n}}-\hat{T}\right\|\right\}
\end{aligned}
$$

szerinti optimalizálása, amely az optimális szabályozók beágyazott $G_{\mathrm{r}} = G_{\mathrm{r}}^{\mathrm{opt}}$ és $G_{\mathrm{n}} = G_{\mathrm{n}}^{\mathrm{opt}}$ szűrőinek az optimális megválasztásával biztosítható. *Inverz stabilis* folyamatokra az $R_{\mathrm{r}} = \hat{T}_{\mathrm{r}}$ és $R_{\mathrm{n}} = \hat{T}_{\mathrm{n}}$ feltétel elvileg elérhető, ami a triviális $G_{\mathrm{r}} = G_{\mathrm{n}} = 1$ megoldást jelenti. Az általánosabb *inverz labilis* esetre az optimális átviteli függvényeket meg kell határozni. Igen fontos megjegyezni, hogy ez a tag csak a folyamat modelljétől, tehát tőlünk függ, s nem függ a valódi folyamattól. Jól látható, hogy ez a lépés az igazi határ-optimális szabályozó tervezés.

A modellezési veszteség optimalizálása

A $J_{\mathrm{mod}}^{\mathrm{r}}$ modellezési veszteség optimalitása egy speciális $y_{\mathrm{r}} = y_{\mathrm{r}}^{\mathrm{opt}}$ az alapjel helyén alkalmazott optimális gerjesztés, és a segítségével egy $\hat{P} = \hat{P}^{\mathrm{opt}}$ optimális folyamat modell meghatározását jelenti az alábbi úgynevezett minimax probléma megoldásaként

$$\hat{P}^{\mathrm{opt}} = \arg\left\{ \min_{\hat{P}} \left[\max_{y_{\mathrm{r}}} \left(J_{\mathrm{mod}}^{\mathrm{r}} \right) \right] \right\} = \arg\left\{ \min_{\hat{P}} \left[\max_{y_{\mathrm{r}}} \left\| S_{\mathrm{mod}}^{\mathrm{r}} \right\| \right] \right\}$$

Ez a feladat kétlépéses: az (alkalmazott kritériumtól függő) optimális alapjel ($y_{\mathrm{r}}^{\mathrm{opt}}$) rendszerint maximális kimenőjel szórást biztosít amplitúdó korlátozás esetében. A zárt rendszer így kapott kimenőjelét mérve megfelelő modellezési (identifikációs) módszerrel meghatározzuk a modellezési hiba választott $\left\| S_{\mathrm{mod}}^{\mathrm{r}} \right\|$ optimalitási kritériumának a minimumát biztosító folyamat modellt. Ezt a feladatot a legrosszabb esethez (*worst case*) tartozó identifikációs feladatnak nevezzük.

Mindhárom tagot egyidejűleg optimalizálni nem egyszerű feladat. A gyakorlatban iterációs technikát használnak, amelyben egy-egy lépésben mindig egy optimalizálási probléma megoldása történik.

Részletes tudományos eredmények

A legfontosab új eredmények azok, amelyeket az OTKA projektünk címében jeleztünk és a bevezetőben összefoglaltunk, nevezetesen az a szeparációs módszer, amelynek segítségével sikerült a szabályozási kör hibáját három olyan alapvető összetevőre szétbontani (új dekompozíció), amelyek elméleti határát teljesen pontosan fel tudjuk mérni. Ezek az összetevők a "tervezési veszteség", a "realizálhatósági veszteség" és a "modellezési veszteség". A három összetevő nagyságát jellemző megfelelő mértékek (normák) alkalmazásával egy háromdimenziós térben szemléltethető minden egyváltozós szabályozás elérhető legjobb, azaz határtulajdonsága. A tervezési veszteség minimális értéke a beavatkozó jel túlvezérlési korlátjától függ, értéke kivételes esetektől eltekintve nem lehet zérus. A realizálhatósági veszteség inverz stabilis és egyben stabilis folyamatokra zérussá tehető. Általános esetben ez minimum nem zérus és nem tőlünk, hanem a folyamattól függ, az invariáns tulajdonságoktól. Ez a tag megfelelő belső kompenzáló szűrők segítségével minimalizálható. A minimum az invariáns tényezőktől és a választott optimálási normától függ [14], [15], [16], [18].

Megadtuk a csak a nominális és az előző módszerrel kapott optimális referencia modellektől függő optimális szabályozók algoritmusait, amelyek a realizálhatósági veszteséget minimalizálják. Az optimális szabályozókat stabilis folyamatok *Youla-parametrizált* szabályozási köreire határoztuk meg. Az optimalitás kritériumaként a H2, Hinf és L2, Linf normákat alkalmaztuk. A realizálhatósági veszteség H2, L2 normák szerinti optimalitását a szabályozók - speciális DIOFANTOSZI egyenletek alapján számolt - belső szűrőinek felhasználásával biztosítottuk. A realizálhatósági veszteség Hinf, Linf normák szerinti optimalitását a szabályozók - speciális NEVENLINNA-PICK approximációs egyenletek alapján számolt - belső szűrőinek alkalmazásával biztosítottuk. Különlegesen érdekes eredmény, hogy a H2, Hinf normák alkalmazásával csak nem integráló optimális szabályozó nyerhető. Optimális integráló szabályozóhoz az eredeti normákat speciális "energia" illetve "supremum" normákká kellett kiegészíteni az L2, Linf normák egyidejű alkalmazásával és nem DIRAC-delta (impulzus) alakú gerjesztés feltételezésével [36], [38], [39], [41].

Az új módszerre kezd felfigyelni a nemzetközi szakmai közösség, talán evvel magyarázható a felkérés egy plenáris előadás megtartására [21]. Nem véletlenül ennek az előadásnak az volt a címe, hogy a zárt kör optimalitását próbáljuk megérteni a fentemlített dekompozíciós módszeren keresztül, mert az együttes feladat - ugyan megoldható- gyakorlatilag semmilyen információt nem biztosít a kiszámított optimum értékeléséről.

A modellezési veszteség, amelyet identifikációs veszteségnek is hívhatunk a valódi folyamat és a modellünk eltéréséből adódik. Ez utóbbi megfelelő gerjesztés alkalmazása ("input design") segítségével minimalizálható. A modellezési veszteség optimalizálását lehetővé tevő új identifikációs algoritmus [23] segítségével a zárt kör tervezési feladataitól függő optimális bemenőjel (gerjesztőjel) sorozatot kaphatunk. Érdekes új eredmény, hogy inverz stabilis folyamatokra az optimális gerjesztés a tervezési cél függvényében előre meghatározható és nem függ magától a folyamattól. Inverz labilis folyamatokra viszont függ a folyamat invariáns faktoraitól ezért csak iteratív, tanuló algoritmus képzelhető el. Megmutattuk, hogy a generikus két szabadságfokú szabályozási körökben a *KB-parametrizáláson* alapuló identifikációs módszer határ varianciái aszimptotikusan elérik a felnyitott körben alkalmazható identifikációs módszerek határ varianciáit [29]. A lineáris rendszerekre kidolgozott megközelítés bizonyos nemlineáris rendszer osztályokra is kiterjeszthető. Ezt a felismerést alkalmazva foglalkoztunk nemlineáris folyamatok zárt szabályozási körben történő identifikációjával is [19].

Optimális diszkrét idejű szabályozók rendszerint igénylik a folyamat holtidejének pontos ismeretét. Ha adaptív szavályozót alkalmazunk rendszerint a holtidő apriori ismert értékét tételezzük fel a becslési technika memória vektorában. Annak ellenére, hogy elvileg lehetséges a holtidőt bevonni az identifikációs módszerek paramétereinek körébe, itt is apriori ismert holtidőt használ a legtöbb alkalmazott módszer. Zárt rendszerek stabilitását a holtidő függvényében már számos szerző vizsgálta. Alig van viszont irodalmi eredmény a robusztus stabilitás feltételére, amikoris a stabilitást egyrészt a holtidő ismeretében bekövetkező bizonytalanság, másrészt a zárt rendszer tervezési módszerében használt minőségi előírás függvényében vizsgáljuk. Jól használható analitikus szükséges és elégséges robusztus stabilitási feltételeket tudtunk kiszámítani a holtidő bizonytalanságra egyszerű egyenlőtlenségek formájában arra az esetre, ha a folyamat teljes bizonytalansága a holtidő ismeretéből adódik. A tervezés minőségi feltétele és a holtidő bizonytalanság együttes hatását is vizsgáltuk a robusztus stabilitásra. Ezeket az összefüggéseket nem sikerült analitikus formában meghatározni, de jól használható és igen szemléletes grafikus eredményeket kaptunk arra az esetre, ha a zárt szabályozási kör előírt átvitelét elsőrendű referencia modellel adjuk meg [34]. Ilyenkor a referencia modell törési frekvenciája egyben a zárt rendszer sávszélességével egyezik meg, tehát eredményeink az adott holtidő bizonytalanság mellett elérhető legjobb sávszélességet mutatják. [1], [2]

A nemlineáris folyamatok egy speciális (LJAPUNOV-stabilis) osztályára, ahol a lineáris approximáció stabilis az adott munkapontban, szintén megvizsgáltuk a robusztusság/minőség mérőszámainak összefüggését [28].

Ha folyamat modelljének állapotteres leírása ismert, az egyik legáltalánosabban használt stabilizáló és tervezési technika az állapotvisszacsatolás. A fenti technika különlegessége, hogy az alapjelkövetés dinamikájában a megfigyelő dinamikája nem jelentkezik! Nem túl széles körben ismert viszont, hogy ez a technika csak az alapjelkövetésre biztosít megfelelő tervezési technikát, a zavarelhárítási tulajdonságai ennek a körnek nem tervezhetők. Ezen felismerés alapján olyan kétszabadságfokú struktúrát fejlesztettünk ki, amelynek a segítségével mind az alapjelkövetés, mind pedig a zavarelhárítás is egyidejűleg tervezhető. Egy ilyen struktúra megalapozza azt a korábban már néhány szerző által felvetett sejtést, hogy labilis folyamatok optimális irányítását célszerű két lépcsőben végezni. Először stabilizáljuk a rendszert, majd a második lépcsőben törekedjünk a minőség tervezésére. Sajnos a második lépés nem független az előzőtől és a valódi minőségi tervezés attól függ, hogy milyen "árat" fizettünk a stabilizálásáért. Egy gyakorlati megoldás tehát csak a két lépés iteratív alkalmazásán alapulhat. [13] Mivel a zavarelhárítás tervezésének komoly korlátai vannak, így csak megközelítőleg tudjuk ugyanazt a szabadságfokot (tehát a valódi két szabadságfokú esetet) elérni, mint egy stabilis folyamat esetében. Amennyiben nagy pontosságú zárt szabályozási körre van szükségünk ezt a körülményt kezelni kell. Erre egy kétlépcsős (kaszkád) szabályozási struktúrát dolgoztunk ki, amelynek segítségével egy valódi kétszabadságfokú tervezést valósíthatunk meg. A belső kör a klasszikus stabilizáló megfigyelőt használó állapotvisszacsatolás. A külső kör pedig az általunk korábban kifejlesztett *GTDOF* rendszer [4], [5].

Az állapotvisszacsatoláson alapuló póluselhelyezési módszerek igénylik a folyamat paraméter mátrixainak pontos ismeretét. Ennek ellenére a megfigyelővel kiegészített állapotvisszacsatolás elég jó eredményeket nyújt viszonylag nagy modell bizonytalanságok esetén is. A hiba-terjedés analizásával megmutattuk, hogy a modell bizonytalanság hogyan befolyásolja a kombinált módszer tulajdonságait [33]

Horowitz klasszikus könyvében még azt állította, hogy valamennyi kétszabadságfokú zárt szabályozási kör ekvivalens egymással. Ez természetesen igaz, de a korábbiakban már kimutattuk, hogy a végtelen számú egyenlő között sok tekintetben a legjobb a *GTDOF* topológia. Most sikerült a *GTDOF* topológiának egy olyan struktúráját kidolgozni, amely igen érdekes módon két részre bontható. Az egyik rész csak a tervezési kritériumoktól és a folyamat invariáns tényezőitől, míg a másik csak a folyamat realizálható inverzétől függ. Ezt a struktúrát sikerült blokkorientált, faktorizálható nemlineáris dinamikus folyamatok kétszabadságfokú irányítási sémáinak kidolgozására is felhasználni. A legegyszerűbb WIENER és HAMMERSTEIN modellekkel leírható folyamatokra a nemlineáris jelleg teljes kompenzációját tudtuk elérni. A módszer hatékonyságát együttes identifikációt és irányítást használó rendszerekben tudtuk demonstrálni [3], [6], [8].

Az ipari szabályozástechnikában az elmult évtizedben egy olyan módszer terjedt el viharos gyorsasággal, amelynek elméleti háttere nem túlságosan bonyolult. Ez a model alapú predikciós irányítás (*MPC*). Ez annak ellenére igaz, hogy (a meglehetősen redundáns) működési paramétereinek beállítása eléggé heurisztikus folyamat. Az *MPC* alapján nincs mód a zárt rendszer tulajdonságainak pontos tervezésére, ugyanakkor büntető paramétereit probálgatással változtatva szinte mindig lehetséges elfogadható működést beállítani. Az adaptív *MPC* algoritmusok rendszerint az úgynevezett *R-S-T* parametrizálású kétszabadságfokú rendszer leírást alkalmazzák. További jellemzőjük, hogy a zárt rendszer stabilitását a bemenőjel varianciájának büntetésével érik el. Ennek a megközelítésnek alapvetően két hátránya van: egyrészt nem könnyű közvetlen összefüggést találni egy referencia modell és az általánosított variancia kritérium büntető szűrői között; másrészt az adaptív becslésben felhasználásra kerülő d-lépéses "kvázi-lineáris" prediktor meglehetősen redundáns az identifikálandó paraméterek számában. Vizsgálatainkban kimutattuk, hogy stabilis folyamatok esetén, amikor a *GTDOF* technika használható, lehetséges ekvivalenciát találni az *R-S-T* parametrizálás és a *GTDOF* szerinti parametrizálás között. Ezt az ekvivalenciát vizsgálva bemutattuk, hogy ugyanazon tervezési feltételek mellett elegendő csak a folyamat paramétereinek a becslése az *MPC* algoritmus realizálásához. Eredményeink ismeretében minimális rendű *MPC* algoritmus konstruálható. A folyamat paraméterek rejtett elhelyezkedését is kimutatva módszert dolgoztunk ki a legjobb zárt rendszerbeli identifikáció elvégzéséhez [9], [10], [11]. Megmutattuk, hogy a legjobb zárt körbeni identifikációs tulajdonságokat is arra az esetre kapjuk (az összes lehetséges módszerrel összehasonlítva), ha a minimális rendű *MPC*-vel ekvivalens *GTDOF* módszert használjuk [17]. Ez azért egy hasznos új eredmény, mert a *GTDOF* algoritmussal a zárt rendszer tulajdonságai pontosan tervezhetőek, illetve ilyenkor a korlátozások csak a folyamat tulajdonságaitól függenek, így invariánsak.[20].

Az utóbbi években egyre több figyelem fordul a tervezési módszerek között a DIOPHANTOSZI egyenlettel történő póluselhelyezésre. Ez az eljárás hosszabb alkalmazási gyakorlatot igényel, mert a közvetlen algebrai módszer (a rendszerint fellépő numerikus nehézségek mellett) elméletileg végtelen sok megoldást generál, amelyek közül nem egyszerű kiválasztani a gyakorlatban is alkalmazható minimális rendű szabályozó megoldását. Bemutattuk, hogy ezzel a módszerrel az alapjelkövetés tekintetében el tudjuk érni pontosan azt az optimalitási szabadságot, amit stabilis folyamatokra a *Youla-paraméterezés* nyújt. Ugyanakkor zavarelhárításra csak a póluselhelyezés működik, bár korlátozott hatékonyságú iterációs megoldás kialakítható. Ha pedig stabilis szabályozót is szeretnénk kapni, akkor jelenleg még nincs szisztematikus módszer a tervezésre. Korszerű számítástechnikai eszközökkel viszont vizsgálható a végtelen sok megoldás halmazában az a részhalmaz, amely kielégítheti speciális tervezési igényeinket [22], [24]. Új iteratív eljárást dolgoztunk ki ezen korlátok részbeni kiküszöbölésére [27].

Megmutattuk, hogy a klasszikus SMITH szabályozó a *Youla-parametrizált* szabályozók speciális esete. Ugyanakkor az általános tervezési módszer sokkal jobb perspektívát és lehetőségeket nyújt, mint a klasszikus módszer [35], [37], [40].

Új jegyzet készült a Szabályozástechnika tárgy oktatására [25], amely mind a BME-n, mind pedig a SZE-n felhasználásra kerül az informatikai oktatásban [26]. A jegyzetbe már bekerültek ezek a legújabb tudományos eredmények is.

Riportok

Környezetünkben szokásos a disszertációk, az erősebb publikációk, ipari alkalmazások előkészítésére reportokat írni. A fenti témákhoz is kapcsolódva az alábbi anyagok születtek a projekt során:

A modell-prediktív (*MPC*) irányítási algoritmusok egy speciális osztálya amikor az előrevetítés (predikció) hossza az idővel együtt mozog. Ezt a technikát talán egyszerűbb állapotteres becslésre megfogalmazni, ezért sokszor nem is az *MPC* rövidítéssel utalnak rá és az alkalmazott modell sem átviteli függvény alapú. Az állapotteres megfogalmazás további előnye, hogy mind lineáris változó paraméterű, mind pedig nemlineáris rendszerekre is alkalmazható. A megközelítés előnye, hogy képes korlátozásokat kezelni mind az állapottérben, mind pedig a kimeneti zaj vonatkozásában. A módszerről kimerítő tanulmány készült [12], amelyben az elkészült "toolbox" bemutatására is sor került.

Elektronikus (számítástechnikai) módszerekkel irányított járművek stabilitása napjaink fontos mindennapi kérdésévé vált. Ezen járművek modellje változó paraméterű, ezért stabilitási kérdéseik hagyományos módszerekkel nem tárgyalhatók. Bonyolultabb irányítási módszerek kidolgozásához viszont szükségünk van a stablilitási feltételek tisztázására. Ezeket a feltételeket nemcsak a modell paraméterekkel, hanem azok bizonytalanságaival valamint az irányítás minőségi követelményeivel (performance) kapcsolatban kell vizsgálnunk. A legfontosabb kérdéseket egy tanulmányban [7] vizsgáltuk meg, amelyben különböző manőverezési alapeseteket és időbeni függőséget vizsgáltunk.

Foglalkoztunk a lineáris és nemlineáris rendszerek bemenőjel rekonstrukciójánál használt uj rendszer invertálási módszer alkalmazásával, melynek segítségével robusztus hiba detektáló és izoláló szűrőket tudunk tervezni. Ez a megközelítés a dinamikus invertálás szűrésre való alkalmazása, ami megfelel a dinamikus inverzió irányításra való alkalmazása duális koncepciójának. A módszer egy detektáló architekturát jelent, melynek kimenőjelei a hibajelek, bemenőjelei pedig a rendszer mért bemenő és kimenőjelei és lehetőség szerint azok időbeli deriváltjai. Ez a megközelítés nemcsak a hibajelek észlelését és izolációját teszi lehetővé, hanem azok becslését is. A cél, hogy megtaláljuk a hiba-kimenőjel reziduális átviteli függvény baloldali inverzét. A report első fejezete lineáris, a második fejezete nemlineáris rendszerekkel foglalkozik [31].

Módszert dolgoztunk ki járművek irányítási tervezésében a csúszás megelőzésére. Az aktuális kerék-sin surlódási együttható becslésére szolgáló módszer az adaptív megfigyelő tervezési módszeren alapul. Egy olyan logikai sémát javaslunk melynek alapján megbecsüljük azt a munkapontot, melyben nincs kerékcsúszás. Ezt a becslést felhasználó olyan hagyományos irányítási algoritmust alkalmaztunk, ami a rendszert az előírt munkapontban tartja. Ha a külső környezet megváltozik, akkor egy újabb, a pillanatnyi feltételeknek megfelelő munkapont becslését végezzük el. A javasolt irányítási eljárás nem a mért csúszási arány értékén alapul. Az irányítási algoritmust szimulációs példákon keresztül teszteltük [32].

Az integrált irányítás területén a folyamatos kutatásnak köszönhetően egyre újabb módszerek és megvalósítási eljárások jelennek meg. A reportban néhány példa segítségével a jelenleg fejlesztés alatt álló különféle - főleg ember nélküli és autonóm - integrált irányítási módszerek járműtechnológiai alkalmazásainak lehetőségeibe, architektúrális és tervezési elveibe adunk betekintést [30].

A projekt ideje alatt (2004-2007) **40** angol nyelvű publikáció jelent meg a kutatási témában elért eredményeinkről mérvadó nemzetközi fórumokon és **1** magyar nyelvű egyetemi jegyzet. Készült **5** kutatási report is. Munkáinkra ezidő alatt **44** számú hivatkozást regisztráltunk. Itt nem szerepeltetjük a hasonlóan nagy számú olyan előadást, amelyek anyaga nem került kinyomtatásra.