

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK

Cassegrain spektrográf tervezése és építése a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövéhez

diplomamunka

Készítette: **Fűrész Gábor**, V. éves csillagász hallgató
Témavezető: **Dr. Szatmáry Károly**, egyetemi docens

SZEGED, 2002

Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
1. Áttekintés a csillagászati színeképelemzésről	4
1.1. A kezdetek – rövid történeti áttekintés	4
1.2. Alkalmazási területek	7
1.3. Spektroszkópiai technikák, spektrográfok	11
2. Optika	15
2.1. Alapvető megfontolások és illesztendő paraméterek	15
2.2. A fénymenet és az egyes optikai elemek	19
2.2.1. Rácsok	20
2.2.2. Kollimátor/kamera, elsődleges fényút elemei	20
2.2.3. Rész, a másodlagos fényút elemei	24
2.2.4. Detektor	26
2.2.5. Spektrállámpa becsatolása	27
2.3. Értékmérők számítása	28
2.4. A távcső és a spektrográf együttes teljesítőképességének meghatározása	29
2.4.1. Transzmisszió	29
2.4.2. Érzékenység	30
2.4.3. Hasznos jel	30
2.4.4. Jel/zaj viszony	31
3. Mechanika	33
3.1. Alapvető követelmények, tervezés	33
3.2. Az egyes szerkezeti elemek ismertetése	35
3.2.1. Vázszerkezet	35
3.2.2. Réstartó	36
3.2.3. Rácsváltó és -forgató mechanizmus	37
3.2.4. Tükörtartók	40
3.2.5. CCD és távcső csatlakozása	41
3.2.6. Hőszigetelés, külső burkolat	42
4. Elektronika	43
4.1. Hőmérsékleti stabilizálás	43
4.1.1. TCN75 digitális hőmérő IC	43
4.1.2. PIC16F84 mikrokontroller	45

4.1.3.	A vázszerkezet fűtése	46
4.2.	Léptetőmotor vezérlés, pozícióellenőrzés, beállítás	51
4.2.1.	Léptetőmotorok és az MC3479 meghajtó	51
4.2.2.	Alappozíció definiálása optokapukkal	54
5.	Vezérlő programok	56
5.1.	Mikrokontroller programozás	56
5.2.	Felhasználói felület	57
5.2.1.	<code>stat</code> — Státusz lekérdezése, hibaüzenetek	58
5.2.2.	<code>ini</code> — Inicializálás	60
5.2.3.	<code>set</code> — Beállítás, hibaüzenetek	61
5.2.4.	<code>arc</code> — Hullámhossz kalibráció	62
6.	Első felvételek, összefoglalás	63
	Köszönetnyilvánítás	64
	Hivatkozások, felhasznált irodalom	65
7.	Függelék	66
7.1.	A spektrográfot vezérlő programok	66
7.1.1.	<code>ini.c</code>	66
7.1.2.	<code>stat.c</code>	69
7.1.3.	<code>set.c</code>	71
7.2.	PIC16F84-re írt programok	76
7.2.1.	<code>lm75.src</code>	76
7.2.2.	<code>lcd.src</code>	81
7.3.	Teszteléshez használt programok	85
7.3.1.	<code>lcdtest.pas</code>	85
7.3.2.	<code>lm75test.pas</code>	87
7.4.	NYÁK fóliák	89
7.5.	Műszaki rajzok, szerelési rajzok	91

Bevezetés

A spektroszkópia a leginformatívabb megfigyelési technika a csillagászatban, tulajdonképpen az asztrofizika megszületését tette lehetővé a színképelemzés asztronómiai alkalmazása. Sajnos hazánkban jelenleg egyetlen csillagászati spektrográf sem működik, egyedül az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetének Pizskéstetői Observatóriumában a 60/90/180 cm-es Schmidt távcsővel készítenek kis felbontású, ún. objektívprizmás felvételeket. Ez azonban csak spektráلكlasszifikációt, erősebb, pl. $H\alpha$ emissziók kimutatását, nóvaspektrumok vizsgálatát teszi lehetővé. A közepes, nagy felbontású spektroszkópia azonban sokkal több asztrofizikai információt ad, s ezen technikát csak külföldön alkalmazhatják, sajátíthatják el a magyar kutatók. A XX. század elején a kor elismert spektroszkópusai között még szerepelt magyar név, Konkoly Thege Miklósé, azonban jelentős munkássága óta több, mint száz év telt el. Az utóbbi években ugyan történtek próbálkozások a spektroszkópia újbóli hazai felélesztésére, egyenlőre azonban kevés sikerrel.

Diplomamunkámban – mely a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövének átalakításáról, felújításáról szóló TDK dolgozatom folytatásának tekinthető – egy, a mai technológia eszköztárát felvonultató csillagászati spektrográf tervezését, kivitelezését tűztem ki célul. A témaválasztás tehát az előbbieket tükrében időszerű és indokolt. Egy közepes felbontású spektrumok készítésére és nagyobb (néhány 10 km/s-os) radiális sebességek mérésére alkalmas spektrográf mind a csillagász hallgatók oktatásában, mind a Szegeden folyó kutatómunkában nagy segítséget jelent, s a hazai csillagászati megfigyelésekben hiánypótló jelleggel bír. Jelen dolgozatban először egy rövid áttekintést kívánok adni a spektroszkópia történetéről, alkalmazási lehetőségeiről és eszközeiről. Ezt követően az általam tervezett műszer bemutatása következik, a főbb fejezeteiben az optika, a mechanika, illetve az elektronika tervezésének, kivitelezésének leírása, majd a teljes rendszer integrációjának és tesztelésének bemutatása található. A függelék a részletes technikai dokumentációt (műszaki rajzok, NYÁK fóliák, mikrokontroller és C programok forráskódjai) tartalmazza.

1. Áttekintés a csillagászati színeképelemzésről

1.1. A kezdetek – rövid történeti áttekintés

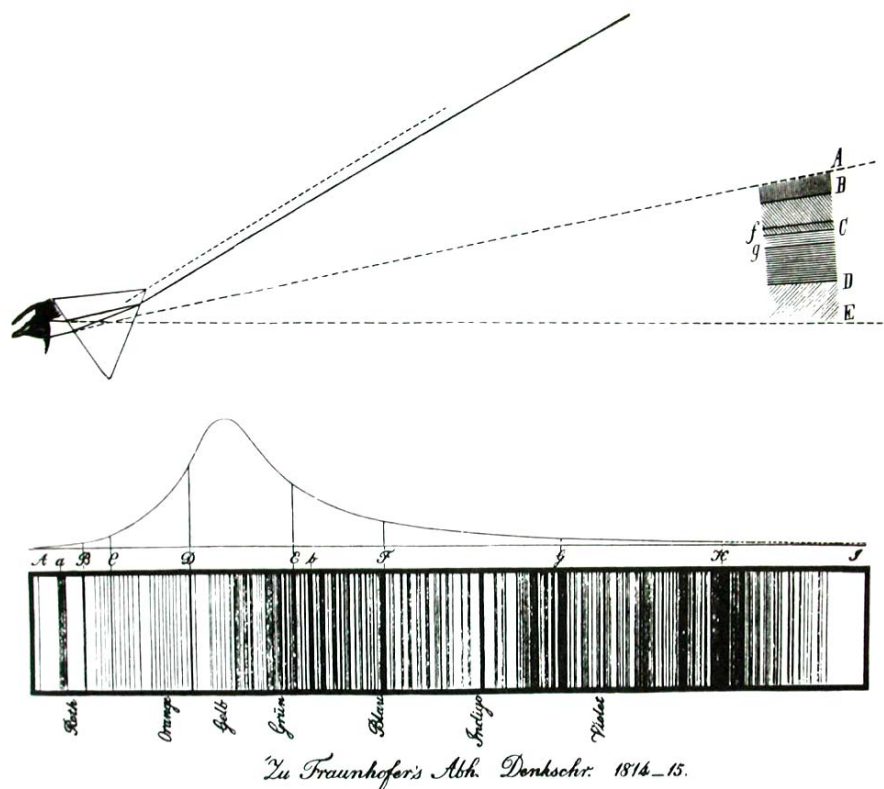
A csillagászatban az egyik legtöbb információt adó megfigyelési technika a spektroszkópia. Sokáig úgy tartották, hiába tudják a csillagászok leírni az égitestek mozgását, a csillagok oly nagy messzeségben vannak, hogy kémiai összetételüket sohasem fogják megismerni. A tudomány fejlődése azonban – mint oly sok más állítást is – e tételt is megdöntötte. A XVII. század utolsó harmadában többen (*Newton, Descartes, Hook*) is leírták a napfény színekre bontását prizma segítségével; a századfordulón *William Herschel* felfedezte a spektrum vörös oldalán túli, nem látható tartományát; *Thomas Young* diffrakciós rács segítségével a fény hullámtermészetét igazolta s megmérte a különféle színekhez tartozó hullámhosszakot. 1802-ben *William Wollaston* rést is alkalmazott a napfény színekre bontásánál, s felfedezte a Nap színeképeének abszorpciós vonalait. Szám szerint öt sötét sávot figyelt meg – köztük a Na dublettet –, azonban jelentőségüket nem ismerte fel. Ezt *Joseph Fraunhofer* tette meg, aki már távcsőhöz is csatolta a diszperzív optika elemet (l. 1. ábra). Ezáltal a Nap spektrumában mintegy 600 vonalat figyelt meg, s 350-nek pontos pozícióját is megadta. Ezzel 1814-ben kezdetét vette a csillagászati spektroszkópia.

Fraunhofer a bolygók és a fényesebb csillagok színeképeének vizsgálatával is foglalkozott, s megállapította, hogy míg a bolygók spektruma a Napéval egyezik, addig a csillagoké jelentősen eltérhet ettől s egymásétól is különböznek. Ezzel egyidőben, 1823-ban, *Sir John Herschel* és a *Daguerrel* egy időben a fotográfiát felfedező *W.H. Fox Talbot* különféle elemekkel festett lángok spektrumát vizsgálta, s utalt rá, hogy ez alapján kémiai analízis végezhető. Sajnos mintáik szennyezettsége miatt azonban minden színeképben megjelent a nátrium, ami támadási felületet adott a módszer használhatóságával szemben s majd 40 évre felfüggesztette a spektroszkópia fejlődését.

Már J. Herschel megpróbálkozott a Nap spektrumának fotografikus rögzítésével, azonban csak kortársa, *Edmond Becquerel* járt elsőként sikerrel (l. 2. ábra). Már a kezdetleges dagerrotípiákon is sikerült az ultraibolya tartományban vonalakat megfigyelni, így a spektroszkópia az infravörös után a rövidebb hullámhosszak felé is kiterjedt.

Többen próbálták a Fraunhofer-féle abszorpciós spektrumot értelmezni, a kémiai elemek lángfestéssel nyert emissziós spektruma alapján. *Foucault* 1849-ben különféle eredetű színeképek vizsgálatával megmutatta, hogy a spektrum emissziós vagy abszorpciós volta attól függ, az adott anyagból kiinduló fényt vagy egy fényesebb forrás adott anyagon áthaladó fényét vizsgáljuk. 1859-ben *Gustav Kirchhoff* függetlenül hasonló eredményre jutott, s három törvényt adott a spektrális analízisre:

1. Egy fénylő folyékony vagy szilárd test spektruma folytonos
2. Fénylő, ritka gáz spektruma fényes vonalakkal áll
3. Ritka gázon áthaladó fénylő test színeképében sötét vonalak jelennek meg



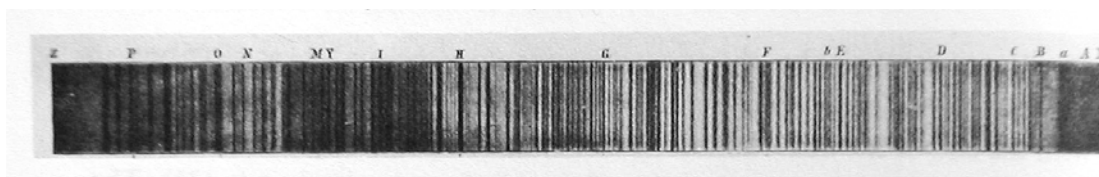
1. ábra.

A Wollaston (fent) és Fraunhofer (alul) által lerajzolt Nap-spektrum

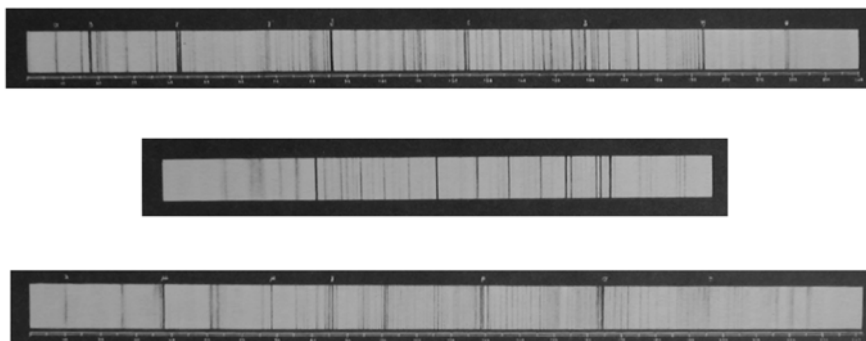
Mivel a 2) és 3) esetben egy adott gáz esetén megfigyelhető vonalak ugyanazon hullámhossznál jelentkeznek, így lehetséges a Nap és más csillagok kémiai analízise (ami pl. a hélium felfedezését is eredményezte). 1860-ban *Robert Bunsen* megmutatta, hogy a Napon ugyanazok a kémiai elemek találhatóak, mint a Földön, s ezzel megszületett az asztrofizika tudománya. 1860-tól kezdődően szimultán többen is foglalkoztak a csillagok színekének megfigyelésével, elemzésével. *Lewis M. Rutherford* elsőként osztályozta a csillagokat színekük alapján. *Angelo Secchi* éveken keresztül nagyon alapos megfigyeléseket végzett mintegy 500 csillag színekéről, melyeket lerajzolva (l. 3. ábra) és elemezve tovább fejlesztette a spektráلكlasszifikációt.

William Huggins más csillagok részletes kémiai analízisét végezte, s mintegy 70 nem csillagszerű objektumot is megfigyelt. *W. Allen Miller*rel ezek közt emissziós spektrumokat talált, melyből azt a helyes következtetést vonták le, hogy e ködök hatalmas világító gázfelhők. Szintén az ő nevékhöz fűződik a Secchi által megjósolt, Doppler effektus miatti vonaleltolódás első megfigyelése.

Henry Draper a színekpek fotografikus rögzítésében játszott úttörő szerepet, 1872-ben a Vega spektrumát örökítette meg. *Hermann Carl Vogel* tökéletesítette a fotografikus spektrum rögzítést s a színekp vonalak Doppler-effektus okozta eltolódása alapján elsőként mért radiális



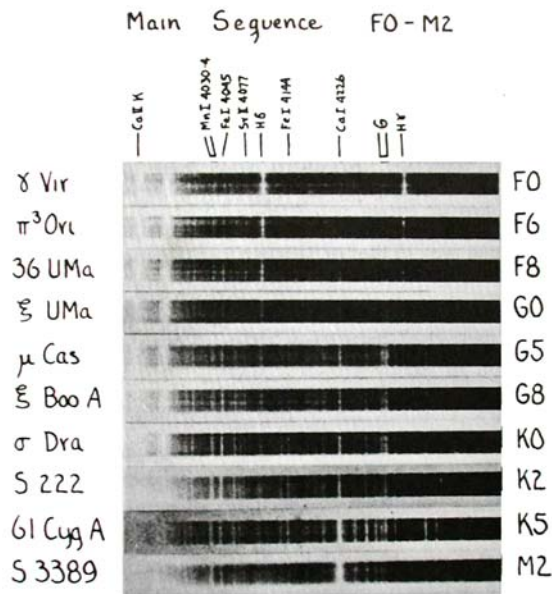
2. ábra.
Az első Nap-spektrum felvétel



3. ábra.
Angelo Secchi kézzel rajzolt spektrumai a Betelgeuse, Aldebaran és Antares csillagokról

sebességértékeket csillagokra, 1887-ben. Két évvel később sebességmérésekkel igazolta, hogy az Algol rejtélyes fényváltozását az okozza, hogy két csillag egymás körüli keringése során időről időre elfedik egymást a komponensek.

A XIX. század utolsó éveiben Henry Draper felesége, *Mrs. Anna Palmer Draper* férje munkásságának folytatására kérte a Harvard College Observatory (Cambridge, MA) vezetőjét, *Edward Pickeringet*. Mrs Draper és más alapítványok támogatásával 1886-ban kezdetét vette a Henry Draper Memorial Catalogue elkészítése. Ennek során 10351 csillag spektrumát fotózták le, melyek rendszerezését *Mrs. Williamina P. Fleming* végezte. Az első spektrumokat is tartalmazó katalógus 1890-ben jelent meg, a Mrs. Fleming által kidolgozott spektrálasszifikációval, ám e rendszerezési séma több módosításon esett át ma is használatos formájának eléréséig. Maga Mrs. Fleming több módosítást hajtott végre, majd *Antonia Maury*, s a déli égbolt csillagainak spektrumait is feldolgozó *Annie Cannon* alakította az osztályozást. Miss Cannon nevéhez fűződik a finomabb besorolást lehetővé tévő alosztályok bevezetése 1901-ben, azonban ezen alosztályok is többszöri módosításon estek át. (Az irodalomjegyzékben megadott forrás bőséges tudománytörténeti gyűjtést ad az érdeklődő számára a csillagászati színképelemzés fejlődéséről. [3])



All stars illustrated are of luminosity class V
Cramer Hi-Speed Special.

4. ábra.

A ma is használatos MK (Morgan–Keenan) klasszifikációs rendszer mintaspektrumai egy XX. század elejéről származó atlaszban

1.2. Alkalmazási területek

Sebességmérés nagy távolságokon

A spektrumvonalak talán legfontosabb tulajdonsága, hogy a hozzájuk tartozó hullámhossz állandó és igen jól meghatározott. Egy hozzánk képest mozgó forrásból érkező fény esetében azonban a vonalak pozíciója megváltozik, az eltolódás mértéke a látóirányú sebességgel arányos:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}. \quad (1)$$

A spektrumvonalak tehát lehetőséget adnak radiális sebesség mérésére, melynek néhány alkalmazási területe:

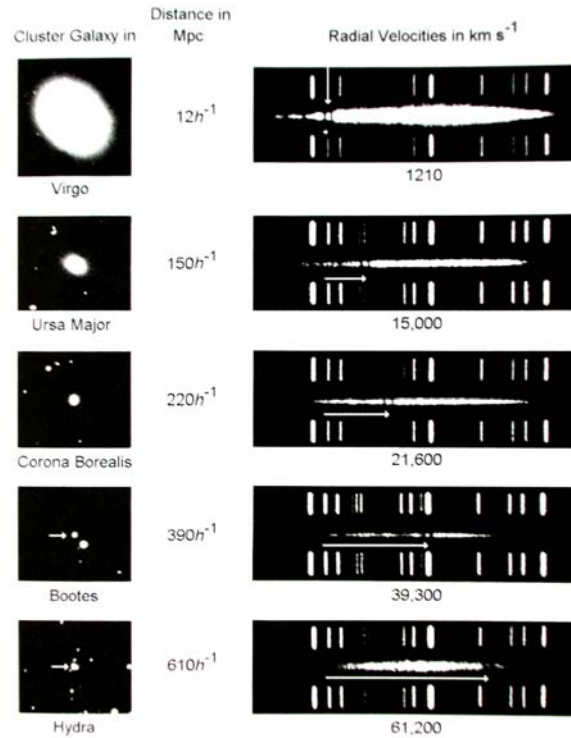
- *Egyedi csillagok térbeli mozgásának meghatározása* — A csillagok égi koordinátáinak periodikus és szekuláris megváltozása (parallaxis ill. sajátmozgás) valamint a spektrum alapján távolságot és sebességvektort tudunk meghatározni. Ez lehetővé teszi az egyes csillagok pozíciójának számítását időben mind előre, mind visszafelé, s ezáltal csillaghalmozok, a Galaxis dinamikai vizsgálatát.

- *Kettőscsillagok fizikai paramétereinek meghatározása* — Sok kettős rendszer esetében a komponensek nem választhatóak szét egy képpalkotó rendszerrel. A közös tömegközéppont körüli keringésük során azonban periodikusan változik radiális sebességük, s ez kimutatható a spektrumból. Amennyiben mindkét csillag spektruma kiértékelhető, a radiális sebességek amplitúdóinak aránya megadja a tömegarányt ill. a sebességgörbék alakja pedig az excentricitásra és a pericentrum hosszúságára enged következtetni. Amennyiben a pályasík látóiránnyal bezárt szögére is van információnk (a kettős összfényességében periódikus fényességcsökkenést, azaz fedést figyelhetünk meg), úgy maguk a tömegek, sugarak, felszíni hőmérsékletek, a fél nagytengely is megadható, a tömeg-luminozitás reláción keresztül pedig az abszolút fényesség, mely a rendszer távolságához vezet.
- *Extraszoláris rendszerek, exobolygók kimutatása* — Ma már több olyan, Naphoz hasonló csillagot ismerünk, mely az előbbiekhöz hasonló változásokat mutat a spektrumában, a kísérő színképe azonban nem látható. A sebességváltozás amplitúdója és periódusa, valamint a Kepler-törvény alapján azonban a kísérőre olyan kis tömegérték adódik, hogy joggal feltételezhetően e kísérők nem csillagok, tömegük ill. hőmérsékletük nem elegendő a magbéli fúzió megindulásához. E Jupiter-szerű, bár annál sokszor nagyobb tömegű exobolygók keresése ma igen népszerű téma a csillagászati spektroszkópiában, holott igen precíz mérések szükségesek a feladat által megkövetelt, néhány méter/másodperces sebességmérési pontosság eléréséhez.
- *Galaxisok rotációs görbéjének felvétele* — A galaxisokban a rotációs sebességeket a sugár függvényében ábrázolva azt várnánk, hogy a sebességek a centrumtól távolodva egyre csökkennek. A rotációs görbék azonban laposak, nem a látható anyag eloszlásának megfelelően futnak. Ez utal többek között a nagy mennyiségű sötét anyag jelenlétére az Univerzumban.
- *Az Univerzum tágulásának kimutatása* — A galaxisok színképében szinte kivétel nélkül vöröseltolódás tapasztalható (l. 5. ábra), vagyis minden csillagrendszer távolodik a Tejútrendszertől. Bizonyos távolságmérési eljárásokkal meghatározva a galaxisok távolságát az korrelációt mutat távolodási sebességükkel. A nagyon nagy távolságokban lévő objektumok a fénysebességet megközelítő sebességgel távolodnak, nyilvánvalóan ez esetben (1) relativisztikus formáját kell alkalmazni. Jelenleg az asztrofizika és kozmológia egyik nagy kérdése, hogy ez a tágulás vajon örökké folytatódik-e, s hogy valóban csak a Dopplereffektus okozza-e a vöröseltolódást.

Lokális kinematikai vizsgálatok

Amennyiben nagy felbontással készítünk spektrumot, lehetőség nyílik az egyes vonalak alakjának vizsgálatára. A vonalprofil pedig az objektumnak s közvetlen környezetének kinematikájáról árulkodik.

- *Anyagkiáramlások, anyagbehullás kimutatása* — Egy anyagát pl. intenzív csillagszél formájában vesztő csillag spektrumában jellegzetes profilú vonalak láthatóak. A gázburok



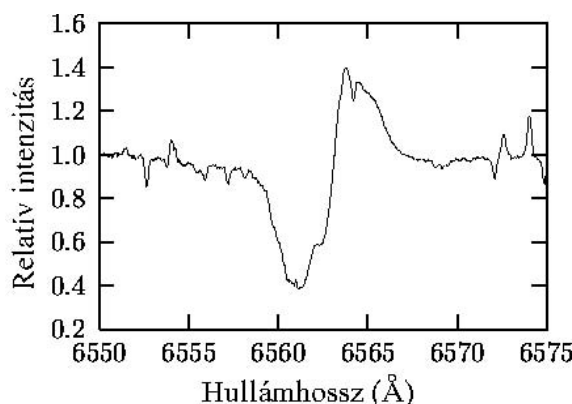
5. ábra.

A kalcium H és K vonalának vöröseltolódása különböző halmazokhoz tartozó galaxisok színeképében ($h = \frac{H}{100} \frac{km/s}{Mpc}$, ahol H a Hubble-állandó)

egy, a nagy kiáramlási sebesség miatt kiszélesedett emissziós vonalat mutat, aminek kék oldalán egy kis abszorpciós sáv látható (l. 6. ábra). Utóbbi a burok pontosan felénk haladó s emiatt kékeltoledást szenvedő részének köszönhető, amin át a csillag fényét érzékelve abszorpciót tapasztalunk. Az ún. P Cygni profilnak tükörképe az inverz P Cygni profil, ami anyagbehullásra utal. A vonalprofilok aszimmetrikus torzulása lökéshullám jelenlétére utal.

- *Csillagfoltok kimutatása, doppler imaging, asztroszeizmológia* — A csillagok forgása miatt is fellép szélesedés a spektrumvonalakban. Amennyiben foltok találhatóak a csillagon, s ezek épp befordulnak a látóirányba, úgy a kék oldalon módosulnak a vonalprofilok. Amikor a folt pontosan a látóirányunkba esik, akkor az adott vonal közepén, amikor kifordul a csillag felénk eső oldaláról a távolodás miatt a vonal vörös oldalán jelentkezik a folt okozta vonalprofiltorzulás.

Pulzáló csillagok esetében a vonalprofilok nagyfelbontású vizsgálatával a különböző pulzációs fázisokban fellépő, fázistól függő profiltorzulások alapján kimutathatóak a nem radális módusok (asztroszeizmológia).



6. ábra.
Jellegzetes P Cygni profil a 89 Herculis csillag $H\alpha$ vonalában

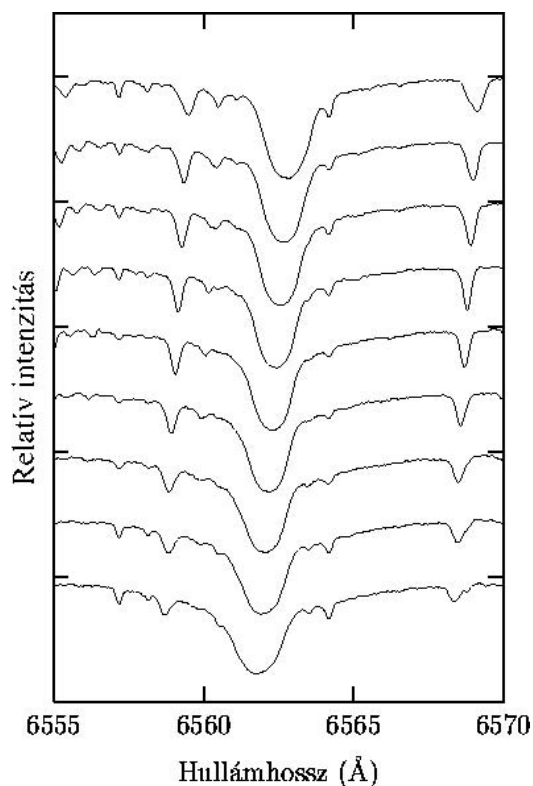
- *Baade-Wesselink analízis* — Radiális pulzációt, azaz rezgéseket mutató csillagok egyensúlyi sugarának meghatározására szolgáló módszer a Baade-Wesselink analízis, amely a változócsillag fény- és radiális sebesség görbéjének együttes vizsgálatát jelenti. Azokban a fázisokban, melyekben a B-V színindex (mely a spektrumot globálisan jól közelítő Planck-görbe meredekségét, s ezáltal a modell fekete test hőmérsékletét mintavételezi), értéke megegyezik, a fényesség általában különböző. Ez arra utal, hogy a csillag hőmérséklete ezekben a fázisokban közel azonos, ellenben a csillag sugara eltérő. A radiális sebességgörbe integráljából – mely a 7. ábrán látható spektrumok alapján határozható meg – megállapítható, hogy mekkora mértékű az elmozdulás e két fázis között, a fényességértékek különbségéből pedig a sugarak aránya határozható meg. E két független mérésből elvileg kiszámítható a csillag átlagos sugara.

Ionizációs, mágneses viszonyok meghatározása

Amennyiben a színeképbén magas ionizációs fokú vonalak láthatóak, az a kibocsátó objektum környezetében igen nagy energiájú fotonok jelenlétét, nagyon magas hőmérsékletet jelez. Galaxisok magjában megfigyelhető nagyfokú ionizáció az aktív csillagkeletkezésre, fiatal csillagok jelenlétére utal. Az egyes vonalak mélységeinek aránya, vagyis az adott elem aránya, ill. az adott állapot betöltöttsége különféle objektumok esetén azok osztályozását teszi lehetővé. Elegendően nagy felbontás esetén a vonalak finomszerkezete is vizsgálható, s az esetleges felhasadások (Zeeman-effektus) a mágneses térre vonatkozóan adnak információt.

Kémiai összetétel meghatározása

Nemcsak a Nap, de a csillagok, gázfelhők, távoli galaxisok kémiai összetétele is tanulmányozható a nagy fénygyűjtő képességű távcsöveknek és érzékeny detektoroknak köszönhetően. Ezen vizsgálatokkal pl. lehetőség nyílik a nukleosintézis modellek ellenőrzésére, az Univerzum korai korszakára alkotott feltételezéseink alátámasztására avagy elvetésére. Megkülönböztethetőek egy adott galaxison belül a különféle kémiai összetételű komponensek, s ezzel a galaxisok fejlődésére, kialakulására vonatkozó információ nyerhető.



7. ábra.

A δ Cephei spektrumának egy részlete különböző pulzációs fázisokban

1.3. Spektroszkópai technikák, spektrográfok

A spektrográf főbb elemei a rés, a kollimátor, a diszperzív elem, a kameralencse és a detektor. Ezen főbb elemekben a Vogel által használt műszerek megegyeznek a mai spektrográfokkal, azonban jelentős technikai fejlődésen és átalakuláson mentek keresztül a színekélemzés eszközei.

Kisfelbontású spektroszkópia

A felbontóképességet a következő kifejezéssel definiálhatjuk:

$$R = \lambda/\Delta\lambda, \quad (2)$$

ahol λ a megfigyelt hullámhossz, $\Delta\lambda$ pedig az adott hullámhosszon feloldott legkisebb részlet. A kis felbontású műszerek az $R = 100 - 10.000$ tartományba esnek, s ezen műszerek alkalmazási területei a spektráلكlasszifikáció, nagyobb radiális sebességek mérése, kémiai analízis, halvány objektumok spektroszkópiája.

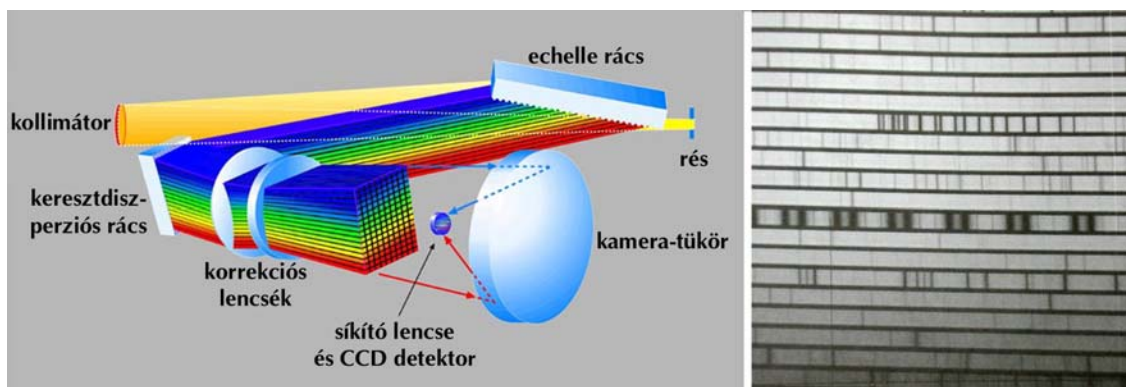
A korai spektrográfokban a diszperzív elem prizma volt, melyek nagy előnye, hogy jó a hatásfokuk (a fény több, mint 90%-át átteresztik, sőt antireflexiós rétegekkel közel 100%-os a fényhasznosítás), azonban csak kis felbontás érhető el velük. Több prizma egymás utáni

alkalmazásával azonban javítható a feloldás, bár bizonyos megfigyelések ezt nem is igénylik. Az egyik ilyen technika az objektívprizmás spektroszkópia, melynél a pontszerű csillagok látják el a rés szerepét, a távcső objektívje a kameralencse s ez elé helyezik az objektívvel egyező méretű prizmat. Így nagy látómezőben szimultán vehetők fel színeképek, s az üvegszálas multiobjektum spektrográfok (l. később) megjelenéséig ez volt az egyetlen módja a spektrális felméréseknek, mint pl. a Henry Draper Memorial Atlasz.

A karcolt rácsok az 1870-es évekig feloldásban alulmaradtak a jóval régebb óta használt és elterjedt prizmákkal szemben, azonban 1882-ben *Henry A. Rowland* egy 15 cm-es lemezre 100.000 karcolást felvéve olyan rácsot készített, amellyel szerelt spektrográf az $R = 150.000$ felbontóképességet érte el. Sajnos azonban az eleinte még bronz, majd üveg hordozóra készített rácsoknak nagyon kicsi volt a hatásfoka, még a legoptimálisabb rendben használva is alig haladta meg a 10%-ot. Az igazán nagy feloldások azonban rácsot követeltek, s 1944-ben *George R. Harrison* elkészítette az első ún. blazed rácsot, melyben a karcolások profilja előre meghatározott és kontrollálható volt. Így egy bizonyos rendben a hatásfok akár a 60–70%-ot, a feloldás pedig a 600.000-et is elérhette.

Nagyfelbontású spektroszkópia

Az $R = 20.000 - 100.000$ közötti feloldású műszereket nagyfelbontásúnak nevezzük. E spektrográfokban a rácsot igen magas rendben használják, s ehhez igen nagy beesési szögekhez kialakított profilú blazed rácsokat, ún. echelle rácsokat alkalmaznak. A magasabb rendek azonban átfednek egymással, aminek kiküszöbölése céljából egy, az elsődleges rács diszperziós tengelyére merőleges, ún. keresztdiszperzív elemet alkalmaznak. Ez lehet prizma, rács, vagy prizma és transzmissziós rács kombinációja (ún. grism az angol *grating* és *prism* szavakból). Ezáltal az egyes rendek egymás alá kerülnek, és egy megfelelő méretű két dimenziós detektorral akár 10–20 rend is rögzíthető egy felvételen (l. 8. ábra). A detektor ma már minden, optikai tartományban működő spektrográf esetében a fotolemezeknél sokkal érzékenyebb CCD, az echelle spektrográfoknál gyakran 1000×1000 vagy még nagyobb pixelszámú érzékelővel.



8. ábra.

Echelle spektrográf felépítése és egy echelle spektrum

Az exobolygók kimutatása igen nagy feloldást igényel, hiszen a néhány m/s-os sebességmérési pontosság (1) kifejezés alapján a $H\alpha$ vonal környezetében mindössze néhányszor 10^{-5} Å eltolódásnak felel meg! Ekkora mértékű eltérést csak úgy lehet kimutatni, ha a csillag spektrumát és a referenciaspektrumot egy időben veszik fel. Ezt úgy valósítják meg, hogy egy nagyon ritka jódgőzt tartalmazó cellán vezetik át a csillag fényét, s így a jód – igen keskeny és éles – vonalai is megjelennek a rögzített spektrumban a csillag vonalaival együtt.

Integrált látómezejű spektrográfok

A spektrográf belépő rése meghatározza, hogy az égbolt mekkora részéről készítünk színeképet. Ez általában igen kicsiny, néhányszor néhány ívmásodperc. Azonban nem csak kis látszó átmérőjű, pontszerű források, hanem kiterjedt objektumok színeképi vizsgálata is végezhető. Ehhez azonban speciális elrendezés szükséges, a rés méretének növelésével ugyanis romlik a feloldóképesség.

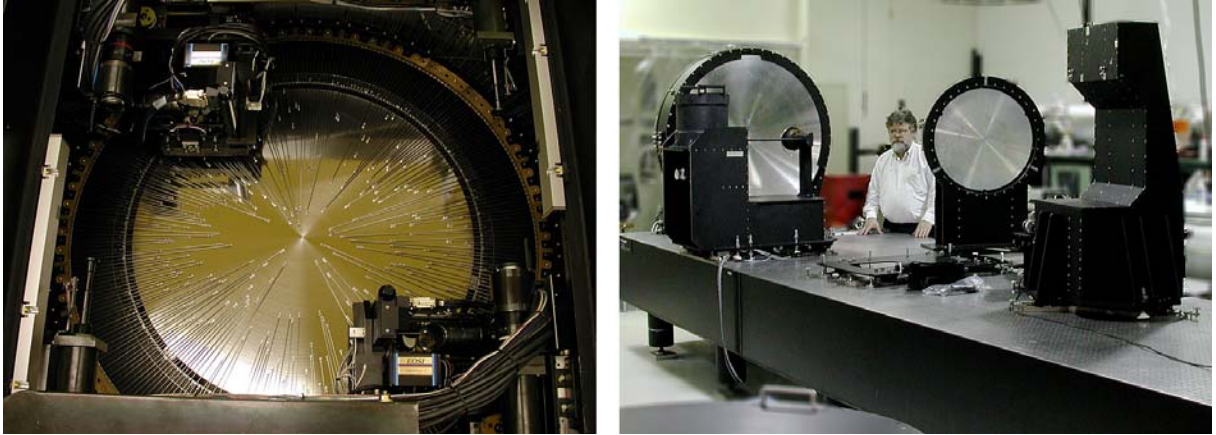
Szimultán spektrális és térbeli feloldást többféleképp is elérhetünk, pl. a fókusz síkba helyezett apró lencsékkel vagy tükrökkel felszabdalthatjuk s különböző irányokba vetíthetjük a képet a spektrográfba, ami így a detektor különböző helyeire képezi le a spektrumot. Esetleg nem egy, hanem több belépő rést is alkalmazhatunk, adott rés esetében azonban a diszperziós tengely irányában nem lehet másik rés, így a térbeli mintavételezés korlátolt.

Egy üvegszál a mag igen kicsiny, pár száz mikronos vagy az alatti méretének köszönhetően önmagában egy belépő résként szolgálhat, s sok szálát egymás mellé egy kötegben a távcsőre csatolva könnyen megvalósíthatjuk az integrált látómezejű spektrográfot. A szál mag/köpeny arányát célszerű minél nagyobbra választani, hogy jobb legyen a felületi kitöltés (így is max. 60%-ot érhetünk el), vagy egy mátrix-szerűen elrendezett négyzetes/hatszög alakú lencséből álló maszk mögé elhelyezni a szálakat s így becsatolni a fényt.

Optikai szállal csatolt spektrográfok, multiobjektum-spektrográfok

Az optikai szálak használata esetén a spektrográfot nem szükséges a távcsőre szerelni, attól teljesen független helyezhető el, sokkal könnyebben kontrollálható körülmények között. Ennek igen nagy előnye, hogy a nagy felbontású műszerek különösen érzékenyek mindenféle mechanikai torzulásokra, s egy mozgó távcső esetén ezeket igen nehéz kiküszöbölni. Továbbá a hőmérséklet is jelentősen változik egy éjszaka során, ami a precízen beállított optikai elemekre nézve nem kedvező. A szálak nem csak egy kötegben, de egyenként is a fókusz síkba helyezhetőek, ezáltal szimultán több objektum, pl. egy halmaz csillagainak színeképe vehető fel. Ez azért nagyon előnyös, mivel egy-egy spektrum felvétele több perces expozíciót igényel, s nem mindegy, hogy 100 csillagról 10 perc, vagy több éjszaka során rögzíthetünk spektrumot. Ezen multiobjektum-spektrográfoknak két típusa létezik. Az egyikben egy előre felvett kép alapján mechanikusan (megfelelő furatokat fúrva egy alaplapba s ezekbe dugva az egyes szálakat) rögzítik az üvegszálakat. A másik típusban a szálak pozíciója változtatható, azokat pl. léptetőmotorok segítségével egyesével, aktívan lehet pozícionálni. E megoldás hátránya, hogy a mozgató mechanizmusok helyigénye miatt kevés, 20-50 szál alkalmazható. Újabban az expozíció alatt mágnesek segítségével rögzítik a szálak pozícióját, ami rögzítés könnyen és gyorsan feloldható. A fókusz síkba helyezett fémlapra egy vagy két robot helyezi el a szálakat minden egyes expozíció előtt a megfelelő elrendezést kialakítva. A mechanikai követelmény igen nagy, de ma már megoldott

probléma egy 60 cm-es lemezen 300 szál 10 mikronnál jobb pontosságú pozícionálása mindössze 5 perc alatt, két robot segítségével (l. 9. ábra). [2]



9. ábra.

A 6,5 m-es MMT számára készített multiobjektum-spektrográf elemei: 300 optikai szál és a pozícionáló robotok valamint a szálak másik oldalán álló echelle spektrográf

2. Optika

2.1. Alapvető megfontolások és illesztendő paraméterek

A spektrum leképezése során a csillagok fényét nagy felületre osztjuk szét. Sokszor azonban maga a csillag is olyan halvány, hogy akár több perces integrációs idővel rögzíthető egy CCD felvételen. Nemcsak a detektálhatóságra kell azonban törekedni, hanem a megfelelő jel/zaj viszony elérésére is. Vagyis egy jól kiértékelhető spektrumhoz minél fényesebb objektum és minél nagyobb fénygyűjtő képességű távcső szükséges. Az $5^m - 6^m$ tartomány már tartalmaz spektroszkópiai szempontból érdekes objektumokat, azonban pl. egy szupernóva általában a $12^m - 15^m$ tartományba esik. Sajnos az objektum fényességére egyáltalán nem, s a második kritériumra is csak kis mértékben lehetünk hatással. A távcső ugyanis többnyire adott, s az igazán nagy tükörátmérőjű teleszkópok használata egy-egy kutató számára csak alkalmanként lehetséges. Kis műszerek esetén tehát – mint a szegedi 40 cm-es távcső is – maradnak a fényes objektumok, s a kevésbé széthúzott, vagyis kisebb felbontású spektrumok.



10. ábra.
A Szegedi Csillagvizsgáló távcsöve

A vázolt cél tehát egy

- kis, $R \approx 1000 - 5000$ felbontású műszer, mely a szegedi távcsőhöz illeszthető
- fényhasznosítása a megfigyelni kívánt halvány objektumok miatt maximális
- detektorként a már meglévő ST-9E CCD kamera legyen használható

A távcsőhöz történő illesztés megköveteli, hogy a spektrográf kollimátora ugyanolyan fényerejű ($f/12, 5$) legyen, mint a távcső optikájának eredő fényereje. Ezáltal biztosítható ugyanis a maximális fénykihasználás. Természetesen a távcső és a spektrográf közé helyezett segédoptikák alkalmazásával a megfelelő fényerejű nyaláb előállítható, ez azonban kismértékű fényvesztéssel és a spektrográf eredő feloldásának csökkenését eredményezi. A CCD pixelméretei is meghatározzák a spektrográf szempontjából, ugyanis a legkisebb rögzíteni kívánt spektrális jellemzőnek a Shannon-féle mintavételezési tétel alapján legalább két pixelre kell esnie, ami az ST-9E-ben lévő chip esetében $40 \mu\text{m}$ -t jelent. Amennyiben a spektrográf feloldása ettől jobb, úgy nem használjuk ki a kamera adta lehetőségeket (redundáns mintavételezés), amennyiben a műszer feloldóképessége kisebb, úgy információt veszünk (alulmintavételezés). Továbbá a detektor érzékenységi tartományát kihasználandó a spektrográf fényátvittele maximális kell legyen az adott tartományon. Reflexiós optikai elemeket tartalmazó műszer esetén ez a reflexiós bevonatra ad feltételeket (l. később).

Felmerül a kérdés, szükséges-e egy új műszer építése, avagy egy már meglévő, eddig más célra használt spektrográfot is lehet-e alkalmazni, esetleg kisebb módosítások végrehajtásával alkalmassá tenni csillagászati használatra. A kérdést alapos megfontolásnak vettem alá, a Kísérleti Fizikai Tanszék használaton kívüli spektrográfjait meg is vizsgáltam e célból. Tény, hogy egy nagynevű cég – mint pl. a Zeiss – kiforrott, több szakember által tervezett műszereinél nehéz jobbat készíteni, mégis az építés mellett döntöttem. Ennek oka, hogy a fellelhető spektrográfok igen terjedelmesek, nagy tömegűek voltak, valamint a meglévő, adott optikai paraméterek nem egyeztek meg a fentiekben említettekkel. A nagy méret és tömeg ott jelent problémát, hogy a távcsőnek a hosszú, több perces expozíció alatt követnie kell az égi objektumot. Ezt teszi lehetővé az óragéppel ellátott német szerelésű tengelykereszt, mely a 10. ábrán is látható. A távcsőmechanika azonban nem terhelhető túlságosan, hiszen a követéshez szükséges nagy pontosságot igen nehéz kivitelezni. Egy adott tengelykereszthez létezik egy terhelhetőségi határ, ún. teherbírás, s maga a távcsőtubus tömege is közel van ehhez a szegedi műszer esetében. Így egy laborhasználatra tervezett, masszív felépítésű, akár 20–30 kg tömegű műszert nem lehet közvetlen a távcsőre szerelni. A előző fejezetben említésre került, hogy az üvegszálak megjelenése lehetőséget adott arra, hogy a spektrográfokat a távcsőtől függetlenül helyezték el. E kérdést is megvizsgáltam, az alábbiakban ismertetendő problémák azonban e lehetőség elvetésére vezettek.

Amennyiben optikai szállal kívánjuk a fényt a távcsőből a spektrográfba vezetni, úgy a szál mindkét végén gondoskodni kell a megfelelő optikai illesztésről. Ezt megnehezíti a fényerő-degradáció jelensége (FRD — *Focal Ratio Degradation*, l. bővebben [8]). Egy szálba adott fényerő mellett becsatolt nyaláb a szál makroszkópikus ill. mikroszkópikus csavarodásai, valamint a szennyezőanyagok miatt más, sokkal nagyobb szögben lép ki. A mérési eredmények ([8])

azt mutatják, hogy az FRD $f/3$ – $f/7$ fényerejű becsatolás esetén minimális, vagyis ekkor esik a kimenő nyaláb nyílásszöge legközelebb a becsatolt nyalábéhoz. Az optimális fényerő azonban függ a szál magátmérőjétől és a szál anyagától. A gyártók nem adják meg az FRD értékét, egy adott szál esetén ezt ki kell mérni. Az FRD tehát praktikusán azt jelenti, hogy amennyiben a becsatolt fényerővel azonos fényerejű optikával kollimáljuk a kilépő nyalábot, úgy igen nagy, akár 80%-os veszteséget tapasztalunk.

A szál magátmérőjét két tényező befolyásolja:

1. A távcső fókuszában mekkora a csillag képe. Ez nem csak az Airy-korong átmérőjétől, hanem a légköri nyugodtságtól is függ, általában ez utóbbi a meghatározó, hiszen az ún. seeing-disk félértékszélessége Szegeden 1,5 – 3 ívmásodperc, míg egy D átmérőjű távcső esetében az Airy-korong sugara adott λ hullámhosszon, ívmásodpercben kifejezve:

$$R_{\text{Airy}} = \frac{251643 \cdot \lambda}{D}, \quad (3)$$

ami a szegedi távcső esetében $0,38''$. Ha tehát a csillagról összegyűjtött összes fényt a szálba akarjuk csatolni, akkor a szál legalább $3'' - 6''$ szöget kell lefedjen. A távcső fókuszának ismeretében megadható, hogy a fókusz síkban ez mekkora méretnek felel meg, s ez adja a szál magjának minimális méretét. A szegedi távcsőre nézve ez $72 - 145 \mu\text{m}$.

2. Mekkora a spektrográf résszélessége. Üvegszálas spektrográf esetében általában maga a szál helyettesíti a rést. A rés mérete azonban befolyással van a spektrográf feloldóképességére (l. (8) egyenlet). Így az első pontban meghatározott minimális szálméret felső határt szabhat a feloldóképességnek, s nem teszi lehetővé a spektrográf kihasználását. Továbbá az FRD miatt a szálba becsatolt fény egy ismeretlen – bár becsülhető és mérhető – szögben lép ki, és ennek egyezni kell a kollimátor befogadási szögével.

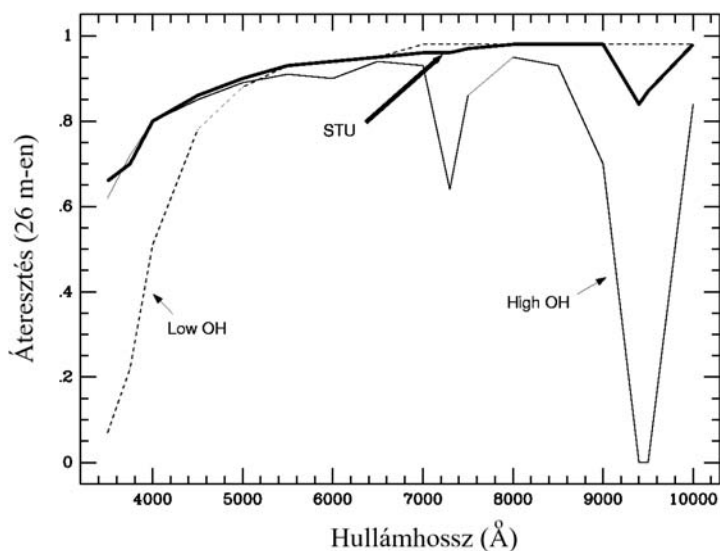
Amennyiben a spektrográf eredeti részét megtartjuk, mert ennek mérete kisebb, mint a szál magmérete s ezáltal nagyobb feloldást biztosít, úgy a szálból kilépő fény nagy részét elveszítjük, ami csillagászati alkalmazásoknál kerülendő. Megoldásként két lehetőség kínálkozik, azonban mindegyiknek megvan a maga igen nagy hátránya.

- (a) A távcső és a légkör által meghatározottnál kisebb magátmérőt választunk, s pl. egy mikroszkópobjektívvel becsatoljuk a szálba a fényt. Előnye e megoldásnak, hogy az általában $f/8 - f/15$ fényerejű távcsövek esetében a közvetlen becsatolásnál az FRD igen jelentős. Ugyanakkor kis magátmérők esetén növekszik az FRD mértéke, pl. míg egy $f/9$ nyaláb $320 \mu\text{m}$ magméretű szálba csatolva $f/7$ kilépési nyílásviszony esetén 85%-os abszolút transzmissziót eredményez, addig ez az érték alig 50% egy $100 \mu\text{m}$ -es szál esetében. A nagy hátrány azonban az, hogy nagyon nehéz ellenőrizni a becsatolás hatásfokát, vagyis hogy a csillag mikroszkópobjektívvel lefókuszált képe pontosan a szál magjára vetül-e. A távcső követési és beállítási pontossága általában nem teszi lehetővé, hogy a fókusz síkban egy objektum képét 50 - $100 \mu\text{m}$ -es pontossággal pozícionáljuk s több percen keresztül hasonló pontossággal ott is tartsuk mindenféle visszacsatolás nélkül. A Bajai Csillagvizsgáló munkatársai szintén ez évben készítettek egy spektrográfot, melynek tesztmérései ma is folynak. Ez

a műszer optikai szálát alkalmaz, s pontosan az imént vázolt problémába ütköztek a készítőik, melyet sajnos egyelőre nem sikerült megoldaniuk. Ezáltal az effektív fényhasznosítás igen csekély, alig néhány százalékos.

- (b) Nem egy, hanem több szálból álló köteget választunk, s a szálakat a távcső fókuszában egy körlap területén, szorosan egymás mellé helyezjük, a spektrográf felőli oldalon pedig egy egyenes mentén egymás mellé helyezve rendezzük el. Így akár alkalmazhatunk $10\ \mu\text{m}$ -es szálakat, s az így kialakított "rés" is ekkora szélességű lehet, ami jó feloldást biztosít. A távcső felőli oldalon azonban hiába is helyezzük szorosan egymás mellé a szálakat, a magot körbevevő köpeny miatt a felületi kitöltés maximálisan 60%, vagyis a fény nagy részét ismét elveszítjük.

A csatolás nehézségein túl nem elhanyagolandó maga a szál transzmissziós karakterisztikája sem. A legjobb áteresztéssel a kvarc szálak bírnak, ezek két alapvető típusa létezik, az alacsony és magas hidroxil tartalmú (l. bővebben [7]). Ezek tipikus képviselőinek egy-egy 26 méteres darabjára kimért átviteli görbét mutatja a 11. ábra. Mivel a CCD a $300 - 1000\ \text{nm}$ -es tartományban érzékeny, mindkét száltípus esetében vannak olyan tartományok, ahol nem tudjuk kihasználni a detektort. Az ábrán egy harmadik transzmissziós görbe is látható, ez azonban egy nagyon speciális, direkt csillagászati célokra kifejlesztett, relatíve nagy magátmérőjű szál, ami kereskedelmi forgalomban nem szerezhető be.



11. ábra.

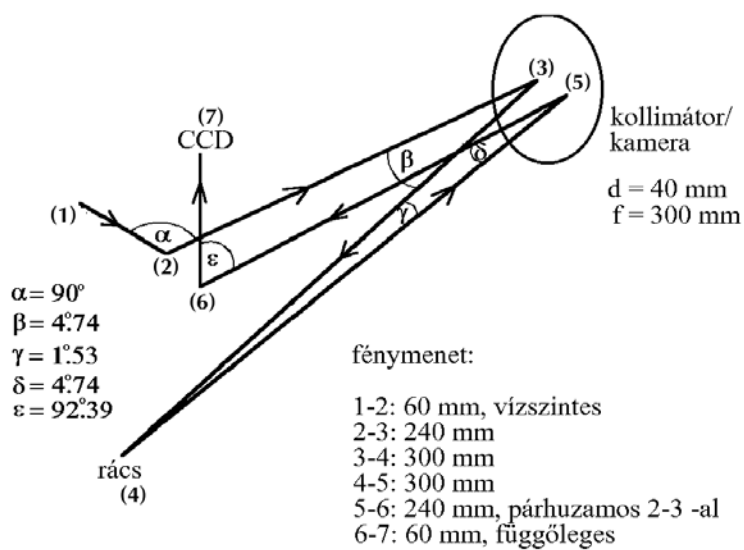
Különböző üvegszálak transzmissziója

Mindent egybevetve tehát célszerűnek tűnt egy teljesen új műszer tervezése és megépítése, mellyel szemben a következő alapkövetelményeket állítottam fel a munka megkezdése előtt:

1. a feloldóképesség $R \approx 1000 - 5000$ tartományba essen, s legyen ezen belül is több választható érték, pl. a rácsok – lehetőleg automatikus – cseréjével
2. a spektrográf közvetlen a távcsőre legyen szerelhető a fiberes csatolást elkerülendő. Ez az optikai és mechanikai elrendezésre további követelményeket szab:
 - (a) az egész szerkezetnek a lehető legkisebb tömegűnek kell lennie, s a távcső optikai tengelyére nézve lehetőleg legyen egyenletes tömegeloszlása
 - (b) a spektrográf mérete is minimális kell legyen, a német szerelésű távcsőmechanika ugyanis bizonyos pozíciókban nem enged túl nagy teret a távcső mozgatásának
 - (c) a kompakt optikai elrendezés egyik lehetséges megoldásának az autokollimációs fénymenet kínálkozik
 - (d) amennyiben a rácsok automatikus cseréjét kell kis méretben kivitelezni, úgy ezt forgómozgásra alapuló rácsváltóval célszerű megoldani
3. a kollimátor fényereje egyezzen meg a távcső $f/12,5$ -ös fényerejével
4. az alkotott spektrumban a legkisebb, műszer által feloldott részlet lineáris mérete a fókusz síkban egyezzen meg az ST-9E CCD kamera két pixelének ($40 \mu m$) méretével
5. a résszélesség legyen változtatható, így fényes csillagok esetében kisebb méretű réssel nagyobb feloldás érhető el; bár a fény egy része elvész, ugyanakkor a halványabb objektumok esetében a nagyobb résszélesség biztosítja a jobb fényhasznosítást
6. egy éjszaka során akár $10 - 20$ fokos hőmérsékletváltozás is lehet, s ezáltal az optikai elemek beállítása a hőtágulás miatt elromolhat. Ezt megelőzendő az optikai elemek egy zárt, hőmérsékletstabilizált térben legyenek elhelyezve
7. mivel az ST-9E kamerában két CCD chip van elhelyezve (l. 22. ábra), legyen az optikai elrendezésben egy másodlagos fénymenet, mely a rés képét a kamerafej kisebb érzékelőjére vetíti. Ezáltal lehetőség nyílik annak ellenőrzésére, hogy az objektum képe a résen van-e illetve a távcső expozíció alatti követési hibái korrigálhatóak

2.2. A fénymenet és az egyes optikai elemek

Az autokollimációs, kvázi Ebert-elrendezésű fénymenet vázlatát és főbb paramétereit mutatja az 12-es ábra. Az előbbiekben felsorolt alapelvek miatt a távcsőből érkező fény csak egy kis szakaszon halad a távcső optikai tengelyében, a segédtükrök alkalmazásával a fényút hosszabb szakasza a távcső tubusára merőleges. Ezáltal csak 20 cm-re nyúlik a tubus mögé a műszer, a keresztirányba vett 40 cm körüli hossz pedig nem zavaró, hiszen maga a tubus is hasonló átmérőjű. A fényút eme "összehajtogatásának" másik előnye, hogy a kollimátort a merőlegestől igen kis szögeltéréssel érik és hagyják el a sugarak, így az aberrációk kicsik maradnak.



12. ábra.
A fénymenet vázlata

2.2.1. Rácsok

A minél nagyobb fénykihasználás érdekében bontóelemként reflexiós, blazelt rácsokat választottam diszperzív elemnek. Az anyagi körülmények az Edmund Optics cég által gyártott rácsok vásárlását tették lehetővé. E rácsok reflexiós görbéit mutatja a 13. ábra.

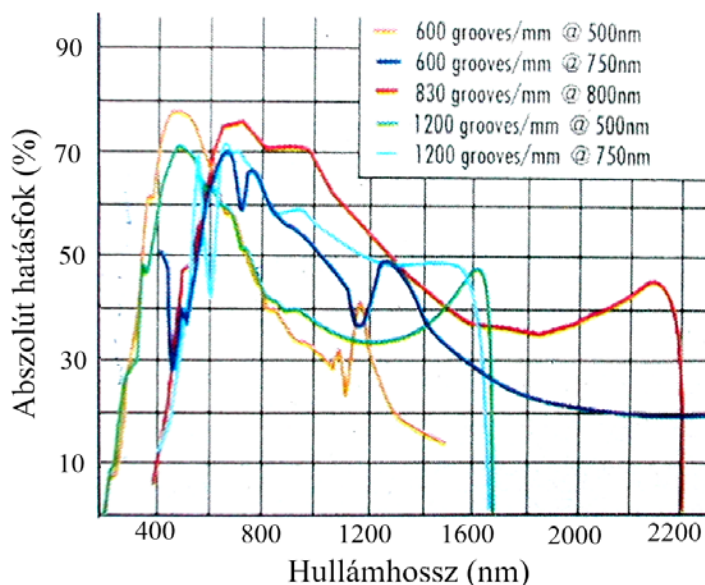
Egy adott szögű profillal karcolt rács egy meghatározott hullámhosszra és annak környezetében ad magas reflexiót. Mint az ábrán is jól látható, a blazelt rácsoknak van egy optimális felhasználási tartományuk. Tekintettel arra, hogy a CCD 350 – 1000 nm közötti tartományban érzékeny, így adott vonal/mm feloldású rács esetén célszerű egy 500 és egy 750 nm-re blazelt rácsot is felhasználni. Mivel 750 nm-en az arany reflexiója nagyobb, mint az alumíniumé (l. 18. ábra, s a cég kínálatában szerepel aranybevonatú rács 750 nm-es hullámhosszra blazelve, így erre esett a választás.

A katalógusbeli rácsok közül az 1-es táblázatban felsoroltakra végeztem el a spektrográf értékmérőinek számítását. Jelenleg a két 1200 vonal/mm-es rács áll rendelkezésre a spektrográfba szerelve (l. 14. ábra).

2.2.2. Kollimátor/kamera, elsődleges fényút elemei

A távcső fényereje alapján a kollimátornak $f/12,5$ -ös fényerejűnek kellene lennie, ami 300 mm fókuszes esetében 24 mm átmérőt jelent. Mivel azonban autokollimációs elrendezésben ugyanezen optikai elemnek kell a színeire bontott nyalábot is leképeznie, az átmérőt növelni kell, legalább a CCD chip 10 mm-es méretével. Mivel azonban a spektrálisan bontott nyaláb a tükröt nem minden átmérőjére szimmetrikusan éri, ezért az átmérő további növelése szükséges ahhoz, hogy

Tipikus hatásfok görbék karcolt rácokra
500 - 800 nm optimális (blaze) tartományokra



13. ábra.

Az Edmund Optics által kínált blazelt rácok reflexiós görbéi

feloldás (vonal/mm)	központi hullámhossz (nm)	blaze szög	maximális reflexió (%)	méret (mm)	katalógus- szám
600	500	8° 37'	75	30×30×30×9,5	K46-075
1200	500	17° 27'	71	30×30×30×9,5	K46-077
600	750	13° 00'	70	30×30×30×9,5	K55-258
1200	750	26° 44'	71	30×30×30×9,5	K46-078

1. táblázat. A spektrográfban felhasználni tervezett rácok adatai

a CCD felületére vignettálódásmentes, egyenletesen megvilágított spektrum vetüljön. Mindezeket szem előtt tartva a kollimátor/kamera átmérője 40 mm, vagyis a fényerő $f/7,5$. Ez azért előnyös, mivel ilyen kis átmérő esetén, ekkora fényerő mellett egy gömbtükör teljesíti a Rayleigh-kritériumot (vagyis hogy a leképezési hibákból származó hullámfronttorzulás nem haladja meg $\lambda/4$ értéket). Egy r görbületes sugarú tükör esetén az optikai tengelytől h távolságra a gömb és parabola közötti eltérést a következő kifejezés adja [9]:

$$\Delta z = \frac{h^2}{2r} - \left(r - \sqrt{r^2 - h^2} \right), \quad (4)$$

amit az $r = 600$ mm görbületes sugarú, 40 mm átmérőjű tükör esetén a $h = 20$ mm peremre kiszámítva $\Delta z = 92,6$ nm, ami valóban a látható tartományban $\lambda/4$ -nél kisebb torzítást eredményez. Elkerülhető tehát a parabolizálás, ami könnyíti a tükör elkészítését.



14. ábra.

Az Edmund Optics által gyártott 1200 vonal/mm-es rácsok (500 ill. 750 nm-re blazelve)

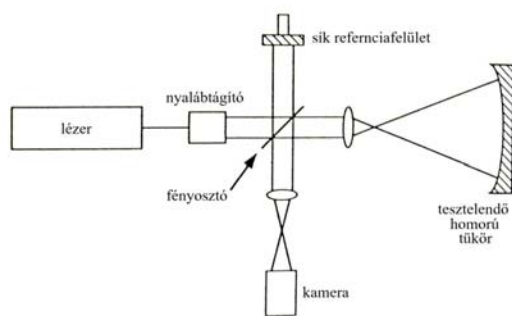


15. ábra.

A kollimátor készítése, tesztelése

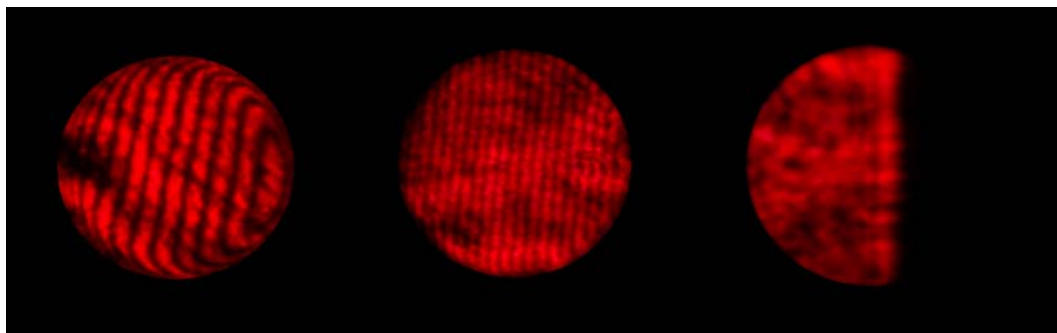
A kollimátort a költségek csökkentése érdekében, valamint a Kísérleti Fizikai Tanszék optikai műhelyének lehetőségeit kihasználva magam csiszoltam (l. 15. ábra) és láttam el reflexiós réteggel. A tükör felületének minőségét egy mikroszkóppal ellenőriztem, a felület alakjának tesztelésére a Foucault-féle késélpróbát, valamint egy Twyman-Green interferométert használtam [5]. Az interferométer felépítésének vázlatát valamint a megépített interferométert a 16. ábrán látható.

A tükör az első alkalommal sajnos nem sikerült jól, a legfinomabb csiszolóporfokozat használata végén ugyanis túl szárazon alakítottam a felületet így a peremen karcok jelentek meg. Ezeket a polírozás során a perem erőteljesebb fényezésével próbáltam eltüntetni, azonban ennek eredményeként az interferogrammon is jól látható (l. 17. ábra) erőteljes peremkopást következett be. A tükörnek így 32 mm-es átmérője volt gömb (ez viszont a sávok morfológiája alapján kóma- és asztigmatizmusmentes, $\lambda/6$ körüli hullámfronthibával), a széleken viszont 4 mm-en egy hullámhossznyi laposodott (fényforrásként He-Ne lézert használtam, így $\lambda = 632,8$ nm). Visszatértem tehát a legfinomabb csiszolóporhoz, s eltüntettem a peremkopást, valamint kicsit növeltem a tükör görbületi sugarát, ugyanis az első alkalommal elért fókuszt is kissé rövidebb volt



16. ábra.

A kollimátor teszteléséhez használt Twyman-Green interferométer felépítése valamint a megépített interferométer



17. ábra.

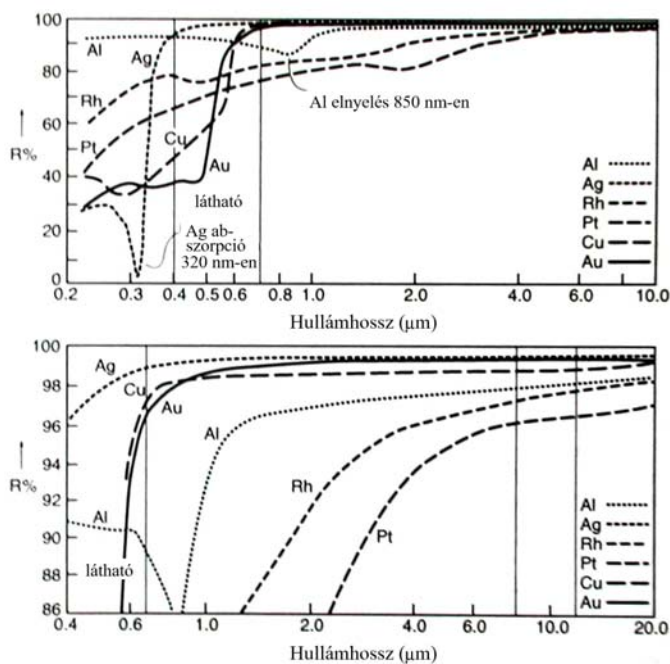
Az első, majd az újracsiszolás utáni interferogram, valamint a kész tükör Foucault-tesztjének árnyékképe

a kelleténél, 270 mm. A 17. ábra közepén az újracsiszolt és újrapolírozott tükör interferogramja valamint jobbra a Foucault-teszt árnyékképe látható. Az iterferogram alapján a felület gömb, a széleken csak minimális peremkopás jelei mutatkoznak. A késélpróba szintén a gömbi felület jellegzetes árnyékképét mutatja, a fókuszon kívüli él képe és az első diffrakciós sáv egyenes, szabályos.

Az elkészített kollimátor/kamera meghatározott paramétereit:

- fókusztávolság: $f = 285 \text{ mm}$
- átmérő/hasznos átmérő: $D/d = 40/39$
- felületi minőség: két nagyobb, 3 mm hosszúságú karc valamint egy nagyobb, 0,5 mm átmérőjű kráter, egyenletesen kifényezett felület
- a felület alakja és hullámfronthibája: gömb, $\approx \lambda/7 - 8$

A kollimátor reflexiós rétegének anyagául nem alumíniumot, hanem ezüstöt választottam, ugyanis a CCD szinte teljes érzékenységi tartományában az ezüstnek jobb a reflexiós képessége (l. 18. ábra). Ezáltal – ha csak pár százalékkal is – de növelhető volt a spektrográf fényhasználtsága. Sajnos a vákuumpárolgató nem teszi egyenlőre lehetővé kvarc védőréteg elkészítését, s ennek hiányában a felület oxidálódik és veszít reflexióképességéből. Amennyiben a későbbiekben sem sikerül a védőréteg párolgatója, úgy tervezem a tükrök máshol történő gőzölését. A kvarcréteg jelenlétében ugyanis 10 évente elegendő újra felvinni a reflexiós rétegeket, míg annak hiányában évente szükséges a frissítés.



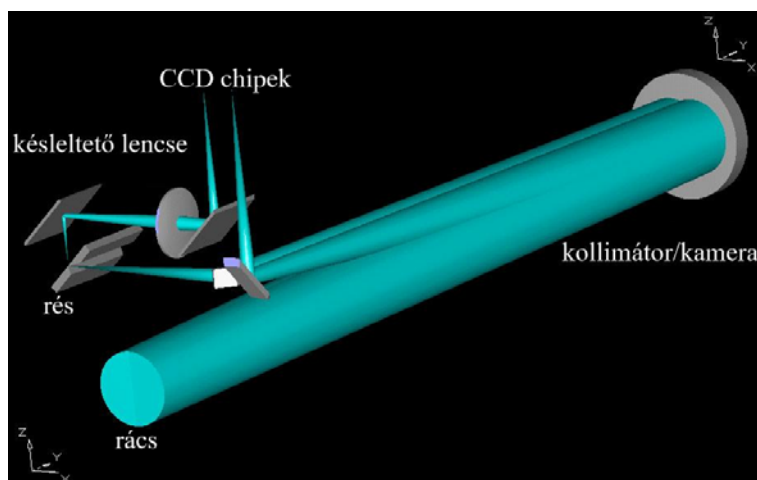
18. ábra.

Különböző rétegek reflexiós görbéi valamint az optikai elemek a vákuumpárolgatóba helyezve az ezüstréteg felvitele előtt

Az elsődleges fényútban lévő két másik tükör igen kis méretű, az első 6×9 mm, a másik 6×20 mm. Ilyen kis méretben könnyen teljesíthető a Rayleigh-kritérium. Ezért mikroszkóp fedőlemezektől vágott üvegdarabok közül interferométeres teszttel választottam ki a megfelelőeket, s ezekből készítettem a tükröket, melyeket szintén ezüst tükröző réteggel láttam el.

2.2.3. Rész, a másodlagos fényút elemei

A 19. ábrán a 12. ábrán már bemutatott elsődleges fénymenet mellett a másodlagos fénymenet is látható. A részt alkotó két szárny tulajdonképp egy tükröt alkot, a távcső optikai tengelyéhez képest 45° -ban bedöntve, így a rész keskeny sávjától eltekintve a teljes látómező a rész fölött lévő tükrökre vetítődik. Innen egy képlettel halad át, melynek fókusza úgy lett megválasztva, hogy a vezetést szolgáló CCD chipre (l. 22. ábra) 1:1 arányban képezze



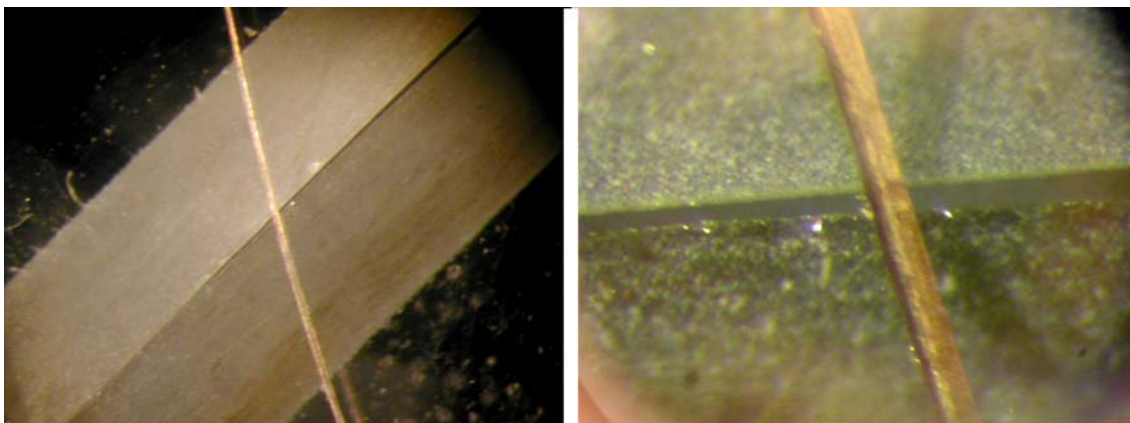
19. ábra.
A teljes fénymenet

le a távcső fókusz síkjában keletkező képet. Ez a lencse fókuszára nézve a 120 mm rész–CCD távolságból az ismert lencseegyenlettel kiszámítva 30 mm-es értéket jelent.

A késleltető lencse és a CCD között egy újabb, 45° -ban döntött segédtükör található. Ezen másodlagos fénymenet szerepe, hogy a spektrum felvétele alatt ellenőrizhető legyen, hogy az objektum képe a résre esik-e, s ha vezetési hibák miatt onnan lekerül, a kép alapján interaktívan lehessen korrigálni. Mivel itt a képalkotásnak pusztán a beállítás ill. a vezetési korrekciók szempontjából van jelentősége, ezért e fénymenet tükrökkel kapcsolatban kicsik az optikai követelmények. Mivel a méretek is kicsik, ezért a segédtükröket szintén mikroszkóp fedőlemezből vágtam ki (ez esetben még interferométeres tesztekre sem volt szükség) és csiszoltam méretre, majd láttam el tükröző réteggel. A tükrök és a lencse méretezésénél a szempont az volt, hogy a vezetést szolgáló CCD chipre vignettátalanul képezzék le a távcső fókusz síkjában keletkező képet. Mivel a chip mérete kicsiny, így a lencse és a tükrök minimális átmérője is mindössze 8 mm. (l. 33. ábra)

A rés szerepe az égi háttér és más objektumok fényének kizárása, valamint a spektrumban megjelenő vonalak tulajdonképpen a rés leképezései. Ezért tehát a rés élének igen egyenesnek kell lenniük, a párhuzamosság azonban nem annyira kritikus, mivel a csillagok képe néhány-szor $10\ \mu\text{m}$ átmérőjű korong, s ezen belül a kismértékű, pár fokos széttartás nem zavaró. Az élnek viszont legfeljebb néhány mikronos egyenetlenséget szabad csak mutatniuk. A szintén saját készítésű résszárnyak élét ezért egészen a legfinomabb csiszolóporokat használva, gyakori mikroszkópos ellenőrzés mellett csiszoltam. A rés egyik szárnyát 45° -osnál nagyobb szögben kell élezni, és szó szerint élre kell csiszolni. Ezt igen nehéz anélkül kivitelezni, hogy ne legyenek az élen betörések. A 20. ábrán látható az elkészített résszárnyak élének mikroszkópos felvétele.

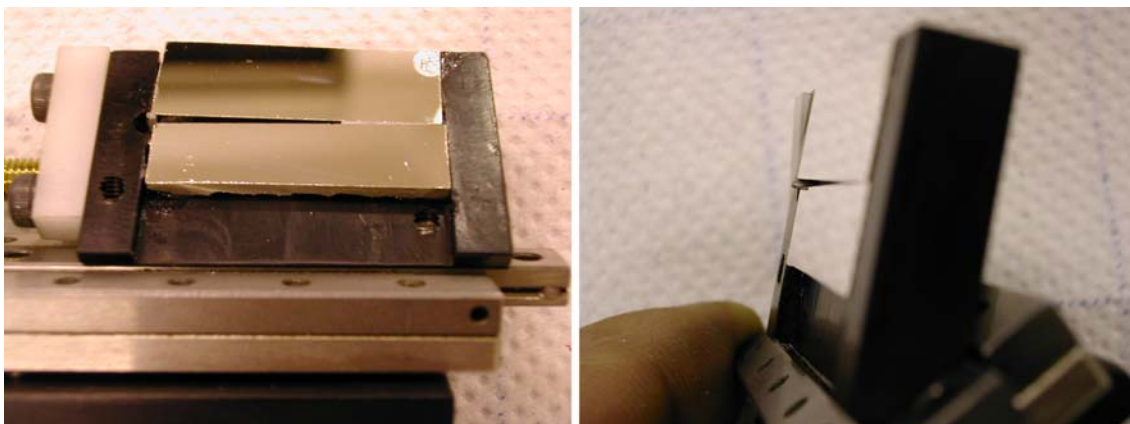
A résszélesség változtatása a szárnyak egymáshoz képesti mozgásával oldható meg. A szükséges kis méret és az egyúttal tükröként is szolgáló rés nagy beállítási pontossága miatt azonban ezt nehéz lett volna kivitelezni. Mivel azonban az ékességgel szemben nem túl nagyok



20. ábra.

A résszárnyak csiszolása során készített mikroszkópos felvételek
(összehasonlításként egy $70\ \mu\text{m}$ vastag hajszál látható)

követelmények, így a szárnyakat egymással 1° -os szöget bezáróan helyeztem el. Magát a réstartót egy lineáris csapágyra szereltem, s így egyetlen elem lineáris mozgásával lehetővé vált a fókusz sík egy adott pontján lévő objektum számára a résszélesség változtatása.



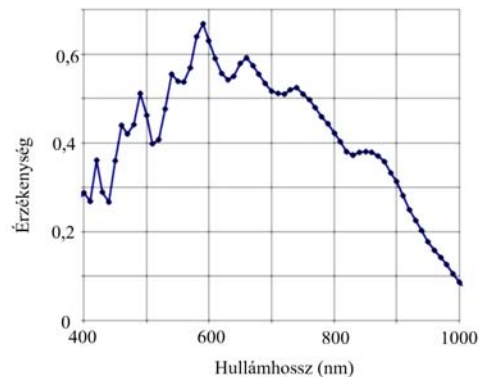
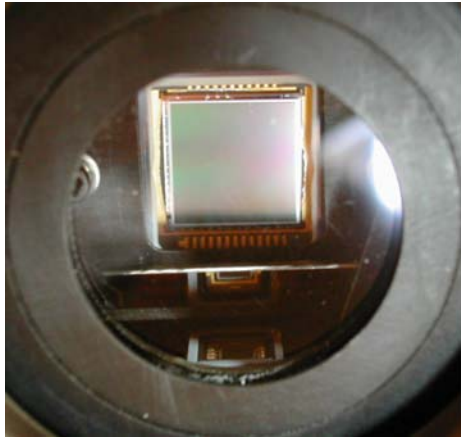
21. ábra.

Az ék alakban elhelyezett résszárnyak a réstartóra erősítve

2.2.4. Detektor

Az ST-9E két CCD-t tartalmaz (l. 22. ábra), az egyik egy Kodak KAF-0261E, amely 512×512 pixeles, $20\ \mu\text{m}$ -es pixelmérettel, vagyis $1\ \text{cm}^2$ hasznos felülettel. E chip feladata a spektrum rögzítése. Mellette – egy tükör segítségével virtuálisan a chipek foglalata által megengedett távolságnál is közelebb – helyezkedik el egy Texeas TC-211 érzékelő, mely 192×165

pixeles, $13,75 \times 16 \mu\text{m}$ -es pixelmérettel, vagyis $2,6 \times 2,6 \text{ mm}$ hasznos felülettel. Ez a távcső 5 méteres fókuszusa esetén (mivel a készletetől lencse a fókuszstíkot 1:1 arányban képezi le e chipre) $1,8 \times 1,8$ látómezőt ad. A két chip egymástól függetlenül olvasható ki, tehát amíg pl. a nagyobb chip egy 5 perces felvételen rögzíti a spektrumot, ez alatt a kisebb chip 5 másodpercenként kiolvasható.



22. ábra.

Az ST-9E CCD kamerafejében található két CCD chip és a kamera érzékenységi görbéje

2.2.5. Spektrállámpa becsatolása

Ahhoz, hogy radiális sebességet lehessen mérni, szükség van egy referenciahullámhosszra. Ezt általában egy tórium-argon vagy vas-neon spektrállámpa szolgáltatja, melynek fénye a spektrográfba vetíthető. Két lehetséges megoldás vázlatát mutatnám be röviden:

- A rés előtt egy 45° -ban megdőntött vékony üveglemez elhelyezése. Ennek előnye, hogy a távcsőből érkező fény egy része (4% szimpla üvegfelület esetén) kicsatolható, s egy okulárt helyezve e fényútba egy objektum könnyen és gyorsan beállítható. Az okulárral átellenben elhelyezett spektrállámpa fénye ugyanezen üveglemez másik oldaláról reflektálódva a spektrográfba jut, a lámpa fényességét tekintve a 4%-os reflexió másodperc nagyságú expozíciót tenne lehetővé. Mindez pedig nem igényel mozgó alkatrészt, pusztán a lámpát kell ki/be kapcsolgatni. Hátránya e megoldásnak, hogy a műszer teljes fényáteresztése mintegy 8%-al csökken.
- A rés előtt egy forgatható, szintén a PC-ről vezérelhető tükör elhelyezése. Ezáltal a műszer fényhasznosítása nem csökken, azonban újabb mozgó, kontrollálandó alkatrész kerül a rendszerbe. Mint az elektronikával foglalkozó részben látható, a rácsváltás, rács dőlésszögének beállítása valamint a rés vezérlése lefoglalja egy PC párhuzamos portjának 8 kimeneti és 5 bemeneti vonalát. A spektrállámpához tartozó egység vezérlése még ugyanezen porton megoldható, annak ugyanis van 4 db kétirányú vonala [4], azonban

ezek csak bizonyos, BIOS-beli portbeállítás esetén érhetőek el. Így régebbi PC-ken a vezérlés nem lesz futtatható, bár ez ma nem jelent korlátozó tényezőt. (Illetve további portok is használhatóak a PC-n, bár egy párhuzamos portot a CCD foglal, egy sorosat az egér ill. egy másik sorosat a távcsőmechanika vezérlése. Alapkonfigurációban egy PC 2 soros, ill. 2 párhuzamos portot tartalmaz, s a spektrográffal együtt mind a négy port foglalt, a PC azonban e téren könnyen bővíthető.)

A másodikként vázolt megoldás előnyösebb, így ez kerül megvalósításra a mechanikai és elektronikai elemek megtervezése után (a diplomamunka leadásakor ez az egység még nem volt készen).

2.3. Értékmérők számítása

Egy bontóelem szögdiszperzióját az alábbi kifejezés definiálja:

$$\frac{\Delta\beta}{\Delta\lambda} = \frac{m}{d \cdot \cos\beta}, \quad (5)$$

ahol β szöget a számítások során a rács karcolásának szögével vettem egyenlőnek, $m = 1$ a használni kívánt első rendben, d pedig a rács két szomszédos osztásának távolsága. Természetesen az így kapott paraméterek egy adott hullámhosszára lesznek jellemzőek, azonban a jól ismert rácsegyenlet segítségével β tetszőleges hullámhosszra megadható s így rácsegyenlet segítségével (autokollimációs esetre felírva):

$$m \cdot \lambda = 2 \cdot \sin\beta \quad (6)$$

s így az alábbi számítások bármely λ -ra elvégezhetőek.

A reciprok lineáris diszperzió, mely megmutatja, hogy egy mm-re mekkora hullámhossztartomány esik:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta x} = \frac{1}{f_{\text{cam}} \cdot \frac{\Delta\beta}{\Delta\lambda}}, \quad (7)$$

ahol f_{cam} a kamera szerepét is betöltő kollimátor fókusz távolsága.

A spektrális tisztaság egy fontos jellemző, hiszen hiába jobb az elméleti feloldása egy spektrográfnak ennél a határértéknél, a részletek összemosódnak s e paraméter szabja meg a valódi feloldóképességet. A legkisebb tisztán, átfedések nélkül kivehető $\Delta\lambda$ részlete a spektrumnak:

$$\Delta\lambda = \frac{d}{m} \cdot \frac{w}{f_{\text{coll}}} \cdot \cos\alpha, \quad (8)$$

ahol w a rés szélessége, α -t pedig – ami a beeső (és autokollimációban egyben a diffraktált) sugár rács normálisával bezárt szögét jelöli – a számítások során szintén a rács profiljának szögével vettem egyenlőnek.

(5) – (8) egyenletek felhasználásával az 1. táblázatban felsorolt rácsokkal a tervezett optikai rendszerre vonatkozóan a 2. táblázatban megadott paramétereket kaptam. A spektrális tisztaságot és az ezzel számított feloldóképességet 40 ill. 80 μm -es résszélességre adtam meg.

katalógus- szám	reciprok lineáris diszperzió (Å/mm)	képskála (Å/pixel)	spektrális tisztaság (Å) [†]	feloldóké- pesség [†]
K46-075	54,94	1,10	2,20/4,39	2273/1139
K46-077	26,49	0,53	1,06/2,12	4717/2358
K55-258	54,13	1,08	2,17/4,33	3456/1732
K46-078	24,80	0,50	0,99/1,98	7575/3787

2. táblázat. A spektrográf főbb értékmérői az egyes rácsok központi hullámhosszára számítva
[†] 40 ill. 80 μm -es résszélességre

2.4. A távcső és a spektrográf együttes teljesítőképességének meghatározása

2.4.1. Transzmisszió

Elsőként számítsuk ki a távcső és a spektrográf optikai elemein történő visszaverődések során keletkező fényvesztést. A T transzmissziós együtthatót a következő kifejezés adja:

$$T = t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \cdot t_4 \cdot t_5 \cdot t_6 \cdot t_7 \cdot t_8 \cdot t_9, \quad (9)$$

ahol az egyes tényezők jelentése:

- t_1 : a tácső főtükrének reflexiója (0,94)
- t_2 : a távcső segédtükrének reflexiója (0,94)
- t_3 : rés áteresztése - amennyiben 2"-es seeinget (légköri nyugodtságot) tételezünk fel -, 40 μm -es résszélesség mellett értéke 0,8, 80 μm -es résszélesség mellett 0,97
- t_4 : az első eltérítő tükör reflexiója (0,94)
- t_5 : a kollimátor tükör reflexiója (0,94)
- t_6 : a rácsok reflexiója, ami a centrális hullámhossz 100 nm-es környezetében átlagosan 0,65-nek vehető
- t_7 : a kameratükör reflexiója (0,94)
- t_8 : a második eltérítő tükör reflexiója (0,94)
- t_9 : a detektor optikai ablakának áteresztése (0,99)

Ezen értékekkel számolva $T = 0,35$ a 40 μm -es rés esetén, illetve $T = 0,43$ a 80 μm -es résszélesség mellett. (A spektrográfban lévő tükrök reflexiós tényezőjeként az alumíniumbevonatra vonatkozó reflexióval számoltam, annak ellenére, hogy ezüst bevonatot készítettem a tükrökre. Utóbbinak ugyan nagyobb a visszaverő képessége, azonban megfelelő védőréteg hiányában a reflexióképesség csökken. Így az alumíniumra vonatkozó értékkel számolva a friss ezüstréteg esetére egy alsó becslés adható (7% az eltérés negatív irányba), ami azonban az előregedett réteg esetén jobban közelíti a valóságot.)

2.4.2. Érzékenység

Pontszerű forrás (csillag) esetében is az S érzékenységet elektron/pixel/másodperc formában fejezzük ki a távcső belépő apertúrájánál 1 foton/cm²/másodperc/Å beérkező fluxus mellett:

$$S = T \cdot A \cdot QE \cdot \Delta\lambda, \quad (10)$$

ahol T a (9) által meghatározott transzmissziós együttható, A a távcső fénygyűjtő felülete, QE a detektor kvantumhatásfoka, $\Delta\lambda$ pedig az egy pixel által lefedett spektrális tartomány (l. a 2. táblázat 4. oszlopát). Számoljunk a továbbiakban a hidrogén Balmer-alfa vonalának közelében, 650 nm-re, itt az ST-9-es CCD kamera kvantumhatásfoka 65%.

- $T = 0,35/0,43$
- $A = 1186 \text{ cm}^2$, figyelembe véve a távcső segédtükrének központi kitakarását
- $QE = 0,65$ (Kodak KAF-0261E chip 650 nm-en)
- $\Delta\lambda = 0,5/1,1 \text{ Å}$ (600 ill. 1200 vonal/mm-es rácsokra)

Ezen paraméterekkel $S = 134,9/296,8$ elektron/pixel/másodperc (40 μm-es résszélesség mellett), illetve $S = 165,7/364,6$ elektron/pixel/másodperc (40 μm-es résszélesség mellett) az 1200 vonal/mm-es és a 600 vonal/mm-es rácsokra 1 foton/cm²/másodperc/Å beérkező fluxus mellett.

2.4.3. Hasznos jel

Egy csillag spektrumának felvételekor a jel nagyságának elektronban történő kifejezése az alábbi képlet szerint történik:

$$C = E \cdot S \cdot T_A \cdot N \cdot M, \quad (11)$$

ahol C az $N \times M$ pixeles területen belül összegyűlt elektronok száma, E a mért csillag fluxusa az atmoszféra fölött foton/cm²/s/Å -ben kifejezve, T_A pedig az atmoszféra transzmissziója.

- $T_A = 0,7$ átlagosan a tengerszinten ($\lambda = 650 \text{ nm}$), ami hozzávetőleg $0,4^m$ fénycsökkenést jelent
- $N = 1$, ill. 2 ; a diszperziós tengely mentén a 80 μm-es résszélesség mellett a spektrális tisztaság négy pixel szélességűnek felel meg, 40 μm-es résszélesség mellett is 2 pixel, azonban számoljunk a pixelek összeolvasása nélkül, alsó becslést adva így az érzékenységre
- $M = 1$, ill. 2 , az előbbihez hasonlóan
- E értékére nézve a 3. táblázat ad tájékoztatást egy A0V színeképtípusú csillag esetén (mint amilyen a Vega, a Lant csillagkép legfényesebb csillaga)

hullámhossz (Å)	fluxus (foton/cm ² /s/Å)
4000	1620
4500	1453
5000	1167
5500	990
6000	833
6500	700
7000	620
7500	536
8000	483

3. táblázat. Egy A0V színeképtípusú csillag fluxusa az atmoszféra felett mérve

$\lambda = 650$ nm-re, a 0^m fényességű Vegára számítva:

$$C_{0,40} = 700 \cdot (134,9/296,8) \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1 = 66101/145432,$$

$$C_{0,80} = 700 \cdot (165,7/364,6) \cdot 0,7 \cdot 2 \cdot 2 = 347142/714616,$$

ahol a $C_{0,40}$ kifejezésben a 0 index a magnitúdóban kifejezett fényességre, a 40 index pedig a rés szélességére utal, a kapott két érték pedig az 1200 vonal/mm, illetve a 600 vonal/mm-es rácsokra vonatkozik.

Valamely adott m , nem 0 magnitúdó fényességű (de továbbra is A0V színeképosztályú csillagra) számolva:

$$C_m = C_0 \cdot 10^{-0,4 \cdot m}. \quad (12)$$

Így pl. egy 8^m -os csillagra $40 \mu\text{m}$ -es rés mellett $C_{8,40} = 41,7/91,8$ elektron/másodperc, egy 10^m csillagra $80 \mu\text{m}$ -es résszélesség mellett $C_{10,80} = 34,7/71,5$ elektron/másodperc adódik.

2.4.4. Jel/zaj viszony

A spektrumok kiértékelhetőségének kritériuma a megfelelő jel/zaj viszony, ami $S/N = 20$ -at el kell érje. A jel/zaj viszony számítása az alábbiak szerint történik:

$$\frac{S}{N} = \frac{C \cdot I}{\sqrt{C \cdot I + N \cdot I \cdot (B + D) + (N/M) \cdot n \cdot s^2}}, \quad (13)$$

ahol az egyes tagok:

- I az expozíciós idő másodpercben
- C a (11)-ben megadott hasznos jel elektron/másodpercben megadva az esetleges pixellösszevonásokat figyelembe véve

- B az égi háttér értéke (szórt fény), elektron/másodperc/pixelben
- D a sötétzaj, elektron/másodperc/pixelben
- N a diszperziós tengely mentén összeolvasott pixelek száma
- M a diszperziós tengelyre merőleges irányban összevont pixelek száma
- n az I integrációs idő eléréséhez összegzett képek száma
- s a detektor kiolvasási zaja elektronban megadva

Külvárosi égbolton az égi háttér értéke hozzávetőlegesen 17 magnitúdó/négyzetívmásodperc, ami mintegy 40 elektron/pixel/másodperces, az égi háttérből származó jelnek felel meg. Az ST-9E detektor kiolvasási zaja 13 elektron, sötétzaja 5 elektron/pixel/másodperc -20 °C-ra hűtve. $40 \mu\text{m}$ résszélesség mellett $M = N = 1$, $80 \mu\text{m}$ résszélesség mellett $M = N = 2$.

Az távcsőmechanika esetleges hibái, a követési pontatlanság miatt (kis időkre elhagyja a rés a csillagot) érdemes több, rövidebb expozíciós képet készíteni általában. A spektrográf úgy kerül a távcsőre, hogy a rés rektaszcenziós irányban áll, így a kisebb követési pontatlanságok során a csillag képe nem hagyja el a rést. Számoljunk tehát a továbbiakban $n = 1$ értékkel. Átrendezve a jel/zaj viszonyra felírt (13) egyenletet az integrációs időre, kiszámítható a kívánt $S/N = 20$ arányhoz tartozó integrációs idő. Az átrendezés során végezzünk el egy közelítő egyszerűsítést. A (13)-as kifejezésben ugyanis egy kép készítése, vagyis $n = 1$ és s kis értéke mellett a nevező utolsó tagja elhanyagolható az első két taghoz képest, ezáltal I -re rendezve a következő kifejezést kapjuk:

$$I = \frac{(S/N)^2}{C^2} \cdot \{C + N \cdot (B + D)\}. \quad (14)$$

S/N értékét 30-nak véve, valamint a többi tényező értékét a fent számítottak alapján behelyettesítve az alábbi expozíciós idők adódnak (az első érték az 1200, a második pedig a 600 vonal/mm-es rácsra vonatkozik; a kiolvasási zaj figyelembevételével ezek az értékek 5-10 százalékkal nagyobbak lehetnek):

$$\begin{aligned} 8^m \text{ csillag, } 40 \mu\text{m résszélesség: } I &= 45/16 \text{ másodperc,} \\ 10^m \text{ csillag, } 80 \mu\text{m résszélesség: } I &= 160/44 \text{ másodperc.} \end{aligned}$$

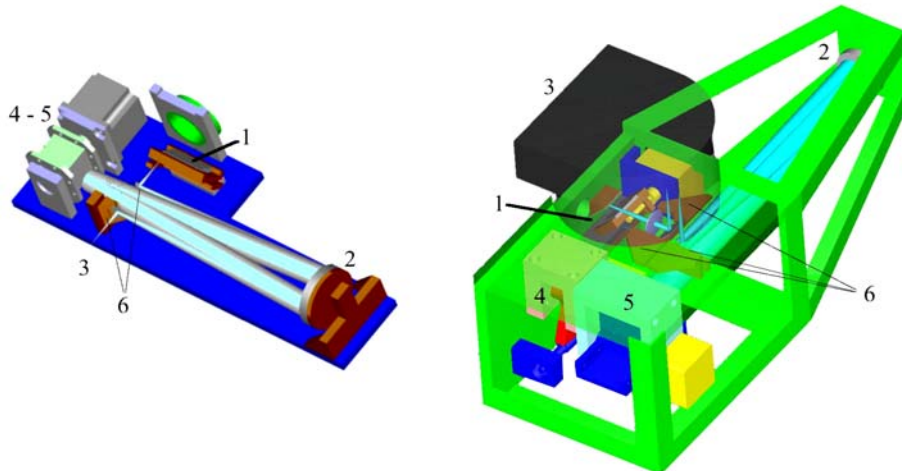
3. Mechanika

3.1. Alapvető követelmények, tervezés

Az optikával foglalkozó fejezet végén felsorolt, a spektrográffal szemben támasztott követelmények egyben a mechanikai szerkezetre vonatkozóan is irányadóak. Az alábbiakban részletesebben, finommechanikai, gyártástechnológiai szempontokat is figyelembe véve szeretném áttekinteni azon alapelveket, mely a műszer alkatrészeinek tervezésekor és elkészítésekor mérveadóak voltak:

- a távcsőmechanika terhelhetősége miatt a mechanikai szerkezetnek a lehető legkisebb tömegűnek kell lennie. Ez az anyagválasztás szempontjából az alumíniumot részesíti előnyben, ami kis fajsúlya mellett korrózióállósága miatt is megfelelő
- a távcső optikai tengelyére vonatkozóan szimmetrikus tömegeloszlásra kell törekedni az egyes elemek elhelyezésekor
- a felépítésre vonatkozó elv, hogy az egyes optikai elemek felfüggesztését minél kisebb felületű alaplapon, alaplapokon kell megoldani, s amennyiben több szeparált alaplap szükséges, azokat lehetőleg vázszerkezettel kell összekapcsolni. A váznak biztosítani kell az optikai elemek egymáshoz képesti stabilitását, vagyis a távcső pozíciójának, azaz a műszerre ható gravitációs erők irányváltozásából adódó mechanikai torzulások minimálisak kell legyenek. Ez a vázszerkezetben a nagyobb távolságok áthidalásában háromszög/trapéz alakok alkalmazásával érhető el
- az optikai elemek tartói legyenek jusztírozhatóak
- a léptetőmotorral vezérelt alkatrészeknek önzárónak kell lenniük, vagyis a motorokról levéve az áramot önmaguk kell tartsák a beállított pozíciót. Erre azért van szükség, mert a motorok áram alá helyezve melegsznek, s a belső tér hőmérsékleti stabilizálását e kontrollálatlan plusz hő megnehezíti
- a rácsváltást a kis méret miatt forgómozgásból lehet megoldani, de biztosítani kell az egyes rácsok pozíciójának pontos reprodukálhatóságát: ugyanazt a rácsot visszaállítva a hullámhossztérés a lefedett tartomány $1/10$ -énél kisebb legyen
- a rácsforgatásnak megfelelő feloldásúnak kell lennie, vagyis a legkisebb lépés kisebb kell legyen, mint a legnagyobb feloldás esetén az egy kép által lefedett hullámhossztartomány $1/10$ -e
- a résmozgatás során a lépésköz a rés szélességének változásában legfeljebb $1 \mu\text{m}$ legyen
- minden mozgó alkatrésznek kotyogásmentesen, az optikai elemek beállítása során azok kontrollálatlan elmozdulását kerülendően kell működnie

- mivel a detektort direkt képalkotásra is használják a távcsővel, így a CCD gyors le- és felszerelhetőségét kell biztosítani úgy, hogy ugyanabba a pozícióba kerüljön vissza a detektor, illetve maga a spektrográf is könnyen leszerelhető legyen a távcsőről
- az optikai úthosszak megváltozásának elkerülésére hőmérsékletileg stabilizált, zárt térben kell elhelyezni az optikai elemeket, vagyis megfelelő hőszigeteléssel és burkolattal kell ellátni a mechanikai szerkezetet



23. ábra.

A legelső, nagyolva kidolgozott és a végleges szerkezet (utóbbinál a felső alaplap és a kamera félig áttetszően van ábrázolva)

1 – rés; 2 – kollimátor; 3 – CCD kamera; 4 – rácsforgató; 5 – rácsváltó; 6 – tükörtartók

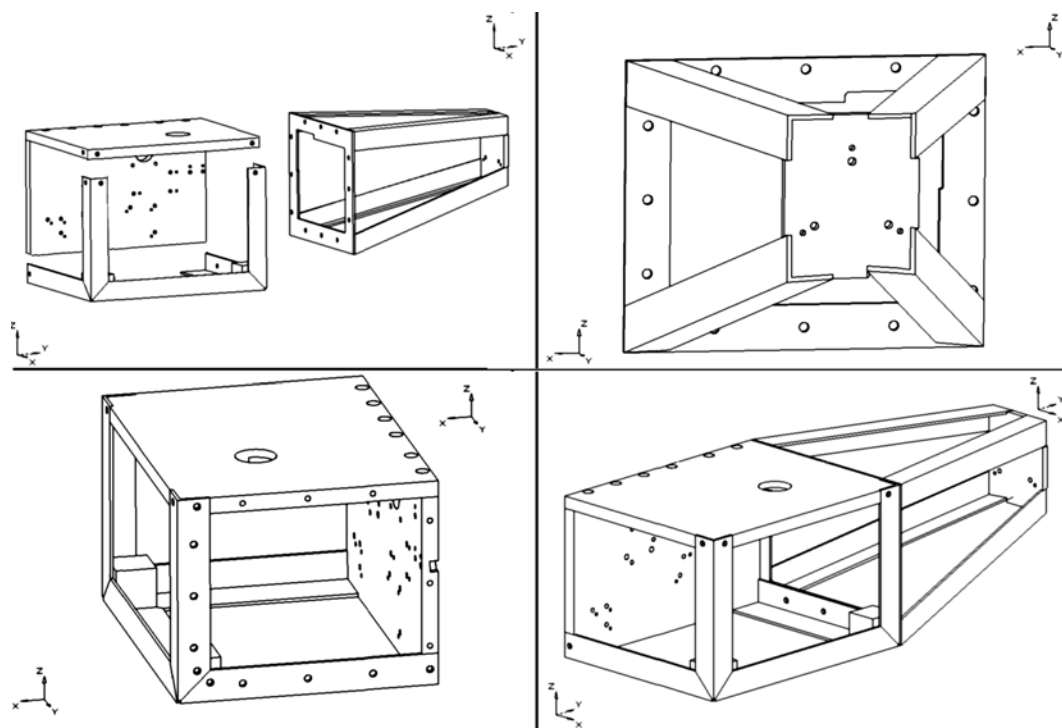
A mechanikai elemek tervezését a *CADKey97 PR2* számítógépes, Windows alatt futó tervezőprogrammal végeztem, melyhez a székesfehérvári Gróf Széchenyi István Műszaki Szakközépiskola jóvoltából férhettem hozzá. A dolgozat több pontján felhasznált három dimenziós színes ábrák, valamint a mellékletben található műszaki rajzok e szoftverrel készültek. A bevezetőben említett TDK dolgozat óta jelentős változáson ment át a mechanika, amit a 23. ábra is jól mutat. Ebben a fejezetben a főbb egységeket szeretném részletesebben bemutatni, melyek a következők:

- vázszerkezet
- réstartó és résmozgató
- rácsváltó és rácsforgató
- tükörtartók
- CCD és távcső csatlakozása
- hőszigetelés, burkolat

3.2. Az egyes szerkezeti elemek ismertetése

3.2.1. Vázszerkezet

Az optikai elemek két, egy oldalsó és egy felső alaplapra vannak szerelve, a két alaplap "L" alakban az éleik mentén összecsavarozva alkot egy egységet. Az alaplapok 10 mm vastagságú táblaalumíniumból készültek. Ezt egy szintén "L" keresztmetszetű, $2 \times 20 \times 20$ ill. $2 \times 20 \times 30$ mm szögalumíniumból készült egység teszi merevvé, mely csavarokkal rögzíthető az alaplapok sarkaihoz. A merevítő egység elemei egymáshoz vannak hegesztve. A kollimátort tartó kis alaplapot négy, szintén $2 \times 20 \times 20$ mm szögalumíniumból készült, egy négyszögletes alapon nyugvó váz tartja, mely elemek szintén hegesztve vannak egymáshoz s egy egységként rögzíthetők csavarok segítségével az alaplapok és a merevítő alkotta egységhez. A kollimátor alaplapját tartó váz minden oldalát trapéz alakúra terveztem, hogy megfelelő szilárdságot adva a kollimátor pozíciója ne változzon (ne lógjon le) a műszer mozgatása során. (l. 24. és 25. ábra)



24. ábra.

A spektrográf vázszerkezetének elemei és összeillesztésük
befoglaló méretek: $x = 160$ mm, $y = 130$ mm, $z = 380$ mm

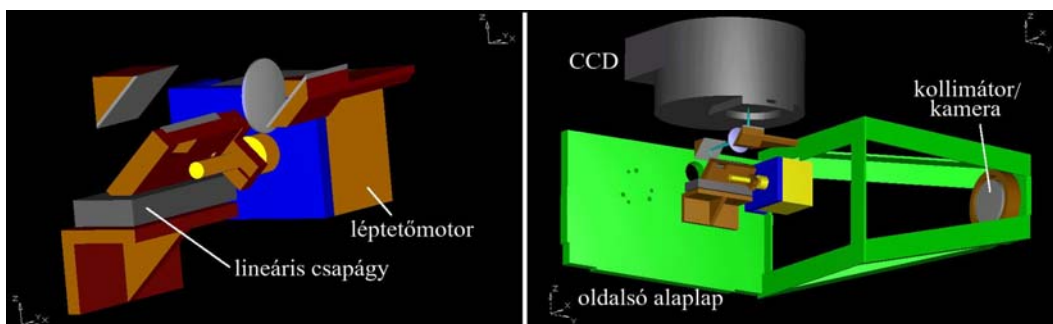
Az oldalsó alaplap néz a távcső felé, és ehhez csatlakozik a rácsváltó- és forgató, valamint a résmozgató mechanizmus. A felső alaplaphoz az elsődleges és másodlagos fényút tükreinek, a késleltető lencsének a tartója, valamint a CCD kamera csatlakozik.



25. ábra.

A vázszerkezet elemei a műszer készítésének elején ill. az összeszerelt váz néhány beépített alkatrészsel

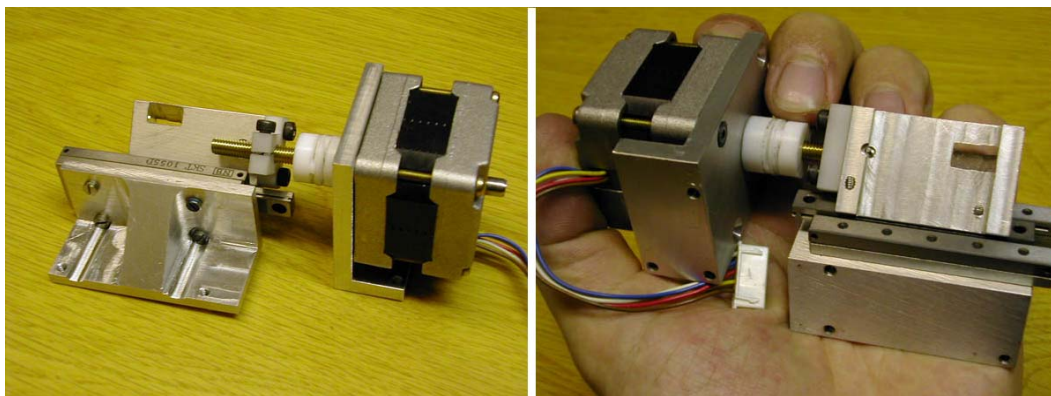
3.2.2. Réstartó



26. ábra.

A réstartó a másodlagos fényút elemeivel, illetve ezen egységek elhelyezkedése a vázszerkezethez és a kamerához képest

A 2.2.3-ban tárgyalt, speciális résszárnyakat tartó egység terve, valamint a vázszerkezeten belüli elhelyezkedése a 26. ábrán látható. A rést közvetlen tartó, 45 fokban bedöntött elem egy lineáris csapágyon ül, amely egy merevített, derékszögű tartón keresztül csatlakozik az oldalsó alaplaphoz. E tartó 3 csavarpár segítségével dönthető, illetve szintén három csavarpárral a csapágy magassága és dőlésszöge állítható. Szintén az oldalsó alaplaphoz csatlakozik egy léptetőmotor, mely tengelye egy kemény műanyagból készült tengelykapcsolóval egy 0,5 mm menetemelkedésű sárgaréz orsóhoz kapcsolódik (l. 27. ábra). Az orsó a réstartó csapágyon elmozduló részéhez rögzített menetes műanyag fülbe csatlakozik. A műanyag fül szárait egy csavar segítségével elő lehet feszíteni, így holtjátékmentes kapcsolat alakítható ki a motor tengelye és a csapágy között. A motor fix rögzítése miatt a tengely forgatásakor a csapágyra szerelt réstartó közeledik vagy távolodik a forgásiránynak megfelelően.



27. ábra.

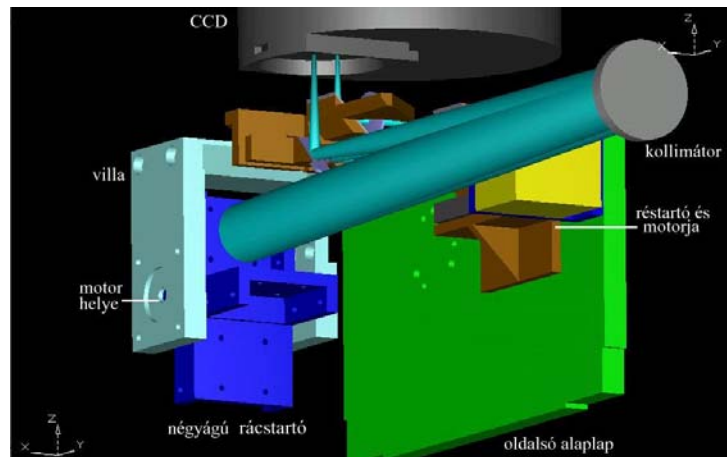
A réstartó és a mozgató motor közelképei

A résszárnyak 1° -os széttartását úgy oldottam meg, hogy a szárnyak élei az egyik végen érintkeznek, a másik végen pedig egy, a réstartóba csavart hernyócsavar megfelelő méretre esztergált szárára fekszenek fel két oldalról (l. a 27. ábra jobb oldalán valamint 21. ábra). A távtartó átmérője $0,45\text{ mm}$ a 26 mm élhosszúságú résszárnyak és az adott szög esetén. Ezt mikrométerrel mérve $0,01\text{ mm}$ pontossággal készítettem el. Mivel a szárnyak 45° -ban döntöttek, így a távcső által $40\text{ }\mu\text{m}$ szélesnek látott pont a szárnyak érintkezési pontjától $3,2$, a $80\text{ }\mu\text{m}$ széles pont $6,4\text{ mm}$ -re van. Mivel $0,1\text{ mm}$ -nél szélesebb rés alkalmazása nem indokolt a használat során, így a lineáris csapágy mozgása az alaphelyzethez képest $8,1\text{ mm}$ kell legyen. Ennek megfelelő szélességben lett átfúrva a réstartó, hogy a fény az első segédtükörre vetülhessen. A mozgató orsó $0,5\text{ mm}$ -es menetemelkedése és a motor $200\text{ lépés/fordulat}$ üzemmódja mellett egy lépés a rés szélességében $0,03\text{ }\mu\text{m}$, ami bőven kielégíti a kitűzött $1\text{ }\mu\text{m}$ -es állítási lépésközt.

3.2.3. Rácsváltó és -forgató mechanizmus

A rácsváltót 4 rács befogadására terveztem. Egy négyzetes keresztmetszetű tengelyen 90 fokként egy-egy, a rácsok rögzítésére és kis mértékű juszttírozására alkalmas "U" keresztmetszetű tartó van elhelyezve. A tengely egyik oldalán csapágyazott, a másik végén közvetlen a forgatást végző léptetőmotor tengelyéhez csatlakozik, ami két ponton csapágyazott. A csapágy és a motor egy villához vannak rögzítve, mely szárai között tud elfordulni a négyágú rácsváltó (l. 28. ábra).

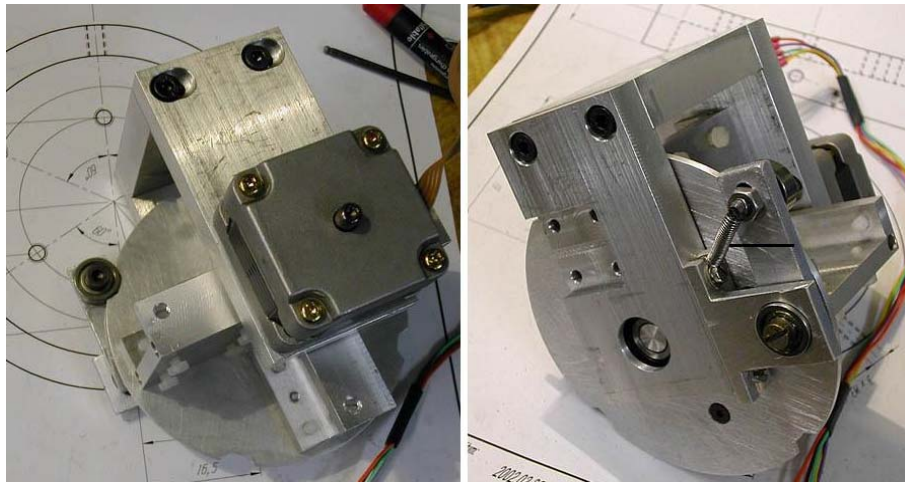
A rácsok kis mérete miatt a motor könnyen tudja forgatni a négyágú tartót, bár törekedni kell a kiegyensúlyozásra: amennyiben csak egy rácsot kívánunk használni, úgy az átellenes pozícióba egy, a ráccsal megegyező tömegű üvegdarabot kell elhelyezni. Ez a szerkezet azonban nem tartja meg pozícióját miután a motorról levesszük az áramot. Ki kellett tehát találni egy olyan mechanikai "zárat", ami a motor viszonylag kis nyomatékával is oldható, ugyanakkor kellő erővel tartja a rácsváltó keretet a beállított pozícióban. Ezt a 29. ábrán látható módon oldottam meg. A rácsváltó tengelyére felkerült egy 2 mm vastag tárcsa, mely finom felületűre megmunkált peremén egymástól 90° -ra négy trapéz alakú mélyedés helyezkedik el. A villához



28. ábra.

A rácsváltó és elhelyezkedése a fényút feltüntetésével

egy csapágyazott karon egy kis gördülőcsapágy csatlakozik, mely a tárcsa peremén fut egy rugó előfeszítésével. A karon a csapágy helyzete állítható, így elérhető, hogy pontosan akkor fekvődjön fel a trapéz alakú bemélyedés két pontján, amikor a rácstartó egyik ága a villa közé került. Ekkor a rugó ereje ebben a pozícióban tartja rácstartót, amennyiben a motoron nincs feszültség. Mivel azonban ez az erő nem sugárirányba hat, így az egyik irányba kis nyomattal elforgatható a rácstartó. A trapéz alakú horony ezen irányban eső falán könnyen felgördül a csapágy, ehhez elegendő a motor nyomatéka, azonban a másik irányba nem tud elfordulni a szerkezet. A rugóerő (praktikusan a rugó hosszának) behangolásával elérhető, hogy a csapágy a horony bármelyik élére kerülve pozícióra húzza a rácstartót kikapcsolt motor esetén.

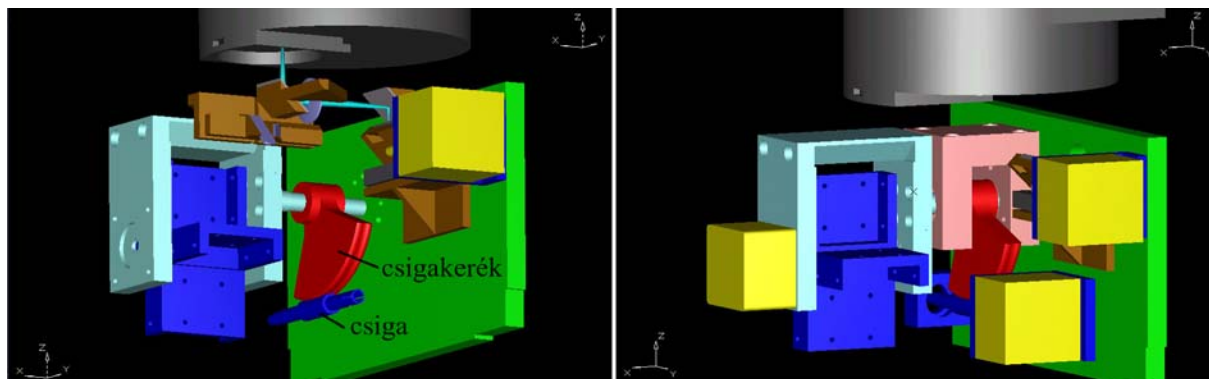


29. ábra.

A rácsváltón alkalmazott automatikus mechanikus zár

A kis csapágy mindig egy pozícióban áll meg, amikor a trapéz két szárát egy-egy ponton érinti. Így a rácsváltó forgatása során egy adott rács pozíciójának reprodukálása nagy pontosságú. Egy tükröt erősítve egy rács helyére s azt lézerral megvilágítva megvizsgáltam, hogy a rácsváltó egy körbefordulása után a visszavert nyalábok hová esnek egy távoli ernyőn. Az 5,5 méteres bázisvonalon a foltok pozíciója 14 mm-t szórt, ami 4/4 reprodukciós pontosságot jelent. Ez a 90 mm átmérőjű tárcsa peremén $57 \mu\text{m}$ -nek felel meg, a spektrumban pedig a (6) rácsegyenlet alapján $\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$ -nek. Ez tehát teljesíti a lefedett hullámhossztartomány 1/10-ében megszabott reprodukciós kritériumot (l. 2. táblázat).

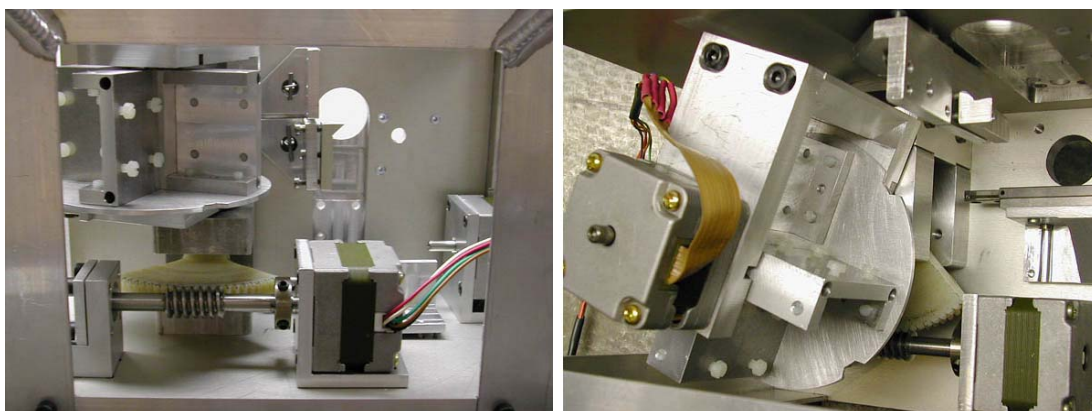
A megfigyelni kívánt hullámhossztartomány beállításához az adott rácsot forgatni kell, mégpedig egy, a felület középvonalán áthaladó tengely körül. Ezt egy csigahajtással oldottam meg, mely tengelye a rácsváltó tengelyt befogó villa egyik szárához kapcsolódik. Mivel a rácsok dőlésszögének változtatása a $0^\circ - 50^\circ$ tartományban lefedi a detektor érzékenysége által meghatározott hullámhossztartományt, így a csigakeréknek csak egy része van kihasználva. Ezért a csigakerékből egy 90° -os ívet tartottam meg, ezáltal a rácsforgató szerkezett kisebb méretben lehetett készíteni és a csigakerék tengelyének csapágyazása könnyebben volt megoldható (l. 30. ábra).



30. ábra.

A rácsforgató csigahajtást mutató CAD rajzok

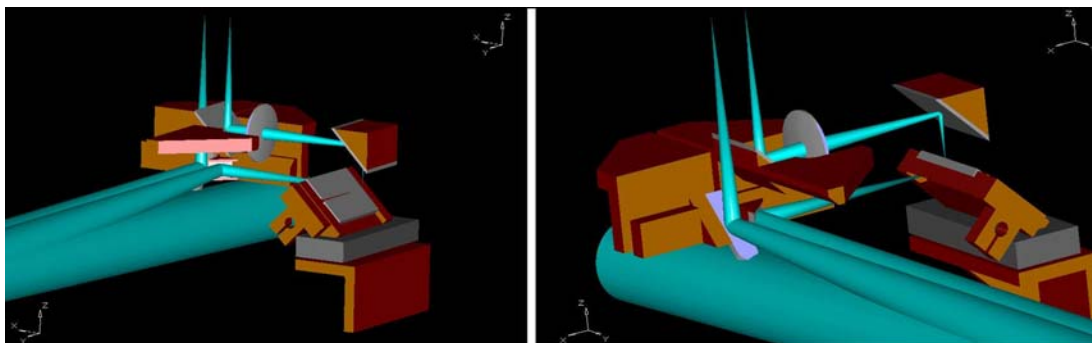
A csiga egyik vége patronos kiképzésű és közvetlen egy léptetőmotor tengelyéhez kapcsolódik, másik vége egy csapágyházban nyugszik. Mind a motortartó, mind a csapágyház jusz-tírozható, így beállítható a csigahajtás ketyogásmentesége. A csiga 1-es modullal készült, a fogsám a teljes csigakerékre $z = 90$. A csiga egy fordulata tehát 4° elfordulást jelent, s mivel a léptetőmotor lépésszáma 400, így egy lépés $0,6^\circ$. A (6) rácsegyenletet felhasználva ez $0,3 \text{ nm}$ -t jelent, vagyis a legnagyobb felbontás esetén (ekkor 25 nm -t fed le a CCD chip, l. 2. táblázat) is bőven teljesíti a célként kitűzött értéket (ami a lefedett tartomány 1/10-e, vagyis a legnagyobb feloldás esetén $2,5 \text{ nm}$).



31. ábra.
A rácsforgató a vázszerkezetbe szerelve

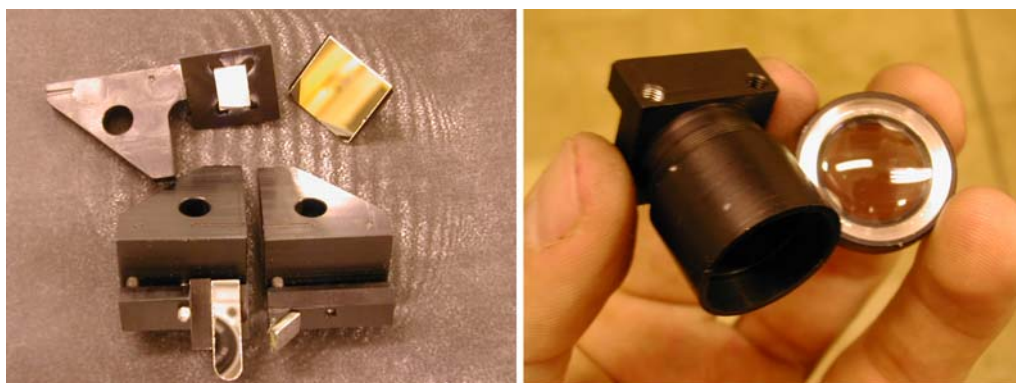
3.2.4. Tükörtartók

Az elsődleges és másodlagos fényút tükörtartóinak elhelyezkedését a 32. ábra mutatja CAD rajzokon, a fénykúpokkal együtt. Ezek mind a felső alaplaphoz csatlakoznak (l. 34). A finom állíthatóság érdekében 3 – 3 állítócsavar tart ellen egy erős rugónak. Az állítócsavarok menetemelkedése 0,5 mm és nem közvetlen az alumínium alaplapba, hanem abba csavarozott műanyag betétekbe csatlakoznak. E betétekbe csak kettes fokozatig lettek belevágvva a menetek, így a jusztírozócsavarokat szorosan, kotyogásmentesen tartják.



32. ábra.
A tükörtartók elhelyezkedése a fényúthoz képest

Az optikák kis mérete miatt a tartók és az üveg eltérő hőtágulásából adódó erők is kicsik, ráadásul a belső tér hőmérsékletileg stabilizált, így a kis tükröket ragasztással is lehet rögzíteni.



33. ábra.

Az alkalmazott tükrök valamint a késleltető lencse a tartóikra szerelve



34. ábra.

A felső alaplagra szerelt optikai elemek

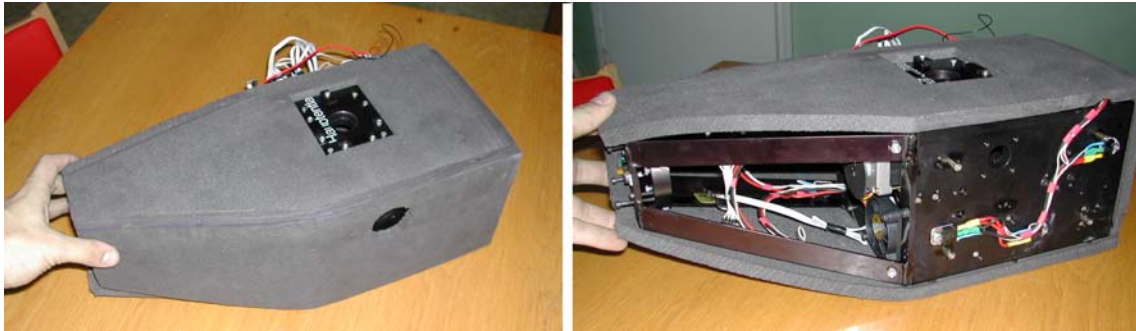
3.2.5. CCD és távcső csatlakozása

A kamerát oly módon kellett rögzíteni, hogy annak leszerelése után ugyanabba a pozícióba lehessen visszahelyezni a spektrográfra. Továbbá a felfogatásnak jusztirozhatónak kellett lennie, hogy spektrum irányát a CCD chip egy sorával párhuzamosan lehessen beállítani. A kamerafej elején található, négyzetes keresztmetszetű csonkot minden oldalról állítható tartók pozicionálják, melyek közül kettő kis karmokkal rendelkezik, s ezekkel szorítják le a felső alaplaphoz erősített tartólemeze. Az egyik karmos oldaltartó levehető, s ezáltal a többi oldaltartó közül kihúzható, majd leemelhető a kamerafej. A tartólemez és a felső alaplappal távolsága változtatható, ezáltal fókuszálható a kamera.

A távcső csatlakoztatását szintén úgy kellett megoldani, hogy csak egyféleképp lehessen felszerelni a spektrográft, és ekkor a rés rektaszccenzió irányban álljon. Ez utóbbi beállításának lehetőségét majd a beállítás rögzítését hernyócsavarok biztosítják, a pozíció reprodukálhatóságát pedig egy kis tűréssel elkészített csap teszi lehetővé, mely a távcső végén lévő csonk furatába illeszkedik egy adott helyzetben.

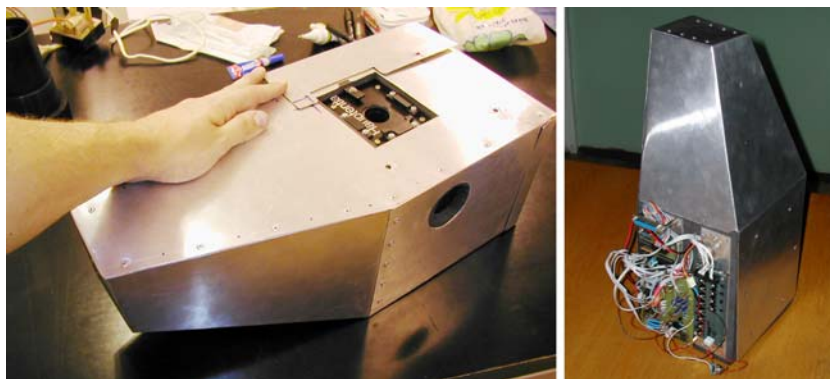
3.2.6. Hőszigetelés, külső burkolat

A hőszigetelést sportboltokban kapható derékaljból készítettem. Egy 12 mm vastagságú, jól szigetelő, jól vágható és nem forgácsoló darabot választottam. A váz minden oldalára vágtam egy-egy megfelelő alakú darabot, majd a fűtőtranzisztorok és vezetékek helyét az alsó oldalakon kivágtam, biztosítva ezzel a jobb, egyenletesebb felfekvést. A szigetelőket nem rögzítettem a vázhoz, ezt a külső, alumíniumlemezzel készített burkolat teszi. A szigetelés eredményességét a 44. ábra szemlélteti, ahol két hűlési teszt eredményei láthatóak.



35. ábra.

A hőszigetelés a vázszerkezeten



36. ábra.

A külső burkolat

Az alumínium burkolat a vázszerkezet több pontjára szerelt 12 mm-es távtartókra erősíthető csavarok segítségével. A távtartók helye át van fúrva a szigetelőkön, s ezek is rögzítik a szivacsokat. A külső burkolat két részből áll, az egyik könnyen levehető s ezáltal hozzáférést biztosít az elektronikához illetve lehetővé teszi a rácok cseréjét. A burkolat másik része a távcsőcsatlakozás csomójának leszerelése után távolítható csak el.

4. Elektronika

4.1. Hőmérsékleti stabilizálás

Egy éjszaka során akár $10 - 15$ °C-ot is változhat a hőmérséklet. A kollimátor fókusza 300 mm, s ha egy alumínium szerkezet tartja, akkor ebben a $\Delta T = 15$ °C hőmérsékletváltozás

$$\Delta L = \alpha_{Al} \cdot \Delta T \cdot L \quad (15)$$

hosszváltozást eredményez, ahol α_{Al} az alumínium hőtágulási együtthatója, értéke $2,38 \cdot 10^{-5}$ Kelvin⁻¹. $L = 300$ esetében a hosszváltozásra $0,11$ mm-t kapunk. Mivel a spektrográf optikai elemei a használat során nem állíthatóak, a fókuszváltozás nem kompenzálható, s a szerkezet esetleges egyenetlen hűléséből adódó csavarodás miatti jusztírozás romlás sem korrigálható. (A távcső fókusza is változik, ez viszont használat közben is korrigálható.) Ezért meg kell előzni e hibákat, s ennek módja, ha a szerkezet egy zárt, hőmérsékletileg stabilizált térrészben helyezkedik el. A stabilizáció szintjét nem szabad túl magasra, a környezetétől nagyban eltérőre állítani, ekkor ugyanis olyan hőáramlások alakulhatnak ki, amik rontják a leképezést.

Célként az alábbiakat tűztem ki:

- a ± 1 °C stabilizálás, ami a hosszváltozásban ± 7 μ m-ek felel meg 300 mm-es bázison (ez a detektor egy pixelének harmada)
- a stabilizálás automatikusan történjen, a spektrográf alkatrészeinek beállítását vezérlő PC-től függetlenül
- legyen lehetőség a belső tér hőmérsékletének ellenőrzésére és a stabilizációs pont állítására PC-n és/vagy kézi vezérlőn keresztül

A szerkezet fűtésére két mód kínálkozott. Az egyikben egy fűtőszál melegítené a belső légteret, amit egy ventilátor egyenletesen elkever, s a levegő adja át a hőt a vázszerkezetnek. A másik megoldásban a vázszerkezet van fűtve rászertelt tranzisztorok segítségével. Ez utóbbit választottam, mivel jobb lehetőséget ad a fűtés kontrollálására. Erre azért van szükség, mert a vázszerkezet elemei igen egyenlőtlen felület/tömeg aránnyal rendelkeznek.

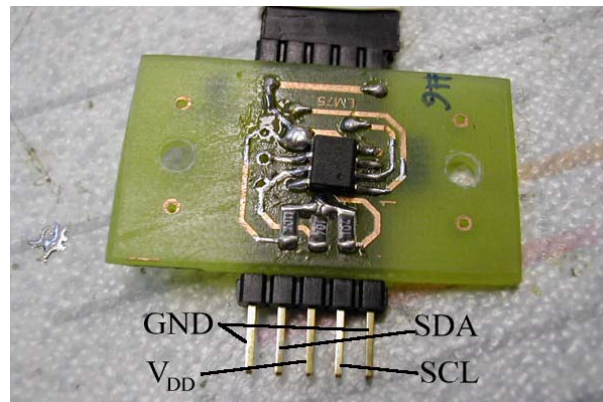
4.1.1. TCN75 digitális hőmérő IC

Hőérzékelőnek a Microchip TCN75 digitális szenzorát választottam, mely jellemzői:

- $0,5$ fokos pontosság
- -55 °C — $+125$ °C működési tartomány
- egy érpáron zajló soros kommunikáció (I²C)

- 3 bites címzés, ami lehetővé teszi 8 szenzor egy vonalon történő kezelését
- alacsony áramfelvétel ($250 \mu A$)

Az I²C kommunikáció egy órajelet (SCL – *S*erial *C*Lock) és egy adatot (SDA – *S*erial *D*Ata) továbbító érpáron zajlik. Előnye, hogy nem szükséges szabványosított sebesség (mint pl. a PC RS232 portján keresztül történő kommunikáció esetén a rögzített bit/másodperc értékek), tetszőleges órajel mellett működik 400 kbit/s sebességig. A kommunikáció megkezdését az jelenti, ha az SDA magas–alacsony átmenetet produkál mialatt SCL magas szinten van; az adatforgalom leállítását SDA alacsony–magas átmenete jelzi SCL magas szintje mellett. E két jel között 8 bites csomagokban történik az adatátvitel, az SDA vonalat a fogadó fél mindig SCL magas szintjekor mintavételezi, a küldő fél pedig SCL alacsony szintjekor állítja be SDA értékét az épp elküldendő bit értékének megfelelően magas/alacsony szintre.



37. ábra.

Egy TCN75 szenzor a kis áramköri lapra szerelve

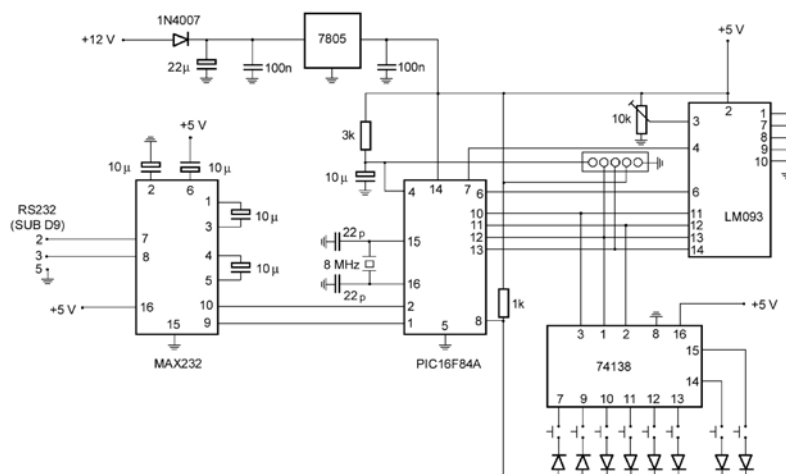
A különböző eszközök rendelkeznek egy rájuk jellemző, 4 bites kóddal, ami a TCN75 esetében 1001. Ez lehetővé teszi, hogy egyetlen vonalon több különböző eszközt is kezeljünk. A startkondíció után az első elküldött byte első 4 bitje ugyanis meghatározza azt, hogy melyik típusú eszköz fog válaszolni az adott vonalon. Lehetőség van egy bizonyos típusból akár 8 egységet is elhelyezni egy vonalon, ugyanis az első elküldött byte 5., 6. és 7. bitje lehetőséget ad egy eszközcsaládon (amit az első 4 bit definiált) belül nyolc egység közül az adott címre beállítottat megszólítani. (Az első byte utolsó bitje azt dönti el, hogy a megszólított eszköztől adatot várunk vagy pedig küldeni akarunk.)

A felületszerelt tokozású szenzorok egy-egy kis áramköri lapra lettek ültetve, mely lehetővé teszi azok soros felfűzését. A csatlakozósor kiosztása (l. 37. ábra) biztosítja, hogy a csatlakozó fordított bekötése ne tegye tönkre a szenzort és ne akadályozza az azon túl lévő, helyesen bekötött szenzorok elérését. Legfeljebb az SDA és SCL vonalak felcserélését okozza az adott szenzor esetében a hibás bekötés, ekkor $-0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ érték érkezik a hibásan bekötött szenzor címéről. Amennyiben helyes a bekötés de a szenzor hibás, úgy szintén ezt az értéket kapja a hívó fél, ami lehetőséget ad a jelenlétérzékelésre, a meghibásodott szenzorok kiszűrésére. A kis áramköri lapon a szenzoron kívül a címet beállító ellenállások találhatóak (l. 37. ábra).

Az 1 kbyte program-memória s a program futása során keletkező átmeneti adatok tárolására szolgáló 68 byte bőven elegendő az elvégzendő feladatokat ellátó program számára, felesleges nagyobb tárterületű kontrollert választani. Az 1500 Ft-os IC-vel így helyettesíthető a számítógépes kapcsolat, s az alábbiak végezhetőek el automatikusan:

- hőérzékelők lekérdezése sorban egymás után
- a beérkezett adatok alapján a fűtőáramkör ki/be kapcsolása
- a beérkezett adatok meghatározott sebességen (9600 baud) RS232 protokollon át történő kiküldése (így PC-n vagy egy kézi, kijelzővel ellátott egységen nyomon követhető a hőmérséklet változása)
- RS232 protokollon adat fogadása a kapcsolási hőmérséklet módosítására

A külső, kézi egység szintén egy PIC16F84 mikrokontrollert tartalmaz, ez veszi RS232-n keresztül az adatokat és jeleníti meg egy LCD kijelzőn. A dolgozat leadásakor még nem készült el az a program, mely lehetővé tenné ezen kézi egységről a stabilizációs pont állítását, pusztán a szenzorok adatainak kijelzését végzi egyelőre a függelékben megtalálható program.



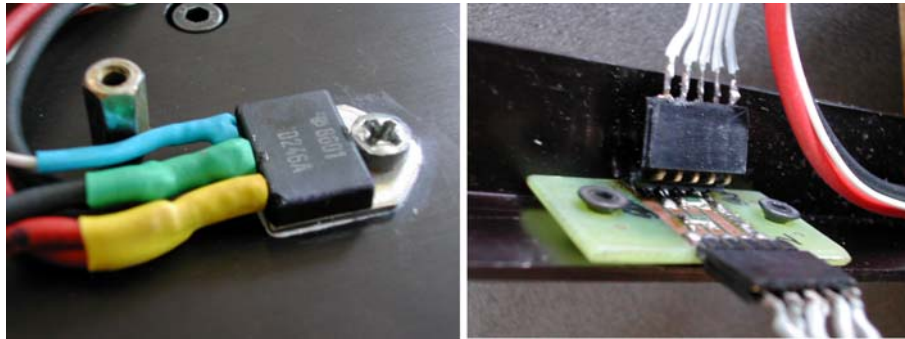
39. ábra.

A hőmérsékletet LCD panelen megjelenítő kézi egység kapcsolási rajza

4.1.3. A vázszerkezet fűtése

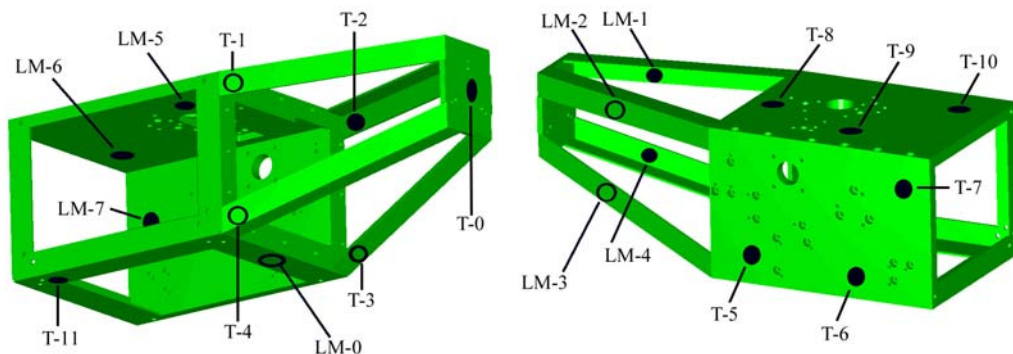
A vázszerkezetre 12 db tranzisztort és 8 hőszenzort helyeztem el (l. 40. és 35. ábrák). A kollimátor alaplapját tartó rudak mindegyike kapott egy tranzisztort és egy hőmérőt, hiszen

ezek azonos és állandó hőmérséklete a leginkább fontos a defókuszálódás és csavarodás elkerülése végett. A tranzisztorok és szenzorok elhelyezkedését a 41. ábra mutatja. Igyekeztem minél egyenletesebben elosztani a fűtést és a szenzorokat, ügyelve arra, hogy ne kerüljön túl közel érzékelő egy fűtőelemhez sem (elkerülve a túl gyors, a szerkezetben mutatkozó hőterjedést megelőző reagálást), illetve hogy a fényút és a jusztirozási lehetőségek szabadon maradjanak.



40. ábra.

A fűtőtranzisztorok és hőmérők felszerelése a vázszerkezetre



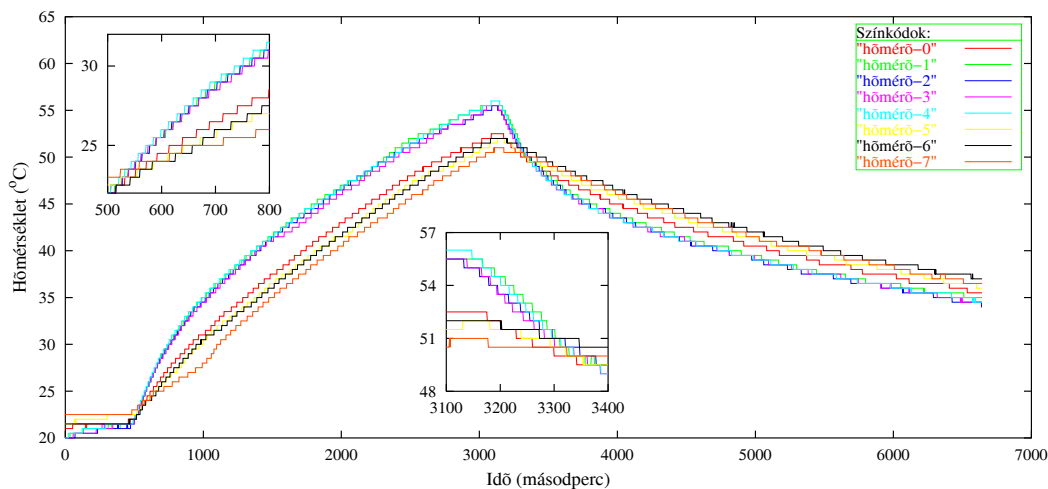
41. ábra.

A fűtőtranzisztorok és hőmérők elhelyezkedése a vázszerkezeten a felt körök a látható oldali, az üres körök a túlsó oldali elhelyezkedést szimbolizálják, LM jelöli a hőszenzorokat, T a fűtőtranzisztorokat

Mivel az egyes tranzisztoroknak különböző tömegű elemeket kell átfűteniük, így eltérő teljesítménnyel kell melegítsenek, ha a váz egyenletes felmelegedését kívánjuk. Ezért minden fűtőtranzisztor teljesítménye egy potméter segítségével külön-külön szabályozható (l. 38. ábra). Az első fűtési teszt feladata az volt, hogy meghatározzam az egyes tranzisztorok teljesítményét. Ehhez a mechanikailag teljesen összeszerelt szerkezetet beburkoltam, majd egy ampermérő segítségével minden fűtőelemre 0,2 A áramfelvételt állítottam be, ami a 12 V-os tápfeszültség mellett 2,4 W teljesítményt jelent, a teljes vázszerkezetre nézve 28,8 W-ot. A hőszenzorok adatait egy PC segítségével a soros porton keresztül rögzítettem, másodpercenként lekérdezve az

értékeket. Mintegy fél óra elteltével kikapcsoltam a fűtést, hogy a hőszigetelt szerkezet hűlését vizsgálhassam. A mérési eredményeket a 42. ábra mutatja.

Fűtési teszt 1. – egyenlő teljesítmény minden tranzisztoron



42. ábra.

Az első fűtésteszt

A fűtési teljesítmény hangolására az alábbi feltevéssel éltem: megnéztem a fűtés bekapcsolása utáni első 5 percben a melegedési görbéket, melyek e szakaszon egy egyenessel jól közelíthetőnek tűntek (l. 42. ábra bal felső inzert). Így az adott hőszensorhoz legközelebb eső tranzisztorok teljesítménye a szenzorhoz tartozó görbe kezdeti szakaszára illesztett egyenes meredeksége alapján tűnt meghatározhatónak. A négy, kollimátor alaplapot tartó rúd azonos melegedést mutatott, ezért az ezeket fűtő tranzisztorok (T-1, T-2, T-3 és T-4 a 41. ábrán) teljesítménye azonos kell legyen, az érték megállapításához LM-1 szenzor adatait használtam. LM-5 és LM-6 görbéi szintén együtt futottak, vagyis LM-6 adatait T-8, T-9, T-10 és T-11 szabályzásához használtam fel. LM-7 görbéje T-6 és T-7, LM-0 görbéje pedig T-5 teljesítményére nézve adott támpontot. T-0 fűtési teljesítményét T-5 és T-1 közé helyeztem.

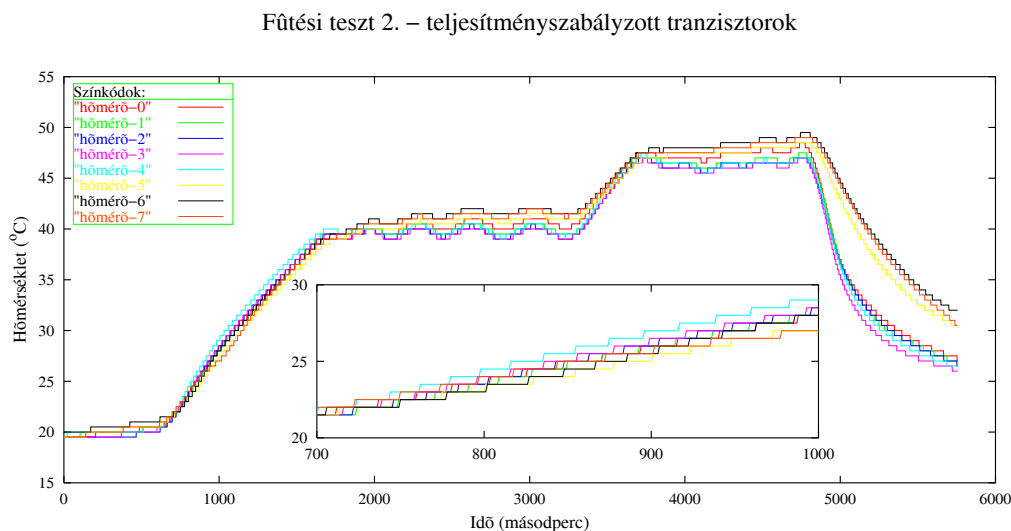
tranzisztor	szenzor	meredekség	szorzófaktor	fűtőáram (A)	teljesítmény (W)
T-1,2,3,4	LM-1	0,0312	3,1	0,13	1,56
T-0	LM-0,1	0,0260	2,6	0,16	1,92
T-5	LM-0	0,0208	2,1	0,19	2,28
T-8,9,10,11	LM-6	0,0183	1,8	0,23	2,76
T-6,7	LM-7	0,0099	1	0,4	4,8

4. táblázat.

Az első fűtésteszt alapján meghatározott paraméterek és fűtési teljesítmények az egyes tranzisztorokra

Minden kiválasztott szenzorhoz a GNUPlot ábrázolóprogram segítségével meghatároztam az adataira illesztett egyenes meredekségét, majd a legkisebb értéket (LM-7) egységnek véve szorzófaktorokat határoztam meg a teljesítményre nézve, illetve a legnagyobb fűtőáramot 0,4 A-nek véve az egyes tranzisztorok áramfelvételét és ezáltal teljesítményét számítottam ki. Ezen adatokat a 4. táblázat tartalmazza.

A hőszigetelés eltávolítása után a vázszerkezet lehűtöttem, majd ismét beburkoltam s árammérő segítségével beállítottam az egyes tranzisztorok meghatározott áramfelvételét. A 43. ábra mutatja az így végrehajtott fűtésteszt során az egyes szenzorok által mért hőmérsékletértékek időbeli változását. Az ábra inzertjében kinagyított melegedési szakaszon jól láthatóan minden görbe együtt fut, vagyis sikerült jól meghatározni és beszabályozni az egyes tranzisztorok teljesítményét.



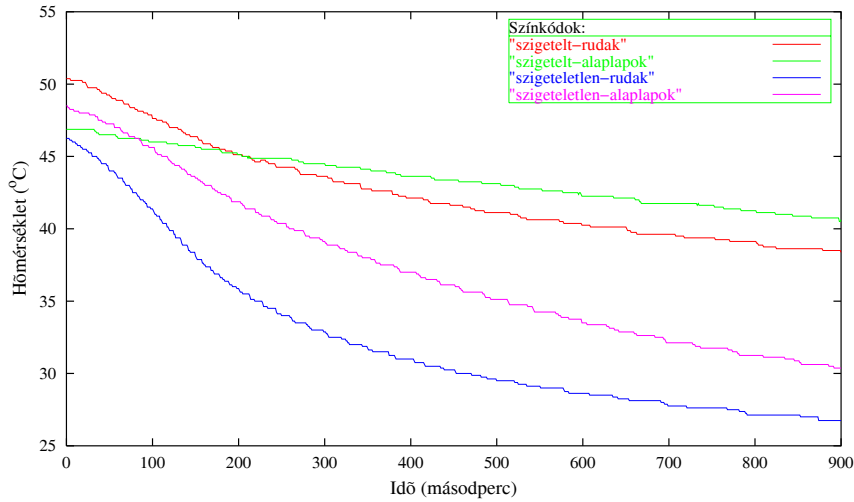
43. ábra.

A második fűtésteszt

Ezen teszt alkalmával a 40 °C elérése után a PC monitorán megjelenő értékek alapján manuálisan ki/be kapcsolgatva a fűtést megpróbáltam több-kevesebb sikerrel szabályozni a hőmérsékletet, majd ugyanezt tenni pár fokkal magasabb hőmérsékletre fűtve a szerkezetet. Ezután kikapcsoltam a fűtést és levettem a hőszigetelést, megfigyelendő a hűlés sebességét a szigetelés nélkül. Ezt az első fűtésteszt hűlési görbéjével egybevetve mutatja a 44. ábra (az adatok kis mértékű elcsúsztatásával, hogy jobban összevethető legyen a két görbepár).

A 44. ábrán csak két görbével tüntettem fel egy teszt adatait. Az előző grafikonokon ugyanis jól látható, hogy a kollimátor alaplapját tartó rudakhoz tartozó szenzorok egyenletes melegedést mutatnak, így jogos az LM-1,2,3 és 4 szenzorok adatainak átlagával jellemezni a váz ezen, kis tömegű elemekből álló részének melegedését. Már az első fűtésteszt során is nagyjából azonosan futott a többi, LM-0,5,6 és 7 szenzorokhoz tartozó görbe, a 2. fűtésteszt alkalmával méginkább, így a váz nagyobb tömegű részeinek melegedését is jól jellemzi ezen szenzorok értékeinek átlaga. Ezáltal kissé átláthatóbb grafikonokat kapunk.

Hűlési teszt



44. ábra.

A hőszigetelés hatásfokát mutatja a hűlési teszt

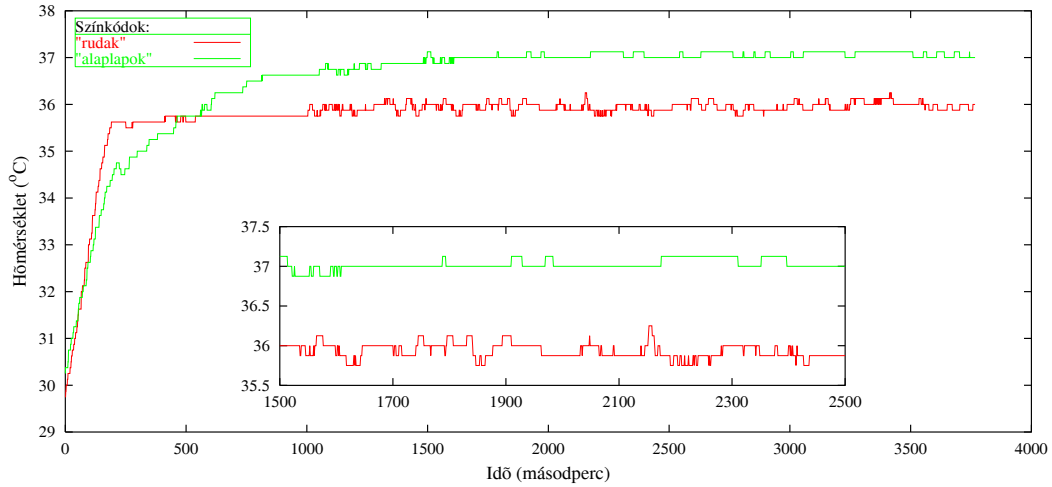
tranzisztor	fűtőáram (A)	teljesítmény (W)
T-1,2,3,4	0,19	2,28
T-0	0,19	2,28
T-5	0,23	2,76
T-8,9,10,11	0,25	3,00
T-6,7	0,38	4,56

5. táblázat. A végleges fűtőáramok és -teljesítmények

Az átlagolást alkalmaztam az utolsó fűtésteszt adatainak ábrázolásában is. E teszt során automatikus szabályzásra programoztam fel a mikrokontrollert, mely alapjául e teszt során az LM-1 szenzor adatait használtam fel. A PIC programjában 36 °C-ot adtam meg, melyet ha túllép a hőmérséklet kapcsolja le a fűtést, s amennyiben 35,5 °C alá csökken, kapcsolja be a fűtést. Az eredményt a 45. ábra mutatja, melyen látható, hogy sikerült elérni a célként kitűzött ± 1 °C stabilizációt. E végső teszt előtt még egyszer módosítottam a tranzisztorok teljesítményét. Ennek oka az volt, hogy a szerkezet ugyan tartotta az elért hőmérsékletet, azonban az alaplapok 1,5 °C-al magasabb hőmérsékleten voltak. Ezt az eltérést csökkentendő a rudak fűtését mintegy 15%-al megemeltem, valamint az összteljesítményt is kissé növeltem a gyorsabb felmelegedés végett. A végleges paramétereket a 5. táblázat tartalmazza.

A későbbiek során tervezem a kézi kontrolláló egység befejezését; a hőszabályozás alapjául nem egy, hanem a négy rúdhhoz tartozó szenzor jeleinek együttes figyelembevételét megvalósítani; valamint egy külső szenzort elhelyezni, mely az éjszaka elején a bekapcsoláskor mért külső hőmérséklet alapján állítja be a stabilizációs pontot.

Fűtési teszt 3. – automatikus stabilizálás



45. ábra.
Végző fűtésteszt

4.2. Léptetőmotor vezérlés, pozícióellenőrzés, beállítás

A szegedi 40 cm-es távcső az átalakítása óta távolról, a távcső alatti épület egyik szobájából vezérelhető, illetve a CCD kamera is onnan kontrollálható. Célszerűnek tűnt a spektrográftól oly módon megépíteni, hogy ugyanezen helyről, mondjuk a kamerát is vezérlő PC segítségével lehessen vezérelni. Az állítandó paraméterek:

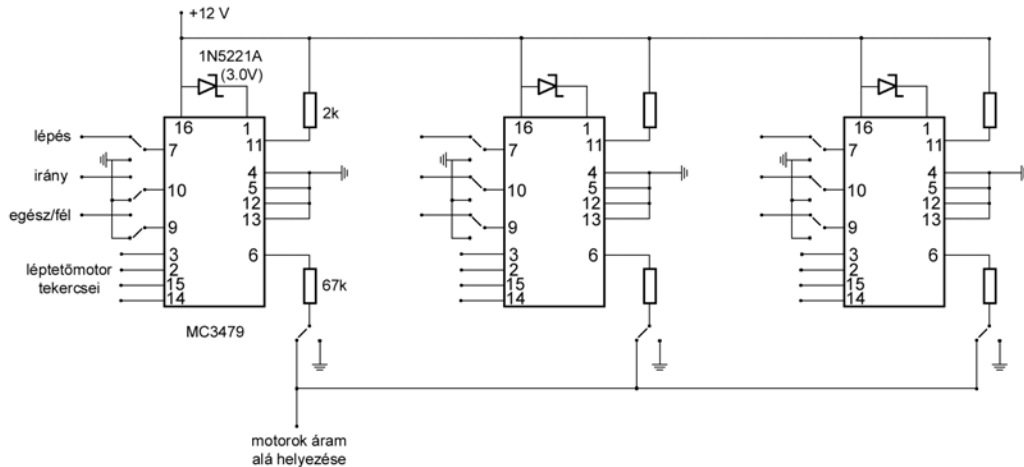
- a megfigyelni kívánt hullámhossztartománynak megfelelő rács kiválasztása (a rácsváltó forgatása, egy irányban)
- a megfigyelni kívánt hullámhossztartomány beállítása (a rácstartó forgatása, két irányban)
- a résszélesség változtatása (a részhez tartozó motor forgatása, két irányban)
- spektrállámpa ki/be kapcsolása és fényének bevetítése

Ezt célszerű léptetőmotorokkal megvalósítani, valamint a mozgás során a pozíciókat optokapukkal ellenőrizni. Ehhez a PC egyik párhuzamos portját terveztem felhasználni, melyen összesen 8 kimeneti, 5 bemeneti, és 4 ki/bemeneti láb található (utóbbi csak bizonyos, a BIOS-ban beállított üzemmód esetén érhető el, így igyekeztem a 8 ki- és 4 bemenetre szorítkozni).

4.2.1. Léptetőmotorok és az MC3479 meghajtó

Kétfázisú léptetőmotorok egyszerű kezelését teszi lehetővé a Motorola MC3479 integrált áramköre, melynek főbb paraméterei:

- TTL/CMOS kompatibilis bemeneti vezérlőjelek
- egész/fél lépés valamint irány választható a bemeneti jelekkel, illetve egy vezérlőjellel levehető az áram a tekercsekről
- 350 mA/tekercs meghajtási kapacitás, vagyis nincs szükség külön erősítésre, az IC kisebb motorok esetén közvetlen annak tekercseihez csatlakoztatható



46. ábra.

A léptetőmotor vezérlés kapcsolási rajza

Az IC-k a léptetéshez pusztán órajelre igényelnek, a tekercsek áram alá helyezését nem szükséges vezérlőjellel szabályozni, beállítható az állandó áramellátottság is. Ez jelen esetben nem kedvező, hiszen a motorok ekkor melegsznek, s e kontrollálatlan hőforrás nem kívánatos a hőmérsékletileg stabilizált térben. Így a léptetőmotorokat vezérlő áramkör oly módon készült, hogy lehetőség legyen az áram levételére a tekercsekről. Mivel három motort is kell vezérelni, vagyis 3 órajelre, valamint két motornál irányváltásra is szükség van, ezért ha mindhárom motor tekercseinek áramellátását külön szabályoznánk, akkor ez kitöltené egy PC párhuzamos portjának mind a 8 kimeneti bitjét. Mivel azonban pl. spektrállámpa kapcsolására is szükség van, és a motorok használata viszonylag rövid időt vesz igénybe, így egyetlen jel egyszerre kapcsolja az áramot minden motorra. Ezáltal a printerport kimenetei közül kettő szabadon marad további felhasználásra. Mint a következő alfejezetben látható, a port 4 bemeneti bitje kevés az egyes alkatrészek pozíciójának ellenőrzésére, így szükség volt egy multiplexer alkalmazására, mely bemeneti jelének választására használtam fel a port egyik kimeneti adatbitjét. A fennmaradó kimeneti bit pedig a spektrállámpa kapcsolására használható. A PC egyik párhuzamos portján a kimeneti bitek felhasználását a 6. táblázat foglalja össze.

A léptetőmotorokat régi számítógépes hajlékonylemez-egységekből szereltem ki, ezáltal is csökkentve az anyagi kiadásokat. Ezek kis mérete valamint teljesítménye pont megfelelő volt a

egység elnevezése	vezérlőjel funkciója	láb sorszáma a csatlakozón	adatbit sorszáma	adatbit értéke és jelentése
Rácsváltás	fél/egész lépés [†]	—	—	—
	irányváltás	—	—	—
	órajel	3	1	2
	áramkapcsolás	2	0	1 – áram bekapcsolva 0 – áram kikapcsolva
Rácsforgatás	fél/egész lépés [†]	—	—	—
	irányváltás	4	2	4 – csökkenő szög ^{††} 0 – növekvő szög
	órajel	5	3	8
	áramkapcsolás	2	0	1 – áram bekapcsolva 0 – áram kikapcsolva
Résmozgatás	fél/egész lépés [†]	—	—	—
	irányváltás	6	4	16 – résszélesség nő 0 – résszélesség csökken ^{††}
	órajel	7	5	32
	áramkapcsolás	2	0	1 – áram bekapcsolva 0 – áram kikapcsolva
	Optokapu csoport kiválasztás	8	6	64 – rácsváltó érzékelői 0 – rácsforg. és rés érzékelői
	Spektrállámpa kapcsolás	9	7	128 – bekapcsolás 0 – kikapcsolás

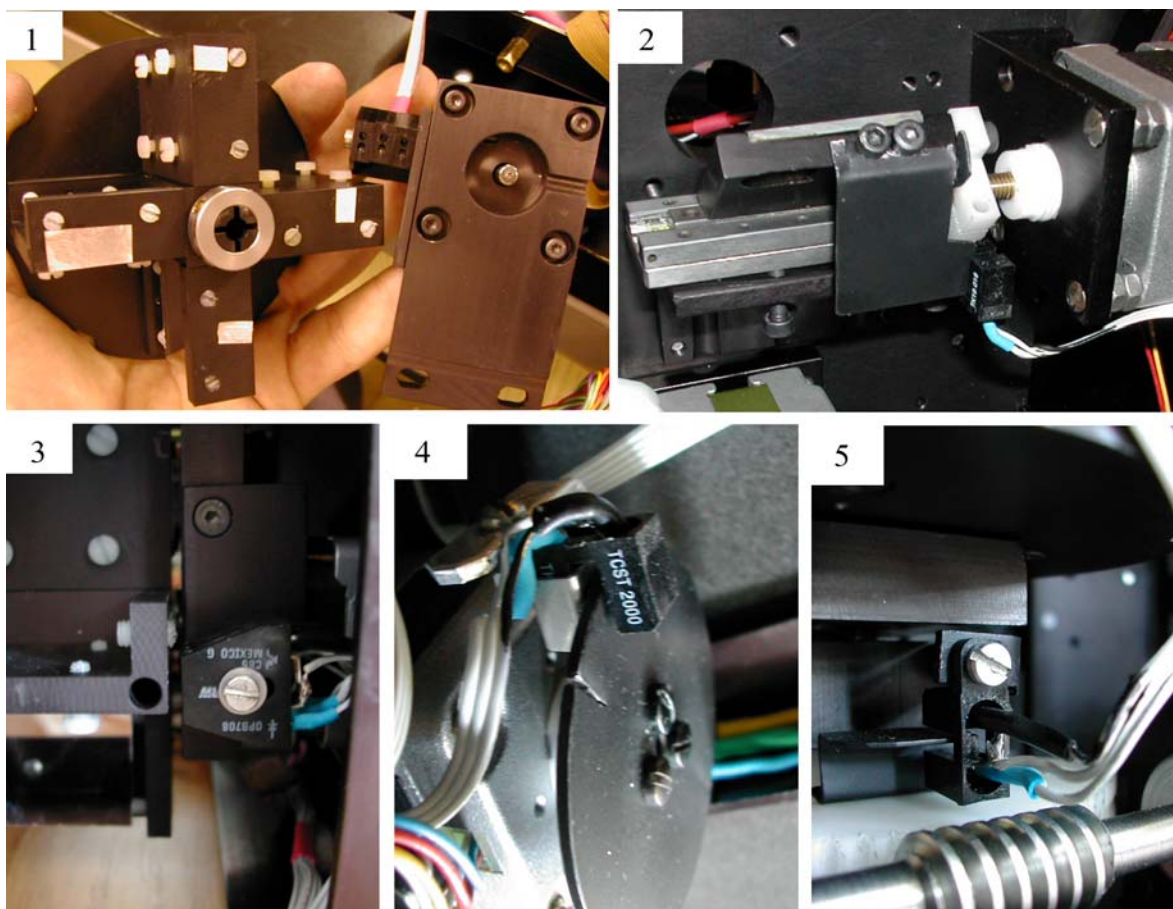
6. táblázat. A printerport kimeneti bitjeinek felhasználása

[†] – rögzített, felezett üzemmód, 400 lépés/fordulat

^{††} – az alappozíció felvételekor a mozgás iránya

feladatra, s lépésszámuk is megfelelő feloldást biztosított (alapértelmezésben 200 lépés, felező üzemmódban 400 lépés fordulatonként), kétfázisúak lévén ill. tekercseik megfelelő impedanciája miatt az MC3479 számára közvetlen meghajthatónak bizonyultak. A motorok ugyan csak 400 lépéses üzemmódban működnek, azonban a 0,9 fokos lépésszögnél sokkal pontosabban reprodukálják egy lépés helyzetét. Ezt úgy ellenőriztem, hogy a motorok tengelyére egy tükröt ragasztottam, amit lézerrel megvilágítva nagy bázisvonalon elhelyezett ernyőn mértem a visszavert nyaláb pozícióváltozását a motor teljes körbefordulása során (a rácsváltó mechanika teszteléséhez hasonlóan). A mérések azt mutatták, hogy a reprodukció 9'-nél pontosabb.

A motorok vezérlésénél problémát jelentett, hogy a PC párhuzamos portja nem terhelhető túlságosan, s kiadva egy vezérlő jelet a motorok felé a feszültség annyit esik, hogy nem éri el a TTL magas jelszintjét. Ezért egy kétirányú meghajtóegységet (74245) kellett a port és a meghajtó IC-k közé elhelyezni (a beépítés során az irány rögzített), l. a 48. ábrát.



47. ábra.

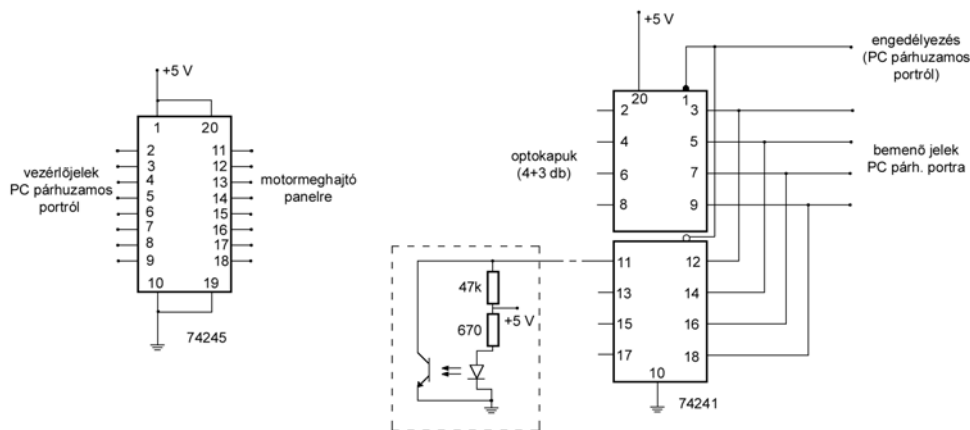
Az optokapuk elhelyezése

1,3 – a rácsváltó reflexiós kapui és jeladói; 2 – a rés alappozícióját jelző kapu; 4 – a motortengelyeken lévő tárcsa és transzmissziós kapu; 5 – a rácsforgatás alappozícióját jelző kapu;

4.2.2. Alappozíció definiálása optokapukkal

A mozgó egységeket beállításához egy alappontot kell definiálni, melyben ismerjük a később beállítandó paraméterek értékeit. A rácsváltás során négy pozíció közt kell különbséget tennünk, illetve fel kell ismerni, ha egyik rács sincs beforgatva. E feladathoz tehát 3 bitre van szükségünk. A rácsok dőlésszögének illetve a rés szélességének állításakor az alappozícióból kiindulva a lépések számlálásával kontrollálható a pozíció, ehhez viszont az alappozíciót egy lépés pontossággal kell meghatározni.

A megkívánt pontosságot úgy értem el, hogy egyrészt a motorok tengelyére, másrészt a mozgatott alkatrészeire (a csigakerékre ill. a csapágyon mozgó réstartóra) helyeztem el egy-egy optokaput. Erre azért volt szükség, mivel a motorok többszöri körbefordulása is szükséges a beállítás során. Az alaphelyzetet az definiálja, ha a mozgó alkatrészen lévő jeladó és a motortengelyen lévő adó egyidőben jelez. Utóbbi esetében – mivel maga a motor egy lépés 1/6-ának



48. ábra.

Az optokapuk kezelését szolgáló elektronika vázlata ill. balra a léptetőmotor vezérlőjeleit illesztő IC

egység elnevezése	jel értelmezése	láb sorszáma a csatlakozón	bit sorszáma	beolvasott érték/ érték változása
Rácsváltás	1-es pozíció elérése	11	7	144
	2-es pozíció elérése	12	5	48
	3-as pozíció elérése	15	3	24
	4-es pozíció elérése	11,12,15	3,5,7	184
Rácsforgatás	mozgó rész alaphelyzetben	13	4	+16
	motortengely alaphelyzetben	11	7	+128
Részmozgatás	mozgó rész alaphelyzetben	12	5	+32
	motortengely alaphelyzetben	15	3	-8

7. táblázat. A párhuzamos port bemeneti bitjeinek felhasználása

pontosságával reprodukálja az adott lépés pozícióját – elegendő egy lépés méretének megfelelő jelszélességű kaput alkalmazni. A motorok tengelyére 50 mm átmérőjű korongokat szereltem, mely kerületén egy lépés 0,4 mm-nek felel meg. A tárcsákra kb. 0,5 mm széles metszéseket készítettem vékony szalagfűrész szál segítségével. Mivel az optokapuk 3 mm szélesek voltak, így ezekre vékony alumíniumlemezből maszkokat készítettem, melyekre 0,5 mm-es fúróval lyukat fúrtam. Ezáltal sikerült elérnem, hogy mindig ugyanannál a lépésnél álljon meg a motor, mint ahogy azt a lépésszámlálással és lézeres mérésekkel sikerült igazolni.

Mivel így összesen 7 bemeneti vonalra volt szükségem és a párhuzamos port csak négyet kínált, ezért egy IC (74241) segítségével a printerport egyik kimeneti bitjét használva két csoportra osztottam az optokapukat, az egyik osztályba a rácsváltás 3 reflexió, a másikba a fennmaradó négy transzmissziós kapu került (l. 48. ábra). A bemeneti bitek kiosztását a 7. táblázat foglalja össze.

5. Vezérlő programok

5.1. Mikrokontroller programozás

A Microchip saját, 35 szóból álló assembly nyelve helyett a Parallax assemblyt használtam, ami ugyan több parancsszóból áll, ezek viszont számomra jobban átlátható és kezelhető egységet alkottak. Már majdnem teljesen készen voltak a mikrokontrollerek programjai, amikor sikerült egy hivatalos PIC égetőt és környezetet megismernem. A PCM fordító nagy előnye, hogy a C programozási nyelv szintaxisával egyező parancsokat használ a mikrokontroller egységeinek kezelésére, s a beégetendő program logikai részletei C-ben programozhatóak. Ez ugyan nem a legtömörebb kódot adja, azonban sokkal gyorsabb és egyszerűbb programozást biztosít, mint az assembly. Az RS232 kommunikációt megvalósító programrészlet esetében lehetett látni a PCM nagy előnyét. A sebesség (9600 baud) beállításánál ugyanis oszcilloszkóp segítségével kellett a soros rutin késleltetési idejét behangolni, ami igen nehézkesen s sok idő ráfordításával sikerült. A PCM-ben ezzel szemben egyetlen parancssorban bármilyen sebességű soros kommunikáció deklarálható. Ezért tehát a későbbiekben tervezem e fordító jobb megismerését és a programok átültetését (hiszen a felhasználó által futtatott programok is C nyelven íródtak, s így a teljes vezérlés egységesebb, külső szemlélő által jobban átlátható, mint egy assembly program).

A hőérzékelők adatait és a fűtéskapcsolást végző mikrokontroller programjának tömbvázlata a 49. ábrán látható, a teljes program a függelékben található. A program működési elve vázlatosan a következő:

A bekapcsolás után a mikrokontroller kiküld egy csupa 0 bitet tartalmazó byte-ot az RS232 vonalon, ez jelenti a hőérzékelők lekérdezésének kezdetét. Ezután a címregiszterbe beírja az első szenzornak megfelelő címet (a bitek értéke 1001000, ahol az első 4 bit a TCN75 szenzorra utal, a maradék három bit pedig a 0-ás sorszámú szenzort jelenti az adott vonalon), majd elindítja az I²C kommunikációt. A kiküldött cím után 2 byte adatot olvas be a PIC, ami vagy 0 értékű (ha a megszólított szenzor nem válaszol) vagy pedig egy bináris hőmérsékletértéket tartalmaz. Ezután megszakítja az I²C kapcsolatot, s az érték vizsgálatával eldönti a kontroller, hogy értékelhető adat jött-e be. Amennyiben nem, egy, a jelenlétérzékelést szolgáló byte az adott szenzor sorszámával egyező sorszámú bitjét 0-ra állítja, értékelhető adat esetén a bit értéke egy. Mivel nincs szükség a szenzor teljes működési tartományának ($-55\text{ °C} — +125\text{ °C}$) kihasználására, ezért a 2 byte-on küldött értéket egy byte méretűre konvertálja a program. Így a működési tartomány ugyan csökken, azonban a fennmaradó $-55\text{ °C} — +72\text{ °C}$ is elegendő ebben az alkalmazásban, s így gyorsabban történhet a mintavételezés. Az átalakított byte-ban a 110 decimális jelenti a 0 °C -ot, 255 decimális a $+72,5\text{ °C}$, míg 0 decimális a -55 °C -ot. A konverzió előtt szükséges megvizsgálni, hogy egész vagy fél fokot is tartalmazó, illetve negatív vagy pozitív érték lett beolvasva. Ezután a mikrokontroller kiírja az RS232 vonalon az egy byte-os hőmérsékletértéket, majd a címregiszterben a következő szenzor címét beállítva visszaugrik az I²C-n történő adatlekérdezéshez. Ezt összesen nyolcszor végzi el, majd kiküldi RS232-n a szenzorok jelenlétét mutató byte-ot és meghatározza, hogy ki avagy be kell-e kapcsolnia a fűtőáramkört. Ezután a program futása kezdődik előlről, a soros vonalon a "0" kiküldésével



49. ábra.

A hőstabilizálást végző mikrokontroller programjának tömbvázlata

mely a vevőt az újabb adatsorozat küldésének megkezdéséről tájékoztatja.

A kézzelvezérlőben lévő mikrokontroller által jelenleg ellátott feladat igen egyszerű, mindössze RS232-n keresztül fogadja az 1 byte méretűre alakított hőmérsékletértékeket, s ezeket sorban megjeleníti egy LCD panelen. Mint említettem, a későbbiekben szeretném oly módon továbbfejleszteni e programot, hogy lehetőséget adjon a hőstabilizálást végző mikrokontroller programjának átadni egy értéket, mely a stabilizációs pont manuális, adott körülményeknek leginkább megfelelő beállítását teszi lehetővé.

5.2. Felhasználói felület

A spektrográf vezérlését egyszerű parancsszavas környezetben terveztem megvalósítani, Linux operációs rendszer alatt, a különböző, néhány paraméter megadásával futtatható shell programok filozófiájában. A C nyelven írt programok azonban minimális módosítással (a portkezelő parancsok alakjának megváltoztatásával) akár Windows alatt egy DOS ablakban is futtathatóak. A grafikus környezetet egyrészt az egyszerűbb programozás miatt, másrészt a

már említett, csillagászok által általánosan használt shellprogramok kezelési hasonlatosságának megőrzése miatt kerültem.

Összesen négy program végzi a vezérlést, melyből háromnak forráskódját a függelék tartalmazza. A spektrállámpát vezérlő kód a vezérlendő mechanikai egység hiányában a dolgozat leadásakor még nem volt készen. A megírt három program az alkatrészek alappozícióba állítását; tetszőleges, a felhasználó által definiált értékre történő beállítását; illetve a műszer aktuális státuszának lekérdezését teszi lehetővé.

A programokat az LPT1 porton történő kommunikációra írtam meg, amennyiben az LPT2 port használata szükséges, úgy a forráskódok elején definiált `PORT` és `IMPORT` globális változók értékét `0x278` ill. `0x279`-re kell átírni, majd újrafordítani a programokat. A portok kezelése linux alatt `root`-ként engedélyezett, így `superuser`-ként kell futtatni a kódokat.

5.2.1. `stat` — Státusz lekérdezése, hibaüzenetek

Bekapcsolva a spektrográfot először is célszerű lekérdezni az optikai elemek pillanatnyi helyzetét. Ezt a `stat` parancs futtatásával tehetjük meg. A képernyőn az alábbihoz hasonló üzenet jelenik meg:

```
*****
                                gSPEC SPECIFICATIONS

column description:
  1) grating position           2) resolution [groves/mm]
  3) blaze wavelength [nm]     4) blaze angle [degree]
  5) lower limit of usage [nm] 6) upper limit of usage [nm]
  7) resolution at blaze wavelength with 40 micron slit
  8) plate scale (angstrom/mm) 9) approx. spectrum length (nm)

   1.  2.  3.  4.  5.  6.  7.  8.  9.
   1 1200 500 17.45 350 650 4700 0.53 25
   2  0  0  0.00  0  0  0  0.00  0
   3 1200 750 26.73 600 900 7600 0.50 25
   4  0  0  0.00  0  0  0  0.00  0

The slit width can be adjusted between 20 an 100 microns
The current status of the spectrograph:

                                WARNING!

The status file is too old, please execute initialization!

*****
```

A kis táblázat tájékoztat arról, mely rácsok vannak beépítve és ezek milyen paraméterekkel rendelkeznek. Amennyiben a későbbiek során egy rács cserélődik, vagy újabb kerül elhelyezésre, úgy egy, a futtatható programokkal azonos könyvtárban lévő `spec.dat` nevű ASCII file-ba kell elvégezni a megfelelő módosításokat. Ezt a file-t mind a státuszlekérdezést, mind a beállítást végző program használja. Amennyiben a file nem található, az említett programok a

WARNING!

There is no specification file, please contact the designer!

hibaüzenettel térnek vissza. Ez esetben létre kell hozni a `spec.dat` file-t, melyre nézve a következők a követelmények. A file egyszerű szöveges állomány, mely első négy sora a rácsookra vonatkozó adatokat kell tartalmazza. Ezt tetszőleges számú sorban megjegyzés követheti, azonban az első négy sor 9 oszlopból kell álljon, melyeket tabulátorok választanak el egymástól. Az egyes mezők sorrendje, jelentése és értékmegadási formája teljesen megegyezik azzal, amit az imént a `stat` parancs futtatása során a képernyőn megjelenő üzenetre példaként bemutattam.

Az `stat` futtatása során kapott

WARNING!

The status file is too old, please execute initialization

vagy

WARNING!

There is no status file, please execute initialization

hibaüzenet akkor jelenik meg, ha a `status.dat` file a futtatás idejéhez képes két óránál régebben lett létrehozva, avagy nem található abban a könyvtárban, ahonnan futtatjuk a parancsot. Ez a file tartalmazza a mozgó alkatrészek aktuális pozícióját, s a legutolsó inicializálás időpontját. Amennyiben a file nem létezik, az `ini` parancs futtatásával létrehozható, amennyiben túl réginek nyilvánítja a `stat` (vagy akár a `set`) parancs, úgy szintén az `ini` futtatása szükséges. Ezt bővebben a következő alfejezet tárgyalja.

Amennyiben nincs hibaüzenet, s a státuszlekérdezés lefut (ez tulajdonképp a `status.dat` és `spec.dat` file-ok beolvasása, vizsgálata és megjelenítése), úgy a következő jelenik meg a képernyőn:

gSPEC SPECIFICATIONS

column description:

- 1) grating position
- 2) resolution [groves/mm]
- 3) blaze wavelength [nm]
- 4) blaze angle [degree]
- 5) lower limit of usage [nm]
- 6) upper limit of usage [nm]
- 7) resolution for blaze wavelength with 40 micron slit
- 8) plate scale (angstrom/mm)
- 9) approx. spectrum length (nm)

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
1	1200	500	17.45	350	650	4700	0.53	25
2	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0
3	1200	750	26.73	600	900	7600	0.50	25
4	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0

The slit width can be adjusted between 20 an 100 microns

The current status of the spectrograph:

Grating position: 1 Grating angle (degree): 13.89 = 400 nm
Slit width (micron): 40 Last initialization: 373 seconds before

5.2.2. ini — Inicializálás

Az elhelyezett optokapuk csak bizonyos pozíciókról, a motorok egy-egy teljes körbefordulásának tényéről adnak tájékoztatást, nincsenek abszolút koordinátákat adó enkóderek. A pontos pozíciókat a léptetőmotorokra kiadott impulzusok számlálásával határozza meg a program, amiket egy alapponthez képest válthatunk át abszolút pozíciókká. Ezért szükséges a spektrográf használata előtt ezen alaphelyzet beállítása, s ez után történhet a felhasználó által megadott hullámhossz, résszélesség és rácspozíció beállítása. Az inicializálás során egy `status.dat` file-ban kerülnek rögzítésre az alappozícióhoz tartozó értékek. Ezeket az optokapuk jeladóinak áthelyezésével lehet hangolni (erre minden esetben lehetőséget biztosít a mechanikai kiképzés), az értékeket pedig meg kell határozni, kalibrálni a nullpontokat. Ezen kezdeti értékeket az inicializálást végző C program elején definiált két változó tartalmazza:

```
#define SLIT_OFSET 1 /* slit width at home position, in microns */
#define GRT_OFSET 2.3 /* grating holder angle at home position, in degrees */
```

Amennyiben a spektrográf szétszerelésére kerül sor, úgy e két paraméter értéke újra meghatározandó s a programot újra kell fordítani.

A mozgó egységek alaphelyzetbe állítása két okból lehet szükséges:

- nem található a pillanatnyi pozíciót tartalmazó file
- túl régen történt az utolsó inicializálás, s azóta vagy hibák halmozódtak fel a lépésszámlálás során (az optokapuk említett korlátozott szerepe miatt az esetleges pár lépésnyi megcsúszások nem érzékelhetőek), vagy esetleg pl. egy rácscsere vagy egyéb manuális beavatkozás során a szerkezeti egységek elállítottak a file-ban rögzített értékekhez képest

A programban beállított időkorlát 2 óra, két inicializálás között legfeljebb ennyi idő telhet el, különben sem a `stat` sem pedig a `set` programok nem futnak le. A `set` futtatása során a `status.dat` file-ban a pozíciókra vonatkozó értékek állandóan frissülnek, azonban az utolsó inicializálás ideje változatlanul kerül kiírásra, ezt csak az `ini` futtatása módosítja.

Amennyiben valami mechanikai vagy elektronikai probléma lép fel, s az alappozíciót nem éri el az egyes alkatrészek, akkor a program nem adja vissza a felhasználónak az ablakot. Normális esetben az `ini` legfeljebb egy perc alatt le kell fusson, ha ez nem történik meg, akkor a spektrográfot szét kell szedni és kideríteni a hiba okát.

A program normális futása során az alábbi üzenet jelenik meg a képernyőn:

```
*****
SETTING HOME POSITION FOR gSPEC

searching slit home position...      OK
searching grating rotator home position... OK
selecting grating G1...              OK
updating status report file...       OK
*****
Grating position: 1
Grating angle:    2,34 degree
Slit width:      1 micron
*****
```

5.2.3. set — Beállítás, hibaüzenetek

A `set` parancsnak három paramétert kell megadni, ezek hiányában hibaüzenet kapunk:

```
usage: [grating position] [central wavelength (nm)] [slit width (micron)]
example: set 3 640 40
for more information execute "stat"
```

A `status.dat` vagy a `spec.dat` file-ok hiánya esetében az előbbieken ismertetett okokból a bemutatott hibaüzeneteket kapjuk, hasonlóan ha a `status.dat` időregisztere 2 óránál többet mutat. Amennyiben a három paraméter egyike is hibás, úgy szintén hibaüzenet jelenik meg a képernyőn:

- amennyiben nem 1-4 közé eső számot adunk meg rácspozíciónak

```
The grating position value must be between 1-4
```

- ha olyan pozíciót adunk meg, amely a `spec.dat` file szerint üres

```
The specified grating position is empty
```

- ha az adott rács blaze szögének megfelelő hullámhossztól nagyon távoli értéket adunk meg beállítandó centrális hullámhossznak

```
The grating in position N is not usable at the specified wavelength
please: give wavelength between LLL-UUU nm for this grating,
        choose another grating or
        execute "stat" for more information about available gratings
```

ahol N, LLL és UUU helyén a felhasználó által beállítani kívánt rácspozíció, ill. a `spec.dat`-ban ezen rácshoz tartozó alsó és felső használhatósági hullámhosszhatár áll

- ha túl kicsi vagy túl nagy résszélességet adunk meg

```
The slit width must be between 20-100 micron
```

Még egy esetben kaphatunk hibaüzenetet, amennyiben egy nagyobb mértékű állítás során, amikor is a motortengelynek legalább egyszer körbe kell fordulnia, az optokapuk nem jelzik vissza a megfelelő számú körbefordulást. Ez mechanikai szorulásra utal, s az alábbi hibaüzenettel jár:

```
Mechanical problems are occurred while adjusting slit width/grating position
Please execute initialization!
```

ekkor állítsuk be az alappozíciókat, s ha az `ini` lefut, próbálkozhatunk újra a beállítással, ha nem fut le, úgy javítani kell a mechanikát.

Amennyiben valamely paraméter értéke megegyezik az épp beállított értékkel, akkor a program lefut, s a megjelenő üzenet tájékoztat arról, hogy az adott egység pozíciójában nem történt változás. Ennek fényében az alábbi kétféle kimenet jelenhet meg:

SETTING USER DEFINED POSITIONS FOR gSPEC

Changing grating position from N to M ... OK
Changing central wavelength from NNN to MMM ... OK
Changing slit width from NN to MM ... OK

vagy

SETTING USER DEFINED POSITIONS FOR gSPEC

Grating position is not changed [N]
Grating angle is not modified [AA = NNN nm]
Slit width is not modified [NN micron]

Illetve ha csak egy vagy két egység pozíciója nem változott, akkor az azoknak megfelelő sor a második, a többi az első mintának megfelelően alakul. N, NN, NNN ill. AA az állítás előtti értékek, M, MM, MMM pedig a felhasználó által beadott, beállítani kívánt értékek.

5.2.4. arc — Hullámhossz kalibráció

Mivel a spektrállámpa fényének becsatolását végző egység a dolgozat leadásáig nem készült el, ezért az ezt vezérlő programot sem tudom ezen írásban bemutatni. A hullámhossz kalibrációhoz szükséges spektrállámpa felvételeket egy `arc` nevű parancs futtatása után lehet majd elkészíteni, mely a lámpa fényét a spektrográfba vetítő motort fogja meghajtani. Egy kapcsolója lesz e parancsnak, mely értéke `on` ill. `off`, a lámpa be ill. kikapcsolásának megfelelően. A kívánt hullámhossztartományt, résszélességet a `set` paranccsal kell beállítani, ha szükséges., (A kalibrációs felvételek azonban többnyire közvetlen egy csillagspektrum felvétele előtt/után történnek, a beállítások megváltoztatása nélkül.)

6. Első felvételek, összefoglalás

Az elkészített spektrográf optikai elemeinek beállítása az igen kompakt kivitelezés és a komplex fényút miatt nem túl egyszerű, hosszú időt vesz igénybe. A beállításhoz egy HeNe lézert használtam, ezzel jelölvén ki virtuálisan a távcső optikai tengelyét, s ehhez igazítottam az optikákat. Az iteratív beállítási folyamatot túl hosszadalmas lenne bemutatni, inkább csak a legelső tesztfelvételekkel szeretném szemléltetni az elért eredményt.

A következő oldalon látható, kihajtható színes ábra egy HgCd spektrállampa vonalait mutatja az általam tervezett és megépített spektrográffal előállított és a Szegedi Csillagvizsgáló ST-9E CCD kamerájával rögzített színekben. (Az eredeti felvételek fekete-fehérek, a színezés utólagos és csak az élethűbb megjelenést szolgálja.) A több, mint 20 képből (egy-egy kép 25 nm-t fed le a spektrumból) összeállított mozaik az 500 nm-re blazelt, 1200 vonal/mm-es ráccsal készült. (A két spektrum egy folytonos egységet alkot, a "#"-al jelölt vonal mindkét színekben megtalálható. A rés széttartása miatt egy 4 pixel széles tartományt tartottam meg minden egyes képből, s ezeket többször egymás fölé/alá másolva készítettem el az ábrán látható színekben, így a vonalak egyenesek.) Néhány beazonosított vonal hullámhosszát, valamint ezek alatt egy pixelszámban kifejezett koordinátaérték tüntettem fel, illetve bizonyos részleteket kinagyítottam, hogy megállapítható legyen, teljesíti-e az optika a kitűzött célokat. A kinagyított részletek alján kis osztások jelzik, hogy mekkorák a pixelek. A kék tartomány 435,8 nm-nél ill. 434,8 nm-nél található vonalai között 19 pixel a távolság, vagyis a képskála 0,5 Å/pixel. Mint a jobb felső, az ultraibolya tartomány egyik részletét mutató nagyításon is jól látható, két, egymástól 2 pixelre, vagyis 1 Å-re lévő vonalat képes különválasztani a rendszer, tehát a spektrális tisztaság eléri az 1 Å értéket.

Az előző fejezetekben szereplő teszteredmények s a fentiek alapján összességében tehát elmondható, hogy az általam tervezett és megépített műszer mind optikailag, mind mechanikailag, mind az elektronikát tekintve éli a kitűzött célokat. Vagyis egy kis tömegű, kompakt, közepes felbontású, a rácscseréjével illetve a résszélesség változtatásával állítható paraméterű, hőmérsékletileg stabilizált zárt térrel rendelkező, PC-ről vezérelhető spektrográfot terveztem és készítettem, mely optikai paramétereiben illeszkedik a szegedi 40 cm-es távcsőhöz és ST-9E CCD detektorhoz. A műszert sajnos idő hiányában csak spektrállampával tudtam tesztelni, a tesztfelvételek azonban igazolják az optikai rendszer teljesítőképességére elvégzett számítások eredményeit.

A műszerrel hamarosan elkészülhet az első csillagspektrum. Az első célpontok között olyan csillagok szerepelnek majd, mint pl. a 89 Herculis. E fényes objektum nagyon különös viselkedést mutat, színekében P Cygni profilok és – fényességéhez hasonlóan – időbeni változások figyelhetők meg. A furcsa fény- és színeképi változások okára hosszú időn át tartó, folyamatos, közepes felbontású spektrumok felvétele deríthet fényt, melyhez ideális a szegedi, immáron spektrográffal kiegészült műszeregyüttes.

Köszönetnyilvánítás

Elsősorban *szüleimnek* szeretnék köszönetet mondani, akik messzemenő bizalma és mindenbeni támogatása lehetővé tette számomra, hogy gyermekkorom óta zavartalan foglalkozhassam csillagászattal, tanulmányaimmal.

Köszönet illeti témavezetőmet, *dr. Szatmáry Károlyt* valamint *dr. Szatmári Sándor* tanácskezelőt, akik az anyagi- és munkafeltételeket biztosították jelen szakdolgozat kivitelezéséhez. *dr. Vinkó József* szakmai tanácsai és segítsége szintén nagyon sokat jelentettek. A következőkben abc rendben felsorolt személyek a spektrográf kivitelezése során voltak segítségemre tanácsaikkal, fizikai munkájukkal: *Gyuricza Csaba* (elektronika, NYÁK tervezés, PIC programozás), *Lázár József* (PIC programozás), *Málits Sándor* (mechanika kivitelezése), *Papp István* (elektronika), *Sári Pál* (mechanika tervezése), *Szántó Zoltán* (mechanika kivitelezése), *Torma Szilveszter* (mechanika kivitelezése). Végül, de nem utolsó sorban *Dr. Andrew Szentgyörgyi*nek köszönöm tanácsait, segítségét, valamint az általa felkínált lehetőséget a műszertechnikai ismereteim bővítésére.

És köszönet a *barátoknak*, akik olyanok, mint a csillagok, nem mindig látszanak, de mindig ott vannak.

Hivatkozások

- [1] Carrol, B.W. & Ostlie, D.A. 1996, An Introduction to Modern Astrophysics, Addison–Wesley Publishing Company, Inc.
- [2] Fabricant, D.G. et al 1998, Construction of the Hectospec: 300 optical fiber-fed spectrograph for the converted MMT, SPIE 3355, 285
- [3] Hearnshaw, J.B. 1990, The analysis of starlight - one hundred and fifty years of astronomical spectroscopy, Cambridge University Press
- [4] Kónya L. 1991, PC elektronika, Műszaki Könyvkiadó
- [5] Malacara, D. 1992, Optical Shop Testing, John Wiley & Sons, Inc.
- [6] Murdin, P. ed. 2001, Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, Institute of Physics Publishing
- [7] Nelson, G.W. 1995, Introduction to Fiber Optics, SPIE 2476, 2
- [8] Ramsey, L.W. 1995, Focal Ratio Degradation in Optical Fibers of Astronomical Interest, SPIE 2476, 26
- [9] Rutten, H.G.J & van Venrooij, M.A.M. 1950, Telescope Optics, Willmann–Bell, Inc.
- [10] Vinkó J., Szatmáry, K., Kaszás, G. Kiss, L.L. 1998, A csillagok színeképe, Meteor Csillagászati Évkönyv 1998, MCSE
- [11] Wilson, R.N. 1999, Reflecting Telescope Optics I-II, Springer

- [12] Motorola MC3489 Stepper Motor Driver Data Sheet, 1996, Motorola, Inc.
- [13] Microchip PIC16F84A 18-pin Enhanced Flash/EEPROM 8-bit Microcontroller Data Sheet, 1998, Microchip Technology, Inc.
- [14] Microchip TCN75 2-wire Serial Temperature Sensor and Thermal Monitor Data Sheet, 2001, Microchip Technology, Inc.
- [15] PCB, PCM and PCW PIC C Compiler Reference Manual, 1994, Custom Computer Services, Inc.

7. Függelék

7.1. A spektrográfot vezérlő programok

7.1.1. ini.c

Ez a program végzi a spektrográf mozgó alkatrészeinek alappozícióba állítását.

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/io.h>
#include <time.h>

#define PORT 0x378 /* LPT1 - data 0-7 = pin 2-8 */
#define INPORT 0x379 /* LPT1 - status = pin 11,12,13,15 */
#define SLIT_OFSET 1 /* slit width at home position, in microns */
#define GRT_OFSET 2.3 /* grating holder angle at home position, in degrees */

FILE *file;

time_t TIME;
int CURR_STAT;
int PREV_STAT;
int i;

int main()
{
    printf("\n*****");
    printf("\n\n\t\tSETTING HOME POSITION FOR gSPEC");
    printf("\n\n\t\tsearching slit home position...\t");

    if (ioperm(PORT, 3, 1)) {perror("ioperm"); exit(1);}
    outb(0, PORT); /* set bias current for all steppers */
    usleep(300000);
    PREV_STAT=inb(INPORT);

    while (inb(INPORT) != PREV_STAT+16) /* setting slit home */
    {
        PREV_STAT=inb(INPORT);
        outb(32, PORT);
        outb(0, PORT);
        usleep(30);
    }
    while (inb(INPORT) != PREV_STAT+128)
    {
        PREV_STAT=inb(INPORT);
        outb(48, PORT);
    }
}
```

```

        outb(0, PORT);
        usleep(30);
    }
    printf("\t\tOK\n\t");

    printf("searching grating rotator home position...\t");
    usleep(300000);
    while (inb(INPORT) != PREV_STAT+32) /* setting grating rotator home */
    {
        PREV_STAT=inb(INPORT);
        outb(12, PORT);
        outb(0, PORT);
        usleep(30);
    }
    while (inb(INPORT) != PREV_STAT-8)
    {
        PREV_STAT=inb(INPORT);
        outb(8, PORT);
        outb(0, PORT);
        usleep(30);
    }
    printf("OK\n\t");

    printf("selecting grating G1...\t");
    usleep(300000);
    outb(64, PORT); /* setting grating holder home */
    while (inb(INPORT) != 208)
    {
        outb(66, PORT);
        outb(64, PORT);
        usleep(30);
    }
    for(i=0; i<5; i++)
    {
        outb(66, PORT);
        outb(64, PORT);
        usleep(30);
    }

    printf("\t\t\tOK\n\n\t");
    outb(1, PORT); /* removing bias current from steppers */
    if (ioperm(PORT, 3, 0)) {perror("ioperm"); exit(1);}

    printf("updating status report file...\t\t");
    file = fopen("status.dat", "wt");
    time(&TIME);
    fprintf(file, "1 %5.2lf %d %d\n", GRT_OFFSET, SLIT_OFFSET, TIME);
    fclose(file);
    printf("OK\n\n*****\n\n\t\t");

```

```
    printf(" Grating position:\t 1\n\t\t Grating angle:  \t%5.2lf degree \n\t\t Slit width:  
\t\t%d micron", GRT_OFSET, SLIT_OFSET);  
    printf("\n\n*****\n\n");  
  
    exit(0);  
}
```

7.1.2. stat.c

Ez a program a spektrográf mozgó alkatrészeinek pillanatnyi helyzetét kérdezi le és jeleníti meg a képernyőn.

```
#include <time.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#define PI 3.1415926535798

main ()
{
FILE *specfile,*statfile;
typedef struct GRT_s {
    int POS;
    int RES1;
    int RES2;
    int BLAZEW;
    int USL;
    int USU;
    int SPL;
    double BLAZEWA;
    double SCL;
} GRT_t;
GRT_t GRT[4];

int CURR_POS,TIME,CURR_SLW;
double CURR_ANGLE,CWL;
time_t CURR_TIME;
int i;

    printf("\n*****\n");
    printf("\n \t\t\tgSPEC SPECIFICATIONS\n\n");
    printf(" column description:\n 1) grating position\t\t2) resolution [groves/mm]\n");
    printf(" 3) blaze wavelength [nm]\t4) blaze angle [degree]\n");
    printf(" 5) lower limit of usage [nm]\t6) upper limit of usage [nm]\n");
    printf(" 7) resolution at blaze wavelength with 40 micron slit\n");
    printf(" 8) plate scale (angstrom/mm)\t9) approx. spectrum length (nm)\n\n");

    specfile = fopen("spec.dat", "rt");
    if (!(specfile))
    {
        printf("\t\t\tWARNING!\n There is no specification file, please contact the
designer!\n");
        printf("\n*****\n\n");
        exit(1);
    }
    i=0;
    while( i<4 )
```

```

    {
        fscanf(specfile, "%d\t%d\t%d\t%lf\t%d\t%d\t%d\t%lf\t%d\n", &GRT[i].POS, &GRT[i].RES1,
&GRT[i].BLAZEW, &GRT[i].BLAZEA, &GRT[i].USL, &GRT[i].USU, &GRT[i].RES2, &GRT[i].SCL,
&GRT[i].SPL);
        printf(" %d\t%d\t%d\t%.2lf\t%d\t%d\t%d\t%.2lf\t%d\n", GRT[i].POS, GRT[i].RES1,
GRT[i].BLAZEW, GRT[i].BLAZEA, GRT[i].USL, GRT[i].USU, GRT[i].RES2, GRT[i].SCL, GRT[i].SPL);
        i++;
    }
fclose(specfile);

printf("\n The slit width can be adjusted between 20 an 100 microns\n");
printf(" The current status of the spectrograph:\n\n");

statfile = fopen("status.dat", "rt");
if (!(statfile))
    {
        printf("\t\t\tWARNING!\n There is no status file, please execute initialization!\n");
        printf("\n*****\n\n");
        exit(1);
    }
fscanf(statfile, "%d %lf %d %d", &CURR_POS, &CURR_ANGLE, &CURR_SLW, &TIME);
time(&CURR_TIME);
if ( (CURR_TIME - TIME) > 7200 )
    {
        printf("\t\t\tWARNING!\n The status file is too old, please execute
initialization!\n");
        printf("\n*****\n\n");
    }
else
    {
        CWL= (2 * sin(CURR_ANGLE*PI/180) * 1000000) / GRT[CURR_POS-1].RES1;
        printf(" Grating position: \t%d\tGrating angle (degree): %.2lf = %.0lf nm\n",
CURR_POS, CURR_ANGLE, CWL);
        printf(" Slit width (micron): \t%d\tLast initialization: \t%d seconds before\n",
CURR_SLW, CURR_TIME-TIME);
        printf("\n*****\n\n");
    }
fclose(statfile);
}

```

7.1.3. set.c

E program segítségével állítható be a felhasználó által megadott központi hullámhossz, résszélesség és a használni kívánt rács.

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/io.h>
#include <time.h>
#include <math.h>

#define PORT 0x378
#define INPORT 0x379
#define PI 3.1415926535798

int main(argc, argv)
int argc;
char *argv[ ];
{
    int i,j,k,opto,prev_stat;
    int SET_POS,SET_WL,SET_SW;
    int CURR_POS,CURR_SW,TIME;
    double CURR_ANGLE,CWL;
    double SET_ANGLE;

    FILE *specfile,*statfile;
    typedef struct GRT_s {
        int POS;
        int RES1;
        int RES2;
        int BLAZEW;
        int USL;
        int USU;
        int SPL;
        double BLAZEAA;
        double SCL;
    } GRT_t;
    GRT_t GRT[4];
    time_t CURR_TIME;

    printf("\n*****\n");
    printf("\n\t\t SETTING USER DEFINED POSITIONS FOR gSPEC\n\n");

    if ( argc != 4) {
        printf("\n usage:  set [grating position] [central wavelength (nm)] [slit width (micron)]");
        printf("\n example:  set 3 640 40");
        printf("\n for more information execute \"stat\"\n");
        printf("\n*****\n");

        exit(1);
    }
}
```



```

}
SET_POS = atoi(argv[1]);
SET_WL = atoi(argv[2]);
SET_SW = atoi(argv[3]);

specfile = fopen("spec.dat", "rt");
if (!(specfile)) {
    printf("\t\t\tWARNING!\n There is no specification file, please contact the
designer!\n");
    printf("\n*****\n");
    exit(1);
}
i=0;
while( i<4 ){
    fscanf(specfile, "%d\t%d\t%d\t%lf\t%d\t%d\t%lf\t%d\n", &GRT[i].POS, &GRT[i].RES1,
&GRT[i].BLAZEW, &GRT[i].BLAZEA, &GRT[i].USL, &GRT[i].USU, &GRT[i].RES2, &GRT[i].SCL,
&GRT[i].SPL);
    i++;
}
fclose(specfile);

statfile = fopen("status.dat", "rt");
if (!(statfile)) {
    printf("\t\t\tWARNING!\n There is no status file, please execute initialization!\n");
    printf("\n*****\n");
    exit(1);
}
fscanf(statfile, "%d %lf %d %d", &CURR_POS, &CURR_ANGLE, &CURR_SW, &TIME);
time(&CURR_TIME);
if ( (CURR_TIME - TIME) > 7200 ) {
    printf("\t\t\tWARNING!\n The status file is too old, please execute
initialization!\n");
    printf("\n*****\n");
    exit(1);
}

if ( (SET_POS < 1) || (SET_POS > 4) ) {
    printf("\n The grating position value must be between 1-4\n");
    printf("\n*****\n");
    exit(1);
}
if ( GRT[SET_POS-1].RES1 == 0 ){
    printf("\n The specified grating position is empty\n");
    printf("\n*****\n");
    exit(1);
}
if ( (SET_WL < GRT[SET_POS-1].USL) || (SET_WL > GRT[SET_POS-1].USU) ) {
    printf("\n The grating in position %d is not usable at the specified wavelength\n",

```

```

SET_POS);
    printf(" please:\tgive wavelength between %d-%d nm for this grating",
GRT[SET_POS-1].USL, GRT[SET_POS-1].USU);
    printf("\n \t\tor choose another grating\n");
    printf(" execute \"stat\" for more information about available gratings\n");
    printf("\n*****\n");
    exit(1);
}
if ( (SET_SW < 20) || (SET_SW > 100) ) {
    printf("\n The slit width must be between 20-100 micron\n");
    printf("\n*****\n");
    exit(1);
}

SET_ANGLE = asin((GRT[SET_POS-1].RES1 * SET_WL) / 2000000.0) * 180.0/PI;

if (ioperm(PORT, 3, 1)) {
    perror("ioperm");
    printf("\n No acces to the parallel port\n\n");
    exit(1);
}

usleep(300000);
if ( CURR_POS != SET_POS ) {
    printf(" Changing grating position from %d to %d ... \t", CURR_POS, SET_POS);
    outb(64, PORT);
    if( (CURR_POS - SET_POS) < 0) j=fabs(CURR_POS-SET_POS);
    if( (CURR_POS - SET_POS) > 0) j=4-(CURR_POS-SET_POS);
    if(SET_POS == 1) opto=208;
    if(SET_POS == 2) opto=112;
    if(SET_POS == 3) opto=88;
    if(SET_POS == 4) opto=248;

    for(i=0; i<90*j; i++) {
        outb(66, PORT);
        outb(64, PORT);
        usleep(30);
    }
    while(inb(INPORT) != opto) {
        outb(66, PORT);
        outb(64, PORT);
        usleep(30);
    }
    for(i=0; i<5; i++) {
        outb(66, PORT);
        outb(64, PORT);
        usleep(30);
    }
    outb(1, PORT);
    printf("OK");
}

```

```

else printf("\n Grating position is not changed [%d]", SET_POS);

usleep(300000);
if( floor(SET_ANGLE*100) != floor(CURR_ANGLE*100) ) {
    CWL= (2 * sin(CURR_ANGLE*PI/180.0) * 1000000.0) / GRT[CURR_POS-1].RES1;
    opto = 0;
    printf("\n Changing central wavelength from %5.01f to %d ... \t", CWL, SET_WL);
    j = floor( fabs(SET_ANGLE - CURR_ANGLE) * 100);
    k = floor(j/400)+1;

    if ( SET_ANGLE > CURR_ANGLE) {
        for(i=0; i<j; i++) {
            prev_stat = inb(INPORT);
            outb(8, PORT);
            outb(0, PORT);
            usleep(30);
            if(inb(INPORT) == prev_stat-8) opto++;
        }
        SET_ANGLE = CURR_ANGLE + floor(fabs((SET_ANGLE-CURR_ANGLE)*100.0))/100.0;
    }
    else {
        for(i=0; i<j; i++) {
            prev_stat = inb(INPORT);
            outb(12, PORT);
            outb(0, PORT);
            usleep(30);
            if(inb(INPORT) == prev_stat-8) opto++;
        }
        SET_ANGLE = CURR_ANGLE - floor(fabs((SET_ANGLE-CURR_ANGLE)*100.0))/100.0;
    }

    if( ((k-opto) < 0) || ((k-opto) > 1) ) {
        printf("\n\n\t WARNING!\n");
        printf(" Mechanical problems are ocurred during grating rotation\n");
        printf(" Please execute initialization!\n");
        printf("\n*****\n");
        exit(1);
    }
    printf("OK");
}
else printf("\n Grating angle is not modified [%.21f = %d nm]", SET_ANGLE, SET_WL);

usleep(300000);
if( SET_SW != CURR_SW ) {
    opto = 0;
    printf("\n Changing slit width from %d to %d ... \t", CURR_SW, SET_SW);
    if ( SET_SW > CURR_SW) {
        j = floor(((SET_SW-CURR_SW)/707.0)*20800.0);
        k = floor(j/400)+1;
        for(i=0; i<j; i++) {

```

```

        prev_stat = inb(INPORT);
        outb(48, PORT);
        outb(0, PORT);
        usleep(30);
        if(inb(INPORT) == prev_stat+128) opto++;
    }
}
else {
    j = floor(((CURR_SW-SET_SW)/707.0)*20800.0);
    k = floor(j/400)+1;
    for(i=0; i<j; i++) {
        prev_stat = inb(INPORT);
        outb(32, PORT);
        outb(0, PORT);
        usleep(30);
        if(inb(INPORT) == prev_stat+128) opto++;
    }
}

if( ((k-opto) < 0) || ((k-opto) > 1) ) {
    printf("\n\n\t\t WARNING!\n");
    printf(" Mechanical problems are occurred while adjusting slit width\n");
    printf(" Please execute initialization!\n");
    printf("\n*****\n");
    exit(1);
}
printf("\tOK");
}
else printf("\n Slit width is not modified [%d micron]", SET_SW);
printf("\n\n*****\n");

if (ioperm(PORT, 3, 0)) {perror("ioperm"); exit(1);}

statfile = fopen("status.dat", "wt");
fprintf(statfile, "%d %5.2lf %d %d", SET_POS, SET_ANGLE, SET_SW, TIME);
fclose(statfile);

exit(1);
}

```

7.2. PIC16F84-re írt programok

7.2.1. lm75.src

Ez a program végzi a hőszensorok kezelését és ez alapján a fűtőáramkör kapcsolását.

```
                DEVICE PIC16C84,hs_OSC,WDT_OFF,PROTECT_OFF

r0 equ 1ch
r1 equ 1dh
r2 equ 1eh
sndbyte equ 20h
reg2 equ 21h
REG3 EQU 25H
BITCTR EQU 28H
HIGHDATA EQU 29H
LOWDATA EQU 2AH
rcvbyte equ 24h
CIM equ 2Bh
present equ 2Ch
s1 equ 19h
s2 equ 1ah
s3 equ 1bh

SDA1 equ rb.6
SDA2 equ rb.5
SCL equ rb.7
tranz equ rb.3

OUT equ ra.3
IN equ ra.2

                jmp start

I2CSTART SETB SDA1
                SETB SCL
                CLRB SDA1
                CLRB SCL
                SETB SDA1
                RET

I2CSTOP SETB SDA1
                CLRB SCL
                CLRB SDA1
                SETB SCL
                SETB SDA1
                RET
```

```

I2Ckiir MOV BITCTR,#8
I2Ckiir1 RL REG2
        clrb SCL
        MOVB SDA1,C
        NOP
        setb SCL
        nop
        nop
        nop
        clrb scl
        DJNZ BITCTR,I2Ckiir1
        RET

```

```

I2COLVAS MOV BITCTR,#8
I2COLVAS1 nop
        nop
        nop
        SETB SCL
        MOVB C,SDA1
        RL REG2
        NOP
        CLRB SCL
        DJNZ BITCTR,I2COLVAS1
        RET

```

```

ELOJEL RL HIGHDATA
        RL LOWDATA
        RR HIGHDATA
        SNB HIGHDATA.7 ;ez a bit jelzi a minusz ho-t

        jmp MIN ;0 alatt van a ho

        CLC ;plusz ho van
        add LOWDATA,#110 ;eltoljuk a 0 fokot 110 dec.-ra
        snc
; MOV lowdata,#0ffH ;70 fok felett is 70 fokot ad
        clc
        RET

```

```

MIN NOT LOWDATA ; kettes komplementes kepzés
        INC LOWDATA
        sub lowdata,#110 ; -55fok=0h, 0fok=110dec.(6Eh)
        RET

```

```

Start mov !ra,#4
        mov !rb,#0

```

```

hurok2 MOV sndbyte,#0
        CALL rs232kiir

```

```

MOV CIM,#091H
CALL CIKLUS

MOV CIM,#093H
CALL CIKLUS

MOV CIM,#095H
CALL CIKLUS

MOV CIM,#097H
CALL CIKLUS

MOV CIM,#099H
CALL CIKLUS
csbe lowdata,#181
call tranzoff
csae lowdata,#179
call tranzon

MOV CIM,#09BH
CALL CIKLUS

MOV CIM,#09DH
CALL CIKLUS

MOV CIM,#09FH
CALL CIKLUS

mov sndbyte,#1
CALL rs232kiir

mov sndbyte,present
CALL rs232kiir

clr bitctr
startbit inc bitctr
clr rcvbyte
cje bitctr,#255,hurok2
snb in
jmp startbit
mov bitctr,#8
call bitdelay
jb in,startbit
receive call bitdelay
call bitdelay
movb c,in
rr rcvbyte
djnz bitctr,receive
call bitdelay
call bitdelay

```

```

        movb rcvbyte.7, tranz

        JMP HUROK2

ciklus NOP
MER CALL I2CSTART ;i2c start

        MOV REG2, cim ;i2c vezerloszo kiiras
        CALL I2Ckiir

        MOV !RB, #64 ;ack beolvasas

        SETB SCL ;ack
        movb c, SDA1
        rl present
        CLRB SCL
                                           ;lowdata beolvasas

        CALL I2COLVAS
        MOV LOWDATA, REG2

        SETB SCL
        NOP
        CLRB SCL

                                           ;highdata beolvasas

        CALL I2COLVAS
        MOV HIGHDATA, REG2

                                           ;no ack (SDA1=1)

        SETB SCL
        NOP
        CLRB SCL

        MOV !RB, #0

        CALL I2CSTOP ;i2c stop

        CALL ELOJEL

        MOV sndbyte, lowdata
        CALL rs232kiir

        mov s2, #255
        mov s1, #255
loop1 djnz s1, loop1
        djnz s2, loop1

        RET

```



```

rs232kiir mov bitctr,#8
           clrb out
           call bitdelay
           call bitdelay

send rr sndbyte
           movb out,c
           call bitdelay
           call bitdelay
           djnz bitctr,send
           setb out
           call delay
           ret

bitdelay mov s1,#020h
wait1 djnz s1,wait1
       ret

delay mov s1,#03fh
wait2 djnz s1,wait2
       ret

tranzon setb tranz
       ret

tranzoff clrb tranz
       ret

```

7.2.2. lcd.src

Ez a program RS232 kommunikációs vonalon veszi a hőstabilizálást végző mikrokontrollertől a szenzorok adatait és megjeleníti egy LCD kijelzőn.

```
                DEVICE PIC16C84,hs_OSC,WDT_OFF,PROTECT_OFF

r0 equ 10h
r1 equ 11h
r2 equ 13h
reg1 equ 20h ; lcd-re kimeno adat regisztere
reg2 equ 21h ; -||-
delctr equ 22h
bitctr equ 23h
rcvbyte equ 24h
hur1 equ 25h ;hurok munkavaltozo
hur2 equ 26h ; -||-
hur3 equ 27h ; -||-
reg12 equ 28h ; lcd-re kimeno adat regisztere
reg13 equ 29h ; -||-
s1 equ 08h ;kesletetes valtozo
s2 equ 09h ; -||-
s3 equ 0ah ; -||-
EGYES equ 2ah
TIZES equ 2bh
SZAZAS equ 2ch
FEL equ 2dh
MIN equ 2fh

in equ ra.2
out equ ra.3
ena equ rb.0
rs equ rb.1
lcd equ rb

                jmp start

delay call en ;LCD delay
                mov s1,#160
delay1 djnz s1,delay1
                ret

en setb ena ;enable impulzus az lcd-nek
                nop
                nop
                nop
                clrb ena
                ret
```

```

kiir MOVB RB.7,REG1.7
      MOVB RB.6,REG1.6
      MOVB RB.5,REG1.5
      MOVB RB.4,REG1.4
      CALL EN
      MOVB RB.7,REG1.3
      MOVB RB.6,REG1.2
      MOVB RB.5,REG1.1
      MOVB RB.4,REG1.0
      CALL EN
      CALL DELAY
      ret

home clrb rs ; torli a kijelzot
      mov reg1,#2
      call kiir
      mov s2,#50
hos call delay
      djnz s2,hos
      setb rs
      ret

ini clrb rs
      mov reg1,#028h
      call kiir
      mov reg1,#028h
      call kiir
      mov reg1,#06h
      call kiir
      mov reg1,#080h
      call kiir
      mov reg1,#0ch
      call kiir
      setb rs
      ret

convert mov FEL,030h
      clrb c
      rr reg2
      snb c
      mov FEL,#035h

      mov MIN,#45
      cjb reg2,#110,hex2dec
      MOV MIN,#32 ;space kodja

HEX2DEC MOV SZAZAS,#32
      MOV TIZES,#32
      MOV EGYES,#48
SZAZAS1 CJB REG2,#100,TIZES1

```

```

SUB REG2,#100
INC SZAZAS
CJAE REG2,#100,SZAZAS1
ADD SZAZAS,#16
ADD TIZES,#16
TIZES1 CJB REG2,#10,EGYES1
SUB REG2,#10
INC TIZES
CJAE REG2,#10,TIZES1
ADD TIZES,#16
CJE SZAZAS,#32,EGYES1
CSE TIZES,#48
SUB TIZES,#16
EGYES1 ADD EGYES,REG2
RET

```

```

lcdkiir mov reg1,MIN
call kiir
mov reg1,SZAZAS
call kiir
mov reg1,TIZES
call kiir
mov reg1,EGYES
call kiir
mov reg1,#44
call kiir
mov reg1,FEL
call kiir
mov reg1,#223
call kiir
mov reg1,#67
call kiir
mov reg1,#32
call kiir
ret

```

```

Start mov !ra,#4 ;Set data direction register for port A
mov !rb,#0

```

```

mov s2,#255 ;bekapcsolasi kesleltetes
loop djnz s1,loop
djjnz s2,loop

```

```

call ini

```

```

mov reg1,#02ah ;a csillag kodja
call kiir ;kiirjuk haromszor
call kiir
call kiir

```

```

kezd clrb rs ;nullazuk CGRAM-ot
      mov reg1,#080h
      call kiir
      setb rs

kezd1 call startbit
      cje reg2,#0,kezd
      call convert
      call lcdkiir

      call startbit
      cje reg2,#0,kezd
      call convert
      call lcdkiir

      clrb rs
      mov reg1,#0A8h ;masodik sor elso pozicioja
      call kiir
      setb rs

      call startbit
      call convert
      call lcdkiir

      call startbit
      call convert
      call lcdkiir

      jmp kezd

startbit mov bitctr,#8
          clr rcvbyte
          snb in
          jmp startbit
          call bitdelay
          jb in,startbit
receive call bitdelay
          call bitdelay
          movb c,in
          rr rcvbyte
          djnz bitctr,receive
          call bitdelay
          call bitdelay
          mov reg2,rcvbyte
          ret

bitdelay mov s1,#020h
wait1 djnz s1,wait1
      ret

```

7.3. Teszteléshez használt programok

7.3.1. lcdtest.pas

Ez a program az LCD-re a hőmérsékleteket kiíró mikrokontroller programját teszteli, RS232-n 9600 baud sebességgel egy karaktersorozatot küld, ami helyes működés esetén megjelenik az LCD panelen.

```
uses dos, crt;

type buff = array[0..80] of char;

var f1 : file of buff;
    datalow : buff;
    data : array[0..80] of byte;
    i,j : integer;
    addr : word;
    fna : string[12];

procedure varok;
begin
inc(j);
if j > 1000 then begin
    gotoxy(1,1);
    writeln('Nyomtatasi hiba !!!');
end;
end;

procedure printerini;
begin
port[addr+3]:=131;
port[addr+1]:=0;
port[addr]:=12;
port[addr+3]:=3;
end;

procedure printing;
begin
for i := 0 to 79 do begin
delay(20);

                                port[addr]:=data[i];
                                j:=0;
                                end;
end;

procedure load;
begin
assign(f1,'joe.pas');
reset(f1);
```

```
read (f1,datalow);  
close(f1);  
end;
```

```
procedure fill;  
begin  
for i:= 0 to 79 do begin  
data[i]:=ord(datalow[i]); end;  
end;
```

```
begin  
clrscr;  
addr:=1016;  
printerini;  
load;  
fill;  
printing;  
end.
```

7.3.2. lm75test.pas

Ez a program RS232-n veszi és a PC monitorán megjeleníti a hőstabilizálást végző mikrokontroller által küldött értékeket, illetve egy file-ba egy másodpercenként lementi azokat. Ez a program szolgált a fűtési tesztek adatainak rögzítésére.

```
uses dos, crt;

type buff = array[0..1023] of char;

var f1 : file of buff;
    datalow : buff;
    data : array[0..31] of byte;
    tomb : array[0..30] of byte;
    a,b,c,d,e,f,i,j,sp : integer;
    g: real;
    z : longint;
    addr : word;
    fna : string[12];
    w:array[1..2048,1..11] of integer;
    f2:text;
    l,m:integer;

procedure wait;
begin
end;

procedure lekerdez;
begin
    clrscr;
    writeln('Melyik porton vagy? (3F8=1016, 2F8=760, 3E8=1000, 2E8=744)');
    readln(addr);
end;

procedure printerini;
begin
    port[addr+3]:=131;
    port[addr+1]:=0;
    port[addr]:=12;
    port[addr+3]:=3;
end;

procedure printing;
begin
    repeat wait until port[addr+5]<>96;
    if port[addr] = 0 then gotoxy(1,wherey);
    write(port[addr], ' ');
end;
```



```

begin

clrscr;

for l:=1 to 2048 do
  for m:=1 to 11 do
    w[l,m]:=0;

lekerdez;
printerini;
l:=1;
repeat
begin
  repeat printing until port[addr] = 0;
  begin
    for m := 1 to 11 do
      begin
        w[l,m]:=port[addr];
        printing;
      end;
    delay(2000);
    l:=l+1;
  end;
end; until keypressed;

printing;
readln;

  assign(f2,'adat.dat');
  rewrite(f2);

  for l:=1 to 2048 do
  begin
    for m:=1 to 11 do write(f2,w[l,m], ' ');
    writeln(f2);
  end;

  close(f2);
end.

```

7.4. NYÁK fóliák

A TCN75 szenzorokhoz

A hőszensorokat kezelő mikrokontrollerhez

Az adatokat LCD-n megjelenítő mikrokontrollerhez

A fűtésteljesítményt szabályozó potméterekhez

A léptetőmotorokhoz

7.5. Műszaki rajzok, szerelési rajzok