

## ELEKTRONIKA DECENTRALIZOVANÉHO RIADENIA ROBOTICKÉHO RAMENA

autor: Filip Tóth, vedúci práce: prof. Ing. Boris Rohaľ-Ilkiv, CSc.

pracovisko, inštitúcia:

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky (FEI) a  
Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky (SjF)  
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave  
ftxrobot@hotmail.com, xfilipx@azet.sk

### Abstrakt

Cieľom práce bolo navrhnuť a realizovať elektroniku pre konkrétne robotické zariadenie. Jedná sa o robotické rameno so sériovou kinematickou štruktúrou. Rameno má celkovo šesť stupňov voľnosti. Tri stupne predstavuje rameno robota a ďalšie tri stupne zápästie. Ako koncový efektor je použité chápadlo. Elektroniku pre samostatné robotike rameno bolo potrebné navrhnuť tak, aby sa elektricky dala prepojiť zo štandardným hardvérom a softvérom, ktoré má bežne k dispozícii väčšina laboratórií STU orientovaných na automatizáciu. Podobné robotické rameno bude v budúcnosti súčasťou mobilného robota.

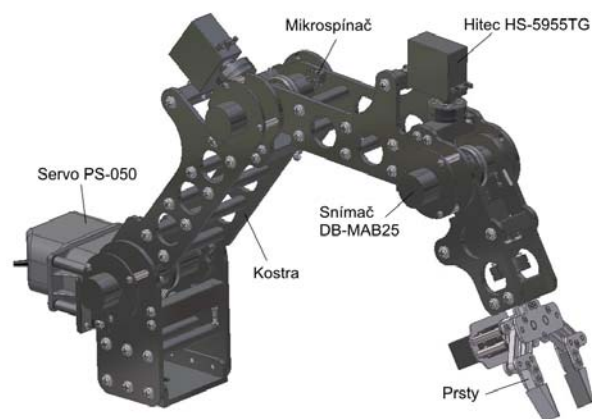
### Úvod

Projekt by nemohol vzniknúť bez iniciatívy Pavla Krasňanského, ktorý je študentom tretieho ročníka Strojníckej fakulty STU. V roku 2006 dostal myšlienku vytvoriť mechaniku pre robotický manipulátor. Projekt dostal názov Robotické rameno. V tom čase som dostal možnosť podieľať sa na tvorbe kompletnej elektroniky robotického ramena. Tento projekt sa nezaobíde bez skúseného programátora mikroprocesorov Davida Gustafika, ktorý je študentom druhého ročníka fakulty elektrotechniky a informatiky STU. Na vývoji elektroniky pracujem už tretí rok. Cieľom celého projektu súčasnej verzie robotického ramena je aplikovať priame a inverzné kinematické úlohy cez prostredie MATLAB.

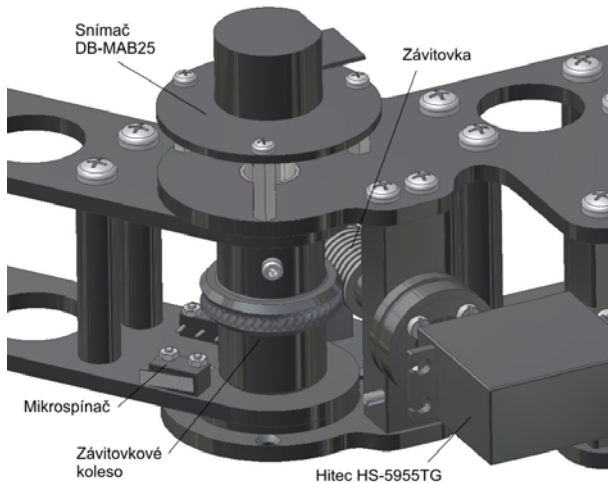
### 1. Základné informácie o mechanike

Rameno (Obr. 1.) je pripevnené na podstave, ktorej prierez v osi symetrie predstavuje lichobežník. V tejto podstave je implementovaná mechanika pre prvý stupeň voľnosti. Druhý, tretí a štvrtý stupeň voľnosti je tvorený kostrou z duralového plechu o hrúbke 4mm. Štvrtý stupeň voľnosti sa môže brať ako súčasť ramena ale aj ako súčasť technologického nástroja teda zápästia. Piaty stupeň voľnosti predstavuje natočenie technologického

nástroja, ktorý má za úlohu uchop predmetu. Chápadlo je tvorené dvoma prstami, ktoré sa proti sebe symetricky pohybujú. Tvoria šiesty stupeň voľnosti. Sériová kinematická štruktúra je dosť náročná na akčné členy, preto je pohyb kĺbov riešený cez závitové koleso a tým dosiahnutie väčšieho prevodového čísla ako v klasickom ozubení. Veľkou výhodou a dôsledkom tejto konštrukcie je nulová vôľa prevodov a tiež nulová spotreba energie v statických stavoch. Nevýhodou je pomalá dynamika systému. Každý kĺb (Obr. 2.) obsahuje servomotor, snímač absolútnej polohy, koncové spínače a závitový prevod. V druhom stupni voľnosti je použitý motor s vyšším krútiacim momentom, pretože rameno sily je najväčšie. Osobitnú konštrukciu tvorí chápadlo, ktorého prsty majú paralelnú kinematickú štruktúru, čo je veľká výhoda, pretože vždy sú navzájom rovnobežné. V mieste úchopu sú integrované tlakové senzory. Dĺžka vystretého ramena je 580mm a hmotnosť 5075g. Akčné členy predstavujú servomotory dvoch typov (Tab. 1.) V druhom stupni je použitý priemyselný servomotor PS-050 od firmy TONEGAVA SEIKO s oceľovými prevodmi. Vo všetkých ostatných je použitý profesionálny modelársky servomotor HS-5955TG od firmy Hitec s titánovými prevodmi. Snímače absolútnej polohy priamo merajú vzájomné natočenie ramien. Jeho hriadeľ je upevnený v osi kĺbu a závitového prevodu. Typ snímača polohy je DB-MAB25 od firmy Megatron.



Obr. 1. mechanika ramena



Obr. 2. mechanika v kĺbe

	HS-5955TG	PS-050
Prevody	titánové	oceľové
Krútiaci moment	31,2 kg.cm <sup>-1</sup>	91,5 kg.cm <sup>-1</sup>
Rýchlosť	0,15 s / 60°	0,29 s / 60°
Rozmery [mm]	40 x 20 x 37	100 x 44 x 79
Napájanie [V]	4,8-6	5-12
Hmotnosť [g]	62	283,4

Tab. 1. parametre servomotorov

## 2. Elektronika

Elektronika tvorí oblasť môjho záujmu a preto som si dal veľmi záležať na jej návrhu a konštrukcii. K návrhu elektroniky (Obr. 3.) som sa dostal až po tom, ako bola mechanika skoro hotová a tak nebolo možné zasahovať do elektromechanických dielov ako sú napríklad akčné členy a snímače. Ešte pred samotným návrhom bolo potrebné analyzovať systém ako celok z elektrického hľadiska, stanoviť požiadavky a ciele, ktoré sú: modularita, programovateľnosť, minimalizácia kabeláže, robustnosť, softvérový prístup k vedľajším parametrom, miniaturizácia, minimalizácia prechodových odporov, normalizácia prepojenia s riadiacim systémom, minimalizácia stratového výkonu, digitalizácia analógových častí, auto diagnostika a odstraňovanie porúch, bezpečnosť. Chcel by som zdôrazniť, že sa nejedná o žiadne kopírovanie už existujúcich schém, všetko je mojím spôsobom prototyp, pričom som dodržiaval odporúčania od výrobcov súčiastok.

### 2.1. Kľbový modul Hitec

Kľbový modul Hitec je doska plošných spojov s riadiacou elektronikou, do ktorej sa pripája servomotor typu HS-5955TG, snímač polohy, koncové spínače, sériová komunikačná zbernica, napájanie výkonovej a logickej časti. Plošný spoj je uchytený na článku medzi dvoma stupňami voľnosti a elektricky prepojený

s kĺbom, ktorý sa vzhľadom na neho nepohybuje. Jednou z podmienok bola modularita a minimalizácia kabeláže. Každý stupeň voľnosti má vlastnú elektroniku pričom majú spoločné napájanie a sériovú komunikačnú zbernicu. Veľká výhoda takéhoto riešenia je, že medzi jednotlivými stupňami voľnosti je iba šesť vodičov a to sú Transmit Data, Receive Data, System Ground, +5V, +7.4V, Power Ground. V porovnaní s centralizovaným riadením, ktoré nie je súčasťou ramena, by pri prvom stupni voľnosti bolo minimálne 64 vodičov. Ostané moduly, ako sú Kľbový modul Tonegava a Kľbový modul zo snímaním sily úchopu vychádzajú z modulu Hitec, až na malé odlišnosti. Srdcom modulu je mikroprocesor Atmel mega8 [1] RISC architektúry. Je to najmenší procesor z rady ATmega, v ktorom som využil sériovú linku, A/D prevodníky, ISP rozhranie, PWM generátor, logické vstupy a výstupy. Taktovaný je externým kryštálom o frekvencii 14,7456 MHz, čo je optimálne z hľadiska nastavenia časovačov, komunikácie a takmer maximálneho výkonu mikroprocesora. Na informovanie o rôznych stavoch sú na plošnom spoji tri LED diódy (červená, zelená a modrá). Dve nízkovýkonové sú pripojené priamo na piny mikroprocesora, ich spotreba je menšia ako 2 mA [2] a jedna vysokosvietivá modrá, ktorá je spínaná z mikroprocesora cez MOSFET N kanál tranzistor typu IRF7341 [3]. Jej spotreba je 20mA [2] a slúži na indikovanie kritických stavov. Servomotor ma klasické 3 vodičové modelárske pripojenie +Vs, GND a S. Signál je pripojený cez 1KΩ ochranný rezistor priamo na výstup mikroprocesora. Poloha výstupného hriadeľa serva bola snímaná spätnoväzobným členom. Spätnoväzobný člen je odstránený a na miesto regulácie polohy sa teraz reguluje smer a rýchlosť otáčania. Požadovaná rýchlosť a smer výstupného hriadeľa je do riadiacej elektroniky zadávaná impulzne - šírko modulovaným (PWM) signálom s opakovacou frekvenciou 50Hz. Zastavenie je pri šírke riadiaceho impulzu 1,5 ms. Šírka impulzu sa mení od 1ms do 2 ms. Rušeniu sa zamedzilo oddelením napájania výkonovej a logickej časti. Aby bolo možné monitorovať zaťaženie alebo prípadné preťaženie bol pred záporný pol napájania servomotora zaradený 0,1Ω rezistor z odporového drôtu. Jeho merný odpor je 2,5 Ω/m. Pomocou úbytku napätia na tomto rezistore je možné nepriamo merať veľké prúdy. V tomto prípade ide o prúdy do 5,2A. Úbytok napätia je privedený na vstup A/D prevodníka mikroprocesora. Podobným spôsobom sa kontroluje vstupné napájacie napätie logickej a výkonovej časti. Pri statických a poruchových stavoch servomotora ho mikroprocesor odpája od zdroja. Tým sa šetrí energia a chráni sa ostatná elektronika. Ako výkonový prvok je použitý MOSFET P kanál tranzistor typu Si4435BDY [4]. Pri tomto type tranzistora závisí  $R_{DS}$  od napätia  $U_{GS}$  a tak je potrebné priviesť na Gate, čo najväčšie napätie, ktoré je v tomto prípade napätie určené pre výkonovú časť +7.4V. Keďže maximálne výstupné napätie mikroprocesora je najviac +5V musel byť ako medzičlen použitý ďalší MOSFET N kanál tranzistor typu IRF7341 [3]. Tým sa podarilo dosiahnuť

$R_{DS}$  tranzistora s P kanálom na hodnotu menšiu, ako  $0,02\Omega$  [4]. Pri prechode maximálneho elektronickou povoleného prúdu  $I_D = 5,2A$  je stratový výkon  $P_D$  vyžiarovaný MOSFET P kanál tranzistorom typu Si4435BDY menší než  $0,5408W$ , čo je v norme, lebo výrobca udáva  $P_{D_{MAX}}=0,9W$  pri  $70^\circ C$ . Tranzistor je typu puzdra SO-8, cez ktorého vývody je možné odvieť stratové teplo. Teplo sa odvádza do plošného spoja, kde je medená plocha na to vyhradená. Jeden modul má maximálny odber výkonovej časti  $5,2A$ . Ak je maximálne zaťažených všetkých 6 stupňov voľnosti, celková spotreba môže byť až  $31,2A$ . Moduly majú všetku kabeľáž v sérii, takže napríklad cez prvý modul by tiekol prúd  $31,2A$ . Na základe tak extrémneho prúdového zaťaženia je predimenzovanie výkonových konektorov nevyhnutné. Preto sú v poslednej verzii použité konektory typu T, ktoré sa vyznačujú veľkou styčnou plochou kontaktov a prúdovou zaťažiteľnosťou do  $40A$ . Ostatné konektory sú štandardné nízkovýkonové a určené hlavne ako signálové typu Wire to board. Snímač absolútnej polohy má 6 vodičové pripojenie a poskytuje 10 bitovú informáciu o uhle natočenia [5]. So snímačom sa komunikuje synchronne sériovo. Pre synchronizáciu snímača sa používa pin CLOCK a Chip select pre aktiváciu. Informácie o konkrétnych dátových a statusových bitoch dáva pin DATA a to v presne definovaných sledoch impulzov závisiacich na časovaní mikroprocesora. Napájanie snímača je v rozsahu  $4,5V < VDD < 5,5V$  a spotreba je menšia ako  $20mA$ . Je to elektromagneticky rotačný enkodér typu DB-MAB25 od firmy MEGATRON [5]. Špeciálnou časťou modulu je komunikačné rozhranie, ktoré môže fungovať na báze sériovej linky alebo ako záložný druh komunikácie je použitá zbernica I2C. Sériová linka ako taká je určená na komunikáciu medzi dvoma zariadeniami po dvoch vodičoch Receive a Transmit so spoločnou zemou. V tomto robotickom ramene však komunikuje 6 modulov s externým zariadením, ktoré udáva polohu. Dvojstavovú logiku sériovej linky som zmenil na trojstavovú a to na log „1“, log „0“ a stav vysokej impedancie. Avšak finálna logika je opäť dvojstavová ale stavy sú log „0“ a stav vysokej impedancie. Na zbernici ma každý modul pull UP rezistor, ktorý transformuje stav vysokej impedancie na stav kvázi log „1“. Vo voľnom zmysle sa dá povedať, že používam tvrdú log „0“ a mäkkú log „1“. Veľkou výhodou takejto fyzickej vrstvy je odolnosť voči poruchám a skratom na zbernici, ktoré nemajú fatálne následky na ostatnú elektroniku. Vodič Receive majú moduly spoločný a všetky súčasne prijímajú príkazy. Kábel Transmit používajú všetky moduly ale v danej chvíli vysielajú vždy iba jeden. Integrovaný obvod, ktorý konvertuje dvojstavovú logiku na trojstavovú je typu 74HC125 [6]. Je to logicky obvod na báze štvoritého trojstavového zbernicového buffra s oneskorením  $8ns$ . Ako záložná komunikácia v prípade zlyhania sériovej slúži I2C, ktorá používa tie isté vodiče. Zbernica I2C používa na komunikáciu medzi mikroprocesorom a I2C zariadením dvoj vodičové rozhranie. Jeden vodič je nositeľ nosného kmitočtu tzv. Clock line nazývaný

SCL. Druhý vodič, dátový, je nazývaný SDA. Keďže je to sériová zbernica, ktorá navyše podporuje viacero zariadení na jediných dvoch vodičoch, musí nejako adresovať tieto zariadenia. Každé zariadenie má vlastné 7 bitové číslo. Prenos je 8 bitový, s jedným ack bitom po každých 8 bitoch - potvrdenie prijatia dát [7]. Modul ďalej obsahuje tlačítko reset, jumper na dlhodobé zmeny chodu programu, konektor pre dva koncové spínače, ako ochrana pri zlyhaní snímača absolútnej polohy alebo servomotora. Na každom module sa nachádza konektor pre ISP programátor pomocou, ktorého je možné naprogramovať mikroprocesor. ISP programátor tvorí akýsi medzičlen medzi mikroprocesorom a paralelným portom počítača pomocou, ktorého sa presúva sled hexa znakov. Súčasná verzia modulu je tretia v poradí, kde sa podarilo zmenšiť jej celkovú plochu o 57%. V module sú otvory pre plastové dištančné stĺpiky M3 pomocou, ktorých je modul upevnený na kostru ramena. Zo strany konektorov je krycie plexisklo na ochranu elektroniky. Plošný spoj je navrhnutý v návrhovom systéme OrCAD a vyrobený dvojvrstvou technológiou s ochrannou maskou.

## 2.2. Kĺbový modul Tonegava

Kĺbový modul Tonegava je skoro totožný s Kĺbovým modulom Hitec. Rozdiel spočíva iba v druhu pripojeného servomotora a tým je typ PS-050 od firmy TONEGAVA SEIKO. Toto servo ma oddelenú logickú časť od výkonovej a preto bolo treba pozmeniť jeho pripojenie. Logická časť sa pripája trojvodičovo a obsahuje piny +5V, GND a Signál. Výkonová časť je pripojená dvojvodičovo a obsahuje piny +Vs a GND. Výhodou je pomerne veľký rozsah napájania pre výkonovú časť, ktorý je v rozmedzí od 6 do 12 voltov. Prúdová zaťažiteľnosť aj všetky ostatné parametre sú identické. Tento modul používa iba kĺb v druhom stupni voľnosti.

## 2.3. Modul so snímaním sily úchopu

Modul so snímaním sily úchopu je podobný s Kĺbovým modulom Hitec. Avšak nepripája sa tam snímač absolútnej polohy, ale tlakové senzory. Tlakové senzory sú umiestnené v mieste úchopu predmetu chápadlom. Je nemeckej výroby typu FSR-150AS od firmy FSR-Sensoren. Senzor mení svoj odpor v závislosti od zmeny tlaku v normálovom smere. Pre jeho kompaktné rozmery  $12 \times 12 \times 0,5mm$  sa výborne hodí na zabudovanie do chápadiel. Nevýhodou je jeho nelineárna prevodová charakteristika. Pri pôsobiacom tlaku od  $0,1$  do  $100N$  sa jeho odpor mení od niekoľkých megaohmov do odporu menšieho ako  $1K\Omega$ . Tento rozsah je pomerne problematické spracovať. Keď zoberieme do úvahy rameno sily, na ktoré je v chápadle pripojený hriadeľ servomotora, situácia sa dosť zjednoduší, pretože výsledná maximálna hodnota sily  $F_{MAX}$  je  $30N$ . Spodnú hranicu merania pôsobiacej sily som obmedzil na  $1N$ . Dostávam rozsah  $1$  až  $30N$ , čo

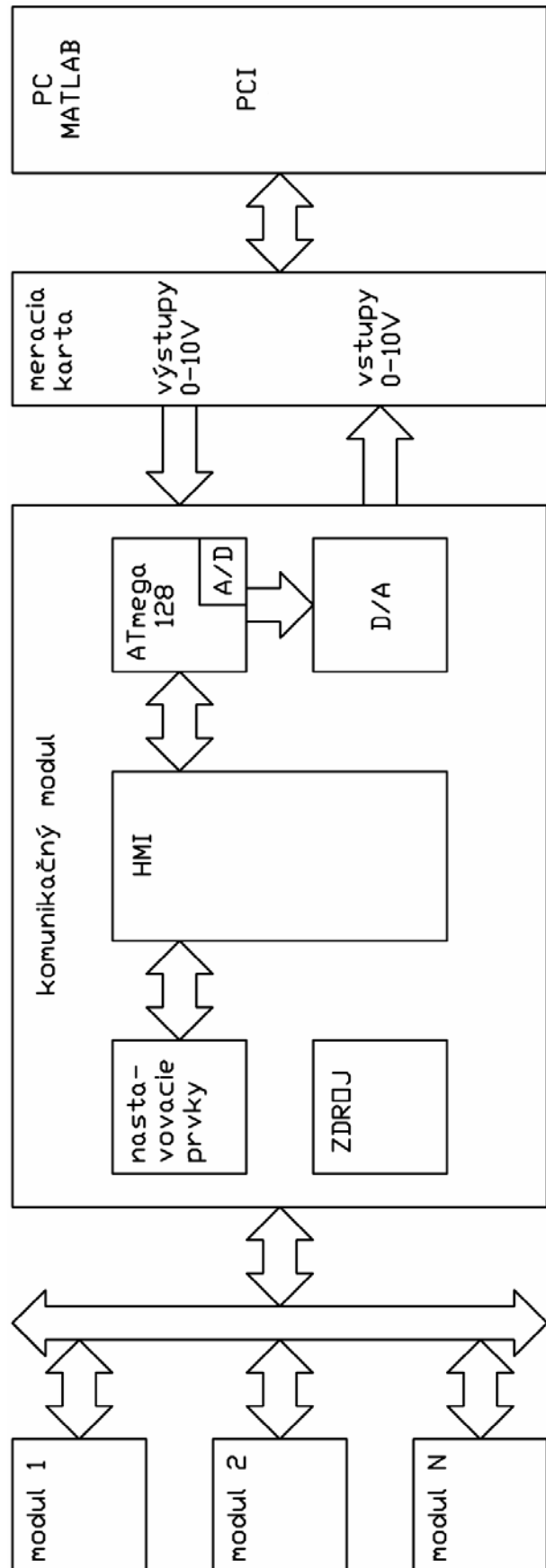
podľa prevodovej charakteristiky zodpovedá zmene odporu od 1 do 10 K $\Omega$ . Maximálny dovolený prúd snímačom je 1mA. Kontakty snímača sú zapojené do jednoduchého odporového deliča s teplotnou stabilitou  $\pm 100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ , ktorého výstupné napätie spracúva A/D prevodník mikroprocesora.

## 2.4. Modul ATmega128

Modul ATmega128 je doska plošných spojov, na ktorej je mikroprocesor Atmel mega128 [8] a minimálne možné potrebné množstvo diskretných súčiastok nevyhnutných na jeho bezproblémový chod. ATmega128 je v SMD puzdre a ťažko by sa vymieňal pri jeho poškodení. Tento modul je iba prevod SMD puzdra na klasické konektory typu Wire to board s rozstupom pinov 2,54 milimetra. Na plošnom spoji zo strany bottom je vyvedených 64 pinov, ďalej obsahuje tlačítko reset a nízkovykonovú LED diódu na indikovanie napájania. Modul sa v prípade poruchy jednoducho vymení za nový, ktorý je v zálohe. Prípadne sa dá použiť ako elegantné riešenie pre vývoj úplnej inej aplikácie ale momentálne slúži ako hlavná jednotka Komunikačného modulu.

## 2.5. Komunikačný modul a HMI

Komunikačný modul (Obr. 3.) je doska plošných spojov, ktorá nie je mechanickou súčasťou robotického ramena. Hlavná náplň tejto elektroniky je tvoriť medzičlen medzi meracou kartou počítača a robotickým ramenom. Ďalšou úlohou tejto elektroniky je unifikácia signálu na 0 - 10 V pre zadávanie uhla natočenia jednotlivých stupňov voľnosti a 0 - 10 V pre získavanie informácie o aktuálnom strave. Karta disponuje 8 napät'ovými normalizovanými vstupmi a 8 napät'ovými normalizovanými výstupmi. Ďalej obsahuje dve komunikačné rozhrania RS232 a špeciálny D-Sub konektor určený pre úplné pripojenie robotického ramena. Pridanú hodnotu tohto modulu predstavuje HMI (human machine interface). Užívateľ má možnosť priamo ovládať robotické rameno na čo mu slúžia dve tlačítka, signalizačné LED diódy, signalizačný piezo element, dva enkodérové potenciometre a LCD display, ktorý môže zobrazovať 4 x 20 znakov. Ako hlavný inteligentný člen tejto zostavy slúži mikroprocesor ATmega128, ktorý je súčasťou modulu ATmega128. Tento mikroprocesor je najväčší z radu ATMEL mega a plne sú využité všetky jeho piny. Komunikačný modul obsahuje kompletne napájanie pre výkonovú a logickú časť robotického ramena. Napájanie je filtrované pomerne veľkou kapacitou kondenzátorov. Ako ochranné prvky slúžia výkonové diódy a tavné poistky. Pre extrémne prúdové zaťaženie je stabilizované a monitorované len napájanie logickej časti. Výkonovú napájaču časť si sami kontrolujú moduly, ktoré sú súčasťou robotického ramena. Pre zadávanie uhla natočenia jednotlivých kĺbov robotického ramena je použitých osem A/D prevodníkov (Obr. 3.) mikroprocesora ATmega128. Pre optimálne fungovanie



Obr. 3. bloková schéma celého elektronického systému

A/D prevodníka je pred vstup zaradený napäťový delič tvorený precíznym, viac otáčkovým trimrom, ktorý prevádza vstupne napätie 0 – 10 V na 0 - 2,56 V s teplotnou stabilitou  $\pm 100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ . Toto prispôsobenie vyplýva z vnútorného zapojenia A/D prevodníka a tiež z potreby použitia vnútornej napäťovej referencie mikroprocesora. Prevodník je 10 bitový, doba prevodu sa pohybuje od 65 do 260  $\mu\text{s}$  a maximálny počet vzoriek je 15 kSPS. Pri výstupoch 0 -10 V, ktoré udávajú hodnotu o uhloch natočenia všetkých kĺbov, nastáva problém, pretože mikroprocesor neobsahuje žiadne D/A prevodníky. Pri výbere externého D/A prevodníka boli požadované tieto parametre: rozlíšenie aspoň 10 bitov, vnútorná napäťová referencia, jednoduché napájanie, paralelná vstupná zbernica, priamy napäťový výstup. Po prehodnotení technických a ekonomických stránok bol vybraný prevodník od firmy Maxim typu MAX530. MAX530 je nízkovýkonový 12 bitový D/A prevodník s napäťovým výstupom používajúci jednoduché alebo dvojité napájanie. Čip obsahuje vnútornú napäťovú referenciu a operačný zosilňovač, ktorý posilňuje jeho výstup. Výstup je možné nastaviť v konfigurácii: 0 až +2.048 V, +4.096 V,  $\pm 2.048$  V, alebo iný pri externej napäťovej referencii. Je kompatibilný so 4, 8 a 16 bitovými mikroprocesormi s dobou prevodu 25  $\mu\text{s}$ . Nevýhoda je, že má 8 bitové pripojenie. Takže v jednom momente nie je možné naviť všetkých 12 bitov. Nastavovať bity je možné dvoma spôsobmi. Buď zadávam 4 bity tri krát po sebe, alebo najprv zadám spodných 8 bitov a potom vrchné 4 bity. Okrem dátových bitov ma prevodník aj 6 obslužných, ktoré zabezpečujú správne ovládanie napäťového prevodu. Spolu je použitých 8 kusov prevodníkov. Ak by sa ovládal každý prevodník samostatne, bolo by potrebné 112 obslužných pinov mikroprocesorov, čo je nereálne. Preto majú všetky prevodníky spoločnú dátovú zbernicu. Niektoré obslužné piny prevodníka sú privedené na multiplexor typu HCT154N. Ku konkrétnemu prevodníku mikroprocesor pristupuje cez adresu zadávanú multiplexorom, ktoré na krátku dobu zabezpečia komunikačné spojenie. Multiplexory majú spoločnú adresnú zbernicu a priamo pripojenú na mikroprocesor. Týmto spôsobom je na obsluhu ôsmich 12 bitových prevodníkov potrebných len 16 pinov mikroprocesora. Napäťový výstup mal byť normalizovaný v rozsahu 0 až 10 V a tak bolo potrebné všetky výstupy D/A prevodníkov posilniť operačnými zosilňovačmi. Výhoda operačného zosilňovača je, že vôbec nezaťažuje výstup prevodníka a je možné jednoducho nastaviť jeho napäťové zosilnenie. Nevýhodou je, že vnáša do výstupnej veličiny chybu. Chyba môže byť spôsobená jeho nelinearitou, offsetom, tepelnou závislosťou a šumom. Preto nebolo možné použiť klasické typy ale precízne prístrojové, ktoré umožňujú doladiť parametre nesúvisiace so zosilnením. Tiež musí podporovať jednoduché napájanie a výstupné napätie v saturácii aspoň 10 V. Pre túto aplikáciu bol vhodný TLC271CP. TLC271CP je nízkošumový precízny operačný zosilňovač, ktorý pracuje aj s jednoduchým napájaním. Jeho typický šum je 25 nV.

Umožňuje nastavovať tri Bias módy. Tieto módy ovplyvňujú kľúčové parametre operačného zosilňovača a tiež umožňuje vybrať ten najlepší pre danú aplikáciu. Módy sú HIGH, MEDIUM a LOW. Každý z nich je akýmsi kompromisom medzi vlastnou spotrebou a potláčaním nežiaducich parametrov. Vo finále sa použil HIGH Bias mód, ktorý pri najväčšej vlastnej spotrebe umožňuje takmer vynulovať offset. Napájanie operačného zosilňovača je 12 V. Výstup je primerane zaťažený do zeme a cez ochranný rezistor je signál privedený na výstup 0 – 10 V komunikačného modulu. V komunikačnom module sú otvory pre dištančné stĺpiky M3, pomocou ktorých je pripevnený ochranný kryt. Plošný spoj je navrhnutý v návrhovej systéme OrCAD a vyrobený štvorvrstvou technológiou s nepájivou ochrannou maskou a popisom súčiastok.

### 3. Prepojenie modulov

Všetky kĺbové moduly sú prepojené paralelne, t.j. majú spoločnú komunikačnú zbernicu a napájanie. Konektory typu wire to board sú použité pre napájanie logiky a sériovej linky. Je to štvorpinový konektor, ktorý obsahuje Transmit Data, Receive Data, System Ground, +5V. Nezanedbateľný je problém vedenia vodičov v pohyblivých robotických systémoch. Z mechanického hľadiska je výhodné vodiče namáhať v skrute. Ale to je možné, iba v konštrukciách, kde sú osi pohyblivých častí duté. V nasej konštrukcii robotického ramena také niečo nie je možné, preto sa bolo treba zamerať na výber vhodných vodičov. Ako najvhodnejšie sa javia lanká, ktorých jadrá majú niekoľko desiatok, ba až stovák drôtov. Pre logiku a nízke výkony sú použité vysoko flexibilné silikónové meracie káble s prierezom  $0,25\text{mm}^2$ . V jadre sa nachádza 128 drôtov o priemere 0,05mm. Konektory typu T sú použité pre napájanie výkonovej časti. Pri tak veľkých prúdoch sa prejaví každý prechodový odpor. Posledný modul dostáva menovité napätie zmenšené o všetky úbytky v spojoch a konektoroch. Klasické konektory, ktoré sú bežne používané majú veľmi nízke prúdové zaťaženie a relatívne vysoký prechodový odpor. Profesionálne konektory, ktoré znesú požadované prúdy majú masívnu konštrukciu, ktorá je dôsledkom ochrany pre dotyk nebezpečného napätia. Konektory používané v modelárskej elektronike majú najlepší pomer medzi rozmermi a prechodovým odporom, ktorý sa pohybuje na úrovni jednotiek m $\Omega$ . Dimenzovaniu konektorov musí odpovedať aj prúdové dimenzovanie prívodných výkonových káblov. Pre rozvod napájania výkonovej časti sú použité vysoko flexibilné PVC meracie káble s prierezom  $2,5\text{mm}^2$ . V jadre sa nachádza 651 drôtov o priemere 0,07mm. Najextrémnejšie namáhané káble sú použité na prepojenie snímačov tlaku a modulu ramena. Snímač sa nachádza na technologickej hlavici, ktorá sa môže natáčať aj o 360°. Pretože prúd snímačom neprekročí 1 mA, bolo možné minimalizovať prierez káblu na minimum. Pre tento účel sú použité vysoko flexibilné pramene vodiča typu "LIFY" s prierezom  $0,05\text{mm}^2$ . V jadre sa nachádza 26 drôtov o priemere

0,05mm. Na prepojenie robotického ramena a komunikačného modulu sú použité špeciálne hybridné D-SUB konektory v ktorých sa nachádza 7 silnoprúdových a 17 signálnych pinov. Silnoprúdové piny sú určené pre prúdy do 40A a na ich povrchu sa nachádza vrstva zlata hrubá 0.8  $\mu\text{m}$ . Veľkosťou a rozmerovo je totožný s klasickým D-SUB 50 pinovým konektorom. Na komunikačnom module sa nachádzajú klasické 4 mm zdievky pre pripojenie banánikov. Takýto druh pripojenia je v školských laboratóriách veľmi rozšírený a praktický. Jedná sa o pripojenie vstupov a výstupov meracej karty počítača.

## 5. Návrh, výroba a testovanie

Pri návrhu som vychádzal zo skúsenosti, ktoré som získal pri návrhu iných robotických systémov a z doporučených zapojení od výrobcov. Väčšina zapojení je otestovaná na nepájivom poli. Keď výsledky testov neodpovedali požiadavkám, hľadali sa iné lepšie riešenia. Hlavným vývojovým nástrojom pri tvorbe elektroniky bol OrCAD od spoločnosti Cadence Design System. OrCAD je softvérový nástroj v prevažnej miere používaný pre návrh elektrických zariadení. Softvér je využívaný hlavne pri tvorbe dokumentácie elektrických zariadení pre výrobu plošných spojov aj pre automatizované systémy. Taktiež umožňuje kreslenie elektrických schém a ich simuláciu. Po finálnom návrhu bol vygenerovaný post script. Post script slúži ako podklad pre výrobu osvitových fólií. Ďalej bol vygenerovaný vrtačkový súbor, ktorý obsahuje x y súradnice dier na plošnom spoji. Osvitové fólie a vrtačkový súbor tvoria technologicky podklad pre výrobu plošných spojov. Väčšina plošných spojov robotického ramena je vyrobená dvojvrstvou technológiou s nepájivou ochrannou maskou. V komunikačnom module je najviac prípojov a tak bol vyrobený štvor-vrstvou technológiou s ochrannou maskou a popisom súčiastok. Na plošných spojoch bolo ďalším cieľom použiť čo najviac elektrických súčiastok s SMD montážou s cieľom minimalizovať rozmery. Súčiastky boli osadené ručne. Po zostavení bol každý modul otestovaný a po dobu niekoľkých hodín zaťažovaný na 100% maximálnej nominálnej záťaže. Kryty plošných spojov a držiaky konektorov boli navrhnuté v návrhovom systéme AutoCAD. AutoCAD od firmy Autodesk je asi najpoužívanejší predstaviteľ CAD systémov určený pre tvorbu strojárskych výkresov. Súbor z AutoCADu tvorí vstupne údaje do CNC stroja, ktorý vyrezal všetky kryty vodným lúčom. Kryty plošných spojov vyrezal rezací stroj IFB DWJ Mach 4. V reprografickom štúdiu boli osvitovou jednotkou Scitex Dolev 250 PSM výtlačné fólie pre výrobu plošných spojov. Pomocou osvitových fólií boli na SAV vyrobené plošné spoje.

## Zhodnotenie

V súčasnosti prebieha kompletná rekonštrukcia mechaniky robotického ramena. Doteraz boli testované všetky elektronické a mechanické súčasti iba samostatne. Po úplnej hotovej mechanike príde na rad kompletná elektronika, ktorá oživí doterajší statický model robotického ramena. Po zosúladiení všetkých mechatronických častí príde na rad tvorba základných algoritmov pre mikroprocesory nachádzajúce sa na remene. Potom bude možné aplikovať priame a inverzné kinematické úlohy, optimalizovať prejdenu drahú a riešiť rôzne iné matematické a riadiace úlohy. MATLAB nemusí byť nutne hlavným nástrojom, pretože meraciu kartu vie obsluhovať aj mnoho iných softvérových prostriedkov. Na základe skúseností z vývoja tejto verzie robotického ramena sa pravdepodobne bude navrhovať nová verzia s menšou hmotnosťou a lepšou dynamikou, ktorá bude pripevnená na mobilom robotickom podvozku. Na holonómnom podvozku bude výkonný riadiaci informačný systém schopný autonómne skúmať prostredie, v ktorom sa nachádza.

## Literatúra

- [1] Atmel Corporation: 8-bit AVR with 8K Bites In-System Programmable Flash , [online] Publikované máj.2008, Dostupné z [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/2486s.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/2486s.pdf)
- [2] Kingbright Corporation: Surface mount LED lamps, [online] Publikované v roku 2008, Dostupné z <http://www.sos.sk/pdf/king/king-smdled.pdf>
- [3] IR WORLD HEADQUARTERS: IRF7341 HEXFET Power MOSFET, [online] Publikované apríl.2005, Dostupné z <http://www.irf.com/product-info/datasheet/data/irf7341.pdf>
- [4] Vishay Corporation: P-Channel 30-V (D-S) MOSFET, [online] Publikované 03.03.2003, Dostupné z <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/vishay/72123.pdf>
- [5] Megatron Elektronik AG & Co.: Halleffekt absolutwertgeber serie MAB25 SER, [online] Publikované 28.02.2008, Dostupné z [http://megatron.de/Impuls1/DB\\_MAB25.pdf](http://megatron.de/Impuls1/DB_MAB25.pdf)
- [6] SGS-THOMSON Microelectronics: QUARD BUS BUFFERS (3-STALE), [online] Publikované v roku 1994, Dostupné z <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompson/Microelectronics/mXrytxt.pdf>
- [7] TwiNgMan: Zbernica I2C, [online] Publikované 17.04.2007, [citované 13.4.2009], Dostupné z <http://new.twingy.sk/rozne/zbernica-i2c>
- [8] Atmel Corporation: 8-bit AVR Microcontroller with 128K Bites In-System Programmable Flash , [online] Publikované december.2003, Dostupné z <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/atmel/2467S.pdf>