

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2008

Petr Vaša

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových
inženýrských studií

Konstrukce počítačem řízeného laboratorního zdroje

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových
inženýrských studií

Konstrukce počítačem řízeného laboratorního zdroje

Petr Váša

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Pracoviště : Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Fakulta Mechatroniky a mezioborových
inženýrských studií

Technická univerzita v Liberci
Studentská 2, 461 17 LIBEREC 1

Školitel: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146114012

Rozsah bakalářské práce

Počet stran: 57
Počet obrázků: 9
Počet tabulek: 8

Rozsah příloh bakalářské práce

Počet stran: 4
Počet obrázků: 7
Počet tabulek: 0

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Akademický rok 2007/2008

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Petr Váša**

studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Vedoucí ústavu Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto bakalářskou práci:

Název tématu: **Konstrukce počítačem řízeného laboratorního zdroje**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku stabilizovaných laboratorních zdrojů.
2. Seznamte se s komunikačními protokoly používanými laboratorními přístroji.
3. Zvolte vhodný typ mikropočítače a vytvořte program pro řízení a komunikaci s PC.
4. Proveďte návrh výkonové a řídicí části zdroje včetně návrhu plošného spoje.
5. Zhotovte jeden funkční vzorek navrženého laboratorního zdroje.
6. Laboratorní zdroj otestujte, vytvořte jednoduchý demonstrační software.
7. Zdokumentujte informace pro další využití a výrobu přístroje.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1329, Liberec 1
PSČ 461 17

100
1 774/08 Mb

RS
52 s., [4] s. příl.
ob, řad.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci 6. 4. 2008

Petr Vaňha
.....

Abstrakt

Konstrukce počítačem řízeného laboratorního zdroje

Petr Váša

Předmětem této práce je konstrukce počítačem řízeného laboratorního zdroje, jako základního prvku laboratorního vybavení. Cílem je přístroj navrhnout tak, aby bylo možné jej samostatně používat stejně jednoduše, jako klasický analogový laboratorní zdroj, nebo ve spolupráci s řídicím počítačem jako součást rozsáhlejšího automatizovaného měřicího pracoviště. Přestože laboratorní zdroje této kategorie již v dnešní době patří mezi základní položky sortimentu většiny renomovaných výrobců laboratorní techniky, může být z různých důvodů, a to nikoli pouze finančních, žádoucí takový zdroj zhotovit přestavbou stávajícího čistě analogového přístroje, respektive návrhem a vestavbou číslicové řídicí části. Touto cestou se ubírá i praktická část této práce. Je proveden rozbor zapojení jednoho konkrétního typu laboratorního zdroje a návrh řídicí části, který řeší přizpůsobení stávajícího zapojení, manuální ovládání přístroje a komunikaci s počítačem, včetně tvorby jednoduchého komunikačního protokolu. Výsledkem je přístroj, který sice nedosahuje parametrů seriově vyráběných programovatelných zdrojů, pořizovací náklady jsou však přibližně o jeden řád nižší.

Klíčová slova: zdroj, počítačové řízení, mikroprocesor, PIC.

Abstract

Construction of computer controlled laboratory power supply

Petr Váša

The subject of this work is construction of a computer controlled laboratory power supply as a basic item of laboratory equipment. The aim is to design the appliance so that it could be used easily like classical analog laboratory power supply, or in cooperation with control computer as a part of larger automatic measuring unit. Eventhough laboratory instruments of this category already belong to basic products of renowned producers of laboratory equipment, it can be desirable to make such a power supply by installing digital control unit into simple analog appliance. This is the aim that has been also followed in the practical part of this work. It consists of an analysis of connection of one type of laboratory power supply and design of control unit. This solves the adjustment of existing connection, manual operating of the appliance and communication with the computer together with producing simple communication protokol. The result is appliance which doesn't have the parameters of top fabricated programmable power supply but which is considerably cheaper to obtain.

Keywords: Power Supply, Computer Controlling, Microcontroller, PIC.

1. Úvod 12

2. Popis přístroje 13

3. Konstrukce 14

4. Programování 15

5. Závěr 17

6. Seznam literatury 17

7. Seznam obrázků 18

8. Seznam tabulek 19

9. Seznam příloh 20

10. Seznam zkoušek 21

11. Seznam výpočtů 22

12. Seznam schém 23

13. Seznam součástí 24

14. Seznam měření 25

15. Seznam výpočtů 26

16. Seznam schém 27

17. Seznam součástí 28

18. Seznam měření 29

19. Seznam výpočtů 30

20. Seznam schém 31

21. Seznam součástí 32

22. Seznam měření 33

23. Seznam výpočtů 34

24. Seznam schém 35

25. Seznam součástí 36

26. Seznam měření 37

27. Seznam výpočtů 38

28. Seznam schém 39

29. Seznam součástí 40

30. Seznam měření 41

31. Seznam výpočtů 42

32. Seznam schém 43

33. Seznam součástí 44

34. Seznam měření 45

35. Seznam výpočtů 46

36. Seznam schém 47

37. Seznam součástí 48

38. Seznam měření 49

39. Seznam výpočtů 50

40. Seznam schém 51

41. Seznam součástí 52

42. Seznam měření 53

43. Seznam výpočtů 54

44. Seznam schém 55

45. Seznam součástí 56

46. Seznam měření 57

47. Seznam výpočtů 58

48. Seznam schém 59

49. Seznam součástí 60

50. Seznam měření 61

51. Seznam výpočtů 62

52. Seznam schém 63

53. Seznam součástí 64

54. Seznam měření 65

55. Seznam výpočtů 66

56. Seznam schém 67

57. Seznam součástí 68

58. Seznam měření 69

59. Seznam výpočtů 70

60. Seznam schém 71

61. Seznam součástí 72

62. Seznam měření 73

63. Seznam výpočtů 74

64. Seznam schém 75

65. Seznam součástí 76

66. Seznam měření 77

67. Seznam výpočtů 78

68. Seznam schém 79

69. Seznam součástí 80

70. Seznam měření 81

71. Seznam výpočtů 82

72. Seznam schém 83

73. Seznam součástí 84

74. Seznam měření 85

75. Seznam výpočtů 86

76. Seznam schém 87

77. Seznam součástí 88

78. Seznam měření 89

79. Seznam výpočtů 90

80. Seznam schém 91

81. Seznam součástí 92

82. Seznam měření 93

83. Seznam výpočtů 94

84. Seznam schém 95

85. Seznam součástí 96

86. Seznam měření 97

87. Seznam výpočtů 98

88. Seznam schém 99

89. Seznam součástí 100

90. Seznam měření 101

91. Seznam výpočtů 102

92. Seznam schém 103

93. Seznam součástí 104

94. Seznam měření 105

95. Seznam výpočtů 106

96. Seznam schém 107

97. Seznam součástí 108

98. Seznam měření 109

99. Seznam výpočtů 110

100. Seznam schém 111

101. Seznam součástí 112

102. Seznam měření 113

103. Seznam výpočtů 114

104. Seznam schém 115

105. Seznam součástí 116

106. Seznam měření 117

107. Seznam výpočtů 118

108. Seznam schém 119

109. Seznam součástí 120

110. Seznam měření 121

111. Seznam výpočtů 122

112. Seznam schém 123

113. Seznam součástí 124

114. Seznam měření 125

115. Seznam výpočtů 126

116. Seznam schém 127

117. Seznam součástí 128

118. Seznam měření 129

119. Seznam výpočtů 130

120. Seznam schém 131

121. Seznam součástí 132

122. Seznam měření 133

123. Seznam výpočtů 134

124. Seznam schém 135

125. Seznam součástí 136

126. Seznam měření 137

127. Seznam výpočtů 138

128. Seznam schém 139

129. Seznam součástí 140

130. Seznam měření 141

131. Seznam výpočtů 142

132. Seznam schém 143

133. Seznam součástí 144

134. Seznam měření 145

135. Seznam výpočtů 146

136. Seznam schém 147

137. Seznam součástí 148

138. Seznam měření 149

139. Seznam výpočtů 150

140. Seznam schém 151

141. Seznam součástí 152

142. Seznam měření 153

143. Seznam výpočtů 154

144. Seznam schém 155

145. Seznam součástí 156

146. Seznam měření 157

147. Seznam výpočtů 158

148. Seznam schém 159

149. Seznam součástí 160

150. Seznam měření 161

151. Seznam výpočtů 162

152. Seznam schém 163

153. Seznam součástí 164

154. Seznam měření 165

155. Seznam výpočtů 166

156. Seznam schém 167

157. Seznam součástí 168

158. Seznam měření 169

159. Seznam výpočtů 170

160. Seznam schém 171

161. Seznam součástí 172

162. Seznam měření 173

163. Seznam výpočtů 174

164. Seznam schém 175

165. Seznam součástí 176

166. Seznam měření 177

167. Seznam výpočtů 178

168. Seznam schém 179

169. Seznam součástí 180

170. Seznam měření 181

171. Seznam výpočtů 182

172. Seznam schém 183

173. Seznam součástí 184

174. Seznam měření 185

175. Seznam výpočtů 186

176. Seznam schém 187

177. Seznam součástí 188

178. Seznam měření 189

179. Seznam výpočtů 190

180. Seznam schém 191

181. Seznam součástí 192

182. Seznam měření 193

183. Seznam výpočtů 194

184. Seznam schém 195

185. Seznam součástí 196

186. Seznam měření 197

187. Seznam výpočtů 198

188. Seznam schém 199

189. Seznam součástí 200

190. Seznam měření 201

191. Seznam výpočtů 202

192. Seznam schém 203

193. Seznam součástí 204

194. Seznam měření 205

195. Seznam výpočtů 206

196. Seznam schém 207

197. Seznam součástí 208

198. Seznam měření 209

199. Seznam výpočtů 210

200. Seznam schém 211

201. Seznam součástí 212

202. Seznam měření 213

203. Seznam výpočtů 214

204. Seznam schém 215

205. Seznam součástí 216

206. Seznam měření 217

207. Seznam výpočtů 218

208. Seznam schém 219

209. Seznam součástí 220

210. Seznam měření 221

211. Seznam výpočtů 222

212. Seznam schém 223

213. Seznam součástí 224

214. Seznam měření 225

215. Seznam výpočtů 226

216. Seznam schém 227

217. Seznam součástí 228

218. Seznam měření 229

219. Seznam výpočtů 230

220. Seznam schém 231

221. Seznam součástí 232

222. Seznam měření 233

223. Seznam výpočtů 234

224. Seznam schém 235

225. Seznam součástí 236

226. Seznam měření 237

227. Seznam výpočtů 238

228. Seznam schém 239

229. Seznam součástí 240

230. Seznam měření 241

231. Seznam výpočtů 242

232. Seznam schém 243

233. Seznam součástí 244

234. Seznam měření 245

235. Seznam výpočtů 246

236. Seznam schém 247

237. Seznam součástí 248

238. Seznam měření 249

239. Seznam výpočtů 250

240. Seznam schém 251

241. Seznam součástí 252

242. Seznam měření 253

243. Seznam výpočtů 254

244. Seznam schém 255

245. Seznam součástí 256

246. Seznam měření 257

247. Seznam výpočtů 258

248. Seznam schém 259

249. Seznam součástí 260

250. Seznam měření 261

251. Seznam výpočtů 262

252. Seznam schém 263

253. Seznam součástí 264

254. Seznam měření 265

255. Seznam výpočtů 266

256. Seznam schém 267

257. Seznam součástí 268

258. Seznam měření 269

259. Seznam výpočtů 270

260. Seznam schém 271

261. Seznam součástí 272

262. Seznam měření 273

263. Seznam výpočtů 274

264. Seznam schém 275

265. Seznam součástí 276

266. Seznam měření 277

267. Seznam výpočtů 278

268. Seznam schém 279

269. Seznam součástí 280

270. Seznam měření 281

271. Seznam výpočtů 282

272. Seznam schém 283

273. Seznam součástí 284

274. Seznam měření 285

275. Seznam výpočtů 286

276. Seznam schém 287

277. Seznam součástí 288

278. Seznam měření 289

279. Seznam výpočtů 290

280. Seznam schém 291

281. Seznam součástí 292

282. Seznam měření 293

283. Seznam výpočtů 294

284. Seznam schém 295

285. Seznam součástí 296

286. Seznam měření 297

287. Seznam výpočtů 298

288. Seznam schém 299

289. Seznam součástí 300

290. Seznam měření 301

291. Seznam výpočtů 302

292. Seznam schém 303

293. Seznam součástí 304

294. Seznam měření 305

295. Seznam výpočtů 306

296. Seznam schém 307

297. Seznam součástí 308

298. Seznam měření 309

299. Seznam výpočtů 310

300. Seznam schém 311

301. Seznam součástí 312

302. Seznam měření 313

303. Seznam výpočtů 314

304. Seznam schém 315

305. Seznam součástí 316

306. Seznam měření 317

307. Seznam výpočtů 318

308. Seznam schém 319

309. Seznam součástí 320

310. Seznam měření 321

311. Seznam výpočtů 322

312. Seznam schém 323

313. Seznam součástí 324

314. Seznam měření 325

315. Seznam výpočtů 326

316. Seznam schém 327

317. Seznam součástí 328

318. Seznam měření 329

319. Seznam výpočtů 330

320. Seznam schém 331

321. Seznam součástí 332

322. Seznam měření 333

323. Seznam výpočtů 334

324. Seznam schém 335

325. Seznam součástí 336

326. Seznam měření 337

327. Seznam výpočtů 338

328. Seznam schém 339

329. Seznam součástí 340

330. Seznam měření 341

331. Seznam výpočtů 342

332. Seznam schém 343

333. Seznam součástí 344

334. Seznam měření 345

335. Seznam výpočtů 346

336. Seznam schém 347

337. Seznam součástí 348

338. Seznam měření 349

339. Seznam výpočtů 350

340. Seznam schém 351

341. Seznam součástí 352

342. Seznam měření 353

343. Seznam výpočtů 354

344. Seznam schém 355

345. Seznam součástí 356

346. Seznam měření 357

347. Seznam výpočtů 358

348. Seznam schém 359

349. Seznam součástí 360

350. Seznam měření 361

351. Seznam výpočtů 362

352. Seznam schém 363

353. Seznam součástí 364

354. Seznam měření 365

355. Seznam výpočtů 366

356. Seznam schém 367

357. Seznam součástí 368

358. Seznam měření 369

359. Seznam výpočtů 370

360. Seznam schém 371

361. Seznam součástí 372

362. Seznam měření 373

363. Seznam výpočtů 374

364. Seznam schém 375

365. Seznam součástí 376

366. Seznam měření 377

367. Seznam výpočtů 378

368. Seznam schém 379

369. Seznam součástí 380

370. Seznam měření 381

371. Seznam výpočtů 382

372. Seznam schém 383

373. Seznam součástí 384

374. Seznam měření 385

375. Seznam výpočtů 386

376. Seznam schém 387

377. Seznam součástí 388

378. Seznam měření 389

379. Seznam výpočtů 390

380. Seznam schém 391

381. Seznam součástí 392

382. Seznam měření 393

383. Seznam výpočtů 394

384. Seznam schém 395

385. Seznam součástí 396

386. Seznam měření 397

387. Seznam výpočtů 398

388. Seznam schém 399

389. Seznam součástí 400

390. Seznam měření 401

391. Seznam výpočtů 402

392. Seznam schém 403

393. Seznam součástí 404

394. Seznam měření 405

395. Seznam výpočtů 406

396. Seznam schém 407

397. Seznam součástí 408

398. Seznam měření 409

399. Seznam výpočtů 410

400. Seznam schém 411

401. Seznam součástí 412

402. Seznam měření 413

403. Seznam výpočtů 414

404. Seznam schém 415

405. Seznam součástí 416

406. Seznam měření 417

407. Seznam výpočtů 418

408. Seznam schém 419

409. Seznam součástí 420

410. Seznam měření 421

411. Seznam výpočtů 422

412. Seznam schém 423

413. Seznam součástí 424

414. Seznam měření 425

415. Seznam výpočtů 426

416. Seznam schém 427

417. Seznam součástí 428

418. Seznam měření 429

419. Seznam výpočtů 430

420. Seznam schém 431

421. Seznam součástí 432

422. Seznam měření 433

423. Seznam výpočtů 434

424. Seznam schém 435

425. Seznam součástí 436

426. Seznam měření 437

427. Seznam výpočtů 438

428. Seznam schém 439

429. Seznam součástí 440

430. Seznam měření 441

431. Seznam výpočtů 442

432. Seznam schém 443

433. Seznam součástí 444

434. Seznam měření 445

435. Seznam výpočtů 446

436. Seznam schém 447

437. Seznam součástí 448

438. Seznam měření 449

439. Seznam výpočtů 450

440. Seznam schém 451

441. Seznam součástí 452

442. Seznam měření 453

443. Seznam výpočtů 454

444. Seznam schém 455

445. Seznam součástí 456

446. Seznam měření 457

447. Seznam výpočtů 458

448. Seznam schém 459

449. Seznam součástí 460

450. Seznam měření 461

451. Seznam výpočtů 462

452. Seznam schém 463

453. Seznam součástí 464

454. Seznam měření 465

455. Seznam výpočtů 466

456. Seznam schém 467

457. Seznam součástí 468

458. Seznam měření 469

459. Seznam výpočtů 470

460. Seznam schém 471

461. Seznam součástí 472

462. Seznam měření 473

463. Seznam výpočtů 474

464. Seznam schém 475

465. Seznam součástí 476

466. Seznam měření 477

467. Seznam výpočtů 478

468. Seznam schém 479

469. Seznam součástí 480

470. Seznam měření 481

471. Seznam výpočtů 482

472. Seznam schém 483

473. Seznam součástí 484

474. Seznam měření 485

475. Seznam výpočtů 486

476. Seznam schém 487

477. Seznam součástí 488

478. Seznam měření 489

479. Seznam výpočtů 490

480. Seznam schém 491

481. Seznam součástí 492

482. Seznam měření 493

483. Seznam výpočtů 494

484. Seznam schém 495

485. Seznam součástí 496

486. Seznam měření 497

487. Seznam výpočtů 498

488. Seznam schém 499

489. Seznam součástí 500

490. Seznam měření 501

491. Seznam výpočtů 502

492. Seznam schém 503

493. Seznam součástí 504

494. Seznam měření 505

495. Seznam výpočtů 506

496. Seznam schém 507

497. Seznam součástí 508

498. Seznam měření 509

499. Seznam výpočtů 510

500. Seznam schém 511

501. Seznam součástí 512

502. Seznam měření 513

503. Seznam výpočtů 514

504. Seznam schém 515

505. Seznam součástí 516

506. Seznam měření 517

507. Seznam výpočtů 518

508. Seznam schém 519

509. Seznam součástí 520

510. Seznam měření 521

511. Seznam výpočtů 522

512. Seznam schém 523

513. Seznam součástí 524

514. Seznam měření 525

515. Seznam výpočtů 526

516. Seznam schém 527

517. Seznam součástí 528

518. Seznam měření 529

519. Seznam výpočtů 530

520. Seznam schém 531

521. Seznam součástí 532

522. Seznam měření 533

523. Seznam výpočtů 534

524. Seznam schém 535

525. Seznam součástí 536

526. Seznam měření 537

527. Seznam výpočtů 538

528. Seznam schém 539

529. Seznam součástí 540

530. Seznam měření 541

531. Seznam výpočtů 542

532. Seznam schém 543

533. Seznam součástí 544

534. Seznam měření 545

535. Seznam výpočtů 546

536. Seznam schém 547

537. Seznam součástí 548

538. Seznam měření 549

539. Seznam výpočtů 550

540. Seznam schém 551

541. Seznam součástí 552

542. Seznam měření 553

543. Seznam výpočtů 554

544. Seznam schém 555

545. Seznam součástí 556

546. Seznam měření 557

547. Seznam výpočtů 558

548. Seznam schém 559

549. Seznam součástí 560

550. Seznam měření 561

551. Seznam výpočtů 562

552. Seznam schém 563

553. Seznam součástí 564

554. Seznam měření 565

555. Seznam výpočtů 566

556. Seznam schém 567

557. Seznam součástí 568

558. Seznam měření 569

559. Seznam výpočtů 570

560. Seznam schém 571

561. Seznam součástí 572

562. Seznam měření 573

563. Seznam výpočtů 574

564. Seznam schém 575

565. Seznam součástí 576

566. Seznam měření 577

567. Seznam výpočtů 578

568. Seznam schém 579

569. Seznam součástí 580

570. Seznam měření 581

571. Seznam výpočtů 582

572. Seznam schém 583

573. Seznam součástí 584

574. Seznam měření 585

575. Seznam výpočtů 586

576. Seznam schém 587

577. Seznam součástí 588

578. Seznam měření 589

579. Seznam výpočtů 590

580. Seznam schém 591

581. Seznam součástí 592

582. Seznam měření 593

583. Seznam výpočtů 594

584. Seznam schém 595

585. Seznam součástí 596

586. Seznam měření 597

587. Seznam výpočtů 598

588. Seznam schém 599

589. Seznam součástí 600

590. Seznam měření 601

591. Seznam výpočtů 602

592. Seznam schém 603

593. Seznam součástí 604

594. Seznam měření 605

595. Seznam výpočtů 606

596. Seznam schém 607

597. Seznam součástí 608

598. Seznam měření 609

599. Seznam výpočtů 610

600. Seznam schém 611

601. Seznam součástí 612

602. Seznam měření 613

603. Seznam výpočtů 614

604. Seznam schém 615

605. Seznam součástí 616

606. Seznam měření 617

607. Seznam výpočtů 618

608. Seznam schém 619

609. Seznam součástí 620

610. Seznam měření 621

611. Seznam výpočtů 622

612. Seznam schém 623

613. Seznam součástí 624

614. Seznam měření 625

615. Seznam výpočtů 626

616. Seznam schém 627

617. Seznam součástí 628

618. Seznam měření 629

619. Seznam výpočtů 630

620. Seznam schém 631

621. Seznam součástí 632

622. Seznam měření 633

623. Seznam výpočtů 634

624. Seznam schém 635

625. Seznam součástí 636

626. Seznam měření 637

627. Seznam výpočtů 638

628. Seznam schém 639

629. Seznam součástí 640

630. Seznam měření 641

631. Seznam výpočtů 642

632. Seznam schém 643

633. Seznam součástí 644

634. Seznam měření 645

635. Seznam výpočtů 646

636. Seznam schém 647

637. Seznam součástí 648

638. Seznam měření 649

639. Seznam výpočtů 650

640. Seznam schém 651

641. Seznam součástí 652

642. Seznam měření 653

643. Seznam výpočtů 654

644. Seznam schém 655

645. Seznam součástí 656

646. Seznam měření 657

647. Seznam výpočtů 658

648. Seznam schém 659

649. Seznam součástí 660

650. Seznam měření 661

651. Seznam výpočtů 662

652. Seznam schém 663

653. Seznam součástí 664

654. Seznam měření 665

655. Seznam výpočtů 666

656. Seznam schém 667

657. Seznam součástí 668

658. Seznam měření 669

659. Seznam výpočtů 670

660. Seznam schém 671

661. Seznam součástí 672

662. Seznam měření 673

663. Seznam výpočtů 674

664. Seznam schém 675

665. Seznam součástí 676

666. Seznam měření 677

667. Seznam výpočtů 678

668. Seznam schém 679

669. Seznam součástí 680

670. Seznam měření 681

671. Seznam výpočtů 682

672. Seznam schém 683

673. Seznam součástí 684

674. Seznam měření 685

675. Seznam výpočtů 686

676. Seznam schém 687

677. Seznam součástí 688

678. Seznam měření 689

679. Seznam výpočtů 690

680. Seznam schém 691

681. Seznam součástí 692

682. Seznam měření 693

683. Seznam výpočtů 694

684. Seznam schém 695

685. Seznam součástí 696

686. Seznam měření 697

687. Seznam výpočtů 6

Obsah

Seznam použitých symbolů	8
Seznam použitých zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
Úvod	12
1 Napájecí zdroje	13
1.1 Dělení napájecích zdrojů	13
1.2 Parametry ideálních napájecích zdrojů	13
1.3 Typická konstrukční řešení	14
1.3.1 Zdroje se spojitou stabilizací	14
1.3.2 Spínané zdroje	15
2 Laboratorní zdroje	17
2.1 Specifika konstrukce	17
2.2 Sledované parametry laboratorních zdrojů	19
3 Komunikace laboratorních přístrojů s počítačem	20
3.1 Fyzická rozhraní	20
3.2 Komunikační protokoly	21
3.3 Návrh vlastního komunikačního protokolu	22
4 Analogová část	24
4.1 Popis zapojení zdroje Statron 2223	24
4.1.1 Výkonová část	24
4.1.2 Řídící část	25
4.2 Obvodová analýza	27
4.3 Přizpůsobení pro počítačové řízení	28
4.3.1 Řídící vstupy	28
4.3.2 Úpravy napájení a transformátoru	29
4.3.3 Změny v osazení	30
5 Digitální řídicí část	32
5.1 D/A převod	32
5.1.1 Volba rozsahů a rozlišení	32
5.1.2 Výběr D/A převodníku	33
5.1.3 Přizpůsobení rozsahu	33

5.1.4	Kompenzace offsetu	34
5.1.5	Komunikace převodníku s mikropočítačem	35
5.2	Ovládací prvky	36
5.3	Komunikace s počítačem	37
5.3.1	Problematika galvanického oddělení	37
5.3.2	Realizace komunikačního rozhraní	38
5.3.3	Návrh izolačního transformátoru	38
5.4	Výběr mikroprocesoru	40
5.5	Přiřazení vývodů	40
5.6	Konstrukční provedení	42
6	Program mikroprocesoru	43
6.1	Inicializace	43
6.2	Hlavní smyčka	44
6.3	Přerušení	44
6.4	Obsluha manuálních ovládacích prvků	45
6.4.1	Detekce stisku tlačítek	45
6.4.2	Vyhodnocení směru otáčení rotačního kodéru	45
6.5	Komunikace s D/A převodníkem	46
6.6	Příjem znaku po sériové lince	47
6.7	Vyhodnocení a obsluha příkazů	48
7	Demonstrační software pro PC	49
	Závěr	51
	Literatura	52
	Přílohy bakalářské práce	53
A	Původní schéma zdroje Statron 2223	54
B	Upravené schéma zdroje Statron 2223	55
C	Schéma digitální řídicí části	56
D	Layouty DPS a rozložení součástek	57
	Přílohy v elektronické formě	CD

Seznam použitých symbolů

A	$[-]$	zisk zesilovače
A_L	$[H]$	materiálová a rozměrová konstanta
D	$[-]$	dekadické vyjádření vstupního slova D/A převodníku
G	$[S]$	elektrická vodivost
G	$[-]$	zisk zesilovače
I	$[A]$	elektrický proud
L	$[H]$	indukčnost
l_J	$[m]$	střední délka dráhy magnetického toku
μ_0	$[H/m]$	permeabilita vakua
μ_R	$[-]$	relativní permeabilita
n	$[-]$	počet bitů D/A převodníku
N	$[H]$	počet závitů
P	$[\Omega]$	hodnota proměnného elektrického odporu
Q		kvantizační krok D/A převodníku – jednotka dle veličiny
R	$[\Omega]$	elektrický odpor
S_j	$[m^2]$	kolmý průřez jádra
U	$[V]$	elektrické napětí

Seznam použitých zkratek

CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (technologie výroby integrovaných obvodů)
D/A	Číslicově analogový převodník
DPS	Deska plošného spoje
EIA	Electronic Industries Alliance
GPIO	General Purpose Interface Bus
HW	Hardware
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IRC	Inkrementální rotační čidlo
LDO	Low Drop Out – nízký úbytek (např. napětí)
LSB	Least significant bit – nejméně významný bit
MSB	Most significant bit – nejvíce významný bit
OZ	Operační zesilovač
PCI	Rozšiřující rozhraní počítače
RS232	komunikační rozhraní počítače
RS485	průmyslová komunikační sběrnice
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments
SPI	Serial Peripheral Interface
SSP	Synchronous Serial Port
TIA	Telecommunications Industry Association
TTL	Transistor Transistor Logic (technologie výroby integrovaných obvodů)
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (univerzální synchronní/asynchronní přijímač/vysílač)
USB	Universal Serial Bus – komunikační rozhraní počítače

Seznam obrázků

1.1	Náhradní schémata lineárních zdrojů	13
1.2	VA charakteristiky lineárních zdrojů	14
1.3	Blokové schéma lineárního zdroje	15
2.1	Pracovní oblast laboratorních zdrojů	18
4.1	Zjednodušené náhradní schéma zdroje	27
4.2	Náhrada potenciometrů D/A převodníky	29
5.1	Kompenzace offsetu DA převodníku	34
6.1	Průběh výstupních signálů kodéru při otáčení	45
7.1	Náhled okna demonstračního programu	50

Seznam tabulek

3.1	Příkazy komunikačního protokolu	23
4.1	Signály pro připojení digitální části	30
4.2	Změny v osazení DPS zdroje	31
5.1	Volba rozsahů a rozlišení D/A převodníků	32
5.2	Rozsahy a velikosti kroku v různých místech obvodu	33
5.3	Formát datového rámce D/A převodníku MCP4822	35
5.4	Volba jemného a hrubého kroku	36
5.5	Signály mikroprocesoru a jejich funkce	41

Úvod

S rozvojem výpočetní techniky a číslicových měřicích systémů se u moderních napájecích zdrojů vyžaduje schopnost komunikace s nadřazenými řídicími systémy, které přebírají roli obsluhy. Takové zdroje jsou již konstrukčně podstatně složitější, než obyčejné analogové přístroje, ovšem jejich základem jsou opět pouze kvalitní analogové obvody doplněné o řídicí digitální část. V případě, že se vyskytne potřeba vybavit pracoviště moderním počítačově řízeným zdrojem, je v podstatě několik možností.

Nejjednodušší (ale bohužel i nejnákladnější) je zakoupit hotový přístroj sériové výroby. Výrobci ale většinou počítačovým řízením vybavují až modely vyšších řad, které mají vysokou přesnost a více kanálů, což ve výsledku vede na dosti vysokou cenu zdroje jako celku. Pokud parametry takového špičkového přístroje nevyužijeme, není jeho pořízení ekonomické. Další možností, která se nabízí, je použít analogový zdroj vybavený vstupy (analogovými) pro externí řízení a tyto vstupy budit analogovými výstupy z multifunkční měřicí karty. Toto řešení je poměrně univerzální, neboť umožňuje současně i měřit a v případě potřeby používat obě zařízení zvlášť, ovšem má i své nevýhody. Na prvním místě bude opět nejspíše cena karty a na druhém její nepřilíš snadná přenositelnost (v případě karet do PCI sběrnice). Krajní možností je stavba nového zdroje jako celku. Zde je výhodou snad jen to, že lze zdroj postavit přesně na míru zamýšlené aplikaci, což ovšem při potřebě jednoho či několika málo kusů nemůže zastínit řadu nevýhod, mechanickým provedením počínaje a vynaloženými náklady a časem stráveným při vývoji konče. Kompromisem mezi posledními dvěma zmíněnými cestami je vestavba digitální řídicí části do jednoduchého analogového zdroje. Tato možnost je zvláště zajímavá, pokud bude zdroj sloužit v méně náročné aplikaci, kde lze sice slevit z přesnosti, ale přesto je vyžadováno počítačové řízení. Právě taková situace byla příčinou vzniku této práce.

Cílem praktické části bylo prozkoumání možností jednoho konkrétního typu laboratorního zdroje z hlediska vhodnosti jeho analogové části pro externí řízení, případně návrh a konstrukce nové analogové části a konečně návrh a konstrukce digitální řídicí části, zajišťující komunikaci s počítačem.

Kapitola 1

Napájecí zdroje

1.1 Dělení napájecích zdrojů

Napájecí zdroj je nedílnou součástí každého elektronického zařízení, které vyžaduje napájení stejnosměrným proudem. Základním hlediskem, podle kterého můžeme napájecí zdroje dělit, je způsob, jakým získávají energii dodávanou do napájeného obvodu. Rozlišujeme napájecí zdroje bateriové a síťové.

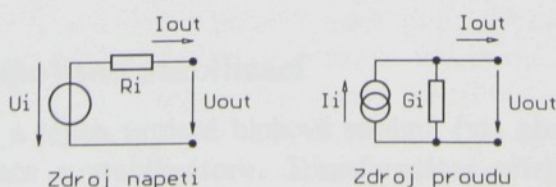
Bateriové zdroje jsou typicky tvořeny baterií elektrochemických článků, které získávají energii elektrochemickou reakcí. Ta může být jednorázová (primární články), nebo opakovatelná (sekundární články – akumulátory). Bateriové zdroje se používají pro napájení mobilních přístrojů a jako záložní zdroje při výpadku elektrorozvodné sítě.

Zatímco bateriové zdroje jsou již ze své podstaty zdroji stejnosměrnými, síťové zdroje získávají stejnosměrné napětí úpravou střídavého napětí z elektrorozvodné sítě. Používají se pro napájení všech ostatních zařízení, neboť ve srovnání se zdroji bateriovými jsou zpravidla levnější, nehledě na to, že výkonové možnosti bateriových zdrojů jsou poměrně omezené.

1.2 Parametry ideálních napájecích zdrojů

V teorii elektrických obvodů jsou ideální zdroje reprezentovány dvojpóly a rozlišují se na napěťové a proudové. Ideální zdroj napětí udržuje na svých svorkách konstantní napětí bez ohledu na odebíraný proud, který se může teoreticky blížit nekonečnu. Ideální zdroj proudu dodává do obvodu konstantní proud bez ohledu na odebírané napětí. Není-li zdroj zatížen, blíží se toto napětí nekonečnu.

Reálný napěťový (proudový) zdroj lze modelovat ideálním zdrojem doplněným o vnitřní odpor (vodivost), který představuje jeho parazitní vlastnosti. Vnitřní odpor (vodivost) je zpravidla lineární, i když to tak obecně být nemusí. Náhradní schémata linearizovaných reálných zdrojů jsou na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Náhradní schémata lineárních zdrojů

Svorkové napětí reálného napěťového zdroje je dáno rovnicí:

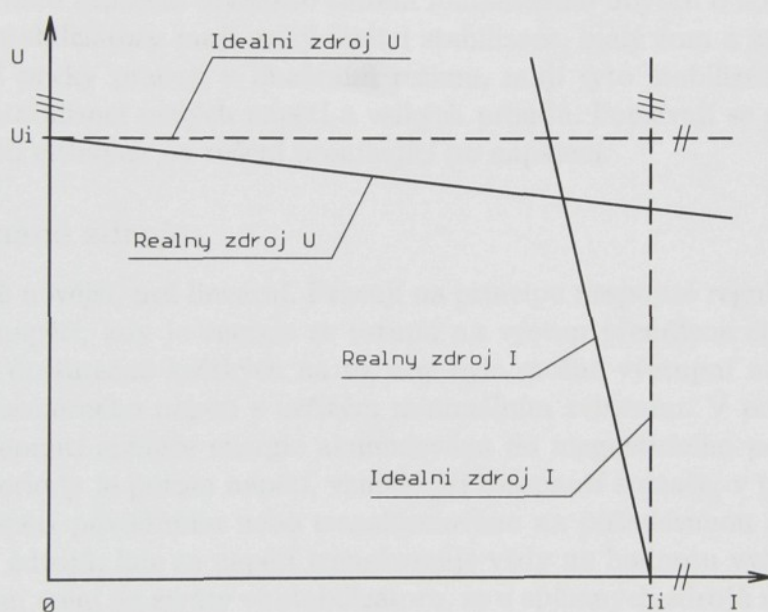
$$U_{OUT} = U_i - R_i \cdot I_{OUT} \quad [V; V, \Omega, A], \quad (1.1)$$

kde U_{OUT} je svorkové napětí, U_i je vnitřní napětí, R_i je vnitřní odpor (ideálně nulový) a I_{OUT} je odebíraný proud. Pro proudový zdroj platí analogický vztah:

$$I_{OUT} = I_i - G_i \cdot U_{OUT} \quad [A; A, S, V], \quad (1.2)$$

kde I_{OUT} je svorkový proud, I_i je vnitřní proud, G_i je vnitřní vodivost (ideálně nulová, neboli nekonečný svodový odpor) a U_{OUT} je výstupní napětí.

Grafickým znázorněním rovnic 1.1 a 1.2 jsou VA charakteristiky na obrázku 1.2, které jsou někdy nazývány jako zatěžovací charakteristiky. Je z nich vidět, že parametry ideálních zdrojů jsou skutečně nezávislé na zátěži. Vnitřní odpory reálných zdrojů se projeví odklonem skutečných charakteristik od ideálních. Blíží-li se reálný zdroj svojí charakteristikou zdroji ideálnímu, je takzvaně „tvrdý“ a naopak, blíží-li se jeho charakteristika spíše charakteristice druhého typu zdroje, je označován jako „měkký“.



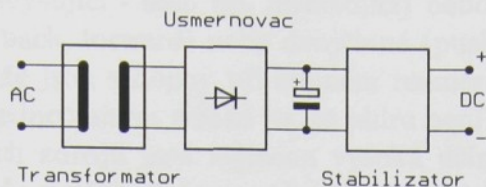
Obrázek 1.2: VA charakteristiky lineárních zdrojů

1.3 Typická konstrukční řešení

Napájecí zdroje lze dle vlastního obvodového řešení rozdělit na zdroje lineární (spojité) a spínané.

1.3.1 Zdroje se spojitou stabilizací

Jsou historicky starší a jejich typické blokové schéma (viz obrázek 1.3) sestává z transformátoru, usměrňovače a stabilizátoru. Transformátor přizpůsobuje velikost síťového napětí konkrétní aplikaci a galvanicky odděluje napájený obvod od elektrorozvodné sítě. Usměrňovač převádí střídavé napětí na stejnosměrné a stabilizátor eliminuje vlivy kolísání napětí sítě a odběru vlivem změny zátěže.



Obrázek 1.3: Blokové schéma lineárního zdroje

Největší vliv na kvalitu výstupního napětí zdroje má stabilizátor. Rozlišujeme stabilizátory paralelní (Zenerovy diody, TL431, MA550 - většinou přesné referenční zdroje s pevnou hodnotou napětí) a sériové, které zpravidla pracují jako zpětnovazební regulátory. Patří sem např. známé monolitické obvody řady 78XX, LM317 a v podstatě všechna zapojení z diskretních prvků. Obecně jsou tyto zdroje složeny z přesného referenčního zdroje, snímače výstupního napětí a rozdílového zesilovače, který řídí akční člen (výkonový tranzistor). Na něm vznikají při provozu zdroje největší ztráty, protože pro spolehlivou funkci vyžaduje určitý úbytek napětí, který u běžných stabilizátorů dosahuje až 3V. Tento nedostatek částečně odstraňují moderní stabilizátory LDO (Low Drop Out), u kterých je změnou vnitřního zapojení dosaženo snížení minimálního úbytku o 50 až 80%.

Lineární stabilizátory mají velký činitel stabilizace, malý šum a zvlnění. Jelikož však jejich aktivní prvky pracují v lineárním režimu, mají tyto stabilizátory nižší účinnost, zejména při stabilizaci malých napětí a velkých proudů. Používají se pro napájení analogových obvodů citlivých na rušení pronikající po napájení.

1.3.2 Spínané zdroje

Jsou vývojově novější, než lineární. Pracují na principu nespojitě regulace vstupního stejnosměrného napětí, kdy je energie ze vstupu na výstup přenášena sice nespojitě, avšak v intervalech dostatečně krátkých na to, aby bylo možné výstupní napětí vyfiltrovat do podoby stejnosměrného napětí s určitým minimálním zvlněním. V první části každé periody je po sepnutí spínače energie akumulována do magnetického pole indukčnosti. Ve druhé části periody je potom napětí, vzniklé při rozepnutí spínače, v požadované polaritě přičteno k napětí původnímu nebo transformováno na požadovanou hodnotu. Na rozdíl od lineárních zdrojů, kde se napětí transformuje vždy na hodnotu vyšší než potřebnou a rozdíl se potom mění na ztráty ve stabilizátoru, se u spínaných zdrojů napětí převádí nebo transformuje přímo na požadovanou hodnotu. Je to možné proto, že napětí indukované v akumulační indukčnosti je úměrné energii v ní akumulované a ta závisí na době, po kterou se indukčnost nechá „nabíjet“. Regulace výstupního napětí se tedy provádí změnou střídý budičho signálu spínacích prvků.

Frekvence se volí řádově v rozsahu desítek až stovek kHz. Vyšší frekvence umožňuje při stejné indukčnosti přenést vyšší výkon, ale je v praxi omezena vlastnostmi použitých feromagnetik (hysterezní ztráty) a konečnou rychlostí spínacích prvků. Výhodou spínacího režimu aktivních prvků, kterými jsou nejčastěji polem řízené tranzistory, je zejména minimalizace ztrát. Ty jsou potom dány pouze parazitními vlastnostmi použitých součástek, na rozdíl od spínaných stabilizátorů, kde je určitá výkonová ztráta „uměle“ udržována proto, aby obvod vůbec mohl fungovat. Nevýhodou je rušení, které je vyzařováno jak po napájecím vedení, tak i ve formě elmag. pole. Nedílnou součástí spínaného zdroje jsou tedy filtry a stínění, které při požadavku na precizní odrušení zdroj značně prodražují.

U spínaných zdrojů nelze uvést žádné typické blokové schéma, neboť existuje celá řada různých topologií, které jsou vzájemně dosti odlišné. Dělí se na spínané zdroje s tlumivkou

Kapitola 2

Laboratorní zdroje

2.1 Specifika konstrukce

V praxi existují případy, které vyžadují napájení zdrojem, jehož parametry se maximálně blíží zdroji ideálnímu. Pro takové účely se používá specifická skupina síťových zdrojů, které se označují jako laboratorní. Důraz je u nich kladen především na kvalitativní parametry, přičemž se používají i řešení, která by u běžných zdrojů kvůli svým nevýhodám neuspěla.

Specifikem laboratorních zdrojů je jejich schopnost pracovat jak v režimu zdroje konstantního napětí, tak i v režimu zdroje konstantního proudu. Hodnoty napětí i proudu lze plynule měnit v rozsazích, jimiž je definována tzv. pracovní oblast zdroje.

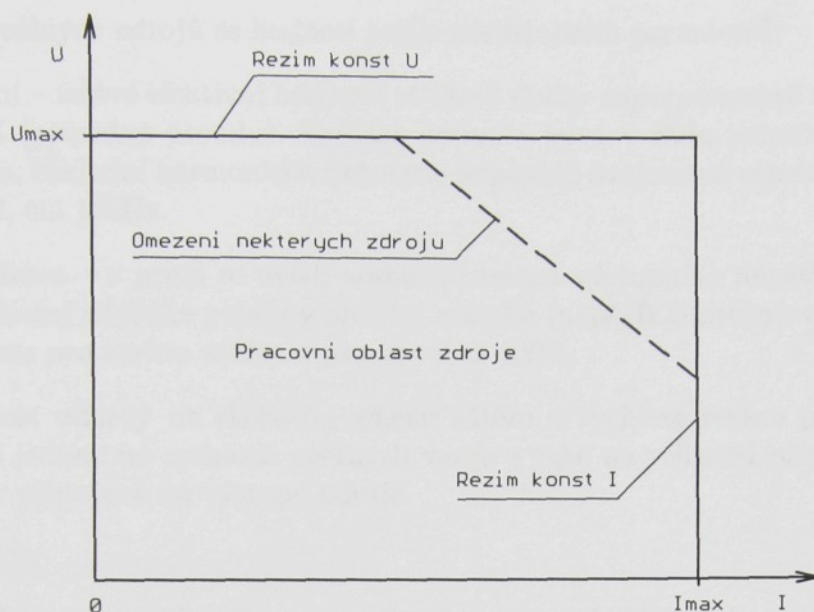
V režimu konstantního napětí představuje nastavená hodnota proudu hranici, při jejímž překročení zdroj přejde do režimu konstantního proudu, čímž omezí odebíraný proud na nastavenou hodnotu. Tato funkce bývá nazývána jako omezovací proudová pojistka a nachází uplatnění zejména při oživování a testování elektronických obvodů. Analogicky platí, že v režimu zdroje konstantního proudu hodnota nastaveného napětí představuje napěťové omezení.

Elektronickou stabilizací je zajištěno, že se zdroj v obou režimech chová jako maximálně tvrdý, tudíž jeho zatěžovací VA charakteristika má pravoúhlý tvar, viz obrázek 2.1.

Výjimkou mohou být některé velmi výkonné zdroje, u nichž je možné maximální proud odebírat jen do určité hodnoty napětí a naopak. Tyto zdroje jsou konstruovány s ohledem na to, že v technické praxi se vyskytují určité typické případy požadovaného napájení a to buď velkým proudem při malém napětí (dříve např. rozsáhlé systémy na bázi TTL logiky), nebo malým proudem při vyšším napětí. Pokud nepotřebujeme odebírat současně maximální napětí a proud, lze takto snížit cenu, rozměry a hmotnost univerzálního zdroje, protože transformátor může být dimenzován na nižší výkon. Na obrázku 2.1 je omezení pracovní oblasti takového zdroje vyznačeno čárkovaně.

Co se týče obvodového provedení, je u laboratorních zdrojů dávána přednost lineární koncepci, protože dosahuje lepších kvalitativních parametrů (zvlnění, šum, činitel stabilizace, rušení). Nízká účinnost zde není tolik podstatná, jelikož se předpokládá spíše krátkodobý provoz. Je však třeba s ní počítat při návrhu chlazení aktivních prvků stabilizátoru.

Chlazení musí být schopné odvést ztrátový výkon vzniklý při jakékoli kombinaci odebíraného proudu a napětí. Ten dosahuje maxima při nulovém napětí a maximálním proudu, čili při zkratovaném výstupu zdroje. Tehdy je téměř veškerý výkon přenesený transformátorem přeměněn v teplo, které je u každého elektronického zařízení nežádoucím činitelem, protože ovlivňuje parametry a také životnost součástek. Pro snížení výkonového namáhání se u lineárních zdrojů používá metoda přepínání odboček sekundárního vinutí transformátoru v závislosti na hodnotě výstupního napětí zdroje. To je rozděleno do dvou



Obrázek 2.1: Pracovní oblast laboratorních zdrojů

nebo i více rozsahů, přičemž stabilizátor je vždy napájen z té odbočky, jejíž napětí s určitou rezervou dostačuje pro spolehlivou funkci stabilizátoru v daném rozsahu. Odbočky jsou přepínány nejčastěji reléově, ale v některých případech i prostřednictvím triaků.

Nevýhodou spínaných měničů pro účely laboratorního zdroje je kromě již zmíněných nevýhod také to, že se u nich hůře provádí regulace napětí v širokém rozsahu, respektive od úplné nuly. Pro spolehlivou činnost měniče je vyžadována určitá předzátěž, která při nízkých odběrech jeho účinnost snižuje. Složitější zpětnovazební řízení měničů může být háklivé na skokové změny zátěže.

2.2 Sledované parametry laboratorních zdrojů

Vlastnosti reálných zdrojů se hodnotí podle následujících parametrů:

- Zvlnění – udává efektivní hodnotu střídavé složky superponované na stejnosměrném napětí (případně proudu). Typická hodnota bývá v řádu jednotek mV při plném odběru, základní harmonická frekvence odpovídá dvojcestně usměrněnému síťovému napětí, čili 100Hz.
- Stabilizace – v praxi se uvádí absolutní změna výstupního napětí a proudu jednak při kolísání síťového napětí v určitém rozsahu (např. fa Statron uvádí -10 až $+6$ %) a potom pro změnu zátěže v rozsahu 0 až 100%.
- Rychlost odezvy na skokovou změnu zátěže – rychlost reakce proudové pojistky. Závisí jednak na rychlosti zpětných vazeb a také na velikosti případné filtrační kapacity připojené na výstupu zdroje.
- Stabilita
 - Časová – dána časovou stálostí parametrů klíčových součástek (referenční zdroje, rezistory, OZ), neboli těch, které mají vliv na přenosy vnitřních děličů a zesilovačů. V praxi se udává doba po kalibraci, po kterou je garantováno, že parametry budou v rámci definovaných tolerancí.
 - Teplotní – dána teplotními koeficienty zdroje referenčního napětí a opět i klíčových součástek, které je nutné umísťovat co nejdál od zdrojů tepla, případně používat teplotní kompenzace (u precizních přístrojů). Typická hodnota je v řádu 10^1 až 10^2 ppm/°C.
 - Frekvenční – jelikož je stabilizátor zpravidla realizován jako zpětnovazební regulátor, mohou při nevhodném charakteru zátěže nastat problémy se stabilitou regulační smyčky jako celku, což se projevuje kmitáním výstupního napětí v určitém rozsahu kolem nastavené hodnoty.

Kapitola 3

Komunikace laboratorních přístrojů s počítačem

3.1 Fyzická rozhraní

Pro propojení laboratorních přístrojů s počítači se užívá několika málo druhů rozhraní. Průmyslovým standardem je rozhraní IEEE 488.1 (GPIB), jehož nevýhodou je fakt, že vyžaduje speciální kartu do PC, jejíž cena může být srovnatelná nebo i vyšší ve srovnání s cenou zamýšleného zdroje. Už to samo o sobě je dostatečným důvodem pro to, aby byl zvolen jiný typ rozhraní. Pokud možno takového, které pro svou funkci nevyžaduje žádný přídatný HW. Tuto podmínku v dnešní době splňuje sériová linka RS 232 [1], která je již spíše na ústupu, a moderní rozhraní USB. To je dnes široce podporováno a na trhu je k mání mnoho integrovaných obvodů od předních výrobců polovodičů.

Poměrně zajímavým řešením jsou obvody [5] nabízené firmou FTDI, které umožňují přenášet data podle RS 232 přes USB médium. V počítači se přitom takto připojené zařízení jeví tak, jako by bylo připojeno přes sériovou linku. Tyto obvody jsou základem běžně dostupných „převodních“ kabelů, které umožní provozovat starší přístroje, vybavené pouze sériovou linkou, i s novými počítači, které již budou disponovat pouze rozhraním USB. S výhodou tedy lze náš zdroj vybavit pouze sériovou linkou, pro niž existuje levný a dostupný HW a patří často ke standardním periferním obvodům moderních mikroprocesorů, které obsahují hardwarový USART modul, takže není třeba obsluhu sériového kanálu ručně programovat.

Uvedeme zde stručný přehled klíčových vlastností třech nejpoužívanějších rozhraní:

1. Sériová linka RS 232 – nejnovější specifikace TIA/EIA 232 F, ITU V.28

- Základní charakteristiky:
 - Elektricky nesymetrické vedení, různý počet vodičů (3 až 7).
 - Napěťové úrovně: 3 až 15V log. 0, -3 až -15V log. 1
 - Dvoubodový spoj
- Výhoda:
 - Standardní rozhraní počítače – levné a dostupné.
- Nevýhody:
 - Relativně nízká přenosová rychlost – maximálně 115,2 kbit/s.
 - Ke každému portu lze připojit pouze jedno zařízení.

2. Rozhraní USB (Universal Serial Bus)

- Základní charakteristiky:
 - Elektricky symetrické vedení, celkem 4 vodiče.
 - Napěťové úrovně podobné TTL ($\log. 0 < 0,3V$ a $\log. 1 > 2,8V$).
 - Vícevrstvá hvězdicová struktura, v praxi opět dvoubodové spoje.
- Výhody:
 - Standardní moderní rozhraní počítače – levné a dostupné.
 - Vysoká přenosová rychlost – podle verze 1,5 Mbit/s až 480Mbit/s.
- Nevýhody:
 - Podporováno pouze novějšími přístroji.
 - Propojení na vzdálenost max. 5 m.
 - Vysoká latence (řádově $100\mu s$).

3. Přístrojové rozhraní GPIB (IEEE 488)

- Základní charakteristiky:
 - Elektricky nesymetrické vedení, 24 vodičů (8 data, 8 řízení, 8 země).
 - Napěťové úrovně TTL, ale inverzní logika.
 - Sběrníková topologie, maximálně 15 zařízení, délka jednoho segmentu max. 2m, celková délka sběrnice max. 20m.
- Výhody:
 - Lze propojit více přístrojů navzájem mezi sebou.
 - Vyšší přenosová rychlost, než RS 232 (maximálně 1MB/s).
 - Standardní rozhraní přístrojů střední a vyšší třídy.
- Nevýhody:
 - Není standardním rozhraním počítače, nutno použít komunikační kartu.

3.2 Komunikační protokoly

První generace počítačově řízených měřicích přístrojů se vyznačovala tím, že každý výrobce používal vlastní protokoly a rozhraní, které nebyly vzájemně nijak standardizovány. Prvním krokem ke standardizaci bylo schválení normy IEEE 488–1975, která definovala elektrické a mechanické vlastnosti rozhraní, způsob navazování spojení, adresování a protokol pro přenos jednotlivých bajtů mezi přístroji. Později byla tato norma aktualizována pod označením IEEE 488.1–1987.

Byl tedy určen způsob, jakým budou data přenášena, nebyl však specifikován jejich význam. Každý výrobce definoval příkazy pouze pro své přístroje, tudíž opět nebyly vzájemně kompatibilní. To měla změnit norma IEEE 488.2–1987, která definovala role přístrojů a řídicích systémů v rámci měřicího systému, strukturované schéma komunikace a částečně též způsob odesílání příkazů do přístrojů a přijímání odpovědí. Definovala sice některé často užívané příkazy, ale význam a syntaxe všech ostatních typů příkazů byly opět ponechány na výrobcích. IEEE 488.2 přesně specifikuje, jak mají být příkazy určitého typu implementovány, pokud jsou přístrojem podporovány, ale neurčuje, které příkazy by přístroj měl ze své podstaty podporovat. Bylo tedy možné, že dva podobné přístroje od různých výrobců, oba splňující IEEE 488.2, měly zcela rozdílné sady příkazů.

Kompatibility na úrovni příkazů bylo dosaženo až zavedením standardu SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments), viz [2]. Za jeho vznikem stojí nejvýznamnější výrobci měřicí techniky (Tektronix, Hewlett-Packard – dnes Agilent, National Instruments a mnozí další). Jedná se o univerzální jazyk, který není závislý na typu ani výrobci přístroje, ani na konkrétní fyzické vrstvě rozhraní. Tou mohou být jak průmyslové sběrnice IEEE488.1 či RS485, tak běžně dostupná počítačová rozhraní RS 232 a USB. Standard SCPI předepisuje:

- Obecné povinné příkazy, sloužící ke konfiguraci a identifikaci stavu přístroje (převzaty z IEEE 488.2).
- Příkazy pro vlastní ovládání měření (stromová struktura, příkazy jsou zpravidla zkratkami svých anglických názvů).
- Formát dat (komunikace probíhá textově, prostřednictvím ASCII znaků).

Vzhledem ke své textové povaze lze SCPI protokol snadno implementovat na straně řídicího systému, kterým je zpravidla osobní počítač a tudíž lze řídicí aplikaci psát v některém vyšším programovacím jazyce (C, Pascal), případně v prostředích typu Lab-View, či LabWindows. Některé měřicí přístroje jsou však řízeny pouze jednočipovými mikroprocesory, pro jejichž naprogramování představuje úloha rozpoznávání velkého množství textových řetězců netriviální problém. Z tohoto důvodu i v dnešní době existují měřicí přístroje, které komunikují vlastními, podstatně jednoduššími protokoly. Jedná se zpravidla o přístroje, které jsou natolik jednoduché, že se u nich implementace SCPI nevyplatí. Typickými představiteli jsou ruční digitální multimetry, u nichž se nepředpokládá nasazení v rámci rozsáhlých měřicích systémů.

3.3 Návrh vlastního komunikačního protokolu

Pro zdroj, který je předmětem této práce, byl navržen jednoduchý textový protokol, který je výsledkem kompromisu mezi náročností implementace a snadným použitím. Komunikace probíhá textově, tak jako u SCPI, příkazy jsou však definovány vlastní. Jejich popis je uveden v tabulce 3.1.

Odeslaný řetězec (příkaz) je třeba potvrdit ukončovacím znakem. Pro zajištění kompatibility s různými operačními systémy je protokol navržen tak, aby rozpoznal příkaz ukončený těmito kombinacemi:

- pouze **CR** (Carriage Return – návrat na začátek řádku, ASCII znak 13)
- pouze **LF** (Line Feed – odřádkování, ASCII znak 10)
- kombinace **CR/LF**

Odpověď typu „Aktuální stav“ je řetězec, který nese informace o aktuálně nastavených hodnotách napětí a proudu a režimu manuálního ovládání ve tvaru:

U<uuu>;I<iii>;<režim><oddělovač>

Význam parametrů je následující:

- <uuu> a <iii> jsou hexadecimálně vyjádřené hodnoty napětí a proudu.
- <režim> je řetězec MON nebo MOFF dle režimu manuálního ovládání.

- $\langle \text{oddělovač} \rangle$ je potvrzovací sekvence odpovědi. Odpovědi na všechny příkazy včetně $*\text{IDN?}$, HELP a chybových hlášení jsou ukončovány kombinací CR/LF .

Dále jsou definována tato chybová hlášení:

- SERR – Syntax ERRor – přijatý řetězec ukončený platným oddělovačem neodpovídá žádnému z podporovaných příkazů.
- LERR – Length ERRor – přijímaný řetězec přesáhl maximální možnou délku (5 znaků)
- RERR – Receive ERRor – během příjmu znaku došlo k chybě. (např. při špatném nastavení portu. V tomto případě však ani řetězec RERR nebude zřejmě přijat správně)

Tabulka 3.1: Příkazy komunikačního protokolu

Příkaz	Popis funkce	Odpověď
$\text{U}\langle uuu \rangle$	Nastavení hodnoty napětí v režimu CV, nebo napěťového omezení v režimu CC. $\langle uuu \rangle$ je hexadecimální vyjádření hodnoty napětí. $\langle uuu \rangle = 000\text{--}C80$	Aktuální stav
$\text{I}\langle iii \rangle$	Nastavení hodnoty proudu v režimu CC, nebo proudového omezení v režimu CV. $\langle iii \rangle$ je hexadecimální vyjádření hodnoty proudu. $\langle iii \rangle = 000\text{--}A28$	Aktuální stav
MON	Zapnutí manuálního ovládání přístroje, výchozí stav po zapnutí.	Aktuální stav
MOFF	Vypnutí manuálního ovládání přístroje. Pokud do 30s po tomto příkazu nepříjde žádný jiný platný příkaz, je ovládání opět zapnuto.	Aktuální stav
$?$	Dotaz na aktuální parametry přístroje. Nic nenastavuje, pouze vrací odpověď.	Aktuální stav
$*\text{IDN?}$	Identifikace přístroje, jediný podporovaný příkaz dle specifikace SCPI.	Typ přístroje, autor, verze firmware.
HELP	Nápověda.	Stručný přehled všech výše uvedených příkazů.

Kapitola 4

Analogová část

4.1 Popis zapojení zdroje Statron 2223

Pro účely této práce se vyskytla možnost použít za základ konstrukce jednoduchý zdroj od firmy Statron, typ 2223, který, jak se později ukáže, je pro vestavbu řídicí části poměrně vhodný. Protože nebyla k dispozici servisní dokumentace, bylo schéma zdroje vykresleno z rozložení součástek a spojů na DPS. Je uvedeno na obrázku v příloze A. Schéma zdroje lze rozdělit na část výkonovou, která dodává výkon do zátěže, a část řídicí, která provádí nastavení a regulaci požadovaných hodnot napětí a proudu na výstupu zdroje.

4.1.1 Výkonová část

Síťové napětí je přes tavnou pojistku F1 a kolébkový vypínač S1 přiváděno na primární vinutí transformátoru T1. Tento transformátor je v tzv. bezpečnostním provedení s primárním vinutím prostorově odděleným od vinutí sekundárních. Ta jsou celkem dvě, galvanicky oddělená. První je výkonové s napětím naprázdno 35V a s odbočkou na 20V, která slouží pro snížení výkonové ztráty na regulačním tranzistoru při velkém odběru proudu a nastavené nízké hodnotě napětí. Přepínání mezi odbočkami zajišťuje relé RE1 ovládané komparátorem IC1C s malou hysterezí. Druhé sek. vinutí je pomocné a slouží k napájení vlastní řídicí elektroniky zdroje. Napětí naprázdno činí 26V.

Napětí z výkonového sekundárního vinutí je přes relé RE1 přivedeno na můstkový usměrňovač B1. Relé přepíná mezi sníženou hodnotou sekundárního napětí (20V) a plnou hodnotou (35V). Proti rušení a zejména proti napěťovým špičkám, vznikajícím při přepínání pod plným zatížením, je usměrňovač chráněn kondenzátory C1 a C2. Usměrněné napětí je vyhlazováno elektrolytickým kondenzátorem C3. Pro rychlejší vybití tohoto kondenzátoru po vypnutí zdroje slouží rezistor R1. Následuje akční člen tvořený dvojicí tranzistorů v Darlingtonově zapojení. Tranzistor T1 je umístěn na malém chladiči společně s usměrňovacím můstkem, zatímco výkonový tranzistor T2 je namontován mimo DPS na hlavním chladiči. Rezistory R2 a R3 zajišťují dokonalé uzavření tranzistorů T1, T2 tím, že odvedou z báze zbytkový proud ICB0 a tím zabrání (po)otevření tranzistoru, způsobenému průtokem ICB0 přechodem B–E. Také napomáhají linearizovat vstupní charakteristiku Darlingtonovy dvojice. Dioda D1 zabráňuje přepólování tranzistorů T1, T2 v situaci, kdy by na výstupu zdroje bylo napětí vyšší, než na kondenzátoru C3. To může nastat např. pokud zdrojem napájíme obvod, který má na vstupu vlastní dostatečně velké filtrační kapacity. Po vypnutí zdroje by potom napětí na těchto kapacitách mohlo být krátkodobě vyšší, než napětí na C3. Tomu zabrání právě dioda D1 tím, že napětí na přechodu C–E Darlingtonovy dvojice omezí na cca 0,7V a rezistor R1 zajistí vybití jak kondenzátoru C3, tak i případné kapacity na výstupu zdroje. Nápomocny jsou v tomto směru i rezistory R4

a R5, které však primárně slouží jako slabá předzátěž pro regulační tranzistory T1, T2.

Plošný spoj je navržen tak, že umožňuje použít na místě T2 dva méně výkonné tranzistory zapojené paralelně. To může být výhodné pro lepší rozložení ztrátového výkonu, snížení výsledného tepelného odporu pouzdra, případně pro přidání stejného typu tranzistoru, pokud by byl zdroj modifikován pro větší proudový odběr. V takovém případě by emitor každého z dvojice výkonových tranzistorů byl zatížen jedním z rezistorů R4, R5 a vzájemné spojení emitorů by bylo provedeno přes výkonové rezistory R6, R7, které by pak kromě funkce bočnicku pro měření proudu zastávaly i funkci vyrovnávacích rezistorů, neboť úbytek napětí na nich působí v obvodu B–E zápornou zpětnou vazbu. Napětí z takto rozděleného bočnicku by bylo snímáno zprůměrováním napětí na emitorech přes rezistory R8, R9 o malých hodnotách.

Základní provedení zdroje Statron 2223 obsahuje pouze jeden výkonový tranzistor T2, takže ve výsledném schématu jsou dvojice R4, R5 a R6, R7 a R8, R9 spojeny přímo paralelně. K bočnicku R6, R7 je přes ochranný rezistor R11 a trimr R10 (pro nastavení rozsahu) připojen panelový magnetoelektrický měřicí přístroj M1, který měří hodnotu odebíraného proudu. Z bočnicku je již napětí vedeno na výstup zdroje, přičemž je dodatečně filtrováno elektrolytickým kondenzátorem C4 a keramickým kondenzátorem C5, který je umístěn přímo na výstupních svorkách. Výstup zdroje je chráněn proti připojení vnějšího napětí opačné polarity diodou D2. Záporná svorka výstupu (GND) je přes kondenzátor C12 spojena s šasi zdroje, které je spojeno s PE vodičem přívodního síťového kabelu.

4.1.2 Řídící část

Je napájena z pomocného sekundárního vinutí transformátoru T1. Napětí z něho je přivedeno přes omezovací rezistor R33 na můstkový usměrňovač B2. Usměrněné napětí je vyhlazeno elektrolytickým kondenzátorem C5. Odtud je napájena cívka relé RE1, které přepíná odbočky výkonového sekundárního vinutí. Cívka relé je ovládána tranzistorem T3. Dioda D3 chrání tranzistor proti napěťovým špičkám záporné polarity, vznikajícím na cívce relé při rozpínání tranzistoru. Mezi bází a emitorem T3 je zapojen rezistor R17, který slouží k odvedení zbytkového proudu ICB0, jako v případě T1 a T2. Kromě relé je z pomocného zdroje napájena vlastní řídící část zdroje. Ta ke své funkci vyžaduje tři hladiny napájecích napětí. Z napětí na C5, poměrně vysoké hodnoty, je přes srážecí rezistor R16 napájen parametrický stabilizátor se dvěma sériově spojenými zenerovými diodami D4 a D5. Z diody D4 je odebíráno kladné napájecí napětí (V+) pro IC1, které je dále stabilizováno třísvorkovým stabilizátorem IC2 a využito jako referenční napětí (UREF). Úbytek napětí na diodě D5 tvoří zápornou větev napájení řídící části (V–). Uzel mezi diodami je považován za zem napájení řídící části, přičemž je spojen s kladnou výstupní svorkou zdroje (UOUT).

Napájení řídící části je tedy plovoucí vůči zemi výkonové (GND). Toto uspořádání umožňuje nastavit proudové poměry v bázi regulační Darlingtonovy dvojice zcela nezávisle na úrovni nastaveného napětí UOUT. Báze je totiž přes rezistor R18 napájena napětím V+, které je tím pádem vždy právě o hodnotu V+ vyšší, než napětí na emitoru, pokud zanedbáme úbytek na bočnicku R6, R7. Tento úbytek však závisí na odebíraném proudu a proto musí být hodnota rezistoru R18 stanovena tak, aby i při maximálním proudu, kdy úbytek dosahuje hodnoty přibližně 1V, bylo možné tranzistor spolehlivě otevřít. Zároveň je však třeba brát ohled na dovolené zatížení výstupů OZ (IC1A, IC1B), které tvoří alternativní cestu proudu tekoucího rezistorem R18. Právě odebíráním proudu bází regulačního tranzistoru je realizován vlastní akční zásah regulační smyčky.

V režimu zdroje konstantního napětí pracuje obvod takto: Komparátor IC1A porovnává výstupní napětí zdroje UOUT s napětím odvozeným z děliče tvořeného rezistory R28+R29 a potenciometrem P1. (R29 je trimr pro přesné nastavení rozsahu regulace

napětí, P1 je dvojitý potenciometr sloužící pro nastavení požadované hodnoty napětí. Jeho dráhy P1A, P1B mají řádově odlišné hodnoty odporu a jsou spojeny sériově. P1A potom slouží k jemnému nastavení napětí, zatímco P1B k hrubému. Sériová kombinace P1A+P1B je přemostěna kondenzátorem C11, který potlačuje rušení a šum.) Dělič je zapojen mezi zem výkonové části (GND) a referenční napětí UREF. Ve vyváženém stavu musí být rozdíl napětí na vstupech komparátoru IC1A nulový, čemuž odpovídá určitý nastavený poměr děliče R28+R29 a P1. Stoupne-li např. výstupní napětí UOUT nad požadovanou hodnotu, klesne napětí na neinvertujícím vstupu IC1A vůči invertujícímu vstupu, protože poměr děliče zůstane nezměněn. Komparátor překlopí do záporné saturace, čímž přes LED diodu D1 odbudí bázi tranzistoru a napětí na výstupu poklesne. Dioda D1, umístěná na panelu přístroje, přitom svým svitem indikuje režim zdroje konstantního napětí. Zesílení otevřené smyčky komparátoru IC1A je pro střídavé signály sníženo integrační zpětnou vazbou tvořenou rezistory R19, R20 a kondenzátorem C9. Napětí vstupující do neinvertujícího vstupu (respektive rozdílové napětí vstupů) je pro jistotu omezeno Zenerovou diodou D6. Obvykle se pro tento účel používají dvě antiparalelně zapojené křemíkové diody, použitím Zenerovy diody s nízkým závěrným napětím je jedna dioda ušetřena. Toto omezení se uplatní, pokud zdroj přejde z režimu zdroje konstantního napětí do režimu zdroje konstantního proudu.

V tomto režimu přestane pro komparátor IC1A platit podmínka nulového rozdílového napětí na vstupech, jeho výstup překlopí do kladné saturace a LED1 zhasne. Zpětná vazba se nyní uzavírá přes diodu LED2 a komparátor IC1B, který porovnává úbytek napětí na bočniku R6, R7 s napětím získaným dělením referenčního napětí (UREF) na děliči, tvořeném rezistory R27+R30 a potenciometrem P2. (R30 je trimr pro přesné nastavení rozsahu regulace proudu, P2 je potenciometr sloužící pro nastavení požadované hodnoty výstupního proudu, resp. proudového omezení. Stejně jako P1 je v duálním provedení pro hrubé a jemné nastavení hodnoty.) Výstupní napětí z tohoto děliče určuje nastavenou hodnotu odebíraného proudu, případně proudového omezení v režimu zdroje konstantního napětí. Stoupne-li hodnota odebíraného proudu, zvětší se přímo úměrně napěťový úbytek na bočniku R6, R7, čímž vzroste napětí na invertujícím vstupu komparátoru IC1B vůči vstupu neinvertujícímu. Výstup komparátoru překlopí do záporné saturace a tím přes LED diodu D2 sníží buzení báze regulačního tranzistoru. To způsobí pokles výstupního proudu. Integrační kondenzátor C10 spolu s rezistorem R22 zajišťuje stabilitu zpětné vazby IC1B. Rezistor R23 kompenzuje chybu způsobenou vstupním klidovým proudem IC1B tekoucím rezistorem R22.

Komparátor IC1C zajišťuje přepínání odboček výkonového sekundárního vinutí v závislosti na nastavené hodnotě výstupního napětí zdroje. Je zapojen jako invertující komparátor s hysterezí, která je dána hodnotami rezistorů R24, R26. Referenční napětí komparátoru je vzhledem k jeho zemi (UOUT) nulové. Komparační napětí je získáno na děliči z rezistorů R31, R32, kdy jeden vývod děliče je připojen na referenční napětí (UREF) a druhý na zem zdroje (GND). Výstup komparátoru přes omezovací rezistor R25 budí bázi spínacího tranzistoru T3. Hystereze obvodu je poměrně malá a slouží pouze k zamezení zakmitávání relé v případě, že je nastavená hodnota výstupního napětí (UOUT) blízka hodnotě překlápěcího napětí komparátoru.

Zesilovač IC1D plní funkci budiče panelového magnetoelektrického voltmetru M2. Jeho přínos spočívá především v tom, že od výstupní svorky zdroje (UOUT) impedančně odděluje voltmetr, který by jinak svým relativně nízkým vnitřním odporem tento výstup zatěžoval. Při vyšším výstupním napětí a malém odebíraném proudu by způsoboval chybu při měření výstupního proudu, který by byl ukazován vyšší, než skutečný. Proudové omezení by naopak účinkovalo již při nižší hodnotě, než nastavené. Z tohoto hlediska by bylo nejvhodnější použít neinvertující zesilovač, jehož vstupní odpor je dán v podstatě jen para-

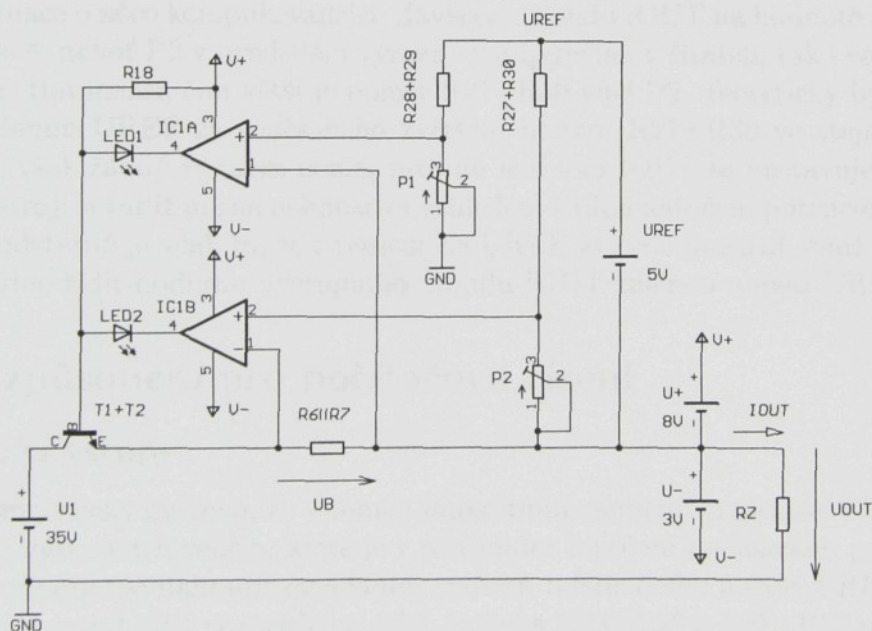
metry použitého operačního zesilovače. Vzhledem ke způsobu napájení OZ však zde toto zapojení použít nelze a tak je zesilovač zapojen jako invertující. Vstupní odpor je dán rezistorem R12, jehož hodnota je alespoň stanovena tak, aby jím způsobená chyba byla řádově nižší, než rozlišení ampérmetru. Z pozice IC1D je vstupním signálem zem zdroje GND a zemí výstupní napětí zdroje UOUT. Zisk je určen poměrem odporu trimru R13 a rezistoru R14 vůči R12. Trimr R13 slouží pro přesné nastavení rozsahu měřidla M2.

4.2 Obvodová analýza

Nyní je třeba zapojení zdroje podrobněji analyzovat z hlediska jeho vhodnosti pro vestavbu řídicí části. Zapojení by mělo splňovat tato základní kritéria:

- Řízení externím napětím či proudem, namísto hodnotou odporu.
- Obě řídicí napětí vztažena vůči jedinému potenciálu (předpokládá se ovládání proudu i napětí).
- Dostupnost napájení pro řídicí část.

Pro účely této analýzy je vhodné provést zjednodušení, jehož výsledkem je idealizované náhradní schéma zdroje, uvedené na obrázku 4.1. Napájecí obvody jsou zde nahrazeny ideálními zdroji napětí (U1, U−, U+, UREF). Názvy ostatních prvků ve schématu odpovídají příslušným prvkům podle celkového schématu (příloha A).



Obrázek 4.1: Zjednodušené náhradní schéma zdroje

Podle tohoto schématu lze již snadno odvodit vztahy, popisující závislost výstupních veličin (napětí UOUT a proudu IOUT), na parametrech obvodových prvků. Vyjdeme přitom ze základního principu, který se používá při řešení obvodů s operačními zesilovači. Ten praví, že rozdílové napětí na vstupu ideálního OZ zapojeného jako zesilovače je rovno nule. Nic na tom nemění fakt, že zpětná vazba není uzavřena přímo z výstupu OZ, nýbrž zprostředkovaně přes diody LED1, LED2 a regulační tranzistor T1+T2. Samozřejmě toto platí pouze pokud výstup OZ není v saturaci.

V režimu zdroje konstantního napětí tedy platí pro napětí na vstupech IC1A rovnost:

$$(U_{OUT} + U_{REF}) \frac{P_1}{P_1 + R_{28} + R_{29}} = U_{OUT} \quad (4.1)$$

Vyjádříme-li z rovnice 4.1 proměnnou U_{OUT} , dostaneme výraz:

$$U_{OUT} = U_{REF} \frac{P_1}{R_{28} + R_{29}} \quad (4.2)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že výstupní napětí U_{OUT} je přímo úměrné odporu potenciometru P_1 a referenčnímu napětí U_{REF} , nepřímě pak hodnotě rezistorů $R_{28} + R_{29}$. Výhodná je zejména lineární závislost na napětí U_{REF} , která umožňuje řídit velikost napětí U_{OUT} změnou U_{REF} , například napěťovým výstupem D/A převodníku. V tomto případě by potenciometr P_1 byl nahrazen rezistorem s pevnou hodnotou.

V režimu zdroje konstantního proudu, kdy se celková zpětná vazba uzavírá přes IC1B, platí pro napětí na jeho vstupech rovnost:

$$U_{REF} \frac{P_2}{P_2 + R_{27} + R_{30}} = U_B, \quad \text{kde: } U_B = (R_6 || R_7) I_{OUT} \quad (4.3)$$

I_{OUT} potom snadno vyjádříme jako:

$$I_{OUT} = U_{REF} \frac{P_2}{(P_2 + R_{27} + R_{30})(R_6 || R_7)} \quad (4.4)$$

Zde je situace o něco komplikovanější. Závislost proudu I_{OUT} na hodnotě P_2 je lineární pouze přibližně, neboť P_2 v uvedeném výrazu vystupuje jak v čitateli, tak i ve jmenovateli. Nelinearita je tím menší, čím větší je poměr $R_{27} + R_{30}$ vůči P_2 . Teoreticky by bylo možné ji snížit zvýšením U_{REF} za současného zvětšení hodnot $R_{27} + R_{30}$ ve stejném poměru. Prakticky to však žádný význam nemá, protože hodnota I_{OUT} se nastavuje podle údaje měřicího přístroje a tudíž mírná nelinearita vzhledem k úhlu natočení potenciometru nečiní problémy. Podstatné je však to, že závislost na U_{REF} je i zde lineární, čímž je opět dána možnost snadno řídit hodnotu výstupního proudu I_{OUT} změnou napětí U_{REF} .

4.3 Přizpůsobení pro počítačové řízení

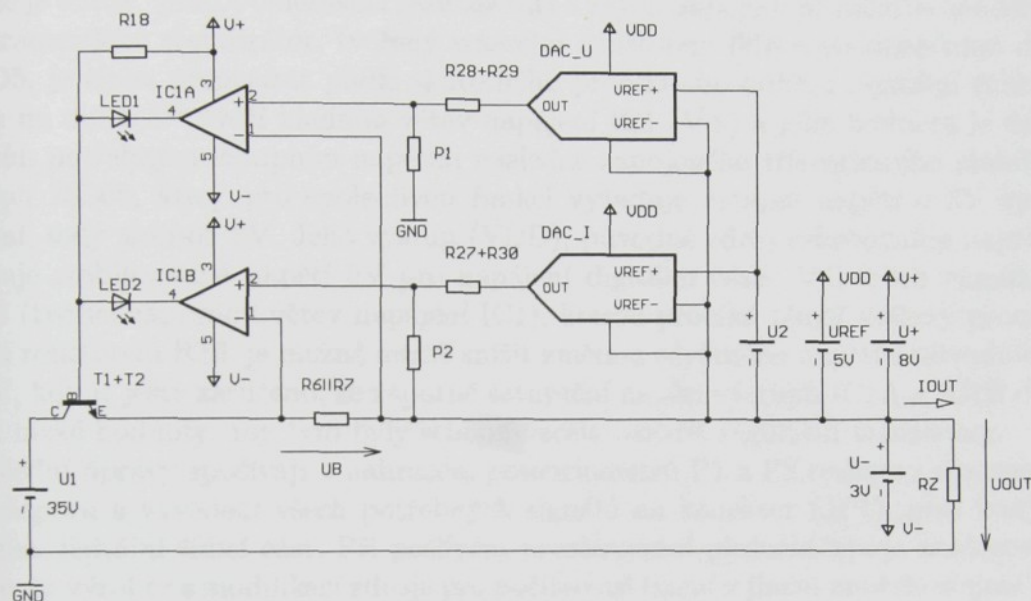
4.3.1 Řídící vstupy

Máme tedy analyticky ověřeno, že v tomto konkrétním zapojení analogové části zdroje lze ovládání jeho výstupních veličin, které je v původním zapojení realizováno potenciometry P_1 a P_2 , plnohodnotně nahradit ovládáním změnou referenčního napětí U_{REF} . Aby bylo možné napětí a proud řídit nezávisle na sobě, je třeba $R_{28} + R_{29}$ a $R_{27} + R_{30}$ od potenciálu U_{REF} oddělit. Tím vzniknou dva nezávislé řídicí vstupy, které budou zpracovávat napětí v rozsahu $0 - U_{REF}$, přičemž nulovému napětí odpovídá nulová hodnota výstupního napětí nebo proudu, úrovní U_{REF} potom hodnota maximální. Potenciometry P_1 , P_2 je přitom nutné nahradit rezistory o hodnotách odpovídajících maximálním hodnotám odporu potenciometrů. Po této úpravě je zdroj možné řídit nikoli hodnotou odporu potenciometrů, ale přímo hodnotou vnějšího napětí, tak jak bylo požadováno.

Zároveň je splněn i požadavek, aby obě řídicí napětí byla vztažena vůči jedinému společnému potenciálu. V našem konkrétním případě je tímto potenciálem kladná výstupní svorka zdroje (U_{OUT}), která představuje zem samotné analogové řídicí části zdroje (obvody kolem IC1) a bude též zemí navržené digitální části (DGND). Při požadavku na řízení

zdroje počítačem je nejvýhodnější řídicí vstupy budit přímo D/A převodníky s napěťovým výstupem.

Takové uspořádání je naznačeno na obrázku 5. Jedná se opět o ideové náhradní schéma, které zachycuje připojení D/A převodníků ke stávající řídicí části. Napájení IC1 zůstává beze změn, přičemž společnou svorkou je opět výstupní svorka zdroje (UOUT). Původní zdroj referenčního napětí UREF lze použít pro napájení digitální části (VDD). Pro D/A převodníky se buď vytvoří nový zdroj referenčního napětí (U2), nebo se použijí převodníky, které jej mají integrován na čipu.



Obrázek 4.2: Náhrada potenciometrů D/A převodníky

4.3.2 Úpravy napájení a transformátoru

Pokud původní zapojení zdroje z přílohy A podrobíme výše popsaným úpravám, dojdeme ke schématu uvedenému v příloze B.

Nejrozsáhlejších změn doznal pomocný napájecí zdroj řídicí části. Ty se týkají především zvýšení jeho proudové zatížitelnosti, aby bylo možné z něho odebírat proud potřebný pro napájení digitální části, na který původně nebyl dimenzován. Kromě správného dimenzování součástek je také nutné minimalizovat případné tepelné ztráty, aby nedocházelo ke zbytečnému ohřevu součástek, které samy žádné teplo nevyvíjejí, ale mohou jím být negativně ovlivněny jejich parametry (u rezistorů změna odporu s teplotou), či životnost (zejména elektrolytických kondenzátorů a samotného plošného spoje).

Prvním problémem je velikost napětí pomocného sekundárního vinutí (SEC3), jehož jmenovitá hodnota činí 26V. Po usměrnění můstkem B2 a vyfiltrování kondenzátorem C6 je k dispozici stejnosměrné napětí přibližně 35V, kterým je napájena cívka relé RE1, dimenzovaná ovšem pouze na jmenovité napětí 24V. Při sepnutí relé dochází k jeho zbytečnému oteplení. Podobně je zbytečné srážet napětí na D4 a D5 (cca 12V) z poměrně vysoké hodnoty 35V, což opět vede k nezanedbatelným tepelným ztrátám. Tyto nedostatky lze částečně odstranit snížením sekundárního napětí tak, aby stejnosměrné napětí na C6 dosahovalo hodnoty jmenovitého napětí cívky relé, tedy přibližně 24V. To je u použitého transformátoru možné poměrně snadno provést odvinutím potřebného počtu závitů sekundárního vinutí SEC3, neboť se toto vinutí nachází v nejvyšší (vrchní) vrstvě sekundární cívky.

Počet odmotaných závitů lze stanovit následovně: Na sekundární cívku navineme izolovaným vodičem známý počet závitů (stačí 5–10), transformátor připojíme do sítě (nejlépe přes regulační autotrafo, které umožní nastavit jmenovité napětí 230V) a změříme napětí na provizorním vinutí. Počet jeho závitů, vydělený změřeným napětím, určí počet závitů na 1V, který vynásobíme rozdílem původního a požadovaného sekundárního napětí. Výsledek je počet závitů, které je třeba odvinout. Případně je možné během odmotávání měřit, jak se snižuje napětí, a konečný počet odmotaných závitů průběžně upravovat. U použitého typu transformátoru dojdeme k hodnotě 24 závitů, výsledné sekundární napětí je potom 18,3V, místo původních 26V.

Dále je nutné vyřadit omezovací rezistor R33 a zvýšit kapacitu filtračního kondenzátoru C6. Parametrický stabilizátor, tvořený srážecím rezistorem R16 a stabilizačními diodami D4 a D5, je třeba přepočítat podle skutečného proudového odběru digitální řídicí části. Úbytek na diodě D4 tvoří kladnou větev napájení IC1 (V+) a jeho hodnota je dána minimálním potřebným vstupním napětím následně zapojeného třísvorkového stabilizátoru IC2 typu 78L05, který pro spolehlivou funkci vyžaduje vstupní napětí o 3V vyšší než výstupní, tedy alespoň 8V. Jeho výstup (VDD), původně zdroj referenčního napětí, nyní poskytuje stabilizované napětí 5V pro napájení digitální části. Výkonové namáhání diody D5 (tvořící zápornou větev napájení IC1), kterou protéká téměř veškerý proud, jaký protéká rezistorem R16, je možné mírně snížit změnou závěrného napětí z původních 5,1V na 3,9V, kdy je ještě zaručeno, že záporné saturační napětí výstupů IC1A a IC1B dosáhne natolik nízké hodnoty, aby tyto byly schopny zcela uzavřít regulační tranzistory.

Poslední úpravy spočívají v nahrazení potenciometrů P1 a P2 rezistory s pevnou hodnotou odporu a vyvedení všech potřebných signálů na konektor (JP1), přes který bude připojena digitální řídicí část. Při pečlivém prozkoumání plošného spoje analogové části zjistíme, že výrobce s modifikací zdroje pro počítačové řízení v jiném modelu zřejmě počítal a proto jsou pro vyvedení některých signálů přímo k dispozici pájecí body. Zbývající signály je nutno připojit k vývodu některé součástky v daném uzlu ze strany spojů. Vývody rezistorů R28 a R27 je třeba odpojit od potenciálu VDD přeškrábnutím (odfrézováním) odpovídajících spojů. Přehled všech signálů a jejich připojení je uveden v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Signály pro připojení digitální části

Pin JP1	Signál	Popis	Barva vodiče	Přípojný bod na DPS
1	VDD	+5V napájení procesoru	zelená	L3
2	DGND	zem řídicí části	černá	L4
3	V–	–3,9V napájení OZ	modrá	anoda D5
4	V+	+8,2V napájení OZ	červená	katoda D4
5	U _{IN}	řídící napětí regulace napětí	žlutá	L2
6	I _{IN}	řídící napětí regulace proudu	oranžová	L1

4.3.3 Změny v osazení

V tabulce 4.2 jsou shrnuty všechny změny v osazení DPS analogové části zdroje. Je-li to potisk na DPS je proveden spíše s ohledem na snadné osazení při výrobě (názvy součástek jsou většinou přímo pod osazenou součástkou), než na případné servisní zásahy (názvy součástek by měly být vidět i po jejich osazení), je schéma vykresleno s číslováním nezávislým na číslování výrobce. Proto je v tabulce 4.2 uvedeno číslování součástek, které mají být vyměněny, také podle potisku výrobce.

Kapitola 4

Digitalní řídicí část

4.1 D/A převodník

4.1.1 Volba rozložení a realizace

Pro návrh řídicí části je třeba zvolit vhodný D/A převodník a rozložení součástek na desce. Vzhledem k tomu, že se jedná o řídicí část, je vhodné zvolit převodník s vysokou přesností a rychlostí.

Tabulka 4.2: Změny v osazení DPS zdroje

Pozice ve schématu	Pozice dle potisku	Původní hodnota	Náhrada
P1A, P1B	P2	potenciometr 4k7 + 47k	rezistory 3k3 + 47k
P2A, P2B	P1	potenciometr 4k7 + 47k	rezistory 3k3 + 47k
R29	R22	trimr obyčejný 2k2	trimr víceotáčkový 2k0
R30	R24	trimr obyčejný 47k	trimr víceotáčkový 50k
C6	C12	elyt 220μF/35V	elyt 470μF/35V
R33	R1	rezistor 8R2	nahradit propojkou
R16	R35	rezistor 680R/0,6W	rezistor 150R/2W
D4	D4	BZX55C 8V2 (0,4W)	BZX85C 8V2 (1,3W)
D5	D3	BZX55C 5V1 (0,4W)	BZX85C 3V9 (1,3W)

Kapitola 5

Digitální řídící část

5.1 D/A převod

5.1.1 Volba rozsahů a rozlišení

Pro výběr vhodného typu D/A převodníku je nutné nejdříve stanovit rozsah a velikost kvantizačního kroku Q (hodnota výstupní veličiny odpovídající 1 LSB). Z toho vyplyne potřebný počet bitů D/A převodníku. Rozsahy lze u použitého typu zdroje mírně rozšířit, čímž se získá rezerva pro případ, že by bylo potřeba napájet zátěž vyššími hodnotami napětí či proudu, než jsou původní poměrně typické hodnoty 30V a 2,5A. Při volbě kroku můžeme postupovat tak, že využijeme plný rozsah D/A převodníku, přičemž velikost kroku je potom dána vztahem:

$$Q = \frac{Rozsah}{2^n}, \quad \text{kde } n \text{ je počet bitů převodníku.} \tag{5.1}$$

Obecně potom Q může vyjít jako desetinné číslo s neukončeným rozvojem. Pro účely napájecího zdroje je však mnohem vhodnější krok zvolit jako celočíselný. Daní za toto zjednodušení je určité plýtvání rozsahem D/A převodníku, i přesto je to však pro účely napájecího zdroje vhodnější, než první zmíněný přístup. Vyjádříme-li z výrazu 5.1 počet bitů n , dostaneme:

$$n = \log_2 \left(\frac{Rozsah}{Q} \right) = \frac{\log \left(\frac{Rozsah}{Q} \right)}{\log(2)} \tag{5.2}$$

Z tohoto vztahu získáme počet bitů zaokrouhlením n na nejbližší vyšší celé číslo. Pro použitý typ zdroje jsou konkrétní navržené a vypočtené hodnoty uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Volba rozsahů a rozlišení D/A převodníků

Veličina	U	I
Původní rozsah	0–30 V	0–2.5 A
Zvolený rozsah	0–32 V	0–2.6 A
Zvolený krok Q	0.01 V	0.001 A
Počet kroků	3200	2600
Potřebný počet bitů převodníku (n)	12	12
Rozsah vstupního slova dekadicky	0–3200	0–2600
Rozsah vstupního slova hexadecimálně	0–C80	0–A28

5.1.2 Výběr D/A převodníku

Pro tuto konstrukci byl zvolen D/A převodník MCP4822 od firmy Microchip. Jedná se o dvoukanálový 12-ti bitový DA převodník s napěťovými výstupy s programovatelným ziskem, integrovaným zdrojem referenčního napětí (2.048V) a sériovou linkou SPI. Odporová síť má strukturu typu „string“. Úplný popis je uveden v katalogovém listu výrobce [3]. Výstupní napětí D/A převodníku je dáno vztahem:

$$U_{OUT} = \frac{D \cdot G}{2^n} U_{REF} \tag{5.3}$$

kde U_{REF} je referenční napětí, D odpovídá dekadické hodnotě vstupního slova, G je zisk výstupního bufferu (1 nebo 2) a n je počet bitů převodníku. Hodnoty rozsahů a velikosti kroků na výstupech D/A převodníků, vypočtené pro hodnoty zvolené v tabulce 5.1, jsou uvedeny v tabulce 5.2, kde jsou pro přehlednost uvedeny tytéž hodnoty pro řídicí vstupy analogové části a pro výstup zdroje.

Tabulka 5.2: Rozsahy a velikosti kroku v různých místech obvodu

Veličina	Výstup D/A převodníku		Řídicí vstup analogové části		Výstup zdroje	
	Rozsah	Q	Rozsah	Q	Rozsah	Q
U	0–3.2 V	1 mV	0–5 V	1.5626 mV	0–32 V	10 mV
I	0–2.6 V	1 mV	0–5 V	1.923 mV	0–2.6 A	1 mA

5.1.3 Přizpůsobení rozsahu

Rozsahy výstupních napětí D/A převodníku je třeba přizpůsobit vstupním rozsahům řídicích signálů analogové části zdroje. To lze provést v nejjednodušším případě přepočítáním hodnot vstupních děličů (P1, R28+29, P2, R27+R30). Druhá možnost je přizpůsobit rozsahy zesilovačem, zařazeným mezi výstup D/A převodníku a vstup řídicího napětí analogové části. Teoreticky jsou obě řešení rovnocenná a přestože první řešení vypadá jednodušeji, pro reálné zapojení je vhodnější řešení druhé. Poskytuje totiž prostor pro kompenzaci offsetu, viz 5.1.4.

Konkrétní obvodové řešení je patrné ze schématu digitální části v příloze C. D/A převodník IC3 je napájen napětím VDD, stejně jako mikropočítač IC4 a obvod sériového rozhraní IC5. Proti možnému rušení po napájecí cestě od těchto obvodů je převodník odrušen kondenzátorem C8. Výstupy D/A převodníku IC3 jsou přímo zapojeny na neinvertující vstupy zesilovačů IC1, IC2, jejichž zisk je obecně určen požadovaným poměrem výstupního napětí ku vstupnímu, neboli:

$$A_U = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \tag{5.4}$$

Současně pro zisk uvedeného zapojení neinvertujícího zesilovače platí:

$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \tag{5.5}$$

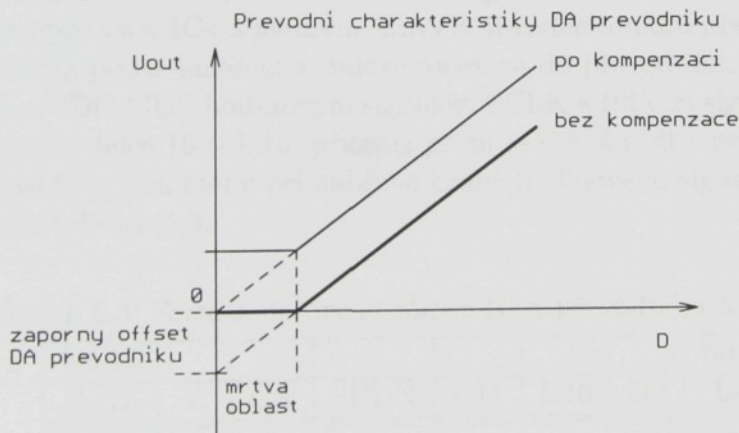
Rovnici 5.4 dosadíme do 5.5 a vyjádříme poměr rezistorů:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} - 1 \tag{5.6}$$

Dosažením již známých hodnot z tabulky 5.2 dojdeme k hodnotě poměru, který následně vyjádříme vhodnými hodnotami rezistorů z řady E24. Případná odchylka se dorovná trimry R29, R30 v analogové části. Pro nastavení offsetu slouží trimry R6, R7. Operační zesilovače jsou napájeny z hladin $V+$ (8,2V) a $V-$ (-3,9V), aby bylo možné vzhledem k vlastní saturaci OZ dosáhnout požadovaný rozsah 0–5V. Výstupy zesilovačů IC1, IC2 (řídící napětí U_{OUT} , I_{OUT}) jsou vyvedeny na konektor JP3, který slouží k propojení s analogovou částí zdroje.

5.1.4 Kompenzace offsetu

Celkové offsety výstupních veličin zdroje se skládají z několika složek. Nejproblematictější je offset samotného D/A převodníku. Pokud je záporný, způsobuje na převodní charakteristice D/A převodníku zlom, který nelze nijak kompenzovat. Projevuje se tak, že výstupní napětí se nezačne měnit hned při změně LSB, ale až když vstupní slovo D dosáhne určité hodnoty, viz. obrázek 5.1. Dalším zdrojem offsetu je výstupní buffer D/A převodníku. Jelikož je převodník napájen nesymetricky, je jeho buffer v provedení operačního zesilovače typu „Rail to Rail“. Ten produkuje malý kladný offset, který lze vykompenzovat. Rovněž analogová část postavená na bázi operačních zesilovačů má svůj vlastní offset, který je možné kompenzovat společně s offsetem bufferu. K tomu slouží zapojení vhodného typu operačního zesilovače, který má vyvedeny vstupy pro kompenzaci vlastního offsetu, ve funkci neinvertujícího stejnosměrného zesilovače. Z běžně dostupných typů vyhovuje klasický typ LM741. Pokud by offset nebyl nijak kompenzován, způsoboval by zbytečnou chybu nuly přístroje jako celku, i když lze takto kompenzovat pouze dvě ze tří složek výsledného offsetu.



Obrázek 5.1: Kompenzace offsetu DA převodníku

5.1.5 Komunikace převodníku s mikropočítačem

Komunikace D/A převodníku IC3 s mikroprocesorem IC4 probíhá přes rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface). Toto rozhraní bylo vyvinuto firmou Motorola a je určeno speciálně pro komunikaci mikroprocesorů s periferními obvody, jako jsou D/A a A/D převodníky, inteligentní čidla, paměti FLASH a EEPROM a další speciální obvody vybavené tímto rozhraním. Mezi základní rysy patří:

- Sběrnice sdílená jedním MASTER zařízením a jedním nebo více SLAVE zařízením.
- Synchronní přenos dat, synchronizační signál SCLK generuje vždy MASTER zařízení (mikroprocesor).
- Data jsou přenášena typicky jako 8 bitová slova, nebo jejich násobky.
- Datová sběrnice je dvouvodičová (signály MISO – Master In Slave Out, MOSI – Master Out Serial In), čímž je umožněn plně duplexní přenos.
- SLAVE zařízení jsou adresována signálem CS (Chip Select), přičemž každé musí mít svůj vodič.

SPI sběrnice tedy může mít různý počet vodičů v závislosti na počtu a způsobu propojení SLAVE obvodů. Pokud nevádí zpomalení komunikace, lze obvody zřetězit spojením datových výstupů se vstupy následujících obvodů, přičemž vstupy CS všech obvodů jsou spojeny. Potom je možné data do obvodů přenést jediným dlouhým zápisem, kdy data musí být vysílána v takovém pořadí, aby po ukončení zápisu byla ve všech obvodech data pro ně určená. Přehled možností rozhraní SPI lze nalézt např. v [4] a v katalogových listech příslušných obvodů.

V našem konkrétním zapojení vystačíme s nejjednodušší konfigurací, kdy MASTER obvodem je mikroprocesor IC4 a jediným SLAVE obvodem duální převodník IC3. Protože data jsou přenášena pouze směrem z mikroprocesoru do převodníku, vystačíme s jedním datovým vodičem SDO/SDI, hodinovým signálem SCLK a řídicím signálem CS. Data jsou přenášena v rámci o délce 16-ti bitů, přičemž první je vysílán bit s nejvyšší vahou (MSB). Jednotlivé datové bity jsou čteny při náběžné hraně hodinového signálu SCLK. Struktura rámce je uvedena tabulce 5.3.

Tabulka 5.3: Formát datového rámce D/A převodníku MCP4822

bit 15							bit 8
A/B	X	GA	SHDN	D11	D10	D9	D8
bit 7							bit 0
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

Význam jednotlivých bitů:

- $\overline{A/B}$ – rozhoduje, do kterého kanálu převodníku budou data zapsána
- X – nepoužit
- $\overline{GA}$ – určuje zisk výstupního zesilovače daného kanálu
- $\overline{SHDN}$ – nastavení režimu snížené spotřeby
- D11:D0 – 12 datových bitů (D11 = MSB, D0 = LSB), hodnota v přímém binárním kódu.

5.2 Ovládací prvky

Nahrazením klasických potenciometrů v analogové části zdroje za D/A převodníky byl zdroj zároveň zbaven manuálních ovládacích prvků. Aby bylo možné přístroj i nadále používat samostatně bez nutnosti připojení k počítači, je nezbytné doplnit jej o nové ovládací prvky, které budou obsluhovány mikroprocesorem. Z hlediska snadného vyhodnocování se nabízí ovládání tlačítkové, které však mnohdy není uživatelsky nejprívětivější.

Zdroj je v původním provedení vybaven dvojicí potenciometrů pro jemné a hrubé nastavení hodnot výstupního napětí a proudu. Toto klasické uspořádání lze snadno zachovat použitím tzv. rotačních kodérů. Princip činnosti je shodný s inkrementálním rotačním snímačem (IRC), konstrukce je však výrazně zjednodušena právě pro použití ve funkci náhrady klasického potenciometru, jakožto ovládacího prvku. Zatímco průmyslové IRC snímače obvykle pracují na optickém principu, se kterým lze dosáhnout vysokého počtu impulsů na jednu otáčku (a životnosti), rotační kodéry vystačí s mechanickými kontakty, neboť počet impulsů na otáčku bývá v rozmezí 12 až 30 impulsů a rychlost otáčení se nepředpokládá příliš vysoká. Stejně jako IRC ale obsahuje dva snímače, které produkují dvě řady vzájemně fázově posunutých pulzů. Frekvence pulzů udává rychlost otáčení a z fázového posuvu obou signálů lze určit smysl otáčení. Způsob vyhodnocení směru otáčení je popsán v části 6.4.2.

V konstrukci je použit rotační kodér RE-30S, který obsahuje dva spínače s vývody A, B a společným vývodem C. V klidové poloze jsou kontakty rozepnuty, při otáčení se vývody A a B spínají na vývod C. Kromě toho je kodér vybaven dalším spínacím kontaktem s vývody SW1, SW2, který funguje jako tlačítko při axiálním stisku osy kodéru. To je využito k přepínání mezi hrubým a jemným krokem při nastavování hodnot. Připojení rotačních kodérů k mikroprocesoru je patrné se schématu v příloze C. Společné vývody C obou kodérů a vývody tlačítek SW2 jsou připojeny na zem (DGND). Ostatní vývody jsou připojeny k napětí VD) přes pull-up rezistory (RN1), které na těchto vývodech udržují v klidovém stavu logickou 1. Sepnutím kontaktu je odpovídající vývod uzemněn, což představuje logickou 0. Takto získané logické úrovně lze přímo zpracovávat vstupy mikroprocesoru. Ošetření proti záskmitům kontaktů je provedeno softwarově. Oba rotační kodéry (CODER_U, CODER_I) jsou umístěny na samostatném plošném spoji, který je s deskou digitální řídicí části spojen plochým vodičem přes konektor (JP2). Kromě kodérů jsou na tomto pomocném plošném spoji umístěny též LED diody (LED_U, LED_I), indikující režim jemného kroku. V tomto režimu je nastavovaná hodnota měněna s nejjemnějším možným krokem, tj. po jednom Q. Hrubý krok je stanoven tak, aby se ovládání co nejvíce blížilo původnímu ovládání potenciometry, tedy aby bylo možné celý rozsah výstupního napětí a proudu přeladit přibližně jednou otáčkou kodéru, která vygeneruje 30 impulsů. Velikosti jemného a hrubého kroku jsou shrnuty v tabulce 5.4.

Tabulka 5.4: Volba jemného a hrubého kroku

Krok	Jemný		Hrubý	
	Hodnota	Počet Q	Hodnota	počet Q
U	10mV	1	1V	100
I	1mA	1	100mA	100

5.3 Komunikace s počítačem

Na základě úvah v části 3.1 bylo pro realiaci fyzické vrstvy zvoleno rozhraní RS 232.

5.3.1 Problematika galvanického oddělení

Pro převod logických signálů úrovně TTL/CMOS na napěťové úrovně dle TIA/EIA 232 F existují speciální integrované obvody. Nejznámějším obvodem této kategorie je bezesporu obvod MAX232 firmy MAXIM, který vystačí s jediným napájecím napětím 5V, přičemž napětí potřebná pro buzení přenosové linky získává pomocí integrované nábojové pumpy. Tento obvod převzala do svého výrobního programu většina předních výrobců polovodičů a je proto k mání v různých modifikacích. Většina těchto obvodů přitom nijak neřeší základní nedostatek, kterým je galvanické spojení přístroje s počítačem, resp. propojovaných zařízení obecně. Galvanické spojení způsobuje dva základní problémy:

- Při rozdílném zemním potenciálu propojovaných zařízení protéká zemním vodičem vyrovnávací proud vyvolávající na tomto vodiči napěťový úbytek, který má zpravidla charakter brumu o frekvenci 50Hz. Jelikož je rozhraní RS 232 definováno jako elektricky nesymetrické, přičítá se brum k užitečnému signálu datových vodičů, čímž snižuje šumovou imunitu kanálu. Pokud je rozdíl potenciálů malý, může vést pouze k chybám při přenosu, je-li větší, může způsobit i zničení portu.
- Vylučuje používat laboratorní přístroje jako plovoucí vůči zemi. To se týká zejména měřicích přístrojů, jako jsou stolní multimetry a generátory, může to však vadit například i tehdy, když potřebujeme výstupy dvou zdrojů (počítačem řízených) spojit do série.

Z těchto důvodů je u laboratorních přístrojů zpravidla vyžadováno galvanické oddělení výstupu komunikační linky od zbytku zařízení.

Nejjednodušší a často používané řešení je standardní obvod MAX232, který je napájen ze zvláštního sekundárního vinutí transformátoru, galvanicky odděleného od všech ostatních. Datové signály jsou potom odděleny prostřednictvím optronů na úrovních TTL/CMOS. Nevýhodou tohoto uspořádání je, že mezi vinutími transformátoru může vznikat nezanedbatelná kapacitní vazba, která by u citlivějších měřicích přístrojů mohla mít negativní vliv. Izolační pevnost běžných transformátorů navíc bývá definována pouze mezi primárem a sekundárem, nikoli mezi sekundáry navzájem. To lze sice obejít použitím samostatného transformátoru pro napájení galvanicky oddělené části, ale je třeba podotknout, že miniaturní zalité transformátorky, které se pro takový účel přímo nabízejí, mají značný rozptylový tok, který uvnitř přístroje opět může způsobovat nežádoucí rušení. Posledním nedostatkem je, že takovýto způsob napájení nelze použít u bateriově napájených přístrojů, jako jsou ruční digitální multimetry.

U nich se používá obdoba výše popsaného zapojení s tím rozdílem, že napájecí napětí pro MAX232 je odvozeno od napěťových úrovní signálů přenášených po kabelu. Napětí jednotlivých signálů jsou přes diody (nejlépe Schottkyho) přivedena na společný sběrací kondenzátor, za nímž následuje stabilizace na úroveň 5V, potřebnou pro napájení MAX232. Komunikační kabel má potom na straně přístroje podobu optického konektoru, na kterém jsou umístěny fotodioda a fototranzistor, zajišťující galvanické oddělení datových signálů. Přestože je toto řešení hojně využíváno i renomovanými výrobci měřicích přístrojů, nelze zaručit 100% funkčnost na všech počítačích, neboť například některé notebooky budí sériovou linku nižším napětím, než běžné stolní počítače.

5.3.2 Realizace komunikačního rozhraní

Problém galvanického oddělení sériové linky lze technicky poměrně čistě řešit použitím specializovaných obvodů, které si samy zajišťují napájení izolované části rozhraní pomocí vlastního spínaného DC/DC měniče. Příkladem této koncepce je dvojice integrovaných obvodů MAX250 a MAX251 od firmy MAXIM. S minimem vnějších součástek jsou schopné galvanicky oddělit dva signály v každém směru a to až do rychlosti 19,2 kbaud. Právě tyto obvody jsou použity pro konstrukci komunikační brány digitální řídicí části zdroje.

Schéma zapojení je patrné z přílohy C. Podrobný popis obou integrovaných obvodů je uveden v katalogovém listu výrobce [6]. První z obvodů, MAX250 (IC5), převádí napěťové úrovně TTL/CMOS z procesoru (IC4) na budicí proud diody vysílacího optočlenu OK1 a naopak, přijatý signál z kolektoru fototranzistoru přijímacího optočlenu OK2 tvaruje do těchto úrovní. Diody optočlenů lze připojit bez omezovacích rezistorů přímo k výstupům, protože tyto jsou řešeny jako zdroje konstantního proudu o hodnotě cca 7mA. Dále obvod IC5 obsahuje oscilátor o frekvenci cca 150 kHz a střídě 1:1, kterou jsou buzeny vnitřní spínací MOSFET tranzistory, jejichž zátěž tvoří primární vinutí izolačního transformátoru (IT1) v zapojení Push–Pull. Kondenzátor C1 slouží k vykrývání odběrových špiček vznikajících vlivem činnosti měniče. Obvod MAX251 (IC6) obsahuje opět nezbytné převodníky úrovní, tentokrát však z TTL/CMOS na RS 232 a dále jednocestný usměrňovač a stabilizátor kladného napětí (vůči vývodu 14 – ISO.GND). Toto napětí je vyhlazováno kondenzátorem C4 a dále stabilizováno pro napájení vnitřní logiky. Stabilizované napětí je filtrováno kondenzátorem C2. Záporné napětí je jednocestně usměrněno diodou D1 a vyhlazeno kondenzátorem C3. Datové signály RX, TX jsou vyvedeny na standardní devítipinový konektor Canon X1, izolovaně umístěný na zadním panelu přístroje. Oproti výrobce doporučenému zapojení musely být do kolektorů optočlenů OK1, OK2 doplněny zatěžovací rezistory R1, R2, které zajišťují rychlé rozepnutí fototranzistorů.

5.3.3 Návrh izolačního transformátoru

Jedinou kritickou součástí popsaného zapojení je izolační transformátor IT1. V katalogovém listu [6] je uvedena specifikace, podle níž lze transformátor navrhnout. Nejdůležitějšími parametry pro stanovení počtu závitů jsou převodní poměr vinutí a minimální indukčnost primárního vinutí. Nejdříve je nutné zvolit vhodný typ feritového jádra, které bude schopné pracovat při požadované spínací frekvenci 150kHz. Přitom by mělo mít co možná nejvyšší relativní permeabilitu, aby celkový počet závitů potřebných pro dosažení dané indukčnosti byl malý. Výhodami nízkého počtu závitů jsou snadnější výroba, menší stejnosměrný odpor vinutí (lze použít vodič s větším průřezem) a menší nároky na prostor pro vinutí. Indukčnost cívky s toroidním jádrem je dána vztahem:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_R S_J N^2}{l_J}, \quad (5.7)$$

kde: μ_0 je permeabilita vakua [H/m], μ_R je relativní permeabilita materiálu, z něhož je jádro vyrobeno [–], S_J je průřez jádra [m²], N je počet závitů [–] a l_J je střední délka dráhy magnetického toku [m]. Výrobce obvykle vlastnosti materiálu i rozměry jádra zahrnuje do jediné konstanty A_L , která se uvádí v katalogu:

$$A_L = \frac{\mu_0 \mu_R S_J}{l_J} \quad (5.8)$$

Indukčnost se potom počítá jednoduše podle vztahu:

$$L = A_L N^2 \quad (5.9)$$

Odtud vyjádříme počet závitů potřebný k dosažení požadované indukčnosti s konkrétním typem jádra jako:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \quad (5.10)$$

V této konstrukci byl transformátor navinut na běžné toroidní jádro T16 z materiálu H20 (podle značení výrobce Pramet Šumperk). Hodnota konstanty A_L podle katalogu je $1190 \text{ nH} \pm 25\%$ a pro požadovanou minimální indukčnost primáru $L=1\text{mH}$ vyjde počet závitů $N=30$. Protože je primár ve dvojčinném zapojení Push–Pull, je jeho vinutí rozděleno na dvě sekce po 15-ti závitech. Převodní poměr specifikovaný v katalogovém listu [6] je 1:1 a sekundární vinutí má tudíž stejný počet závitů ($N=30$) jako primární. Pro zvýšení izolační pevnosti transformátoru jako celku je vhodné na jádro před navinutím nenést (např. ponořením) dvě až tři vrstvy elektroizolačního laku. Vinutí je vhodné od sebe prostorově oddělit tak, aby každé zabíralo necelou polovinu obvodu jádra a mezi krajními (sousedními) závity primáru a sekundáru zbylo několik mm prostoru. Obě vinutí jsou navinuta lakovaným měděným vodičem o průměru 0,3 mm. Po navinutí je vhodné mechanicky fixovat vinutí nanesením další vrstvy laku.

5.4 Výběr mikroprocesoru

Prvním krokem při volbě vhodného typu mikroprocesoru je stanovení všech potřebných signálů, jejichž prostřednictvím bude mikroprocesor komunikovat s okolním. V našem případě se jedná o tyto 3 skupiny komunikačních signálů:

- Standardní logické vstupy pro obsluhu ovládacích prvků a výstupy pro indikační LED diody.
- Rozhraní SPI pro komunikaci s D/A převodníkem.
- Standardní sériová linka pro obousměrnou komunikaci s počítačem.

Výrobci mikroprocesorů se snaží dosáhnout jejich velké univerzálnosti tím, že do jediného pouzdra integrují velké množství periferních obvodů, jako jsou čítače a časovače, analogové komparátory, A/D převodníky, generátory PWM signálu, komunikační rozhraní a další. Vzhledem k omezenému počtu vývodů pouzdra je však často jeden pin sdílen několika periferními obvody, přičemž je na uživateli, aby zvolil, pro jakou funkci chce daný pin využít. Z toho vyplývá, že zpravidla nelze použít libovolnou kombinaci periferních obvodů daného mikroprocesoru. Při jeho výběru je tedy nutné se kromě toho, zda požadované periferie obsahuje, zabývat také tím, zda je možné je používat současně.

Jedním z mnoha typů mikroprocesorů, splňujících výše stanovená kritéria, je mikroprocesor PIC16F689 od firmy Microchip, který byl zvolen za základ této konstrukce. Kompletní procesoru popis je uveden v [7]. Jedná se o moderní 8-bitový mikroprocesor, jehož základní vlastnosti (podstatné pro tuto konstrukci) jsou:

- Architektura RISC (z anglického Reduced Instruction Set Computer – počítač s redukovanou instrukční sadou).
- Paměť programu typu FLASH o kapacitě 4096 slov.
- Datová paměť SRAM a EEPROM, každá o kapacitě 256B.
- Osmiúrovňový hardwarový zásobník.
- Přerušení (externí, od integrovaných periférií, při změně stavu portu).
- Hardwarově implementovaný modul EUSART (Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter).
- Hardwarově implementovaný modul SSP, kompatibilní s rozhraním SPI.
- 16-ti bitový čítač/časovač

5.5 Přiřazení vývodů

Mikroprocesor je vybavený celou řadou periferních obvodů, z nichž však v této konstrukci využijeme jen malou část. Jsou to moduly EUSART, sloužící pro připojení sériové linky v třívodičovém zapojení, a SSP (Synchronous Serial Port) v režimu SPI, který odesílá data do D/A převodníku. Pouzdro mikroprocesoru má celkem 20 vývodů, z nichž dva jsou napájecí. Zbývajících 18 vývodů jsou univerzální vstupy a výstupy, které jsou rozděleny mezi celkem 3 porty.

Porty PORTA a PORTB nejsou vyvedeny v plné šíři 8 bitů, mají však tu podstatnou vlastnost, že změnou logické úrovně na nich lze vyvolat přerušení (tzv. on change

interrupt). Port PORTA má vyvedeno šest bitů (RA0:5), dva z nich jsou však fyzicky sdíleny s vývody sloužícími pro připojení krystalu oscilátoru, tudíž pro uživatele zbývají čtyři bity. (Všechny bity portu PORTA je možné využívat pokud se použije některý z interního oscilátoru.) Port PORTB má vyvedeny pouze čtyři bity (RB4:7), z nichž dva jsou fyzicky sdíleny s vývody RX, TX modulu EUSART a jeden s vývodem SCK modulu SSP.

Port PORTC je vyveden v plně šíři osmi bitů, z nichž jeden je sdílen s vývodem SDO modulu SSP. Po odečtení všech sdílených vstupů tedy zbývají čtyři bity portu PORTA schopné generovat přerušení při změně log. úrovně (což právě dostačuje k připojení dvou potřebných rotačních kodérů a dvou tlačítek), jeden bit portu PORTB a sedm bitů portu PORTC. Zbývající vstupy a výstupy jsou připojeny k volným vývodům portů s ohledem na co nejjednodušší návrh plošného spoje. Přehled všech signálů a jejich funkcí je uveden v tabulce 5.5.

Tabulka 5.5: Signály mikroprocesoru a jejich funkce (I = vstup, O = výstup)

Jméno signálu	Vývod procesoru		Směr	Funkce
UA	19	RA0	I	signál A kodéru napětí
UB	16	RC0	I	signál B kodéru napětí
UT	18	RA1	I	tlačítko kodéru napětí
IA	4	RA3	I	signál A kodéru proudu
IB	5	RC5	I	signál B kodéru proudu
IT	17	RA2	I	tlačítko kodéru proudu
LED_I	15	RC1	O	jemný krok proudu
LED_U	14	RC2	O	jemný krok napětí
LED_S	13	RB4	O	indikace manuálního ovládání
TX	10	RB7	O	vysílání seriové linky
RX	12	RB5	I	příjem seriové linky
SDI	9	RC7	O	data D/A převodníku
SCK	11	RB6	O	hodiny D/A převodníku
CS	8	RC6	O	řízení D/A převodníku

Zapojení mikroprocesoru IC4 v rámci digitální řídicí části je patrné z jejího celkového schématu v příloze C. Procesor je napájen napětím VDD (+5V), které je lokálně odrušeno kondenzátorem C5. Zdrojem hodinového kmitočtu je vnitřní oscilátor ve výrobce doporučeném zapojení, tvořeném kondenzátory C6, C7 a krystalem Q1, který určuje frekvenci oscilátoru. Ta může u použitého typu procesoru být v rozmezí 0–20 MHz. Zvolená frekvence 11.0592 MHz je jednou z hodnot, při kterých lze dosáhnout přesného generování přenosové rychlosti (tzv. baudrate) v modulu EUSART. Indikační LED diody (LED_U, LED_I, LED_S) jsou připojeny přes omezovací rezistory R3, R4, R5 v negovaném režimu, kdy příslušná dioda svítí, pokud je daný vývod procesoru v log. 0. Výstupy logických obvodů mají totiž zpravidla menší úbytek v režimu zátěže (sink), než v režimu zdroje (source) a tedy je v tomto režimu i nižší výkonová ztráta na výstupním tranzistoru daného výstupu. Všechny ostatní signály jsou přenášeny přímo v úrovních TTL/CMOS.

5.6 Konstrukční provedení

Řídící část je postavena na dvou deskách plošných spojů (DPS). Obrazce plošných spojů a osazovací předpisy jsou uvedeny v příloze D. Pomocná deska nese rotační kodéry a indikační LED diody, všechny zbývající součástky jsou umístěny na hlavní DPS. Toto uspořádání umožňuje umístit DPS ve skříni zdroje podle potřeby, přičemž ovládací prvky na panelu se připojí vícežilovým vodičem ke konektoru JP2. Manuální ovládání je také možné zcela vynechat a používat řídicí část pouze ve spolupráci s počítačem. Obě desky jsou navrženy jako jednostranné a v klasické THT montáži, což zjednodušuje kusovou výrobu.

Konektor JP3 slouží pro připojení analogové části zdroje, konektor JP4 pro vyvedení sériové linky na panel zdroje. Standardní konektor pro RS 232 je 9-ti pinový Canon, v tomto případě v provedení Female. Ten musí být namontován izolovaně od šasi zdroje, protože při propojení stíněným kabelem by došlo k propojení s šasi počítače přes stínění.

Umístění hlavní desky je vhodné zvolit takové, aby jednak nebránila proudění vzduchu uvnitř skříně a současně nebyla vystavována teplu od chladiče a transformátoru. Tak se dá částečně omezit vliv teplotních koeficientů součástek. Dále je vhodné ji umístit co nejdále od transformátoru, tedy z dosahu jeho rozptylového magnetického pole.

Kapitola 6

Program mikroprocesoru

Program mikroprocesoru v maximální možné míře využívá přerušovacího systému. Ve výchozím stavu po zapnutí napájení jsou veškerá přerušení zakázána. Je tomu tak proto, aby nebyl nijak narušován chod počáteční inicializace. Během ní se provede konfigurace požadovaných periférií, nastavení počátečních hodnot proměnných a výběr zdrojů přerušení. To je globálně povoleno až jako poslední instrukce inicializace. Po jejím ukončení je prováděna smyčka hlavního programu. V tomto stavu procesor setrvává tak dlouho, dokud nenastane událost, která způsobí přerušení. Tou může být buď povel od manuálních ovládacích prvků, nebo přijetí znaku sériovou linkou. V tom okamžiku se pozastaví hlavní smyčka a začne se vykonávat rutina obsluhy přerušení. Během provádění této obsluhy je přerušení automaticky globálně zakázáno, aby nemohlo dojít ke kolizi. Procesor má totiž pouze jediný vektor přerušení a neumožňuje během obsluhy přerušení obsloužit další přerušení s vyšší prioritou, tak jako to umí dospělé procesory. Přerušení je opětovně povoleno až po dokončení obsluhy události, která jej vyvolala. Během trvání obsluhy jsou tedy veškeré další možné zdroje přerušení ignorovány.

6.1 Inicializace

Počáteční inicializace je první kód, který se provádí po spuštění procesoru. Jejím úkolem je nastavení všech parametrů hardware, které nelze nastavit v tzv. konfiguračním slově již při programování. Zejména se jedná o tyto body:

- Nastavení požadovaných směrů jednotlivých bitů všech portů, které lze konfigurovat jako vstupní nebo výstupní. Správný směr je nutné nastavit i u bitů, které jsou využívány moduly EUSART a SSP.
 - Asynchronní režim přenosu
 - Rychlost 9600 b/s
 - 8 datových bitů
- Konfigurace požadovaného režimu a rychlosti modulu EUSART, v našem případě jsou konkrétní parametry:
 - Režim SPI Master
 - Data vysílána při náběžné hraně hodinového signálu SCLK
 - Rychlost přenosu FOSC/4 (nejrychlejší možná)

– Nastavení všech registrů na požadované počáteční hodnoty

- Výběr a povolení požadovaných zdrojů přerušení: On Change Interrupt od portu PORTA a příjem znaku ze sériové linky modulem EUSART.

6.2 Hlavní smyčka

Smyčka hlavního programu slouží pouze k počítání času funkce TimeOut. Čas je měřen 16-ti bitovým časovačem TIMER1 se zařazenou předděličkou s poměrem 1:8. Časovač je aktivován příkazem MOFF, tedy při vypnutí manuálního ovládání. Zdrojem hodinového signálu časovače je frekvence oscilátoru dělená čtyřmi ($11.0592 / 4 = 2,7648$ MHz). V této konfiguraci trvá čítání 16-ti bitového čísla (0000h až FFFFh) přibližně 0,19s. Delší čas lze měřit programově čítáním počtu přetečení 16-ti bitového registru časovače. Doby 30s je dosaženo po 158 přetečeních ($30 / 0,19 = 158$), vystačíme tedy s jedním 8-bitovým registrem. Při každém přetečení časovače je tento registr inkrementován a jeho obsah testován na hodnotu 158. Pokud je dosažena, znamená to, že čas vypršel a manuální ovládání je opět zapnuto.

6.3 Přerušení

Základní funkcí obsluhy přerušení je čtení a vyhodnocení stavu ovládacích prvků. K tomu lze s výhodou využít funkci přerušovacího systému nazvanou On Change Interrupt, kterou jsou vybaveny porty PORTA a PORTB. Funguje tak, že u bitů, nastavených do režimu vstupu, při každém čtení stavu portu (ve druhém strojovém cyklu každého instrukčního cyklu) porovnává nově načtenou hodnotu s hodnotou předchozí, která je ukládána ve speciálním neadresovatelném registru. Zjistí-li rozdíl, vygeneruje přerušení, pokud je pro daný pin povoleno. Tímto způsobem lze tedy detekovat stisk tlačítka či otočení kodérem, jelikož však mikroprocesor má pouze jediný vektor přerušení, není schopen rozlišit, který ovládací prvek přerušení způsobil. Toto rozhodnutí se musí provést programově. Princip je stejný jako u vlastního zjištění přerušení. Stav portů PORTA, PORTC (ke kterým jsou připojeny kodéry a tlačítka) jsou ukládány ve dvou dvojicích registrů. Jedna pracovní dvojice slouží pro uložení okamžitého stavu portů po příchodu přerušení a druhá pro zálohování tohoto stavu pro účely porovnání při dalším přerušení. Při inicializaci jsou obě dvojice nastaveny na stejné hodnoty. Po vyvolání prvního (a každého dalšího) přerušení je okamžitý stav portů uložen do pracovních registrů pro případ, že by se stav portu stihl změnit ještě během vyhodnocování. Původce přerušení lze jednoduše identifikovat porovnáním odpovídajících bitů nově načtených stavů portů (bajtů) v pracovních registrech s předchozími stavy uloženými v záložních registrech. Teoreticky se může stát, že dva zdroje vygenerují přerušení ve stejný čas (např. při současném stisku obou tlačítek) a v tom případě je třeba stanovit prioritu, určující, který ze zdrojů má být obsloužen. Ta je pevně dána pořadím, v jakém jsou testovány jednotlivé zdroje přerušení. Konkrétní pořadí je stanoveno takto:

1. Příjem znaku modulem USART
2. Stisk tlačítka napětí
3. Stisk tlačítka proudu
4. Otočení kodérem napětí
5. Otočení kodérem proudu

Jakmile je rozpoznán jeden zdroj přerušení, je provedeno jeho vyhodnocení a po jeho ukončení se již další případné zdroje neobsluhují. Před úplným ukončením obsluhy přerušení jsou záložní registry přepsány registry pracovními. Poté je přerušení opět povoleno a pokračuje se ve vykonávání smyčky hlavního programu.

6.4 Obsluha manuálních ovládacích prvků

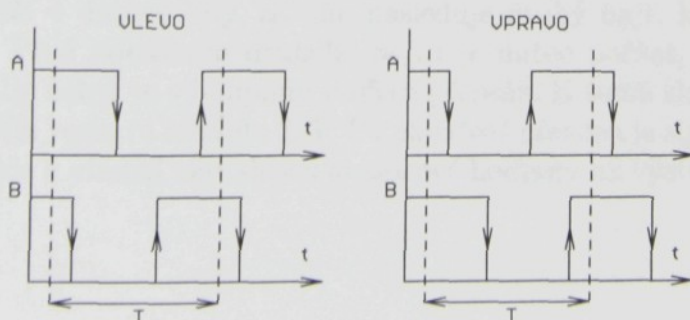
Možným zdrojem přerušení jsou manuální ovládací prvky. Jelikož se jedná o součástky s mechanickými kontakty, je třeba u nich řešit zákmity. To je provedeno zařazením malého zpoždění před vlastní čtení aktuálního stavu portu. Při vyvolání přerušení se tedy nejdříve testuje přerušení od USART a pokud toto nenastane, čeká se po dobu $200\mu\text{s}$, dokud se neustálí napětí na vstupech portů PORTA a PORTC, kam jsou připojeny ovládací prvky. Až poté jsou načteny stavy portů a vyhodnocen konkrétní původce přerušení, jak bylo popsáno výše. Doba zpoždění byla stanovena experimentálně.

6.4.1 Detekce stisku tlačítek

Nejprve jsou testovány stisky tlačítek, která slouží pro přepínání mezi hrubým a jemným režimem nastavování výstupní veličiny. Výchozí po zapnutí zdroje je režim hrubého nastavení, s každým stiskem tlačítka se režim přepne na opačný. Volba jemného režimu je indikována svitem odpovídající LED diody na panelu. Určitý problém způsobuje to, že přerušení od portu PORTA je generováno jak při přechodu z log. 1 na log. 0, tak i při změně z log. 0 do log. 1, neboli s oběma hranami signálu. Stisknutím tlačítka vygenerujeme taktéž obě hrany, sestupnou hranu při stisku a náběžnou při uvolnění. Takto by se sice režim po stisknutí změnil, ale vzápětí by se po uvolnění tlačítka vrátil zpět. Proto je programově testována také hrana, která přerušení způsobila. Konkrétně je obsluha tlačítka spuštěna až s náběžnou hranou, tedy při jeho uvolnění. Po úspěšném rozpoznání přerušení a požadované hrany je nastaven příznakový bit adresovaný přímo na výstup portu, kam je připojena indikační LED dioda. Tento bit je potom testován při obsluze odpovídajícího rotačního kodéru. Při přechodu z režimu jemného nastavení do hrubého je navíc hodnota napětí či proudu zaokrouhlena na nejbližší hodnotu odpovídající hrubému kroku. Přerušení způsobené sestupnou hranou je ignorováno a žádná užitečná obsluha se nevykonává.

6.4.2 Vyhodnocení směru otáčení rotačního kodéru

Dalším zdrojem přerušení jsou rotační kodéry pro nastavení hodnot výstupních veličin. Výstupem kodéru jsou dva signály A a B, které se při otáčení liší svým fázovým posuvem typicky o $1/4$ periody T . Průběh signálů při otáčení oběma směry je na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Průběh výstupních signálů kodéru při otáčení

Směr otáčení uvažujeme při čelním pohledu na hřídelku. Čárkovanými čarami jsou naznačeny klidové polohy, kdy jsou kontakty rozepnuty a na výstupech je tudíž přes pull-up rezistory udržována log. 1. Signál A budeme považovat za hodinový signál, při jehož náběžné hraně budeme číst úroveň signálu B. Je-li v okamžiku náběžné hrany signálu A signál B v log. 1, otáčí se kodér doleva, je-li v log. 0, otáčí se doprava. Analogicky je možné číst úroveň signálu B při sestupné hraně signálu A, případně při obou jeho hranách. Takový způsob se často využívá pro zvýšení rozlišení průmyslových IRC snímačů, zde je však nežádoucí, protože by během jednoho kroku kodéru generoval dva impulzy. Stejně jako tlačítko totiž kodér v jednom kroku generuje přerušení s oběma hranami signálu A a je tedy nutné programově ošetřit, aby čtení signálu B bylo provedeno pouze při jedné hraně, v našem případě vzestupné, tak jako u tlačítek. Pro ošetření zákmitů kontaktů kodérů platí totéž, co pro tlačítka, neboť zpoždění po vyvolání přerušení je společné pro tlačítka i kodéry.

Číselné hodnoty napětí a proudu jsou uchovávány v registrech k tomu vyhrazených. Jelikož datová paměť procesoru má šířku 8 bitů, je 12-ti bitové číslo rozděleno do dvou registrů (bajtů). V nižším bajtu je uloženo 8 nižších bitů a v horním bajtu 4 vyšší bity. Tento formát se až na řídicí signály přesně shoduje s formátem rámce, v jakém jsou přenášena data do D/A převodníku. Všechny aritmetické operace přičítání a odečítání čísla k 12-ti bitové hodnotě jsou naprogramovány tak, aby se horní i dolní bajty navenek chovaly jako jediný 16-ti bitový registr, tedy například při podtečení dolního bajtu při odečtení čísla je hodnota horního bajtu dekrementována o jednotku. Přitom jsou současně kontrolovány povolené rozsahy, aby nedošlo k celkovému podtečení (při otáčení doleva se hodnota zastaví na nule) nebo překročení rozsahu (při otáčení doprava se hodnota zastaví na určeném maximu).

Při otočení kodéru je nejdříve testován směr a poté příznakový bit režimu nastavování (hrubě/jemně). Podle směru otočení je provedeno přičtení nebo odečtení konstanty, jejíž hodnota je dána příznakem režimu. V režimu jemného kroku je hodnota změněna o 1 (LSB), v režimu hrubého kroku o 100 (viz. tabulka 5.4). Nakonec je zavolána procedura, která změněnou hodnotu výstupní veličiny odešle přes modul SSP do D/A převodníku.

6.5 Komunikace s D/A převodníkem

Zápis dat do D/A převodníku je velice jednoduchý, protože celý průběh přenosu je řízen hardwarově modulem SSP. Před zahájením přenosu je nutné nastavit signál CS do log. 0, aby bylo možné do D/A převodníku zapsat data. Vlastní zápis dat začne uložení bajtu, který má být odeslán, do výstupního bufferu modulu SSP. Ten sám generuje hodinový signál SCLK potřebný pro odeslání jednoho bajtu.

Při každém zápisu do D/A převodníku je nutné přenést celkem dva bajty. První je odeslán vyšší bajt, který obsahuje řídicí bity (určující kanál, do kterého budou data zapsána) a nejvyšší 4 datové bity, za ním následuje druhý bajt, který nese zbývajících 8 datových bitů. Před odesláním druhého bajtu je nutné počkat, dokud se první bajt celý neodvysílá, aby nebyl ve výstupním bufferu přepsán. K tomu slouží příznakový bit ve speciálním funkčním registru modulu SSP. Po ukončení přenosu je signál CS nastaven zpět do log. 1, čímž dojde k vlastní aktualizaci analogové hodnoty na výstupu D/A převodníku.

6.6 Příjem znaku po sériové lince

Zbývající část programu má na starosti komunikaci zdroje s počítačem prostřednictvím příkazů, definovaných v části 3.3. Zatímco u manuálních ovládacích prvků každé přerušení způsobí odpovídající akci, při ovládání počítačem se musí příkaz nejprve složit znak po znaku a jeho vyhodnocení se provede až s příchodem definovaného oddělovacího znaku, či sekvence znaků. Pro tento účel je v paměti procesoru vyhrazena souvislá oblast pěti bajtů pro ukládání příkazu (rozsah odpovídá nejdelšímu příkazu *IDN?). Při přístupu do této oblasti se využívá nepřímého adresování, které umožňuje pracovat s ukazatelem na paměťovou buňku, místo přímé adresy. Inkrementací či dekrementací ukazatele se lze jednoduše pohybovat ve vymezené oblasti.

Obsluha přerušení probíhá následovně: Přijatý znak je načten z přijímacího bufferu modulu EUSART do pracovního registru. Nejprve je testováno, zda se jedná o ukončovací znak LF. Pokud ano, testuje se ještě, zda je prvním znakem nového příkazu a v tom případě je zahozen, protože se předpokládá, že je to součást sekvence oddělovací sekvence CR/LF předchozího příkazu. Pokud není prvním znakem, je považován za ukončovací a v tom případě se pokračuje zpracováním přijatého příkazu. Pokud přijatý znak není LF, testuje se výskyt druhého možného ukončovacího znaku CR. V kladném případě je opět považován za ukončovací a přechází se na zpracování. Pokud přijatý znak není žádným z ukončovacích znaků, jedná se zřejmě o znak příkazu a je třeba jej uložit.

Pro účely odlaďování komunikace přes terminálové aplikace typu Hyperterminál či Te-r-aTerm, kdy se text zadává z klávesnice, je program vybaven schopností rozlišit klávesu backspace (0x08). Jelikož se psané znaky ihned odesílají na sériový port, nebylo by v případě překlepu možné špatně zadaný znak opravit. Bylo by nutné špatně zadaný příkaz potvrdit, aby došlo k jeho načtení a vyčištění přijímacího bufferu pro další příjem a poté by se muselo zadání příkazu celé opakovat. Detekováním znaku backspace lze tuto nepříjemnou vlastnost odstranit. Poslední přijatý znak se vymaže a aby se tato změna projevila i v okně terminálu, kde dojde pouze k posunu kurzoru o krok zpět, je ještě odeslán znak mezera (0x20), kterým je špatně zadaný znak v okně terminálu přepsán a znak backspace (0x08), který opět vrátí kurzor o jednu pozici doleva. Lze takto dokonce vymazat všechny zadané znaky. Kromě této funkce je ruční zadávání příkazů dále zjednodušeno tím, že jsou podporovány jak malé, tak i velké znaky (malé znaky jsou před uložením automaticky převáděny na velké).

Projde-li přijatý znak všemi výše popsány testy, je uložen na adresu danou ukazatelem a ten je následně inkrementován. Obsluha přerušení je potom ukončena. Při všech operacích s ukazatelem (dekrementace při výmazu backspace, inkrementace při příjmu dalšího znaku) se kontroluje povolený rozsah pěti znaků, aby nebyly zbytečně ukládány řetězce, které stejně neodpovídají žádnému z příkazů. Při pokusu o zapsání šestého znaku je tento zahozen, stejně tak jako předchozích pět znaků (byť i platných) a je odesláno chybové hlášení LERR (Length Error - chybná délka). Poté je port (modul EUSART) resetován a ukazatel je nastaven na adresu pro příjem prvního znaku. Při příjmu znaku může nastat ještě tzv. chyba rámce, kterou detekuje přímo modul EUSART. Ta nastává, pokud není přijatý stop bit na očekávané pozici a její příčinou je zpravidla špatné nastavení parametrů sériové linky v počítači (např. 7 datových bitů místo 8 nebo zapnutá parita). Výskyt této chyby je programem testován a je případně oznámena odesláním řetězce RERR (Receive Error - chyba příjmu). Pokud je však chyba skutečně způsobena mylným nastavením portu, nemůže být logicky ani tento řetězec počítačem přijat správně.

6.7 Vyhodnocení a obsluha příkazů

Přijatý řetězec, uložený v paměti, je postupně porovnáván s jednotlivými příkazy. Jejich pořadí je stanoveno tak, aby nejčastěji používané příkazy byly rozpoznány a vykonány co nejrychleji. Zvolené pořadí je následující:

1. U $\langle$ uuu $\rangle$
2. U $\langle$ iii $\rangle$
3. ?
4. MON
5. MOFF
6. *IDN?
7. HELP

Příkazy pro nastavení hodnot napětí a proudu jsou vyhodnocovány odzadu, tedy nejdříve se převedou tři hexadecimální znaky na 12-ti bitové číslo a až potom se podle prvního znaku rozhodne, které veličině bude hodnota náležet. Pokud na očekávaném místě není nalezena hexa číslice, pokračuje se testováním následujících řídicích příkazů. Pokud přijatý řetězec neodpovídá žádnému příkazu, je do počítače odesláno hlášení SERR (Syntax Error – chyba syntaxe). Je-li je některý z příkazů úspěšně rozpoznán, provede se jeho obsluha.

Obsluha příkazů U $\langle$ uuu $\rangle$, U $\langle$ iii $\rangle$ začíná kontrolou rozsahu přijaté hodnoty vzhledem ke zvoleným rozsahům D/A převodníků. Případná vyšší hodnota je automaticky nahrazena maximem rozsahu pro danou veličinu. Poté je uložena do vyhrazených dvojic registrů a odtud odeslána do odpovídajícího kanálu D/A převodníku, stejně jako při otočení kódérem. Nakonec je zformulována a odeslána odpověď ve tvaru definovaném v části 3.3. Pokud je nastaven režim ovládání MOFF, vynulují se též čítače funkce TimeOut.

Příkaz ? slouží ke zjištění aktuálních parametrů zdroje. Odpověď sestaví tak, že převede čísla uložená v registrech na trojice hexadecimálních znaků, které doplní potřebnými znaky podle definovaného formátu a přidá řetězce MON nebo MOFF podle aktuálního režimu. Odeslání do počítače probíhá průběžně tak, jako jsou informace získávány. V režimu MOFF jsou opět vynulovány čítače TimeOut. Odesílání znaků přes sériovou linku modulem EU-SART probíhá podobně, jako u modulu SSP. Vysílání je automaticky zahájeno uložením požadovaného znaku (bajtu) do vysílacího bufferu, přičemž je třeba nejdříve testovat, je-li buffer prázdný po případném předchozím vysílání.

Příkaz MOFF vypne manuální ovládání přístroje tím, že zakáže přerušení od všech ovládacích prvků (On Change Interrupt portu PORTA). Nastaví odpovídající příznakový bit, čímž zhasne zelenou indikační LED diodu, spustí časovač funkce TimeOut a odešle odpověď.

Příkazem MON se manuální ovládání opět aktivuje. Pokud je nastavování napětí nebo proudu v hrubém režimu, provede se též zaokrouhlení aktuálních hodnot na nejbližší hodnotu odpovídající hrubému kroku. Potom se opět nastaví příznak režimu, rozsvítí LED, zastaví časovač funkce TimeOut a nakonec povolí přerušení od portu PORTA a opět pošle odpověď.

Příkazy *IDN? a HELP slouží pouze pro identifikaci přístroje. Pro každý z příkazů je pevně stanoven rozsah adres v datové EEPROM paměti, v němž se nachází text, který je odeslán znak po znaku na sériový port. Součástí textů jsou speciální znaky (!), které jsou při vysílání nahrazeny oddělovačem řádku (CR/LF). I tyto dva příkazy způsobí nulování čítačů funkce TimeOut v režimu MOFF.

Kapitola 7

Demonstrační software pro PC

Pro účely prezentace funkčnosti navrženého způsobu komunikace zdroje s počítačem byl vytvořen jednoduchý demonstrační program pro OS Windows. Byl naprogramován ve vývojovém prostředí Borland Delphi 7, přičemž pro obsluhu sériového portu počítače byla využita knihovna AsyncFree [8]. Náhled ovládacího panelu je na obrázku 7.1.

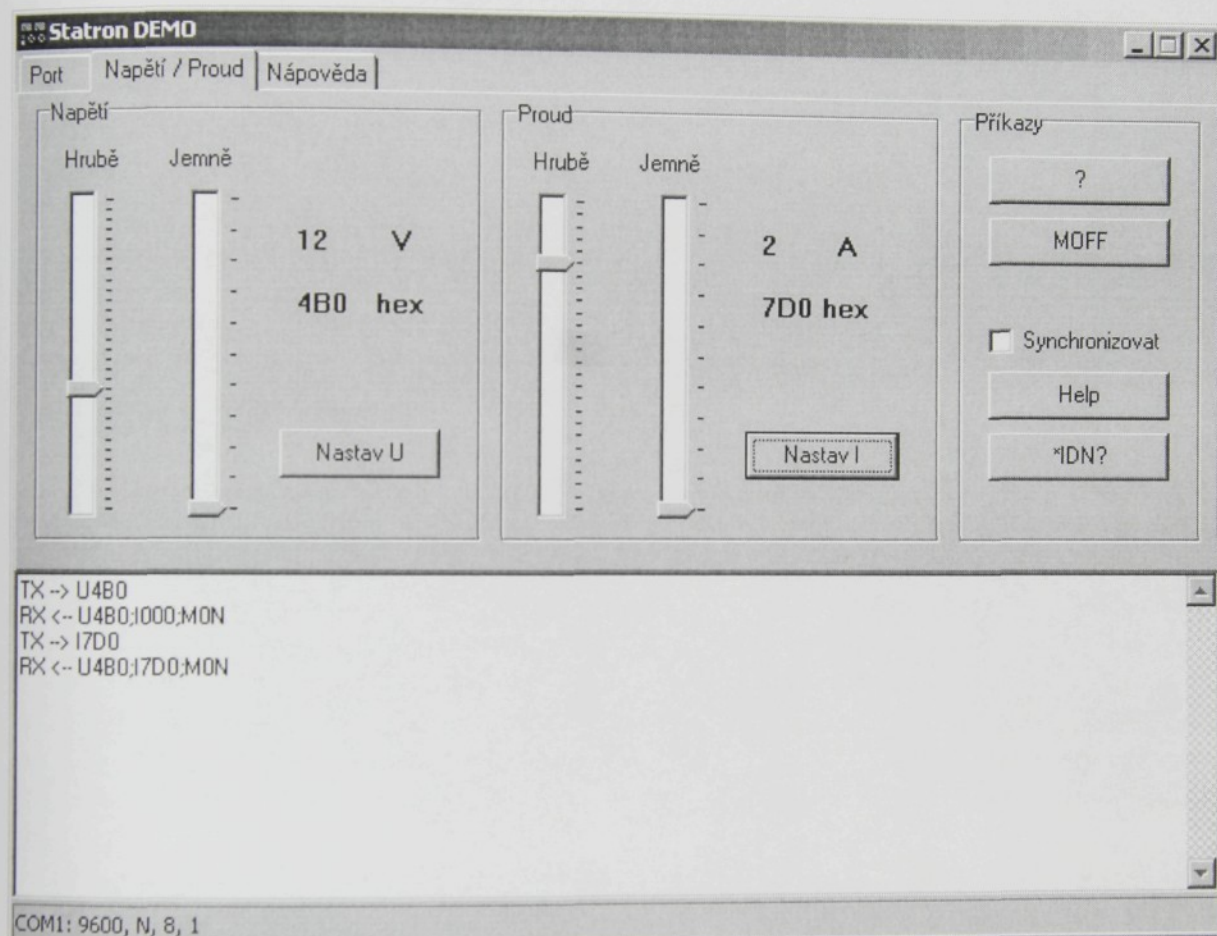
Po spuštění programu je zobrazena záložka Port, kde lze vybrat jeden z dostupných COM portů a tento následně otevřít. Po úspěšném otevření je automaticky zobrazena záložka Napětí/Proud, která slouží jako hlavní ovládací panel. Zde se nacházejí ovládací prvky, kterými lze odesílat všechny příkazy dle tabulky 3.1.

Hodnoty napětí a proudu se nastavují dvojicí posuvných ukazatelů (jemně a hrubě), přičemž zvolená hodnota je zobrazena jak v odpovídajících jednotkách, tak i v násobku kvantovacích kroků převedeném do hexadecimální podoby, která se dosazuje jako argument do příkazu. Ten je odeslán až při stisku tlačítek „Nastav U“, „Nastav I“.

V pravé části okna jsou tlačítka ostatních příkazů. Jejich význam je zřejmý už z popisu protokolu, takže nevyžaduje podrobnější komentář. Po přepnutí do režimu MOFF lze označit volbu „Udržovat režim“, což způsobí odesílání příkazu „?“ každých 20 s. Tím dojde k resetování časovače ve zdroji a jelikož ten je nastaven na 30 s, nedojde k jeho vypršení a tedy ani k samočinnému přepnutí zpět do režimu MON.

Je-li zaškrtnuta volba „Synchronizovat“, jsou hodnoty veličin a polohy posuvníků nastaveny podle hodnot, které vrátil zdroj jako odpověď. V režimu MON lze tedy hodnoty nastavené manuálně na panelu přístroje načíst do počítače.

Probíhající komunikaci lze sledovat v dolní části okna. Odesílané příkazy jsou uvozeny předponou TX, přijaté odpovědi mají předponu RX. Ukončovací znaky CR, LF nejsou zobrazovány.



Obrázek 7.1: Náhled okna demonstračního programu

Závěr

Dosažitelné parametry analogového charakteru jsou předurčeny vlastnostmi použitého zdroje Statron 2223, který patří do nejnižší cenové kategorie a tudíž jeho parametry nejsou a ani nemohou být ve všech směrech ideální. Přesto je pro běžné aplikace dostačující a pro přestavbu relativně vhodný, jednak z důvodu příznivé konstrukce analogové části a samozřejmě také kvůli nižší ceně. Nevhodná je poněkud méně bytelná konstrukce šasi a také řešení pomocného napájecího zdroje, které si vyžádalo úpravu vinutí transformátoru.

Modul digitální řídicí části je navržen co možná nejuniverzálněji s ohledem na možnost vestavby do různých typů zdrojů. Manuální ovládání je řešeno s ohledem na předpokládanou kategorii zdrojů, u které by vestavba modulu přicházela v úvahu. Záměrně tedy ovládání není řešeno klasickou kombinací klávesnice a displeje, která by si vyžádala rozsáhlejší zásahy do mechanické konstrukce, ale rotačními kodéry, které jsou uživatelsky pohodlné podobně jako klasické potenciometry a lze jimi potenciometry na panelu přístroje nahradit bez viditelných zásahů do jeho designu.

U popisovaného zdroje se nepodařilo zcela uspokojivě vyřešit problém offsetu ze dvou důvodů. Prvním je vlastní záporný offset D/A převodníku, který čistě analogovou cestou vykompenzovat nelze. Bylo by však možné ke vstupnímu slovu D/A převodníku přičítat konstantu, která by celý rozsah posunula mírně nad mrtvou oblast, přičemž usazení přesně na nulu by se provedlo opět analogově. U použitého zdroje nemělo smysl toto řešení použít vzhledem k dalšímu zdroji offsetu, kterým je nevhodné vedení zemních spojů na desce analogové části i nesymetrické propojení analogové a digitální části, kvůli němuž se úbytek způsobený průtokem i relativně malého proudu zemním vodičem přičítá k užitečnému signálu. Jelikož na začátku rozsahu D/A převodníku úroveň signálu na jeho výstupu dosahuje řádu jednotek mV, má napěťový úbytek na společném vodiči ne zcela zanedbatelný vliv.

Výsledkem je, že nelze nastavit napětí menší než cca 15mV a proud nižší než cca 5mA. V případě napětí tedy dosahuje chyba offsetu $2Q$ ($Q=10\text{mV}$), kdežto u proudu je to $5Q$ ($Q=1\text{mA}$). Nad těmito hodnotami již převodní charakteristiky zdroje v rámci integrálních a diferenciálních nelinearit D/A převodníků sledují ideální převodní charakteristiku. Vzhledem k tomu, že napájecí zdroj slouží pro dodávku napětí a proudu výrazně vyššího, než je offset, nepředstavuje tento nedostatek pro jeho používání závažnou překážku. Úplné eliminace vlivu rušivých napětí by bylo možné dosáhnout komplexním návrhem analogové i digitální části s respektováním pravidel pro důsledné oddělení signálových a napájecích zemí. Potom by se ovšem řídicí modul nedal navrhnout jako univerzální.

Naopak poměrně zdařilý je způsob komunikace s počítačem. Navržený protokol je velmi jednoduchý a robustní. Chování přístroje je stabilní a nekončí žádnými nedefinovanými stavy, které by vyžadovaly restart, jako se to mnohdy děje u přístrojů sériové výroby. Galvanické oddělení sériové linky je vyřešeno zcela nekompromisně pomocí prostředků, které jsou k tomuto účelu speciálně určené.

Celkově lze říci, že popsáný způsob přestavby napájecího zdroje splňuje zadání beze zbytku. Reprodukovatelnost výsledků byla úspěšně ověřena na dvou kusech identického typu zdroje.

Literatura

- [1] *HW server představuje – RS 232* [online]. [cit.2.4.2008]
Dostupné z <<http://www.hw.cz/projects/rs232>>.
- [2] SCPI Consortium *SCPI syntax & style* [online]. [cit.2.4.2008]
Dostupné z <<http://www.scpiconsortium.org/SCPI-99.pdf>>.
- [3] Microchip *MCP4822 datasheet* [online]. [cit.2.4.2008]
Dostupné z <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21953a.pdf>>.
- [4] Wikipedia *Serial peripheral interface overview* [online]. [cit.2.4.2008]
Dostupné z <http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus>.
- [5] FTDI *FTR232* [online]. [cit.2.4.2008]
Dostupné z <<http://www.ftdichip.com/Products/FT232BM.htm>>.
- [6] MAXIM *MAX250 and MAX251 datasheet* [online]. [cit.2.4.2008]
Dostupné z <<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX250-MAX251.pdf>>.
- [7] Microchip *PIC16F689 datasheet* [online]. [cit.2.4.2008]
Dostupné z <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41262E.pdf>>.
- [8] Voneš P. *Komponenta AsyncFree* [online]. [cit.2.4.2008]
Dostupné z <<http://sourceforge.net/projects/asyncfree>>.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

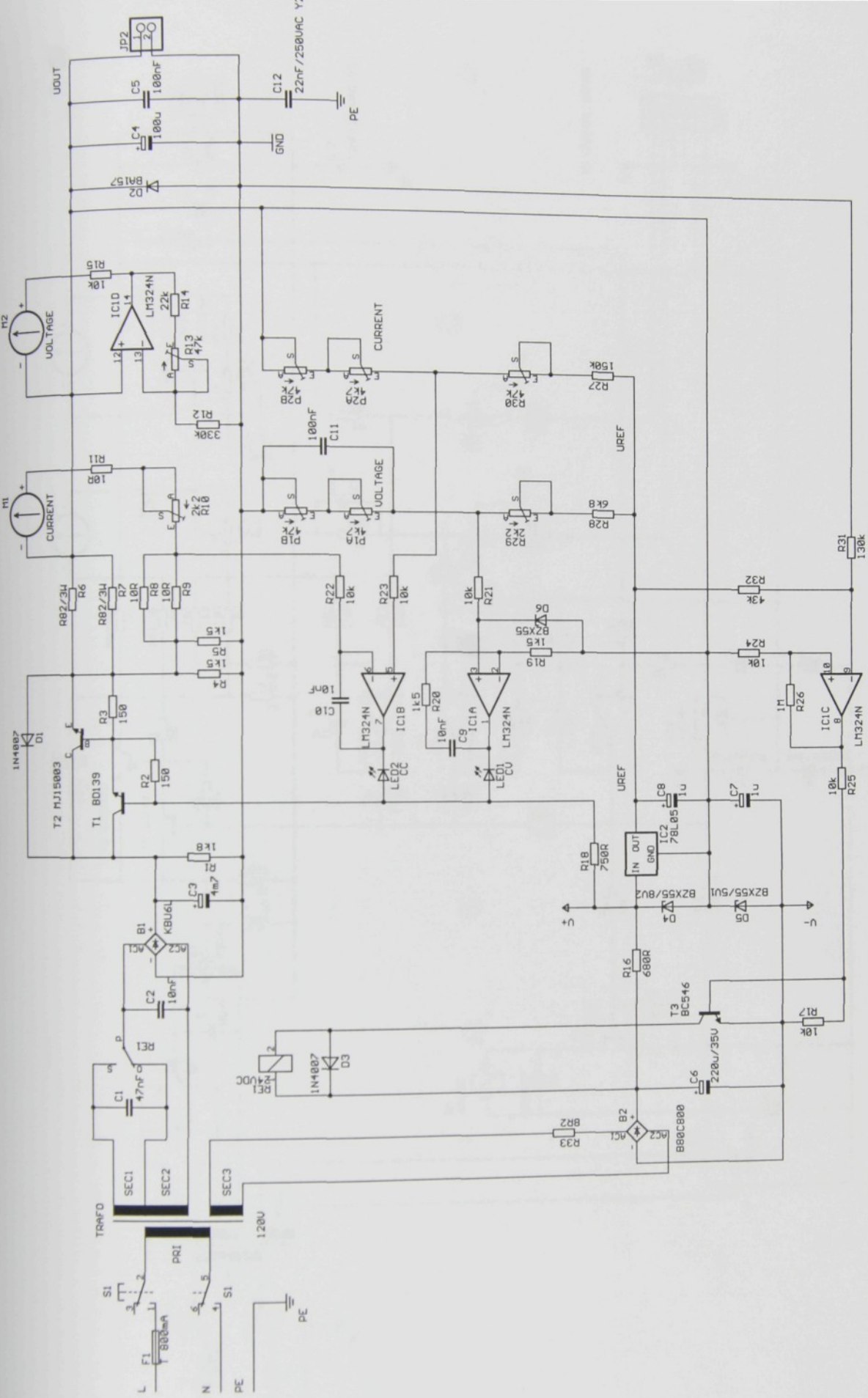
Fakulta mechatroniky a mezioborových
inženýrských studií

PŘÍLOHY BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

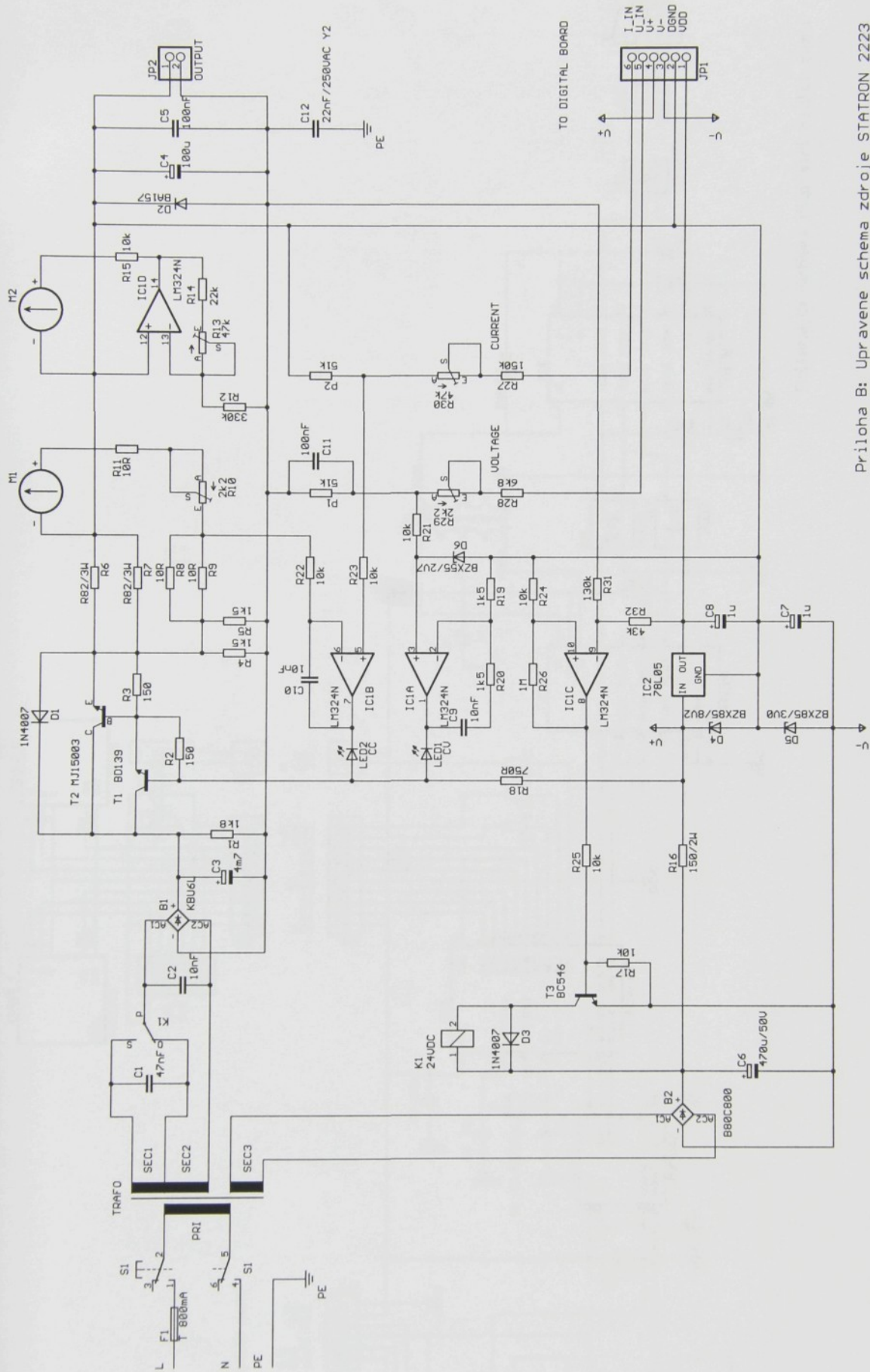
Konstrukce počítačem řízeného laboratorního zdroje

Petr Váša

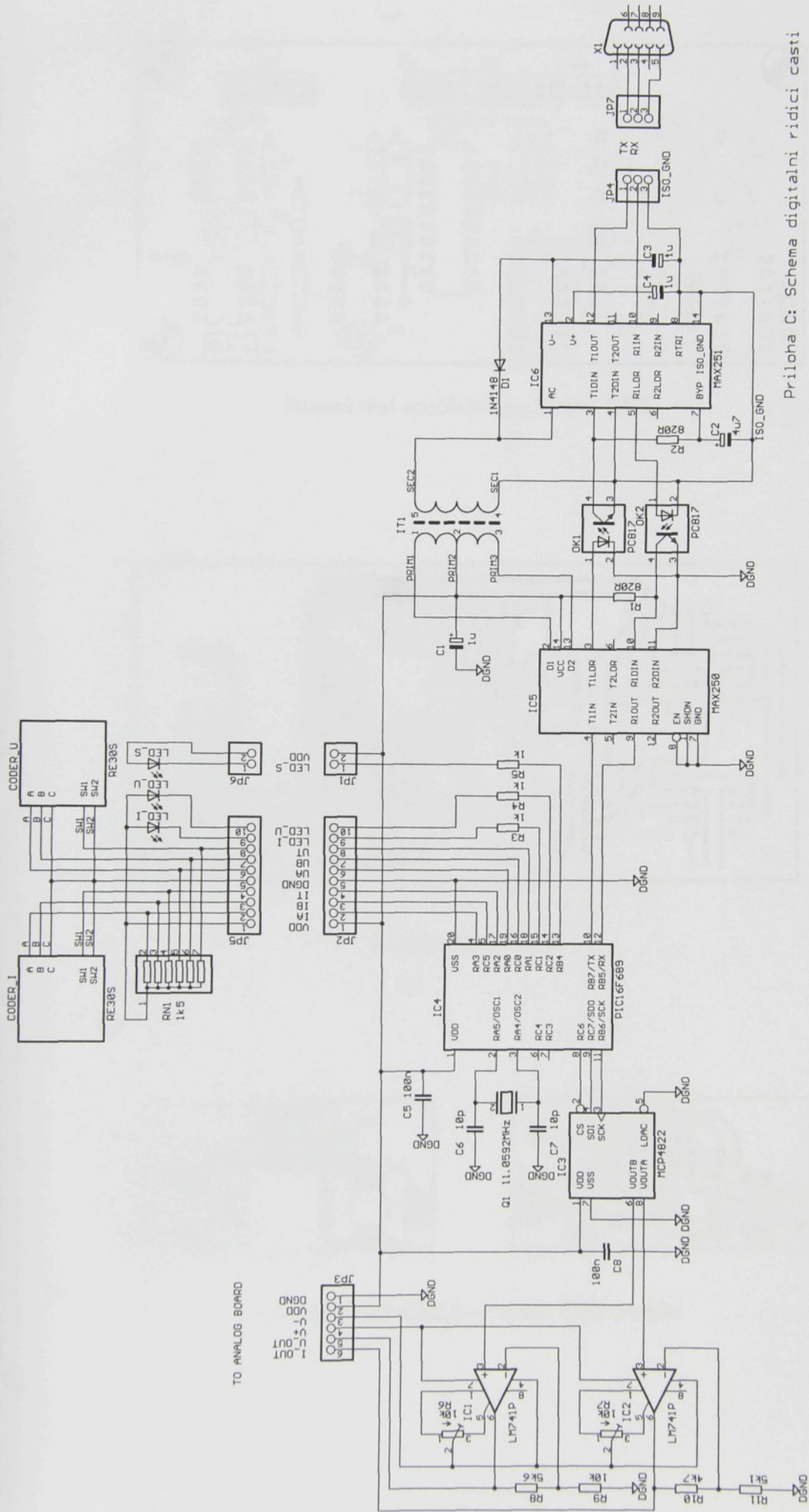
Rozsah příloh bakalářské práce: 4 strany



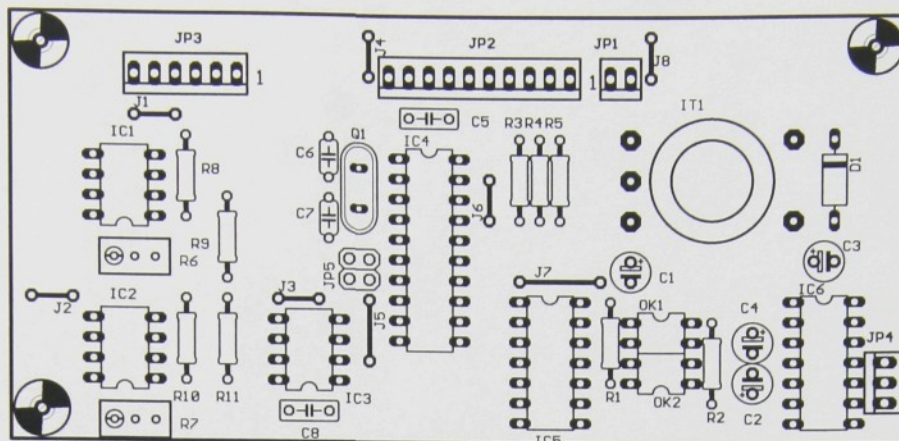
Priloha A: Puvodni schema zdroje STATRON 2223



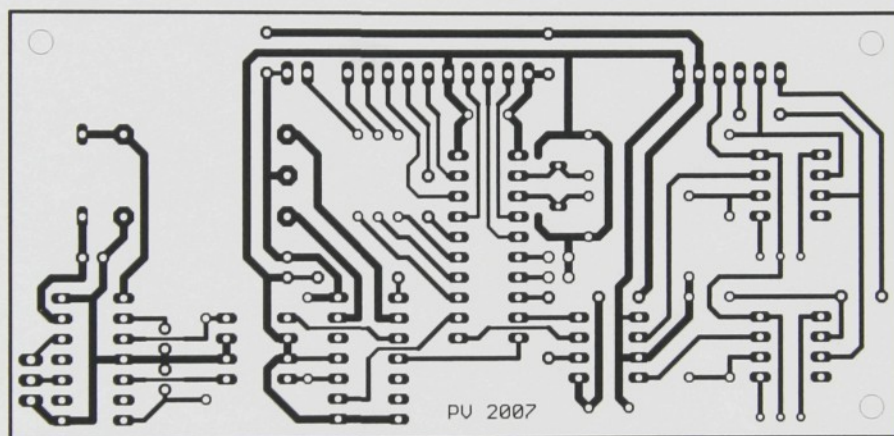
Priloha B: Upravene skema zdroje STATRON 2223



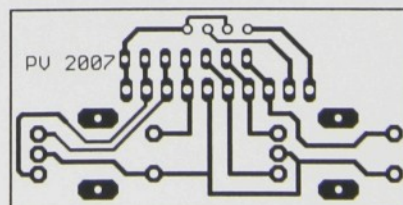
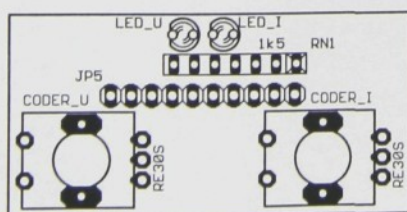
Priloha C: Schema digitalni ridici casti



Rozmístění součástek na hlavní DPS



Layout hlavní DPS



Rozmístění součástek a layout DPS panelu

V117/08M_b
+CD