

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

LABORATORNÍ ZDROJ

LABORATORY POWER SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Tománek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

BRNO 2017



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Radek Tománek

ID: 173765

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní zdroj

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Z odborné literatury vypracujte přehled technických parametrů průmyslově vyráběných laboratorních zdrojů, zaměřte se zejména na elektrické parametry, zdroje kategorizujte podle technické vybavenosti a ceny.
2. Diskutujte možné varianty realizace lineárního stabilizovaného laboratorního zdroje s proudovým omezením, který bude mít několik galvanicky oddělených bloků pro stavitelné a pevné výstupy napětí. Návrh laboratorního zdroje zaměřte na potřeby vývojových a servisních pracovišť.
3. Navrhněte blokové schéma, včetně elektrického schématu jednotlivých bloků, a návrh dokumentujte.
4. Na úrovni prototypu realizujte konstrukční a obvodové řešení vybraného bloku laboratorního zdroje s ohledem na připojení dalších bloků zdroje.
5. Diskutujte a prezentujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M.: Napájení elektronických zařízení. Brno: ÚREL FEI VUT v Brně, 1999.
ISBN: 80-214-1090- 6

Technická dokumentace přístrojů

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 29.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce srovnává množství typů laboratorních zdrojů jak z hlediska výstupních parametrů, tak i částečně z jejich technického řešení a jejich možností použití. Tím jsou rozebrány používané metody v laboratorních zdrojích, na které navazuje návrh koncepce univerzálního laboratorního zdroje. Hlavní částí této práce je podrobný popis vlastního vyvíjeného a realizovaného laboratorního zdroje. Práce je zakončena představením naměřených parametrů na realizovaném prototypu.

KLÍČOVÁ SLOVA

laboratorní zdroj, regulovatelný zdroj, stabilizovaný zdroj, programovatelný zdroj, zdroj konstantního napětí, zdroj konstantního proudu, napěťový zdroj, proudový zdroj

ABSTRACT

Paper compares several types of power supply from the point of view of output parameter, engineering solution and applied potentiality. Analysis of methods used in power supplies are followed with multipurpose power supply design. Main part of this paper is detailed description of my own developed and implemented power supply. Paper is closed with presentation of parameters measured with implemented prototype.

KEYWORDS

laboratory power supply, controllable power supply, adjustable power supply, stabilized power supply, programmable power supply, constant voltage power supply, constant current power supply, voltage source, current source

TOMÁNEK, Radek *Laboratorní zdroj*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2017. 165 s. Vedoucí práce byla Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Laboratorní zdroj“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucí bakalářské práce paní Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a trpělivost.

Dále děkuji panu Drahoslavu Doležalovi za množství podnětných návrhů k práci a pomoc při konstrukci.

V neposlední řadě chci poděkovat všem, kdo jakýmkoliv způsobem přispěli k vývoji nebo stavbě tohoto zdroje.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

1	Úvod	9
2	Laboratorní zdroje	10
2.1	Režimy zdrojů	10
2.1.1	Režim konstantního proudu	10
2.1.2	Režim proudové pojistky	11
2.2	Způsoby předregulace napětí	13
2.2.1	Zdroje pevného napětí	13
2.2.2	Regulovatelné zdroje bez předregulace napětí	14
2.2.3	Regulovatelné zdroje se skokovou předregulací napětí	14
2.2.4	Regulovatelné zdroje se spojitou předregulací napětí	16
3	Průmyslově vyráběné zdroje	18
3.1	Výstupní napětí a proud	18
3.1.1	Zdroj Agilent E3631A	18
3.1.2	Zdroj Siglent SPD3303X-E	19
3.1.3	Zdroje Tektronix	19
3.1.4	Zdroj TESLA BS575	19
3.1.5	Zdroje ZPA Košíře	21
3.1.6	Zdroj Radiotechnika RSZ30P	21
3.1.7	Zdroj TESLA BS554	21
3.1.8	Zdroj MASTECH HY3005D	22
3.1.9	Zdroj Statron 2223.0	22
3.1.10	Zdroj Diametral P130R51D	22
3.1.11	Zdroj UNI-T UTP3705	22
3.2	Stabilita a chyba nastaveného napětí a proudu	22
3.2.1	Analogově nastavitelná hodnota napětí a proudu	23
3.2.2	Digitálně nastavitelná hodnota napětí a proudu	25
3.2.3	Doba náběhu	26
3.3	Zvlnění a šum	26
3.4	Maximální napětí výstupních svorek proti kostře	27
3.5	Měření výstupního napětí a proudu	27
3.5.1	Porovnání digitálních a analogových měřidel	27
3.5.2	Porovnání s komparačním vyhodnocením	28
3.5.3	Sledování změn výstupních veličin	28
3.5.4	Přesné měření výstupních veličin	28
3.6	Výstupní impedance	29

3.6.1	Výstupní odpor a vodivost	29
3.6.2	Výstupní kapacita	29
3.6.3	Kmitočtová závislost výstupní impedance	30
3.7	Bezpečnost a odrušení	30
3.8	Pracovní podmínky	30
3.8.1	Rozsah teplot	30
3.8.2	Napájecí napětí	31
3.9	Všeobecné údaje	31
3.9.1	Komunikační rozhraní	31
3.9.2	Chlazení	33
3.10	Ostatní údaje a zhodnocení	34
4	Koncepce vlastního navrhovaného zdroje	37
4.1	Požadavky na laboratorní zdroj	37
4.2	Základní popis jednotlivých bloků zdroje	37
4.2.1	Regulovatelné bloky A a B	37
4.2.2	Blok C pro napájení logických obvodů	37
4.2.3	Blok D pro napájení 12 V techniky	39
4.2.4	Blok E pro symetrické napájení analogových obvodů	39
4.3	Princip činnosti regulovatelných zdrojů	39
4.3.1	Výkonová část	39
4.3.2	Regulátory	40
4.4	Princip činnosti pevných zdrojů	41
4.5	Další funkce laboratorního zdroje	42
5	Podrobný popis zdroje	43
5.1	Popis laboratorního zdroje	43
5.1.1	Celkové blokové schéma laboratorního zdroje	43
5.2	Vstupní díl	43
5.2.1	Blokové schéma vstupního dílu	43
5.2.2	Popis zapojení vstupního dílu	44
5.2.3	Konstrukční řešení vstupního dílu	45
5.3	Výkonový blok A, B	47
5.3.1	Blokové schéma výkonového bloku A, B	47
5.3.2	Triakové spínání v nule	47
5.3.3	Princip činnosti výkonového bloku	47
5.3.4	Předregulace a usměrnění	48
5.3.5	Koncový stupeň	55
5.3.6	Chlazení	56

5.4	Regulátory A, B	56
5.4.1	Blokové schéma regulátoru A, B	56
5.4.2	Popis zapojení regulátoru A, B	58
5.4.3	Komparátory	61
5.5	Měření výstupních veličin	62
5.5.1	Digitální měřidla	62
5.5.2	Ručičkový indikátor	64
5.5.3	Vyvedené výstupy z bočnic	65
5.6	Zdroje pevného napětí	66
5.6.1	Zdroje C, D a E	66
5.7	Výstupní odpojovače	67
5.8	Konstrukce	68
5.8.1	Popis ovládacích prvků	69
5.8.2	Rozmístění konstrukčních celků	74
5.8.3	Popis konstrukce jednotlivých celků	74
6	Rozbor dosažených výsledků	80
6.1	Porovnání laboratorních zdrojů a možné varianty jejich řešení	80
6.2	Návrh koncepce laboratorního zdroje	81
6.3	Naměřené technické parametry na vyvíjeném zdroji	81
6.3.1	Rozsah napětí a proudu	82
6.3.2	Napěťová stabilita	82
6.3.3	Zvlnění a šum	82
6.3.4	Maximální napětí proti kostře	83
6.3.5	Výstupní odpor a kapacita	83
6.3.6	Pracovní podmínky	85
6.3.7	Dynamické parametry	85
7	Závěr	86
	Literatura	87
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	90
	Seznam příloh	92
A	Přílohy - bloková schémata zdroje	95
A.1	Blokové schéma celého zdroje	95

B Přílohy - Vstupní díl	96
B.1 Blokové schéma vstupního dílu	96
B.2 Obvodové schéma vstupního dílu	97
B.3 Osazovací plán desky vstupního dílu - vrchní strana	98
B.4 Osazovací plán desky vstupního dílu - spodní strana	99
B.5 Předloha desky vstupního dílu - spodní strana	100
B.6 Konstrukční výkres vstupního dílu	101
C Přílohy - Výkonový blok	102
C.1 Blokové schéma výkonového bloku	102
C.2 Obvodové schéma výkonového bloku	103
C.3 Osazovací plán desky výkonového bloku - vrchní strana	104
C.4 Osazovací plán desky výkonového bloku - spodní strana	105
C.5 Předloha desky výkonového bloku - vrchní strana	106
C.6 Předloha desky výkonového bloku - spodní strana	107
C.7 Konstrukční výkres chladiče výkonového bloku	108
D Přílohy - Filtry	109
D.1 Obvodové schéma filtrů	109
D.2 Osazovací plán desky filtrů - vrchní strana	110
D.3 Předloha desky filtrů - spodní strana	111
E Přílohy - Regulátor A, B	112
E.1 Blokové schéma regulátoru A, B	112
E.2 Obvodové schéma regulátoru U a I	113
E.3 Osazovací plán desky regulátoru U a I - vrchní strana	114
E.4 Předloha desky regulátoru U a I - spodní strana	115
E.5 Obvodové schéma komparátorů	116
E.6 Osazovací plán desky komparátorů - vrchní strana	117
E.7 Předloha desky komparátorů - spodní strana	118
F Přílohy - Blok E	119
F.1 Obvodové schéma prototypu bloku E	119
G Přílohy - Digitální voltmetr	120
G.1 Blokové schéma digitálního voltmetru	120
H Přílohy - Čelní panel	121
H.1 Obvodové schéma čelního panelu	121
H.2 Konstrukční výkresy předního panelu	123
H.3 Subpanely čelního panelu	126

H.3.1	Konstrukční výkres subpanelu 1	126
H.3.2	Konstrukční výkres subpanelu 2	127
H.3.3	Konstrukční výkres subpanelu 3	128
H.3.4	Konstrukční výkres subpanelu 4	129
H.3.5	Obvodové schéma subpanelu 5	130
H.3.6	Osazovací plán desky subpanelu 5 - vrchní strana	131
H.3.7	Předloha desky subpanelu 5 - spodní strana	132
H.3.8	Obvodové schéma subpanelu 6	133
H.3.9	Osazovací plán desky subpanelu 6 - vrchní strana	134
H.3.10	Předloha desky subpanelu 6 - spodní strana	135
H.3.11	Obvodové schéma subpanelu 7	136
H.3.12	Osazovací plán desky subpanelu 7 - vrchní strana	137
H.3.13	Předloha desky subpanelu 7 - spodní strana	138
H.3.14	Obvodové schéma subpanelu 8	139
H.3.15	Osazovací plán desky subpanelu 8 - vrchní strana	140
H.3.16	Předloha desky subpanelu 8 - spodní strana	141
H.3.17	Obvodové schéma subpanelu 9	142
H.3.18	Osazovací plán desky subpanelu 9 - vrchní strana	143
H.3.19	Osazovací plán desky subpanelu 9 - spodní strana	144
H.3.20	Předloha desky subpanelu 9 - vrchní strana	145
H.3.21	Předloha desky subpanelu 9 - spodní strana	146
H.3.22	Obvodové schéma subpanelu 11	147
H.3.23	Osazovací plán desky subpanelu 11 - spodní strana	148
H.3.24	Předloha desky subpanelu 11 - spodní strana	149
H.3.25	Konstrukční výkres desky subpanelu 11 - vrchní strana	150
H.4	Potisk stupnice ručičkového měřicího přístroje	151
H.5	Konstrukční výkres zadního panelu	152
H.6	Subpanely zadního panelu	153
H.6.1	Obvodové schéma subpanelu 1	153
H.6.2	Osazovací plán desky subpanelu 1 - vrchní strana	154
H.6.3	Osazovací plán desky subpanelu 1 - spodní strana	155
H.6.4	Předloha desky subpanelu 1 - vrchní strana	156
H.6.5	Předloha desky subpanelu 1 - spodní strana	157
H.6.6	Konstrukční výkres desky subpanelu 1 - vrchní strana	158
H.7	Skříň laboratorního zdroje	159
H.7.1	Výkres distančního sloupku pro upevnění konektorů	159

I	Přílohy - Seznam součástí	160
I.1	Seznam součástí vstupního dílu	160
I.2	Seznam součástí výkonového bloku A, B	160
I.3	Seznam součástí filtrů AB	162
I.4	Seznam součástí regulátoru A, B	162
I.5	Seznam součástí komparátorů	163
I.6	Seznam součástí subpanelu 5 předního panelu	164
I.7	Seznam součástí subpanelu 6 předního panelu	164
I.8	Seznam součástí subpanelu 8 předního panelu	165
I.9	Seznam součástí subpanelu 11 předního panelu	165
J	Použité přístroje při měření dosažených parametrů zdroje	165

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Ideální výstupní charakteristika laboratorního zdroje	10
2.2	Skutečná výstupní charakteristika laboratorního zdroje	12
2.3	Zatěžovací charakteristika zdroje s režimem proudové pojistky s trvalým proudem zátěží	13
2.4	Principiální schéma zdroje bez předregulace napětí	14
2.5	Principiální schéma zdroje se skokovou předregulací napětí	15
2.6	Principiální schéma zdroje s fázovou předregulací napětí	17
2.7	Principiální schéma zdroje s pulzní předregulací napětí	17
4.1	Blokové schéma vazeb výstupních bloků laboratorního zdroje	38
4.2	Principiální schéma navrženého regulovatelného zdroje	40
4.3	Principiální schéma navrženého pevného zdroje	41
5.1	Vstupní díl - součástky	44
5.2	Vstupní díl - stínění	46
5.3	Výkonový blok	48
5.4	Princip dvou můstků zapojených sériově se sepnutým triakem T1 . . .	49
5.5	Princip dvou můstků zapojených sériově s vypnutým triakem T1 . . .	50
5.6	Můstky se zaměněnými vývody vinutí a sepnutým triakem T1	51
5.7	Můstky se zaměněnými vývody vinutí a rozepnutým triakem T1 . . .	51
5.8	Můstky s vynechanými diodami a sepnutým triakem T1	52
5.9	Můstky s vynechanými diodami a rozepnutým triakem T1	53
5.10	Princip použitého zapojení se sepnutými triaky	54
5.11	Pohled na plošný spoj výkonového bloku ze strany od chladiče	56
5.12	Pohled na plošný spoj prototypu regulátoru A, B	58
5.13	Digitální panelové měřidlo	62
5.14	Ručičkový indikátor s upravenou stupnicí	65
5.15	Konstrukce laboratorního zdroje	68
5.16	Pohled na přední panel	70
5.17	Pohled na zadní panel	73
5.18	Uspořádání konstrukčních bloků ve skříni laboratorního zdroje při pohledu shora	75
5.19	Desky plošných spojů subpanelů 5 až 8	77
5.20	Pohled do laboratorního zdroje při odklopeném předním panelu během stavby	79

SEZNAM TABULEK

3.1	Přehled parametrů průmyslově vyráběných zdrojů	20
6.1	Přehled parametrů vyvíjeného zdroje	84
I.1	Seznam součástí modulu VSTUPNÍ DÍL	160
I.2	Seznam součástí výkonového bloku A, B	160
I.3	Seznam součástí filtrů AB	162
I.4	Seznam součástí regulátoru A, B	162
I.5	Seznam součástí modulu KOMPARÁTOR PROT	163
I.6	Seznam součástí modulu PŘEDNÍ PANEL - SUB_5	164
I.7	Seznam součástí modulu PŘEDNÍ PANEL - SUB_6	165
I.8	Seznam součástí modulu PŘEDNÍ PANEL - SUB_8	165
I.9	Seznam součástí modulu PŘEDNÍ PANEL - SUB_11	165
J.1	Použité přístroje při měření dosažených parametrů zdroje	165

1 ÚVOD

Laboratorní zdroje v dnešní době patří k základní výbavě mnoha technických pracovišť. Podle způsobu využití jsou na ně kladeny různé nároky. Tato práce je zaměřena na stejnosměrné laboratorní zdroje s výkonem řádově desítek až stovek wattů, s regulovatelným výstupním napětím i regulací úrovně proudového omezení.

V první části této práce je stručný popis vybraných vlastností laboratorních zdrojů. Následuje přehled vybraných průmyslově vyráběných laboratorních zdrojů s porovnáním jejich některých parametrů udávaných výrobcí. Součástí popisu je také porovnání řešení jednotlivých zdrojů.

Ze získaných informací vychází návrh vlastní koncepce laboratorního zdroje. Návrh zdroje v této práci však nevznikl pouze ze získaných znalostí při zpracovávání, ale předcházela tomu dlouholetý zájem o tuto problematiku, praxe se servisem, především průmyslově i amatérsky vyráběných laboratorních zdrojů, a v neposlední řadě stavba vlastních zdrojů v menším technickém rozsahu.

Velkou část práce tvoří podrobný popis vlastního vyvíjeného a postaveného funkčního prototypu laboratorního zdroje. S touto částí práce souvisí i rozsáhlá příloha, ve které je především množství výkresové dokumentace vyvinutého zařízení.

Práce je zakončena představením základních parametrů prototypu a zhodnocením jeho vlastností.

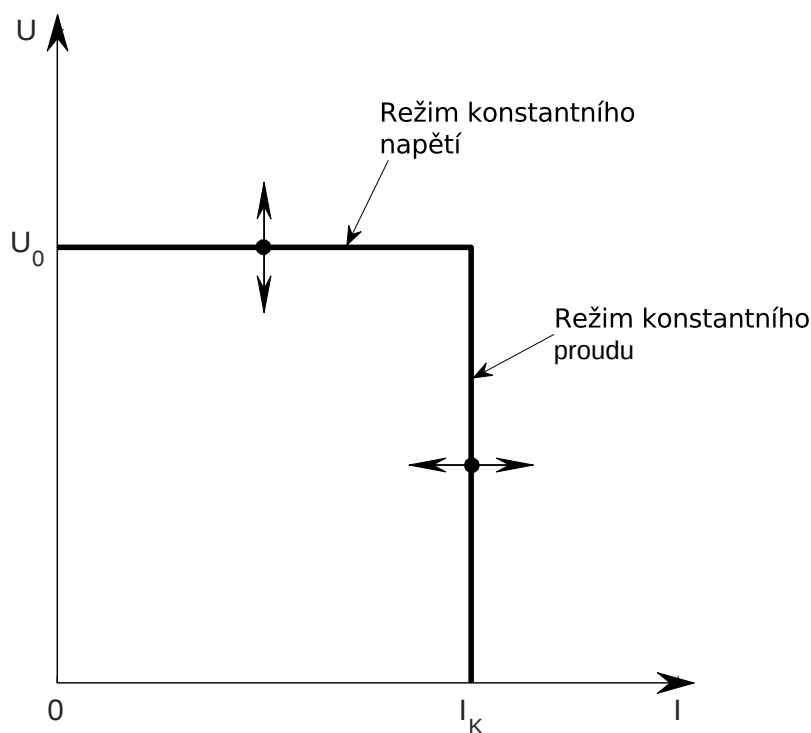
2 LABORATORNÍ ZDROJE

2.1 Režimy zdrojů

Všechny zde popisované zdroje mají regulaci výstupního napětí na předem nastavenou hodnotu U_0 . Tuto hodnotu zdroje přibližně regulují za předpokladu, že je výstupní proud I menší než přednastavená úroveň proudového omezení I_K . Při dosažení tohoto proudu se zdroje přestanou chovat jako zdroj konstantního napětí. V napájecích zdrojích se často používají dva typy zatěžovacích charakteristik.

2.1.1 Režim konstantního proudu

V laboratorních zdrojích se pro regulovatelné části nejčastěji používá přepínání mezi režimem konstantního napětí a režimem konstantního proudu. V jakém režimu se zdroj nachází je indikováno na čelním panelu. U některých zdrojů je možná i zvuková indikace. Zatěžovací charakteristika ideálního laboratorního zdroje je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Ideální výstupní charakteristika laboratorního zdroje s regulátorem konstantního proudu

Ve skutečnosti se zdroje od této charakteristiky více či méně liší. I přes snahu minimalizovat výstupní odpor zdroje v napěťovém režimu R_U pomocí zpětnovažební regulační smyčky může dojít se zvyšujícím zatěžovacím proudem k poklesu výstupního napětí pod napětí naprázdno. Podobný problém vzniká i u zdroje v režimu konstantního proudu, kde ze zvyšujícím napětím U na zátěži klesá výstupní proud I . Vlivem konečného zesílení zesilovačů nemusí být ani změna mezi napěťovým a proudovým režimem dokonale skoková. V případě, že je odpor zátěže R_Z roven meznímu odporu R_{MEZ} podle vztahu 2.1, může s nepatrnou změnou zatěžovacího odporu R_Z klesat výstupní napětí U a přitom výstupní proud I nedosáhne zkratového proudu I_K .

$$R_{MEZ} = \frac{U_0}{I_K} \quad (2.1)$$

kde:

R_{MEZ} [Ω] je mezní zatěžovací odpor, při kterém dochází ke změně režimu zdroje

U_0 [V] je výstupní napětí zdroje naprázdno

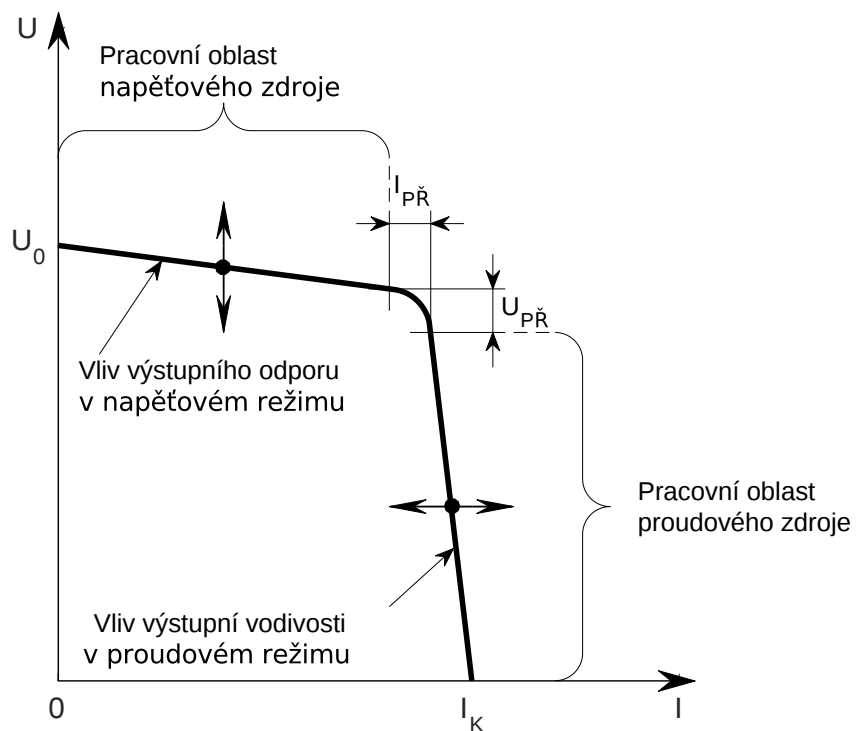
I_K [A] je proud zdrojem nakrátko

Tvar takové výstupní charakteristiky je naznačen na obrázku 2.2. U některých zdrojů je definován přechodový proud $I_{P\check{R}}$, o který by měla být nastavena úroveň proudového omezení větší, než je skutečný odebíraný proud zátěží. Tím je zajištěno, že se nezvyšuje výstupní odpor v pracovní oblasti napěťového zdroje. Pro použití zdroje v proudovém režimu se definuje hodnota přechodového napětí $U_{P\check{R}}$, o kterou by mělo být přednastavené napětí větší, než je napětí na zátěži. Pak se zdroj nachází v pracovní oblasti proudového zdroje, kde by měla být výstupní vodivost G_I minimální a přibližně stabilní. Hodnota přechodového proudu $I_{P\check{R}}$ je závislá na velikosti přednastaveného proudu I_K . Hodnota se tedy uvádí jako interval proudu, ve kterém se nachází přechod mezi režimy zdroje.[1, 2, 3]

Po takto definované zatěžovací charakteristice se však pracovní bod pohybuje pouze v ustáleném stavu. Pro časově proměnnou zátěž už nelze uvažovat pouze výstupní odpor zdroje (nebo vodivost), ale je třeba počítat s výstupní impedancí (nebo admitancí). Závislost výstupní impedance na kmitočtu je u některých zdrojů definována v příložené dokumentaci.[1]

2.1.2 Režim proudové pojistky

Převážně u stabilizovaných zdrojů pevných výstupních napětí se při dosažení mezního proudu I_K zdroj nepřepíná do režimu onstantního proudu, ale pro snížení ztrát na stabilizátoru poklesne proud pod mezní hodnotu I_K .



Obr. 2.2: Skutečná výstupní charakteristika laboratorního zdroje s regulátorem konstantního proudu

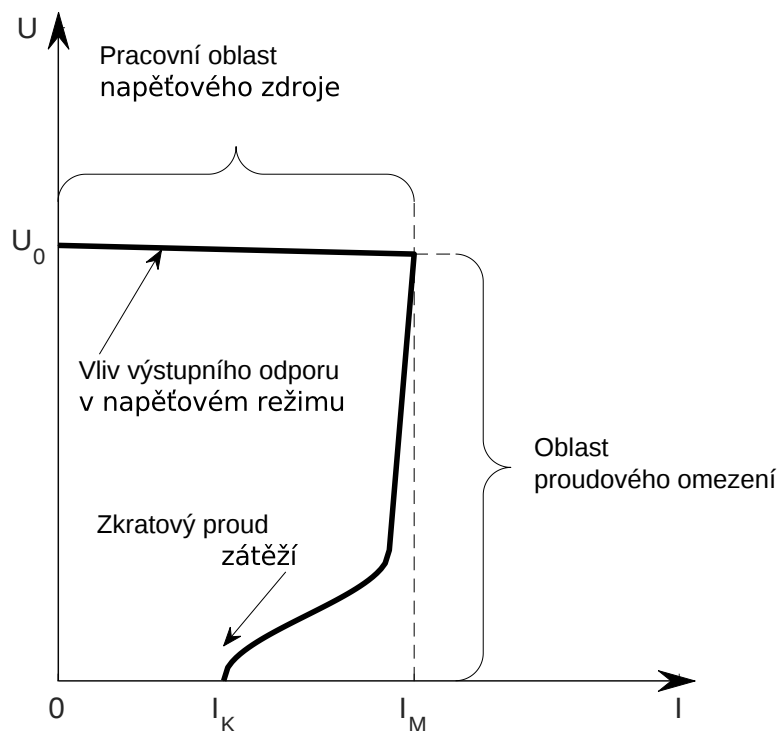
Trvalý proud zátěží

U některých typů zdrojů teče zátěží trvale proud v závislosti na jejím odporu a při zvýšení jejího odporu nad definovanou mez se zdroj opět automaticky přepne do režimu konstantního napětí. Možný tvar takové zatěžovací charakteristiky je na obrázku 2.3. [3, 4]

Vypnutí zdroje

Pro ochranu připojené zátěže ke zdroji je možné při dosažení mezního proudu I_K zdroj elektronicky vypnout. Pro opětovné zapnutí zdroje je nutné vyvolat definovanou akci, neboť při nulovém výstupním napětí U a proudu I nelze sledovat změnu odporu zátěže. Nejčastěji se čeká na opětovnou aktivaci zdroje uživatelem.

Obdobného chování je dosaženo při osazení výstupu zdroje proudovou tavnou pojistkou. V takovém případě je ale překročení mezního proudu I_K destruktivní a pro opětovné zapnutí zdroje je nutné tavnou pojistku vyměnit za novou. Tento efekt však u laboratorních zdrojů není žádaný, a proto se jím dále nebudu v této práci zabývat.



Obr. 2.3: Zatěžovací charakteristika zdroje s režimem proudové pojistky s trvalým proudem zátěží

2.2 Způsoby předregulace napětí

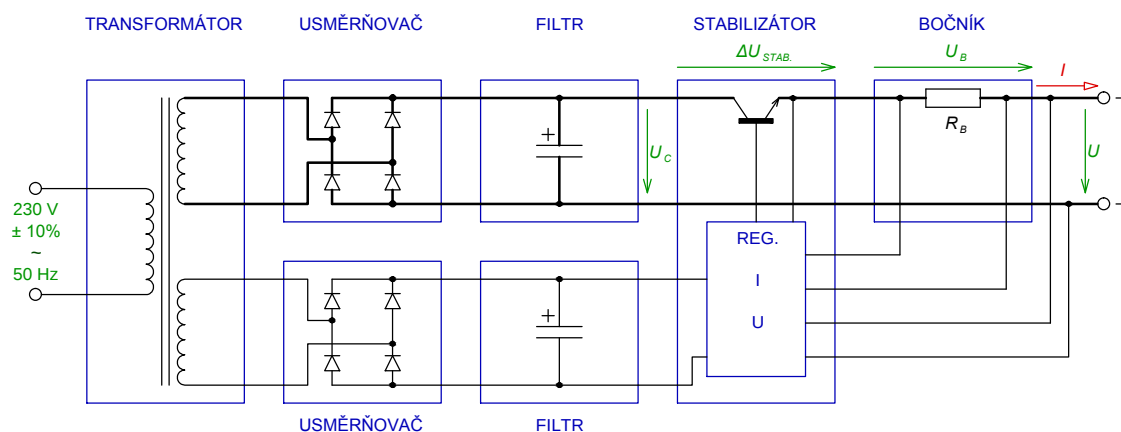
Stejnoseměrný laboratorní zdroj by se měl chovat jako zdroj konstantního napětí nebo proudu, kterému je dodávána energie z rozvodné napájecí sítě (dále jen sítě). Zároveň je ale často vyžadováno, aby tento zdroj byl od sítě galvanicky oddělený a byl v definovaných mezích nezávislý na jejím napětí. Galvanické oddělení v laboratorních zdrojích zajišťuje transformátor, který zároveň slouží u všech, v této práci zmíněných, laboratorních zdrojů ke snížení síťového napětí na napětí menší.

2.2.1 Zdroje pevného napětí

U stabilizovaných zdrojů s jedním pevným napětím je možné toto menší napětí usměrnit, vyfiltrovat a stabilizovat. Při návrhu takového zdroje se výstupní napětí z transformátoru volí tak, aby bylo dostatečně velké na to, aby pokrylo ztráty na dalších prvcích a aby i při definovaném poklesu napětí na filtru U_C nemuselo dojít k poklesu napětí na výstupu lineárního stabilizátoru. Zároveň se však nevolí zbytečně velké, aby nedocházelo k velkému napěťovému úbytku $\Delta U_{STAB.}$, a tedy i ztrátám na stabilizátoru.

2.2.2 Regulovatelné zdroje bez předregulace napětí

U laboratorních zdrojů se při tomto způsobu návrhu musí sekundární napětí transformátoru uzpůsobit pro maximální výstupní napětí zdroje. Je-li zdroj zatížen maximálním proudem, je nejvyšší účinnost stabilizátoru právě při maximálním výstupním napětí. Při snižování výstupního napětí zdroje U_0 účinnost klesá, protože rozdílové napětí mezi napětím na filtru a výstupním napětím U je úbytek napětí na lineárním stabilizátoru $\Delta U_{STAB.}$. Při velkém úbytku napětí $\Delta U_{STAB.}$ a zároveň při velkém výstupním proudu I dochází k velkým výkonovým ztrátám, které jsou odvedeny ve formě tepla do okolí. Proto se tento způsob používá jen u zdrojů s malým maximálním výstupním proudem nebo s malým rozsahem nastavitelného napětí. Princip tohoto zdroje je patrný ze schématu na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Principiální schéma regulovatelného zdroje bez předregulace napětí

2.2.3 Regulovatelné zdroje se skokovou předregulací napětí

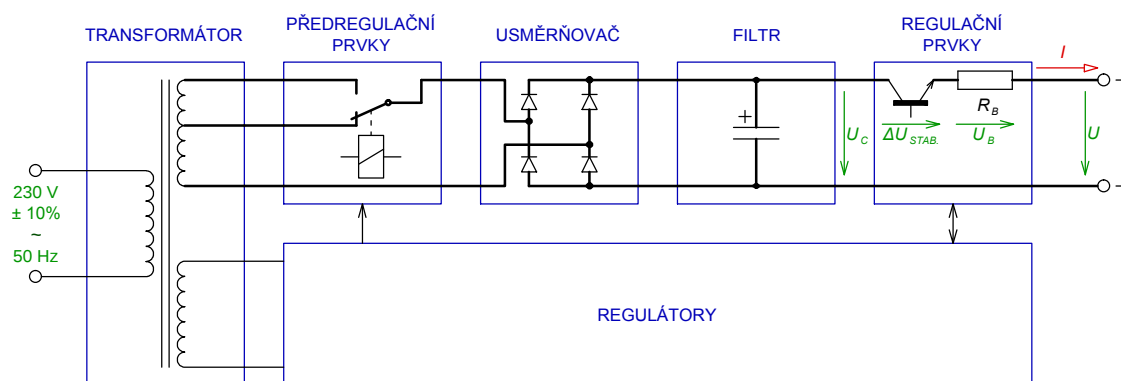
Jedná se o nejčastější způsob snížení ztrát na stabilizátoru. Podmínkou pro toto řešení je odbočka z vinutí transformátoru nebo více samostatných vinutí dimenzovaných na požadovaný proud. U laboratorních zdrojů se využívá odbočka na sekundárním vinutí, což zjednodušuje napájení ostatních pomocných obvodů v přístroji. Příklad zapojení regulovatelného zdroje se skokovou předregulací napětí pomocí relé je na obrázku 2.5.

Reléové přepínání odboček transformátoru

Tento způsob přepínání nevyžaduje ve výkonové části doplňování dalších součástek kromě zmiňovaného relé za předpokladu, že jsou ostatní obvody napájeny samostatným vinutím transformátoru nebo alespoň samostatným usměrňovačem na tomtéž

vinutí. Pro řízení relé postačuje komparátor s hysterezí, který sleduje napětí na výstupu napěťového stabilizátoru a podle jeho velikosti přepne relé buď na odbočku s vyšším napětím nebo s nižším napětím.

Tento jednoduchý způsob lze modifikovat i pro přepínání mezi více odbočkami transformátoru nebo mezi více sekundárními vinutími. Aby nebylo nutné přepínat mezi dvěma kontakty, je možné usměrňovač doplnit dalšími diodami a relé použít pouze jako spínač. Hlavní nevýhodou tohoto způsobu je možná poruchovost elektromechanického prvku. U programovatelných zdrojů tento způsob zbytečně prodlužuje dobu změny napětí U_C . U běžných laboratorních zdrojů může zvyšování napětí přes přepínací mez zanášet nežádoucí zpoždění změny napětí U v proudovém režimu při změně zátěže. Přepínací děj pomocí relé je doprovázen slyšitelným cvakáním.



Obr. 2.5: Principiální schéma regulovatelného zdroje se skokovou předregulací napětí

Bezkontaktní přepínání odboček transformátoru

Většina nevýhod u předchozího způsobu je odstraněna nahrazením elektromechanického relé polovodičovými spínacími prvky. Jednou z možností je nahrazení spínacího kontaktu relé triakem. To částečně zkrátí zpoždění sepnutí při změně napětí U . Doba zvýšení napětí U_C je ale i v tomto případě omezena náběhem síťového napětí podle sinusového průběhu. Značnou nevýhodou představuje úbytek napětí na triaku v sepnutém stavu U_T , neboť na něm vznikají další ztráty. Oproti relé jsou ale ztráty nezávislé na jeho stáří. Další nevýhodou je malá kritická strmost blokovacího napětí $\frac{dU_D}{dt}$ u triaků oproti tyristorům. U relé nehrozí sepnutí kontaktů při velké strmosti napětí. Tento jev snižuje odolnost triaku proti rušení. Při nevhodném použití může způsobovat rušení vlivem strmých hran protékajícího proudu.

Použití dvojice tyristorů namísto dvou diod v usměrňovači pomůže ke snížení ztrát. Sníží se i odolnost proti rušení díky vyšší kritické strmosti blokovacího napětí $\frac{dU_D}{dt}$. Řízení dvojice tyristorů namísto jednoho triaku je obvykle obvodově složitější.

Obě tyto možnosti v případě kvalitního zpracování jsou obvodově náročné, což je jeden z důvodů, proč se toto řešení v laboratorních zdrojích příliš nevyužívá. Při dosažení takového zpracování je ale řešení velmi spolehlivé i při častém provozu.

2.2.4 Regulovatelné zdroje se spojitou předregulací napětí

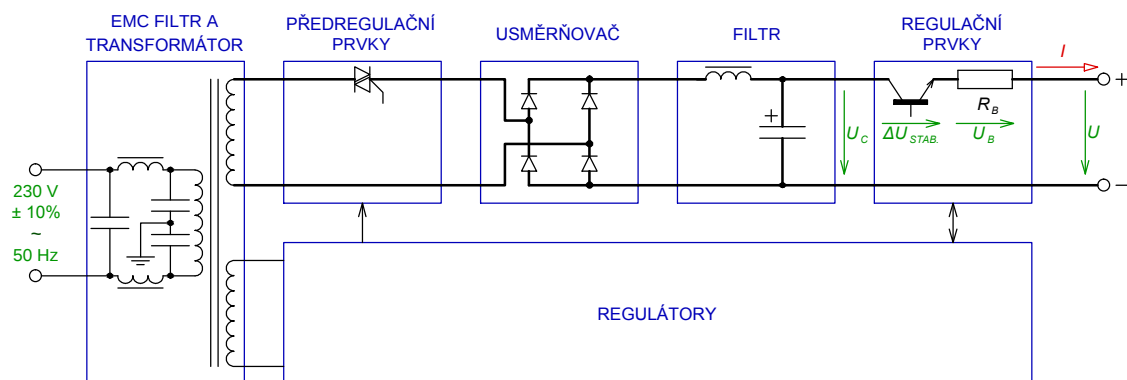
Dosud zmiňovaná řešení umožňovala pouze přepínání mezi předem určenými napěťovými kroky. Tím se při některých hodnotách výstupního napětí U dosáhne snížení ztrát ve zdroji. Kvůli množství nevýhod při přepínání malých napětí se většinou využívají pouze 2 režimy s přepínáním okolo poloviny rozsahu výstupního napětí. Jednou z možností snížení ztrát i při menším výstupním napětí U než polovina napěťového rozsahu jsou spojitě předregulátory napětí.

Fázová předregulace napětí

Fázová předregulace napětí sice zahrnuje většinu nevýhod zmiňovaných u bezkontaktního přepínání odboček transformátoru, ale má také další výhody. Tímto způsobem je možné omezit ztráty stabilizátoru napětí na minimum v celém rozsahu výstupního napětí. Dále zlevňuje výrobu transformátoru, neboť nevyžaduje odbočky na vinutí ani další sekundární vinutí. Závislost střední hodnoty výstupního napětí tohoto předregulátoru ale není lineární na řídicím úhlu otevření spínací součástky. Spínání tyristorů nebo triaku v různé fázi vstupního napětí způsobuje nejenom rušení do sítě, ale také na výstupu usměrňovače. Přináší tedy větší složitost jak ve výkonové části zdroje, tak v jeho řídicích obvodech. Schéma fázové triakové předregulace je naznačeno na obrázku 2.6.

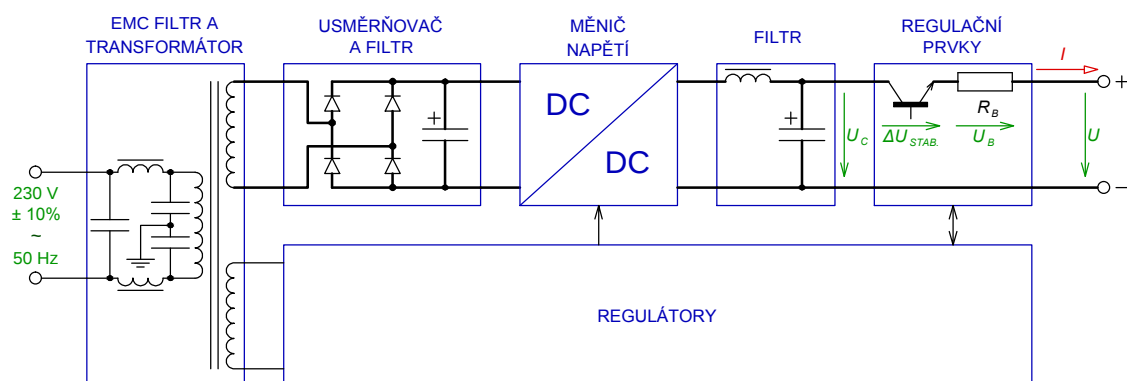
Pulzní předregulace napětí

Pulzní předregulace napětí sice také představuje rušení na výstup, nicméně pulzní měniče napětí se provozují na vyšších spínacích kmitočtech, což snižuje požadavky na časové konstanty výstupních filtrů. Tyto měniče lze snadněji navrhnout s lineární závislostí výstupního napětí na řídicím signálu. Velkou výhodou představují u programovatelných zdrojů nebo u zdrojů konstantního proudu, protože vlivem vysokého spínacího kmitočtu, oproti síťovému kmitočtu, lze dosáhnout rychlé změny napětí. Jedná se o DC/DC měniče, což vyžaduje stejnosměrné napětí na jeho vstupu. Toho lze využít pro rychlé změny napětí krátkodobým přemostěním vstupu měniče na



Obr. 2.6: Principiální schéma regulovatelného zdroje s fázovou předregulací napětí

jeho výstup. Princip zdroje s pulzním měničem je naznačen schématem na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Principiální schéma regulovatelného zdroje s pulzní předregulací napětí

Pulzní předregulátor napětí odstraňuje většinu předchozích nevýhod. Jeho implementace do laboratorního zdroje je ale velmi náročná za předpokladu, že se nemají zhoršit ostatní parametry laboratorního zdroje oproti předchozím možnostem. Pro jeho návrh je důležité mít dobré znalosti a zkušenosti z praktického návrhu s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu. U kvalitního laboratorního zdroje by měl být návrh proveden nejenom tak, aby svými parametry vyhovoval příslušným normám, ale také aby jeho parametry dosahovaly uspokojivých hodnot pro dané použití.

3 PRŮMYSLOVĚ VYRÁBĚNÉ ZDROJE

Cílem tohoto bodu není uvést kompletní přehled laboratorních zdrojů daných parametrů dostupných na trhu, ale udělat si představu o konkrétních hodnotách a vlastnostech laboratorních zdrojů používaných v praxi. Pro porovnání byly vybrány stejnosměrné laboratorní zdroje s maximálním trvalým výstupním proudem alespoň 1 A a maximálním výstupním napětím 30 V nebo tomu nejbližšími hodnotami, které jsou v nabídce daného výrobce. Snahou je nevybírat úzkou cenovou nebo kvalitativní skupinu zdrojů, ale rozebrat vlastnosti zdrojů, se kterými se můžeme běžně setkávat, ať už v domácím prostředí, školách, servisních pracovištích, v sektoru vývoje nebo v laboratořích přesného měření. Do porovnání byly zařazeny i zdroje, které už se nevyrábí, ale jsou stále ve velké míře v praxi využívány. Přehled parametrů průmyslově vyráběných vybraných laboratorních zdrojů je v tabulce 6.1.

Můžeme zde naléznout nejčastěji udávané parametry v technických dokumentacích jednotlivých laboratorních zdrojů. Aby bylo možné porovnat zdroje ve společné tabulce, bylo nutné u zdrojů s více výstupy vybrat pouze jeden, a to ten hlavní, regulovatelný. Celkový počet výstupů uvádí 1. řádek tabulky. Další řádky jsou vztaženy už pouze k vybranému výstupu nebo se týkají společných vlastností celého přístroje. Ke zdroji Statron 2223.0 se mi nepodařilo sehnat úplný návod a od zdroje ZPA Košíře AUL210 mám pouze servisní návod, takže mohou chybět některé údaje.

3.1 Výstupní napětí a proud

Všechny porovnávané zdroje nemají maximální zatěžovací proud I závislý na výstupním napětí U . Omezení výstupního proudu pod mez jmenovitého rozsahu má akorát zdroj ZPA Košíře AUL210, který má maximální součet proudů z obou regulovatelných zdrojů 2 A. Zde je ale porovnáván pouze jeden blok zdroje, takže jeho maximální proud může dosahovat trvale 2 A. Jednotlivé zdroje nabízejí různé možnosti volby výstupního napětí a proudového omezení. [5]

3.1.1 Zdroj Agilent E3631A

Na zdroji Agilent E3631A se žádaná hodnota volí z čelního panelu pomocí jednoho společného otočného prvku. Tlačítka se pak určí, který zdroj se bude ovládat a zda se nastavuje výstupní napětí U_0 nebo proud I_K . Otočným prvkem se pak skokově mění výstupní napětí U_0 . Skok je určen opět tlačítky, kterými se určí řád čísla, který se má měnit. Při zvyšování přes číslici 9 se inkrementuje o jedničku vyšší řád, čili lze bez použití tlačítek změnit výstupní napětí U_0 nebo proud I_K v celém rozsahu s předem nastaveným krokem. Během této změny uživatel nemusí sledovat

panel přístroje, což je velmi užitečné v případě, že není důležitá přesná velikost výstupního napětí U (nebo proudu I), ale je jím ovládána jiná hodnota. V kombinaci s tlačítky lze celkem rychle a přesně nastavit žádanou hodnotu. Výstupy zdrojů je možné zapnout i vypnout bez změny přednastavených hodnot. Zdroj lze programovat i pomocí sběrnice GPIB nebo přes rozhraní RS-232. [6]

3.1.2 Zdroj Siglent SPD3303X-E

Podobný způsob předvolby napětí U_0 a proudu I_K z panelu je u zdroje Siglent SPD3303X-E. Výstupy zdrojů je také možné zapnout i vypnout tlačítkem. Programování je možné přes USB nebo přes Ethernet. [7]

3.1.3 Zdroje Tektronix

Zdroj Tektronix PWS2323 umožňuje pouze tlačítkovou volbu napětí U_0 a proudu I_K . Pomocí klávesnice je možné rychle a přesně nastavit hodnotu výstupního napětí U_0 . Její změna už ale není tak snadná, jako např. u zdroje Agilent E3631A. Nutno ale zmínit, že Tektronix nabízí i zdroj PWS4323, který je také vybaven otočným prvkem pro snadnou změnu napětí U_0 nebo proudu I_K . [8, 9]

3.1.4 Zdroj TESLA BS575

Programovatelný zdroj TESLA BS575 má pro volbu napětí U_0 a proudu I_K na předním panelu otočné přepínače s číselnou indikací nastavené hodnoty. Protože se jedná o čtyřkvadrantový zdroj, jsou zde tlačítkové přepínače pro volbu znaménka. Na zdroji je tedy snadné nastavit přesnou žádanou hodnotu výstupu, jejíž velikost je kdykoliv čitelná. Pro změnu napětí U_0 lze přepnutím přepínače změnit hodnotu příslušných číslic celkové hodnoty napětí U_0 . Pokud je ale třeba postupně jemně zvyšovat napětí přes více řádů, může nastat problém. Není obtížné přepnout jedním prstem dva vedlejší přepínače. Změnit ale hodnotu výstupního napětí U_0 např. z 19,99 V na 20,00 V tak, aby výstupní napětí U v žádném čase přechodného děje neklesalo, už může činit problém. Jak je ale z dokumentace patrné, zdroj je maximálně optimalizován pro programování pomocí sběrnice IMS-2. [10]

Tab. 3.1: Přehled technických parametrů vybraných průmyslově vyráběných laboratorních zdrojů

		Agilent E3631A [6], [11]	Diametral P130R51D [12]	MASTECH HY3005D [13]	Radiotechnika RSZ30P [14]	Siglent SPD3303X-E [7]	Statron 2223.0 [15]	Tektronix PWS2323 [8], [16]	TESLA BS554 [2]	TESLA BS575 [10]	UNI-T UTP3705 [17]	ZPA Košíře AUL210 [5]
Základní údaje	Počet výstupů	1	2	1	4	3	1	1	1	1	2	5
	Jmenovitý rozsah výstupního napětí	0 ÷ 25 V	0 ÷ 30 V	0 ÷ 30 V	0 ÷ 30 V	0 ÷ 30 V	0 ÷ 30 V	0 ÷ 32 V	0 ÷ 30 V	±(0 ÷ 29,99) V	0 ÷ 32 V	0 ÷ 36 V
	Jmenovitý rozsah výstupního proudu	0 ÷ 1 A	0 ÷ 4 A	0 ÷ 5 A	0 ÷ 3 A	0 ÷ 3 A	0 ÷ 2,5 A	0 ÷ 3 A	0 ÷ 1 A	0 ÷ 999 mA	0 ÷ 5 A	0 ÷ 2 A
	Nastavitelný rozsah výstupního napětí	0 ÷ 25,75 V	0 ÷ 30 V	-	-	0 ÷ 32 V	-	-	-	±(0 ÷ 29,99) V	-	0 ÷ 36 V
	Nastavitelný rozsah proudového omezení	0 ÷ 1,03 A	0,1 ÷ 4 A	-	0,025 ÷ 3,2 A	0 ÷ 3,2 A	-	-	0,025 ÷ 1,1 A	0 ÷ 999 mA	-	0,2 ÷ 2 A
	Krok nastavení výstupního napětí	1,5 mV	-	-	100 mV	1 mV	-	10 mV	-	10 mV	-	-
	Krok nastavení proudového omezení	0,1 mA	-	-	-	1 mA	-	10 mA	-	1 mA	-	-
	Napěťová stabilita se změnou sítě v rozsahu napětí	±(< 0,01 % + 2 mV)	cca 0,05 %	≤ 0,01 % + 1 mV	< 0,01 %	≤ 0,01 % + 3 mV	15 mV	≤ 0,1 % + 5 mV	≤ ±0,05 %	-	0,005 % + 1 mV	25 mV
	Napěťová stabilita se změnou proudu 0÷100 %	±(< 0,01 % + 2 mV)	cca 0,2 %	≤ 0,01 % + 3 mV	< 0,01 %	≤ 0,01 % + 3 mV	30 mV	≤ 0,02 % + 5 mV	≤ ±(0,05 % + 4 mV)	-	≤ 0,01 % + 2 mV	20 mV
	Napěťová stabilita se změnou teploty	±(0,01 % + 3 mV)/°C	-	-	< 0,01 %/°C	≤ 0,03 %/°C	-	-	≤ ±0,05 %/°C	±(0,015 % + 1,5 mV)/°C	-	-
	Chyba napětí při referenční teplotě	±(0,05 % + 20 mV)	-	-	< 0,1 %	±(0,03 % + 10 mV)	-	≤ 0,05 % + 10 mV	-	±0,1 % ± 5 mV (do 0,1 A)	-	±2 %
	Proudová stabilita se změnou sítě v rozsahu napětí	±(< 0,01 % + 250 μA)	cca 0,05 %	≤ 0,2 % + 1 mA	-	≤ 0,2 % + 3 mA	2,5 mA	≤ 0,1 % + 2 mA typ.	-	-	≤ 0,5 mA	-
	Proudová stabilita se změnou napětí 0÷100 %	±(< 0,01 % + 250 μA)	-	≤ 0,2 % + 3 mA	-	≤ 0,2 % + 3 mA	5 mA	≤ 0,1 % + 2 mA typ.	-	-	-	-
	Proudová stabilita se změnou teploty	±(0,02 % + 0,5 mA)/°C	-	-	-	-	-	-	-	±(0,015 % + 0,1 mA)/°C	-	-
	Chyba proudu při referenční teplotě	±(0,15 % + 4 mA)	-	-	-	±(0,3 % + 10 mA)	-	≤ 0,2 % + 10 mA	-	±0,2 % ± 0,5 mA	-	-
	Doba náběhu t_N	30 min.	-	15 min.	30 min.	30 min.	-	-	30 min.	30 min.	-	20 min.
	Zvlnění a šum napětí v napěťovém režimu	< 0,35 mV _{EF} a < 2 mV _{SS}	2 mV _{EF}	≤ 0,5 mV _{EF}	< 1 mV _{SS}	≤ 2 mV _{EF}	2 mV _{EF}	≤ 1 mV _{EF} /3 mV _{SS}	≤ 1 mV _{EF}	15 mV _{SS} (krátké impulzy)	≤ 1 mV _{EF}	1 mV
	Zvlnění a šum proudu v proudovém režimu	< 500 μA _{EF}	-	≤ 3 mA _{EF}	-	≤ 3 mA _{EF}	2 mA _{EF}	≤ 5 mA _{EF}	-	3 mA _{SS} (krátké impulzy)	≤ 1 mV _{EF}	(10 mV)
	Maximální napětí výstupních svorek proti kostře	±240 V _{DC}	-	-	40 V	-	-	< 100 V	60 V	60 V	-	-
	Chyba přesnosti měření napětí	< 0,05 % + 10 mV	-	±1 % ± 2 digits	< 3 %	±(0,03 % + 10 mV)	třída 5	≤ 0,05 % + 120 mV	±3 %	-	-	-
	Chyba přesnosti měření proudu	< 0,15 % + 4 mA	-	±2 % ± 2 digits	< 3 %	±(0,3 % + 10 mA)	třída 5	≤ 0,1 % + 15 mA	±3 %	-	-	-
Pracovní podmínky	Výstupní odpor/vodivost	-	-	-	-	-	-	-	-	< 5 mΩ/ ≤ 40 μA/V	-	< 10 mΩ
	Kapacita výstupního kondenzátoru	(471,12 μF) ¹	10 μF	(470,1 μF) ¹	(100 nF) ¹	-	-	-	(5 μF) ¹	0	-	(200 μF) ¹
	Bezpečnostní třída	Návod – str. 15 ²	Návod – str. 8 ²	Návod – str. 1-3 ²	Návod – str. 5 ²	-	-	Návod – str. Vii ²	Návod – str. 4 ²	Návod – str. 17 ²	-	Návod – str. 3 ²
	Stupeň odrušení	Návod – str. 15 ²	Návod – str. 8 ²	-	Návod – str. 5 ²	-	-	Návod – str. V ²	Návod – str. 4 ²	-	-	-
	Rozsah teplot	0 ÷ +40 °C	10 ÷ +30 °C	0 ÷ +40 °C	+5 ÷ +40 °C	0 ÷ +40 °C	0 ÷ +35 °C	0 ÷ +40 °C	+5 ÷ +40 °C	+5 ÷ +40 °C	0 ÷ +40 °C	+10 ÷ +35 °C
	Relativní vlhkost	-	-	20 ÷ 80 %	40 ÷ 80 %	< 80 %	< 85 %	5 ÷ 95 %	40 ÷ 80 %	40 ÷ 80 %	-	≤ 80 %
	Tlak vzduchu	-	-	-	86 ÷ 106 kPa	ve výškách < 2000 m	-	ve výškách < 2000 m	86 ÷ 106 kPa	86 ÷ 106 kPa	-	-
	Poloha přístroje	-	-	-	Vodorovná	-	-	-	Vodorovná (±5°) ³	Vodorovná (±5°) ³	-	-
Všeobecné	Napájecí napětí	230 V _{AC} ± 10 % ⁴	230 V+6/−10 %	220 V _{AC} ± 10 % ⁴	220 V ± 10 %	220/230 V ± 10 % ⁴	230 V+6/−10 %	220 ÷ 240 V _{AC} ± 10 % ⁴	220 V ± 10 % ⁴	220 V ± 10 %	230 V _{AC} ± 10 %	220 V+10/−15 %
	Druh napájecího proudu	-	-	-	~ zkreslení < 5 % ⁵		-	-	~ zkreslení < 5 % ⁵	~ zkreslení < 5 % ⁵	-	-
	Kmitočet napájecího napětí	47 ÷ 63 Hz	50 Hz	50/60 Hz ± 2 Hz	50 Hz	50/60 Hz	48 ÷ 62 Hz	47 ÷ 63 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz ± 4 %	50 Hz ± 3 %
	Příkon	350 VA	160 W	-	420 VA	195 W	-	350 VA	70 VA	140 VA	-	300 VA
	Rozměry přístroje $\check{s} \times v \times h$ [mm]	212,6 × 132,6 × 348,2	158 × 172 × 280	136 × 158 × 291	500 × 145 × 360	225 × 136 × 275	140 × 120 × 260	217 × 91 × 362	235 × 145 × 320	435 × 143 × 382	197 × 152 × 305	188 × 227 × 340

¹Určeno ze schémat zapojení nebo z rozpisu elektrických součástí

²V dokumentaci jsou uvedeny normy, které přístroj splňuje

³Vodorovná nebo nakloněná se sklonem ±5°

⁴Jeden z více volitelných vstupních rozsahů napětí

⁵Střídavý sinusový, se zkreslením menším než 5 %

3.1.5 Zdroje ZPA Košíře

Přepínačů pro volbu žádané hodnoty využívá i zdroj ZPA Košíře AUL210. Volba napětí U_0 je u tohoto zdroje zajišťována kombinací přepínače po skocích po 3 V a pro jemné nastavení potenciometrem s rozsahem zvýšení napětí o 3 V nad úroveň nastavenou přepínačem. Potenciometr je cejchován po 0,5 V. Tento způsob nastavování napětí U_0 sice umožňuje nastavit známou hodnotu napětí U_0 bez potřeby voltmetru, neumožňuje ale spojitou změnu napětí U_0 přes jmenovitý rozsah zdroje. Tento způsob nastavení napětí zřejmě výrobce zvolil z důvodu absence voltmetrů ve zdroji. Tento nedostatek výrobce odstranil u zdroje AUL310 pomocí dvojice potenciometrů, kde jsou digitální panelová měřidla přepínatelná mezi měřením napětí U a proudu I . Volba proudu u tohoto zdroje není plynulá, ale skoková v řadě 0,2; 0,5; 0,8; 1,0; 1,3; 1,5; 1,8; 2,0 A. U zdroje AUL310 je tento přepínač rovněž nahrazen potenciometrem. Zdroj je možné ovládat pomocí vnějšího napětí nebo pomocí externího odporu po stisknutí tlačítka EXT REF. To umožňuje externě nastavovat jak hodnotu napětí, tak hodnotu proudu, a to spojitě. Lze využít i různých kombinací tak, že je jedna veličina ovládána z panelu a druhá externě. Stejně tak může být jedna veličina ovládána vnějším odporem a druhá vnějším napětím.

[5, 25]

3.1.6 Zdroj Radiotechnika RSZ30P

Radiotechnika u zdroje RSZ30P dává uživateli na výběr mezi spojitou regulací napětí pomocí potenciometru a nespojitou regulací napětí pomocí otočných přepínačů s číselnou indikací. Volba typu regulace napětí je pomocí tlačítkového přepínače a je indikována LEDkami. Proud je spojitě nastavitelný jedním samostatným potenciometrem. [14]

3.1.7 Zdroj TESLA BS554

Velmi vhodný kompromis mezi rychlostí nastavení žádané hodnoty a její přesností je použití aripotu pro napětí U_0 a běžného potenciometru pro proud I_K . Tento způsob je využit ve zdroji TESLA BS554. Proud v rozsahu do 1,1 A se dá běžným potenciometrem nastavit dostatečně přesně i pro elektroniku s malým odběrem proudu. Nastavení je velmi snadné a bez jakýchkoliv problémů se dá spojitě přeladit celý rozsah zdroje. [2]

3.1.8 Zdroj MASTECH HY3005D

Hlavní nevýhodou aripotu je jeho vysoká cena oproti běžnému potenciometru. Ve zdroji MASTECH HY3005D je použito dvou dvojic potenciometrů. Jeden je pro hrubé nastavení napětí, druhý pro jemné nastavení napětí. Obdobně je využito i druhé dvojice pro nastavení proudu. Problém může nastat, pokud si nahrubo nastavíme napětí jedním potenciometrem, a chceme si druhým potenciometrem napětí ještě mírně zvýšit. Pokud je tento potenciometr už na maximu, je nutné jej snížit, hrubým potenciometrem hodnotu mírně zvýšit a poté přesně doladit hodnotu jemným potenciometrem. Při jiném postupu by mohlo dojít k překročení žádané hodnoty během nastavování, což někdy může být na škodu. [13]

3.1.9 Zdroj Statron 2223.0

Stejného principu využívá zdroj Statron 2223.0 s tím rozdílem, že v něm jsou potenciometry hrubé a jemné regulace souosé. Zaberou sice méně místa na čelním panelu, ale výše zmíněný problém to neodstraňuje. [15]

3.1.10 Zdroj Diametral P130R51D

Laboratorní zdroj Diametral P130R51D má pro nastavení napětí také dvojici potenciometrů, pro nastavení proudu ale využívá pouze jeden potenciometr. Vzhledem k tomu, že zdroj má rozsah proudu do 4 A, může být jeden potenciometr pro nastavení proudové pojistky příliš necitlivý. Nastavení požadované hodnoty je pak náročné na cit obsluhy. [12]

3.1.11 Zdroj UNI-T UTP3705

U zdroje UNI-T UTP3705 jsou použity samostatné potenciometry pro nastavení napětí i proudu, což zdroj omezuje spíše pro napájení zátěží, kde není potřebné nastavovat přesnou hodnotu napětí nebo proudu. [17]

3.2 Stabilita a chyba nastaveného napětí a proudu

Jak již bylo popsáno v kapitole 2, všechny zmíněné zdroje mají dvě regulační smyčky - napěťovou a proudovou. U některých zdrojů je jako hlavní pracovní oblast považován režim konstantního napětí a proudová smyčka pak tvoří primárně ochranu proti přetížení nebo zkratu napěťového zdroje. Představuje tak elektronickou pojistku napěťového zdroje. Z tohoto pohledu pak nedává příliš smysl definovat stabilitu proudového omezení, neboť v proudovém režimu se považuje spojení zdroje a zátěže

v poruchovém stavu. Může sloužit i pro omezení proudového nárazu při připojení např. kapacitní zátěže nebo žárovky se studeným vláknem, jehož odpor může být výrazně menší než při zahřátí na pracovní teplotu. U některých zdrojů ale je snadou optimalizovat zdroj jak pro režim konstantního napětí, tak pro režim konstantního proudu. Z tohoto pohledu pak lze předpokládat provoz zdroje jako proudový zdroj a pak je třeba definovat i stabilitu zdroje v režimu konstantního proudu. Optimalizovat zdroj pro oba tyto režimy není vůbec jednoduchá záležitost a přináší komplikace, jak při jeho návrhu, tak i při jeho provozu.

3.2.1 Analogově nastavitelná hodnota napětí a proudu

U zdrojů, u kterých se zadává žádaná hodnota např. neocechovaným potenciometrem, se nastavuje ovládací prvek tak dlouho, dokud např. na výstupu zdroje není požadovaná hodnota, jejíž velikost se měří. Při tomto způsobu nastavení stabilizovaného zdroje může být zajímavé, jak se hodnota bude měnit se změnou okolních parametrů. 3 nejvýznamnější parametry, které ovlivňují stabilitu výstupního napětí nebo proudu, jsou: změna napětí v napájecí rozvodné síti, změna odporu zátěže a změna teploty okolního prostředí. Laboratorní zdroje by měly mít definované pracovní podmínky, tedy rozsah parametrů, v jehož mezích zdroj spolehlivě funguje. Při změnách těchto parametrů během provozu zařízení, byť v mezích definovaných výrobcem, může docházet ke kolísání výstupního napětí nebo proudu. Tyto parametry jsou uvedeny uprostřed části „Základní údaje“ tabulky 6.1. Tyto hodnoty mohou být u zdrojů s cechovanými nastavitelnými prvky nebo digitálně volenou žádanou hodnotou zahrnuty ve společné chybě zobrazené hodnoty proti skutečné hodnotě. Tyto případy budou samostatně popsány v oddíle 3.2.2, a proto nebudu upozorňovat na případné vynechání některých z údajů u zdrojů Siglent SPD3303X-E, Tektronix PWS2323 a zdroje TESLA BS575. Toto se týká i zdroje Agilent E3631A, ale ten má všechny zmiňované údaje uvedené. Ke zdrojům s cechovanými nastavitelnými prvky lze částečně zařadit i zdroje Radiotechnika RSZ30P a ZPA Košíře AUL210. Nebudu upozorňovat ani na neúplnost definice u zdrojů Statron 2223.0 a ZPA Košíře AUL210 kvůli neúplnosti údajů v tabulce, viz začátek této kapitoly 3.

Napěťová a proudová stabilita se změnou napětí sítě

Hodnota napěťové a proudové stability se změnou napětí sítě je závislá na udávaném pracovním rozsahu napájecího napětí. To je nejčastěji $\pm 10\%$, u zdrojů Diametral P130R51D a Statron 2223.0 to je pouhých $+6/-10\%$. Naopak u zdroje ZPA Košíře AUL210 je rozsah napájecího napětí $+10/-15\%$, a pro tento rozsah by měla být definována i jeho stabilita. Přestože se na první pohled může zdát, že Statron 2223.0 má značně lepší napěťovou stabilitu se změnou napětí sítě než zdroj ZPA Košíře

AUL210, tak po zvážení ostatních faktorů se dojde k tomu, že to není pravda. Statron totiž definuje 15 mV pro změnu sítě o 16 % a ZPA Košíře definuje 25 mV pro změnu sítě o 25 %. Napěťová stabilita se změnou síťového napětí tedy je u těchto zdrojů dle dostupných informací přibližně stejná. Zdroj UNI-T UTP3705 tuto stabilitu udává bez určení mezní hodnoty nebo vyjádření, jak se k této hodnotě došlo. U zdroje Diametral P130R51D je uvedeno před hodnotou „cca“, z čehož lze usuzovat, že se jedná o častou hodnotu. Nemám ale zaručeno, do jaké hodnoty může závislost dosáhnout.

Napěťová a proudová stabilita se změnou proudu I 0÷100 %

Napěťová stabilita se změnou proudu I 0÷100 % je údaj úměrný výstupnímu odporu v režimu konstantního napětí R_U . Většina výrobců tedy uvádí pouze jeden z nich. Podobně i proudová stabilita se změnou napětí U 0÷100 % úzce souvisí s výstupní vodivostí v režimu konstantního proudu G_I . O těchto parametrech ještě bude zmínka v sekci 3.6.

Napěťová a proudová stabilita se změnou teploty

Uvedené teplotní stability jsou vztaženy na změnu teploty o 1 °C. Nejedná se tedy o maximální změnu způsobenou vlivem změny teploty v mezích definované pracovní teploty. S ohledem na možnou změnu teploty, která může běžně v průmyslu nastat, a kterou připouští pracovní podmínky zdroje, je patrné, že může způsobit mnohem větší změny napětí U_0 nebo proudu I_K , než závislost na změně zátěže nebo vliv kolísání sítě. Na tento vliv je třeba si dát pozor i za předpokladu, že přístroje okolo sebe nemají dostatek prostoru na optimální chlazení. Přístroje si mohou zahřát okolní vzduch o nezanedbatelnou teplotu! Proto lze tuto hodnotu považovat za významnou. Rozhodně lze výrobcí UNI-T vytknout, že neuvedl teplotní závislosti, ale uvádí závislost na napájecím napětí o hodnotě 0,005 %. Taktéž chybí teplotní závislost u zdrojů Diametral P130R51D a MASTECH HY3005D.

Časová stabilita

U některých zdrojů je definována časová stabilita, která určuje, jak se může hodnota změnit během definované doby od nastavení výstupního napětí nebo proudu. Např. u zdroje Agilent E3631A je časová stabilita udávána za 8 hodin při konstantním napájecím napětí, konstantní zátěži a okolní teplotě. Časová stabilita v režimu konstantního napětí je $\pm(0,02 \% + 2 \text{ mV})$ a časová stabilita v režimu konstantního proudu je $\pm(0,05 \% + 1 \text{ mA})$. Další zdroj, u kterého jsem našel definovanou časovou stabilitu, je TESLA BS525. Časová stabilita v režimu konstantního napětí je definována jako mezivrcholová hodnota za dobu 8 hodin $< (0,05 \% + 2 \text{ mV})$. [6, 26]

3.2.2 Digitálně nastavitelná hodnota napětí a proudu

U laboratorních zdrojů s digitálním ovládáním se standardně zadává přímo žádaná hodnota formou čísla. Úkolem laboratorního zdroje je pak zajistit na výstupních svorkách zadanou hodnotu s definovanou tolerancí. U nastavování hodnoty potenciometrem se běžně v okamžiku nastavování nastaví vždy správná hodnota nezávisle na aktuálních podmínkách a chyby se pak vyhodnocují ze změny těchto podmínek k podmínkám jiným. Naproti tomu u digitálního nastavení žádané hodnoty se už obvykle nekontroluje skutečná hodnota na výstupu a věří se údaj, který je indikován přístrojem. Pokud ale v okamžiku nastavení žádané hodnoty nejsou zajištěny referenční podmínky, může mít skutečná hodnota na výstupu zdroje odchylku od indikované žádané hodnoty. Při změně pracovních podmínek po nastavení hodnoty se už nevyhodnocuje chyba mezi počátečními podmínkami a aktuálními, ale opět mezi podmínkami referenčními, které definoval výrobce a podle kterých přístroj ocejchoval, a mezi aktuálními podmínkami. Toto tedy platí i pro zadávání žádané hodnoty u analogově ovládaných zdrojů, kde se hodnota zadává například cejchovanými přepínači. V tomto přehledu se tato část částečně týká zdroje ZPA Košire, kde se takto volí proudové omezení a částečně i napětí. Napětí se u něj volí hrubě přepínačem a jemně potenciometrem, který je také ocejchovaný. V režimu nespojité regulace napětí se toto týká i zdroje Radiotechnika RSZ30P.

U digitálních zdrojů může být počáteční chyba částečně kompenzována. Tím se ale kvůli porovnání stabilit laboratorních zdrojů není třeba zabývat. Výrobci udávají u těchto zdrojů chybu napětí nebo proudu při referenčních podmínkách. Někteří tuto chybu definují jako možnou odchylku při referenčním napájecím napětí, definované zátěži a referenční teplotě. Pak definují zvlášť stabilitu se změnou napětí sítě, stabilitu se změnou zátěže a stabilitu se změnou teploty. Takto jsou stability definované např. u zdroje Agilent E3631A. TESLA definovala u zdroje BS575 chybu napětí při referenční teplotě, ale pro celý rozsah napájecího napětí a pro zátěž $0 \div 100 \text{ mA}$. Při překročení tohoto proudu pak je ještě nutné připočíst úbytek na definovaném výstupním odporu R_U . Podobně i chyba proudu při referenční teplotě zahrnuje celý rozsah síťového napětí. Při odchylce teploty od referenční je však nutno přičíst hodnotu stability se změnou teploty v závislosti na velikosti změny teploty. U ostatních zdrojů jsou různé kombinace těchto pohledů na definování stabilit. Vezme-li se v úvahu, co zahrnují stability jednotlivých zdrojů, napěťové stability zmíněných digitálních zdrojů řádově srovnatelné. Pro malá napětí vychází nejstabilněji zdroj TESLA BS575. Stejně tak u proudových stabilit vychází pro malé proudy nejlépe zdroj TESLA BS575. Pro větší proudy může být srovnatelný se zdrojem Agilent E3631A. Oba tyto zdroje mají jmenovitý rozsah proudu přibližně 1 A. Zdroj Siglent SPD3303X-E i Tektronix PWS2323 mají jmenovitý rozsah proudu do 3 A,

což představuje větší problém pro přesné měření proudu, neboť tepelné ztráty P_B na odporovém bočníku R_B rostou kvadrátem protékaného proudu I , jak je patrné ze vztahu 3.1.

$$P_B = R_B \cdot I^2 \quad (3.1)$$

kde:

P_B [W] je ztrátový výkon na odporovém bočníku

R_B [Ω] je odpor bočníku

I [A] je proud tekoucí zdrojem

Pokud se srovná s digitálními zdroji i zdroj Radiotechnika RSZ30P, mohlo by se zdát, že jeho nastavování žádaného napětí v režimu nespojitě regulace napětí je velmi přesné. Tento zdroj má ale krok zadávání napětí 100 mV na rozdíl třeba od zdroje Agilent E3631A, kde se chyby určují z napětí zadaného s přesností na 1,5 mV.

3.2.3 Doba náběhu

Většina zmíněných zdrojů (nezávisle na způsobu zadávání žádané hodnoty) mají definované výstupní stability po době náběhu t_N , která je nejčastěji 30 min., u zdroje ZPA Košíře AUL210 je $t_N = 20$ min. a nejkratší uvádí MASTECH HY3005D, a to $t_N = 15$ min. U zdrojů Tektronix PWS2323 a UNI-T UTP3705 bohužel doba náběhu t_N , tedy doba, po jaké jsou definované stability zdroje, není uvedena. U zdroje Diametral P130R51D nejsou dostatečně definovány ani stability zdroje, takže nelze určit, kdy je zdroj naběhlý. Tato doba ale neomezuje zdroje v používání před jejím uplynutím.

3.3 Zvlnění a šum

Zvlnění a šum udávají výrobci různých hodnot a v různém kmitočtovém spektru. Zvlnění a šum výstupního napětí v napětovém režimu je u zdrojů Agilent E3631A a Tektronix PWS2323 uveden jako efektivní hodnota napětí i hodnota napětí špiška-špiška. U ostatních zdrojů je uveden pouze jeden z těchto údajů. U zdroje TESLA BS575 je uvedena mezivrcholová hodnota napětí s poznámkou „krátké impulzy“, což vhodně upřesňuje představu o druhu zvlnění nebo šumu. U zdroje ZPA Košíře AUL210 není v servisní dokumentaci uvedeno zvlnění výstupního proudu, ale je definováno „Zvlnění výstupního napětí při proudové stabilizaci“. Tento údaj sice přesněji odpovídá způsobu měření zvlnění, chybí zde ale údaje o odporu zátěže a jeho vlastnostech. Závažnějšího nedostatku se dopustil výrobce UNI-T, který definoval zvlnění výstupního proudu v proudovém režimu s jednotkou mV_{EF}. To může budit

pochybnosti, zda je udaná hodnota proudu v chybných jednotkách, nebo zda je měřeno zvlnění a šum na odporové zátěži, která nejenom není definovaná, ale není zde ani popis, že se jedná o tento zvláštní způsob definice.

Při definici zvlnění a šumu je také údaj ovlivněn tím, v jakém kmitočtovém pásmu byla hodnota měřena. Agilent u zdroje E3631A udává $20\text{ Hz} \div 20\text{ MHz}$, u zdroje Siglent SPD3303X-E je uvedeno $5\text{ Hz} \div 1\text{ MHz}$, zdroj Tektronix PWS2323 má zvlnění a šum měřen v pásmu $20\text{ Hz} \div 7\text{ MHz}$ a u zdroje TESLA BS554 je to při $10\text{ Hz} \div 10\text{ MHz}$. U ostatních zdrojů pásmo nebylo definováno. [6, 7, 8, 2]

3.4 Maximální napětí výstupních svorek proti kostře

Tento údaj je velmi důležitý pro použití zdroje na většině pracovišť. Přesto není definován u zdrojů Diametral P130R51D, MASTECH HY3005D, Siglent SPD3303X-E a UNI-T UTP3705. U zdrojů s více výstupy by ještě měla být definována maximální vzájemná napětí mezi jednotlivými galvanicky oddělenými bloky zdrojů nebo mezi jednotlivými výstupními svorkami. Tato hodnota se nejčastěji uvádí jako maximální stejnosměrné nebo špičkové napětí, které se může mezi svorkou a kostrou zdroje vyskytovat, aniž by mohlo dojít k průrazu nebo ovlivnění spolehlivého chodu zdroje. U zdroje TESLA BS575 je uvedeno i zkušební napětí 500 V_{EF} . [10]

3.5 Měření výstupního napětí a proudu

Na těchto zdrojích jsou využity 3 způsoby měření výstupních veličin, a to digitální, analogové a komparační. U digitálního měření patří k hlavním výhodám přesnost nastavení žádané hodnoty a nezávislost přesnosti čtení na úhlu pohledu. Obě tyto vlastnosti nejsou však samozřejmostí.

3.5.1 Porovnání digitálních a analogových měřidel

U zdrojů se pro měření napětí často indikují pouze 3 číslice. Pro rozsah do 30 V to představuje zobrazení napětí ve voltech s jedním desetinným místem. Z principu tedy nemůže být dané měření přesnější než měření kvalitním analogovým panelovým měřidlem. Konkrétně se v tomto přehledu jedná o zdroj Diametral P130R51D a UNI-T UTP3705, kde je napětí měřeno digitálně s indikací jednoho desetinného místa, tedy např. $30,0\text{ V}$. Poměrně přesné analogové měření napětí je ve zdrojích RDIOTECHNIKA RSZ30P a TESLA BS554. Bohužel zde nemohu uvést číselné porovnání nejistot na konkrétním příkladu, neboť ani u jednoho ze zmíněných zdrojů

s digitálními měřidly nejsou uvedeny jejich chyby měření. Pro měření proudů je u zdroje Radiotechnika RSZ30P ještě možnost přepínání rozsahu mezi 1 A a 4 A. Podobně i zdroj Tektronix PWS2323 přepíná rozsah měření napětí pro napětí < 20 V na rozlišení 10 mV.

U zdroje Diametral P130R51D jsou displeje zapuštěné příliš hluboko pod úroveň předního panelu. Vůči této hloubce jsou rámečky kolem sedmisegmentových displejů příliš úzké, což při pohledu z boku zastíní krajní segmenty. Tato skutečnost také nepředstavuje značnou výhodu oproti kvalitním analogovým panelovým měřidům.

3.5.2 Porovnání s komparačním vyhodnocením

U některých zdrojů je využíváno pouze oceichených ovládacích prvků spolu s indikací, zda se zdroj nachází v napěťovém nebo proudovém režimu. Tento způsob nastavení je například u zdroje TESLA BS575 přesnější, než zmíněná digitální měřidla zdrojů Diametral P130R51D nebo UNI-T UTP3705. Nevýhodou ale je, že při připojení neznámé zátěže má uživatel informaci pouze o jedné výstupní veličině. Zdroj TESLA BS575 umožňuje indikaci režimu zdroje konstantního napětí nebo proudu i odesílat na sběrnici IMS-2 pomocí paralelního hlášení. Obdobný způsob indikace napětí je využit i u zdroje ZPA Košire AUL210. Pro měření proudu má ale tento zdroj samostatné analogové panelové ampérmetry. [10, 5]

3.5.3 Sledování změn výstupních veličin

Jiná problematika nastane v okamžiku, kdy už je nastavena žádaná hodnota a je zapotřebí sledovat proud obvodem nebo napětí na zdroji. Často už není potřeba přesného odečítání okamžitých hodnot, ale rychlé sledování změn. Pro tento účel je bezesporu vhodnější grafické vyjádření, což analogové přístroje splňují. Zdroj Siglent SPD3303X-E umožňuje grafické zobrazení časového průběhu výstupních veličin. U elektronických měřicích přístrojů nebo digitálních měřidel může být problém s rušením při pulzním zatížení zdroje. Uživatel pak ztrácí přehled nad tím, zda zakmitává zdroj nebo pouze panelové měřicí přístroje. To nastává např. u zdroje Diametral P130R51D nebo u zdroje Siglent SPD3303X-E. U ostatních zde porovnávaných zdrojů s digitálními měřidly nemám tuto problematiku ověřenou. [27, 7, 28]

3.5.4 Přesné měření výstupních veličin

Pro přesná měření je zapotřebí k výstupu zdroje připojit přesné měřicí přístroje. Zatímco u většiny voltmetrů je měřicí proud zanedbatelný, úbytky na ampérmetru pro přesné měření zanedbatelné často nejsou. Pro odstranění vlivu odporu bočníku ampérmetru nebo vlivu odporu přírodních vodičů umožňuje zdroj Radiotechnika

RSZ30P čtyřvodičové připojení zátěže. To je velmi výhodné při pulzním odběru velkého proudu při malém napětí. [14]

3.6 Výstupní impedance

3.6.1 Výstupní odpor a vodivost

Výstupní odpor napěťového zdroje považuji za důležitý údaj zdroje. Spolu se známým odporem přívodů pak není obtížné odhadnout v jakých mezích se může pohybovat napájecí napětí spotřebiče a hlavně o kolik může kolísat. Jak bylo uvedeno v oddíle 3.2.1, často je vliv výstupního odporu udáván jako napěťová stabilita se změnou zátěže. Přímou udaný mezní výstupní odpor v režimu konstantního napětí a mezní výstupní vodivost v režimu konstantního proudu je u zdroje TESLA BS575. Zároveň výrobce uvádí, že typický výstupní odpor je poloviční než mezní. U zdroje ZPA Košíře AUL210 je uvedena napěťová stabilita se změnou zátěže i výstupní odpor v napěťovém režimu. Ostatní výrobci uvádí pouze stabilitu se změnou zátěže. U zdroje Diametral P130R51D je uvedena stabilita se 100 % změnou zátěže cca 0,2 %, což by pro napětí 30 V a změnu proudu 4 A mělo odpovídat výstupnímu odporu cca $R = \frac{30}{4} \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 15 \text{ m}\Omega$. Já jsem provedl měření na dvou těchto zdrojích a naměřil jsem výstupní odpory 67,4 mΩ a 79,2 mΩ. Měření bylo prováděno za účelem orientační představy, a nebyly u něj tedy určeny nejistoty měření. Ze zde zmiňovaných zdrojů bylo stejné měření za stejných podmínek prováděno i u zdrojů Agilent E3631A, TESLA BS575 a ZPA Košíře AUL310. Všechny tyto další zdroje měly výstupní odpor menší, než mezní parametr udávaný v dokumentaci, i přes jejich značné stáří.

3.6.2 Výstupní kapacita

Dalším, neméně důležitým údajem je z mého pohledu kapacita výstupu. Velká kapacita na výstupu může výrazně zlepšit dynamické vlastnosti (snížit impedanci) zdroje konstantního napětí a může ovlivnit zvlnění a šum napětí v napěťovém režimu. Má však negativní vliv na proudové omezení. Prodlouží se doba ustálení předvolené hodnoty, což se projeví u programovatelných zdrojů. Dojde-li k náhlému nárůstu proudu, vliv proudového omezení se plně projeví až po vybití této kapacity na nové ustálené napětí v proudovém režimu. To může způsobit poškození zátěže, neboť se tato kapacita může vybíjet značnou částí do zátěže. V režimu konstantního proudu pak způsobuje kolísání proudu při strmé změně napětí na zátěži. Nejuniverzálněji řešený z tohoto pohledu je zdroj TESLA BS575, který nemá na výstupu připojené žádné kondenzátory. Výrobce v návodu doporučuje na výstup připojit kapacitu

v případě, že se nevyužívá maximální rychlost programování zdroje. Podstatně se tak sníží rušivé signály na výstupu. Ze zmíněných důvodů považuji velmi nevhodný kondenzátor $470\ \mu\text{F}$ na výstupu zdroje Agilent E3631A. Tento zdroj je do 1 A, tak u něj lze předpokládat zátěže s malým odběrem proudu. Kdyby byl uvnitř výstupní kondenzátor o menší kapacitě, tak by si mohl každý uživatel v případě potřeby na výstup připojit vlastní kondenzátor. Když už je ale uvnitř, tak už uživatel nemá možnost bez zásahu do zdroje tuto kapacitu snížit. Kondenzátor $470\ \mu\text{F}$ je i na výstupu zdroje MASTECH HY3005D. Ten je ale do 5 A, tak u něj se mohou uvažovat zátěže s větším proudem a je to přípustnější, než v předchozím případě.

3.6.3 Kmitočtová závislost výstupní impedance

U zdrojů Agilent E3631A, Radiotechnika RSZ30P, TESLA BS554 a ZPA Košíře AUL210 je přímo uvedena kmitočtová závislost výstupní impedance. Zdroj Radiotechnika RSZ30P a TESLA BS554 má uvedenou i hodnotu přechodového proudu $I_{P\check{R}} = 5\ \text{mA}$ a napětí $U_{P\check{R}} = 0,1\ \text{V}$ odpovídající zatěžovací charakteristice na obrázku 2.2. Zdroj TESLA BS575 má podle výrobce strmý přechod mezi napětovým a proudovým režimem. [14, 2, 10]

3.7 Bezpečnost a odrušení

U některých zdrojů je uvedena bezpečnostní třída a stupeň odrušení nebo normy, kterým zařízení odpovídá. V tabulce 6.1 jsou uvedeny čísla stran v návodu k použití s podrobnostmi, neboť zdroje jsou z různé doby a různých států, což zapříčiňuje nejednotnost ve splněných normách.

3.8 Pracovní podmínky

U všech zdrojů je uveden rozsah teplot, napájecí napětí s definovanou tolerancí a síťový kmitočet.

3.8.1 Rozsah teplot

Většina zdrojů umožňuje provoz až do teploty $+40\ ^\circ\text{C}$, což je podmínkou pro provoz v průmyslu. Zdroje Statron 2223.0 a ZPA Košíře AUL210 mají rozsah teplot pouze do $+35\ ^\circ\text{C}$ a zdroj Diametral P130R51D dokonce jen do $+30\ ^\circ\text{C}$. Tento zdroj má sice v dokumentaci uvedeno, že je určen jen pro provoz v domácnosti. Dle mého názoru ale i pro provoz v domácnosti může být tento rozsah teplot nedostačující. Naopak

zdroj Agilent E3631A umožňuje provoz až do teploty $+55^{\circ}\text{C}$ s lineárním poklesem výstupního proudu do 50 % maximálního proudu. [15, 5, 12, 6]

3.8.2 Napájecí napětí

Povolená velikost napájecího napětí, jeho tolerance, kmitočet a zkreslení jsou dány místem vzniku zdroje nebo uzpůsobením pro export a dobou vzniku. Mnoho zdrojů umožňuje pomocí voliče napětí na zadním panelu určit požadovanou úroveň napětí sítě. V současné době by na území České republiky byl s ohledem na ČSN EN 50160 optimální rozsah napětí $230\text{ V} \pm 10\%$. U zdrojů Radiotechnika RSZ30P, TESLA BS554 a TESLA BS575 je uveden i druh napájecího napětí.

3.9 Všeobecné údaje

3.9.1 Komunikační rozhraní

Laboratorní zdroje se nejčastěji využívají jako univerzální napájecí zdroje s nastavitelným konstantním napětím. Před připojením spotřebiče se navolí požadované napětí a proudové omezení. Poté se připojí spotřebič, a pokud byly úrovně vhodně zvoleny, tak už se nemění. V některých případech se hledá vhodné napětí nebo proud. V takovém případě se může např. napětí nastavit na 0 V a po připojení záteže postupně napětí zvyšovat na požadovanou úroveň. Pro tyto účely je vhodné jednoduché ovládání zdroje z čelního panelu.

Potřebujeme-li ale např. při měření charakteristik napětí postupně měnit, může být výhodné programování zdroje. Zvláště výhodná je funkce programování zdroje přes sběrnici GPIB nebo IMS-2 na pracovišti s automatizovaným měřením. Toho se využívá především v laboratořích, zkušebnách nebo např. v sériové výrobě, kde se požaduje opakovaná sekvence napětí nebo proudů. Ve zvláštním případě může být zdroj použit jako generátor funkcí. Pro tento účel však jsou omezené možnosti generování zejména kvůli vzorkovací periodě. Jsou tím kladeny zvýšené nároky na parametry zdroje. Pro generování střídavých průběhů na výstupu zdroje bez použití dalších součástek už nepostačí pouze jednokvadrantový zdroj.

Programování zdroje TESLA BS575

Jediným zdrojem ze zde zmiňovaných, který dokáže generovat střídavé průběhy, je zdroj TESLA BS575. Jedná se o programovatelný čtyřkvadrantový zdroj. Přístroj se tedy dokáže chovat jako zdroj s kladným nebo záporným výstupním napětím a proudem nebo jako spotřebič, který je schopný absorbovat vnější energii do hodnoty naprogramovaného proudu a přípustného napětí na svorkách.

Při programování zdroje je významným pojmem rychlost programování. Je to doba potřebná k dosažení žádané hodnoty s definovanou tolerancí na výstupu zdroje při definovaných parametrech zátěže a dané změně hodnoty. U zdroje TESLA BS575 je rychlost programování definovaná takto:

Rychlost programování:

doba potřebná k tomu, aby při odporové zátěži dosáhlo výstupní napětí nebo proud 99 % programované hodnoty nebo se od této lišilo o méně než ± 5 mV, resp. $\pm 0,5$ mA: $< 150 \mu\text{s}$, k tomu přistupuje doba potřebná pro přenos 7 bajtů po sběrnici IMS-2. [10], strana 6

Podrobnosti ohledně rychlosti programování a dynamických vlastností přechodového děje při změně žádané hodnoty se uživatel dozví na stranách 28 až 31 návodu. [10]

Zdroj informuje řídicí jednotku měřicího systému pomocí jednovodičové zprávy NRFD o uplynutí doby $150 \mu\text{s}$, tedy o dosažení žádané hodnoty. U tohoto zdroje tedy nemá na dobu dosažení naprogramované hodnoty vliv, zda napětí roste, nebo klesá. Doba, po které je zaručena žádaná hodnota s danou tolerancí, se však prodlouží při změně polarity z $< 150 \mu\text{s}$ na dvojnásobnou. [10]

Programování zdroje Agilent E3631A

U zdroje Agilent E3631A je rychlost programování žádaného napětí definována rovněž do dosažení 99 % programované hodnoty. Časy jsou však proměnné v závislosti na velikosti odporové zátěže a na tom, zda napětí roste, nebo klesá. Pro plnou zátěž při rostoucím napětí je tato doba < 50 ms a při klesajícím napětí je to < 45 ms. Pokud je zdroj napětí naprázdno, pak je doba pro rostoucí napětí < 20 ms a pro klesající napětí < 400 ms. Zdroj umožňuje si ověřit dosažení naprogramované hodnoty měřením. Doba potřebná pro toto ověření je < 100 ms. [6]

Programování zdroje Siglent SPD3303X-E

Zdroj Siglent SPD3303X-E nemá rozhraní GPIB, ale umožňuje programování přes USB port a umožňuje komunikaci i přes Ethernet. Tento zdroj bohužel nemá definovanou dobu programování. [7]

Zdroje Tektronix

Poslední zde zmiňovaný zdroj s digitálním ovládáním Tektronix PWS2323 vůbec neumožňuje externí programování výstupní hodnoty a je jej možné ovládat pouze z čelního panelu. Funkce dálkového programování je u zdroje Tektronix PWS4343, který je vybaven portem USB. [8, 9]

Vnější ovládání zdroje ZPA Košíře AUL210

Možnost analogového ovládání nabízí zdroj ZPA Košíře AUL210, což už bylo popsáno v 6. odstavci sekce 3.1. Tento zdroj je tedy možné dálkově ovládat např. pomocí potenciometrů. Pro pomalé děje je možné zdroj ovládat z generátoru funkcí nebo z nízkovýkonového D/A převodníku. Při tomto použití je však nutné pamatovat na galvanické spojení zdroje s řídicími obvody! Výhodou tohoto způsobu může být oproti digitálnímu programování v některých případech jednodušší systém ovládání a možnost použití např. pro výkonové zesílení při regulaci v laboratoři. Je možné dosáhnout synchronní volby výstupního napětí bez nákladného vybavení pro programování zdrojů pomocí sběrnice GPIB/IMS-2. [5]

Porovnání možností programování zdrojů

Z toho je patrné, že zdroj Agilent E3631A je o několik řádů pomalejší než programovatelný zdroj TESLA BS575. Zde se projevuje velká kapacita kondenzátoru na výstupu zdroje Agilent E3631A, který je při odpojené zátěži vybíjen pouze vnitřním vybíjecím rezistorem. Ten spolu s velkou kapacitou kondenzátoru představuje velkou časovou konstantu. Dalším omezujícím vlivem je zpoždění vzniklé při změně napětí přes úroveň přepínání odbočky transformátoru, které je ovlivněno kmitočtem síťového napětí a jeho okamžitou fází. Naopak výhodou čtyř pracovních kvadrantů zdroje TESLA BS575 zajišťuje srovnatelný čas pro rostoucí i klesající průběh výstupního napětí a nezávislost na zatěžovacím odporu. Zdroj pro snížení ztrát na koncovém stupni nevyužívá přepínání odboček transformátoru, ale má spojitě regulovatelné pulzní měniče, jejichž změna napětí není závislá na průběhu síťového napětí. Pro dosažení rychlé změny výstupního napětí jsou pulzní měniče vybaveny zálohovými tranzistory, které umožňují rychlé změny napětí na výstupu měniče. Tento zdroj je výrazně optimalizován pro dynamiku programování. U zdroje Siglent SPD3303X-E není rychlost programování definována. Nutno ale říci, že čtyřkvadrantový zdroj s velkou rychlostí programování a uspokojivými dynamickými vlastnostmi je značně složitější zařízení. Takový zdroj pak nemůže být zcela optimalizován pro parametry zdroje v režimu konstantního napětí.

3.9.2 Chlazení

U některých zdrojů je v dokumentaci přímo uvedeno, že je pro chlazení použit ventilátor. Jeho nevýhoda oproti pasivnímu chladiči je především možná hluchost, která při dlouhodobém běhu nemusí být příjemná. Pasivní chladiče jsou pro dostatečný odvod tepla často rozměrné a mohou být umísťovány vně přístroje. Při jejich použití je třeba dbát na dostatečný prostor okolo přístroje pro jeho přirozené chlazení.

3.10 Ostatní údaje a zhodnocení

Zdroj Agilent E3631A

Zdroj Agilent E3631A patří k velmi kvalitním a komfortním laboratorním zdrojům vhodným do laboratoří pro přesné měření nebo pro použití v automatizovaném měřicím systému, kde nejsou velké nároky na dynamiku změny výstupního napětí a kde postačí výstupní proud do 1 A. Jeho uživatelská příručka a servisní příručka jsou přímo vzorovou dokumentací k laboratorní technice.

Zdroje TESLA

Kvalitativně srovnatelné jsou s ním zdroje TESLA BS575 a TESLA BS554, jak z hlediska technické úrovně, tak z pohledu technické dokumentace. Pro účely programování převyšuje většina výhod u zdroje TESLA BS575. Pro vývoj a servis elektroniky s nízkou spotřebou považuji za velmi povedený zdroj TESLA BS554, který i přes jeho značné stáří dosahuje stále velké spolehlivosti, stálosti definovaných vlastností a stability i při pulzních odběrech s minimální výstupní kapacitou, která zajišťuje možnost rychlé ochrany spotřebiče při poruše. Pro tento účel je vhodný typ měření. Vzhledem k jeho rozměrům je však škoda, že je vybaven pouze jedním ručičkovým měřidlem, které je nutné přepínat. Bohužel u tohoto zdroje nebyla šťastná volba průměru zdírek pro banánky, neboť pro dnes nejpoužívanější banánky v laboratořích o průměru 4 mm je nutné použití redukce.

Zdroj ZPA Košíře AUL210

Většinu potřebných informací jsem se dočetl i v dokumentaci ke zdroji Radiotechnika RSZ30P. Z hlediska servisní dokumentace vyhověl i zdroj ZPA Košíře AUL210. Zdroje Radiotechnika RSZ30P a ZPA Košíře AUL210 jsou vybaveny i pomocnými zdroji pro symetrické napájení obvodů např. se zesilovači a zdrojem 5 V pro napájení číslicových obvodů, což je činí velmi univerzálními zdroji vhodnými na pracoviště, kde nejsou k dispozici další laboratorní zdroje. Zdroji ZPA Košíře AUL210 však velmi ubírá na užité hodnotě nespojitě nastavování napětí a proudu.

Zdroj Tektronix PWS2323

Zdroj Tektronix PWS2323 má v dokumentaci uvedenu většinu potřebných informací, ale způsob zadávání žádané hodnoty mu z mého pohledu velice snižuje užitnou hodnotu.

Zdroj Siglent SPD3303X-E

Zdroj Siglent SPD3303X-E je naopak vybaven množstvím funkcí, ale postrádám jejich přesné definování v dokumentaci. I přesto má zdroj v dokumentaci uvedenou většinu údajů zde porovnávaných. Kvalitativně na mě však tento zdroj působí spíš jako nižší třída.

Zdroj Statron 2223.0

Zdroj Statron 2223.0 jsem kvůli neúplné dokumentaci nebyl schopen objektivně srovnat s ostatními zdroji. Ze zkušeností však tento zdroj považuji za vhodný napaječ pro pomocné obvody nebo jako zdroj pro nenáročného uživatele.

Zdroj Diametral P130R51D

Podobně bych i zdroj Diametral P130R51D využíval spíše na napájení výkonových částí zařízení, které nekladou na zdroj příliš vysoké nároky na kvalitu. Výhodou u tohoto zdroje mohou být výstupní relé, které bezpečně odpojí výstupní zdířky od zdroje. Naopak tato relé po čase používání výrazně zhoršují stabilitu napětí a mohou být příčinou problémů. Tento zdroj spolu se zdrojem UNI-T UTP3705 mají zcela nedostatečnou dokumentaci, což oběma zdrojům v tomto porovnání velmi ubírá na hodnocení.

Zdroj UNI-T UTP3705

U zdroje UNI-T UTP3705 navíc nebylo vůbec zřejmé, co uvedené údaje znamenají a co si pod tím má uživatel představit. Nevyužívání horních indexů spolu se zápisem bezrozměrného čísla v exponenciálním tvaru je jedna z nejhorších možností, které se mohl UNI-T při sazbě návodu dopustit. Z obsahové stránky není co popisovat, neboť z návodu jsem se toho moc nedozvěděl. Několikanásobné přečtení celého návodu vedlo spíš k domněnkám, než ke spolehlivému informování o daném zdroji.

Zdroj MASTECH HY3005D

S obsahově lepší dokumentací je zdroj MASTECH HY3005D. Zde jsem měl především problém se ujistit, zda držím v ruce opravdu návod od tohoto zdroje, neboť na jeho titulní straně tomu kromě náčrtku čelních panelů zdrojů tohoto výrobce nic nenasvědčovalo. O to více mě znejistilo, když stejné vnější provedení zdroje je i u zdrojů s jiným logem výrobce. Nakonec jsem si dovolil tento návod považovat za ten správný podle razítka přiloženého schématu zapojení. Nejsem si tedy schopen přečíst většinu popisků v razítku, neboť neumím čínsky. V razítku je ale i logo výrobce MASTECH a nápis HY3010, což by měl být jeden ze zdrojů, pro něž je tento

návod společný spolu se zdrojem HY3005D stejného výrobce. Když se odprostím od dokumentace k tomuto zdroji, tak bych ho zařadil rovněž ke zdrojům pro pomocné napájení výkonových obvodů.

4 KONCEPCE VLASTNÍHO NAVRHOVANÉHO ZDROJE

4.1 Požadavky na laboratorní zdroj

Mou snahou je navrhnout stejnosměrný stabilizovaný laboratorní zdroj, který umožní napájení základních částí elektronických přístrojů při jejich vývoji, kdy ještě nejsou realizované jednoúčelové zdroje optimalizované pro napájení daného zařízení. Dále by zdroj měl být využíván pro napájení laboratorní nebo servisní techniky, která nemá vlastní napájecí zdroj umožňující napájení z rozvodné sítě. Tím může být např. univerzální rychlonabíječka, chladicí tunel s ventilátorem, programátor nebo nejrůznější druhy komunikačních převodníků.

4.2 Základní popis jednotlivých bloků zdroje

Z toho plyne požadavek na více samostatných zdrojů s různými vlastnostmi, které budou galvanicky oddělené od rozvodné sítě i vzájemně mezi sebou. Blokové schéma s naznačenou vazbou mezi galvanicky oddělenými bloky zdroje je na obrázku 4.1. Napáječ napájí jednotlivé bloky zdroje střídavým proudem. Transformátor uvnitř napáječe zajišťuje, že všechny jeho výstupy jsou vzájemně galvanicky oddělené a jsou plovoucí i vůči síťovému napětí.

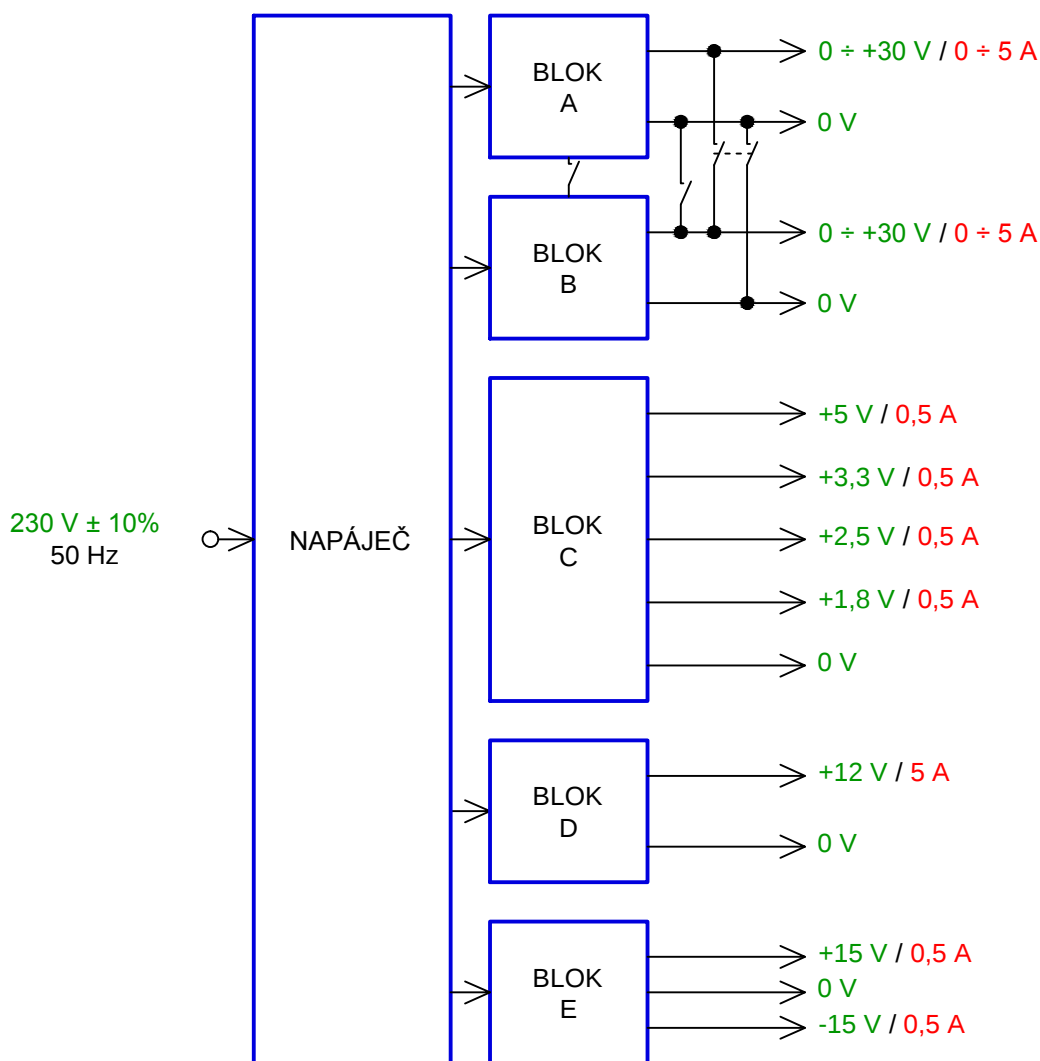
4.2.1 Regulovatelné bloky A a B

Pro univerzální použití navrhuji dva nezávislé regulovatelné zdroje s jmenovitým výstupním napětím v rozsahu $0 \div 30 \text{ V}$ a nastavitelným proudovým omezením se jmenovitým zatěžovacím proudem v rozsahu $0 \div 5 \text{ A}$. Tyto zdroje by měly umožňovat jejich vzájemné sériové nebo paralelní spojení včetně spojení jejich regulátorů. To by mělo zajišťovat rovnoměrné zatěžování jednotlivých výkonových bloků v paralelním spojení. U sériového spojení by to mělo umožnit symetrické napájení zátěže s vyvedeným středem. To je výhodné např. pro napájení výkonových částí zařízení, protože spojení zdrojů umožňuje dodávání trvalého výkonu až 300 W .

4.2.2 Blok C pro napájení logických obvodů

Při vývoji řídicích částí přístrojů jsou často potřeba zdroje pevného napětí pro logické obvody s různými napěťovými úrovněmi. Pro obvody kompatibilní s TTL by měl zdroj mít výstup s pevným jmenovitým napětím 5 V . V dnešní době však toto

napětí není dostatečné pro napájení mikrokontrolérů, hradlových polí ani pro většinu jejich periferních obvodů. Proto by měl zdroj nabídnout pevná napětí 3,3 V, 2,5 V a 1,8 V. Všechny tyto zdroje budou mít společný záporný pól, aby nebylo nutné je spojovat uživatelem. Jejich maximální zatěžovací proud jsem zvolil 0,5 A, a to pro každý samostatný výstup. Tento proud byl zvolen jako kompromis mezi více aspekty.



Obr. 4.1: Blokové schéma vazeb výstupních bloků laboratorního zdroje

Tyto zdroje nenabídnou možnost volby hodnoty mezního proudu, čili při malém maximálním proudu I_K ochrání větší rozsah součástek. Proud I těmito zdroji bude indikován panelovým magnetoelektrickým měřicím přístrojem bez možnosti změny rozsahu proudu. Pokud by byl velký maximální proud, nebyly by dostatečně přesně měřeny malé proudy. Dimenzování na velký proud také přináší větší požadavky na výkonové dimenzování těchto zdrojů. To ale s sebou nese větší rozměry a hmotnost,

což není žádoucí. Při napájení obvodů velkým proudem a malým napětím dochází ke stejné absolutní chybě napětí vzniklé úbytkem napětí na vodičích. Pro malé výstupní napětí je ale velká relativní chyba napětí. V tomto zdroji není plánováno vyvedení zpětných vazeb ze zdroje ven, které umožňuje čtyřvodičové připojení zátěže s vyregulováním úbytku napětí na vedení. Naopak malé proudy neumožňují napájení rozsáhlejších obvodů nebo např. grafických barevných displejů.

4.2.3 Blok D pro napájení 12 V techniky

Dalším velmi často využívaným napětím je 12 V. Je používáno pro množství spotřebičů, které jsou uzpůsobeny pro napájení z palubního napětí v automobilech. Je vhodné pro napájení ventilátorů nebo pro zařízení, která by měla být napájena bezpečným napětím. S ohledem na nejčastější zátěže byl zvolen maximální proud 5 A. Při požadavku na větší proud si uživatel může tento blok přímo spojit s jedním nebo oběma regulovatelnými zdroji paralelně. Případné drobné rozdíly napětí mezi zdroji jim neuškodí, nebude ale zajištěno jejich rovnoměrné zatížení. Při nedostatečném maximálním napětí sériového spojení regulovatelných zdrojů je možno s nimi sériově spojit i tento blok bez omezení rozsahu proudu.

4.2.4 Blok E pro symetrické napájení analogových obvodů

Podobně jako je blok C uzpůsoben pro napájení logických obvodů, blok E umožňuje napájení analogových obvodů symetrickým napětím ± 15 V. Oba tyto výstupy mají společnou nulovou zdířku. Zdroj je také plánován pro maximální proud 0,5 A. Pro větší proudy je možné využít sériového spojení bloků A a B.

4.3 Princip činnosti regulovatelných zdrojů

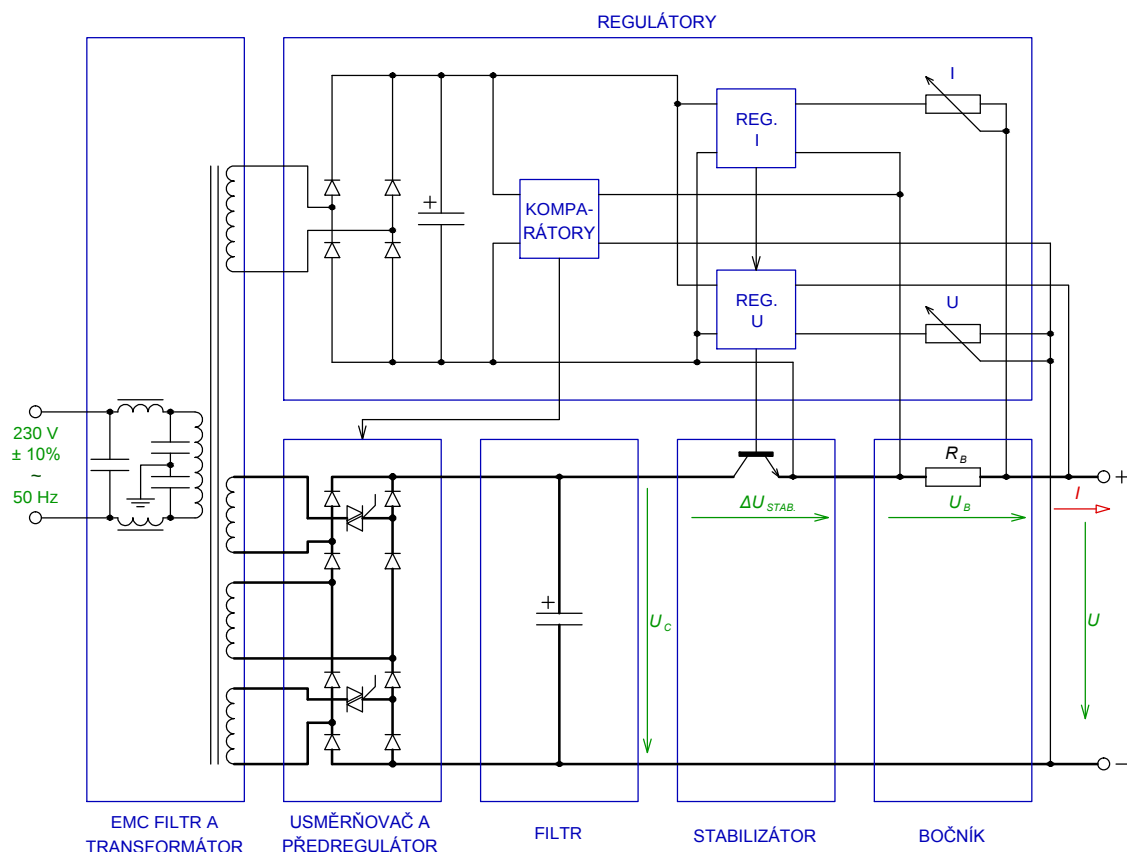
V laboratorním zdroji jsou dva principiálně stejné regulovatelné bloky, které jsou v normálním režimu galvanicky vzájemně oddělené a na sobě nezávislé. Schéma jednoho regulovatelného zdroje je na obrázku 4.2.

4.3.1 Výkonová část

Celý laboratorní zdroj je napájený z rozvodné sítě o jmenovitém napětí $230\text{ V} \pm 10\%$ a kmitočtu 50 Hz. Ve vstupní části zdroje je EMC filtr a společný transformátor s množstvím samostatných sekundárních vinutí, které zajišťují napájení jednotlivých bloků zdroje. Výkonová část regulovatelného zdroje je připojena ke 3 sekundárním vinutím. Ve zdroji je bezkontaktní čtyřstupňová předregulace napětí spínaná v nule.

Předregulátor spíná příslušné vinutí pomocí triaků tak, aby bylo napětí na filtru U_C dostatečně velké. V usměrňovači se sečtou napětí sepnutých vinutí, což zajistí potřebné napětí U_C na filtračním kondenzátoru. [29]

Toto zvlněné napětí je stabilizováno v závislosti na hodnotě zatěžovacího odporu R_Z a na přednastaveném napětí U_0 a proudu I_K , buď na konstantní výstupní napětí, nebo proud. Pro účel regulace proudu I a jeho případného měření je za regulačním tranzistorem zařazen bočník R_B , který převádí výstupní proud I na vyhodnocovací napětí U_B .



Obr. 4.2: Principiální schéma navrženého regulovatelného zdroje

4.3.2 Regulátory

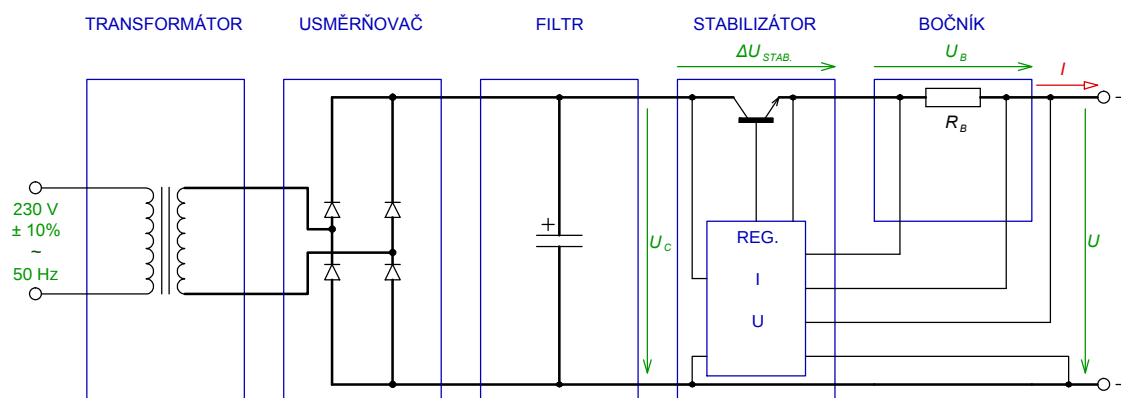
Ve zdroji se reguluje výstupní napětí U , výstupní proud I a úbytek napětí na regulačním tranzistoru ΔU_{STAB} . Regulátory výstupního napětí U a výstupního proudu I jsou spojitě a vždy je v činnosti pouze jeden, jak bylo vysvětleno v sekci režimy zdrojů 2.1 kapitoly laboratorní zdroje. Žádaná hodnota je tedy regulovatelná. Regulace úbytku napětí na regulačním tranzistoru ΔU_{STAB} není plynulá, ale skoková

a žádaná hodnota je konstantní. Vlivem skokové regulace tedy není dosaženo nulové regulační odchylky a na výstupním tranzistoru je tedy ve skutečnosti napětí regulováno pouze v pevně definovaných mezích.

Ze schématu na obrázku 4.2 je také patrné, že napětí na filtračním kondenzátoru U_C je proměnné, ale regulátory jsou napájeny ze samostatného vinutí, což zajišťuje napájení regulátoru konstantním napětím nezávisle na výstupním napětí zdroje U . Nulový potenciál napájecího napětí regulátorů je spojen s emitorem regulačního tranzistoru výkonové části. Na vzájemnou vazbu těchto dvou zdrojů lze tedy pohlízet tak, že napájecí zdroj regulátorů plave na výstupním napětí zdroje U a na úbytku napětí na bočníku U_B . Napájecí napětí regulátoru je tedy potenciálově nad výstupním napětím zdroje. [30]

4.4 Princip činnosti pevných zdrojů

Pevné zdroje konstantního napětí lze optimalizovat pro předem známou hodnotu výstupního napětí U_0 . I když se zdroj může nacházet v režimu konstantního proudu, a tedy s výstupním napětím $U < U_0$, tento stav se nepředpokládá jako trvalý a je v něm přípustná nízká účinnost zařízení. Přesto ale musí ve všech přípustných stavech být zdroj dostatečně dimenzován pro trvalé zatížení. Vzhledem k nižším výstupním výkonům pevných zdrojů nečiní velký problém tyto ztráty trvale uchladit i bez předregulace napětí. To výrazně zjednodušuje celý blok zdroje. [31]



Obr. 4.3: Principiální schéma navrhovaného pevného zdroje

V režimu regulace napětí se regulátor nastaví s ohledem na to, zda je žádaná hodnota napětí U_0 větší nebo menší než vnitřní referenční napětí. Za předpokladu, že je napětí na filtru U_C dostatečně velké pro napájení stabilizátorů, je možné toto

napětí využít zároveň i pro stabilizátor. Princip zapojení plánovaný v pevných zdrojích laboratorního zdroje je na obrázku 4.3. [4, 32]

Toto zapojení přímo odpovídá bloku D s pevným výstupním napětím $U_0 = 12\text{ V}$. Pro blok C je nutno zapojení doplnit o další 3 stabilizátory a bočníky. Blok E využije dvou těchto zdrojů spojených sériově. Aby bylo možno využívat dalších funkcí zdroje, je pro blok E nutno záporný zdroj sestavit symetricky převrácený, tedy s použitím PNP tranzistoru.

4.5 Další funkce laboratorního zdroje

Navrhovaný zdroj by měl dále nabídnout volbu typu zatěžovací charakteristiky u všech jeho bloků. V plánu je mít na všech výstupech zdrojů bezvýkonnostní odpojovače, jejichž vnitřní odpor bude zpětnovazebně kompenzován. U regulovatelných zdrojů by měly ampérmetry při vypnutých odpojovačích ukazovat přednastavenou hodnotu proudu namísto nulového výstupního proudu. Pro indikaci jsou u všech bloků navrženy vypínatelné akustické signalizace dosažení maximálního proudu.

5 PODROBNÝ POPIS ZDROJE

5.1 Popis laboratorního zdroje

Celý přístroj je složen z 5 galvanicky oddělených bloků zdroje, což je patrné ze sekce 4.2. Tyto bloky ale zahrnují množství prvků a pro jejich realizaci jsou dále děleny na jednotlivé moduly. Rozložení je voleno s ohledem na logické rozmístění souvisejících částí k sobě, zohlednění EMC, umístění prvků odvádějících velké množství tepla mimo řídicí elektroniku, a také podle rozměru jednotlivých komponentů. Elektrická schémata zdroje jsou dělena právě podle rozložení prvků na jednotlivé konstrukční moduly.

5.1.1 Celkové blokové schéma laboratorního zdroje

Navržené blokové schéma je v příloze A.1 na výkrese BLOKOVÉ SCHÉMA ZDROJE -BLS. Jednotlivé bloky schématu představují jednotlivé konstrukční celky zařízení. Síťové napětí je přivedeno na vstupní díl, přes který je napájen transformátor. Na levé straně od něj jsou rozkresleny regulovatelné zdroje, ovládací a indikační prvky a panelová měřidla. Na pravé straně výkresu je znázorněno zapojení pevných zdrojů napětí a ve spodní části je centrální řídicí člen.

Regulovatelný zdroj je sestaven z výkonového bloku, filtru, bočníku a regulátoru, přičemž filtr je pro blok A i B na společné desce plošného spoje. Filtry jsou však elektricky zcela samostatné galvanicky oddělené části s dostatečnou izolační pevností. Regulovatelný zdroj je ovládán z čelního panelu a jeho výstupní veličiny jsou zobrazovány na měřidlech umístěných též na předním panelu zdroje.

Pevné zdroje v pravé části se skládají rovněž tak z výkonového bloku, filtru, bočníku a regulátoru. U těchto zdrojů jsou ale společné nejenom filtry, ale i výkonový blok. Zdroje C a E mají ve výkonovém bloku pouze regulační tranzistory, blok D má i usměrňovač na chladiči společného výkonového bloku.

5.2 Vstupní díl

5.2.1 Blokové schéma vstupního dílu

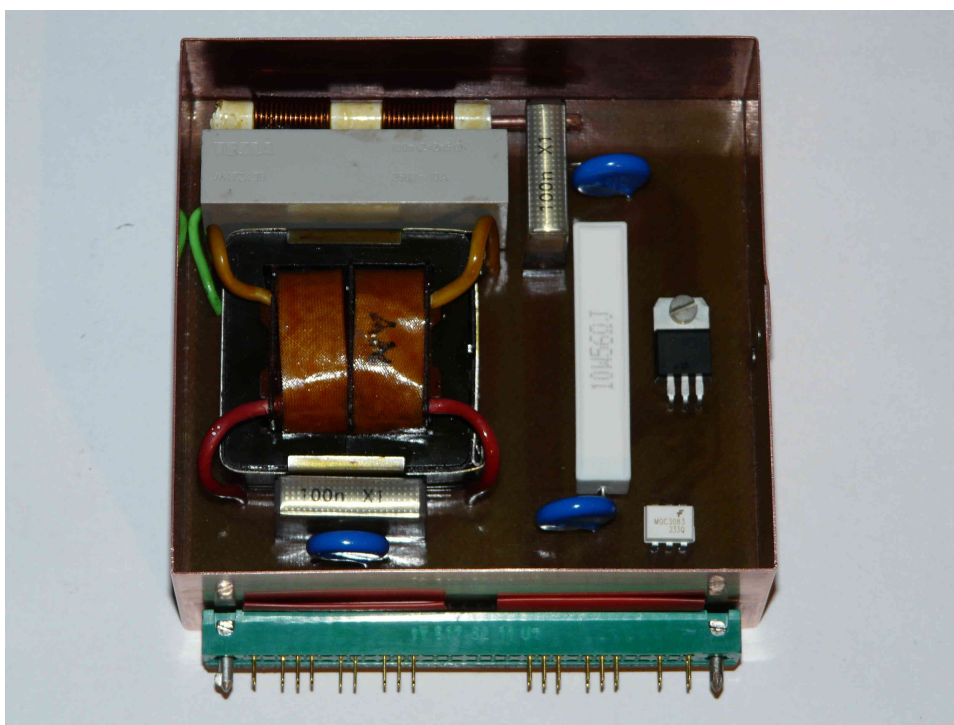
Vstupní díl je na blokovém schématu v příloze B.1. Jak je ze schématu patrné, síťové napětí je přes vypínač a pojistku vedeno na vstupní filtr jak pro symetrickou složku rušení, tak pro nesymetrickou složku, a to pro oba směry přenosu. Dále jsou v obvodu zařazeny prvky přepětové ochrany a startovací obvod umožňující měkký

start zdroje. Vstupní díl je na primární straně transformátoru. Jeho obvody jsou tedy přímo připojeny k síťovému napětí.

5.2.2 Popis zapojení vstupního dílu

Filtr pro protifázové rušení

Obvodové schéma zapojení vstupního dílu je v příloze B.2. Pro potlačení protifázového rušení jsou ve vstupním dílu primárně určeny kondenzátory C1, C7 a kapacita 100 nF kondenzátorového filtru C2. Částečně se na potlačení protifázového rušení podílí i filtrační tlumivky L1 a L2, které jsou sice navinuty pro proudovou kompenzaci pracovních proudů, ale pro vyšší kmitočty se uplatní i indukčnost jejich vodičů při filtraci symetrické složky.



Obr. 5.1: Vstupní díl - součástky

Filtr pro soufázové rušení

Útlum filtru pro soufázové rušení zajišťují LC filtry tvořené kondenzátory C5, C6, dvojicí kapacit 2, 5 nF kondenzátorového filtru C2 a tlumivkami s proudovou kompenzací L1 a L2. Tlumivka L2 je určena pro filtraci v kmitočtovém pásmu od 150 kHz do 500 kHz. Pro kmitočty v pásmu od 500 kHz do 30 MHz je připojena tlumivka L1. Pro vybití všech kondenzátorů ve filtru při odpojení od sítě slouží rezistor R1.

Měkký start zdroje

Pro měkký start zdroje je do série zařazen výkonový rezistor R4. Protože tento rezistor není navržen pro trvalé zatížení při plném výkonu zdroje, je po nabití kondenzátorů ve filtrech na sekundárních obvodech na definovanou mez tento rezistor přemostěn triakem T1. Galvanické oddělení ovládacího napětí triaku zajišťuje optotriak O1. Proti samovolnému sepnutí triaku T1 je na jeho bránu připojen rezistor R5. Odpor rezistoru R6 je volen dostatečně malý s ohledem na sepnutí triaku při malé okamžité hodnotě proudu rezistorem R4. Pro svedení rušivých proudů tekoucích ovládacími vodiči je připojen odpor R7.

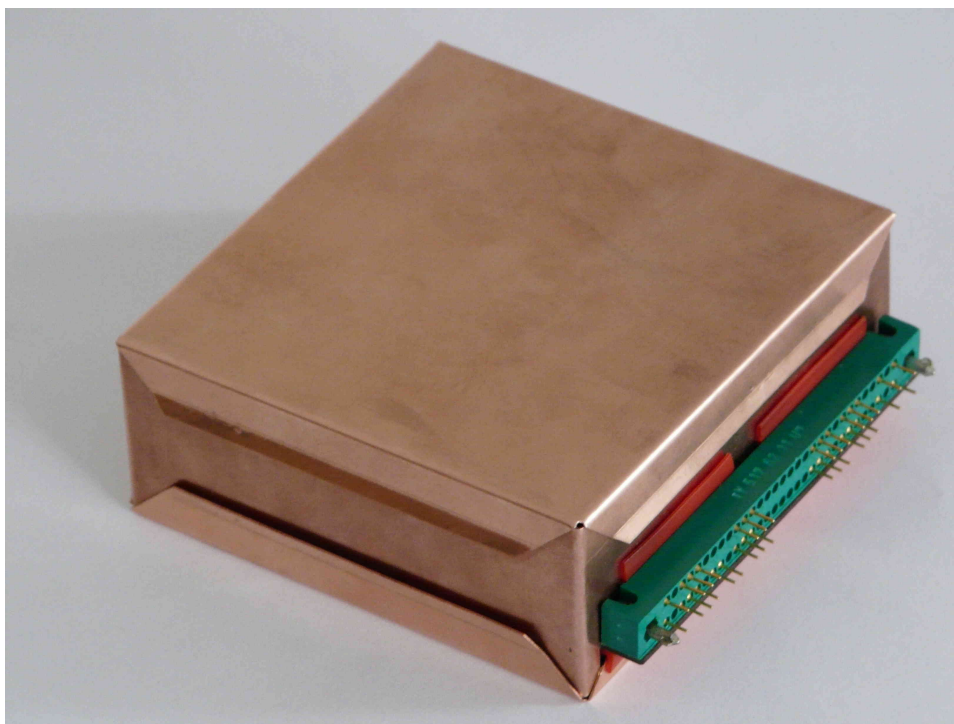
Prvky přepětové ochrany

Aby nebyly spínací prvky poškozeny nebo samovolně spínány přepětovými špičkami, jsou ve vstupním dílu doplněny prvky přepětové ochrany. Varistor R3 zachytává napětové špičky vzniklé při vypnutí transformátoru. Varistor R2 slouží k omezení napětí ze sítě pro triakový spínač. Místo varistoru R8 byla původně plánována bleskojistka pro omezení vysokoenergetických špiček. Pro správnou funkci kombinace bleskojistky a varistoru bylo nutné zvolit hodnoty prvků tak, aby varistor spínal při větších napětích, než bleskojista, neboť vzhledem k rychlosti spínání varistoru by nemusela bleskojista v žádném případě zapálit. Při testování různých napětových kombinací jednotlivých prvků se mi vždy podařilo vyvolat stav, kdy bleskojista stihla zapálit i při běžných přechodových dějích v síti vyvolané indukčními spotřebiči. To způsobilo spálení tavné pojistky na vstupu zdroje, což je při běžném provozu nežádoucí stav. Zvyšovat napětí na bleskojistce a současně s ním i napětí na varistorech už nebylo dále přípustné, neboť bych tím dostatečně neochránil triakový spínač ve vstupním dílu a obvody na sekundární straně transformátoru. Bleskojistka tedy byla vypuštěna a na její pozici byl osazen varistor s hodnotou o 25V vyšší, než je za LC filtrem. Protože ale varistor nespíná dokonale strmě, tak při omezování napětí varistorem R2 poteče část proudu i přes varistor R8.

5.2.3 Konstrukční řešení vstupního dílu

Všechny součástky vstupního dílu jsou soustředěny na desce plošného spoje, která je stíněná krabičkou z měděného plechu. Pro snadnější práci s filtrem, především během vývoje a testování, je krabička složena z pláště, který je sletován s deskou plošného spoje a dvěma odejímatelnými víčky. Jedno ze strany povrchových součástek a druhé ze strany plošných spojů, kde jsou osazeny SMD rezistory. Vývody jsou realizovány řadovým konektorem, pro který jsou v krabičce otvory. Pro snížení

vyzařování rušivého elektromagnetického pole otvorem na konektor jsou v jeho polovině vynechány piny, na místo kterých je protažen stínicí plech skrz DPS na druhou stranu, kde doléhá ke spodnímu víčku. Těleso konektoru je před stínícím krytem, aby bylo možno minimalizovat otvor ve stínění. Pro dodržení bezpečné izolační pevnosti mezi přívody k pinům a stínění krabičky jsou hrany krabičky v blízkosti pinů kryty izolací. Součástky jsou ve filtru rozmístěny s ohledem na minimální délku přívodů



Obr. 5.2: Vstupní díl - stínění

ke kondenzátorům a varistorům. Ideálním rozmístěním prvků by bylo v řadě za sebou směrem od sítě k zátěži. Pro instalaci vstupního dílu do laboratorního zdroje by však tento tvar nebyl vhodný, a proto jsou na jedné straně směrem od konektoru umístěny převážně filtry a vedle jde vedení zpět ke konektoru se startovacími obvody. Pro případné omezení elektromagnetické vazby mezi vstupem a výstupem filtru jsou prvky zarovnány tak, aby bylo možné mezi tyto větve vedení doplnit stínicí přepážku. Protože ale filtr ještě neprošel důkladným a dlouhodobějším testováním, tak zatím nebyla osazena. Přepážka by výrazně zhoršila přístup k jednotlivým součástkám. Po odladění nedostatků filtru a ověření jeho spolehlivosti je možné víčka zaletovat, pokud by to pomohlo k lepším stínícím schopnostem. Zatím jsem ale na filtru neprováděl žádné měření pro určení míry vyzařování a efektivity stínění, tak nejsem schopný posoudit, zda by toto opatření výrazně zlepšilo vlastnosti zařízení.

5.3 Výkonový blok A, B

5.3.1 Blokové schéma výkonového bloku A, B

Výkonový blok je konstrukční celek s triakovým spínačem vinutí, usměrňovačem, koncovým stupněm obsahujícím regulační tranzistory a obvody chlazení. Ty se skládají pouze z ventilátoru a snímače teploty chladiče. Pro správnou činnost výkonového bloku musí být připojen filtr a centrální řídicí člen zajišťující regulaci ventilátoru. Blokové schéma výkonového bloku je v příloze C.1 s názvem VÝKONOVÝ BLOK A, B -BLS.

Výkonový blok slouží k zajištění potřebného výstupního proudu, resp. napětí na výstupu zdroje. Vzhledem k velikosti rozsahu výstupního napětí a proudu je zde zajištěna bezkontaktní čtyřstupňová předregulace napětí spínaná v nule, která především snižuje napěťové úbytky na výkonových tranzistorech. Tím klesnou i ztrátové výkony tranzistorů a tedy i teplo, které je nutné z tranzistorů odvést za jednotku času. Vzhledem k tomu, že výkonový blok byl ze všech částí zdroje nejnáročnější na vývoj, realizoval jsem nejprve jeho prototyp a na základě poznatků získaných při práci s tímto blokem jsem navrhl výkonový blok použitý v tomto zdroji. Celý blok je vidět na obr. 5.3.

5.3.2 Triakové spínání v nule

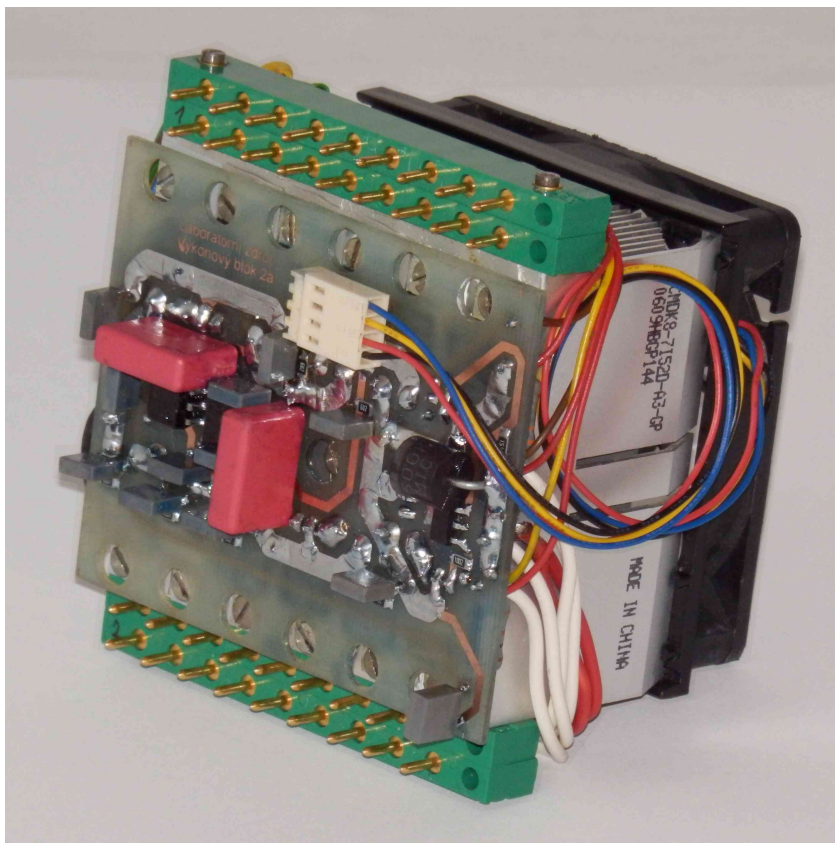
Způsob předregulace použitý ve výkonovém bloku tohoto zdroje spočívá v triakovém připínání vinutí transformátoru. Indukované napětí na připojených vinutích se v diodovém usměrňovači sčítají. Z tohoto usměrňovače je přímo napájen hlavní filtr.

Tento způsob předregulace není u laboratorních zdrojů běžný a nepodařilo se mi najít žádný nízkonapěťový zdroj využívající princip sériového usměrňovače pro sčítání napětí připojených vinutí. Proto jsem se pustil do vlastního vývoje bezkontaktního čtyřstupňového předregulátoru spínaného v nule.

5.3.3 Princip činnosti výkonového bloku

Výkonový blok zajišťuje 3 funkce nezávislé na sobě. Jedná se o předregulaci a usměrnění střídavých napětí přivedených z transformátoru. Toto usměrněné napětí je vyfiltrováno hlavním filtrem umístěným na zvláštní desce mimo výkonový blok. Dále je regulováno koncovým stupněm tohoto bloku. Vzhledem k velkým tepelným ztrátám za určitých podmínek je tento blok nutno aktivně chladit. K tomu slouží ventilátor a snímač teploty pro zajištění zpětné vazby řízení tohoto ventilátoru.

Tento výkonový blok neobsahuje řídicí regulační obvody, a proto je nutno pro plnou funkci tohoto výkonového bloku připojit tři řídicí obvody. Jeden musí dodávat



Obr. 5.3: Výkonový blok

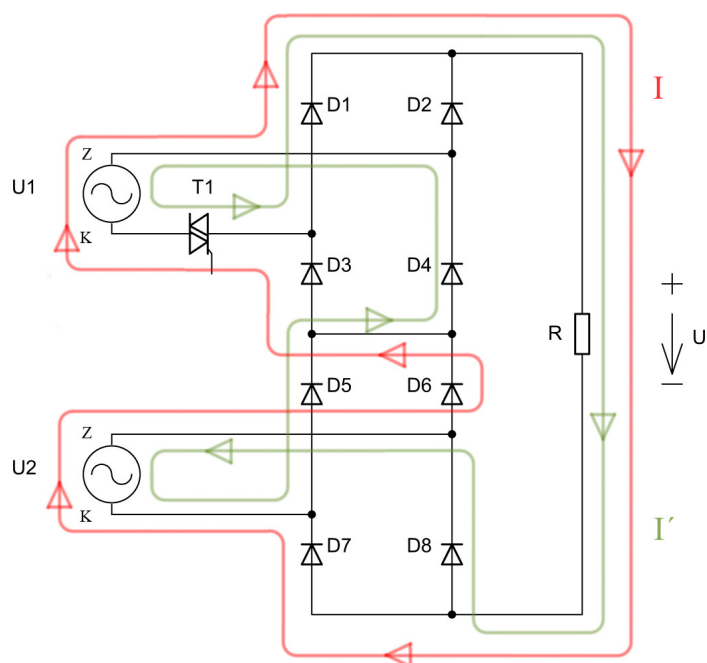
impulzy pro spínání jednotlivých triaků, druhý musí spojitě řídit otevření tranzistorů koncového stupně a třetí by měl zajišťovat řízení ventilátoru.

5.3.4 Předregulace a usměrnění

Prvotní myšlenka vyšla ze sériového spojení Graetzových můstků s odpojováním jednoho vinutí triakem spínaným v nule. Obdobný princip řízení výkonu se používal v některých lokomotivách. Tam byly ale oba tyto mosty řízené antiparalelní dvojicí tyristorů s fázovou regulací výkonu. Při pouhém spínání jednoho mostu v nule by se ztráty na výkonových tranzistorech v některých provozních režimech sice snížily, pořád by ale musely být dimenzovány na značný ztrátový výkon. Zároveň by ale ještě vzrostly ztráty na usměrňovacích diodách na dvojnásobek. [29]

Mou snahou tedy bylo nejprve zvýšit účinnost samotné předregulace a následně zvážit možnost, zda by zapojení neumožňovalo zvýšit počet napěťových stupňů. V zapojení podle obr. 5.4 s pomyslným sepnutým triakem T1 je vidět, že nelze vypustit prostřední spojovací vodič mezi diodami D3 a D4, resp. D5 a D6, protože by pak nemohl protékat proud z diody D5 do diody D4 a proud z diody D6 do diody

D3. Proud by pak byl nucen protékat přímo vždy z diody D5 do diody D3 a z diody D6 do diody D4. To by způsobilo, že by se napětí obou střídavých zdrojů nemohlo v můstku sčítat, a tak na jeho výstupu by byla přibližně absolutní hodnota většího napětí z U_1 nebo U_2 . Z obr. 5.4 je ale také zřejmé, že proud protéká vždy z diody D5 do diody D4 a vždy z diody D6 do diody D3. Nikdy neprotéká přímo (z diody D5 na diodu D3 a z diody D6 na diodu D4). Z toho plyne, že zaměněním vývodů katod diod D5 a D6 proudy potečou vždy přímo, a tudíž je možno vypustit spojující vodič pravé a levé strany schématu. Stejného výsledku docílíme, zaměníme-li začátek a konec jednoho vinutí z transformátoru. Na obr. 5.6 je naznačena záměna vodičů u zdroje U_2 .

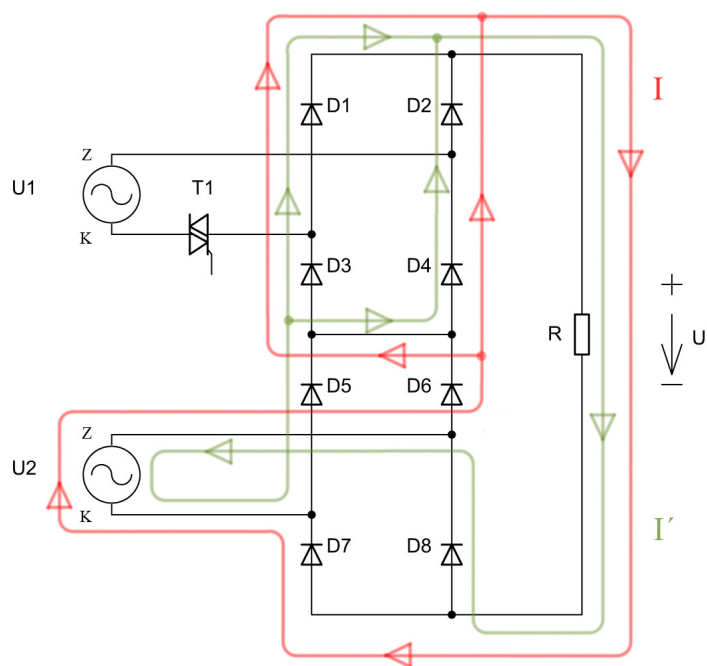


Obr. 5.4: Princip dvou můstků zapojených sériově se sepnutým triakem T1

Stejné zapojení jako na obr. 5.4 je vidět na obr. 5.5. Tentokrát ale budeme uvažovat rozepnutý triak T1. V takovém případě proud ze zdroje U_2 vedeme z diod D5 a D6 na horní můstek. Vzhledem k tomu, že v tomto můstku se nepřičítají žádná napětí, proud se rozdělí do větví sériově spojených diod D1 s D3 a D2 s D4 v poměru součtu odporů dvojic diod a jejich přírodních cest v daném případě (za předpokladu stejného prahového napětí obou diod). Po snížení napětí o úbytek na těchto diodách a cestách proud pokračuje do zátěže. Obvod se beze změny uzavírá přes diody D7 a D8 do zdroje U_2 . Po záměně začátků a konců vinutí U_2 se chování usměrňo-

vače nezmění od případu naznačeného na obr. 5.5. Proudů v takovém zapojení jsou naznačené na obr. 5.7.

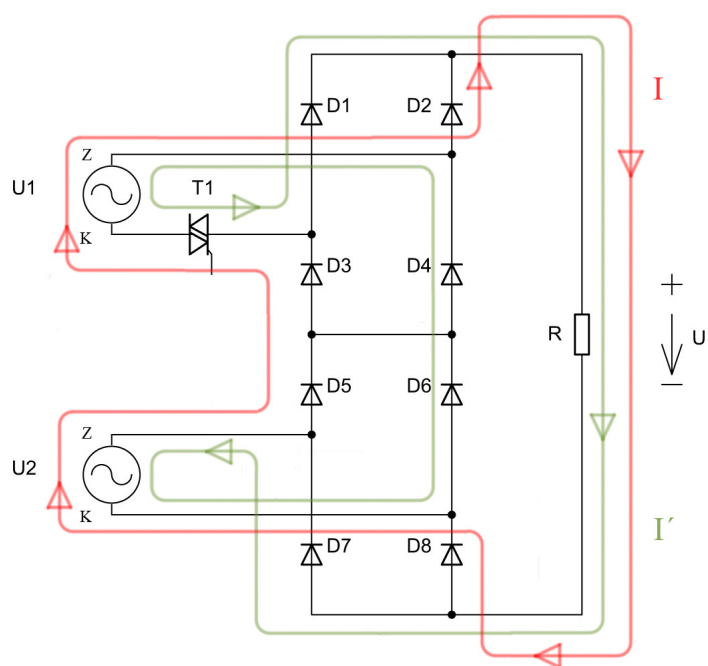
V případě vypuštění prostředního spoje pravé a levé strany usměrňovačů se v zapojení podle obr. 5.7 přeruší rozložení proudu mezi pravou a levou stranu horního mostu. Diodami tedy sice v jedné polovině periody vstupního sinusového proudu poteče přibližně dvojnásobný proud než v předchozím případě, toto zatížení však nebude ve druhé periodě proudu. Střední hodnota proudu každou diodou se výrazně nezmění.



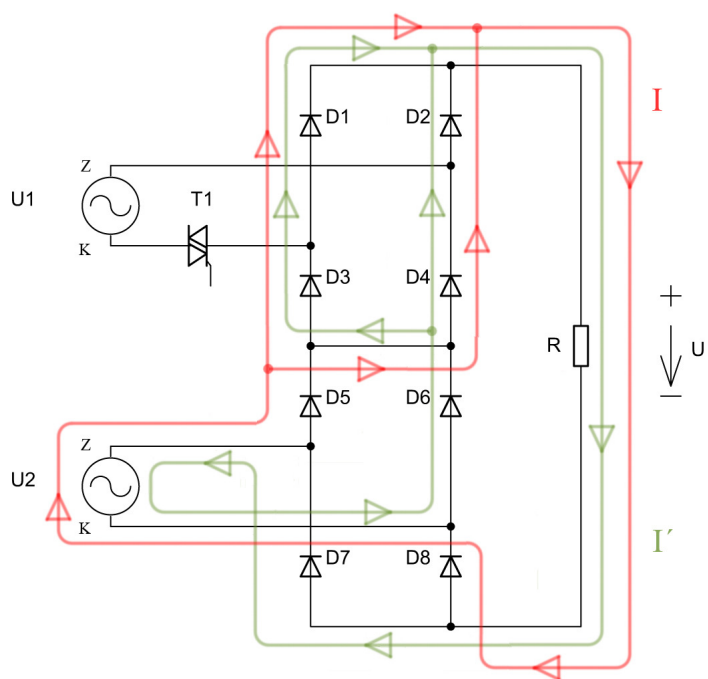
Obr. 5.5: Princip dvou můstků zapojených sériově s vypnutým triakem T1

Tím jsou za sebou pevně spojeny dvojice diod (D3 s D5 a D4 s D6). Pro snížení napěťových úbytků na diodách je možno dvojici diod vypustit. To je naznačeno na obr. 5.8 a obr. 5.9. Při sepnutém triaku T1 (5.8) jsou ztráty oproti reléovému přepínání zvýšeny pouze o úbytek napětí na jedné dvojici diod (D1 a D2) a úbytek napětí na triaku T1. Při rozepnutém triaku T1 (5.8) se usměrňovač chová jako běžný Graetzův můstek se zvýšeným úbytkem na jedné dvojici diod. Vinutí je ale připojováno v nule a bezkontaktně. Lze tedy od tohoto zapojení očekávat dlouhodobou spolehlivost. V tomto laboratorním zdroji by ale pouze dvoustupňová předregulace napětí omezovala maximální ztrátový výkon přibližně na necelých 100 W.

Další úpravou tohoto zapojení, kterou jsem navrhl, bylo zařadit triak i na přívod druhého vinutí z transformátoru. V případě, že jedno vinutí bude mít přibližně dvoj-



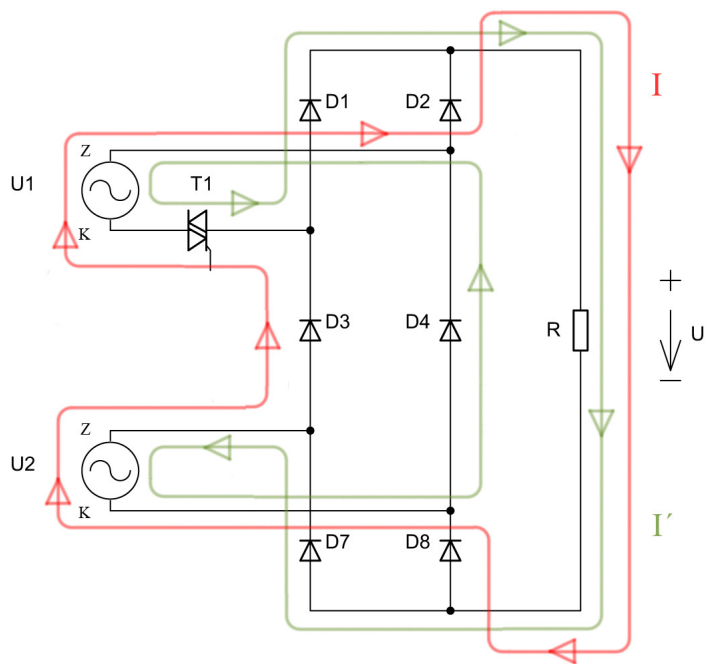
Obr. 5.6: Můstky se zaměněnými vývody vinutí a sepnutým triakem T1



Obr. 5.7: Můstky se zaměněnými vývody vinutí a rozepnutým triakem T1

násobné napětí, než druhé, záleží na tom, které vinutí se připojí jako samostatné do můstku. Například, pokud bude menší indukované napětí na prvním vinutí transformátoru U a na druhém vinutí bude napětí $2 \cdot U$, pak lze v takovém zapojení pomocí spínání triaků vyvolat hned 4 různé stavy:

1. První i druhé vinutí bude odpojeno. Na usměrňovač nebude přivedeno žádné napětí a na jeho výstupu tedy bude 0 V , neuvažují-li se nabitě kondenzátory filtru. Tato možnost je v tomto zapojení nežádoucí, a tak by nejspíš nebyla využita.
2. První vinutí bude připojené a druhé odpojené. Do usměrňovače je přivedeno pouze napětí U , na jeho výstupu pak bude usměrněné napětí U zmenšené především o ztráty na polovodičích.
3. První vinutí bude odpojené a druhé vinutí bude připojené. Do usměrňovače bude přivedeno pouze napětí $2U$, na výstupu tedy bude usměrněné napětí velikostí se blížící $2U$.
4. První i druhé vinutí bude připojeno. Do usměrňovače tedy vstupují dvě napětí, U a $2U$, které se sečtou a na výstupu bude přibližně $3U$.

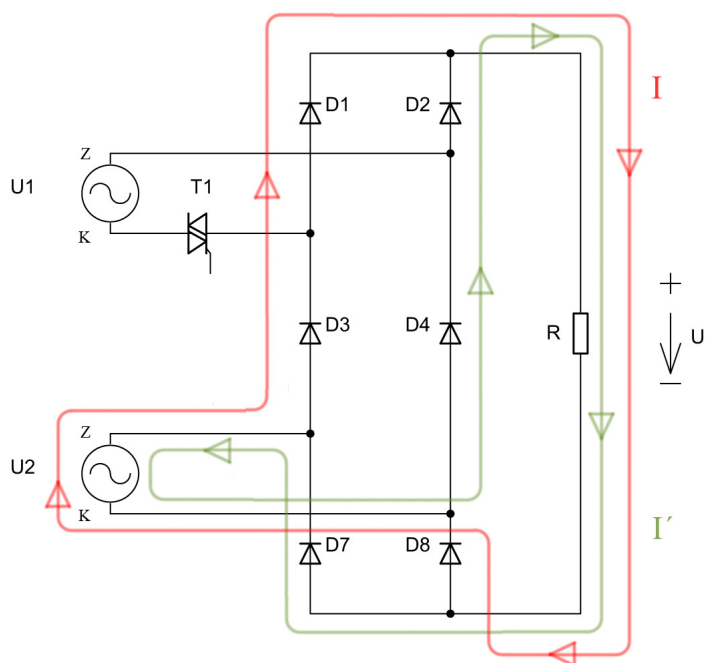


Obr. 5.8: Můstky s vynechanými diodami a sepnutým triakem T1

Aby bylo možné využívat všechny režimy pro napájení koncového stupně, navrhl jsem toto zapojení rozšířit ještě o jednu dvojici diod a třetí sekundární vinutí transformátoru, které je do usměrňovače připojeno přímo, a tudíž jej není možné

vypnout. Uvažujme pro toto vinutí indukované napětí o velikosti U . V takovém případě by se mělo napětí U ze třetího vinutí přičítat ke všem kombinacím uvedeným výše. V bezztrátovém usměrňovači tohoto typu by potom mělo platit, že výstupní napětí bude mít velikost U (1. stav), $2U$ (2. stav), $3U$ (3. stav) nebo $4U$ (4. stav) v závislosti na sepnutí triaků.

Pro odzkoušení celého zapojení jsem postavil prototyp výkonového bloku včetně koncového stupně. Měl sloužit pro vývoj výkonového bloku do tohoto zdroje. Pro snadné připojení měřicích šňůr a sond byl plošný spoj navržen tak, aby součástky měly větší rozestupy a byly přístupné všechny body schématu. Aby bylo možno prototyp výkonového bloku i zatěžovat větším proudem, byl navržen do podlouhlého tvaru, aby jej bylo možno zasunout do chladicího tunelu, který jsem už měl vyrobený dříve.



Obr. 5.9: Můstky s vynechanými diodami a rozepnutým triakem T1

Princip výsledného zapojení je znázorněn na obrázku 5.10. Napětí na kondenzátoru C v maximu jedné půlperiody sinusového signálu, pokud budeme odpor rezistoru R uvažovat dostatečně velký, bude dáno přibližně vztahem:

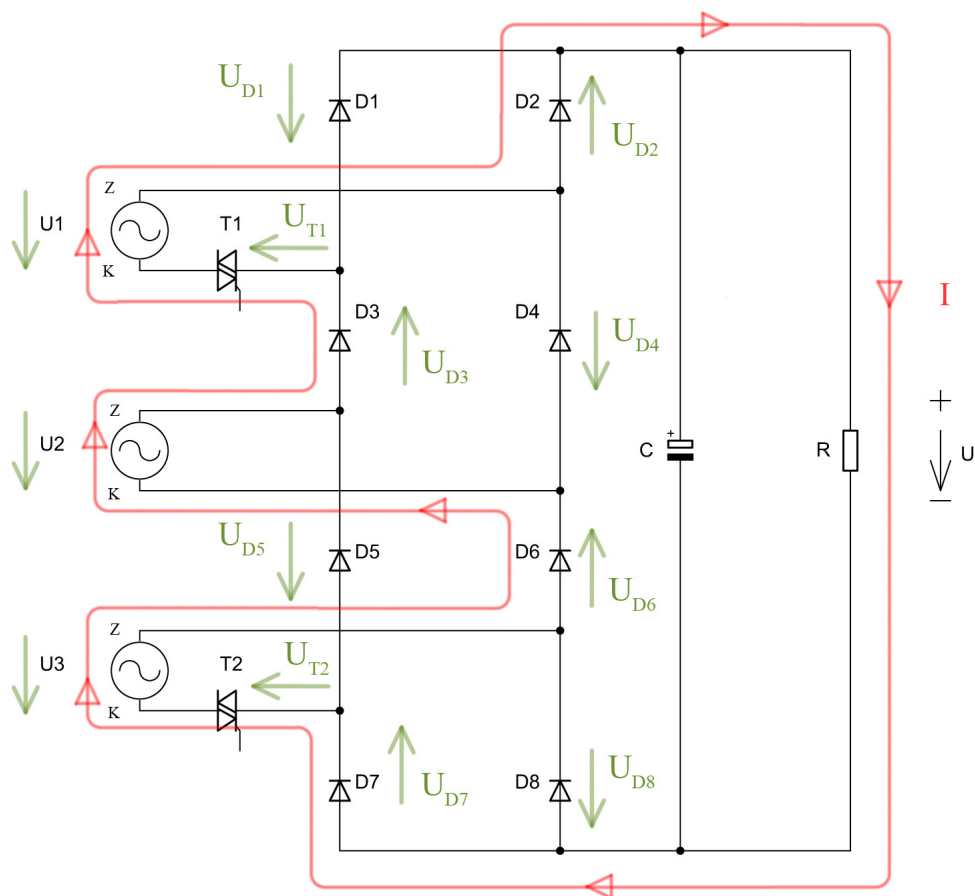
$$U = -U_{D2} + \sqrt{2} \cdot U_1 - U_{T1} - U_{D3} + \sqrt{2} \cdot U_2 - U_{D6} + \sqrt{2} \cdot U_3 - U_{T2} - U_{D7}$$

Za předpokladu, že jsou všechny diody a oba triaky stejné, lze vztah zjednodušit následovně:

$$U = \sqrt{2} \cdot U_1 + \sqrt{2} \cdot U_2 + \sqrt{2} \cdot U_3 - 2 \cdot U_T - 4 \cdot U_D$$

po úpravě:

$$U = \sqrt{2} \cdot (U_1 + U_2 + U_3) - 2 \cdot U_T - 4 \cdot U_D$$



Obr. 5.10: Princip použitého zapojení se sepnutými triaky

Obvodové schéma zapojení výkonového bloku je v příloze C.2 s názvem VÝKONOVÝ BLOK A,B -SCH. Aby ztráty na diodách tohoto usměrňovače nebyly o tolik větší oproti běžným typům, byly zde navrženy Schottkyho diody (\$D_1 \div D_8\$). Ty se vyznačují především nižším napětovým úbytkem v propustném směru, ale také nízkým závěrným průrazným napětím. Diody použité v usměrňovači tohoto výkonového bloku MBR1045 mají udávané závěrné napětí pouze 45 V. Na filtrech ale může být v krajním případě napětí přesahující 50 V. Z obrázku 5.10 je zřejmé, že za provozu by k překročení závěrného napětí nemělo dojít ani na diodách \$D_3\$ a \$D_4\$ (podle obrázku 5.10), které jsou vystavené největšímu závěrnému napětí, uvažujeme-li zdroj s nejvyšším napětím \$U_1\$. Po vypnutí zdroje se ale situace výrazně změní. Na vinutích

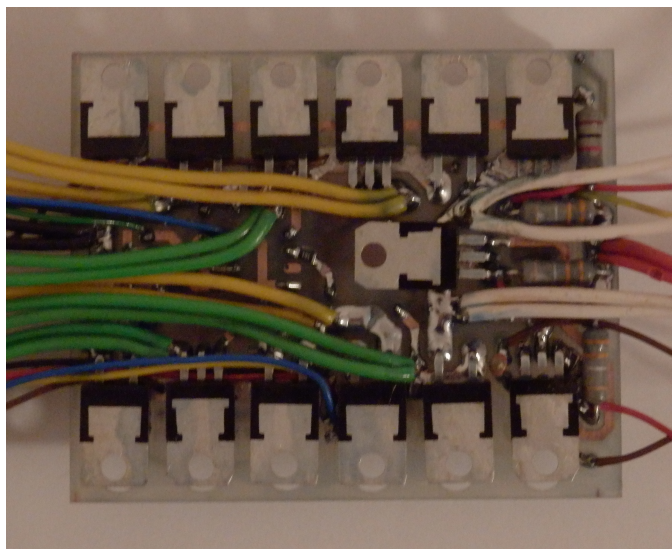
transformátoru se přestanou indukovat napětí a sériové kombinace diod jsou vystaveny v závěrném směru plnému napětí na filtrech. Odpor diod v závěrném směru ale není definován, proto jsou ve výkonovém bloku paralelně zařazené rezistory R1 ÷ R8 zajišťující rovnoměrné rozložení napětí na všech diodách. Tyto rezistory jsou zároveň svými odpory navrženy tak, aby po vypnutí zdroje zajistily postupné vybíjení hlavního filtru. Další ochranu proti průrazu diod v závěrném směru zajišťují kondenzátory C1 ÷ C8 přemostující každou diodu. Zachytávají nepříznivé špičky z napájecího napětí. Tyto rušivé impulzy bývají velmi časově krátké, a tak se blokovací kondenzátory nestihnou nabít na vysoké napětí. Dále by měly sloužit k omezení rušení spínání diod. Schottkyho diody totiž mají rychlý přechod mezi propustným a závěrným směrem.

Spínání hlavních triaků T1 a T2 zajišťují ve zdroji optotriaky OK1 a OK2. Z důvodu nízkých spínaných napětí zde nebylo možno uplatnit běžné spojení triaku a optotriaku, protože by obvod nespínal v nule, ale až při napětí přesahující 2 V, což by při přepínání předregulace na vyšší hodnotu způsobovalo velkou strmost napětí a velký proudový náraz a tím i zapříčiněné rušení. Ve spínacím obvodu hlavního tyristoru je tedy zařazen kondenzátor (C13 a C14), který udržuje energii z předchozí půlplyny sinusovky. Při prvním spuštění, když je kondenzátor vybitý, se po sepnutí optotriaku hlavní triak nesepe, protože proudový impuls je pro řídicí elektrodu opačný, kdy je jeho velikost nedostatečná. Přes řídicí elektrodu ale proud přesto proteče a nabije kondenzátor na polaritu potřebnou pro sepnutí v následující půlplyně. V dalších periodách už nabitý kondenzátor na potřebnou polaritu sepe triak v případě vhodně načasovaného řídicího impulsu do optotriaku už při napětí menším než 1 V. To výrazně snižuje proudový náraz při prvním nabíjení kondenzátoru na vyšší napětí. Pro další periody už tato hrana náběhu sinusovky nemá vliv, protože se diody otevírají při napětí výrazně větším.

5.3.5 Koncový stupeň

Koncový stupeň se skládá z výkonových tranzistorů Q1 ÷ Q3, emitorových rezistorů R14 ÷ R16 zajišťujících rovnoměrné rozložení proudů tranzistorů a tranzistoru Q4 budícího skupinu výkonových tranzistorů. Dále je zde dioda D9 chránící koncové tranzistory proti proražení napětím mezi emitorem a kolektorem (v závěrně polarizovaném směru) v případě, že bude na výstupu připojený zdroj napětí a vybije se hlavní filtr. Typickým příkladem tohoto stavu je výpadek elektrické energie při nabíjení akumulátoru. Dále je jeho součástí rezistor R9 tvořící primární zátěž výstupu laboratorního zdroje. Slouží pro vybití výstupního kondenzátoru při zavření koncových tranzistorů. Součástí zdroje není aktivní zátěž, a tak v případě připojení vnějšího kondenzátoru bude při snižování výstupního napětí vybíjen pouze tímto re-

zistorem. Zajišťuje tak možnost regulace nezatíženého zdroje. Dále zde jsou rezistory R12 a R13 zajišťující rychlé zavření tranzistorů.



Obr. 5.11: Pohled na plošný spoj výkonového bloku ze strany od chladiče

5.3.6 Chlazení

Na výkonovém bloku je připevněn ventilátor a všechny jeho vývody jsou přes čtyřpinový konektor K1 vyvedeny na hlavní konektor KY1. Dále je v chladiči zabudován teplotní senzor R17 PTC s linearizovanou charakteristikou v pracovní oblasti běžných teplot chladiče.

5.4 Regulátory A, B

5.4.1 Blokové schéma regulátoru A, B

Blokové schéma celého regulátoru je v příloze E.1 s názvem REGULÁTOR A,B-BLS. Regulátor této koncepce je ve vývoji a na prototypové úrovni mám realizované 3 obvodové varianty, u kterých právě vyhodnocuji, který bude z hlediska spolehlivosti, teplotní stability a minimalizace pro návrh finálního plošného spoje nejvhodnější. Vybrané řešení bude dále optimalizováno pro dosažení nejlepších výsledků a bude vyroben první prototyp finálního rozvržení součástek na desce plošného spoje, podobně jako tomu bylo u výkonových bloků A a B.

Doposud bylo testování spojování bloků prováděno na jednom výkonovém bloku osazeném v laboratorním zdroji a jako druhý sloužil první prototyp výkonového

bloku A, B. Tento první prototyp se však výrazně lišil od finální verze použité ve zdroji, a tak představoval velký problém při testování regulátoru. V laboratorním zdroji jsou tedy osazeny zatím první prototypy regulátoru, které jsou rozděleny na dvě části a jejich zapojení je rozkresleno na dvou samostatných výkresech.

Na blokové úrovni zde tedy popíši finální koncepci regulátoru A, B, neboť ta už je vzhledem ke stádiu vývoje pevně daná a nepředpokládám její další změnu. Na obvodové úrovni popíši části, které jsou současně osazeny v laboratorním zdroji a které budou vidět u obhajoby bakalářské práce.

Regulátor lze rozdělit na 3 hlavní části:

Napájecí část

Střídavé napětí z transformátoru je usměrněno, vyfiltrováno a stabilizováno. Ze stabilizátoru je napájen zdroj referenčního napětí a všechny další části regulátoru. Před stabilizátorem je vyvedena informace o vstupním napětí zdroje zohledňující úbytky na vodičích a transformátoru. Tato informace slouží k lineárnímu posunu přepínacích úrovní komparátorů pro předregulaci napětí. Přímo z vinutí transformátoru se vyhodnocuje okamžitá fáze vstupního napětí pro účel synchronizace spínání triaků v nule.

Komparátory

Komparátory určují, které triaky budou sepnuty pro dosažení potřebného napětí na filtru U_C . Po zapnutí zdroje, kdy ještě nejsou ustálená napájecí a referenční napětí v řídicích obvodech, musí být zajištěno blokování spínání triaků. V tuto chvíli se totiž nabíjí hlavní filtr zdroje na nejnižší stupeň a případné zvýšení napětí U_C je provedeno až se zpožděním v závislosti na napětí na emitoru regulačního tranzistoru. Po naběhnutí základních částí zdroje dojde k vyhodnocení napětí a k dekodování příslušné kombinace sepnutí triaků. V případě, že má být některý z triaků sepnutý, dojde po příchodu synchronizačního pulzu k sepnutí příslušných budičů optotriaků.

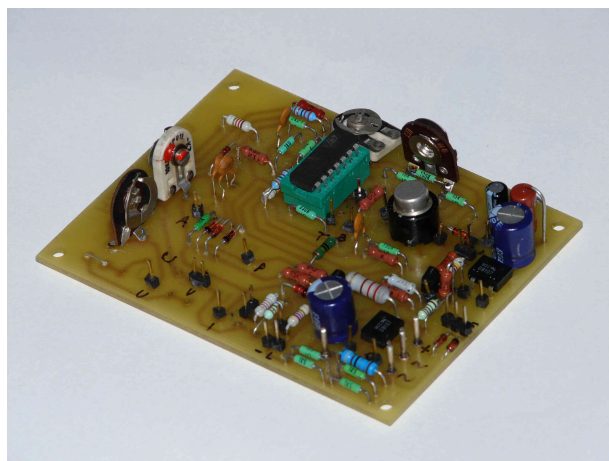
Spojité regulátory

Spojité regulátory jsou složeny z regulátoru napětí, který zároveň budí regulační tranzistory, a regulátoru proudu. Regulátor proudu je vždy nadřazen všem režimům zdroje a jeho činnost je ovlivněna pouze aripotem pro nastavení mezního proudu, volbou charakteristiky a vypnutím proudu I při rozpínání odpojovače, aby nedocházelo k natažení oblouku mezi kontakty relé. Aktivace proudového omezení je indikována signálem indikace omezení, který rozsvítí příslušnou LEDku na čelním panelu a případně centrální řídicí člen vydá akustický signál.

Regulátor napětí v normálním režimu reguluje výstupní napětí U podle nastavení aripotu na čelním panelu. V sériovém režimu spojení zdrojů je blokem přepínání režimu změněno zavazbení regulátoru napětí, což umožňuje regulovat výstupní napětí v závislosti na napětí kladného zdroje. Paralelní režim využije regulátor napětí k regulaci úbytku napětí na bočníku U_B podle proudu tekoucího z druhého zdroje. Všem těmto režimům je nadřazeno omezení z proudového regulátoru.

5.4.2 Popis zapojení regulátoru A, B

Regulační smyčka je napájena ze zvláštního vinutí transformátoru. Její nulový potenciál je přímo spojen s kladnou výstupní zdírkou laboratorního zdroje, a tedy celé regulační obvody pracují na vyšším napěťovém potenciálu oproti výstupnímu napětí. Zajišťuje regulaci napětí a výstupního proudu zdroje. Skládá se ze tří částí: napájecí, obvodu regulace napětí a obvodu regulace proudu. Zapojení regulátoru vychází z principu použitého ve zdroji TESLA BK180 [30]. Obvodové schéma zapojení prototypové desky regulátoru je v příloze E.2 s názvem REGULÁTOR A,B PROT -SCH.



Obr. 5.12: Pohled na plošný spoj prototypu regulátoru A, B

Napájecí část

Střídavé napětí 18 V je vedeno přes rezistor R1 na můstkový usměrňovač B1. Kondenzátor C1 tvoří filtr tohoto napětí. Rezistor R1 slouží pro zvýšení časové konstanty filtru s kondenzátorem C1 a zároveň snižuje proudový náraz po zapnutí zdroje při prvotním nabíjení kondenzátoru C1. V případě zkratu v obvodu regulátoru by tento rezistor posloužil i jako pojistka, neboť zkrat použitého vinutí transformátoru pro regulátor A, B by zřejmě nespálil pojistku v primárním vinutí transformátoru.

Z kondenzátoru C1 je napájena indikační LEDka LED1 proudového přetížení a stabilizátor se Zenerovou diodou V5 a rezistorem R2. Z tohoto stabilizovaného napětí je napájen obvod regulace napětí, obvod regulace proudu a komparátory umístěné na zvláštní desce plošného spoje.

Obvod regulace napětí

Napětí je regulováno integrovaným stabilizátorem IC1 LM723N. Ten obsahuje zdroj referenčního napětí, zesilovač odchylky, tranzistor proudového omezení, výstupní tranzistor a Zenerovu diodu pro posunutí napěťového potenciálu buzení koncového stupně. Regulátor pracuje s pevným referenčním napětím a potenciometr pro změnu výstupního napětí je zařazen ve zpětné vazbě. Souhlasné napětí vstupů operačního zesilovače je tedy v celém pracovním rozsahu regulace napětí konstantní, a zesílení souhlasného signálu tedy nemá na regulaci nastaveného regulátoru vliv. Odporovým trimrem R9 se nastavuje nulové výstupní napětí a trimr R15 slouží k nastavení maximální hodnoty napětí.

Potenciometry R33 a R34 na desce plošného spoje byly využity pouze při vývoji výkonových bloků. V současné době jsou z plošného spoje tyto potenciometry odletovány a z vývodu potenciometru R33 1A je vyveden vodič k čelnímu panelu na desetiotáčkový aripot o hodnotě 10 k Ω . Připojení aripotu R1 je zakresleno na schématu zapojení předního panelu v příloze **H.1** s názvem PŘEDNÍ PANEL - HLAVNÍ -SCH.

Kmitočtovou kompenzaci regulace napětí zajišťuje RC člen tvořený R4, C2 a C12 připojený na zvláštní vývod stabilizátoru.

Obvod regulace proudu

Pro snímání proudu je ve zdroji bočník převádějící výstupní proud na jeho napěťový úbytek. Ten je porovnáván s referenčním napětím a v případě jeho dosažení se zdroj přepne do režimu konstantního proudu. Výstup operačního zesilovače N2 je veden na tranzistor snižující napětí v obvodu IC1 a na tranzistor V10 spínací indikační LEDku LED1 proudového omezení. Odporovým trimrem R21 se nastavuje nulová hodnota proudu při předvolbě minimálního proudu a trimrem R23 je nastavena maximální hodnota proudu.

Pro potlačení zakmitávání celého regulátoru proudu je operační zesilovač N2 opatřen kondenzátorem C5 v přímé zpětné vazbě spolu se sériovým rezistorem R26. Při přechodu do proudového omezení tedy má obvod proporcionálně integrační charakter. Další část frekvenční kompenzace tvoří RC člen sestavený z C3 a R5 připojen na výstupu tohoto zesilovače N2 vedený do integrovaného stabilizátoru IC1.

Potenciometr R35 pro nastavení proudového omezení, stejně jako potenciometry pro nastavení výstupního napětí, není osazen a je z vývodu 1A vyveden vodič k desetitáčkovému aripotu o hodnotě $100\ \Omega$ umístěného na předním panelu. Protože použitý aripot má lineární závislost odporu na úhlu natočení a je na štítku čelního panelu cejchovaný, je na desce regulátoru odpojen vývod E odporového trimru R23.

Pro změnu typu zatěžovací charakteristiky z režimu proudového omezení na režim proudové pojistky jsou využity vývody JP16 a JP17, které jsou tlačítkem z čelního panelu přes diodu sepnuty a tvoří tak kladnou zpětnou vazbu. Při vypnutí elektronické pojistky je možná její opětovná aktivace rozpojením zpětné vazby uvolněním tlačítka. Aby se nevedl kladný vstup operačního zesilovače N2 k čelnímu panelu, je ve zpětné vazbě navržen místo spínače optron.

Za účelem indikace přednastavené hodnoty proudového omezení na ampérmetru při odpojení výstupního odpojovače, je z regulátoru proudu vyvedena přednastavená reference, se kterou je porovnáván úbytek na bočníku, a to na vývod JP11.

Ostatní prvky regulátoru A, B

Protože už v prvotním návrhu laboratorního zdroje jsem zamýšlel spojování regulovatelných bloků A a B paralelně nebo sériově včetně spojení regulátorů, je tento prototyp navržen jako nadřazený, který určuje výstupní napětí nebo proud. Spojení obou bloků bylo naznačeno na obrázku 4.1.

V paralelním spojení by tedy měl být stejně velký proud, který protéká bočníkem tohoto bloku, dodáván také z druhého, paralelně připojeného, bloku. Proto je na kontakt JP2 vyveden úbytek napětí bočníku. Aby v případě zkratování vývodu nedošlo současně ke zkratování bočníku, a tedy k vyřazení proudového regulátoru z činnosti, je výstupu předřazen rezistor R14, jehož hodnota odporu je řádově vyšší než hodnota odporu bočníku. Aby nedošlo k selhání regulace proudu při přivedení velkého záporného napětí na kontakt JP2 vůči kladné výstupní svorce, je zde připojena pro ochranu dioda D1.

V sériovém spojení je nadřazený blok potenciálově nad podřízeným blokem. Černá zdířka nadřazeného bloku je tedy přímo spojena s červenou zdířkou podřízeného bloku a pro informaci o napětí poslouží vyvedení kladného výstupu nadřazeného regulátoru do podřízeného. Napětí z kladné výstupní zdířky je vyvedeno na pin JP1 přes rezistory R180, R181, R190 a R191, které tvoří vstupní odpor sumačního zesilovače podřízeného regulátoru.

Ochrana vstupu stabilizátoru IC1 tvořená diodami V6, V7, V8 a rezistorem R6 byla zamýšlena pro využití při testování podřízeného regulátoru. Ten však nakonec nebyl testován na této desce plošného spoje. Dioda V8 však chrání vstup stabilizátoru IC1 proti připojenému velkému zápornému napětí k černé výstupní zdířce

oproti červené výstupní zdířce.

Ostatní nepopsané vývody z regulátoru nejsou ve zdroji připojeny a byly na plošném spoji vyvedeny pro případnou potřebu při vývoji.

5.4.3 Komparátory

Komparátory slouží pro nespojitou předregulaci napětí na hlavním filtru v závislosti na výstupním napětí zdroje. Převádí tedy výstupní analogové napětí na dvoubitové binární číslo. Při převodu zajišťují hysterezi předcházející zakmitávání spínání jednotlivých vinutí. Pro převod je zde zajištěna napěťová reference. Pro spínání triaků v nule je zde zajištěna fázová synchronizace se střídavým napětím transformátoru.

Obvodové schéma zapojení prototypové desky komparátorů je v příloze E.5 s názvem KOMPARÁTORY PROT -SCH.

Napěťová reference

Reference je zde tvořena jednoduchým Zenerovým stabilizátorem skládajícím se z rezistoru R6 a Zenerovy diody D1. Jedná se o druhý stupeň stabilizace, takže stabilita referenčního napětí v závislosti na vstupním napětí pro účel přepínání vinutí transformátoru je dostatečná. Pro snížení výstupní impedance zdroje referenčního napětí je zde zapojen kondenzátor C3.

Převod napětí na číslo

Převod zajišťují dva komparátory s hysterezí a vzájemnou vazbou tvořené operačními zesilovači IC1A a IC1B. Komparátor zapojený z operačního zesilovače IC1A porovnává, zda je vstupní napětí větší nebo menší než přibližně -15 V. Při tom má kladnou zpětnou vazbu zajišťující hysterezi (R1, R11, R27, D8). Zároveň mění předpětí na vstupním děliči pro druhý komparátor (vazba R2, R12, R28, D9). To znamená, že druhý komparátor překlápí v intervalu vstupního napětí od -30 V do 0 hned třikrát. Přibližně při napětí -21,5 V klesne jeho výstup k nule a okolo -15 V se znovu překlápí do vysoké úrovně. K nule klesne při zvětšení vstupního napětí nad přibližně -7 V a tento stav setrvává s rostoucím napětím až do nuly. Druhý komparátor má svou vlastní hysterezi (R3, R13, R26, D7).

Vzhledem k tomu, že výstupy komparátorů přecházejí do saturace a hodnota jejich napětí je zaváděna do jejich vstupních rozhodovacích úrovní, je nutné je napájet ze stabilizovaného napětí. To je přivedeno z desky regulační smyčky. Zkušebně, pro omezení vlivu pulzní zátěže výstupů operačních zesilovačů na jejich zpětné vazby, byly na plošný spoj prototypu navrženy stabilizátory. Pro předcházení zakmitávání jsou vstupní děliče napětí zatíženy kondenzátory tvořící integrační člunek.

Fázová synchronizace

Z komparátorů jsou informace vedeny přes rezistory R18 a R19 snižující proud a Zenerovy diody D2 a D3 zajišťující posunutí rozhodovací napěťové úrovně spínání diod optotriaků do oblasti, ve které operační zesilovače spolehlivě mění svou výstupní hodnotu. Tranzistory T1 a T2 se otevřou pouze v případě, že střídavé napětí prochází nulou. Šířku těchto impulzů určuje dělič s rezistory R23 až R25. Pro omezení báze proudů komparačního tranzistoru je zde Zenerova dioda D6. Tranzistor T3 zároveň tvoří invertor pro dosažení správné logiky spínání. Tento typ fázové synchronizace však není plánován do finálního regulátoru, který v současné době vyvíjím.

5.5 Měření výstupních veličin

Měření napětí je ve zdroji zajištěno dvěma způsoby. Pro nastavení napětí nezátíženého zdroje nebo zatíženého konstantním odporem je laboratorní zdroj vybaven digitálním voltmetrem. Pro měření napětí na zdroji zatíženém pulzní zátěží je určen ručičkový indikátor. Pro přesná měření proudů bez zvýšení výstupního odporu zdroje, pro jejich grafické zobrazení nebo pro účel dalšího zpracování jsou na zadní panel vyvedeny úbytky napětí z bočníků.

5.5.1 Digitální měřidla



Obr. 5.13: Digitální panelové měřidlo

Blokové schéma digitálních měřidel

Digitální voltmetr je samostatný konstrukční celek zahrnující vlastní usměrňovač, stabilizátor, zdroj záporného napětí, vstupní dělič napětí a integrovaný analogově digitální převodník s dekodérem pro 3½ místný sedmi segmentový LCD s podsvícením. Blokové schéma voltmetru je v příloze G.1 pod názvem VOLTMETR DIG A,B -BLS. Stejný princip je využit i v digitálním ampérmetru.

Popis připojení digitálních měřidel

Moduly digitálních panelových měřidel byly zakoupeny hotové, ke kterým však výrobce nedodává dostatečně podrobnou dokumentaci. Pro vlastní potřebu jsem si tedy zanalyzoval jejich kompletní zapojení a rozmístění součástek na plošném spoji. Prvotním hlavním důvodem byla úprava voltmetru a ampérmetru tak, aby mohl být napájen voltmetr ze společného vinutí transformátoru jako ampérmetr. Tento způsob napájení byl využit ve zdroji TESLA BK180, kde byly použity integrované D/A převodníky stejné koncepce, které jsou použity v zakoupených digitálních měřidlech. [30]

Při získání cenových nabídek na výrobu transformátoru jsem však od této myšlenky ustoupil, neboť by se nevyplatilo do přístroje vyrábět další modul s usměrňovači, filtry a stabilizátory napětí a ještě dělat značné úpravy v zakoupených měřidlech. Každý modul tedy je připojen k samostatnému vinutí transformátoru a nevyžaduje vnější usměrnění ani filtraci napětí. V napájecích částech měřidel jsem ale nahradil vstupní SMD propojku rezistorem o hodnotě $8,2\ \Omega$ ze stejného důvodu jako u regulátoru A a B.

Dále jsem zjistil, že v modulech je jednocestný usměrňovač. Proto jsou záměrně připojeny začátky a konce vinutí na voltmetr a ampérmetr přehozené. Transformátor by tedy měl být měřidly zatěžován rovnoměrně v kladné i záporné půlně sinusovky.

Digitální voltmetr

Měřicí vstupy digitálního voltmetru jsou připojeny přímo na výstupní svorky zdroje, což zajišťuje měření napětí v místě odběru proudu z celého laboratorního zdroje. Měření tedy nezakresluje napěťové úbytky na vodičích zatížených odebíraným proudem ze zdroje.

V panelovém voltmetru je nastaven rozsah do 200 V a pro zkalibrování zatím slouží pouze víceotáčkový trimr uvnitř měřidla. Protože ale za panelovými měřidly bude osazen ještě subpanel 9, zhorší se tím přístup k měřidlům a jejich kalibrace by byla obtížnější. Proto plánuji všechny měřicí předřadníky s kalibračními trimry soustředit na desky plošného spoje, které budou snadno přístupné. Pro bloky A a B se

budou digitální měřidla kalibrovat zřejmě na desce regulátoru. Zvažovaná je i možnost umístit kalibrační trimry na společnou desku měřících předřadníků, kde se budou dostavovat především rozsahy výstupů bočníků a případně měření analogovým měřidlem.

Digitální ampérmetr

Vnitřní zapojení digitálního ampérmetru je velmi podobné zapojení digitálního voltmetru. Obě měřidla jsou osazena na stejných deskách plošného spoje a hlavní rozdíl ampérmetru oproti voltmetru je, že ampérmetr má uvnitř osazen bočník a nemá osazený dělič napětí.

Ve zdroji se pro měření proudu však používá bočník společný pro regulaci proudu, měření analogovým měřidlem, měření digitálním měřidlem a pro vývod k externím měřicím přístrojům. Se současným bočníkem, který má odpor $10\text{ m}\Omega$, je digitální ampérmetr připojen přímo na bočník vstupy A/D převodníku. Tato hodnota odporu bočníku se však při měření a testování zdroje ukázala jako příliš malá, a tak finální bočník bude navržen s vyšším odporem.

5.5.2 Ručičkový indikátor

Pro analogové měření jsem vybral magnetoelektrický panelový měřicí přístroj MP80 od výrobce METRA Blansko. Rozsah měřidla je do $100\text{ }\mu\text{A}$ a při jeho dosažení je na cínce úbytek napětí necelých 170 mV . Pro měření proudu na blocích do 5 A tedy byly původně plánovány měřicí zesilovače. Protože ale plánuji navýšení odporu bočníku, bude mou snahou zvolit jeho odpor alespoň $40\text{ m}\Omega$, což by umožnilo přímé měření proudu i tímto měřidlem. U ostatních výstupů je plánován bočník o větším odporu, než u regulovatelných zdrojů, a tak by s měřením neměl být problém.

Protože ručičkový indikátor slouží k měření více napětí a proudů, je přepínán mechanickým přepínačem mezi jednotlivými veličinami. Přepínač je otočný a je dimenzován pro dostatečné rozdílové napětí mezi jednotlivými výstupy galvanicky oddělených bloků zdroje. Odporové předřadníky plánuji umístit na samostatnou desku plošného spoje, na které budou současně trimry pro kalibraci jednotlivých veličin.

Na panelový měřicí přístroj jsem vyrobil vlastní stupnici, přičemž jedna je cejchována ve voltech a její rozsah je do 30 V a druhá je cejchována v ampérech s rozsahem do 5 A . Pro měření celkového napětí v sériovém spojení bloků A a B je nutno hodnotu napětí po odečtení vynásobit dvěma. Při měření proudů na zdrojích do $0,5\text{ A}$ se odečte z přístroje desetinná hodnota. Potisk stupnice je v příloze [H.4](#) na výkrese s názvem PŘEDNÍ PANEL - STUPNICE - POT.

Celý panelový měřicí přístroj je zapuštěn pod úroveň předního panelu, ve kterém je okénko pouze na stupnici a otvor pro nastavení nuly. Aby rám přístroje nevrhal



Obr. 5.14: Ručičkový indikátor s upravenou stupnicí

stín na stupnici, je nad měřidlem připevněno LEDkové osvětlení. Dokumentace k tomuto osvětlení je v příloze [H.3.22](#) s názvy začínající PŘEDNÍ PANEL - SUB_11.

5.5.3 Vyvedené výstupy z bočníků

Na zadní panel jsou vyvedeny analogové napěťové úrovně úměrné odebíranému proudu z jednotlivých zdrojů. Nejsou vyvedeny přímo vývody z bočníků, protože při jejich zkratování by došlo k selhání proudového regulátoru. Zároveň by musel být bočník zkalibrován na přesnou hodnotu odporu, aby byla rozumná konstanta převodu proudu na napětí.

Výstupy z bočníku jsou tedy vyvedeny přes sériový rezistor, jehož hodnota odporu je řádově vyšší, než hodnota odporu bočníku. Aby nebyla hodnota měřeného napětí zkreslena v závislosti na vstupním odporu externího měřicího přístroje, je výstup navržen pro předem definovanou hodnotu vstupního odporu měřicího přístroje. Pokud má vstupní odpor vyšší, je nutné ho snížit paralelně připojeným odporem např. z odporové dekády. Jedná-li se ale o vysokoimpedanční vstup měřicího přístroje, kde je jeho vstupní odpor o mnoho řádů vyšší než je výstupní odpor měřicích výstupů ze zdroje, je možné namísto připojování odporové dekády přepnout miniaturní přepínač příslušného výstupu na zadním panelu do polohy pro vysokoimpedanční zátěž. Tím se připojí paralelně k měřicímu výstupu vnitřní normálový odpor a měření nebude zkresleno mimo toleranci měřicího výstupu.

Pro časté měření proudu např. osciloskopem by bylo nutné vždy připojovat mě-

řící šňůry do správných zdírek na zadním panelu. Aby se tomu předešlo, je otočný přepínač pro ručičkový indikátor využit i pro přepínání jednoho měřicího výstupu na zadním panelu. Ten je však pouze pro vysokoimpedanční zatížení. Jeho výhodou je ale to, že na něm je pro všechny polohy přepínače společný rozsah výstupního napětí.

Vyvedení měřicích výstupů zajišťuje zadní subpanel 1, jehož dokumentace je v příloze **H.6.1** s názvy začínající ZADNÍ PANEL - SUB_1. Plošný spoj je navržen s dostatečnými rozestupy mezi vývody ze vzájemně galvanicky oddělených bloků zdroje.

5.6 Zdroje pevného napětí

5.6.1 Zdroje C, D a E

Části zdrojů pevného napětí vychází z návrhů regulovatelných zdrojů s vypuštěním příslušných částí, které byly zmíněny v sekci „Princip činnosti pevných zdrojů“ **4.4**. Protože ale vývoj regulátorů pevných zdrojů není zcela ukončen, nezabýval jsem se hlouběji ani pevnými zdroji. Pro vhodný návrh transformátoru, předního panelu a dalších částí souvisejících s pevnými zdroji ale bylo nutné provést alespoň přibližné návrhy bloků pevných zdrojů a ověřit jejich realizovatelnost.

Prvotní návrhy tedy vycházely z ověřeného principu zapojení využitého v prototypu regulátoru regulovatelného bloku. Výkonová část pro blok D, tedy s výstupním napětím 12 V o maximálním zatížení 5 A, je téměř shodná s regulovatelným zdrojem s tím, že je u bloku D vypuštěna část předregulace napětí. Na zbylém místě výkonového bloku CDE jsou navrženy výkonové tranzistory pro bloky C a E.

Příklad možného zapojení regulátoru pro blok E, na kterém probíhalo první testování, je v příloze **F.1** na výkrese REGULAČNÍ OBVOD E PR -SCH. Vzhledem ke konstantnímu výstupnímu napětí bylo možné vypustit samostatné vinutí na transformátoru pro každý regulátor. Ve výkrese je tedy naznačeno možné řešení napájení regulátoru.

Protože u pevných zdrojů bude bočník na plovoucím napěťovém potenciálu vůči zemi, je nutné vztáhnout referenční napětí rovněž k plovoucímu bodu, tedy ke kladné výstupní zdírce. Vývod JP1 slouží k vypnutí symetrie zdroje. Při jeho spojení se regulátory budou chovat jako dva nezávislé zdroje napětí, sériově spojené. Při rozpojených vývodech JP1 by regulátory měly na výstupu udržovat symetrické výstupní napětí, nebudou-li výstupy zdroje připojeny k vnějšímu zdroji energie.

Optočleny OK1 a OK2 jsou připraveny pro připojení k centrálnímu řídicímu členu, který bude zajišťovat akustickou signalizaci proudového přetížení. Optočleny OK3 a OK4 slouží k přepínání zatěžovací charakteristiky. Tranzistory Q3 a Q4

budou umístěny na chladiči výkonového bloku CDE. Využití tranzistoru NPN pro zápornou větev stabilizace však nepředpokládám.

Podrobnějším popisem tohoto schématu se v této práci nebudu zabývat, neboť považuji takovéto řešení především záporné větve stabilizace za zbytečně složité a po dokončení návrhu regulátoru pro blok A, B a D se budu plně věnovat vývoji i tohoto regulátoru. Nutno poznamenat, že při návrhu prototypů regulátoru jsem vycházel z odzkoušených a spolehlivých zapojení, nicméně při vývoji celých regulátorů se nebráním využití moderních integrovaných obvodů.

5.7 Výstupní odpojovače

Protože na výstupy všech zdrojů byla v prvotním plánu navržena relé, tak je mou snahou i tento bod splnit. Nicméně po několikaletém odstupu zjišťuji, že to přináší více nevýhod, než jsem si tehdy uvědomoval. Inspirací pro mě byly zdroje od výrobce Diametral, které mají vypínatelné výstupy, což jsem zmiňoval v sekci 3.10. Ze zkušeností s několika zdroji této koncepce od výrobce Diametral jsem zjistil, že po čase používání se u výstupních relé velmi zvýšil odpor v sepnutém stavu, a u některých dokonce došlo k jejich úplnému selhání.

Pro omezení těchto vlivů jsem navrhl několik opatření, které se snažím při návrhu uplatnit. Relé by měla rozpínat kontakty bezvýkonnostně, tedy při vypnutí bloku zdroje nebo celého přístroje by mělo dojít k omezení proudu výstupním tranzistorem a poté k rozpojení kontaktů relé. Omezení bude zajišťovat regulátor proudu na základě impulsu z optočlenu buzeného centrálním řídicím členem. Toto řešení splní požadavek na vysokou odolnost výstupu vůči libovolné polaritě vnějšího napětí při vypnutém výstupu. Nevýhodou ale je, že při připojení indukční zátěže bude docházet k dlouhé době poklesu proudu a v krajních případech dojde k natažení oblouku při rozpínání. Tento jev by sice bylo možné odstranit, po konzultaci s odborníkem jsem se však dozvěděl, že kontakty spínané a rozpínané zcela bez proudu nemusí zajistit spolehlivý dlouhodobý chod. To jsem si později ověřil na stykači, jehož proud byl v zařízení řízen triakem spínaným v nule, který po čase selhal se zdánlivě čistými kontakty.

Aby se výrazně nezvýšil výstupní odpor zdroje, je plánováno i přepínání zpětných vazeb regulačních smyček pomocí jazýčkových relé. První návrh přepínání zpětných vazeb pro bloky A a B je v příloze H.3.17 na výkrese PŘEDNÍ PANEL - SUB_9-SCH. Přes kontakty jazýčkových relé jsou navrženy RC členy pro stabilitu zdroje při přechodovém ději.

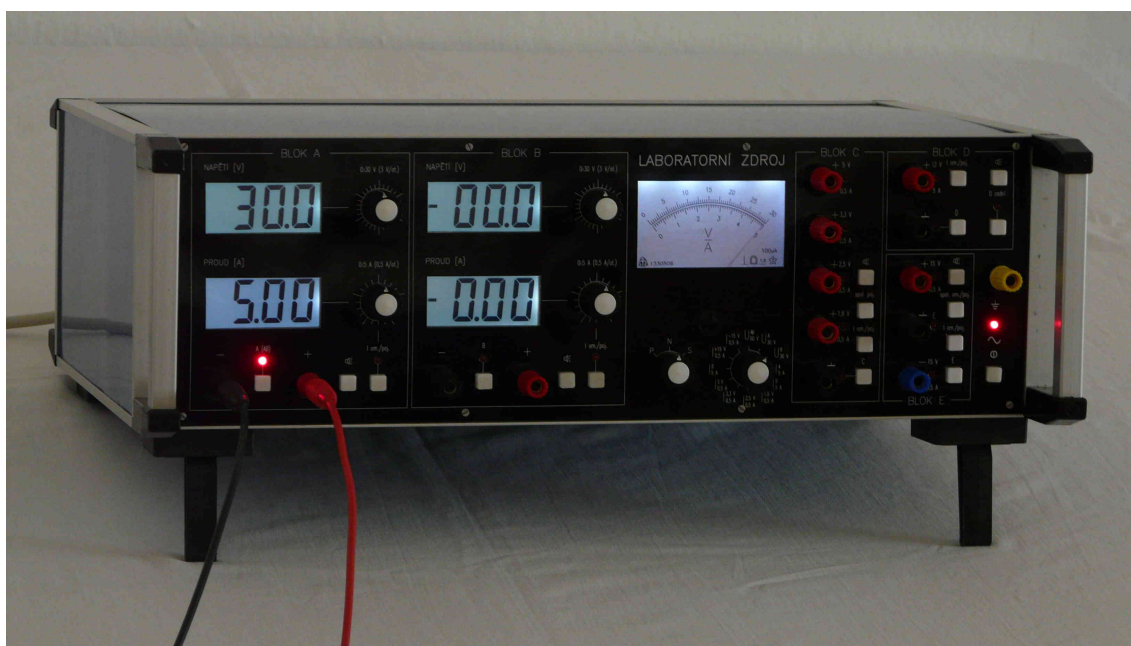
Na stejné desce by měla být osazena i relé pro spojování bloků A a B paralelně nebo sériově. Kompletní ovládání všech relé by měl zajišťovat centrální řídicí člen.

Typ relé zakreslený ve schématu však ve zdroji použit nebude, neboť při jeho důkladném posouzení jsem nebyl přesvědčen o jeho dlouhodobé spolehlivosti. Na místo něj byl vybrán jiný typ relé s průhledným krytem, který může usnadnit i případné hledání závady ve zdroji. Pro ně však bude muset být změněn návrh plošného spoje.

Prvotní návrh je připraven i pro bočníky, další výstupní prvky zde ale zatím nejsou zakresleny. Návrh je teprve připraven k prvnímu testování, čili jej nelze považovat za spolehlivý díl zdroje a zcela jistě dojde k jeho změnám.

5.8 Konstrukce

Laboratorní zdroj je vestavěn do typizované stavebnicové skříně Tesla - ALMES. Na předním panelu přístroje jsou umístěny všechny ovládací a indikační prvky včetně všech hlavních výstupních zdírek. Ze zadní části přístroje je konektor pro připojení síťové šňůry, pojistkové pouzdro, výstupy bočniců, zadní vývod z bloku D a mřížky ventilátorů spolu s větracími otvory. Dále je na zadním panelu vymezené místo pro případné rozšíření o zdířky pro vstup vnějšího napětí pro řízení regulovatelného zdroje nebo pro některé ze standardních komunikačních rozhraní. Konstrukce laboratorního zdroje je vidět na obrázku 5.15.



Obr. 5.15: Konstrukce laboratorního zdroje

Vrchní kryt přístroje je uložen v rámu skříně s přesahy a jeho vyjmutí je možné mírným prohnutím např. za pomoci přísavky. Spodní kryt je upevněn 8 šrouby,

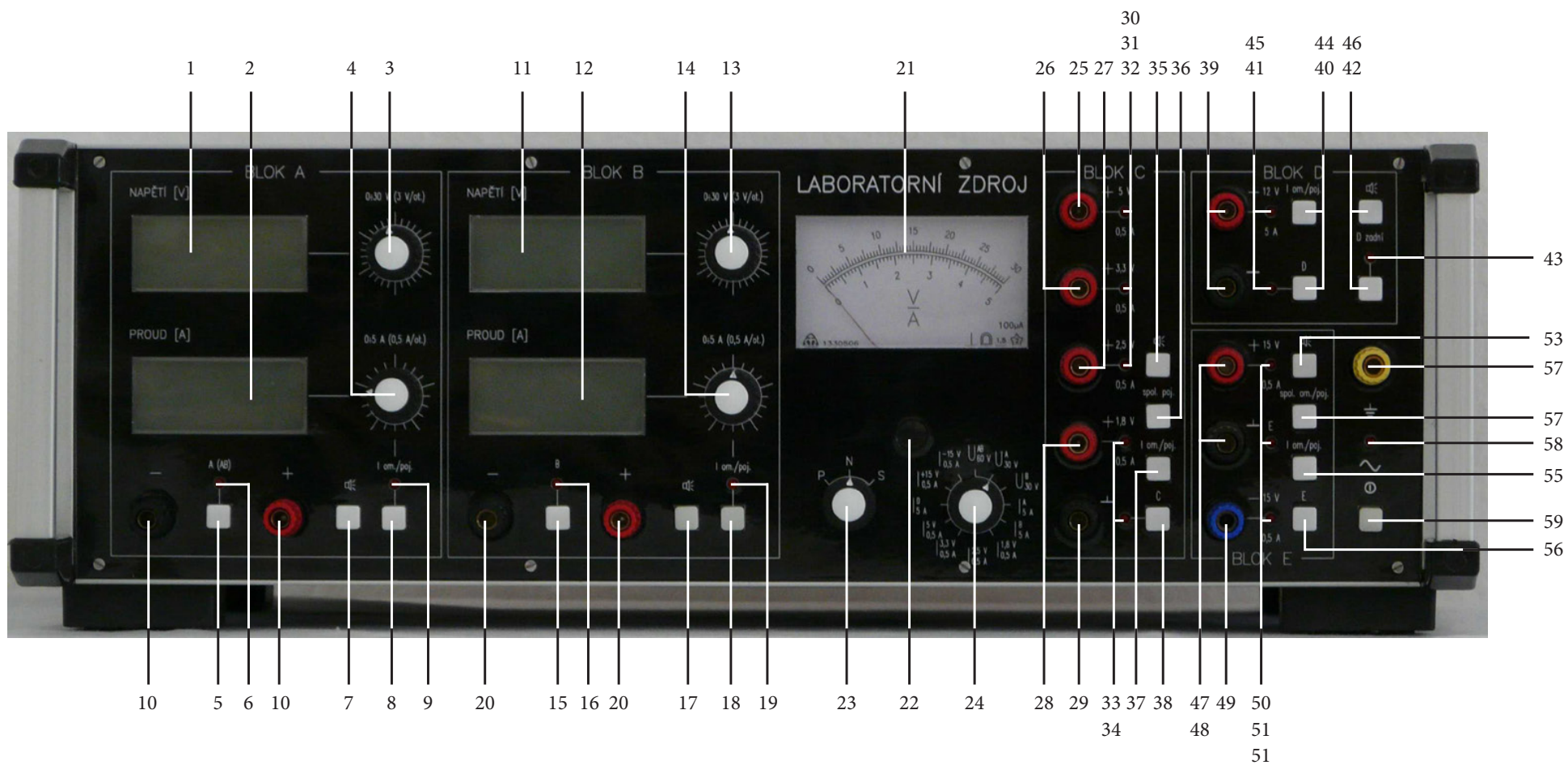
které zároveň drží nožičky přístroje. Nožičky jsou výklopné, což může posloužit pro naklonění přístroje položeného na stole kvůli lepšímu pohledu na čelní panel.

Ve vrchním krytu záměrně nejsou větrací otvory, aby se do laboratorního zdroje zbytečně neprašilo. Při zahřátí některé z částí zdroje je zajištěna cirkulace vzduchu pomocí příslušného ventilátoru. Spínání a regulace otáček ventilátoru je řízeno tak, aby zdroj nebyl zbytečně hlučný. Pokud je ve zdroji malý ztrátový výkon, tak jsou ventilátory zastaveny, případně běží na minimální otáčky.

5.8.1 Popis ovládacích prvků

Přední panel

1. Displej pro zobrazení výstupního napětí bloku A.
2. Displej pro zobrazení výstupního proudu nebo zobrazení předvoleného proudového omezení či proudové pojistky bloku A.
3. Desetiotáčkový potenciometr pro nastavení výstupního napětí bloku A v normálním režimu (3 V na otáčku). V režimu paralelního nebo sériového spojení nemá tento prvek přiřazenou funkci.
4. Desetiotáčkový potenciometr pro nastavení proudového omezení nebo proudové pojistky bloku A v normálním režimu (0,5 A na otáčku). V paralelním režimu by pro správnou funkci měl být tento prvek nastaven na maximum. V sériovém režimu nastavuje proudové omezení záporné větve.
5. Tlačítko na zapnutí výstupu bloku A v normálním režimu. Při jeho stlačení je výstup zdroje připojen na výstupní svorky a na ampérmetru je zobrazován skutečný odebíraný proud. Při uvolnění tlačítka je výstup odpojen a ampérmetr indikuje přednastavené proudové omezení. V režimu paralelního nebo sériového spojení současně ovládá i výstup bloku B.
6. Indikace zapnutého výstupu a zobrazovaného skutečného proudu bloku A.
7. Volba akustické indikace při proudovém omezení nebo při vypnuté proudové pojistce bloku A.
8. Přepínač zatěžovací charakteristiky mezi proudovým omezením a proudovou pojistkou bloku A.
9. Indikace proudového omezení nebo vypnutí proudové pojistky bloku A.
10. Výstupní zdířky bloku A v normálním režimu, záporného napětí v sériovém režimu a společného výstupu v paralelním režimu.
11. Displej pro zobrazení výstupního napětí bloku B.
12. Displej pro zobrazení výstupního proudu nebo zobrazení předvoleného proudového omezení či proudové pojistky bloku B.



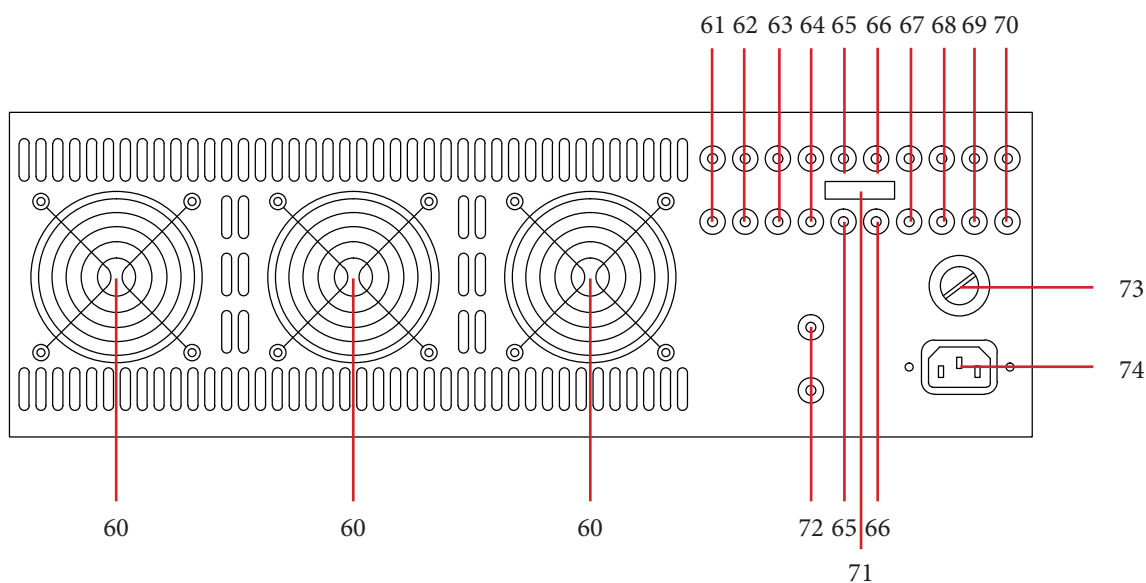
Obr. 5.16: Pohled na přední panel

13. Desetiotáčkový potenciometr pro nastavení výstupního napětí bloku B v normálním režimu (3 V na otáčku). V paralelním režimu je tímto potenciometrem ovládané společné výstupní napětí (3 V na otáčku). V sériovém režimu tento prvek nastavuje celkové výstupní napětí sériové kombinace zdrojů (6 V na otáčku celkového napětí, 3 V na otáčku poloviny symetrického napětí).
14. Desetiotáčkový potenciometr pro nastavení proudového omezení nebo proudové pojistky bloku B v normálním režimu (0,5 A na otáčku). V paralelním režimu nastavuje maximální hodnotu společného výstupního proudu obou bloků (1 A na otáčku).
15. Tlačítko na zapnutí výstupu bloku B v normálním režimu. Při jeho stlačení je výstup zdroje připojen na výstupní svorky a na ampérmetru je zobrazován skutečný odebíraný proud. Při uvolnění tlačítka je výstup odpojen a ampérmetr indikuje přednastavené proudové omezení. V režimu paralelního nebo sériového spojení toto tlačítko nemá přiřazenou funkci.
16. Indikace zapnutého výstupu a zobrazovaného skutečného proudu bloku B.
17. Volba akustické indikace při proudovém omezení nebo při vypnutí proudové pojistky bloku B.
18. Přepínač zatěžovací charakteristiky mezi proudovým omezením a proudovou pojistkou bloku B.
19. Indikace proudového omezení nebo vypnutí proudové pojistky bloku B.
20. Výstupní zdířky bloku B v normálním režimu, kladného napětí v sériovém režimu a společného výstupu v paralelním režimu.
21. Ručičkové měřidlo výstupních napětí a proudů.
22. Kalibrace nuly ručičkového měřidla.
23. Volba režimů bloků A a B:
 - P - Paralelní
 - N - Normální
 - S - Sériový
24. Výběr měřené veličiny ručičkovým měřidlem. Volba U_{60V}^{AB} je funkční pouze v režimu S bloku A a B. Při volbě I_{5A}^D je indikován součet proudů z předního a zadního výstupu!
25. Výstupní zdířka +5 V.
26. Výstupní zdířka +3,3 V.
27. Výstupní zdířka +2,5 V.
28. Výstupní zdířka +1,8 V.
29. Společná nulová výstupní zdířka bloku C.
30. Indikace proudového omezení nebo vypnutí proudové pojistky výstupu +5 V.
31. Indikace proudového omezení nebo vypnutí proudové pojistky výstupu +3,3 V.
32. Indikace proudového omezení nebo vypnutí proudové pojistky výstupu +2,5 V.

33. Indikace proudového omezení nebo vypnutí proudové pojistky výstupu +1,8 V.
34. Indikace zapnutých výstupů bloku C.
35. Volba akustické indikace při proudovém omezení nebo při vypnutí proudové pojistce některého z výstupů bloku C.
36. V režimu proudové pojistky určuje chování při dosažení mezního proudu jednoho výstupu. Při stlačení a dosažení mezního proudu kteréhokoliv výstupu bloku C se vypnou všechny výstupy bloku C. V opačném případě se vypne jen příslušný výstup. V režimu proudového omezení toto tlačítko nemá přiřazenou funkci.
37. Přepínač zatěžovacích charakteristik mezi proudovým omezením a proudovou pojistkou u výstupů bloku C.
38. Tlačítko na zapnutí všech výstupů bloku C.
39. Výstupní zdířky bloku D.
40. Tlačítko na zapnutí předního výstupu bloku D.
41. Indikace zapnutí předního výstupu bloku D.
42. Tlačítko na zapnutí zadního výstupu bloku D. Při jeho vypnutí je odpojena i černá zdířka na zadním panelu.
43. Indikace zapnutí zadního výstupu bloku D.
44. Přepínač zatěžovací charakteristiky mezi proudovým omezením a proudovou pojistkou bloku D.
45. Indikace proudového omezení nebo vypnutí proudové pojistky bloku D.
46. Volba akustické indikace při proudovém omezení nebo při vypnutí proudové pojistce bloku D.
47. Výstupní zdířka +15 V.
48. Společná nulová výstupní zdířka bloku E.
49. Výstupní zdířka -15 V.
50. Indikace proudového omezení nebo vypnutí proudové pojistky výstupu +15 V.
51. Indikace zapnutých výstupů bloku E.
52. Indikace proudového omezení nebo vypnutí proudové pojistky výstupu -15 V.
53. Volba akustické indikace při proudovém omezení nebo při vypnutí proudové pojistce alespoň jednoho z výstupů bloku E.
54. Určuje chování při dosažení mezního proudu jednoho výstupu. Při stlačení a dosažení mezního proudu jednoho z výstupů bloku E se při režimu proudové pojistky vypne i druhý výstup bloku E. V režimu proudového omezení a aktivaci této volby přejde výstup do režimu konstantního proudu 0,5 A a druhý výstup tohoto bloku sleduje symetrii výstupních napětí. V opačném případě se vypne nebo omezí jen příslušný výstup.
55. Přepínač zatěžovacích charakteristik mezi proudovým omezením a proudovou pojistkou bloku E.

56. Tlačítko na zapnutí obou výstupů bloku E.
57. Zdířka spojená s kostrou přístroje.
58. Indikace připojení přístroje k síti a připravenosti k provozu. Při rozsvícení panelových měřidel a nerozsvícení této kontrolky může být způsobeno napětím v síti $< 207\text{ V}$. U zdroje pak není možné zapnout výstupy jednotlivých bloků.
59. Síťový vypínač celého přístroje.

Zadní panel



Obr. 5.17: Pohled na zadní panel

60. Ventilátory
61. Zdířky přepínatelného výstupu z bočníků. 250 mV /rozsah, zatěžovací odpor $\geq 1\text{ M}\Omega$.
62. Zdířky výstupu z bočníku pro výstup -15 V . -500 mV / 500 mA .
63. Zdířky výstupu z bočníku pro výstup $+15\text{ V}$. 500 mV / 500 mA .
64. Zdířky výstupu z bočníku pro výstup $+12\text{ V}$. 250 mV / 5 A .
65. Zdířky výstupu z bočníku pro výstup $+1,8\text{ V}$. 500 mV / 500 mA .
66. Zdířky výstupu z bočníku pro výstup $+2,5\text{ V}$. 500 mV / 500 mA .
67. Zdířky výstupu z bočníku pro výstup $+3,3\text{ V}$. 500 mV / 500 mA .
68. Zdířky výstupu z bočníku pro výstup $+5\text{ V}$. 500 mV / 500 mA .
69. Zdířky výstupu z bočníku bloku B. 250 mV / 5 A .
70. Zdířky výstupu z bočníku bloku A. 250 mV / 5 A .
71. Přepínače zatěžovacího odporu v poloze:
0 pro zatěžovací odpor $= 1\text{ k}\Omega$

- 1 pro zatěžovací odpor $\geq 10\text{ M}\Omega$
- 72. Zadní výstup bloku D.
- 73. Sítová pojistka T3, 15 A.
- 74. Sítová přívodka pro euro zásuvku.

5.8.2 Rozmístění konstrukčních celků

Snahou bylo většinu elektronických součástek soustředit na vyjímatelné desky plošných spojů. V levé části laboratorního zdroje je transformátor a prvky sloužící pro jeho napájení. V pravé části jsou vyjímatelné desky s řídicí a měřicí elektronikou a desky s kondenzátorovými filtry, které nemohou být umístěny v blízkosti výkonových prvků. Zezadu zdroje jsou umístěny výkonové bloky a za předním panelem jsou všechny ovládací a indikační prvky. Uspořádání jednotlivých konstrukčních celků ve zdroji je na obrázku 5.18.

5.8.3 Popis konstrukce jednotlivých celků

Regulátory a předřadníky

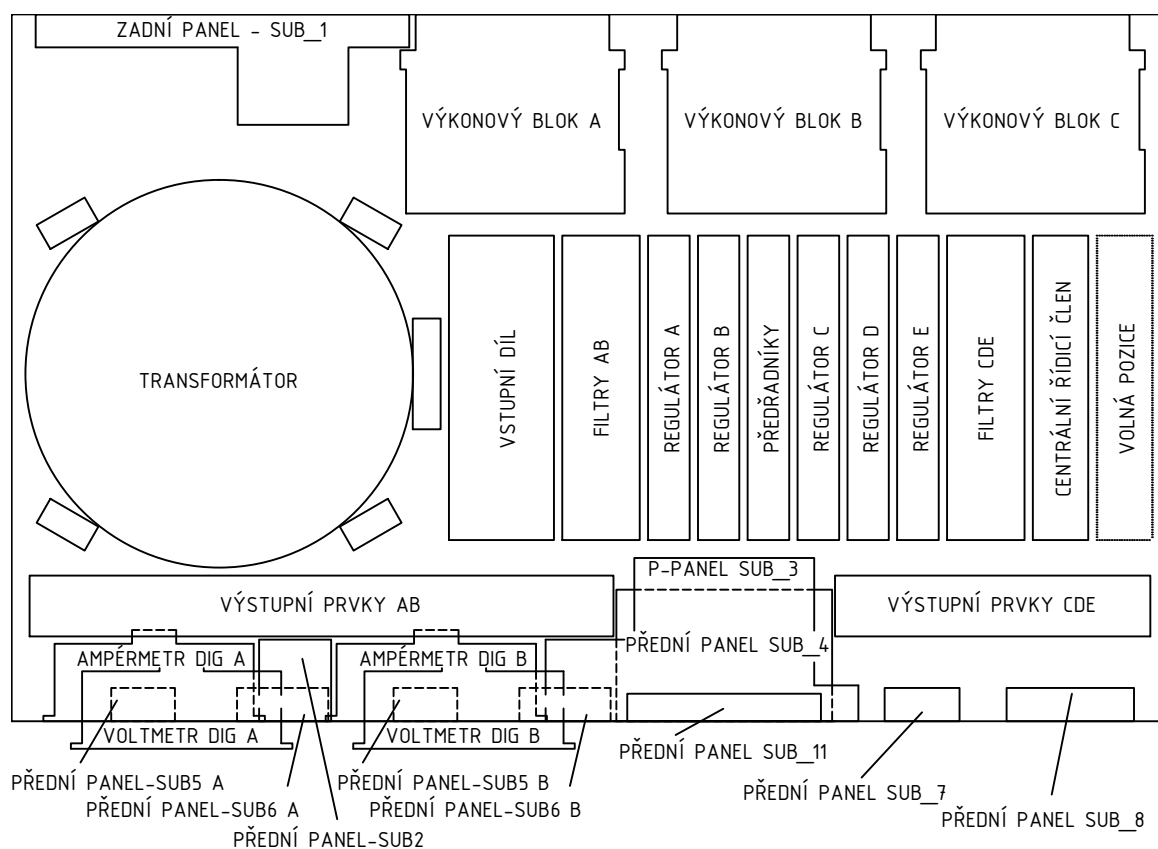
Všechny regulátory a předřadníky na zásuvných deskách jsou blízko sebe a je plánováno jejich obklopení společným stínícím krytem. Spolu s deskami filtrů, centrálním řídicím členem a vstupním dílem by měly být svrchu zajištěny páskem, který zamezí vysunutí desek z řadových konektorů a především ztlumí případné vibrace desek.

Zadní panel a výkonové bloky

Výkonové bloky jsou zasunuty do konektorů vodorovně a proti jejich vysunutí nebo pohybu je upevňuje zadní panel, který přímo doléhá na ventilátory z umělé hmoty. Konektory jsou dostatečně robustní a jsou schopny držet výkonové bloky proti vertikálnímu pohybu nebo pohybu v podélném směru konektorů. Samotné chladiče nesmí být vodivě spojeny s kostrou přístroje, protože na ně je připojen kladný pól hlavního filtru u regulovatelných bloků A a B, u bloku CDE je s chladičem spojen pouze kladný pól filtru bloku D.

Konektory výkonových bloků jsou přišroubovány přes distanční sloupky k podélným nosníkům v rámu přístroje. Pro dosažení dostatečné pevnosti nebylo možné využít standardních distančních sloupků, ale musel jsem si vyrobit vlastní, jejichž výkres je v příloze H.7.1 s názvem SKŘÍŇ - SLOUPEK -SOU. Sloupky jsem vysoustružil z mosazi a je jich ve zdroji osazeno celkem 12 kusů.

Při pohledu ze zadu na laboratorní zdroj je v pravé části po odklopení panelu deska výstupů bočnic, která je připojena do svazku vodičů přes dvacetipinový konektor. Rozměrový náčrtek této desky je v příloze H.6.6 s názvem ZADNÍ PANEL -



Obr. 5.18: Uspořádání konstrukčních bloků ve skříni laboratorního zdroje při pohledu shora

SUB_1 -SOT. Tuto desku je možné odšroubovat při odšroubování matic výstupních zdírek.

Výkres hlavní desky zadního panelu se nachází v příloze **H.5** pod názvem ZADNÍ PANEL - HLAVNÍ -SOU. Otvory za ventilátory jsou určené pro připevnění standardní mřížky k ventilátoru s vyznačenou roztečí otvorů pro šrouby. Síťová přívodka je přišroubována z vnitřní strany panelu, aby zadní panel nevisel za dráty při jejím odšroubování.

Přední panel

Přední panel laboratorního zdroje je bezesporu jeho konstrukčně nejsložitější částí. Pro připevnění všech ovládacích a indikačních prvků do jedné roviny byla deska čelního panelu doplněna dalšími 11 deskami v různých hloubkových úrovních. Poněvadž rozměry předního panelu byly dány vybranou konstrukční skříní, bylo nutné všechny prvky rozmístit do vymezené oblasti. Protože součet netolerovaných vůlí mezi prvky je v celé délce panelu menší než 2 mm, bylo nutné při návrhu důsledně plánovat rozmístění prvků ve všech hloubkových úrovních. Pouze návrh rozmístění prvků na panelu mi zabral několik stovek hodin práce. Nutno ale říci, že precizním návrhem jsem při realizaci nenarazil na žádný problém s rozmístěním, a s dodržěním dokumentace celé sestavy všechny díly přesně pasovaly na navržené místo. Celý přední panel byl frézován CNC frézkou.

Rozmístění prvků čelního panelu bylo zvoleno taky na základě množství kompromisů v rámci uspořádání ostatních prvků ve skříní zdroje, které je také velmi limitováno rozměry celého zařízení. Hlavní desku předního panelu jsem nakreslil a okótoval na tři listy, neboť pro jeho velkou složitost by se jeden společný výkres stal velmi nepřehledným. V příloze H.2 jsou tedy 3 listy pod názvem PŘEDNÍ PANEL - HLAVNÍ -SOU.

Protože přímo na hlavní desce čelního panelu nebo na jeho subpanelech je umístěno velké množství prvků, které jsou s ostatními částmi zdroje přímo spojeny zaletovanými vodiči bez konektorů, je v příloze H.1 s názvem PŘEDNÍ PANEL - HLAVNÍ -SCH dvojice listů schématu propojení jednotlivých prvků i s popisy barev vodičů a označením, ke které části jsou připojeny. Protože se jedná zatím o nedokončený vzorek, nejsou všechny dráty ve zdroji připojeny, a proto tyto vodiče nejsou ani ve schématu popsány.

Subpanely předního panelu

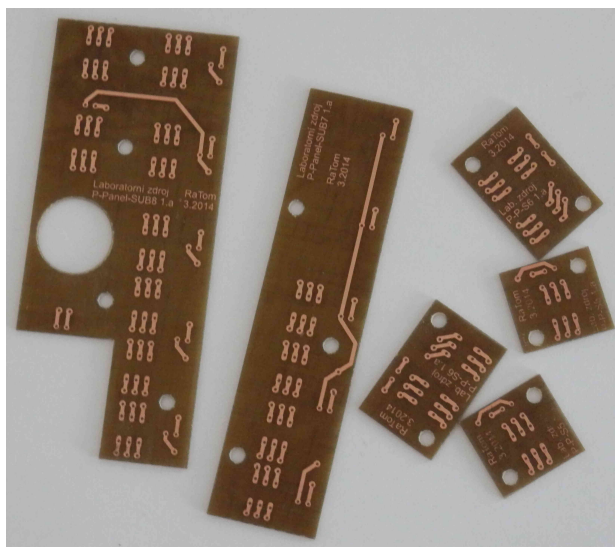
Subpanel 1 slouží pro zapuštění rámečku digitálních panelových měřidel pod rovinu hlavního panelu a je k hlavní desce předního panelu přišroubován přímo s podložkami pouze o 0,5 mm podložkami. Pod názvem PŘEDNÍ PANEL - SUB_1 -SOU je v příloze H.3.1 náčrtek tohoto dílu.

Subpanel 2 nese aripoty bloku A a pro potřebný odstup od čelního panelu je přišroubován přes distanční sloupky k hlavnímu panelu. Náčrtek v příloze H.3.2 nese název PŘEDNÍ PANEL - SUB_2 -SOU. Aripoty jsou k němu přišroubovány maticí a na hřídelích aripotů jsou připevněny hmatníky s kleštinovým upnutím. Protože průměr osy aripotu je 6,34 mm, musel jsem kleštiny pro 6 mm hřídel převrtat na soustruhu.

Subpanel 3 zapouští montážní rovinu panelového magnetoelektrického měřicího přístroje pod hlavní panel o 13,5 mm. Pro zjednodušení konstrukce zároveň slouží pro připevnění aripotů bloku B. V jeho pravé části bylo nutné vyfrézovat žlábký, aby byl zajištěn dostatečný přístup k montážním maticím výstupních zdírek bloku C. Náčrtek PŘEDNÍ PANEL - SUB_3 -SOU je v příloze [H.3.3](#).

Subpanel 4 bylo nutné instalovat kvůli krátkým osám u otočných přepínačů a také z důvodu, že za pravým otočným přepínačem musí být ještě místo pro svazek vodičů, což by při přimontování na subpanel 3 nebylo. Pravý přepínač má vyjmutou podložku s výstupkem, čímž jsou odblokovány všechny polohy přepínače. U levého přepínače jsou podložkou vymezeny pouze 3 polohy. Pro přepnutí na řízení vnějším napětím by bylo možné uvolnit další polohu zprava, na které je plánovaná příprava pro napěťové řízení zdroje, protože napěťové řízení je pro regulátor topologicky shodný režim se sériovým režimem. Pro úplnost zmiňuji přílohu [H.3.4](#) s výkresem PŘEDNÍ PANEL - SUB_4 -SOU.

Subpanely 5 a 6 jsou realizovány deskou plošného spoje a slouží pro připevnění tlačítkových spínačů a indikačních LEDek bloku A a B. Oba subpanely jsou tedy vyrobeny po dvou kusech. Jejich výkresová dokumentace začíná v příloze [H.3.5](#) s názvem PŘEDNÍ PANEL - SUB_5 -SCH a pokračují až po poslední výkres subpanelu 6.



Obr. 5.19: Desky plošných spojů subpanelů 5 až 8

Subpanely 7 a 8 slouží ke stejnému účelu, ale pro bloky C, D a E. Na subpanelu 8 je také připájena LEDka indikující zapnutý přístroj. V příloze [H.3.11](#) s názvem PŘEDNÍ PANEL - SUB_7 -SCH začíná jejich dokumentace.

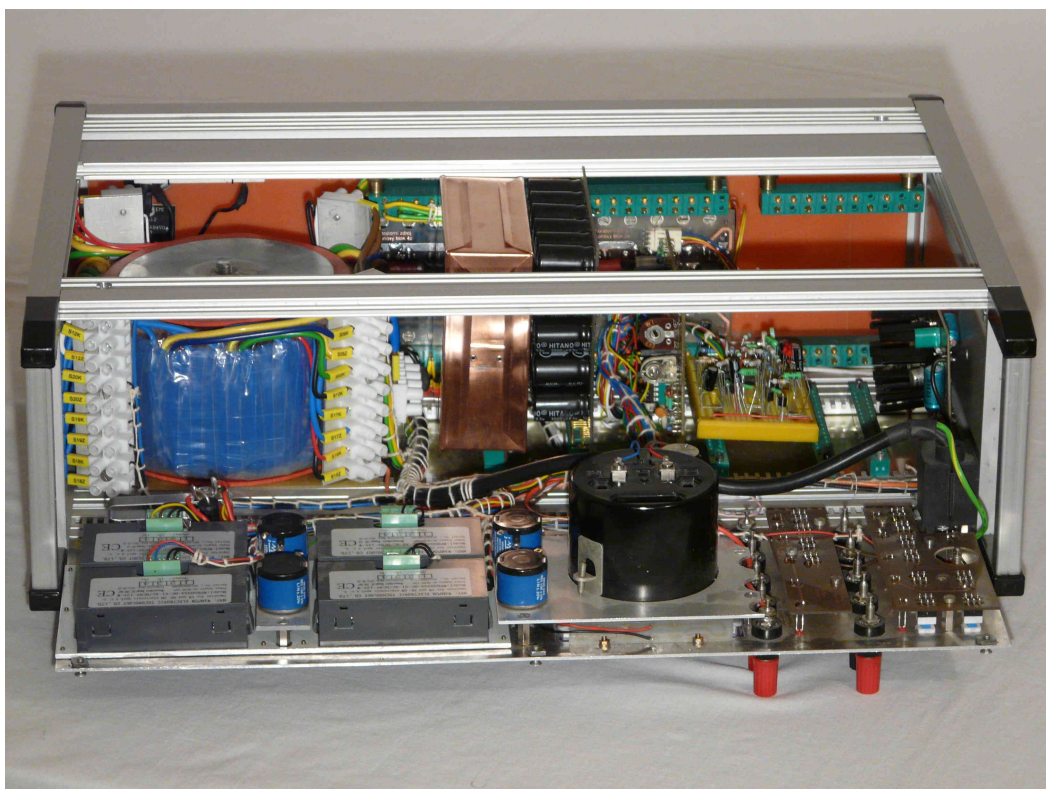
Subpanely 9 a 10 nenesou přímo viditelné prvky předního panelu, ale jsou na nich umístěny součástky, které musí být v blízkosti výstupů. Popis subpanelu 9 byl v sekci 5.7 a subpanel 10 bude sloužit ke stejnému účelu pro bloky C, D a E. V příloze H.3.17 s názvem PŘEDNÍ PANEL - SUB_9 -SCH je prvotní návrh tohoto modulu.

Subpanel 11 zajišťuje pouze osvětlení panelového ručičkového přístroje. Vzhledem k nízké výšce zástavby bylo nejsnadnější plošný spoj přišroubovat zboku pomocí přiletovaných mosazných matic zapuštěných do plošného spoje. Konstrukční řešení je naznačeno na výkrese PŘEDNÍ PANEL - SUB_11 -SOT v příloze H.3.25.

Demontáž předního panelu

Odklopení čelního panelu: Sundají se krytky hmatníků aripotů a otočných přepínačů, pod kterými se uvolní šrouby stahující kleštinu hmatníku. To umožní stáhnutí hmatníků z os aripotů a přepínačů. Poté se odšroubuje 8 šroubků v horní a dolní části čelního panelu držící popisovou část čelního panelu. Po jejím odejmutí se zpřístupní 6 šroubků na okrajích panelu, kterými je připevněna nosná část panelu. Tyto šroubky se nevytácejí celé, ale stačí je uvolnit pouze o několik otáček s přitisknutým panelem směrem ke skříni zdroje. To odemkne matky z rámu přístroje a panel lze odklopit. Pohled do zdroje s odklopeným předním panelem je na obrázku 5.20.

Přístup k výstupním zdírkám: Za čelním panelem je přimontováno velké množství prvků vzájemně blízko sebe. Pro snadnější přístup k výstupním zdírkám regulovatelných bloků a prvkům v jejich okolí je možné odpojit konektory digitálních měřidel a po stlačení aretačních jazýčků na jejich bočních stranách je možné celá měřidla vysunout dopředu a vyjmout je.



Obr. 5.20: Pohled do laboratorního zdroje při odklopeném předním panelu během stavby

6 ROZBOR DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

6.1 Porovnání laboratorních zdrojů a možné varianty jejich řešení

V první části kapitoly 2 jsou přiblíženy režimy zdrojů 2.1, ve kterých zdroje pracují. V druhé části této kapitoly jsou diskutovány způsoby předregulace napětí 2.2. Kapitola „Průmyslově vyráběné zdroje“ 3 porovnává množství laboratorních zdrojů nejenom podle jejich tabulkových hodnot, ale také podle způsobů řešení jejich ovládacích a indikačních prvků, možností využití a částečně v některých odstavcích rozebírá i jejich problematiku, které ovlivňují vnější chování zdrojů nebo omezují jejich možnosti. Zhodnocení porovnávaných zdrojů je na konci této kapitoly v sekci „Ostatní údaje a zhodnocení“ 3.10.

Snahou při studování dokumentací k průmyslově vyráběným zdrojům a jejich porovnáváním bylo také se inspirovat jaké jsou možné varianty řešení kvalitních laboratorních zdrojů. Některé poznatky jsem se snažil v této práci popsat, ale vzhledem k množství porovnávaných zdrojů nebylo možné popisovat všechny vyzorované technické rozdíly mezi jednotlivými zdroji. Přestože se problematice laboratorních zdrojů věnuji velmi dlouho, při zpracovávání této práce jsem si uvědomil, že mám v mnohých věcech nejasnosti. Problematiku, které se mi nepodařilo vyčíst z literatury, jsem se alespoň snažil ověřit měřením na některých dostupných zdrojích. Zejména se jednalo o představu konkrétních velikostí některých hodnot nebo i jejich závislostí na jiných veličinách, které se v dokumentacích uvádí obecně nebo pouze jejich hranice. Bohužel nebylo v mých časových možnostech zpracovat i výsledky těchto měření a zanést je do této práce. Množství nejrůznějších měření napříč jednotlivých zmiňovaných typů jsem provedl už v minulosti a uvědomil jsem si také, jak se udávané parametry výrobci různě liší po jistém opotřebení. Při nahlédnutí do záznamů z těchto měření mě velmi překvapilo, že některé zdroje i po desetiletích častého provozu stále vykazují hodnoty parametrů v mezích definovaných v jejich dokumentaci. Naproti tomu u některých moderních zdrojů jsem se setkal po několika letech provozu značného zhoršení jeho vlastností, které se ani nepřibližovaly mezním hodnotám v jejich dokumentaci.

Bohužel i přes snahu místy porovnání zpestřit praktičtějšími informacemi, které nejsou z dokumentace na první pohled patrné, vedlo zpracování spíše k porovnávání dokumentací jednotlivých zdrojů, než porovnávání zdrojů samotných. Tento fakt byl dán jednak zadanou formou práce a jednak faktem, že jsem porovnávané zdroje neměl nikdy v jeden čas vedle sebe, aby na nich bylo umožněno provést měření pro jejich porovnání za stejných podmínek. Další problém byl ten, že jsem si se

snahou vybrat zdroje do porovnání tak, aby porovnání nebylo zaujato pro několik málo výrobců, vybral k porovnání velké množství zdrojů. To mi neumožnilo jejich podrobnější popis.

6.2 Návrh koncepce laboratorního zdroje

Při prvotním návrhu jsem se snažil vycházet ze získaných informací z průmyslově vyráběných laboratorních zdrojů. Cílem nebylo udělat kopii jiného zdroje, ale vybrat užitečné vlastnosti z jednotlivých zdrojů a snažit je implementovat do koncepce vyhovujících vlastním požadavkům na laboratorní zdroj. Pro návrh některých částí mi však nedostačovaly pouze informace z oblasti laboratorních zdrojů, ale bylo nutné vycházet i z literatury týkající se jiných zařízení.

Tato část byla velmi náročná, neboť při návrhu bylo nutné ověřovat realizovatelnost jednotlivých návrhů. Vzhledem k rozsahu celého zařízení ale nebylo možné z časových důvodů ověřit vzájemnou spolupráci jednotlivých částí a zjistit, zda se podaří všechny části vyladit v navrhované koncepci do stavu s uspokojivými výsledky. Návrh koncepce jsem zdokumentoval v kapitole 4. Pro důkladnější ověření bude nezbytné realizovat i zbývající bloky zdroje a optimalizovat všechny jeho části tak, aby utvářely plnohodnotný laboratorní přístroj.

6.3 Naměřené technické parametry na vyvíjeném zdroji

Během vývoje elektrické části laboratorního zdroje jsem provedl nespočet různých měření, na základě kterých probíhaly další optimalizace zapojení a konstrukce zdroje. Množství z nich tedy posloužila k okamžitému rozhodnutí dalších kroků, která ani nebyla zaznamenána. Významnější měření, která dokazovala některé problémy, byla zaznamenána nejčastěji kombinací ručně psané a kreslené zprávy s případným doplněním fotografie nebo grafu z částečně nebo plně automatizovaného měření. Některá měření jsem dokonce důsledně zadokumentoval i v počítačové podobě především kvůli prezentačním situacím při konzultacích s odborníky přes danou problematiku.

Tato měření však do této práce nezařazuji, protože nedokumentují aktuální stav celého zařízení, ale pouze mezikrok vývoje některých částí přístroje. Pro účel zhodnocení funkčního vzorku bloku A jsem provedl měření základních veličin napěťového stabilizátoru. Pokoušel jsem se měřit i proudovou stabilitu zdroje, ale zdroj v režimu konstantního proudu nevykazoval žádné měřitelné změny dostupnou měřicí technikou (laboratorní magnetoelektrický ampérmetr Metra, rozsah 10 A, třída přesnosti 0,5 %).

Mezní hodnoty, které zdroj v žádném stavu nepřesáhl, jsem zaznamenal do tabulky 6.1. V této tabulce jsou uvedeny i hodnoty, které nebyly získány na základě měření nebo testování, ale které jsem si definoval a dodržoval je při výběru všech součástí a respektoval při návrhu konstrukce laboratorního zdroje. Aby bylo zřejmé, podle čeho je uveden příslušný údaj, popíši zde jednotlivé řádky tabulky. Seznam přístrojů použitých pro měření základních veličin laboratorního zdroje je v příloze J.1.

6.3.1 Rozsah napětí a proudu

Jmenovitý rozsah výstupního napětí a proudu jsou hodnoty, pro které byly navrženy všechny části s jejich trvalým zatížením a v provozu mezních pracovních podmínek definované před začátkem vývoje. Uvažována byla vždy nejhorší možná kombinace mezních parametrů, tedy výstupní napětí nesmí být zvlněno při výstupu 30 V, 5 A, vstupu 207 V a zatížení na maximum všech dalších bloků zdroje. Podobně probíhal návrh i pro teplotní dimenzování jednotlivých prvků. Přestože se za referenčních podmínek i při plném zatížení točí ventilátor pouze na minimální otáčky, bylo nutné respektovat i stav pulzního zatížení v proudovém režimu, kdy střední hodnota proudu zdroje bude dosahovat téměř maxima při malé střední hodnotě výstupního napětí. Pokud ale krátké pulzy neumožní komparátorům přepnout na nižší stupeň předregulátorů, přesáhnou ztráty na výkonovém bloku ideální vypočtené ztráty.

Nastavitelný rozsah výstupního napětí a proudu jsem ověřil měřením, přičemž rozsah napětí byl dostaven podle multimetru Metra M1T290 a rozsah proudu podle magnetoelektrického ampérmetru Metra.

6.3.2 Napěťová stabilita

Pro účel měření napěťových stabilit byl na proudovém regulátoru změněn rozsah do 5,5 A, aby bylo možné měřit parametry zdroje v napěťovém režimu při zatížení 5 A. Měření probíhalo při referenční teplotě $+23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, čili nehrozilo tepelné přetížení výkonových prvků ani při přesáhnutí proudu 5 A. Laboratorní zdroj byl zapnut 15 min. před samotným začátkem předem připraveného měření stabilit. Výstupní napětí jsem měřil přesným číslicovým multimetrem Metra M1T290.

6.3.3 Zvlnění a šum

Výstupní napěťová stabilita se změnou napětí v síti byla změřena v celém rozsahu napájecího napětí $230\text{ V} \pm 10\%$. Měření bylo prováděno při výstupním napětí 30 V naprázdno, se zátěží 1 A a zátěží 5 A. Napěťová stabilita se změnou zatěžovacího proudu v rozsahu 0÷100 % byla měřena při napětí 5 V, 15 V a 30 V.

Zvlnění a šum napětí v napěťovém režimu jsem měřil při výstupních napětích 0 V, 5 V, 15 V a 30 V a výstupu zatěžovaném v rozsahu $0 \div 5$ A drátovými laboratorními rezistory. Střídavou složku napětí jsem měřena milivoltmetrem Tesla BM579, který je určen pro měření střídavých napětí v rozsahu 10 Hz $\div$ 15 MHz. Nejedná se ale o selektivní milivoltmetr, čili měřenou hodnotu ovlivňují i rušivá napětí nad 15 MHz. Z ověřování jeho kmitočtové charakteristiky mám zjištěno, že měří střední hodnotu střídavého napětí s tolerancí $\pm 35\%$ až do kmitočtu 90 MHz.

Při kontrole rušivého napětí na osciloskopu mohu konstatovat, že dominující složkou rušení byl šum, a zvlnění o konstantním kmitočtu nebylo z časového průběhu patrné. Na výstupním napětí nebyly z časového průběhu patrné žádné jehlové impulzy vysoké amplitudy. Přesná hodnota amplitudy však měřena nebyla.

6.3.4 Maximální napětí proti kostře

Pro maximální izolační napětí proti kostře a maximální napětí mezi dvěma libovolnými výstupními zdírkami ± 120 V_{DC} byly vybrány všechny prvky na rozhraní těchto potenciálových hladin a pro toto napětí jsem navrhl všechny desky plošných spojů, které jsou na rozhraní dvou plovoucích hladin.

Celkový test izolační pevnosti jsem zatím neprovedl, protože zařízení ještě není dokončeno. Ani po otestování větším napětím po definovanou dobu ale nebude z bezpečnostních důvodů přípustné je přímo spojit se sítí.

6.3.5 Výstupní odpor a kapacita

Výstupní odpor jsem určil z konstantní složky poklesu napětí při zatížení zdroje, která není závislá na výstupním napětí. Kapacita výstupního kondenzátoru je jmenovitá hodnota udávaná výrobcem elektrolytického kondenzátoru připojeného k výstupním svorkám.

Tab. 6.1: Přehled technických parametrů vyvíjeného laboratorního zdroje

		Blok A
Základní údaje	Jmenovitý rozsah výstupního napětí	$0 \div 30 \text{ V}$
	Jmenovitý rozsah výstupního proudu	$0 \div 5 \text{ A}$
	Nastavitelný rozsah výstupního napětí	$0 \div 30 \text{ V}$
	Nastavitelný rozsah proudového omezení	$0,03 \div 5 \text{ A}$
	Napěťová stabilita se změnou sítě v rozsahu napětí	$\pm(< 0,01 \%)$
	Napěťová stabilita se změnou proudu $0 \div 100 \%$	$\pm(< 0,01 \% + 2 \text{ mV})$
	Doba náběhu t_N	15 min.
	Zvlnění a šum napětí v napěťovém režimu	$\leq 2 \text{ mV}_{\text{EF}}$
	Maximální napětí výstupních svorek proti kostře	$\pm 120 \text{ V}_{\text{DC}}$
	Chyba přesnosti měření napětí dig. / analog.	- / 1,5 %
	Chyba přesnosti měření proudu dig. / analog.	- / 1,5 %
	Výstupní odpor/vodivost	$< 1 \text{ m}\Omega$
	Kapacita výstupního kondenzátoru	$10 \mu\text{F}$
Pracovní podmínky	Rozsah teplot	$+5 \div +40 \text{ }^\circ\text{C}$
	Relativní vlhkost	$45 \div 80 \%$
	Tlak vzduchu	ve výškách $< 2000 \text{ m}$
	Poloha přístroje	Vodorovná ($\pm 5^\circ$) ¹
	Napájecí napětí	$230 \text{ V} \pm 10 \%$
	Druh napájecího proudu	$\sim$ zkreslení $< 5 \%$ ²
	Kmitočet napájecího napětí	50 Hz
Všeobecné	Příkon	700 VA
	Rozměry přístroje $\bar{s} \times v \times h$ [mm]	$435 \times 147 \times 324$
	Hmotnost	12,2 kg
	Komunikační rozhraní	U
	Chlazení	Ventilátory

¹Vodorovná nebo nakloněná se sklonem $\pm 5^\circ$

²Střídavý sinusový, se zkreslením menším než 5 %

6.3.6 Pracovní podmínky

Rozsah pracovních teplot vychází jednak z tepelného dimenzování výkonových prvků a také z katalogových listů jednotlivých součástek vybraných pro stavbu zdroje. Podobně i relativní vlhkost a maximální pracovní výška je definována na základě dokumentací k použitým součástkám. Pro zvýšení odolnosti proti vlhkosti jsou všechny plošné spoje lakované. Poloha je definovaná především z důvodu použitého ručičkového měřidla a také kvůli samovolnému odvodu tepla ze součástek na deskách plošných spojů a z bočníků.

Rozsah napájecího napětí vychází z normy ČSN EN 50160. Sinusový průběh proudu je nutný pro správnou činnost triakových spínačů a pro optimální průběh nabíjení kondenzátorů. Je tedy nepřípustné napájet laboratorní zdroj např. ze záložního zdroje s obdélníkovým výstupním napětím.

Příkon zatím nebylo možné změřit, protože nejsou dokončeny všechny části zdroje, ale vychází z propočtů, které sloužily pro návrh síťového transformátoru.

6.3.7 Dynamické parametry

Při testování zdroje a nastavování regulátoru jsem prováděl i měření odezvy zdroje na jednotkový skok pomocí elektronické zátěže vlastní výroby. Z tohoto měření bohužel nemám záznamy přechodových charakteristik v elektronické podobě. Každopádně malé odezvy napětí na proudový skok mají integrační charakter a při přechodových dějích nedocházelo k sebemenšímu zakmitávání. Tento efekt lze minimalizovat zrychlením regulační smyčky nebo zvýšením kapacity výstupního kondenzátoru. Ani jedno řešení nechci provádět, neboť odezvy nebyly příliš velké a obě řešení by přinesla spíše nevýhody. Pro pulzní zátěž o větším odebíraném proudu je ale vhodné doplnit filtrační kondenzátor vně zdroje.

S dynamickými vlastnostmi zdroje jsem velmi spokojený a potěšilo mě, že zdroj odolává lépe pulzním zátěžím, než některé jiné laboratorní zdroje, na kterých jsem podobné měření prováděl.

7 ZÁVĚR

V počátcích prvních návrhů částí tohoto zdroje jsem neměl ani představu o tom, jak náročné je vyvinout a postavit zařízení takového rozsahu. I přes dřívější zkušenost s návrhem elektronických obvodů a s konstrukcí elektronických přístrojů jsem se dostal k řešení velkého množství problémů, kterými se u zařízení menšího rozsahu není třeba zabývat. Návrhu finálních částí laboratorního zdroje předcházely simulace částí elektronických obvodů na počítači, testování v nepájivých kontaktních polích a stavby prototypových částí.

Vzhledem k rozsahu vývoje bylo nutné hned od počátku všechny části důsledně dokumentovat. Zdokumentovány jsou i všechny prototypové celky, ale kvůli velkému rozsahu kompletní dokumentace vývoje a formě některých dokumentů z vývoje je zde neuvádím. Dokumenty psané nebo kreslené ručně, případně vytištěné budou k nahlédnutí u obhajoby této práce. Jedná se ale o přibližně 200 stran, jejichž popis a zanesení do bakalářské práce bylo nad její přípustný rozsah a časové možnosti k jejímu zpracování.

V práci jsem popisoval pouze části, které jsou už vyvinuté do finální verze a u dílů, kde ještě není jasné, ke které koncepci se přikloním (zejména regulátory všech bloků), jsem uvedl poslední dokončenou a vyrobenou verzi prototypu, která má jednoznačnou dokumentaci. Vlivem postupného vývoje jednotlivých částí a nahrazování prototypů finálními bloky není snadné udržet konzistentní celkové pospojování bloků k sobě. Na jednotlivých výkresech tedy jsou uvedeny významy signálů a popis, kam vedou.

Mrzí mě, že text bakalářské práce jsem musel zestručnit do vysvětlení jedné z funkčních variant a o ostatních jsem se už nezmínil. Nevysvětlil jsem v práci ani problémy, které nastaly při vývoji dané části, ale vzhledem k jejich počtu to nebylo možné. I přesto si ale myslím, že jsem dostatečně splnil všech pět bodů zadání a že ji mohu považovat za dokončenou. Každopádně v případě hlubšího zájmu o kteroukoliv z částí rád poskytnu veškeré informace, které jsem během vývoje získal.

LITERATURA

- [1] Agilent Technologies. DC power supply handbook - application note 90B. [online] <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5952-4020.pdf>>, Naposledy navštíveno 21. 12. 2016.
- [2] TESLA. *Dokumentace - stabilizovaný zdroj - TESLA; BS 554.*
- [3] Šrotýř M. *Elektrická měření I - Elektronické měřicí přístroje a měření pro 3. ročník studijního oboru mechanik.* SNTL, 1982.
- [4] TESLA ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY Koncern Rožnov. *Konstrukční katalog lineárních integrovaných obvodů.* Export KOVO, 1980.
- [5] Závod průmyslové automatizace Košíře. *Tranzistorový stabilizovaný zdroj AUL 210 - návod.*
- [6] Agilent Technologies. *User's Guide - Triple Output DC Power Supply - Agilent E3631A*, 2000.
- [7] LTD SIGLENT TECHNOLOGIES CO. User manual - programmable DC power supply - SPD3000 series. [online] <http://www.pinsonne.de/media/daten/SPD3000_UserManual_EN.pdf>, Naposledy navštíveno 14. 10. 2016.
- [8] Tektronix. PWS2185, PWS2323, PWS2326, and PWS2721 - linear DC power supplies - user manual. [online] <<http://www.tek.com/dc-power-supply/pws2185-manual/pws2185-pws2323-pws2326-and-pws2721>>, Naposledy navštíveno 9. 10. 2016.
- [9] Tektronix. PWS4205, PWS4305, PWS4323, PWS4602, and PWS4721 - linear DC power supplies - user manual. [online] <<http://www.tek.com/dc-power-supply/pws4205-manual/pws4205-pws4305-pws4602-pws4721>>, Naposledy navštíveno 20. 12. 2016.
- [10] TESLA. *Dokumentace - programovatelný zdroj - TESLA; BS 575.*
- [11] Agilent Technologies. *Service Guide - DC Power Supply - Agilent E3631A*, 2000.
- [12] Diametral. *Laboratorní zdroj - model 130R51D, P230R51D, V130R50D.*
- [13] MASTECH. DC power supply, users manual (HY3005D). [online] <https://www.rapidonline.com/pdf/554305_v1.pdf>, Naposledy navštíveno 10. 10. 2016.

- [14] Teplice RADIOTECHNIKA, podnik ÚV Svazarmu. *Instrukční příručka - stabilizovaný zdroj RSZ 30 P*.
- [15] GHV Trading. Laboratorní zdroje a zátěže statron. [online] <<https://www.ghvtrading.cz/download.php?fileid=414>>, Naposledy navštíveno 8. 10. 2016.
- [16] Tektronix. DC power supplies - tektronix PWS2000 series data sheet. [online] <<http://www.tek.com/datasheet/pws2000-dc-power-supply>>, Naposledy navštíveno 9. 10. 2016.
- [17] UNI-T. UTP3700 series - operating manual - DC power supply. [online] <<https://www.gme.cz/data/attachments/orn.722-492.1.pdf>>, Naposledy navštíveno 9. 10. 2016.
- [18] TME. TME - KEYSIGHT TECHNOLOGIES E3631A. [online] <<http://www.tme.eu/cz/details/e3631a/programovatelne-napajeci-zdroje/keysight-technologies/>>, Naposledy navštíveno 10. 12. 2016.
- [19] Diametral. Diametral - laboratorní zdroj P130R51D 1x 0÷30v/4a; 1x 5v/3a. [online] <<http://www.diametral.cz/ac-dc-zdroje/dc-regulovatelne-zdroje/laboratorni/laboratorni-zdroj-p130r51d-1x-030v/4a-1x-5v/3a.html>>, Naposledy navštíveno 25. 11. 2016.
- [20] HAKOM. HAKOM - zdroj laboratorní HY3005D 0-30V/0-5A. [online] <http://www.satelitnishop.cz/product/napajeci-zdroje/zdroje-laboratorni/zdroj-laboratorni-hy3005d-0-30v_0-5a---d/1310>, Naposledy navštíveno 10. 12. 2016.
- [21] SIGLENT.EU. SIGLENT.EU - SPD3303X-E. [online] <<http://www.siglent.eu/spd3303x-e-power-supply.html>>, Naposledy navštíveno 25. 11. 2016.
- [22] GHV Trading. GHV Trading - 2223.0 - stabilizovaný zdroj statron. [online] <<https://www.ghvtrading.cz/merici-pristroje/laboratorni/zdroje/22230.html>>, Naposledy navštíveno 25. 11. 2016.
- [23] Elex Brno. Elex brno - tektronix PWS2323 ss zdroj 0-32v/3a. [online] <<http://www.elexbrno.cz/detail.php?proId=865&secId=94>>, Naposledy navštíveno 25. 11. 2016.
- [24] GM Electronic. GM Electronic - laboratorní zdroj UNI-T UTP3705. [online] <<https://www.gme.cz/laboratorni-zdroj-uni-t-utp3705>>, Naposledy navštíveno 10. 12. 2016.

- [25] Závod průmyslové automatizace Košíře. *AUL 310 - návod*.
- [26] TESLA. *Dokumentace - stabilizovaný zdroj - TESLA; BS 525*.
- [27] Vrba K. *Konstrukce elektronických zařízení*. VUT v Brně, FEKT, UREL, 2013.
- [28] Jones D. L. Siglent SPD3303X precision lab PSU teardown. [online] <<https://www.youtube.com/watch?v=md0auVzY90U&feature=youtu.be&t=1634>>, Na-
posledy navštíveno 30. 9. 2016.
- [29] Palík F. Dvořáček V. *Střídavá posunovací lokomotiva S 458.0*. NADAS
PRAHA, 1975.
- [30] TESLA. *Dokumentace - stabilizovaný zdroj - TESLA; BK 180*.
- [31] Krejčířík A. *Lineární napájecí zdroje*. BEN - technická literatura, 2001.
- [32] Krofta J. Mallat J. *Stabilizované napájecí zdroje pro mikroelektroniku*. SNTL,
1985.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

b	vložený útlum filtru – útlum v dB vyjadřující poměr sinusového napětí na vstupu filtru ku napětí na výstupu filtru
C_I	Vnitřní kapacita – vstupní kapacita měřicího přístroje
$\frac{dU_D}{dt}$	Kritická strmost nárůstu blokovacího napětí na tyristoru nebo na triaku
G_I	Výstupní vodivost zdroje v proudovém režimu
h	Hloubka – rozměr přístroje
I	Výstupní proud ze zdroje
I_K	Proud ze zdroje nakrátko – se zkratovanými výstupními svorkami
I_M	Mezní proud – hodnota proudu, při které se zdroj přepíná mezi režimem konstantního napětí a proudovým omezením
$I_{PŘ}$	Přechodový proud – proud, o který by měla být nastavena větší úroveň proudového omezení než proud zátěží, aby byly zaručovány parametry napěťového stabilizátoru
P_B	Ztrátový výkon na odporovém bočníku
R_B	Odpor bočníku
R_I	Vnitřní odpor – vstupní odpor měřicího přístroje nebo výstupní odpor generátoru
R_{MEZ}	Mezní zatěžovací odpor – hodnota zatěžovacího odporu, při které dochází ke změně režimu zdroje
R_U	Výstupní odpor zdroje v napěťovém režimu
R_Z	Odpor zátěže – hodnota zatěžovacího odporu připojeného k výstupním svorkám
$\check{s}$	Šířka – rozměr přístroje
U	Výstupní napětí na svorkách zdroje
U_0	Napětí zdroje naprázdno – s rozpojenými výstupními svorkami

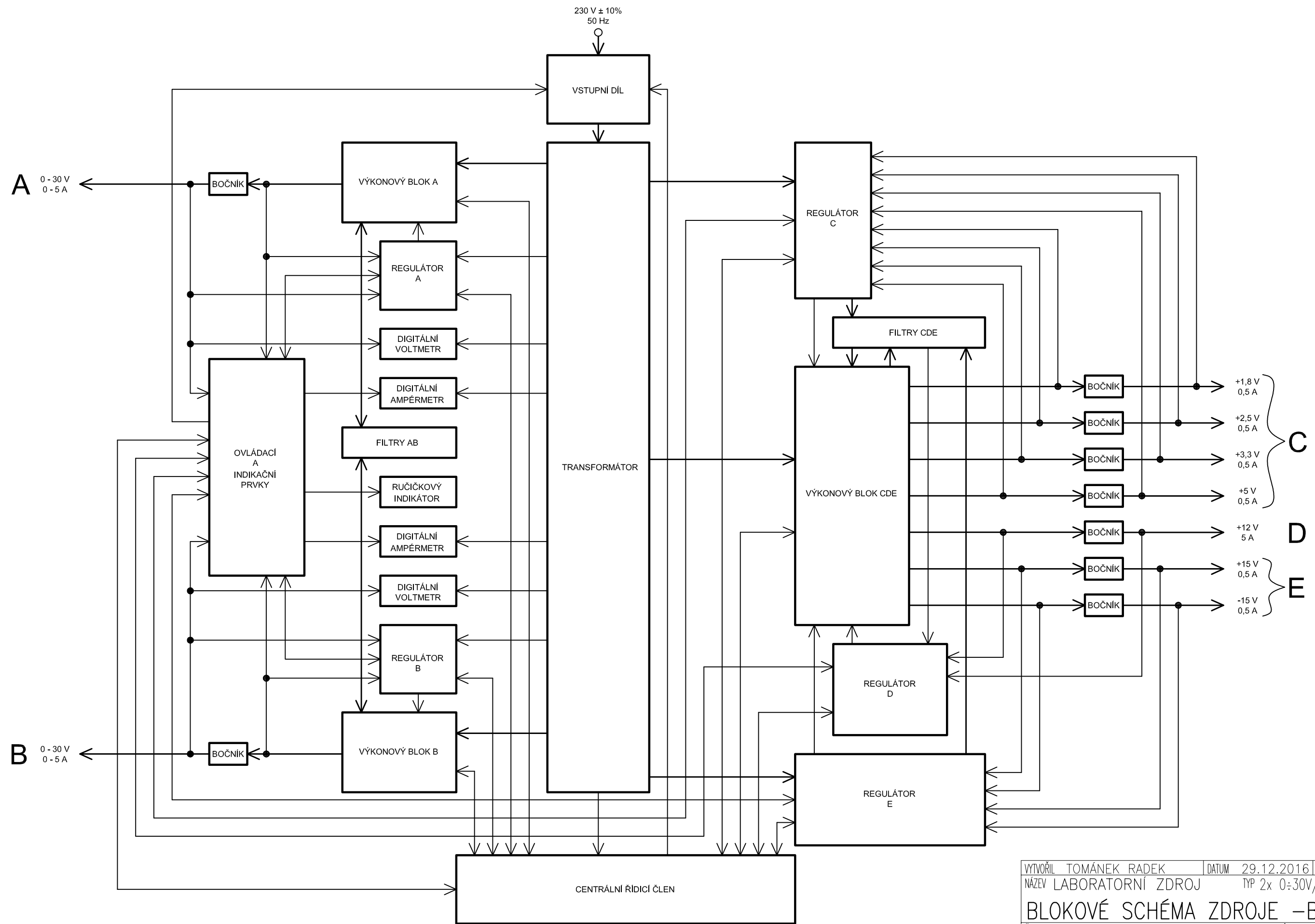
U_1	Vstupní sinusové napětí filtru – měřeno bezprostředně na vstupních svorkách filtru
U_2	Výstupní napětí filtru – měřeno bezprostředně na výstupních svorkách filtru
U_C	Napětí na kondenzátoru stejnosměrného meziobvodu
$U_{PŘ}$	Přechodové napětí – napětí, o které by mělo být nastaveno větší napětí než úbytek napětí na zátěži, aby byly zaručovány parametry proudového stabilizátoru
$\Delta U_{STAB.}$	Úbytek napětí na lineárním stabilizátoru
U_T	Úbytek napětí na tyristoru nebo na triaku v propustném směru
v	Výška – rozměr přístroje
DC/DC	Direct Current/Direct Current – měnič stejnosměrného napětí na stejnosměrné napětí o jiné velikosti
EMC	Electromagnetic Compatibility – elektromagnetická kompatibilita
Ethernet	Název souhrnu technologií pro počítačové sítě
EXT REF	Externí reference – Tlačítko pro volbu vnějšího řízení napětí nebo proudu u zdroje ZPA Košíře AUL210
GPIB	General Purpose Interface Bus
IMS-2	Informační Měřicí Systém - 2. generace
LED	Light-Emitting Diode – světlo vyzařující dioda
NRFD	Not Ready For Data – Nepřipraven na data je signál na sběrnici IMS-2 a GPIB, který informuje mluvčího nebo řídicí jednotku o nedokončení zpracování předchozích dat
R	Odpor – analogově ovládaný zdroj vnějším odporem
RS-232	Sériová linka
TTL	Transistor-Transistor Logic – tranzistorově-tranzistorová logika
U	Napětí – analogově ovládaný zdroj vnějším napětím
USB	Universal Serial Bus

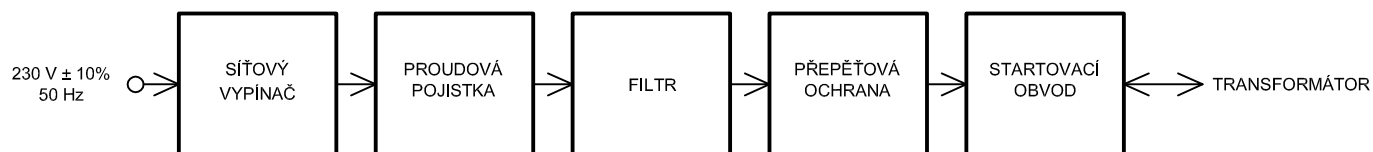
SEZNAM PŘÍLOH

A Přílohy - bloková schémata zdroje	95
A.1 Blokové schéma celého zdroje	95
B Přílohy - Vstupní díl	96
B.1 Blokové schéma vstupního dílu	96
B.2 Obvodové schéma vstupního dílu	97
B.3 Osazovací plán desky vstupního dílu - vrchní strana	98
B.4 Osazovací plán desky vstupního dílu - spodní strana	99
B.5 Předloha desky vstupního dílu - spodní strana	100
B.6 Konstrukční výkres vstupního dílu	101
C Přílohy - Výkonový blok	102
C.1 Blokové schéma výkonového bloku	102
C.2 Obvodové schéma výkonového bloku	103
C.3 Osazovací plán desky výkonového bloku - vrchní strana	104
C.4 Osazovací plán desky výkonového bloku - spodní strana	105
C.5 Předloha desky výkonového bloku - vrchní strana	106
C.6 Předloha desky výkonového bloku - spodní strana	107
C.7 Konstrukční výkres chladiče výkonového bloku	108
D Přílohy - Filtry	109
D.1 Obvodové schéma filtrů	109
D.2 Osazovací plán desky filtrů - vrchní strana	110
D.3 Předloha desky filtrů - spodní strana	111
E Přílohy - Regulátor A, B	112
E.1 Blokové schéma regulátoru A, B	112
E.2 Obvodové schéma regulátoru U a I	113
E.3 Osazovací plán desky regulátoru U a I - vrchní strana	114
E.4 Předloha desky regulátoru U a I - spodní strana	115
E.5 Obvodové schéma komparátorů	116
E.6 Osazovací plán desky komparátorů - vrchní strana	117
E.7 Předloha desky komparátorů - spodní strana	118
F Přílohy - Blok E	119
F.1 Obvodové schéma prototypu bloku E	119

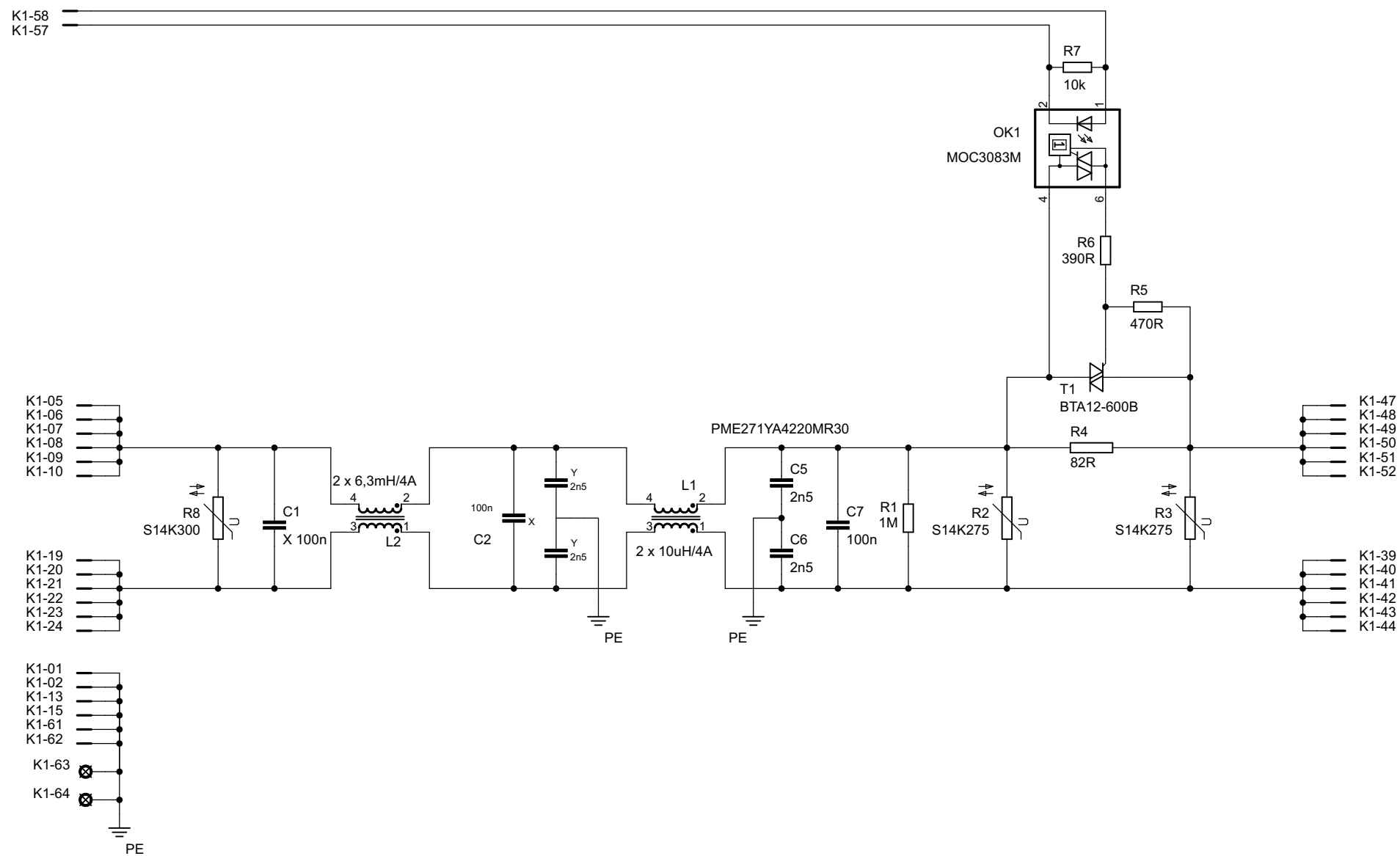
G Přílohy - Digitální voltmetr	120
G.1 Blokové schéma digitálního voltmetru	120
H Přílohy - Čelní panel	121
H.1 Obvodové schéma čelního panelu	121
H.2 Konstrukční výkresy předního panelu	123
H.3 Subpanely čelního panelu	126
H.3.1 Konstrukční výkres subpanelu 1	126
H.3.2 Konstrukční výkres subpanelu 2	127
H.3.3 Konstrukční výkres subpanelu 3	128
H.3.4 Konstrukční výkres subpanelu 4	129
H.3.5 Obvodové schéma subpanelu 5	130
H.3.6 Osazovací plán desky subpanelu 5 - vrchní strana	131
H.3.7 Předloha desky subpanelu 5 - spodní strana	132
H.3.8 Obvodové schéma subpanelu 6	133
H.3.9 Osazovací plán desky subpanelu 6 - vrchní strana	134
H.3.10 Předloha desky subpanelu 6 - spodní strana	135
H.3.11 Obvodové schéma subpanelu 7	136
H.3.12 Osazovací plán desky subpanelu 7 - vrchní strana	137
H.3.13 Předloha desky subpanelu 7 - spodní strana	138
H.3.14 Obvodové schéma subpanelu 8	139
H.3.15 Osazovací plán desky subpanelu 8 - vrchní strana	140
H.3.16 Předloha desky subpanelu 8 - spodní strana	141
H.3.17 Obvodové schéma subpanelu 9	142
H.3.18 Osazovací plán desky subpanelu 9 - vrchní strana	143
H.3.19 Osazovací plán desky subpanelu 9 - spodní strana	144
H.3.20 Předloha desky subpanelu 9 - vrchní strana	145
H.3.21 Předloha desky subpanelu 9 - spodní strana	146
H.3.22 Obvodové schéma subpanelu 11	147
H.3.23 Osazovací plán desky subpanelu 11 - spodní strana	148
H.3.24 Předloha desky subpanelu 11 - spodní strana	149
H.3.25 Konstrukční výkres desky subpanelu 11 - vrchní strana	150
H.4 Potisk stupnice ručičkového měřicího přístroje	151
H.5 Konstrukční výkres zadního panelu	152
H.6 Subpanely zadního panelu	153
H.6.1 Obvodové schéma subpanelu 1	153
H.6.2 Osazovací plán desky subpanelu 1 - vrchní strana	154
H.6.3 Osazovací plán desky subpanelu 1 - spodní strana	155
H.6.4 Předloha desky subpanelu 1 - vrchní strana	156

H.6.5	Předloha desky subpanelu 1 - spodní strana	157
H.6.6	Konstrukční výkres desky subpanelu 1 - vrchní strana	158
H.7	Skříň laboratorního zdroje	159
H.7.1	Výkres distančního sloupku pro upevnění konektorů	159
I	Přílohy - Seznam součástek	160
I.1	Seznam součástek vstupního dílu	160
I.2	Seznam součástek výkonového bloku A, B	160
I.3	Seznam součástek filtrů AB	162
I.4	Seznam součástek regulátoru A, B	162
I.5	Seznam součástek komparátorů	163
I.6	Seznam součástek subpanelu 5 předního panelu	164
I.7	Seznam součástek subpanelu 6 předního panelu	164
I.8	Seznam součástek subpanelu 8 předního panelu	165
I.9	Seznam součástek subpanelu 11 předního panelu	165
J	Použité přístroje při měření dosažených parametrů zdroje	165



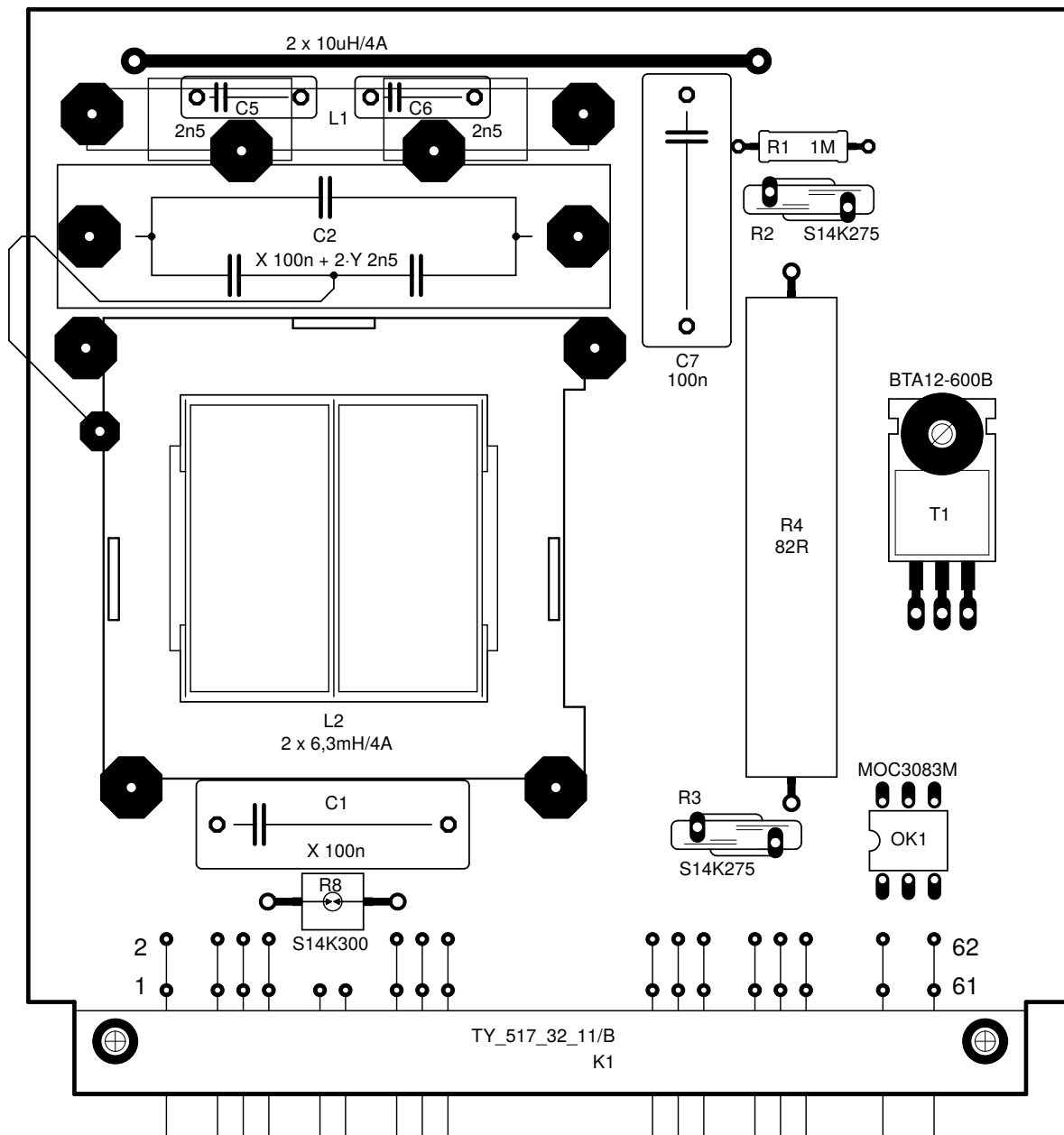


VYTVŮŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	1.10.2016	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ		TYP 2x 0÷30V/0÷5A	
VSTUPNÍ DÍL –BLS				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001–2–24–08–01–B				

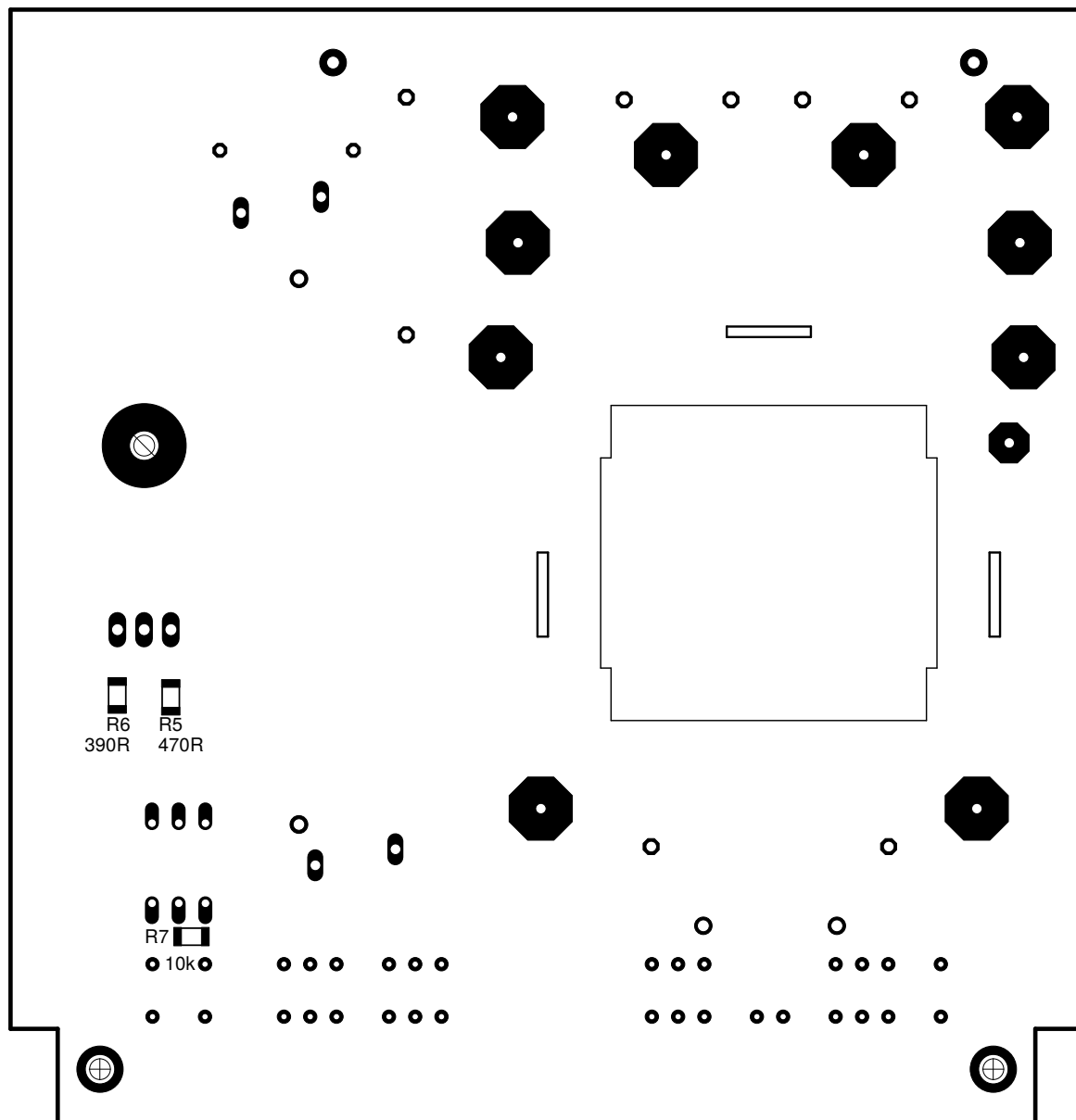


(c) Změna R4 z 82R na 56R/10W
(c) Změna R2 z 800V na 275V
(c) Změna R3 z 800V na 275V
(c) Záměna B1 za R8 300V

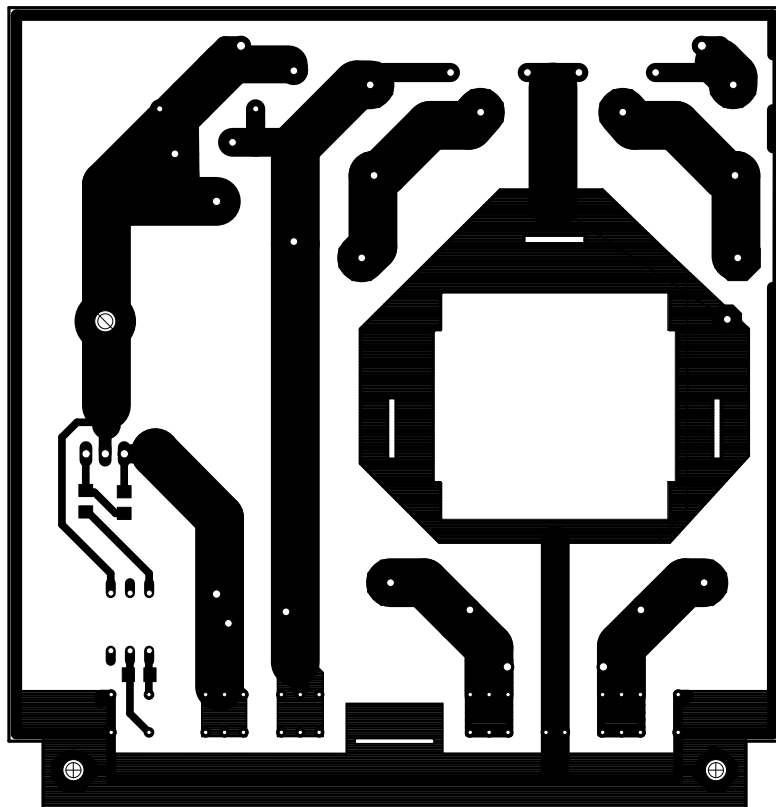
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	19.4.2017	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
VSTUPNÍ DÍL -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-24-01-03-C				



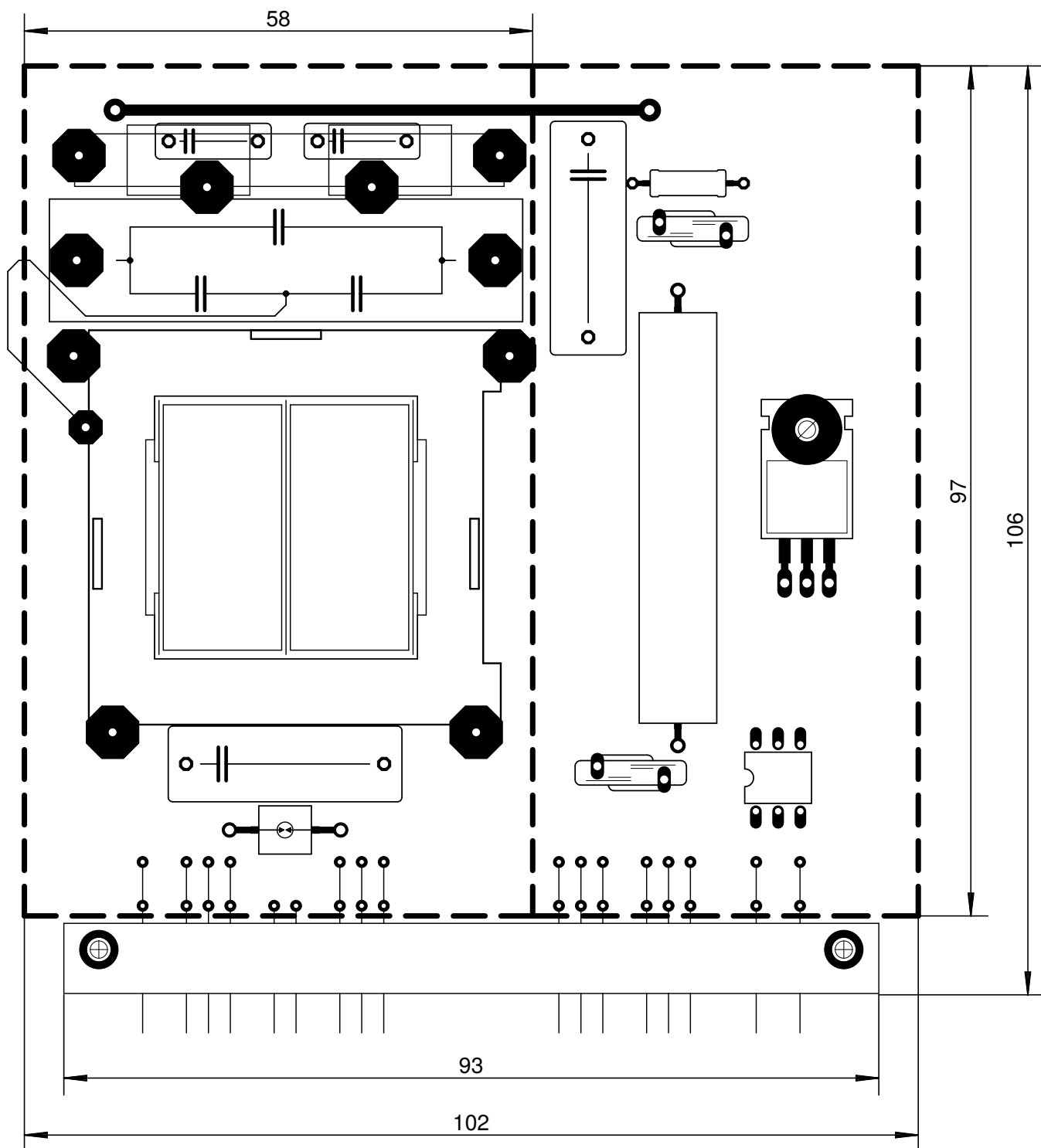
VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	11.3.2017	MĚŘÍTKO	3:2
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
VSTUPNÍ DÍL -OST					
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-24-04-03-C		LISTŮ:	LIST:	



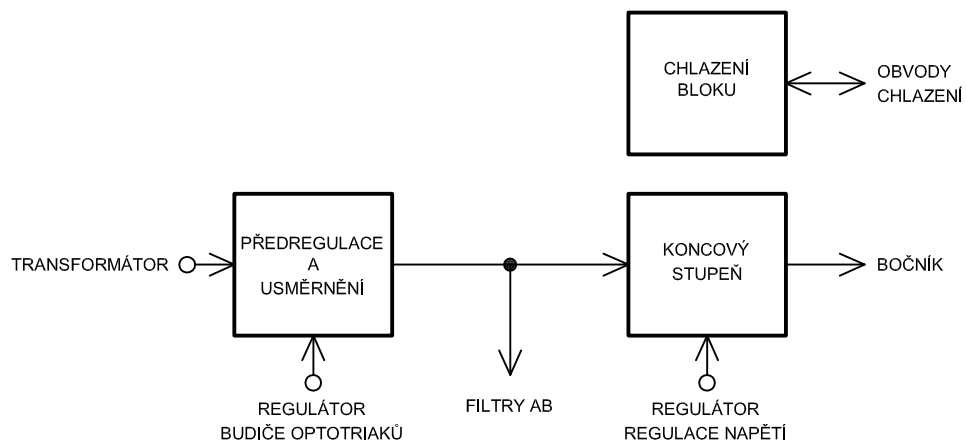
VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	11.3.2017	MĚŘÍTKO	3:2
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
VSTUPNÍ DÍL -OSB					
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-24-05-03-C		LISTŮ:	LIST:	



VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	11.3.2017	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
VSTUPNÍ DÍL -BRB					
ČÍSLO VÝKRESU			LISTŮ:	LIST:	
0001-3-24-03-03-C					

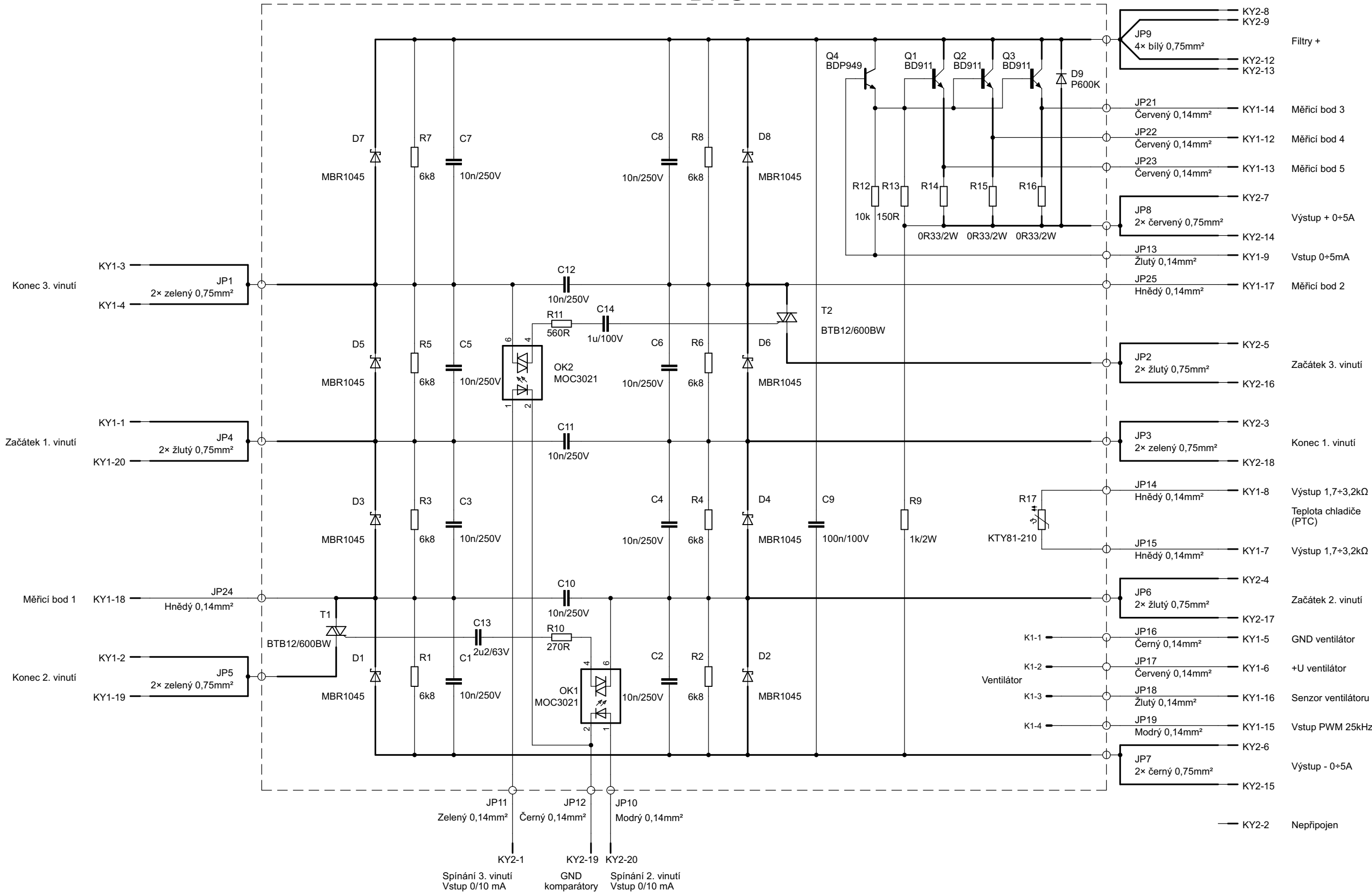


VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	11.3.2017	MĚŘÍTKO	3:2
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
VSTUPNÍ DÍL -SOT					
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-24-09-03-C		LISTŮ:	LIST:	

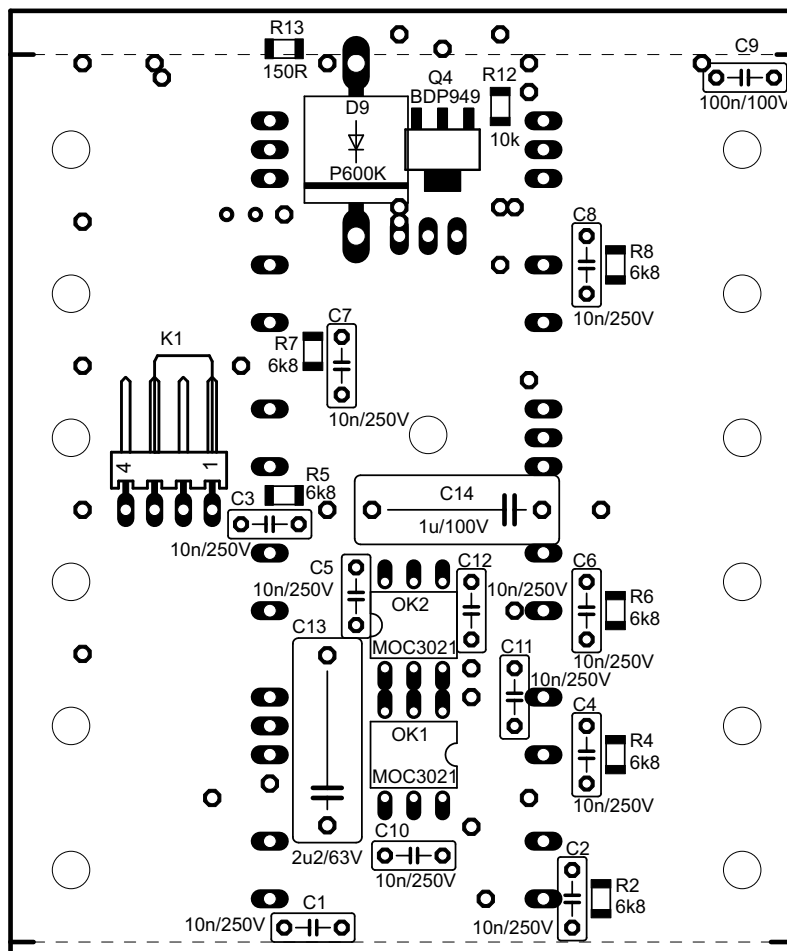


VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	1.10.2016	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ		TYP 2x 0÷30V/0÷5A	
VÝKONOVÝ BLOK A, B –BLS				
ČÍSLO VÝKRESU		LISTŮ:		LIST:
0001–2–01–08–04–D				

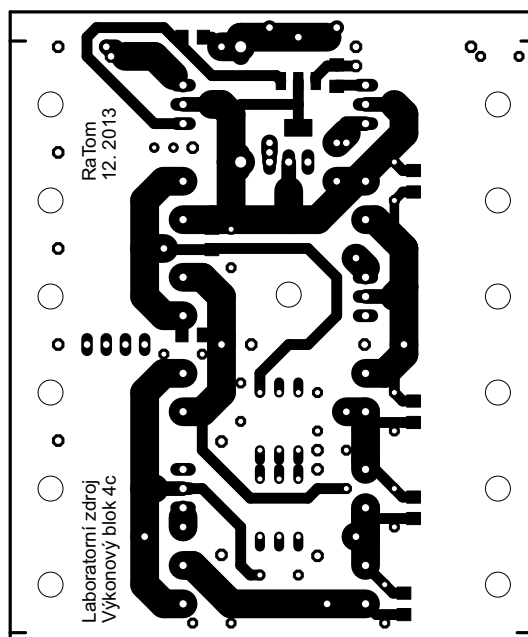
DPS



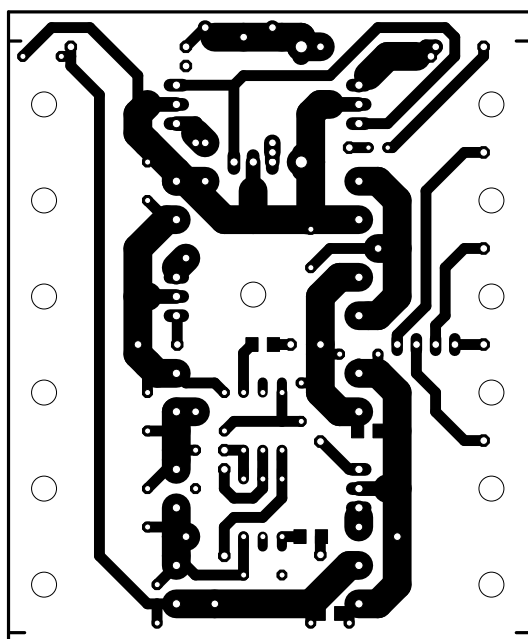
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.11.2013	MĚŘITKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ		TYP	2x 0÷30V/0÷5A
VÝKONOVÝ BLOK A,B -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-01-01-04-C				



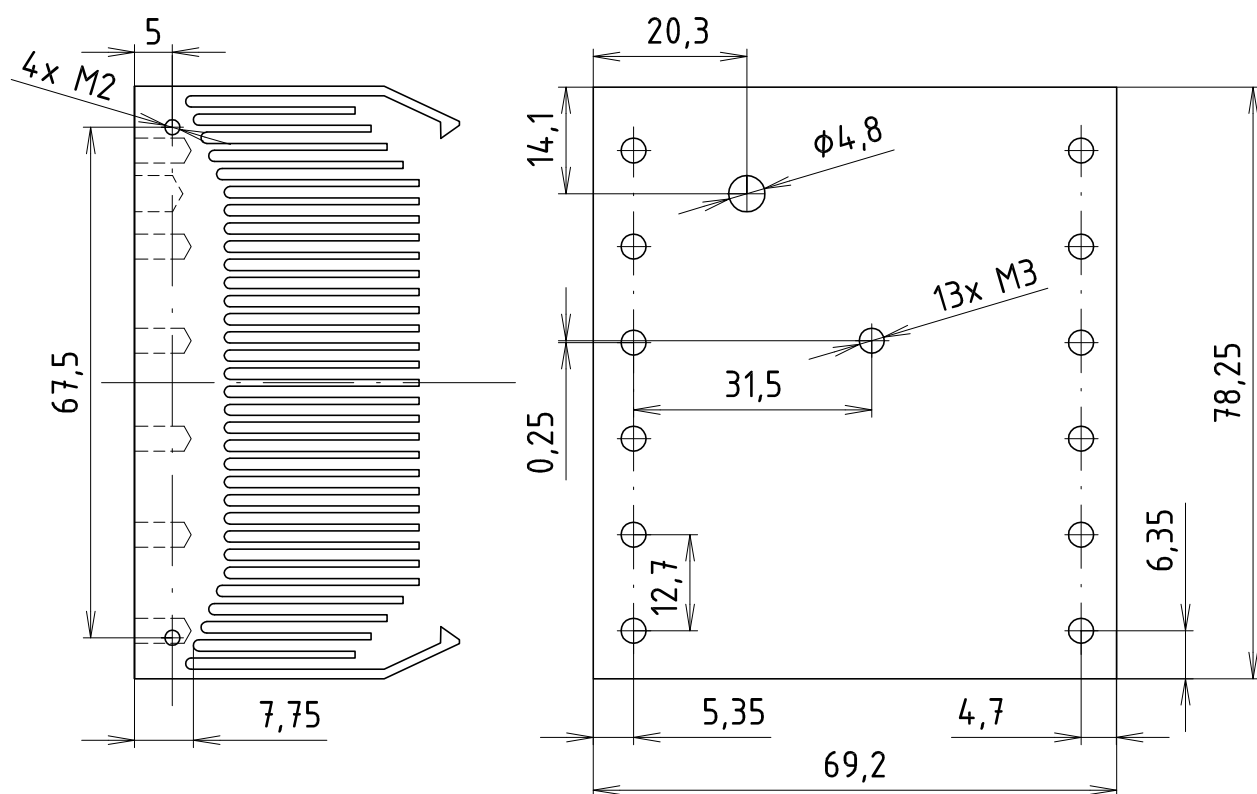
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.11.2013	MĚŘÍTKO	3:2
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
VÝKONOVÝ BLOK A,B -OST					
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-01-04-04-C		LISTŮ:	LIST:	



VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.11.2013	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
	VÝKONOVÝ BLOK A,B -BRT				
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-01-02-04-C		LISTŮ:	LIST:	

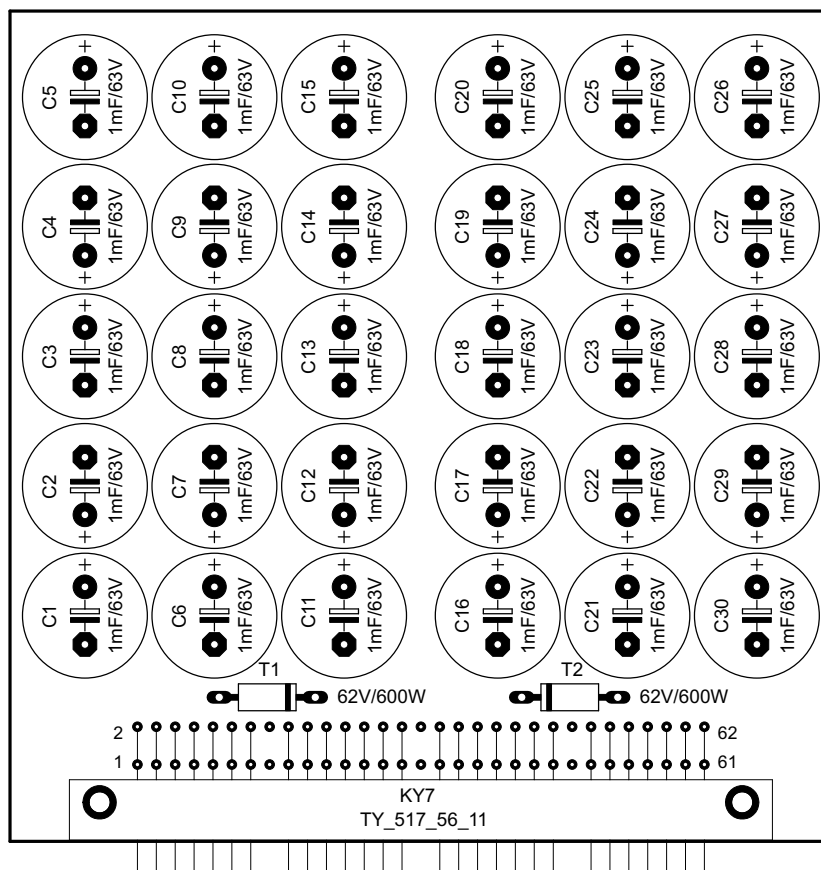


VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.11.2013	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
VÝKONOVÝ BLOK A,B -BRB					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:			LIST:	
0001-3-01-03-04-C					

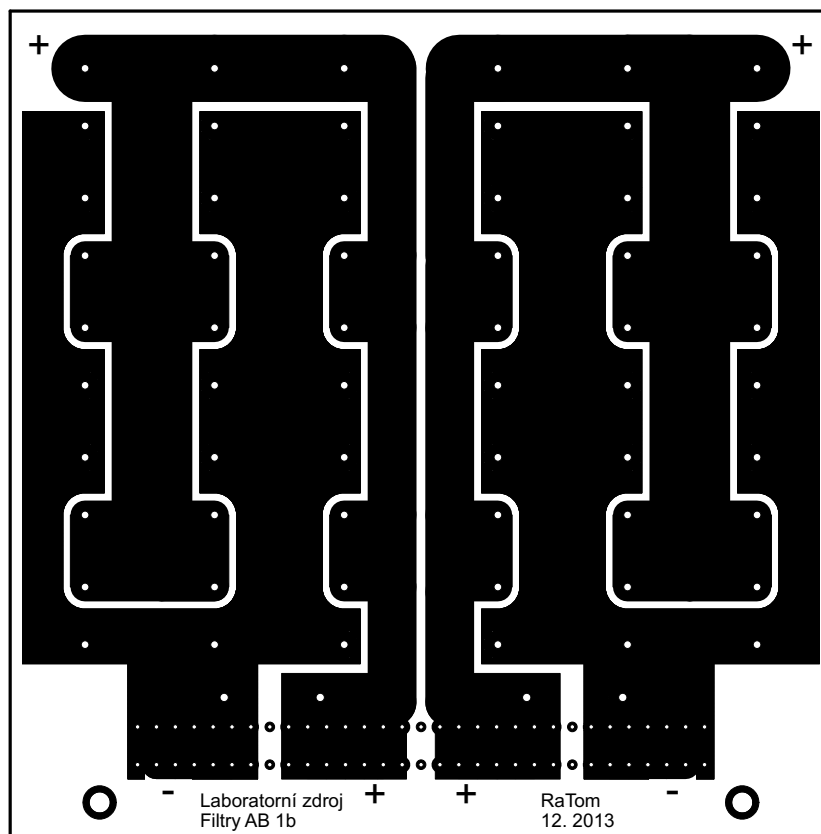


VYTVŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	7.12.2013	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ		TYP 2x 0÷30V/0÷5A		
VÝKONOVÝ BLOK A,B-CHLADIČ –SOU					
ČÍSLO VÝKRESU		LISTŮ:		LIST:	
0001-3-01-06-04-C					

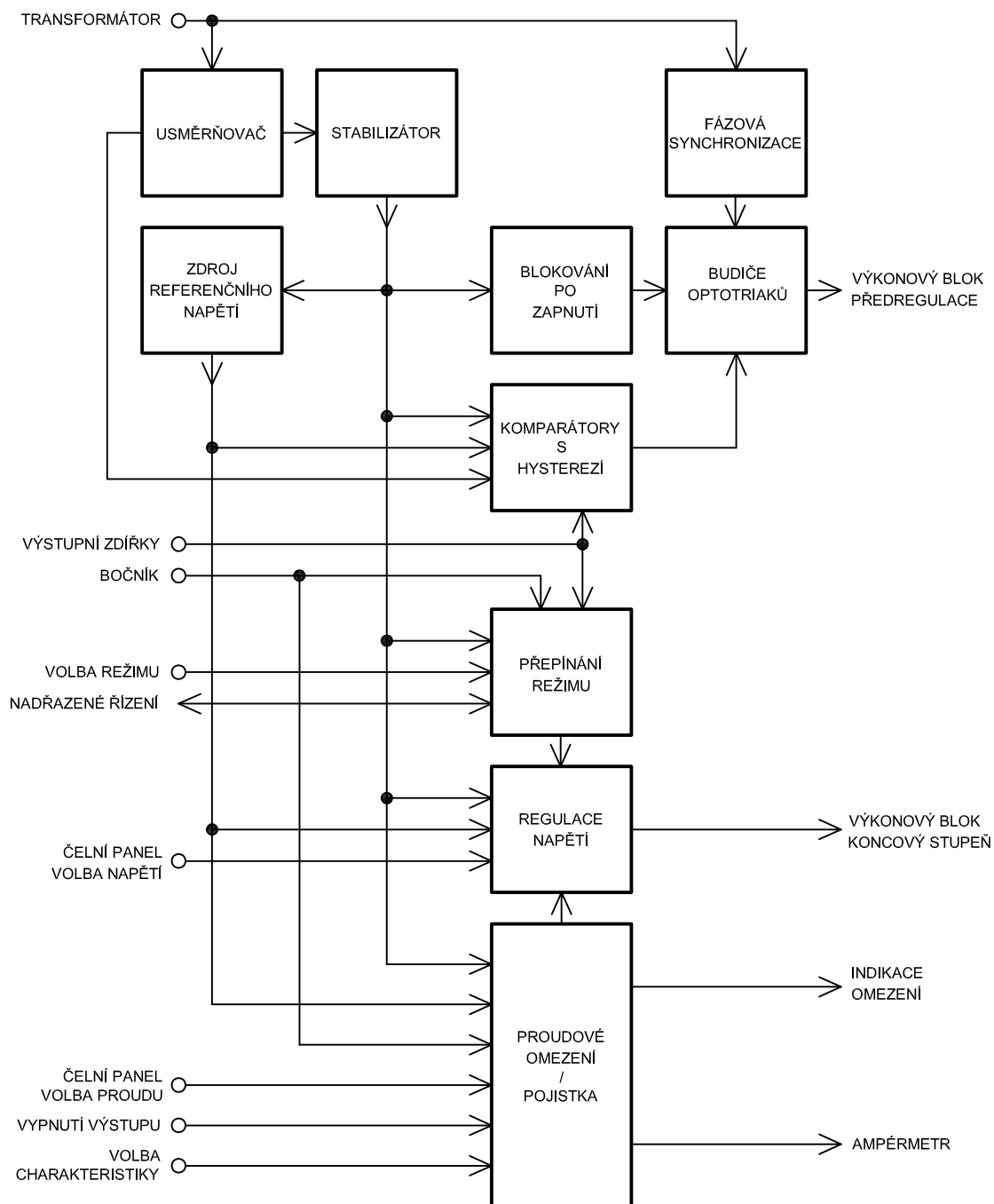




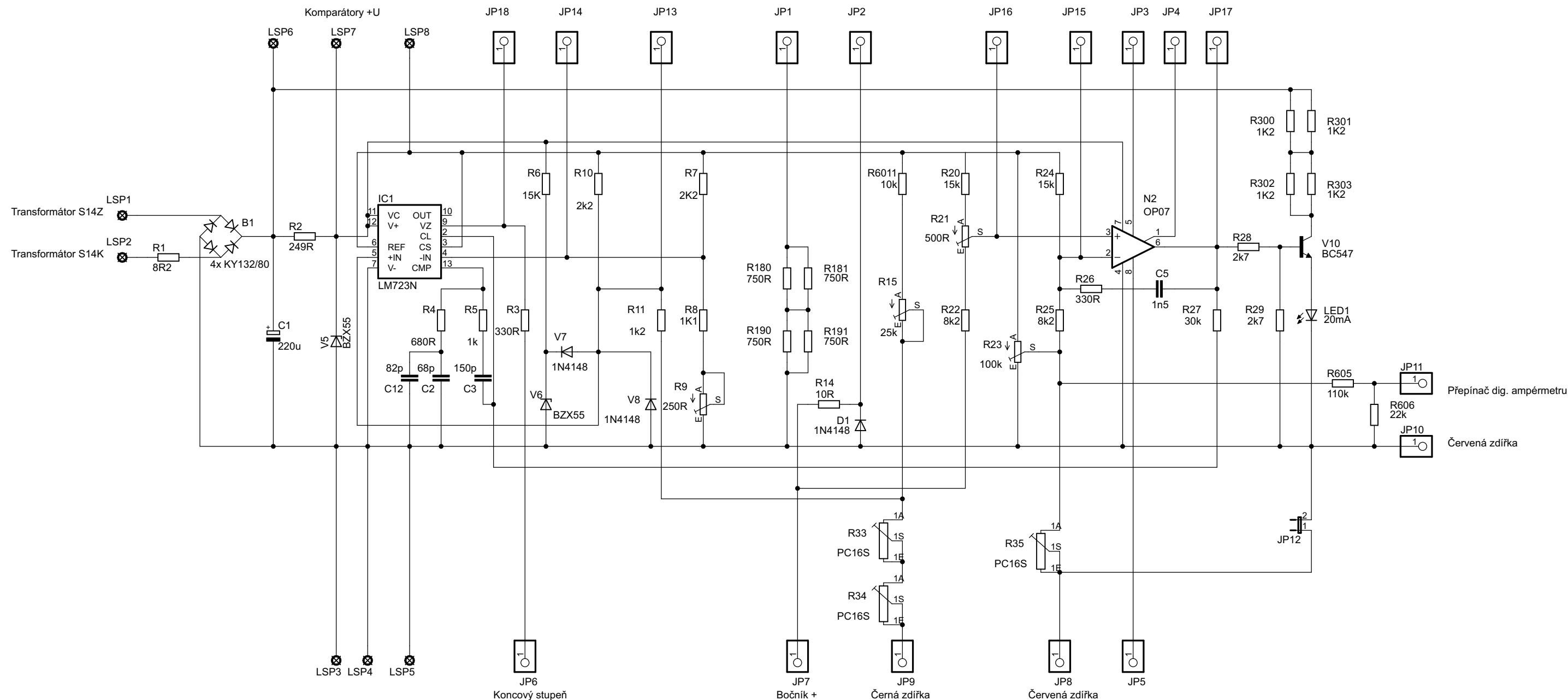
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	18.12.2013	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
FILTRY AB -OST					
ČÍSLO VÝKRESU			LISTŮ:	LIST:	
0001-3-03-04-01-B					



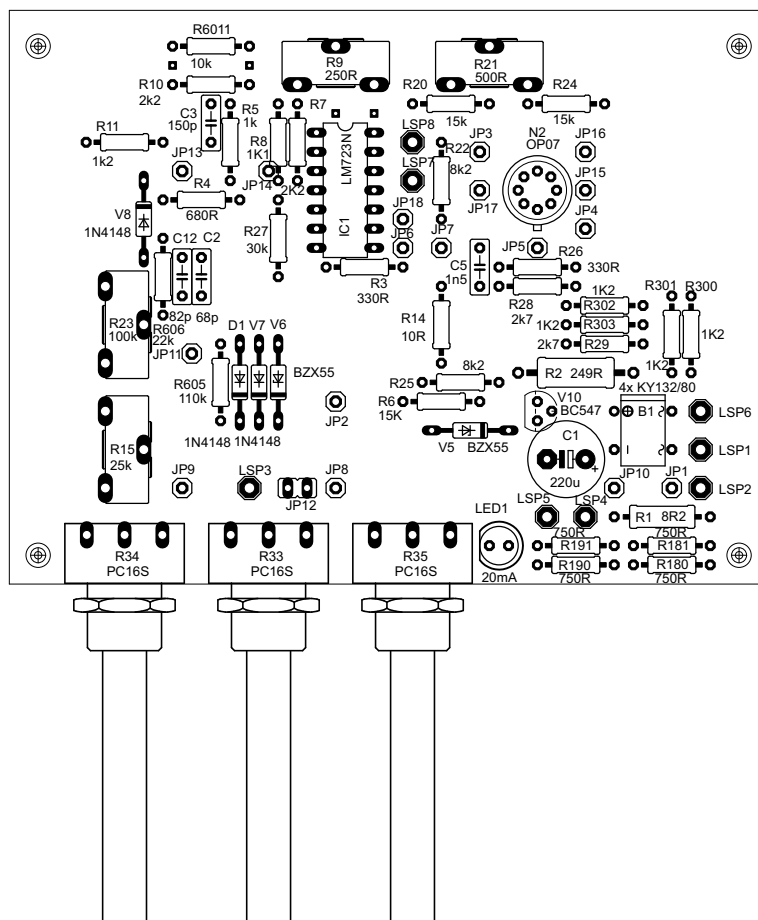
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	18.12.2013	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
	FILTRY AB -BRB				
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-03-03-01-B				
		LISTŮ:		LIST:	



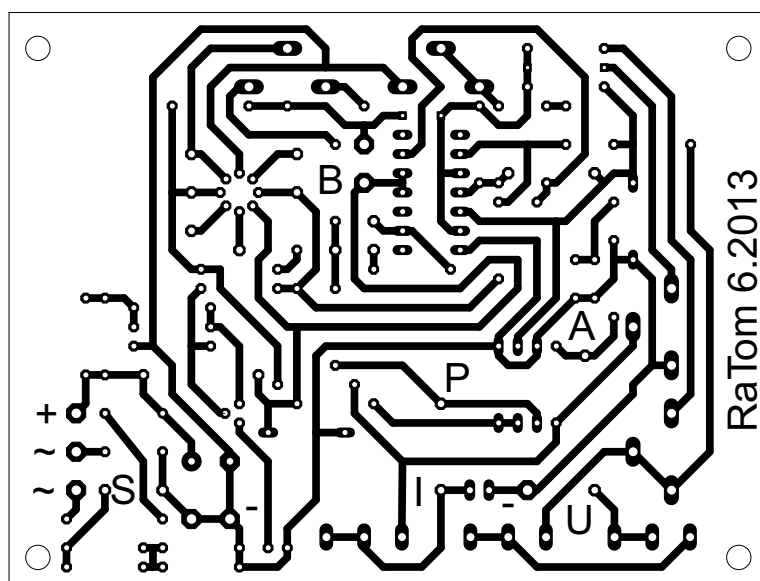
VTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	4.1.2017	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ		TYP 2x 0÷30V/0÷5A	
REGULÁTOR A,B –BLS				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001–2–17–08–02–A				



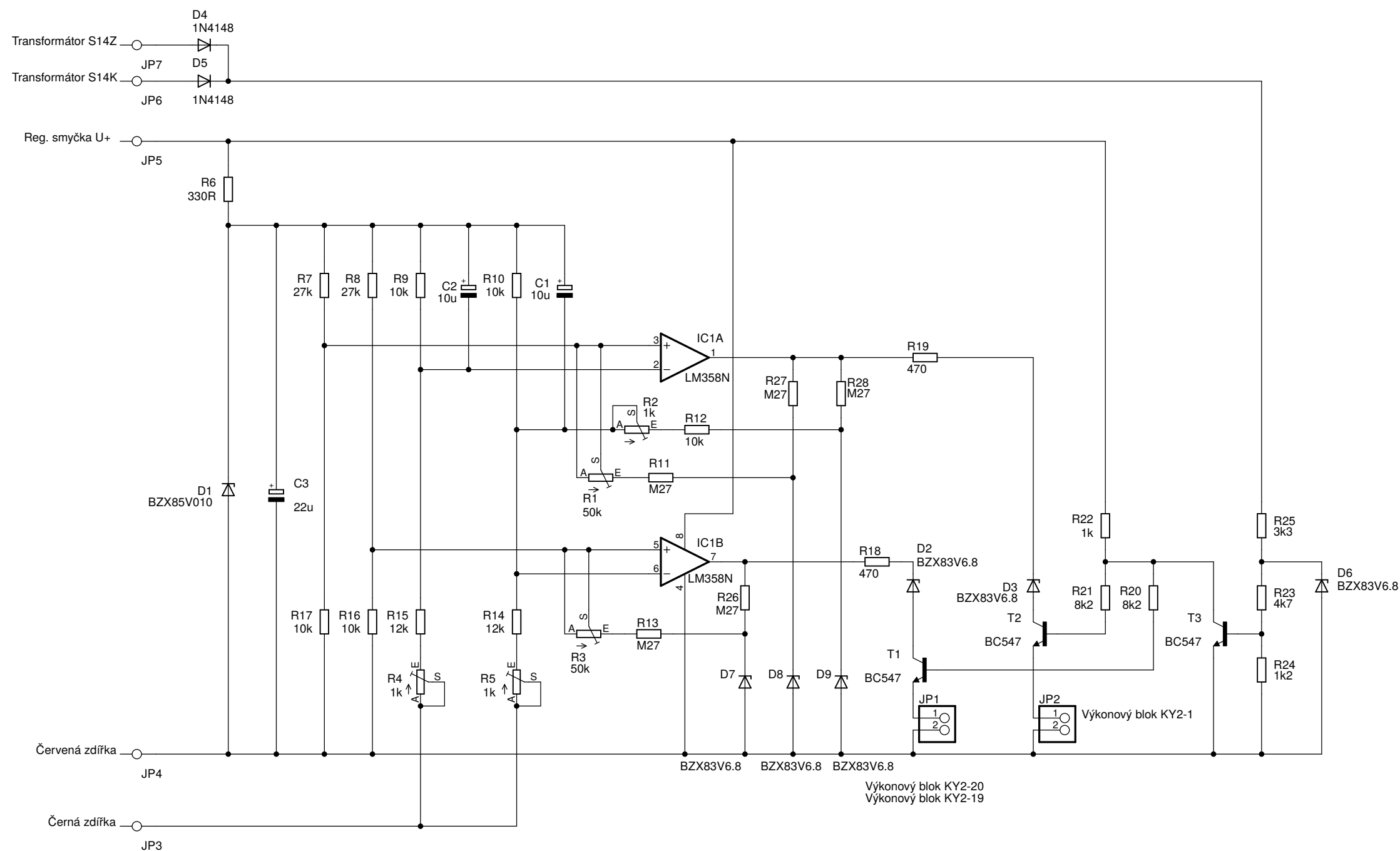
VYTVŮŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	25.6.2013	MĚŘITKO	
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
REG. SMYČKA PROT -SCH					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:		
0001-3-17-01-01-B					



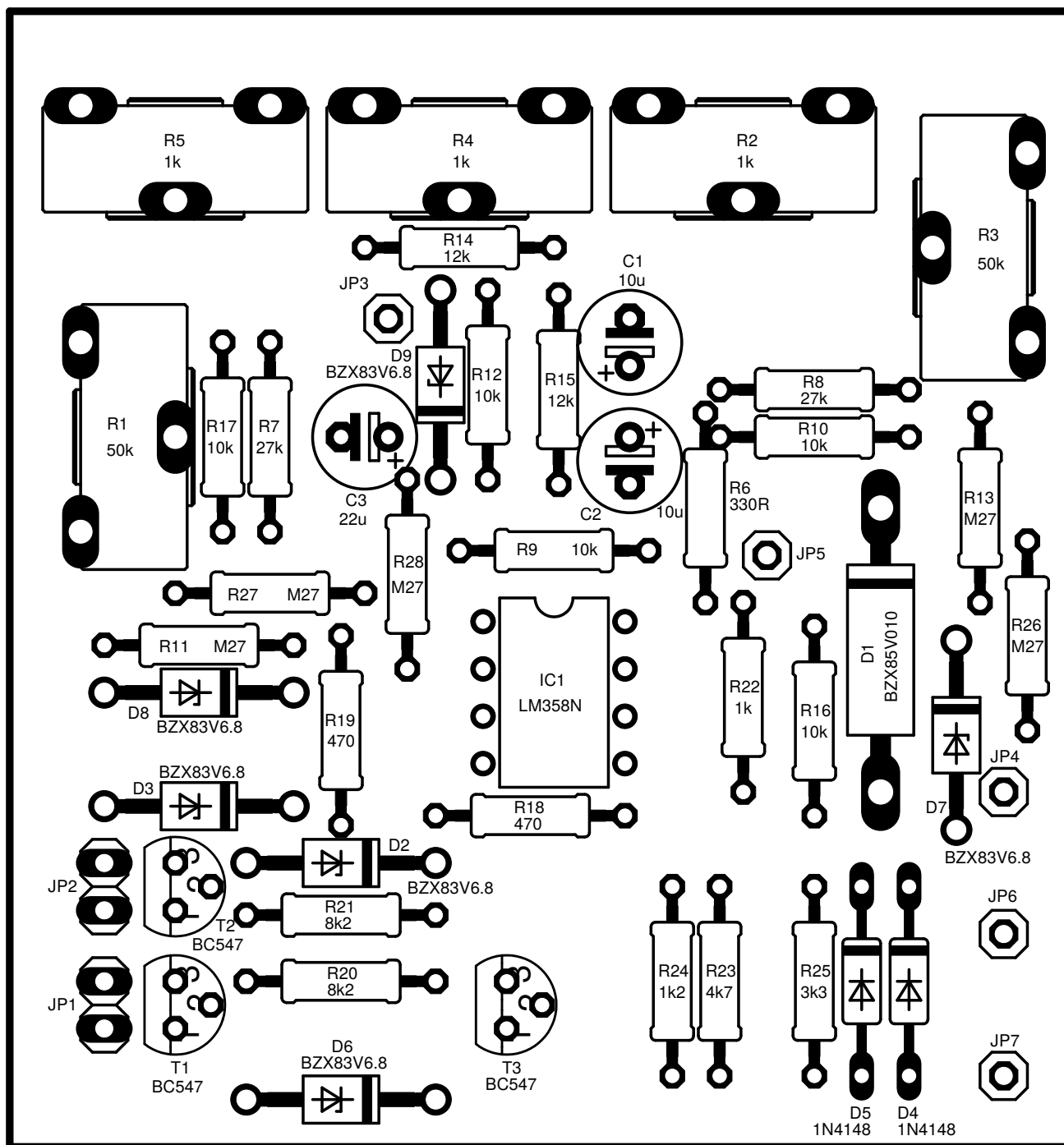
VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	25.6.2013	MĚŘITKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
REG. SMYČKA -OST					
ČÍSLO VÝKRESU			LISTŮ:	LIST:	
0001-3-17-04-01-B					



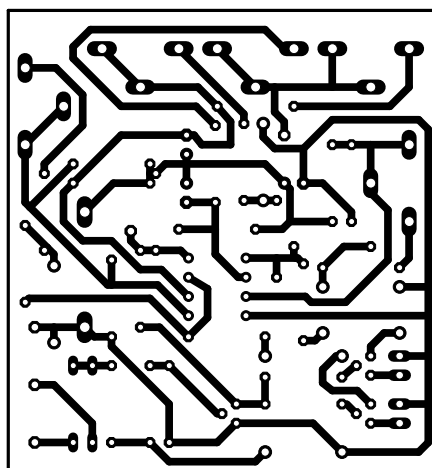
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	25.6.2013	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
REG. SMYČKA -BRB					
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-17-03-01-B		LISTŮ:	LIST:	



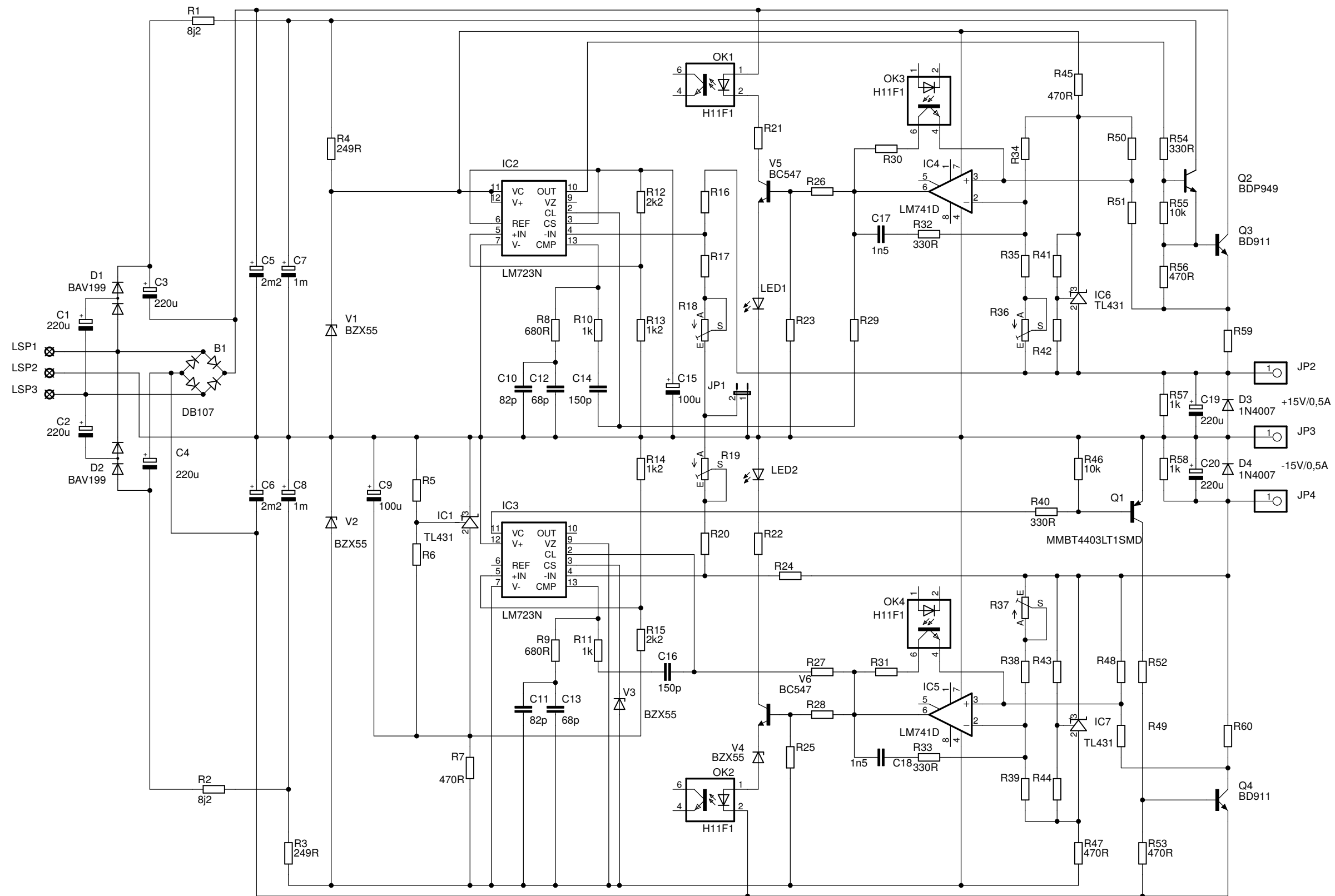
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	20.4.2014	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
KOMPARÁTORY PROT -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-16-01-02-C				



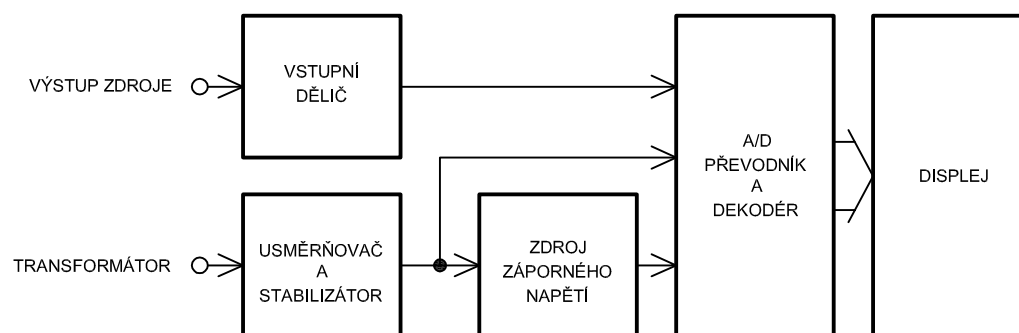
VYTVŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	20.4.2014	MĚŘÍTKO	3:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
	KOMPARÁTORY PROT -OST				
ČÍSLO VÝKRESU		LISTŮ:		LIST:	
0001-3-16-04-02-C					



VYTVŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	20.4.2014	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	KOMPARÁTORY PROT -BRB	
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-16-03-02-C			LISTŮ:	LIST:



VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	23.2.2014	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
REGULAČNÍ OBVOD E PR -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-23-01-02-A				



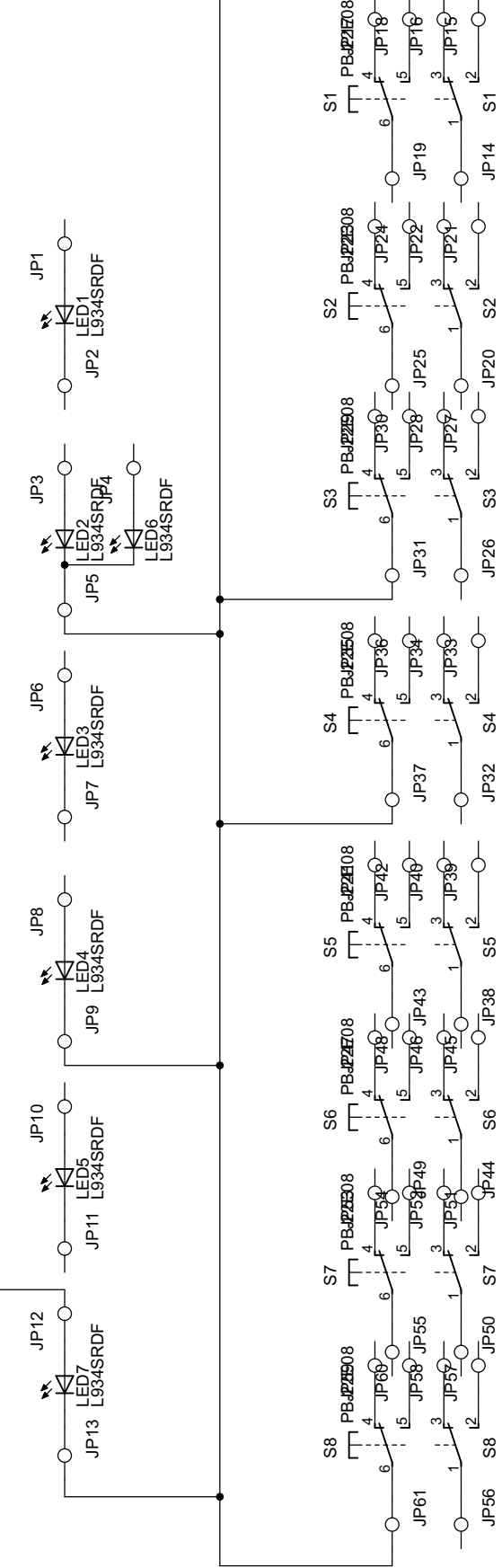
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	4.1.2017	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
VOLTMETR DIG A,B –BLS				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001–2–13–08–03–B				

Černý 0,14mm²

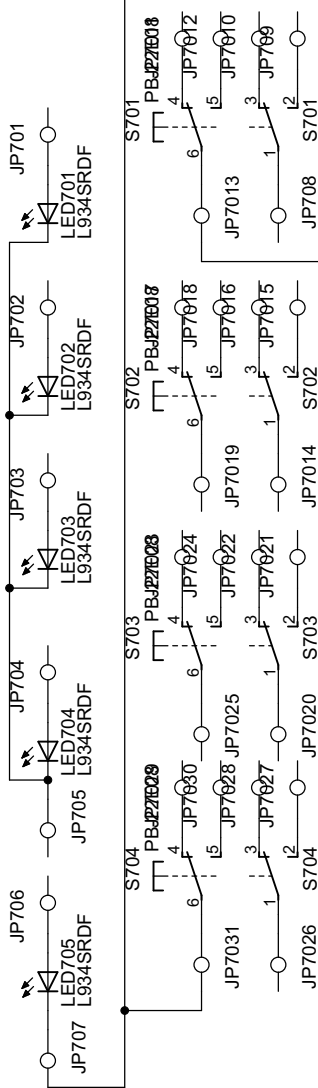
Černý 0,14mm²

Hnědý 0,14mm²

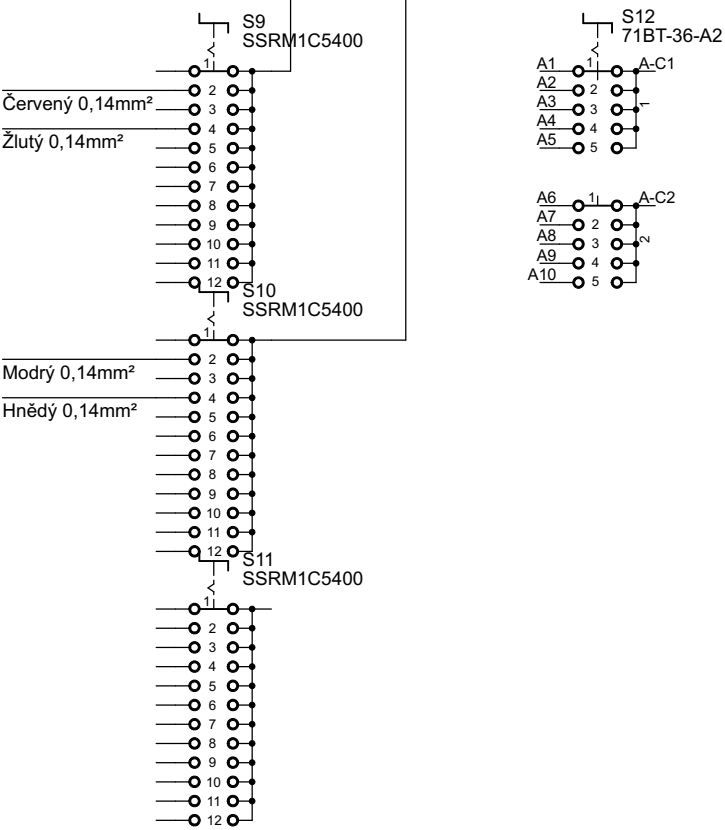
PŘEDNÍ PANEL - SUB_8



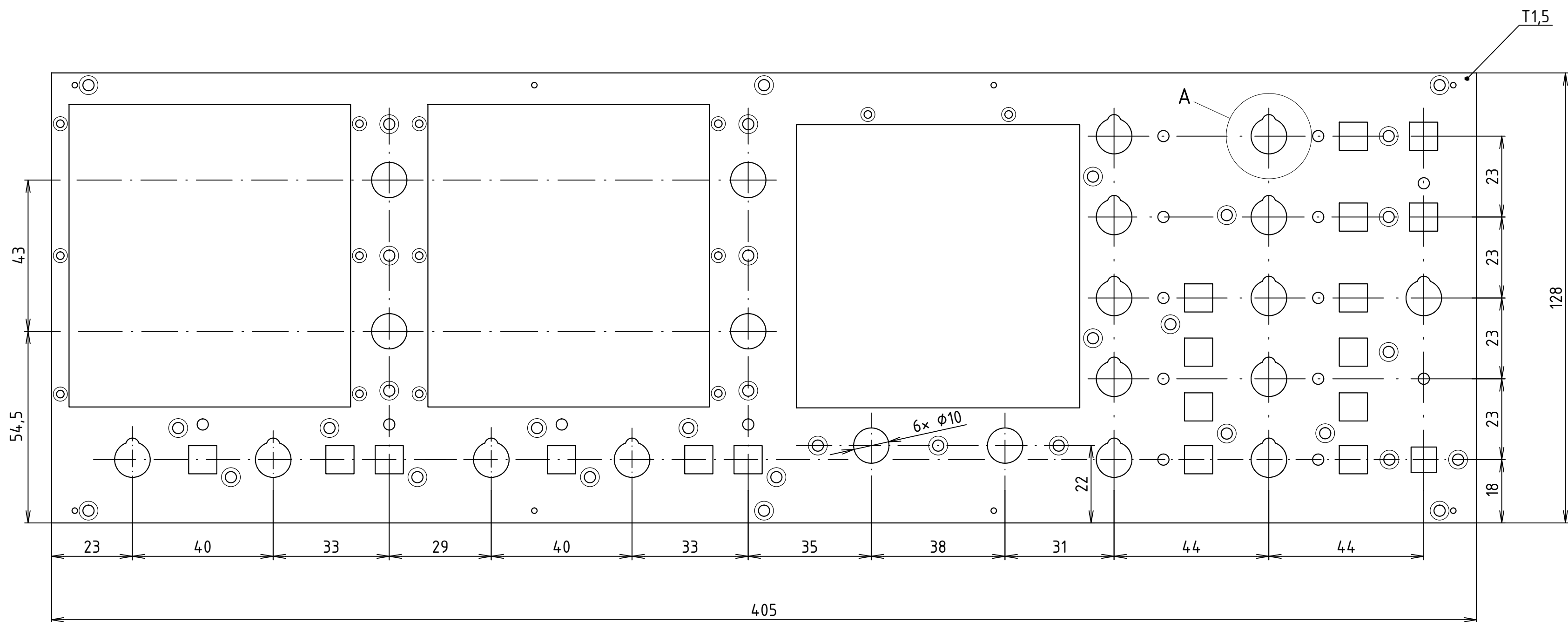
PŘEDNÍ PANEL - SUB_7



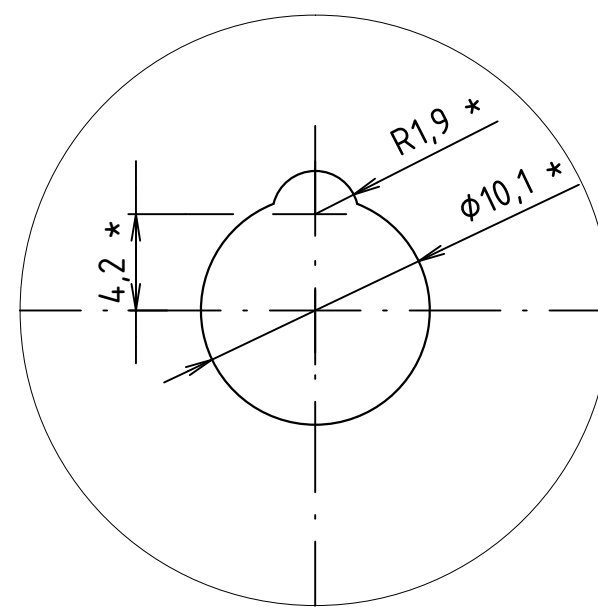
Červený 0,14mm²
Modrý 0,14mm²



VYTVŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	1.5.2014	MĚŘITKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - HLAVNÍ -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ: 2		LIST: 1	
0001-2-04-01-01-A-1				

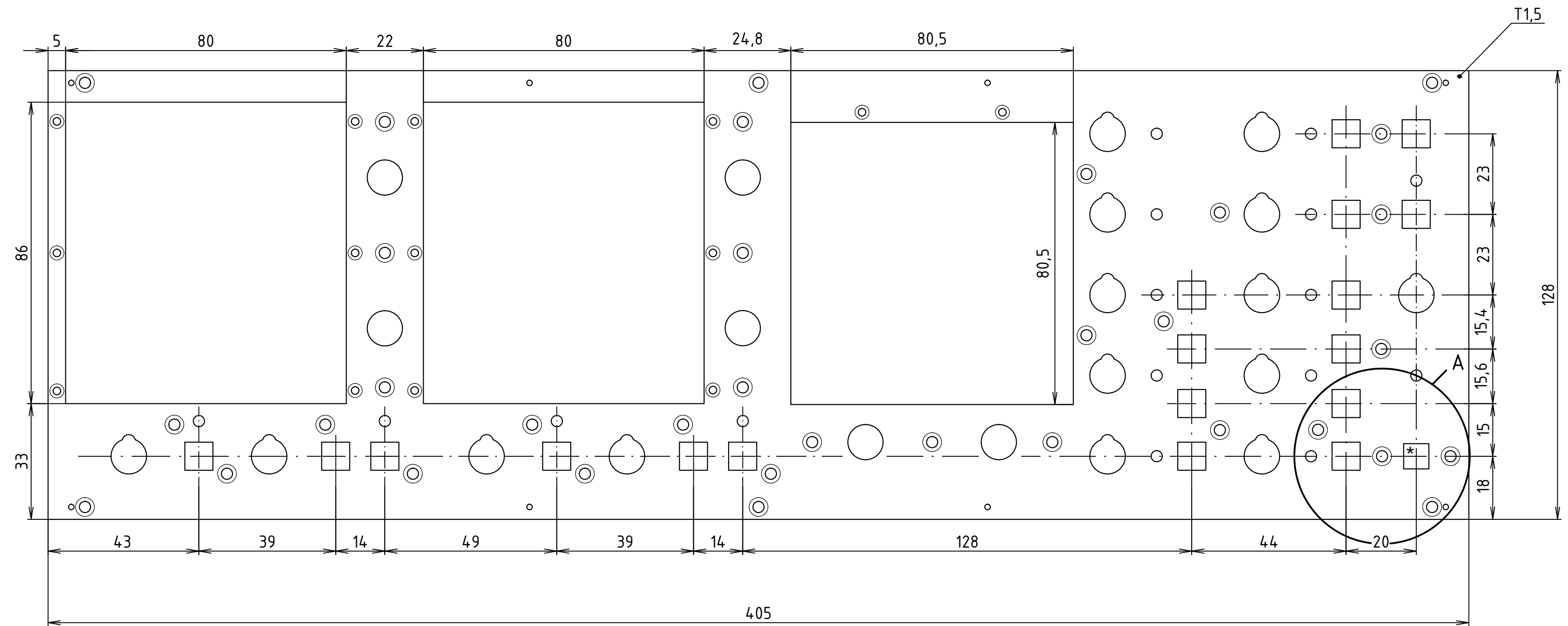


DETAIL A

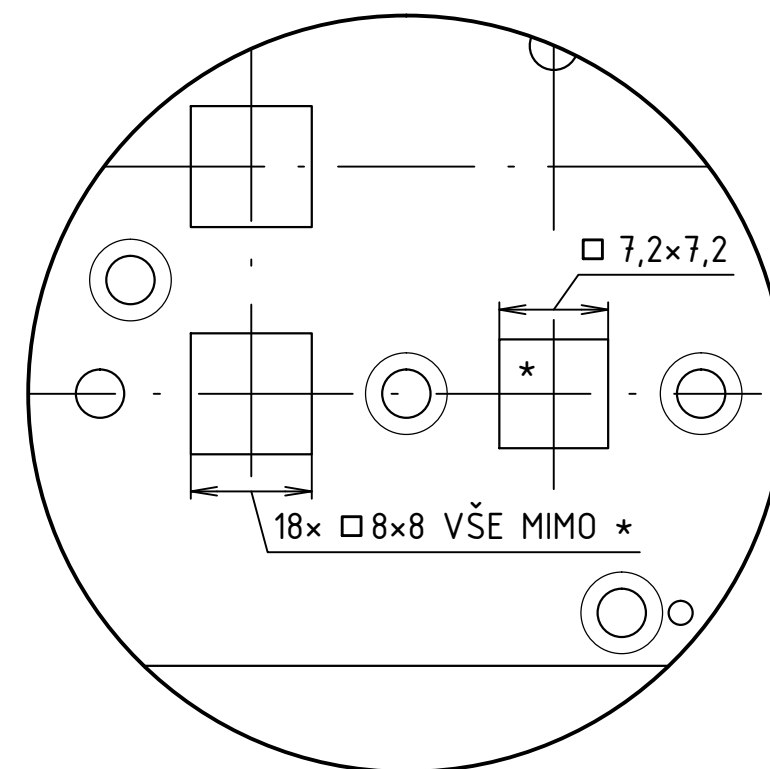


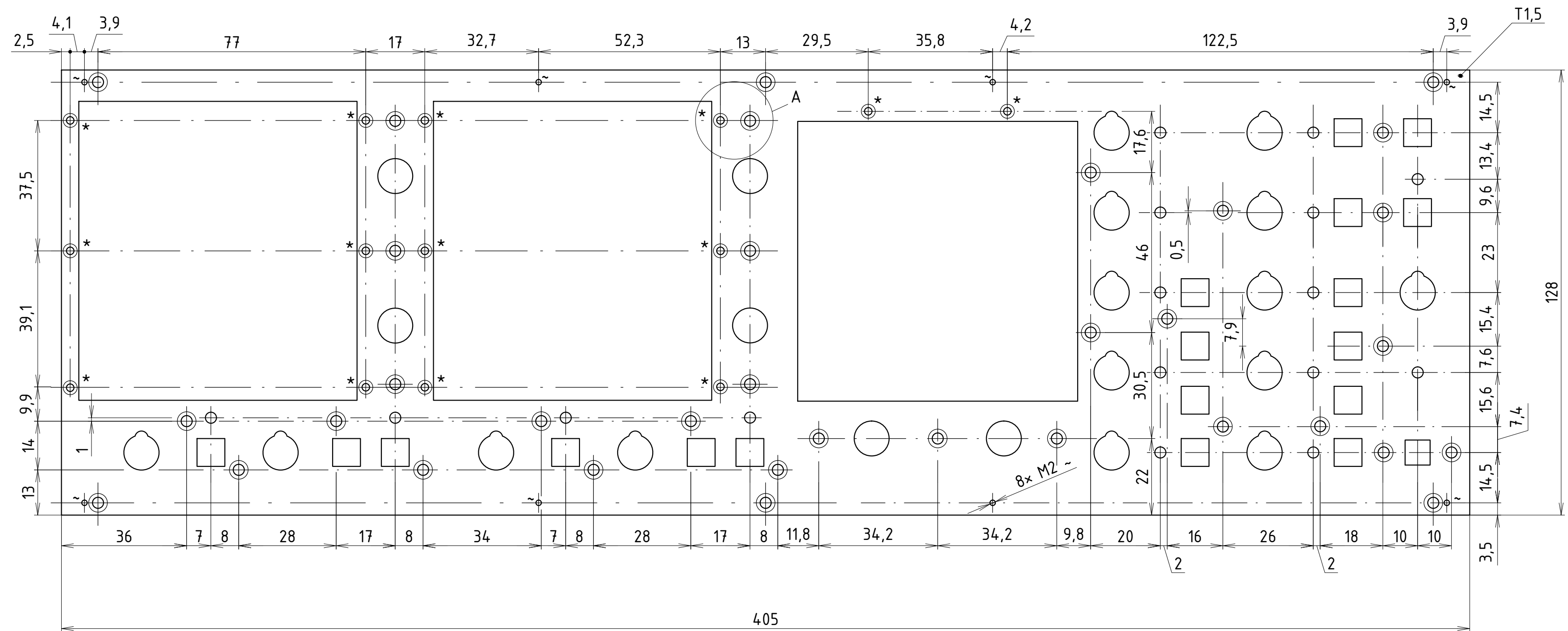
* VŠECHNY OTVORY SE ŽLÁBKEM

VYTVŮRIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	24.6.2014	MĚŘÍTKO	1:1
NAZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
PŘEDNÍ PANEL – HLAVNÍ –SOU					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTU: 3		LIST: 1		
0001-2-04-06-01-A-1					

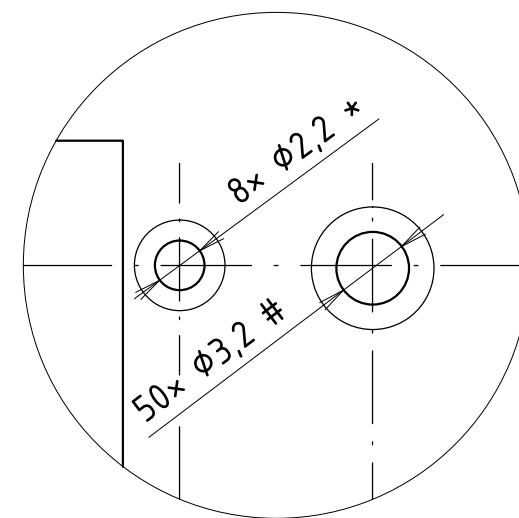


DETAIL A



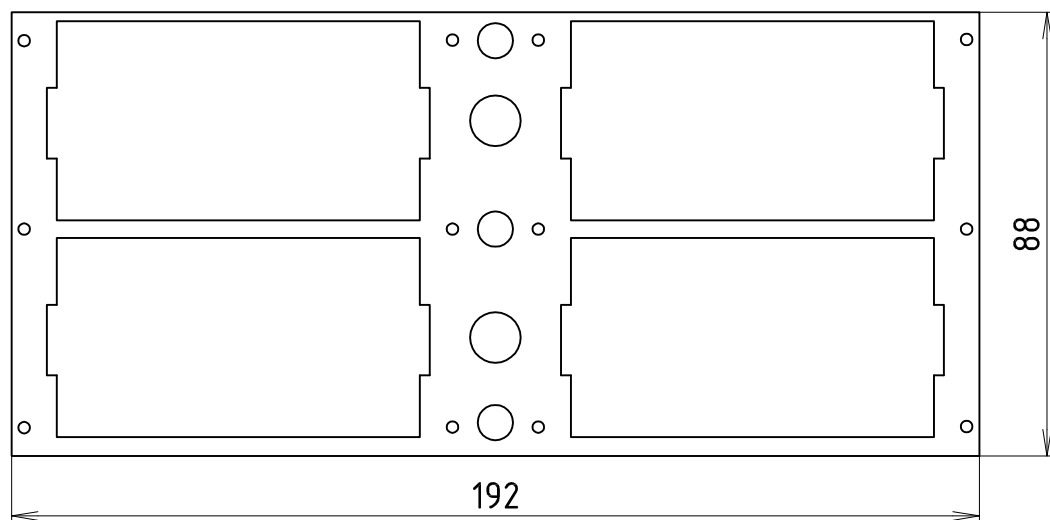


DETAIL A

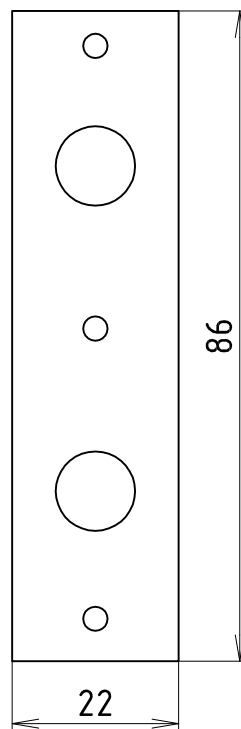


VŠECHNY NEOZNAČENÉ OTVORY
VŠECHNY ZÁPUSTKY JSOU PRO ZÁPUSTNÉ HLAVY ŠROUBŮ M2* NEBO M3

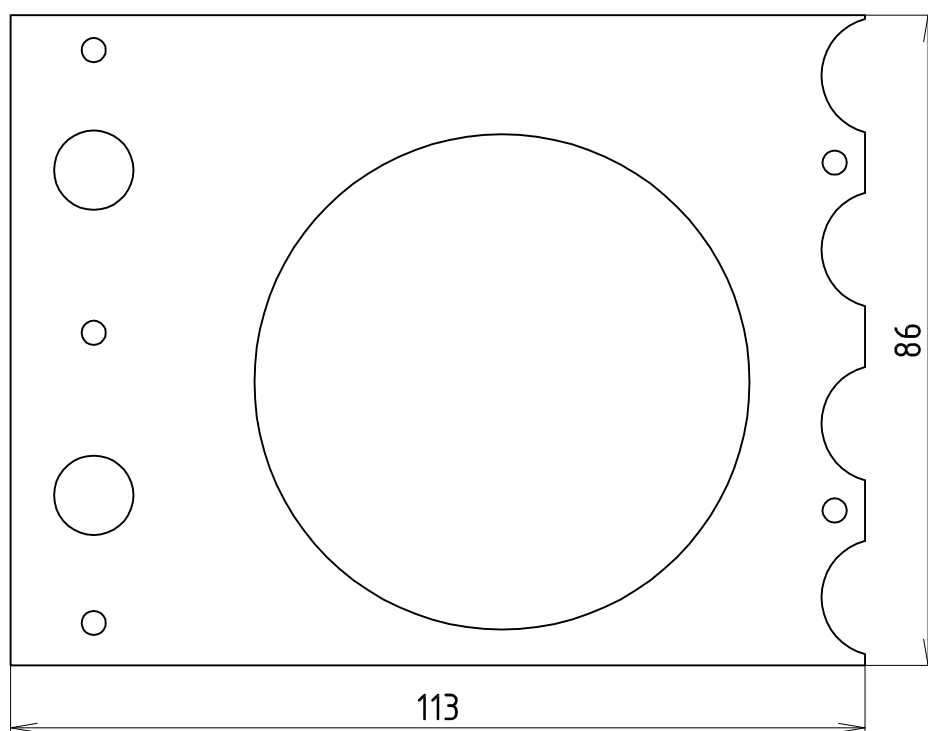
VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	24.6.2014	MĚŘITKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
PŘEDNÍ PANEL – HLAVNÍ –SOU					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ: 3		LIST: 3		
0001-2-04-06-01-A-3					



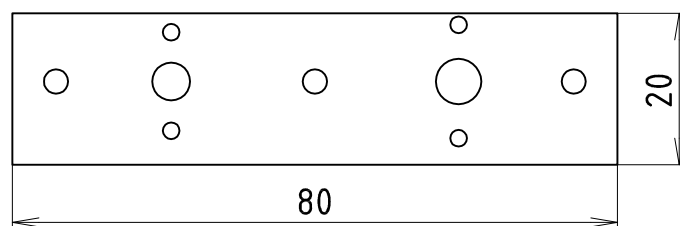
VYTVŮŘIL TOMÁNEK RADEK		DATUM 23.3.2014	MĚŘÍTKO 2:3
NÁZEV LABORATORNÍ ZDROJ		TYP 2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL – SUB_1 –SOU			
ČÍSLO VÝKRESU		LISTŮ:	LIST:
0001-3-05-06-01-A			



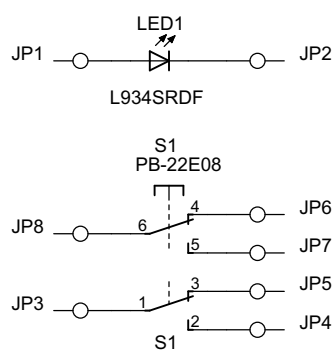
VTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	23.3.2014	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ		TYP 2x 0÷30V/0÷5A		
PŘEDNÍ PANEL – SUB_2 –SOU					
ČÍSLO VÝKRESU		LISTU:		LIST:	
0001-3-06-06-01-A					



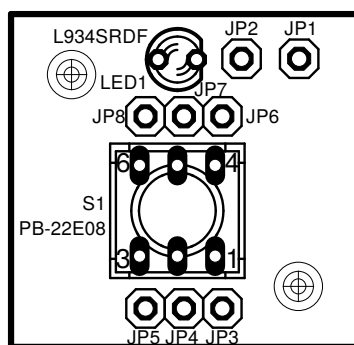
VTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	23.3.2014	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0:30V/0:5A		
PŘEDNÍ PANEL – SUB_3 –SOU					
ČÍSLO VÝKRESU			LISTŮ:	LIST:	
0001-3-07-06-01-A					



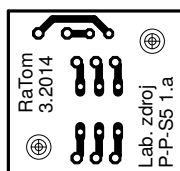
VTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	23.3.2014	MĚŘITKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ		TYP 2x 0÷30V/0÷5A		
PŘEDNÍ PANEL – SUB_4 –SOU					
ČÍSLO VÝKRESU		LISTŮ:		LIST:	
0001-3-08-06-01-A					



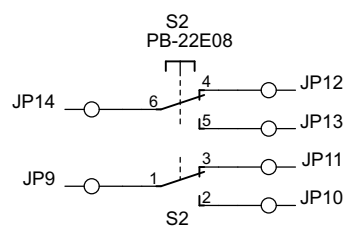
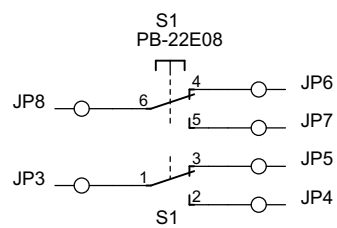
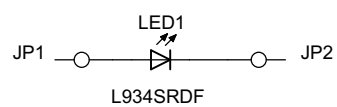
VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.3.2014	MĚŘITKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - SUB_5 -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-09-01-01-A				



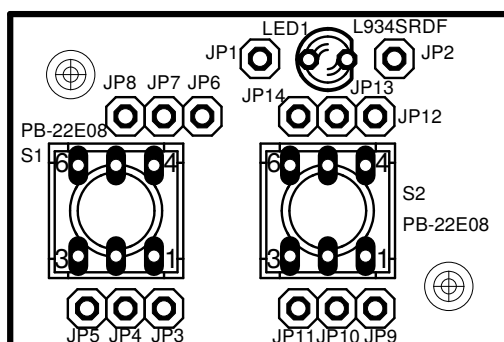
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	29.3.2014	MĚŘITKO	2:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ				
	TYP 2x 0÷30V/0÷5A				
PŘEDNÍ PANEL - SUB_5 -OST					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:		
0001-3-09-04-01-A					



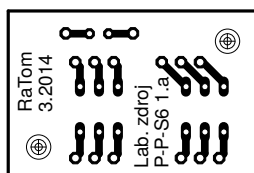
VYTVŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	29.3.2014	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	PŘEDNÍ PANEL - SUB 5 -BRB	
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-09-03-01-A			LISTŮ:	LIST:



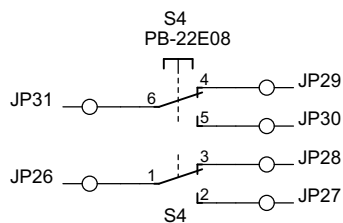
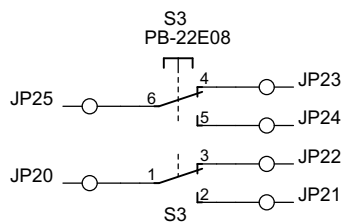
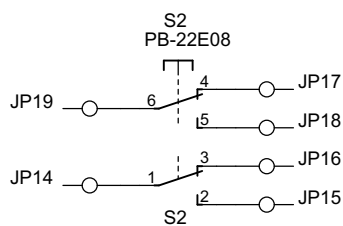
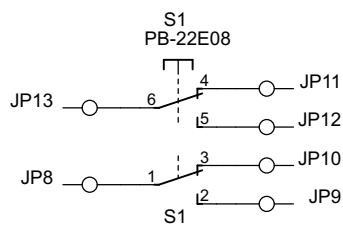
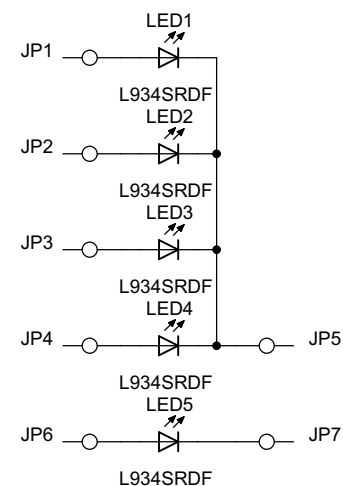
VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.3.2014	MĚŘITKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - SUB_6 -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-10-01-01-A				



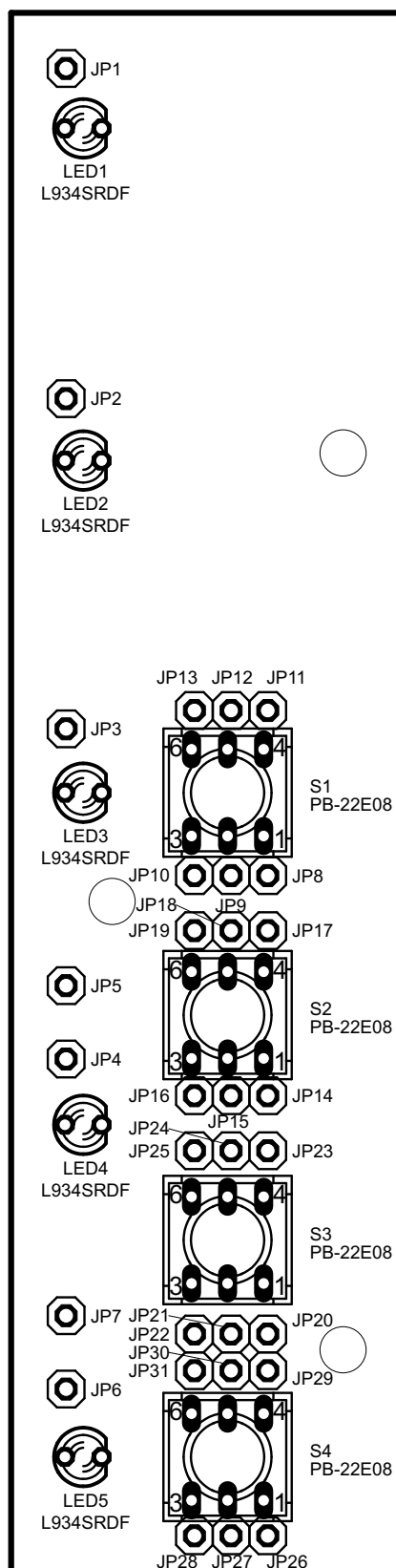
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.3.2014	MĚŘÍTKO	2:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ				
	TYP 2x 0÷30V/0÷5A				
PŘEDNÍ PANEL - SUB_6 -OST					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:		
0001-3-10-04-01-A					



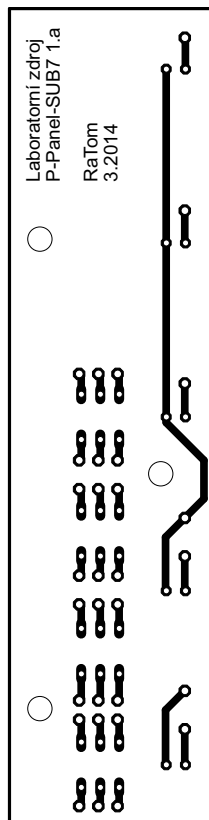
VYTVŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.3.2014	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
	PŘEDNÍ PANEL - SUB 6 -BRB				
ČÍSLO VÝKRESU		LISTŮ:		LIST:	
0001-3-10-03-01-A					



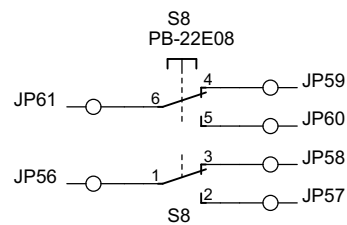
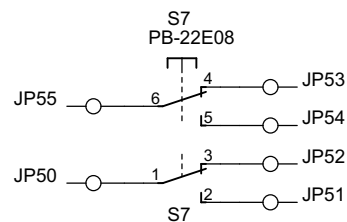
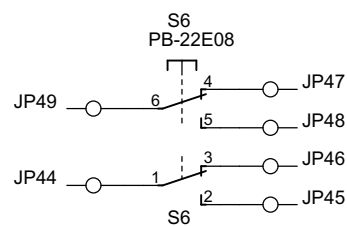
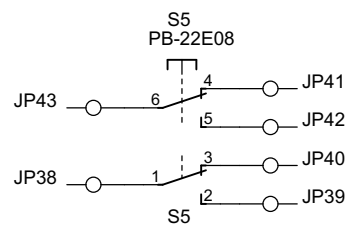
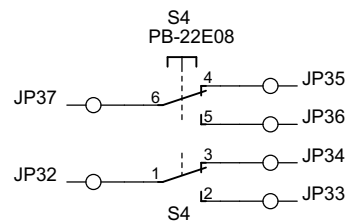
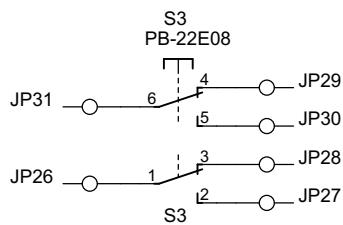
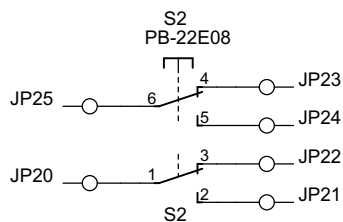
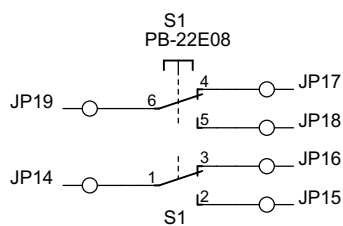
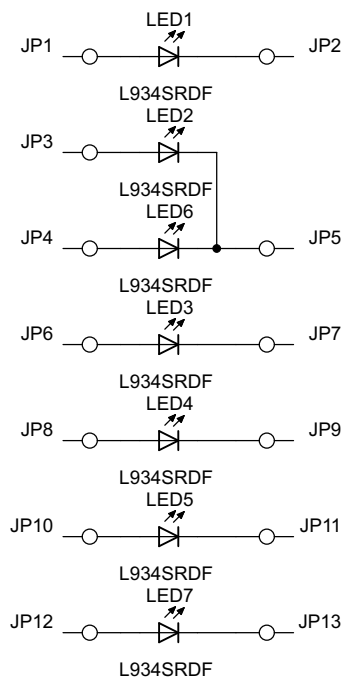
VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.3.2014	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - SUB_7 -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-11-01-01-A				



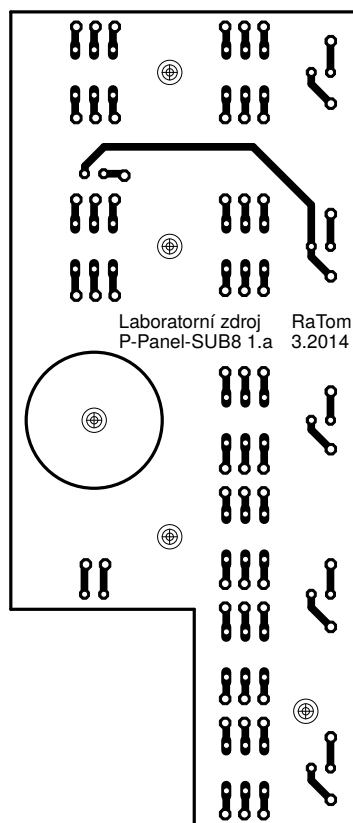
VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.3.2014	MĚŘÍTKO	2:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
PŘEDNÍ PANEL - SUB_7 -OST					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:		
0001-3-11-04-01-A					



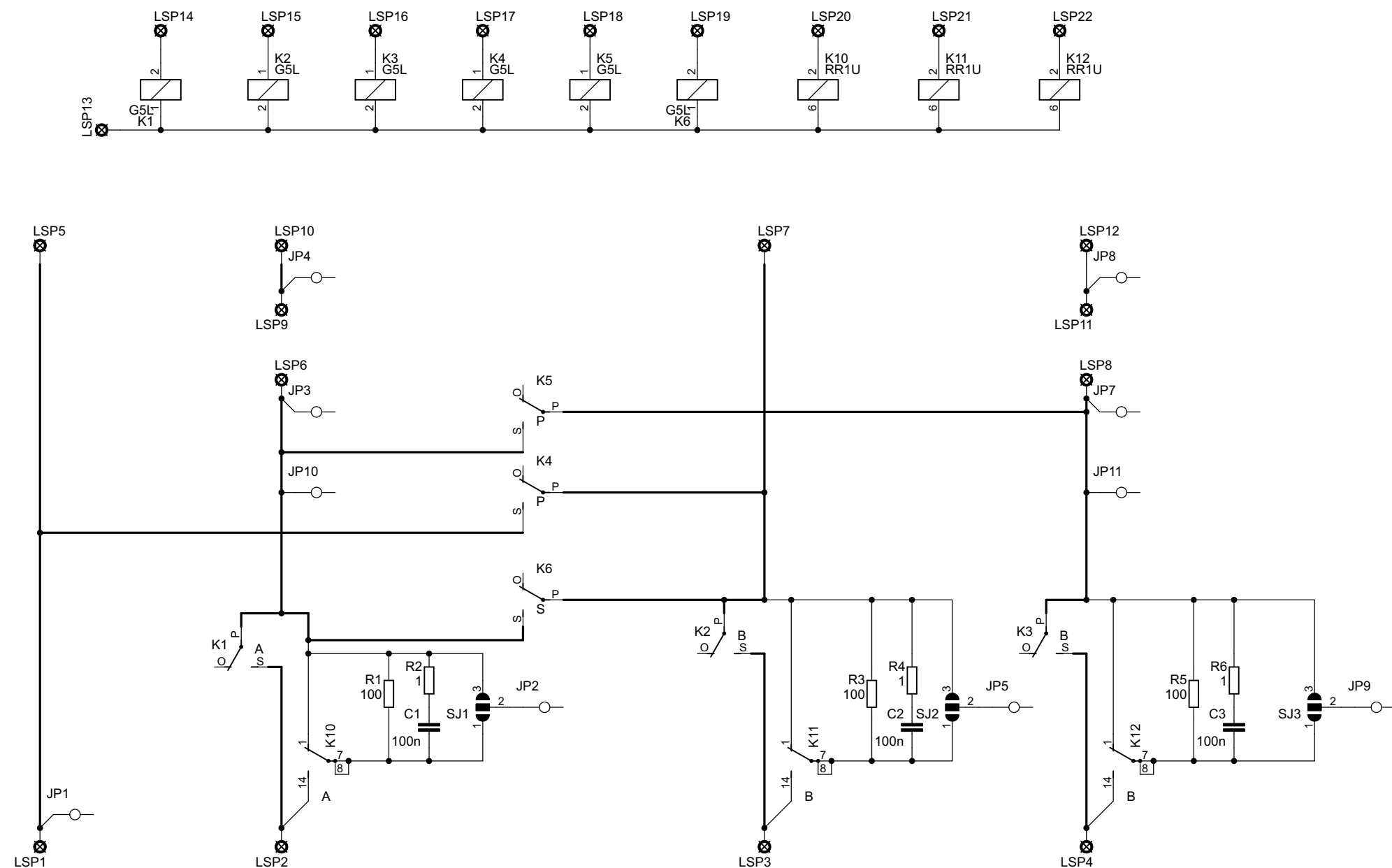
VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.3.2014	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ		TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - SUB_7 -BRB					
ČÍSLO VÝKRESU			LISTŮ:	LIST:	
0001-3-11-03-01-A					



VYTVŮŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.3.2014	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - SUB_8 -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-12-01-01-A				

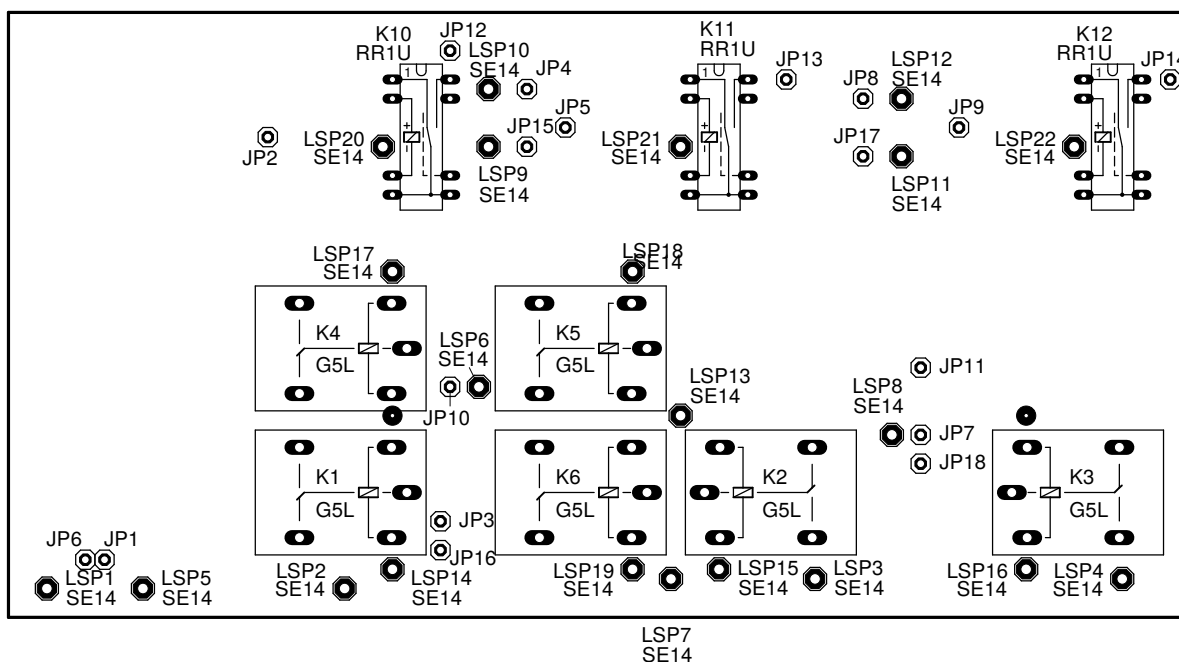


VYTVŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	30.3.2014	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
PŘEDNÍ PANEL - SUB 8 -BRB					
ČÍSLO VÝKRESU		LISTŮ:		LIST:	
0001-3-12-03-01-A					

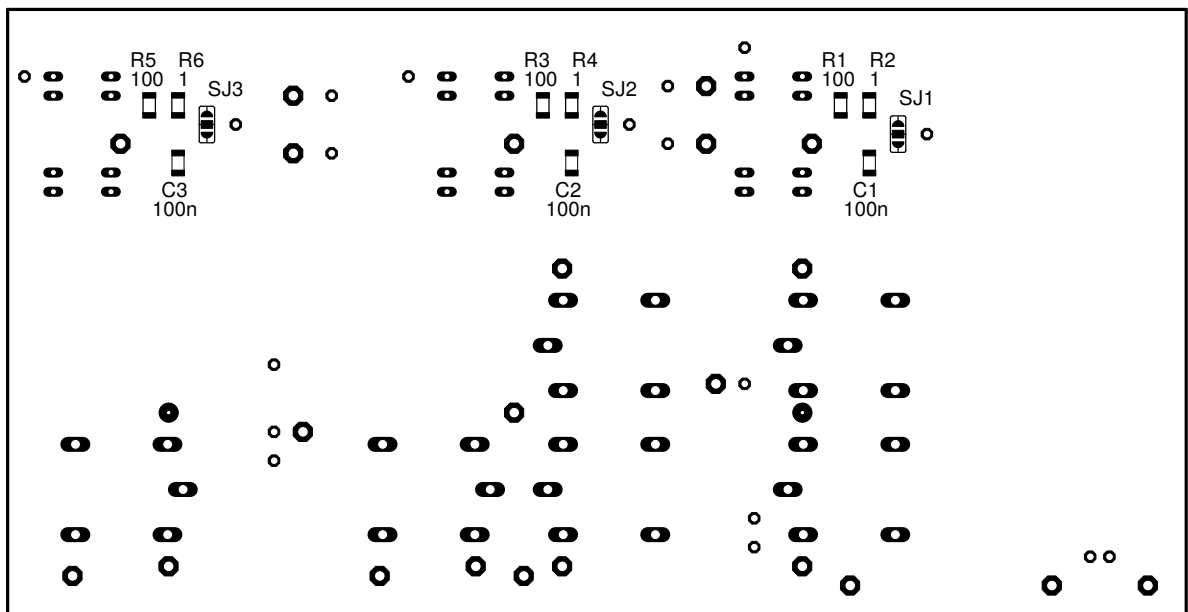


A ... Statically closed when output A is closed
 B ... Statically closed when output B is closed
 N ... Closed in independent mode
 S ... Closed in symmetrical mode
 P ... Closed in parallel mode
 (Contacts marked with the same letter cannot have a common wire, because dynamically they first switch the power relay and then the feedback relay.)

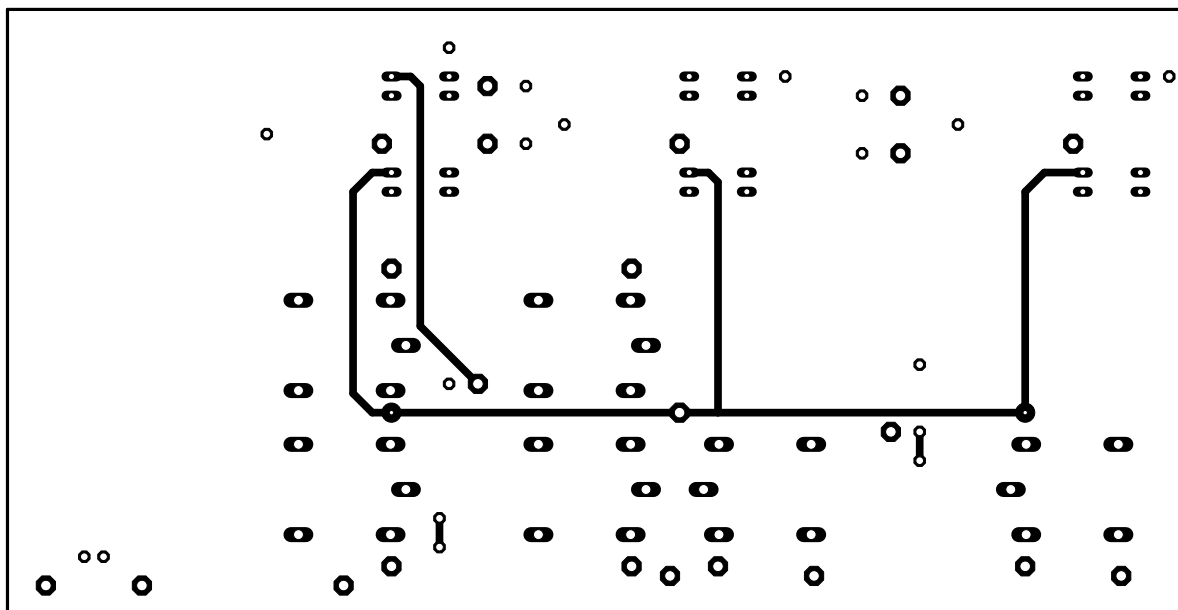
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	6.12.2015	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - SUB_9 -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-28-01-02-A				



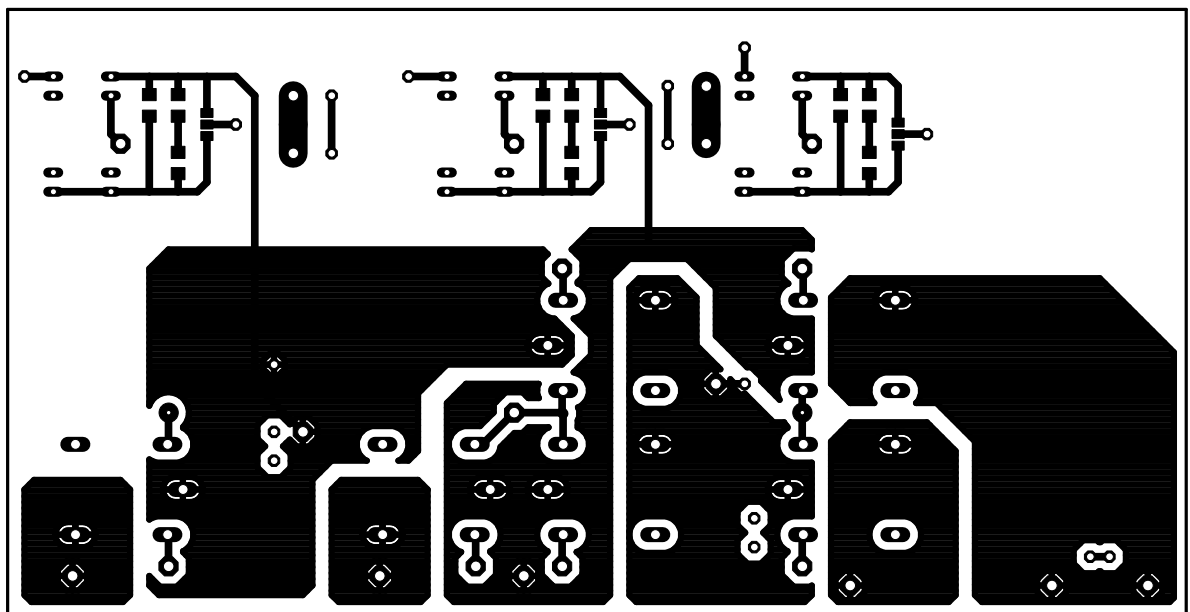
VYTVOŘIL TOMÁNEK RADEK		DATUM 2.2.2016	MĚŘÍTKO 1:1
NÁZEV LABORATORNÍ ZDROJ		TYP 2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - SUB_9 -OST			
ČÍSLO VÝKRESU		LISTŮ:	LIST:
0001-3-28-04-02-A			



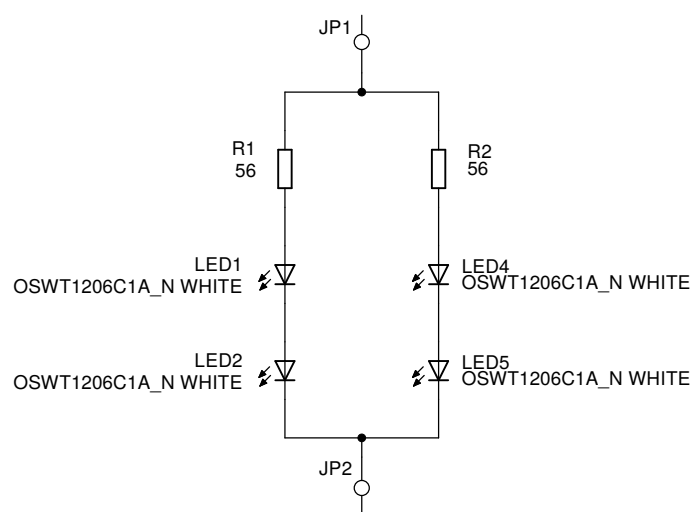
VYTVŮŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	2.2.2016	MĚŘITKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ		TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - SUB_9 -OSB					
ČÍSLO VÝKRESU			LISTŮ:	LIST:	
0001-3-28-05-02-A					



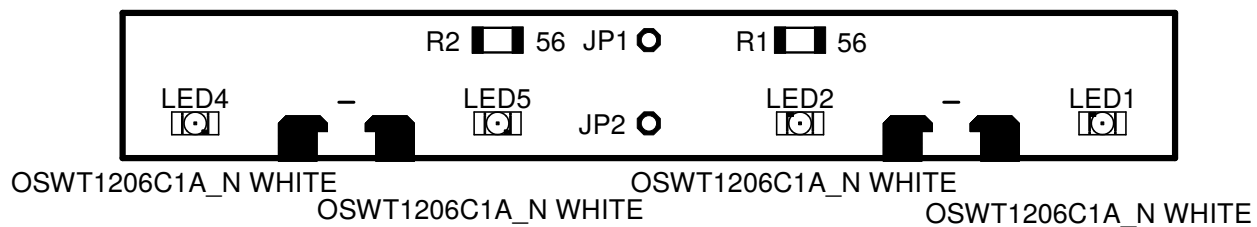
VYTVOŘIL TOMÁNEK RADEK		DATUM 2.2.2016	MĚŘÍTKO 1:1
NÁZEV LABORATORNÍ ZDROJ		TYP 2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - SUB_9 -BRT			
ČÍSLO VÝKRESU		LISTŮ:	LIST:
0001-3-28-02-02-A			



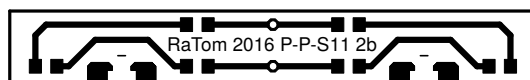
VYTVŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	2.2.2016	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
	PŘEDNÍ PANEL - SUB 9 -BRB				
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-28-03-02-A		LISTŮ:	LIST:	



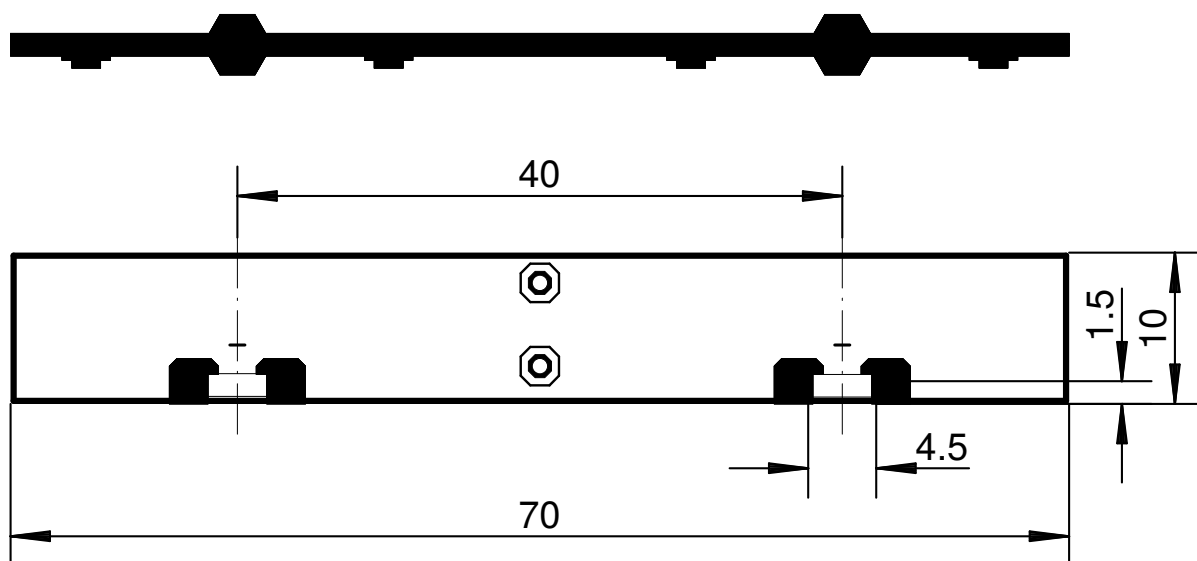
VYTVŮŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	15.1.2016	MĚŘÍTKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
PŘEDNÍ PANEL - SUB_11 -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-30-01-02-B				



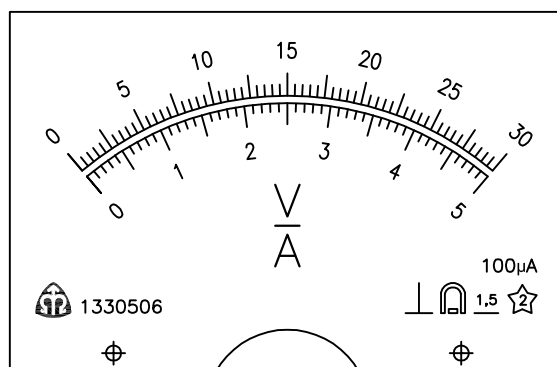
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	15.1.2016	MĚŘITKO	2:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ				
	TYP 2x 0÷30V/0÷5A				
PŘEDNÍ PANEL - SUB 11 -OSB					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTU:		LIST:		
0001-3-30-05-02-B					



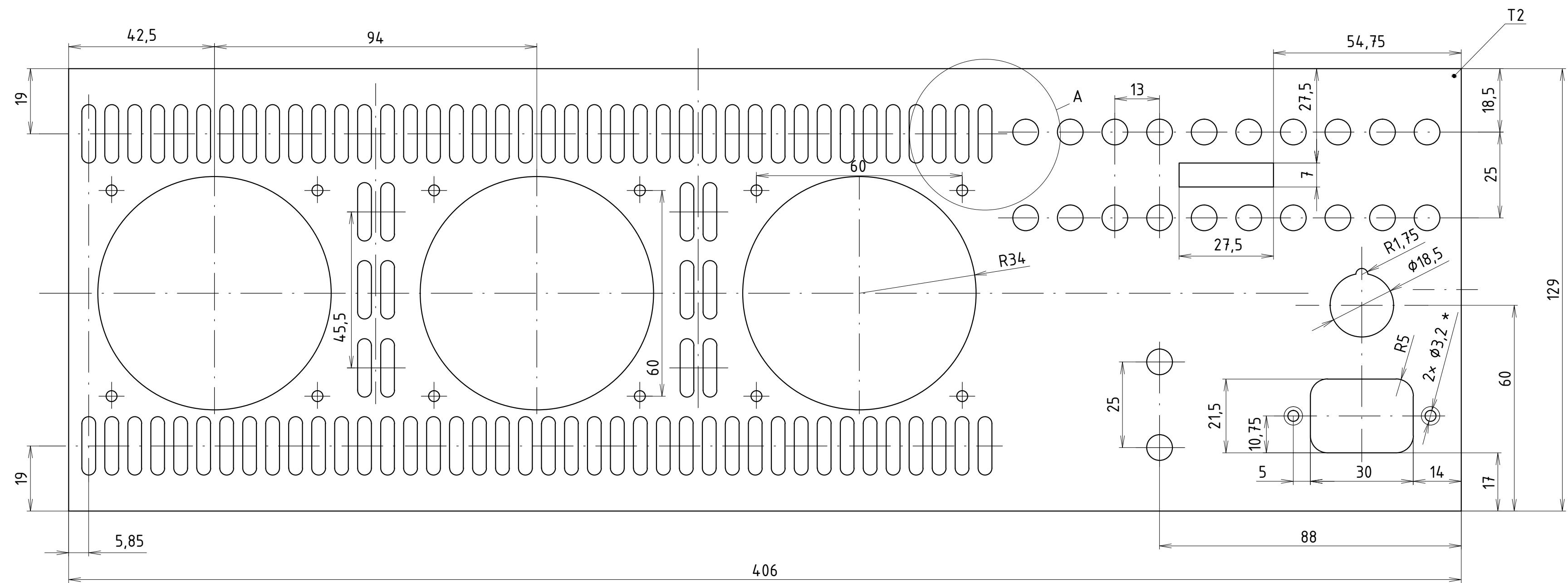
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	15.1.2016	MĚŘITKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
PŘEDNÍ PANEL - SUB_11 -BRB					
ČÍSLO VÝKRESU			LISTŮ:	LIST:	
0001-3-30-03-02-B					



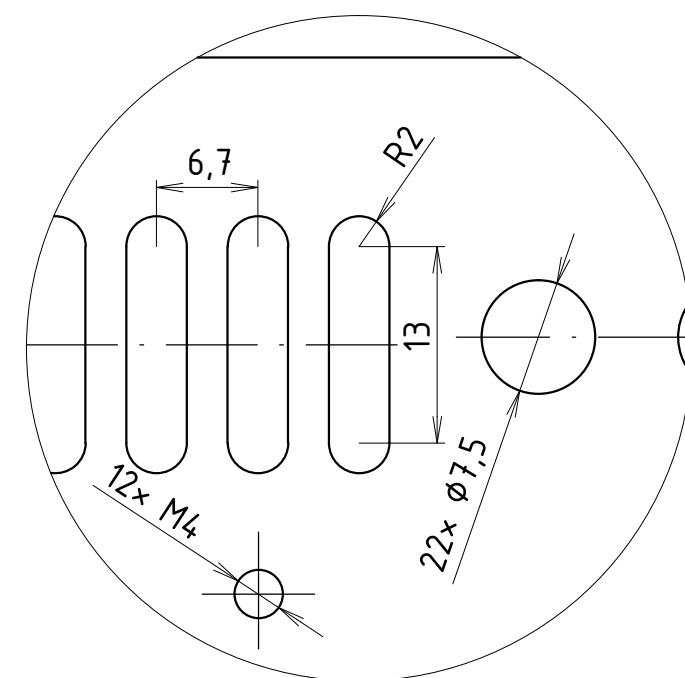
VYTVŮŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	15.1.2016	MĚŘÍTKO	2:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ				
	TYP 2x 0÷30V/0÷5A				
PŘEDNÍ PANEL - SUB_11 -SOT					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:		
0001-3-30-09-02-B					



VYTVŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	7.4.2014	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
PŘEDNÍ PANEL – STUPNICE –POT					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:		
0001-4-15-07-01-A					

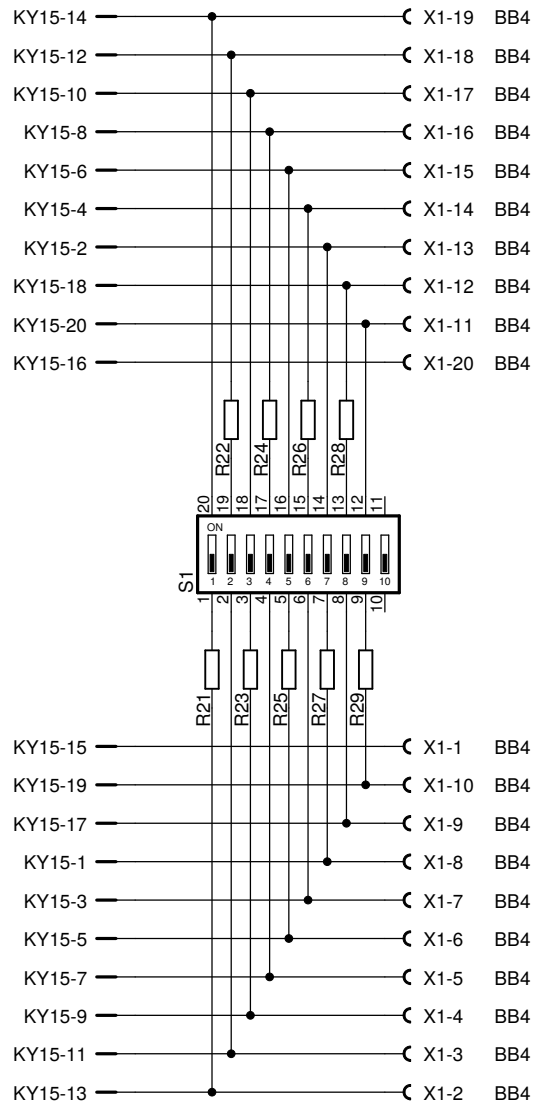


DETAIL A

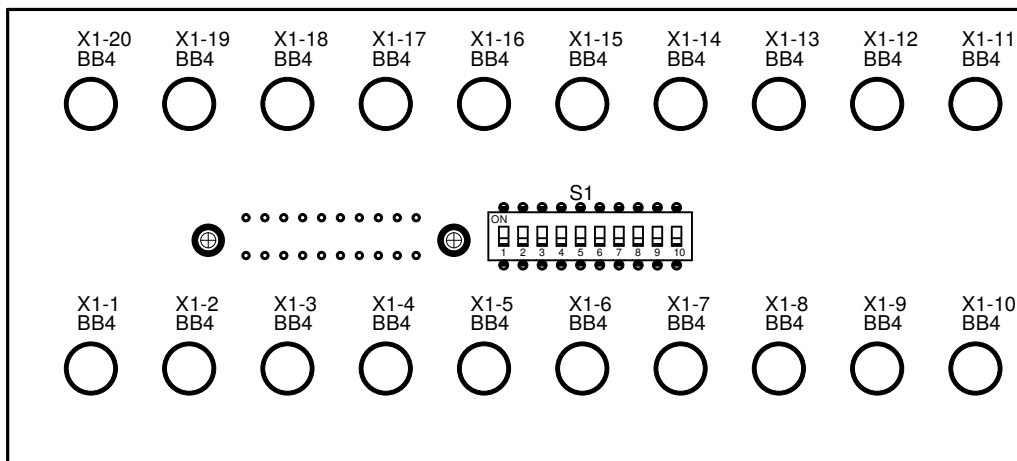


* ZÁPUSTKY JSOU PRO ZÁPUSTNÉ HLAVY ŠROUBŮ M3

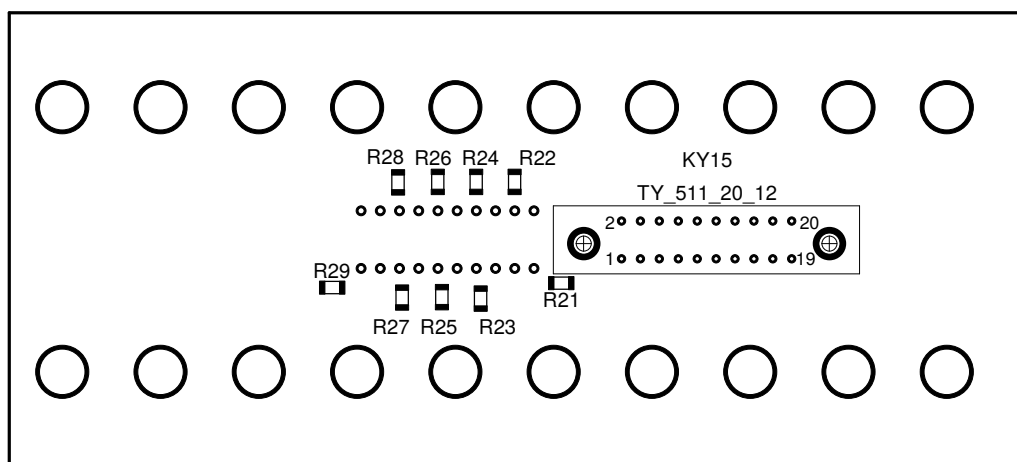
VYVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	26.6.2014	MĚŘÍTKO	1:1
NAZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TP	2x 0÷30V/0÷5A		
ZADNÍ PANEL – HLAVNÍ –SOU					
ČÍSLO VÝKRESU	0001-2-25-06-01-A	LISTŮ: 3		LIST: 1	



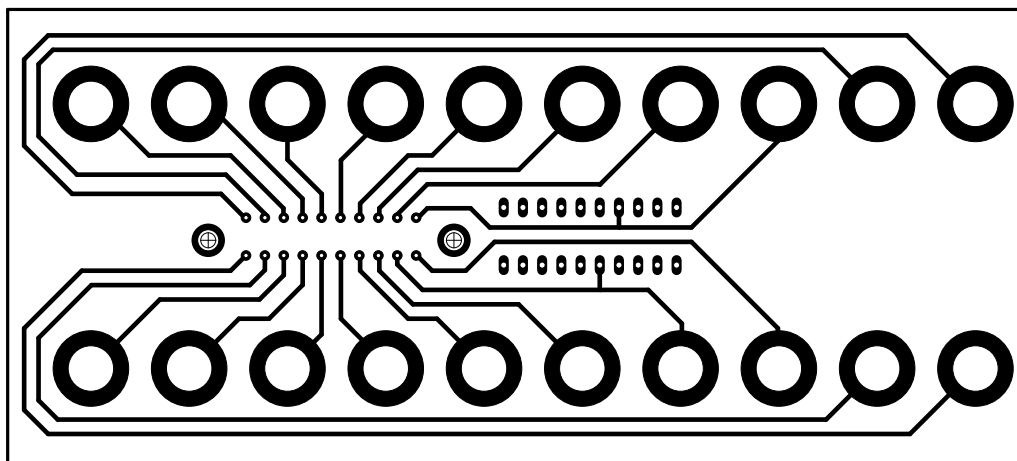
VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	24.4.2017	MĚŘITKO
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A	
ZADNÍ PANEL - SUB_1 -SCH				
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:	
0001-3-26-01-04-A				



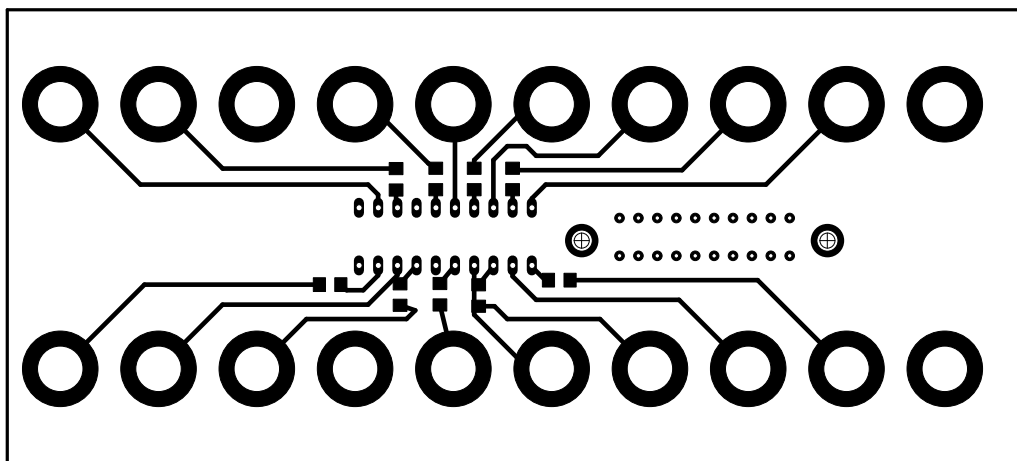
VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	24.4.2017	MĚŘITKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ				
	TYP 2x 0÷30V/0÷5A				
ZADNÍ PANEL - SUB_1 -OST					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:		
0001-3-26-04-04-A					



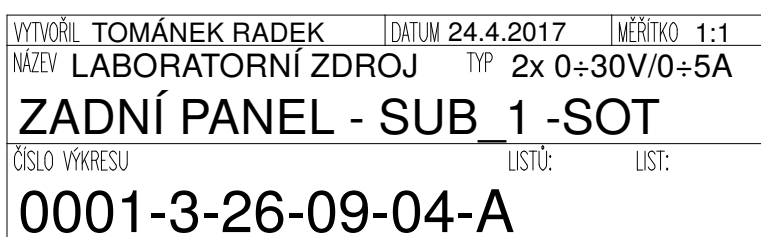
VYTVŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	24.4.2017	MĚŘITKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
	ZADNÍ PANEL - SUB_1 -OSB				
ČÍSLO VÝKRESU	0001-3-26-05-04-A		LISTŮ:	LIST:	

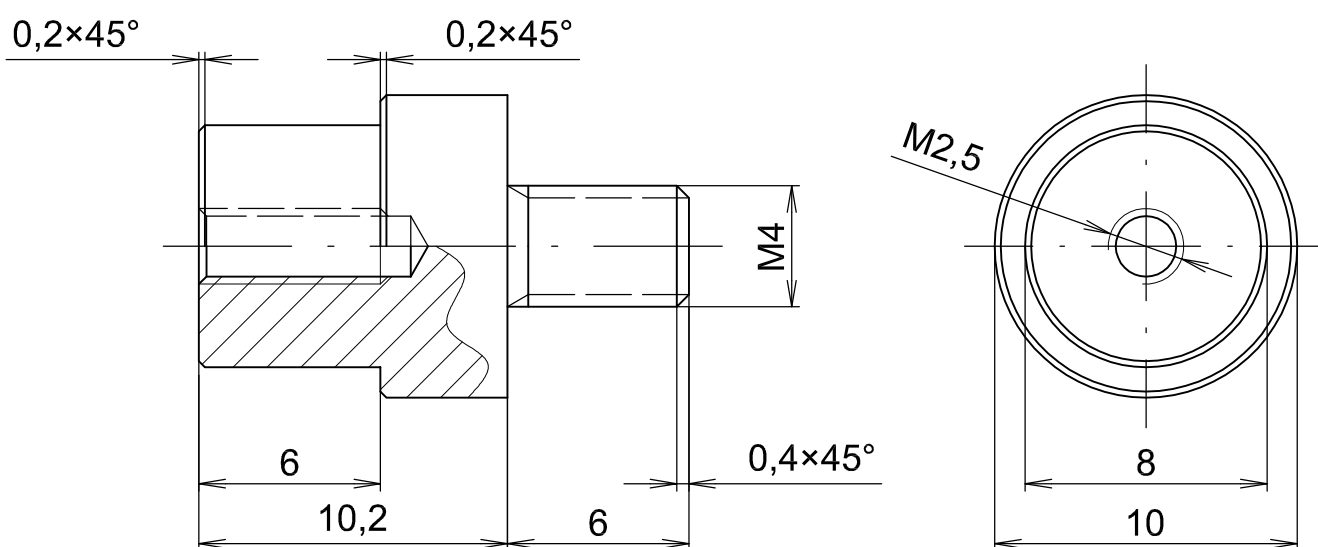


VYTVORIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	24.4.2017	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
ZADNÍ PANEL - SUB_1 -BRT					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:			LIST:	
0001-3-26-02-04-A					



VYTVŮŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	24.4.2017	MĚŘÍTKO	1:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ	TYP	2x 0÷30V/0÷5A		
ZADNÍ PANEL - SUB_1 -BRB					
ČÍSLO VÝKRESU	LISTŮ:		LIST:		
0001-3-26-03-04-A					





VYTVOŘIL	TOMÁNEK RADEK	DATUM	23.4.2014	MĚŘÍTKO	4:1
NÁZEV	LABORATORNÍ ZDROJ		TYP 2x 0÷30V/0÷5A		
SKŘÍŇ – SLOUPEK –SOU					
ČÍSLO VÝKRESU			LISTŮ:		LIST:
0001-3-19-06-01-A					

I PŘÍLOHY - SEZNAM SOUČÁSTEK

I.1 Seznam součástek vstupního dílu

Tab. I.1: Seznam součástek modulu VSTUPNÍ DÍL

Označení	Hodnota	Pouzdro
C1, C7	X 100n	C225-087X268
C2	$X\ 100n + 2 \cdot Y\ 2n5$	WK724_96
C5, C6	Y2 2n5	C102-043X133
K1	TY_517_32_11/B	TY_517_32_11/B
L1	2 x 10uH/4A	DM
L2	2 x 6,3mH/4A	CM
OK1	MOC3083M	DIL06
R1	1M	0309/12
R2, R3	S14K275	S10K11
R4	82R	HPS947
R5	470R	R1206
R6	390R	R1206
R7	10k	R1206
R8	S14K300	S14
T1	BTA12-600B	TO220BH

I.2 Seznam součástek výkonového bloku A, B

Tab. I.2: Seznam součástek výkonového bloku A, B

Označení	Hodnota	Pouzdro
C1 - C8	10n/250V	C050-025X075
C9	100n/100V	C050-025X075
C10 - C12	10n/250V	C050-025X075
C13	2u2/63V	C150-064X183
C14	1u/100V	C150-064X183
D1 - D8	MBR1045	C221B1A
Pokračování na další stránce		

Tab. I.2 – poračování z předchozí stránky

Označení	Hodnota	Pouzdro
D9	P600K	P6-15
JP1	2× zelený 0,75mm ²	1X01
JP2	2× žlutý 0,75mm ²	1X01
JP3	2× zelený 0,75mm ²	1X01
JP4	2× žlutý 0,75mm ²	1X01
JP5	2× zelený 0,75mm ²	1X01
JP6	2× žlutý 0,75mm ²	1X01
JP7	2× černý 0,75mm ²	1X01
JP8	2× červený 0,75mm ²	1X01
JP9	4× bílý 0,75mm ²	1X01
JP10	Modrý 0,14mm ²	1X01
JP11	Zelený 0,14mm ²	1X01
JP12	Černý 0,14mm ²	1X01
JP13	Žlutý 0,14mm ²	1X01
JP14, JP15	Hnědý 0,14mm ²	1X01
JP16	Černý 0,14mm ²	1X01
JP17	Červený 0,14mm ²	1X01
JP18	Žlutý 0,14mm ²	1X01
JP19	Modrý 0,14mm ²	1X01
JP21 - JP23	Červený 0,14mm ²	1X01
JP24, JP25	Hnědý 0,14mm ²	1X01
K1	4 pin konektor	7395-04
KY1, KY2	TY_536_20_1_3	TY_536_20_1_3
OK1, OK2	MOC3021	DIL06
Q1 - Q3	BD911	TO220AH
Q4	BDP949	SOT223
R1 - R8	6k8	R1206
R9	1k/2W	P0613/15
R10	270R	R1206
R11	560R	R1206
R12	10k	R1206
R13	150R	R1206
R14 - R16	0R33/2W	P0613/15
R17	KTY81-210	SOD70
T1, T2	BTB12/600BW	TO220BH

I.3 Seznam součástek filtrů AB

Tab. I.3: Seznam součástek filtrů AB

Označení	Hodnota	Pouzdro
C1 - C30	1mF/63V	E7,5-16
T1, T2	62V/600W	DO15-12
KY7	TY_517_56_11	TY_517_56_11

I.4 Seznam součástek regulátoru A, B

Tab. I.4: Seznam součástek regulátoru A, B

Označení	Hodnota	Pouzdro
B1	4x KY132/80	B-DIL
C1	220u	E5-10,5
C2	68p	C050-025X075
C3	150p	C050-025X075
C5	1n5	C050-025X075
C12	82p	C050-025X075
D1	1N4148	DO35-10
IC1	LM723N	DIL14
LED1	20mA	LED5MM
N2	OP07	TO99
R1	8R2	0309/12
R2	249R	0411/15
R3, R26	330R	0207/10
R4	680R	0207/10
R5	1k	0207/10
R6, R20	15k	0207/10
R7, R10	2k2	0207/10
R8	1k1	0207/10
R9	250R	CA14H
R11, R300 - R303	1k2	0207/10
Pokračování na další stránce		

Tab. I.4 – poračování z předchozí stránky

Označení	Hodnota	Pouzdro
R14	10R	0207/10
R15	25k	CA14H
R21	500R	CA14H
R22, R25	8k2	0207/10
R23	100k	CA14H
R24	15k	0207/10
R27	30k	0207/10
R28, R29	2k7	0207/10
R33 – R35	PC16S	PC16S
R180, R181, R190, R191	750R	0207/10
R605	110k	0207/10
R606	22k	0207/10
R6011	10k	0207/10
V5, V6	BZX55	DO35Z10
V7, V8	1N4148	DO35-10
V10	BC547	TO92

I.5 Seznam součástek komparátorů

Tab. I.5: Seznam součástek modulu KOMPARÁTORŮ PROT

Označení	Hodnota	Pouzdro
C1, C2	10u	E2,5-6
C3	22u	E2,5-6
D1	BZX85V010	C1702-15
D2, D3	BZX83V6.8	DO41Z10
D4, D5	1N4148	DO35-10
D6 – D9	BZX83V6.8	DO41Z10
IC1	LM358N	DIL08
JP1 – JP7	0,14mm ²	1X01
R1, R3	50k	CA14H
R2, R4, R5	1k	CA14H
Pokračování na další stránce		

Tab. I.5 – poračování z předchozí stránky

Označení	Hodnota	Pouzdro
R6	330R	0207/10
R7, R8	27k	0207/10
R9, R10, R12	10k	0207/10
R11, R13	M27	0207/10
R14, R15	12k	0207/10
R16, R17	10k	0207/10
R18, R19	470	0207/10
R20, R21	8k2	0207/10
R22	1k	0207/10
R23	4k7	0207/10
R24	1k2	0207/10
R25	3k3	0207/10
R26 – R28	M27	0207/10
T1 – T3	BC547	TO92

I.6 Seznam součástek subpanelu 5 předního panelu

Tab. I.6: Seznam součástek modulu PŘEDNÍ PANEL - SUB_5

Označení	Hodnota	Pouzdro
JP1 – JP8	0,14mm ²	1X01
LED1	L934SRDF	LED3MM
S1	PB-22E08	9077-2

I.7 Seznam součástek subpanelu 6 předního panelu

Tab. I.7: Seznam součástek modulu PŘEDNÍ PANEL - SUB_6

Označení	Hodnota	Pouzdro
JP1 - JP14	0,14mm ²	1X01
LED1	L934SRDF	LED3MM
S1, S2	PB-22E08	9077-2

I.8 Seznam součástek subpanelu 8 předního panelu

Tab. I.8: Seznam součástek modulu PŘEDNÍ PANEL - SUB_8

Označení	Hodnota	Pouzdro
JP1 - JP61	0,14mm ²	1X01
LED1 - LED7	L934SRDF	LED3MM
S1 - S8	PB-22E08	9077-2

I.9 Seznam součástek subpanelu 11 předního panelu

Tab. I.9: Seznam součástek modulu PŘEDNÍ PANEL - SUB_11

Označení	Hodnota	Pouzdro
JP1, JP2	0,14mm ²	1X01
LED1, LED2, LED4, LED5	OSWT1206C1A_N WHITE	1206
R1, R2	56	R1206

J POUŽITÉ PŘÍSTROJE PŘI MĚŘENÍ DOSAŽENÝCH PARAMETRŮ ZDROJE

Tab. J.1: Použité přístroje při měření dosažených parametrů zdroje

Č.	Přístroj	Typ	Poznámka
1.	Multimetr	METRA M1T290	auto: ss napětí
2.	Ampérmetr	METRA 10A	magnetoele., TP = 0,5
3.	Milivoltmetr	TESLA BM579	10 Hz ÷ 15 MHz
4.	Laboratorní drátové rezistory	METRA, MEZ	-
5.	Střídavý napájecí zdroj	Vlastní výroba	50 V ÷ 260 V/1200 VA
6.	Multimetr	UNI-T DMM3900	rozsah 750 V
7.	Elektronická zátěž	Vlastní výroba	-
8.	Osciloskop	TESLA BM566A	0 Hz ÷ 120 MHz