

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Náhrada relé pomocí FET tranzistorů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel ŠVEJDA**  
Osobní číslo: **E14B0065P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Náhrada relé pomocí FET tranzistorů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Specifikujte požadavky kladené na konkrétní zařízení.
2. Navrhněte zapojení pro bezkontaktní spínání jako náhradu za relé.
3. Navrhněte desku plošného spoje.
4. Zařízení sestrojte a odzkoušejte.
5. Shrňte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan

V Plzni dne 14. října 2016



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřena na náhradu relé pomocí FET tranzistorů ve spínacím režimu. Základním úkolem této práce byl návrh přepojení kontaktních spínacích prvků (relé) v zařízení na bezkontaktní elektronické spínání pomocí FET tranzistorů, návrh plošného spoje umožňujícího změnu přepojení, realizace změny zapojení a odzkoušení funkčnosti zařízení. V této bakalářské práci jsou popsány i základní principy, výhody a nevýhody kontaktních spínacích prvků a elektronických spínacích prvků.

## **Klíčová slova**

Relé, stykač, tyristor, triak, FET, tranzistor, plošný spoj, napájecí zdroj, rezistor, svorkovnice, integrovaný obvod

**Abstract**

This bachelor thesis is focused on substitution of relays by FET transistors in the switch mode. The primary task is the draft of contact switching components (relays) reconnection to the contactless electronic switching with FET transistors, the draft of printed circuit which allows the alteration of reconnect, the realization of connection alteration and the device function test. In this thesis will be also described primary principles, advantages and disadvantages of contact switching components and electronic switching components.

**Key words**

Relay, contactor, thyristor, FET, transistor, printed circuit, power supply, resistor, wire guard, integrated circuit

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 14.5.2017

Pavel Švejda

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 SPÍNACÍ PRVKY</b> .....	<b>12</b>
1.1 KONTAKTNÍ SPÍNACÍ PRVKY ELEKTRONICKY OVLÁDANÉ .....	12
1.1.1 <i>Relé</i> .....	12
1.1.2 <i>Stykač</i> .....	12
1.2 ELEKTRONICKÉ SPÍNACÍ PRVKY .....	13
1.2.1 <i>Spínací elektronické součástky</i> .....	13
1.2.2 <i>Bipolární tranzistor</i> .....	15
1.2.3 <i>Unipolární tranzistory</i> .....	16
1.2.4 <i>Tranzistor ve spínacím režimu</i> .....	18
<b>2 POPIS ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>20</b>
2.1 FUNKCE ZAŘÍZENÍ .....	20
2.2 SILOVÁ ČÁST .....	20
2.2.1 <i>Napájení silové části</i> .....	20
2.2.2 <i>Původní zapojení spínání</i> .....	21
2.2.3 <i>Možnosti zapojení</i> .....	22
2.3 OVLÁDACÍ ČÁST .....	23
2.3.1 <i>Napájecí zdroj</i> .....	23
2.3.2 <i>Měřicí část</i> .....	24
2.3.3 <i>Řídící část</i> .....	26
<b>3 VÝMĚNA SPÍNACÍCH PRVKŮ ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>28</b>
3.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY .....	28
3.2 NÁVRH ZAPOJENÍ A VÝBĚR SOUČÁSTEK .....	28
3.2.1 <i>První verze plošného spoje</i> .....	32
3.2.2 <i>Testování první verze plošného spoje</i> .....	34
3.3 ÚPRAVA NÁVRHU ZAPOJENÍ .....	34
3.3.1 <i>Druhá verze plošného spoje</i> .....	34
3.4 REALIZACE VÝMĚNY SPÍNACÍCH PRVKŮ .....	37
3.4.1 <i>Úprava napájecího zdroje</i> .....	37
3.4.2 <i>Instalace a zapojení plošného spoje</i> .....	38
3.4.3 <i>Instalace chladičů tranzistorů</i> .....	39
<b>4 ODZKOUŠENÍ FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>41</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>42</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>43</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## **Úvod**

Tato bakalářská práce je zaměřena na náhradu relé pomocí bezkontaktního elektronického spínacího prvku realizovaného pomocí FET tranzistorů. Jedná se o zařízení, které v závislosti na vyrobeném výkonu připojuje postupně zátěž v podobě žárovek. Dříve připojování prováděla relé, která byla již opotřebena a tudíž byla nutná jejich výměna. Byla zvolena varianta vyměnit relé za tranzistory ve spínacím režimu.

Tato bakalářská práce byla prezentována na soutěži studentských prací SVOČ 2016, kde získala třetí místo.

## Seznam symbolů a zkratek

$A$	.....	Anoda
$B$	.....	Báze
$B_{(2)}$	.....	Magnetická indukce
$C$	.....	Kolektor
$d$	.....	Tloušťka destičky Hallovy sondy
$D$	.....	Drain
$E$	.....	Emitor
$G$	.....	Gate
$h$	.....	Hallova konstanta
$I$	.....	Proud Hallovou sondou
$I_B$	.....	Proud báze tranzistoru
$I_C$	.....	Proud kolektoru tranzistoru
$I_E$	.....	Proud emitoru tranzistoru
$I_H$	.....	Přídržný proud tyristoru
$K$	.....	Katoda
$P$	.....	Ztrátový výkon tranzistoru
$R_{POU}$	.....	Tepelný odpor pouzdra tranzistoru
$R_{POD}$	.....	Tepelný odpor izolační podložky
$R_{CHL}$	.....	Tepelný odpor chladiče
$S$	.....	Source
$t_o$	.....	Teplota okolí
$t_p$	.....	Teplota pouzdra tranzistoru
$U_{BE}$	.....	Napětí mezi bází a emitorem
$U_{CB}$	.....	Napětí mezi kolektorem a bází
$U_{DS}$	.....	Napětí mezi drain a source
$U_{GS}$	.....	Napětí mezi gate a source
$U_H$	.....	Hallovo napětí

*K1 – K2* ..... Relé 1-8

*T1 – T6* ..... Spínací tranzistory 1-6

*Ž1 – Ž8* ..... Žárovky 1-8

*HDO* ..... Hromadné dálkové ovládání

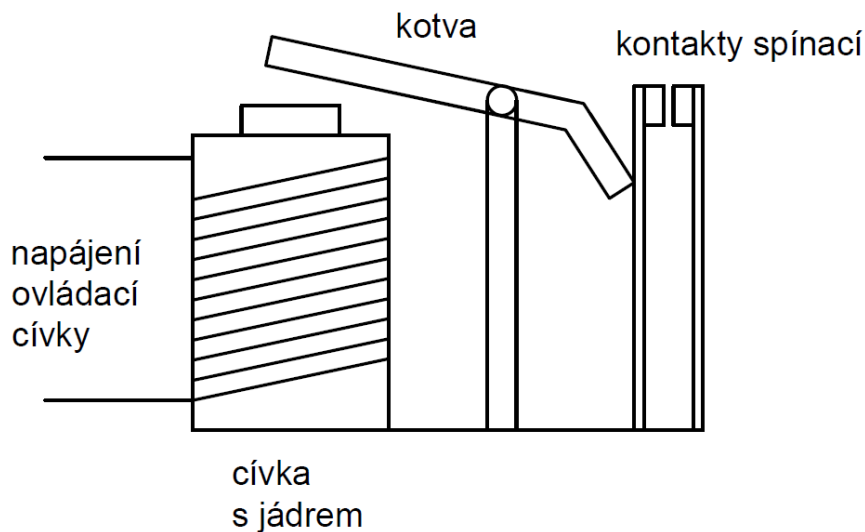
*PLC* ..... Programovatelný logický automat

# 1 Spínací prvky

## 1.1 Kontaktní spínací prvky elektronicky ovládané

### 1.1.1 Relé

Relé je kontakt ovládaný oproti obyčejnému kontaktu (spínači, vypínači, přepínači) elektronicky. Obsahuje cívku pracující na principu elektromagnetické indukce, která po přivedení vnějšího napájení na svorky cívky vytvoří magnetické pole a přitáhne k sobě kotvu s pohyblivými kontakty. Podle druhu se tyto pohyblivé kontakty přitáhnou k pevným kontaktům (spínací) nebo odtáhnou od pevných kontaktů (rozpínací). V praxi se můžeme setkat s kombinací těchto dvou kontaktů, čímž vznikne kontakt přepínací. Ovládací cívka může být napájena stejnosměrným nebo střídavým napětím. Relé se vyrábí přibližně až do hodnoty průchozího proudu kontakty relé cca 100 A.

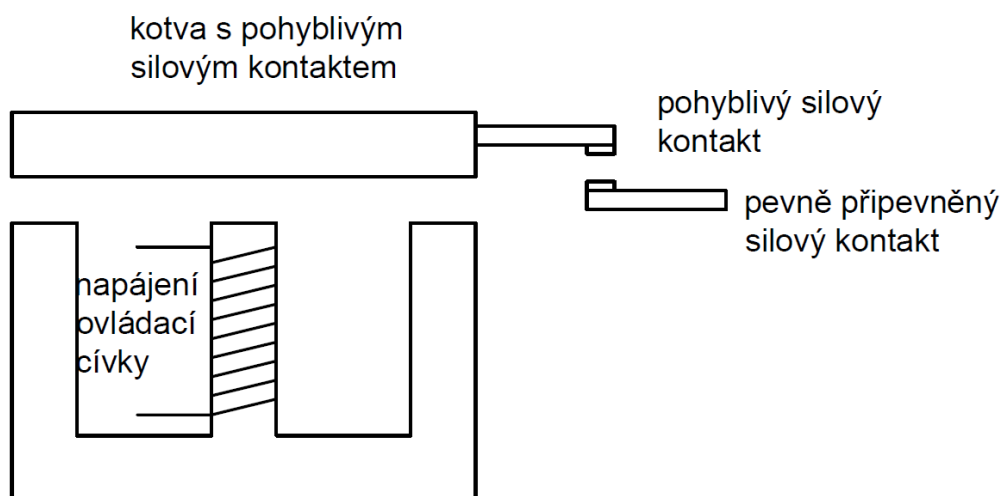


Obr. 1.1 Zjednodušená struktura relé

### 1.1.2 Stykač

Stykač je stejně jako relé kontakt ovládaný elektronicky. Princip stykače je stejný jako u relé. Obsahuje ovládací cívku, kterou můžeme napájet stejnosměrným napětím, ale v praxi se více používá napájení střídavým napětím většinou o velikosti 24 V. Dále obsahuje silové a pomocné kontakty. Silové se používají pro spínání silové zátěže a bývají většinou spínací. Pomocné se používají k sestavení řídicí logiky například jako přídržné kontakty, reverzační kontakty při zapojení dvou stykačů při přepínání motoru ze zapojení

do hvězdy do zapojení do trojúhelníka. Tyto kontakty bývají spínací i rozpínací. Stykač se oproti relé používá na větší zatížení např. spínání motorů, HDO v domovní instalaci, atd.

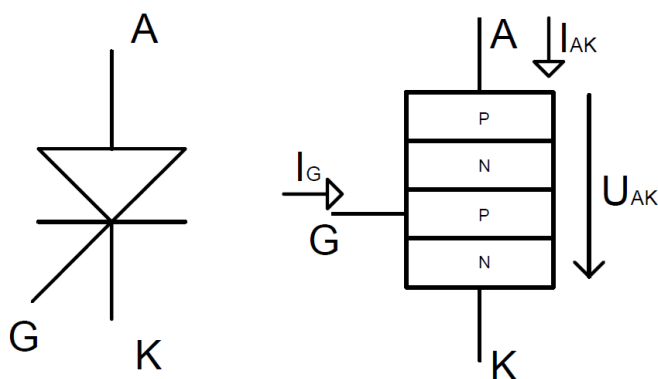


Obr. 1.2 Zjednodušená struktura stykače s jedním silovým kontaktem

## 1.2 Elektronické spínací prvky

### 1.2.1 Spínací elektronické součástky

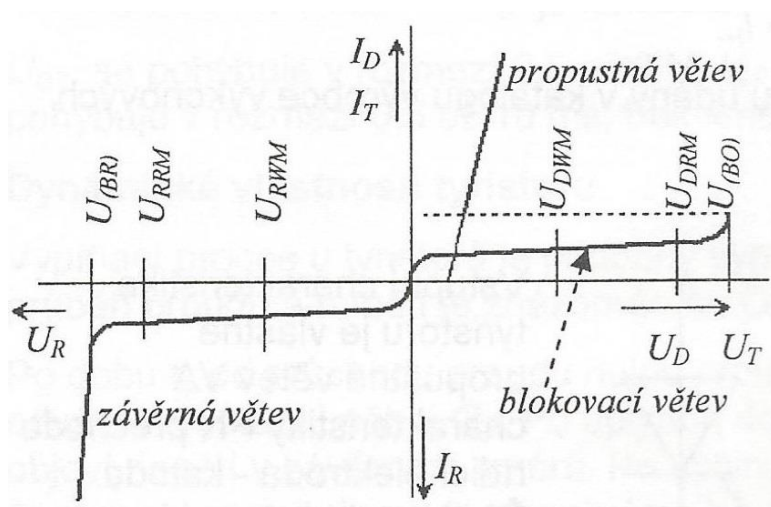
#### Tyristor



Obr. 1.3 značka a struktura tyristoru

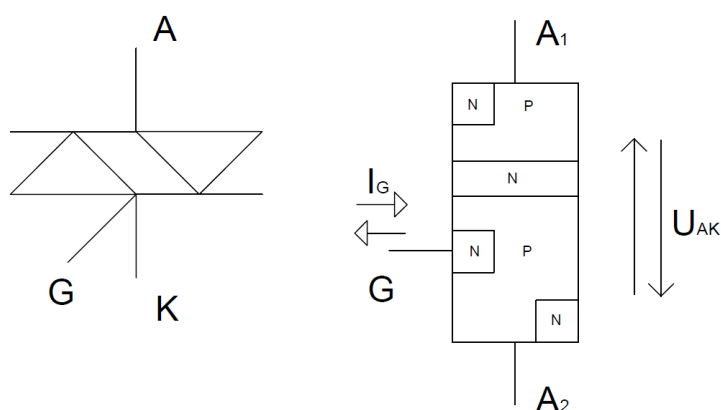
Tyristor je čtyřvrstvá polovodičová součástka se třemi vývody. Má tři stavy. Závěrný, blokovací a propustný. Ve třetím kvadrantu voltamperové charakteristiky se chová jako obyčejná dioda s jedním PN přechodem. V prvním kvadrantu voltamperové charakteristiky má ale jiné vlastnosti. Po připojení napětí v propustném směru (na anodu +, na katodu -) nedojde ihned k průchodu proudu tyristorem. Tyristor se nachází v blokovacím stavu. Výrobce v datovém listu udává tzv. kritickou strmost, což znamená, že tyristor by se mohl

dostat do propustného směru při prudkém nárůstu napětí  $U_{AK}$ . Toto zapnutí je ale nežádoucí a mohlo by dojít i k poškození součástky. Žádoucí je sepnutí tyristoru pomocí vývodu G. Po přivedení proudu  $I_G$  na tento vývod přejde tyristor z blokovacího stavu do stavu propustného. Proud  $I_G$  nemusíme přivádět stále. I po odpojení zdroje od vývodu G je tyristor v propustném směru. Vypnutí tyristoru nastane při poklesu proudu  $I_{AK}$  pod hodnotu přídržného proudu  $I_H$ . Ve stejnosměrných obvodech realizujeme vypnutí tyristoru pomocí paralelně připojeného kondenzátoru nabitého opačnou polaritou. Ve střídavých obvodech se tyristor vypne při každém průchodu časového průběhu proudu nulou.



Obr. 1.4 voltampereová charakteristika tyristoru [1]

### Triak

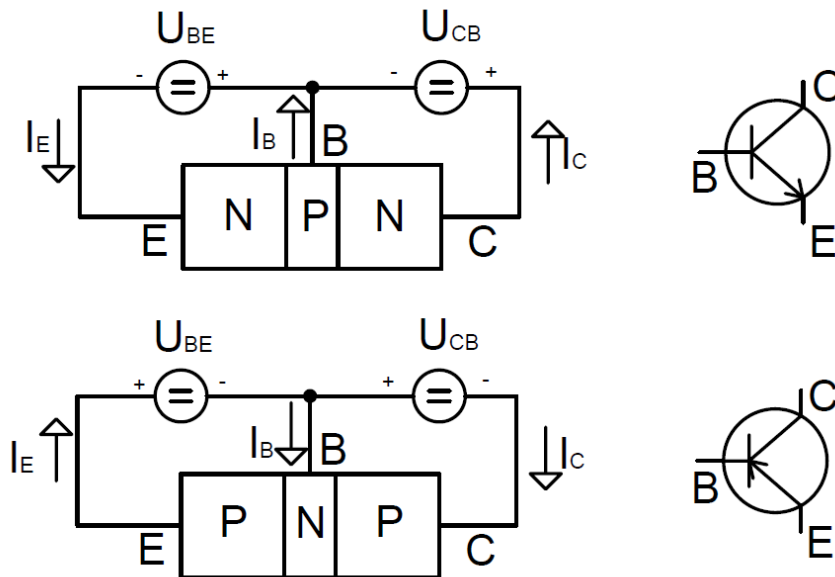


Obr. 1.5 značka a struktura triaku

Triak je symetrická součástka, která je schopna spínat proudy obou polarit. Jedná se principiálně o dva antiparalelně zapojené tyristory. Triak je možno uvést do propustného

stavu krátkým impulzem proudu  $I_G$  o trvání několik  $\mu\text{s}$ . Triak lze zapnout oběma polaritami proudu. Vypnutí triaku se provádí stejně jako u tyristoru poklesem průchozího proudu pod přídržnou hodnotu proudu. Voltamperová charakteristika triaku je souměrná podle počátku. V prvním a třetím kvadrantu je stejná jako charakteristika tyristoru v prvním kvadrantu.

### 1.2.2 Bipolární tranzistor



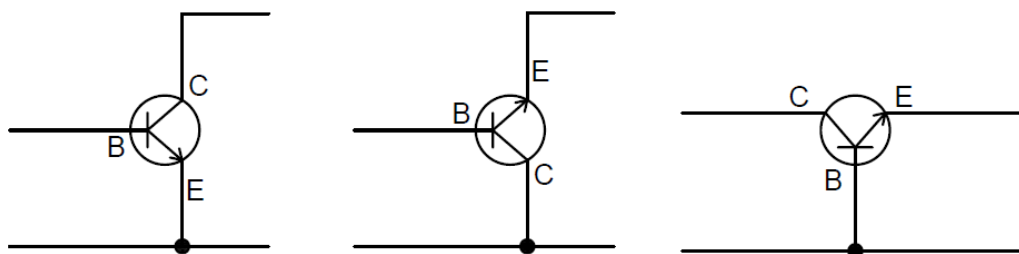
Obr. 1.6 zapojení a značky NPN a PNP bipolárních tranzistorů

Bipolární tranzistor je aktivní polovodičová součástka. Skládá se ze dvou PN přechodů. Existují dva typy bipolárních tranzistorů - NPN a PNP. Po přiložení napětí mezi kontakty tranzistoru NPN báze a emitoru dojde k toku elektronů, které přejdou do oblasti báze, kde část elektronů rekombinuje a zbytek elektronů projde vlivem velkého napětí přes závěrně polarizovaný PN přechod do emitoru a dojde k toku elektrického proudu. [2]

Celkový proud vychází z rovnice:

$$I_E = I_B + I_C \quad (1.1)$$

Bipolární tranzistor může být zapojen třemi způsoby. Každé zapojení má název podle společné elektrody pro vstup a výstup z tranzistoru. Možnosti zapojení jsou se společnou bází, společným kolektorem a společným emitorem.

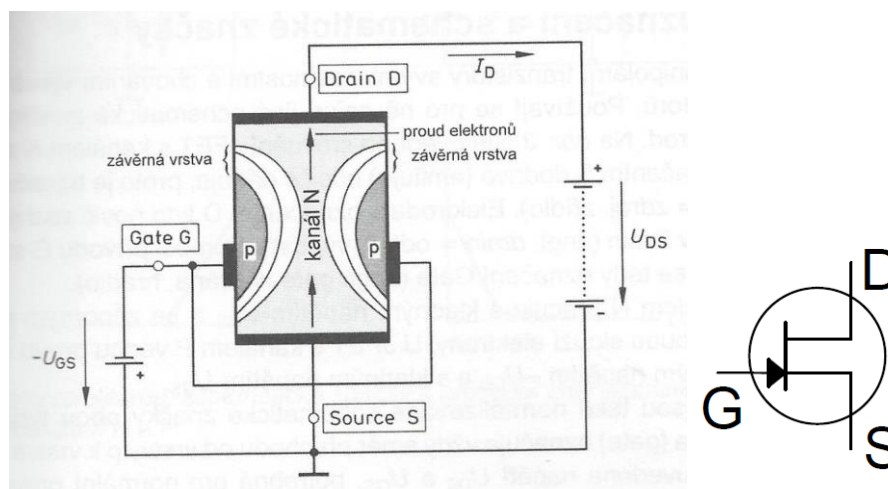


Obr. 1.7 tři způsoby zapojení NPN bipolárního tranzistoru (zleva společný emitor, společný kolektor, společná báze)

### 1.2.3 Unipolární tranzistory

Unipolární tranzistory jsou stejně jako bipolární tranzistor aktivní polovodičové součástky. Oproti bipolárním tranzistorům jsou tyto tranzistory řízené elektrickým polem. V dnešní technice jsou více využívané z důvodu snazšího řízení pomocí napětí. Bipolární tranzistory jsou řízené proudem. Unipolární tranzistory jsou ale více citlivé na statickou elektřinu. Při jejich manipulaci a pájení je nutno dbát na tuto skutečnost. Jinak může dojít k jejich trvalému poškození. U unipolárních tranzistorů se konektory označují jinak než u bipolárních tranzistorů. Báze je u unipolárních tranzistorů označována jak G, kolektor je označen D a emitor je označen jako S. Stejně jako u bipolárních tranzistorů je možno zapojit unipolární tranzistor třemi způsoby (společný emitor, společný kolektor a společná báze). [2]



JFET unipolární tranzistor

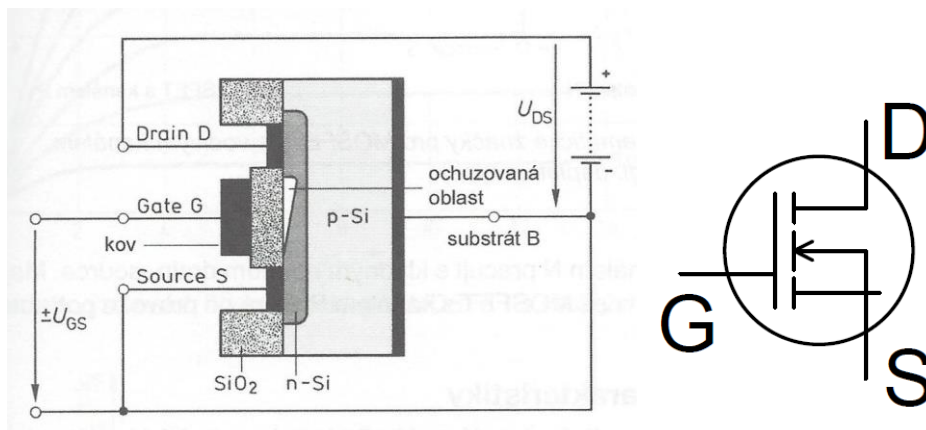
Obr. 1.8 struktura a značka JFET tranzistoru typu N [4]

Jedná se o unipolární tranzistor s přechodovým hradlem. Skládá se ze základního polovodiče typu N nebo P, ve kterém jsou vytvořeny dvě silně dotované oblasti opačné vodivosti. Tento tranzistor se řídí pouze jednou polaritou napětí  $U_{GS}$ . Při zvyšování velikosti tohoto napětí dochází k rozšíření oblastí s prostorovým nábojem v základním polovodiči v okolí polovodičů opačné vodivosti a tím dochází k přiškrcení vodivého kanálu a tím k zmenšení průchozího proudu. U tranzistoru typu N dochází k rozšiřování oblasti v polovodiči N a ovládá se záporným napětím. Tranzistor s kanálem typu P se ovládá kladným napětím. [2]

MOSFET tranzistor

Tento unipolární tranzistor nemá řídicí elektrodu oddělenou pomocí PN přechodu v závěrném směru, ale pomocí tenké izolační vrstvy. Nejčastěji se používá oxid křemičitý  $SiO_2$ . Existují dva typy tohoto tranzistoru. Buď s indukovaným kanálem nebo s vodivým kanálem. Tranzistor s indukovaným kanálem při nulovém řídicím napětí proud nepropouští. Po přivedení kladného napětí (tranzistor typu N) dojde k přitažení elektronů v polovodiči typu P, ty se nahromadí u řídicí elektrody a dojde k vzniku vodivého kanálu. Čím vyšší řídicí napětí, tím více se rozšíří vodivý kanál a vzroste velikost průchozího proudu tranzistorem. MOSFET tranzistor s vodivým kanálem má již vodivý kanál vytvořený, tudíž při nulovém řídicím napětí již nějaký proud tranzistorem protéká. Po

přiložení kladného napětí (tranzistor typu N) na řídicí elektrodu dojde k vtažení elektronů do vodivého kanálu a zvětší se velikost průchozího proudu tranzistorem. Naopak po přiložení záporného napětí dojde k vytlačení elektronů z vodivého kanálu, ten se zúží a poklesne velikost průchozího proudu. MOSFET tranzistor s vodivým kanálem tudíž lze řídit oběma polaritami napětí. U tranzistoru MOSFET typu P je orientace všech napětí opačná a vodivý kanál netvoří elektrony ale díry, ale princip je totožný s tranzistorem MOSFET typu N. [3]



Obr. 1.9 struktura [4] a značka MOSFET tranzistoru typu N

#### 1.2.4 Tranzistor ve spínacím režimu

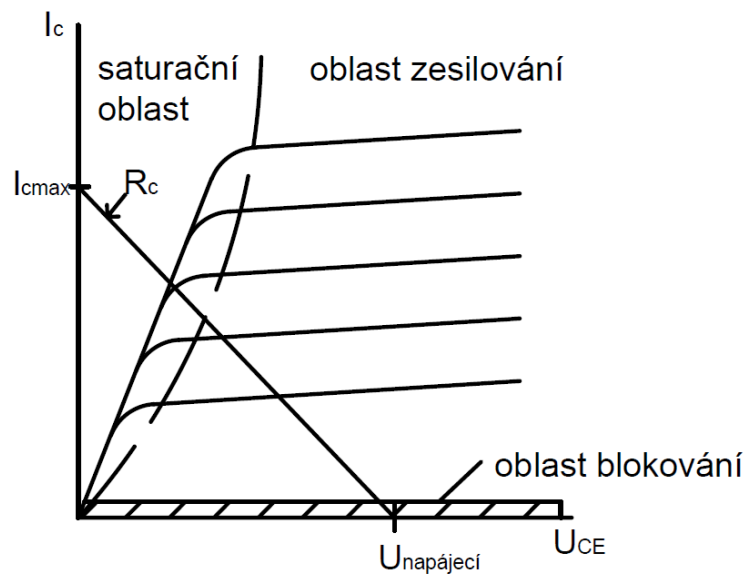
Ve spínacím režimu mohou pracovat bipolární i unipolární tranzistory. Tranzistor pracuje pouze ve dvou stavech. Plně otevřen a plně uzavřen. Pro plné otevření bipolárního tranzistoru dodáváme do báze více proudu než je potřeba pro plný proud kolektorem. Při tomto stavu ale již nedochází ke zvýšení proudu kolektorem z důvodu omezení odporem  $R_C$  a dojde k nasycení (saturaci) tranzistoru a poklesu napětí  $U_{CE}$  až na několik desetin voltu a poklesne i propustný odpor tranzistoru. Tento stav nastává, když je činitel saturace vyšší než 1. [2]

Činitel saturace:

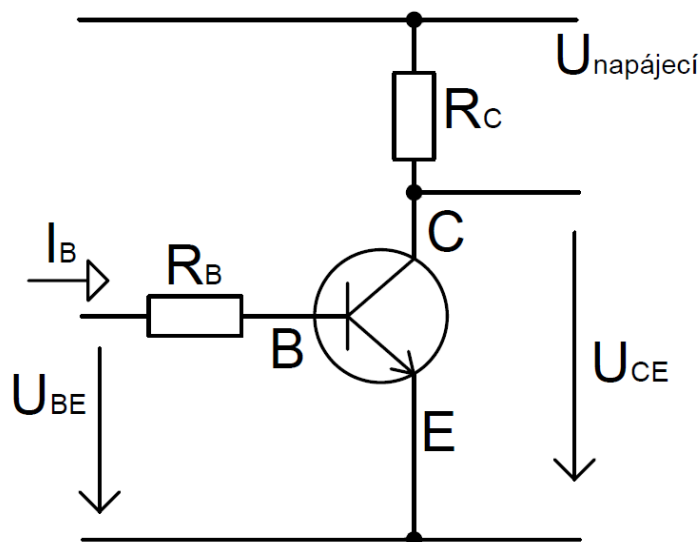
$$s = \frac{I_B}{I_{BMAX}} \quad (1.2)$$

Lze tak vytvořit bezkontaktní spínací prvek, který je velice rychlý, dobře ovladatelný proudem nebo napětím (dle typu tranzistoru) a nedochází zde k opotřebení žádných

kontaktů. Nejčastěji se používá zapojení se společným emitorem. Z unipolárních tranzistorů se nejčastěji používají tranzistory MOSFET. Jejich výhodou je, že při saturaci poklesne jejich napětí  $U_{DS}$  ( $U_{CE}$ ) skoro až na nulovou hodnotu. Naopak jejich nevýhodou je vyšší propustný odpor oproti bipolárním tranzistorům. Také spínací doba je u bipolárních tranzistorů nižší. Nelze zanedbat ani dynamické vlastnosti tranzistorů. Ty se projeví při skokových změnách vstupního proudu, který bude mít na výstupu exponenciální průběh způsobený kapacitami tranzistorů. [2]



Obr. 1.10 voltampérová charakteristika tranzistoru s označením saturační a blokovací oblastí



Obr. 1.11 zapojení bipolární tranzistoru jako spínač v zapojení se společným emitorem

## 2 Popis zařízení

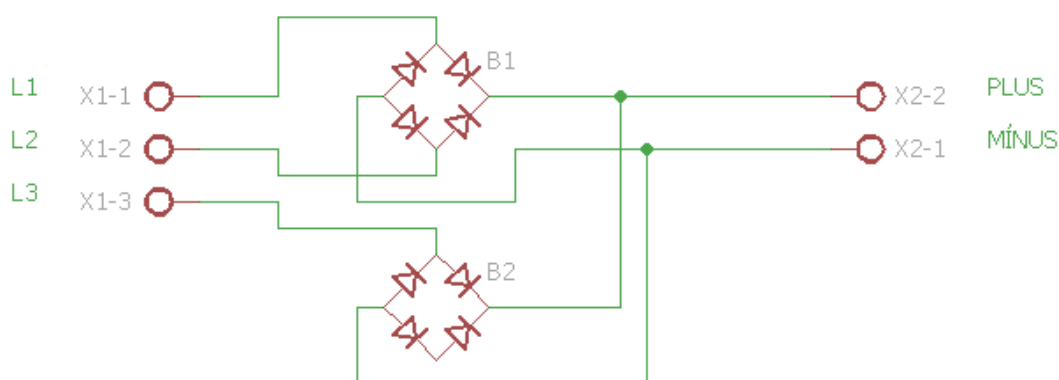
### 2.1 Funkce zařízení

Základní funkcí zařízení je postupné připojování zátěže ke zdroji dle vyrobeného výkonu. Jako zdroj je použit generátor spojený dvoustupňovým řetězovým převodem s rotopedem. Vyrobený výkon je závislý na intenzitě šlapání na rotopedu. Ten může být potom spotřebován buď osmi žárovkami nebo rychlovarnou konvicí. Žárovky jsou připojovány postupně dle vyrobeného výkonu. Měřicí čidla posílají signál do PLC, který vyhodnotí velikost vyrobeného výkonu a vyšle signál spínacím prvkům, které připojí určitý počet žárovek úměrný výkonu ze zdroje. Konvice je připojena přímo ke zdroji. Měří se teplota vody a čím rychleji se na rotopedu šlape, tím dříve se ohřeje voda v konvici.

### 2.2 Silová část

#### 2.2.1 Napájení silové části

Zdrojem je synchronní šesti-pólový servomotor s permanentními magnety, který při otáčení hřídele převádí mechanickou energii na elektrickou dle principu elektromagnetické indukce. Vyrobený střídavý proud je dále usměrněn na stejnosměrný. K tomu slouží třífázový usměrňovací můstek složený ze dvou integrovaných můstků KBPC2506 umístěných na chladiči z důvodu ztrátového tepla. Z můstku na výstupu vychází usměrněný jednofázový šestipulzní proud.

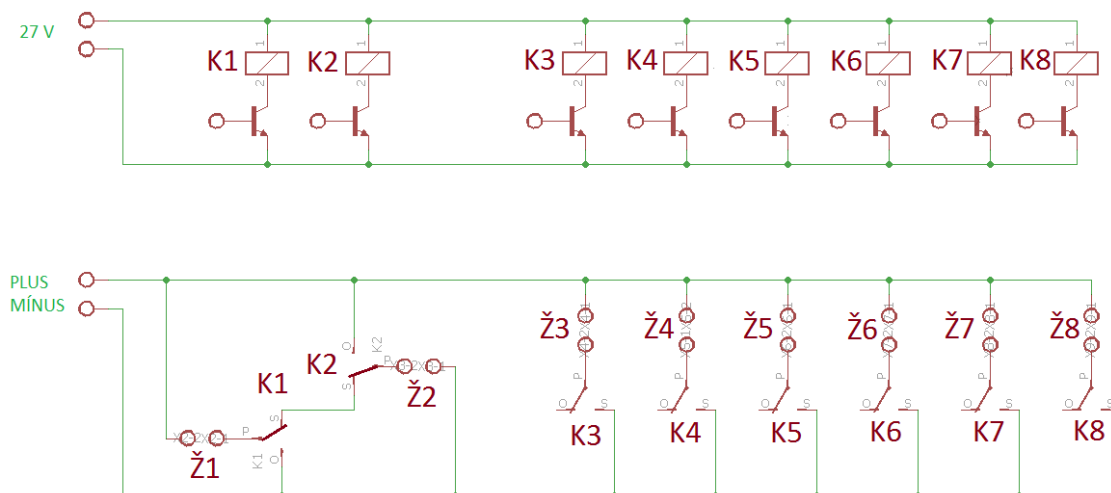


Obr. 2.1 schéma zapojení usměrňovacích můstků

Usměrněný proud je dále přiveden k přepínači. Ten přepíná proud buď na konvici nebo na žárovky. Těch je celkem osm. První a druhá je 24V/100W a dalších šest 24V/60W. Všech osm žárovek bylo připojováno pomocí relé.

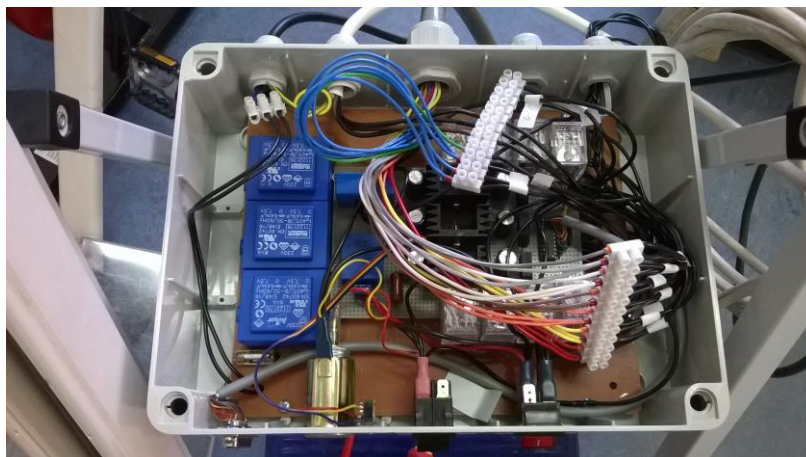
## 2.2.2 Původní zapojení spínání

Připojení prvních dvou relé bylo odlišné oproti ostatním šesti relé. První dvě relé zajišťovala trvalé připojení dvou prvních žárovek v sérii při nečinnosti spínání z PLC.

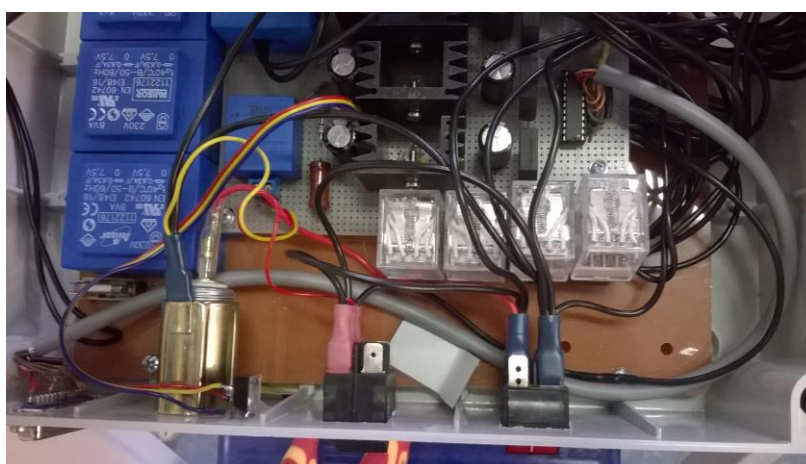


Obr. 2.2 schéma zapojení cívek relé a spínání žárovek

Princip činnosti prvních dvou relé: v případě nečinnosti PLC jsou kontakty relé K1 a K2 spojeny tak, že žárovka 1 (Ž1) a žárovka 2 (Ž2) jsou v sérii a je zajištěno zatížení zdroje i v nečinnosti PLC. Po zapnutí PLC dojde k přepnutí kontaktů K1 a připojení Ž1. Další žárovky se spínají už v závislosti na dodávaném výkonu. Aby nebyly přetíženy výstupy PLC, jsou posíleny pomocí tranzistorů ve spínacím režimu. Po přivedení impulzu z PLC dojde k průchodu proudem tranzistorem a připojení cívk relé k zemi. Ta přepojí kontakty a žárovka se rozsvítí. Tranzistory posilující výstupy PLC byly řešeny pomocí tranzistorového pole ULN2803AP. Veškerá elektronika až na PLC s relé byla umístěna v instalační krabici na hliníkových schůdkách. Na spodní části této krabice jsou i nadále umístěny usměrňovací můstky na chladičích. PLC je umístěno v samostatné instalační krabici a je propojeno pomocí kabelů.



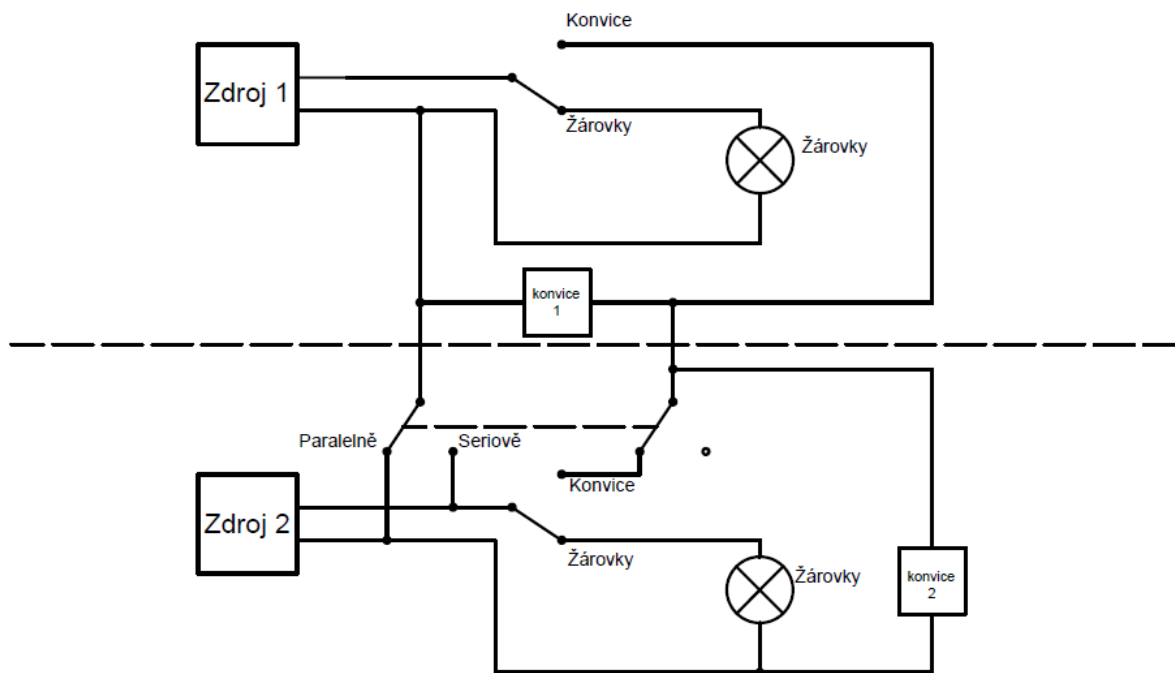
Obr. 2.3 foto zařízení s původními relé



Obr. 2.4 detail na původní relé

### 2.2.3 Možnosti zapojení

Ve skutečnosti není jen jedno popisované zařízení, ale dvě, které lze vzájemně propojit. Při spotřebě vyrobeného výkonu v žárovkách pracuje každé zařízení zvlášť. Každé kolo má svoji ovládací elektroniku až na PLC, které je pro obě zařízení společné. Zařízení je možné spojit třemi způsoby. První způsob je, že každé zařízení dodává výkon do své konvice. Druhý způsob je, že se spojí zařízení k sobě paralelně a napájí jednu konvici. Pozitivní vlastnost tohoto spojení je nezávislost napájecích generátorů. Dalším způsobem je, že se kola pomocí dalšího přepínače spojí do série a napájí opět jen jednu konvici. U tohoto spojení se napájecí generátory ovlivňují navzájem. Vyrobený proud teče skrz oba generátory a dochází přitom k tomu, že na generátoru s nižšími otáčkami vzniká větší moment než na druhém generátoru s vyššími otáčkami.

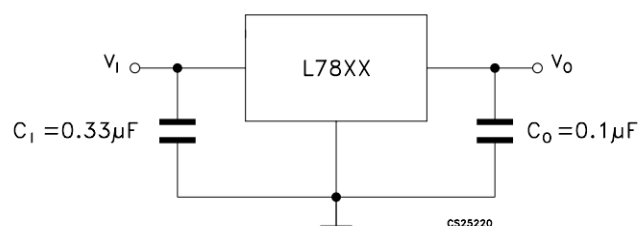


Obr. 2.5 schéma spojení dvou zařízení

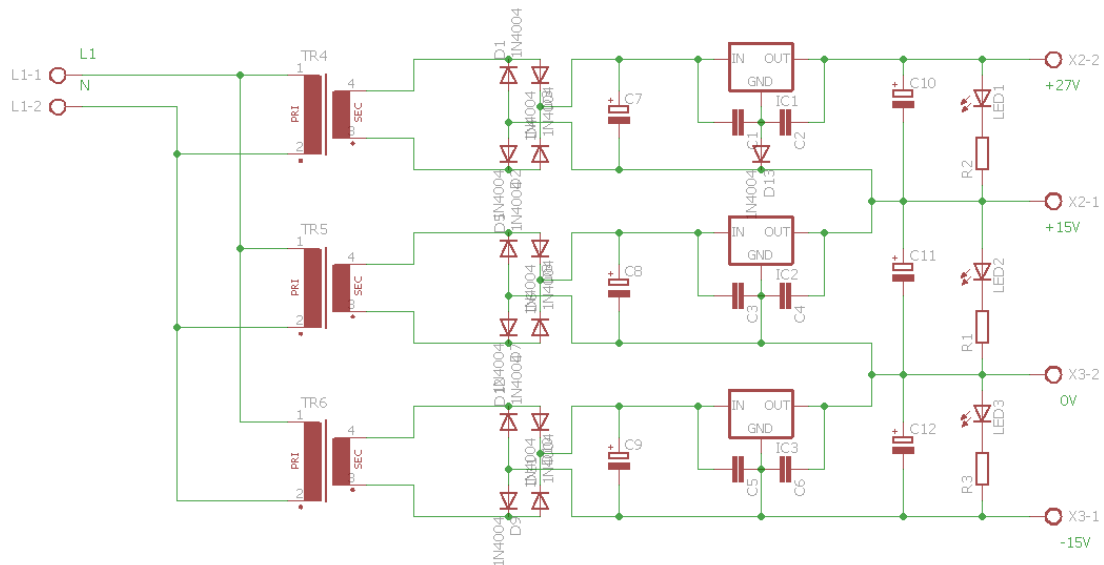
## 2.3 Ovládací část

### 2.3.1 Napájecí zdroj

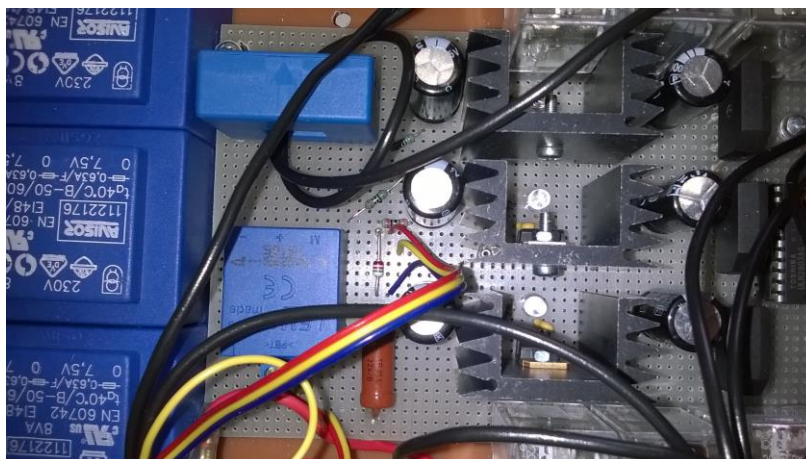
PLC má svůj spínaný zdroj instalovaný v samostatné instalační krabici s ostatními částmi PLC. Ostatní zdroje pro ovládací elektroniku jsou umístěné v instalační krabici na schůdkách. Pro měřicí část je nutné napájecí napětí  $-15\text{V}$  a  $15\text{V}$ . Pro relé bylo nutné napájecí napětí  $27\text{V}$ . Proto bylo nutné připojit další zdroj napětí. Byl použit zdroj o napětí  $12\text{V}$  spojený do série s napájecím zdrojem  $15\text{V}$ . Celé napájení je tedy řešeno pomocí tří oddělených zdrojů. Každý má svůj transformátor  $230/14\text{V}$ , usměrňovací můstek, stabilizátor řady typu  $78\text{XX}$ , vyhlazovací kondenzátory a LED diodu pro indikaci funkčnosti zdroje. Zapojení jednotlivých stabilizátorů odpovídá katalogovému zapojení.



Obr 2.6 katalogové zapojení stabilizátoru 7812 [5]



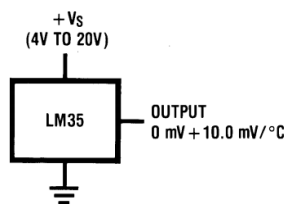
Obr. 2.7 schéma zapojení zdrojů pro ovládání



Obr. 2.8 foto stabilizátorů zdrojů umístěných na chladiči společně s měřicími sondami a transformátory

### 2.3.2 Měřicí část

Při spotřebě vyrobeného výkonu na konvici se měří vyrobený výkon a zároveň i teplota vody. To je realizováno teplotním čidlem LM35 v pouzdře TO92. Tento senzor je ponořen do konvice a převádí naměřenou teplotu na elektrický signál v poměru 10 mV na 1°C.



Obr. 2.9 typické katalogové zapojení teplotního čidla LM35 [6]

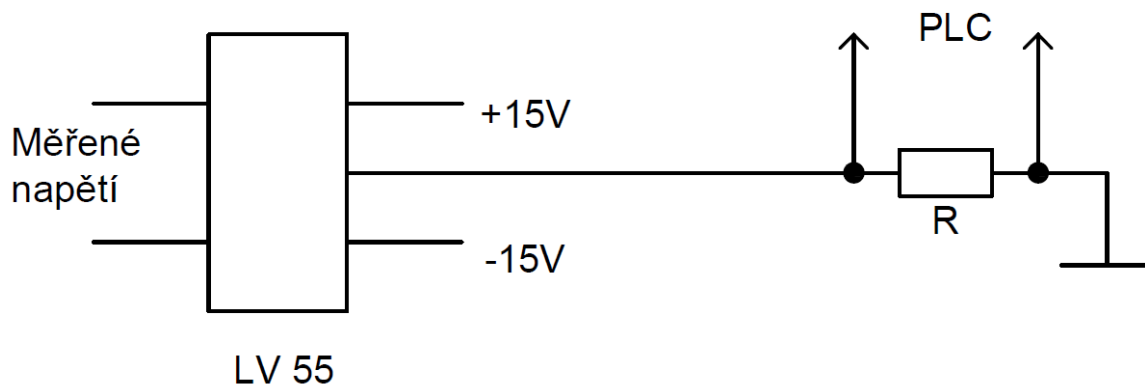


Při spotřebě vyrobeného výkonu na žárovkách se měří napětí a proud. K výpočtu výkonu dochází v PLC. Dle jeho velikosti se žárovky postupně připojují. K měření výkonu je použita napěťová a proudová sonda. K jejich napájení je potřeba souměrného napájení -15V a 15V. Obě sondy pracují na principu Hallova jevu. Hallovým článkem, který je tvořený polovodičovou destičkou, protéká konstantní proud ze souměrného zdroje napětí. Bez působení vnějšího magnetického pole se nevytvoří příčné elektrické pole a napětí na sondě bude tedy nulové. Začne-li působit vnější magnetické pole, začne se vytvářet příčné elektrické pole a na sondě naměříme napětí. Vnější magnetické pole vytváří cívka, kterou protéká měřený proud z vnějšího obvodu. U napěťové sondy je cívka umístěna přímo uvnitř pouzdra sondy. Přiložené napětí umožní průtok proudu a ten vytvoří magnetické pole, které je následně změřeno. U proudových sond není třeba cívky vytvářející vnější magnetické pole. Drát, kterým protéká měřený proud, se chová jako cívka vytvářející magnetické pole ve svém okolí. Existuje několik provedení proudových Hallových sond. Některé typy lze jen přiložit k drátu a u některých je třeba udělat smyčku. To se týká proudových sond s pouzdem ve tvaru prstence.

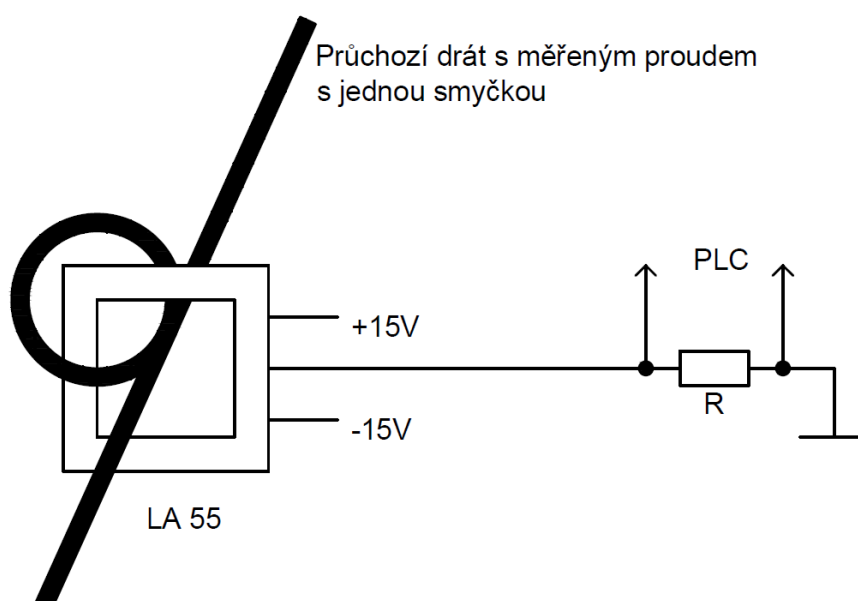
$$U_H = h \cdot \frac{B_{(2)} \cdot I}{d} \quad (2.1)$$

Z rovnice (2.1) vyplývá, že při konstantní Hallově konstantě ( $h$ ) a tloušťce destičky ( $d$ ) bude napětí na výstupu sondy přímo úměrné procházejícímu proudu. Výhodou tohoto měření je oddělení měřícího a silového obvodu.

V popisovaném zařízení je použita napěťová sonda LV 25-P a proudová sonda LA 55-P, která je schopna měřit proudy až do 70 A. Výstupy obou sond jsou proudové. Pro vstupy PLC je ale nutné je převést na napěťové. To je provedeno přes odpor na základě Ohmova zákona. Napětí na rezistoru s konstantním odporem je úměrné průchozímu proudu.



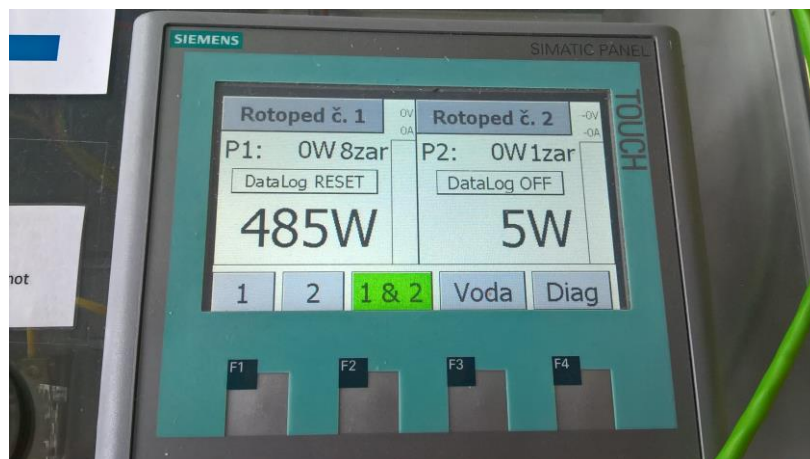
Obr. 2.10 zapojení napěťové sondy LV 55 s připojením k PLC



Obr. 2.11 zapojení napěťové sondy LV 55 s připojením k PLC

### 2.3.3 Řídící část

Řízení v zařízení zajišťuje PLC od firmy Siemens typu Simatic S7-1200 s připojenými periferiemi. Vše je umístěno v instalační krabici. Propojení s okolím zajišťují vstupní a výstupní obvody s relé, konektor RJ45 za účelem komunikace s počítačem a přenosu dat a konektory k připojení dvou zařízení. PLC má svůj napájecí zdroj umístěný uvnitř instalační krabice. K ovládání PLC a zobrazení naměřených hodnot je ve víku instalační krabice umístěn dotykový displej.



Obr. 2.12 dotykový displej PLC

## 3 Výměna spínacích prvků zařízení

### 3.1 Základní požadavky

Základním požadavkem byla výměna kontaktních spínacích prvků v zařízení za bezkontaktní spínání pomocí FET tranzistorů za účelem vyřazení kontaktů, které se po čase opotřebovávají. První dvě relé ale bohužel nelze odstranit. Bylo požadováno ponechání zabezpečovací funkce trvalého zatížení zdroje na kole i bez funkčnosti PLC. Tudíž aby v případě opotřebení relé bylo možné je vyměnit za nové bez nutnosti zásahu do zapojení zařízení pájením kontaktů, nýbrž pouze vyjmutím desky plošného spoje s relé a připojením pomocí konektorů. Dále byl požadavek, pokud to bude možné, aby po výměně spínacích prvků byla ponechána možnost spojení kol.

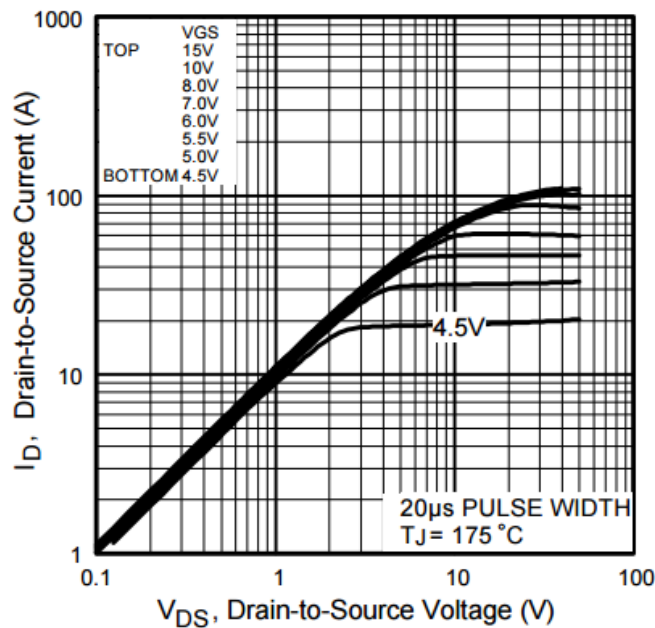
### 3.2 Návrh zapojení a výběr součástek

Návrh zapojení a následně návrh plošného spoje byl proveden v programu Eagle dle zadaných požadavků. Z prostorového hlediska instalační krabice zařízení bylo nutné rozdělit spínací prvky na dvě desky o rozměrech 6x10 cm. Na jedné desce byly umístěny dvě relé a dva tranzistory a na druhé desce čtyři tranzistory. Na desku plošného spoje byla také umístěna veškerá elektronika spojená s výměnou spínacích prvků.

Elektronikou spojenou s výměnou spínacích prvků je myšlen integrovaný obvod, vyhlazovací kondenzátory na vstupu napájení, odpory, tranzistory zesilující výstup integrovaného obvodu a křemíkové diody. Integrovaný obvod zde byl umístěn proto, aby bylo zajištěno odstranění zákmitů vstupu z PLC. Integrovaný obvod obsahoval čtyři hradla AND. Jeden vstup každého hradla AND byl připojen trvale na napájecí napětí, které tvořilo logickou úroveň jedna a druhý vstup byl připojen výstup PLC. Tudíž když na výstupu PLC byla logická úroveň nula, na výstupu hradla byla logická úroveň také nula a nedošlo k připojení žárovky. Při logické úrovni jedna na výstupu PLC byla též na výstupu hradla AND logická úroveň jedna a došlo k připojení žárovky. Bylo ale nutné se rozhodnout o druhu integrovaného obvodu, jestli použít obvod s technologií TTL nebo CMOS. Toto rozhodnutí bylo závislé na napájecím napětí. Obvody TTL mají napájecí napětí 5V a obvody CMOS mají napájecí napětí až 18V. Obvody TTL mají též výhodu větší odolnosti vůči statické elektřině než obvody CMOS. U obvodů CMOS se musí dbát na jejich manipulaci a při osazování do plošného spoje je vhodnější použití patice než

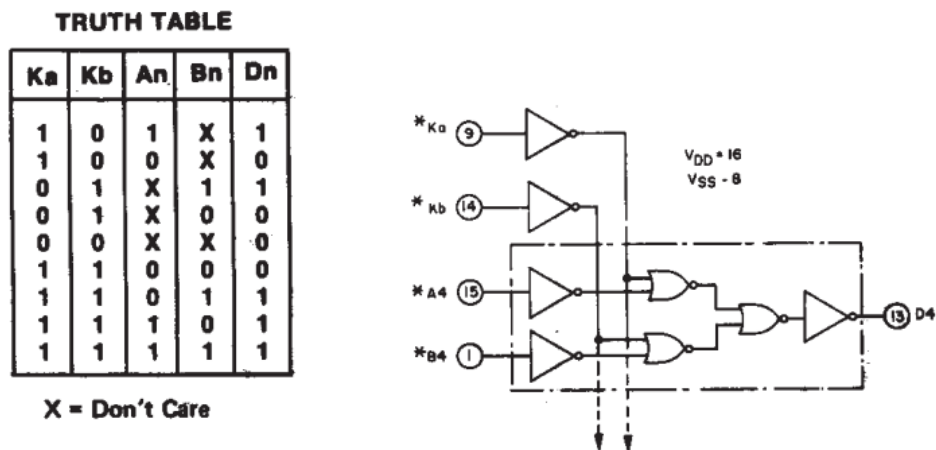
přímého pájení. Muselo být přihlédnuto i k dostupným relé s určitým napájecím napětím. Běžně dostupné relé mají napájecí napětí 5V, 6V a 12V. Dále muselo být přihlédnuto k ovládacímu napětí spínacích tranzistorů.

Byl zvolen spínací tranzistor IRF 540. Tento MOSFET tranzistor je dostatečně naddimenzovaný z hlediska potřeby použití v tomto zařízení, aby byla zaručena spolehlivost. Maximální napětí na tranzistoru může být až 100 V (v zařízení maximálně 24V), maximální průchozí proud 33A a skoro zanedbatelný průchozí odpor  $R_{DS} 0,044\Omega$ . Napětí silového zdroje je 24V, proto aby se předešlo přebytečnému ohřátí tranzistoru, bylo zvoleno napájecí napětí desky 12V za účelem dostatečné saturace tranzistoru. Vliv ovládacího napětí na úbytek napětí na tranzistoru byl experimentálně prověřen v laboratoři. Tranzistor byl napájen z autotransformátoru umístěného v pulstu napětím 24V. To bylo následně usměrněno laboratorním usměřňovačem. Jako zátěž byl použit výkonový drátový rezistor pomocí jehož odporu byl nastaven průchozí proud 8A, což odpovídalo naddimenzované hodnotě skutečného proudu při umístění žárovky 24V/100W, pro zjištění chování tranzistoru v případném větším zatížení, například při umístění žárovky s vyšším výkonem. Jako zdroj ovládacího napětí byl použit regulovatelný laboratorní zdroj. Úbytek napětí na tranzistoru při ovládacím napětí 12V byl mnohem menší než při ovládacím napětí 5V. Na *obr. 3.1* je zobrazená závislost protékajícího proudu tranzistorem v závislosti na napětí  $U_{GS}$ . Na tomto obrázku je viditelné, že tranzistor se bude méně bránit průchozímu proudu při vstupním napětí 12V než při napětí 5V, tudíž ztráty na tranzistoru budou menší.



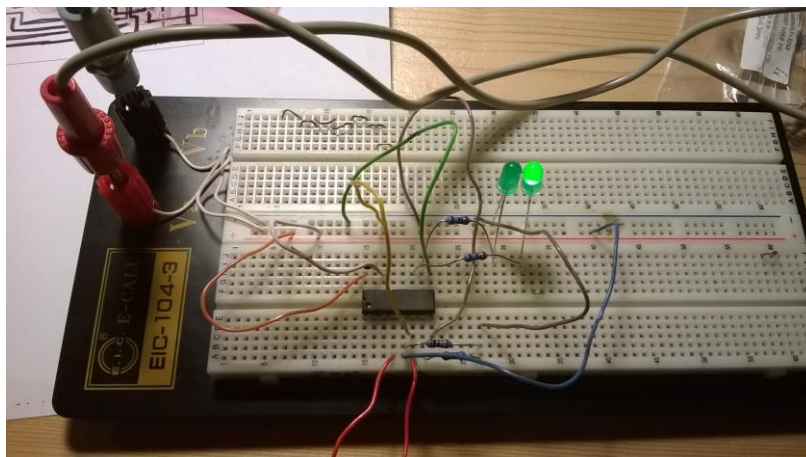
Obr. 3.1 závislost propustného odporu tranzistoru IRF 540 na napětí  $U_{GS}$  [7]

Zvolení napájecího napětí 12V rozhodlo i o použití technologie integrovaného obvodu. Byl zvolen integrovaný obvod CMOS4019. Jedná se o integrovaný obvod se čtyřmi hradly. Obvod má dva vstupy (Ka, Kb), kterými lze kombinací logických úrovní naprogramovat typ hradel, OR nebo AND.



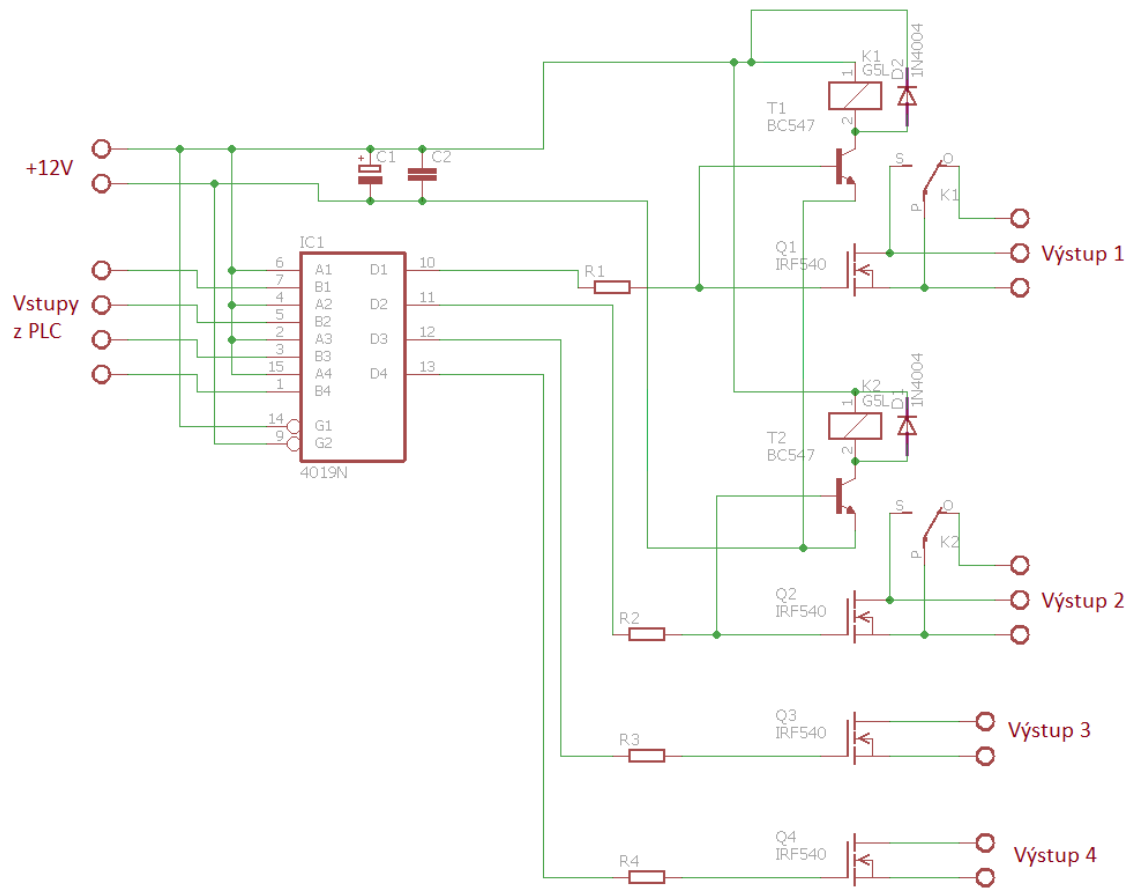
Obr. 3.2 pravdivostní tabulka integrovaného obvodu 4019 společně s zjednodušenou vnitřní strukturou [8]

Pro účely tohoto zapojení bylo zvoleno hradlo AND. Na vstup Ka logická nula a na vstup Kb logická jedna. Z pravdivostní tabulky vyplývá, že výstupní úroveň je závislá pouze na vstupu B, na logické úrovni vstupu A nezáleží. Funkce tohoto obvodu byla experimentálně ověřena na univerzálním nepájivém poli.



Obr. 3.3 ověření funkce integrovaného obvodu CMOS4019

Další součástky potřebné na plošném spoji byly tranzistory posilující výstupy integrovaného obvodu. Připojení relé by mohlo integrovaný obvod přetížit, a tak pro zaručení spolehlivosti byly výstupy integrovaného obvodu posíleny pomocí bipolárních tranzistorů BC 547 ve spínacím režimu v zapojení se společným emitorem. Mezi výstupy integrovaného obvodu a vstupy tranzistorů byly umístěny odpory o hodnotě  $1\text{ k}\Omega$  z důvodu omezení vstupního proudu. Tento odpor by měl zajistit dostatečný saturační proud. Na desku bylo potřeba umístit i další odpory. Ty byly umístěny na další výstupy integrovaného obvodu. Jednalo se o odpory o hodnotě  $10\Omega$  omezující nabíjecí kapacitní proudy hradel unipolárních tranzistorů. Byly připojeny ke vstupům tranzistorů zajišťujících spínání žárovek. Spínací tranzistory byly použity unipolární tranzistory IRF 540 typu N v zapojení se společným emitorem (source). Na desce plošného spoje byly také umístěny diody 1N4007 antiparalelně připojené k relé z důvodu naindukovaného napětí při odstranění napětí z cívky relé a svorkovnice PCB připájené přímo do plošného spoje. Posledními součástkami na desce byly vyhlazovací kondenzátory k vyhlazení vstupního napětí. První byl keramický o hodnotě  $100\text{ nF}$  a druhý elektrolytický  $2200\text{ }\mu\text{F}$ .

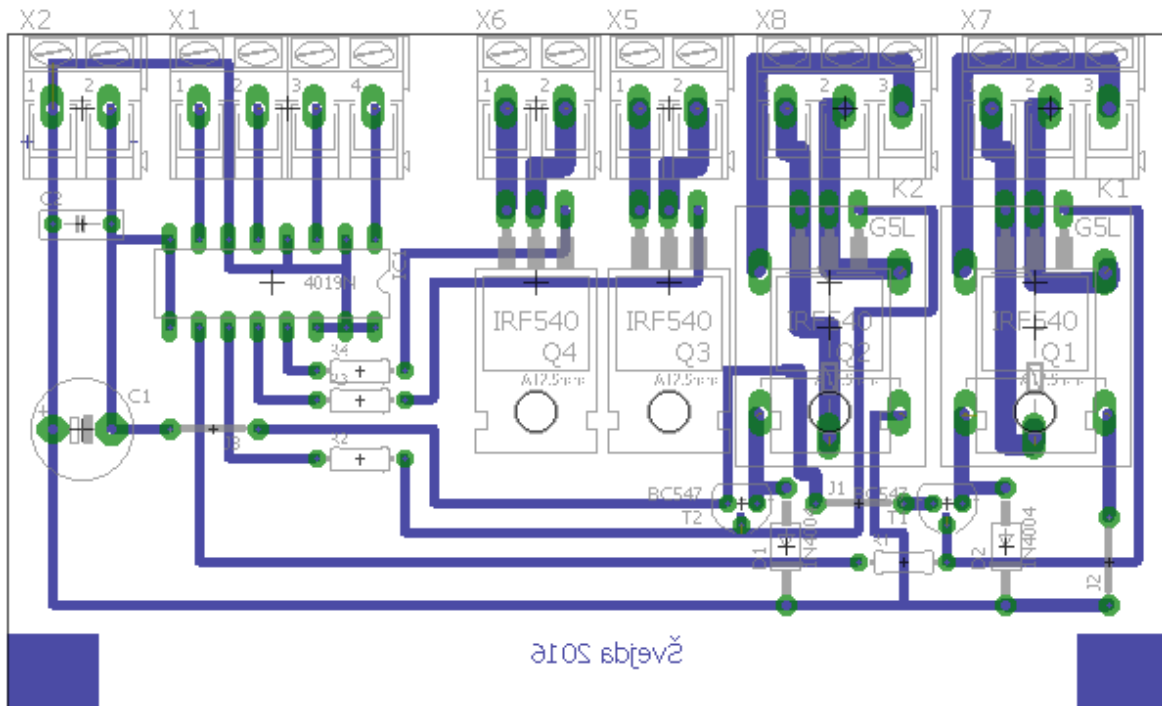


Obr. 3.4 schéma zapojení součástek na plošném spoji

### 3.2.1 První verze plošného spoje

Z prostorového hlediska bylo nutné vyrobit dvě desky plošného spoje, avšak s odlišným osazením spínacích součástek. To znamenalo výrobu dvou druhů plošného spoje a při jejich výrobě i dvou odlišných filmových matric. Proto z ekonomického hlediska byl navrhnout pouze jeden plošný spoj, na který bylo možné umístit buď čtyři spínací tranzistory IRF 540 nebo dva spínací tranzistory a dvě relé.





Obr. 3.5 návrh univerzálního plošného spoje v programu Eagle

Na desce plošného spoje (obr. 3.5) je viditelná jeho univerzálnost, kdy lze zaměnit dva FET tranzistory za dvě relé. V případě osazení FET tranzistory byly osazeny odpory R1 a R2 o hodnotě  $10\Omega$  a byly spojeny s kontakty G FET tranzistorů. Kontakty D a S tranzistorů byly přivedeny na svorkovnice s dvěma kontakty. V případě osazení relé měly odpory R1 a R2 hodnotu  $1k\Omega$ . Ty byly spojeny s bázemi posilujících tranzistorů BC 547. Kolektory těchto tranzistorů byly připojeny na cívku relé, jejíž druhý kontakt byl připojen ke kladnému pólu napájení. Emitory tranzistorů byly připojeny k zápornému pólu napájení. Na desce plošného spoje jsou též viditelné antiparalelně osazené diody k cívkám relé. Přepínací kontakty relé byly spojeny se svorkovnicemi se třemi kontakty.

### 3.2.2 Testování první verze plošného spoje



Obr. 3.6 osazené prototypové desky

Po návrhu desky plošného spoje byly vyrobeny dva prototypy desek a následně byly osazeny. Nejprve byla ověřena funkce spínání pomocí žárovek 12V/2W. Poté bylo provedeno otestování při reálném zatížení žárovkami 24V/100W. Testováním se zjistilo, že nebylo zaručeno uchlazení tranzistorů bez přídavného chlazení a že je tudíž nebude možné umístit uvnitř instalační krabice zařízení též z důvodu uchlazení. Další problém nastal se spínáním. Výstup PLC má maximální hodnotu napětí 5V. Napájení desky plošného spoje bylo navrženo 12V. CMOS obvody mají na výstupu logickou úroveň nula při vstupním napětí od 0 do 25% napájecího napětí a logickou úroveň jedna při 75% až 100% napájecího napětí. Při testování bylo zjištěno, že k dosažení logické úrovně jedna na výstupu by stačilo napětí 4,5V na vstupu hradla. Z důvodu možné nespolehlivosti bylo přistoupeno ke změně zapojení a návrhu jiné desky plošného spoje.

## 3.3 Úprava návrhu zapojení

### 3.3.1 Druhá verze plošného spoje

Z důvodu umístění tranzistorů FET na chladiče a mimo instalační krabici s ostatní elektronikou bylo rozhodnuto o návrhu desky, která bude obsahovat elektroniku potřebnou pro ovládání tranzistorů a budou na ní umístěná dvě relé, které bylo nutné zanechat. Dále bylo rozhodnuto, že deska také nebude umístěna, stejně jako tranzistory, v instalační krabici s ostatní elektronikou, ale bude umístěna co nejbližší výkonovým prvkům za účelem snížení délek kabelů o větším průřezu k výkonovým prvkům.

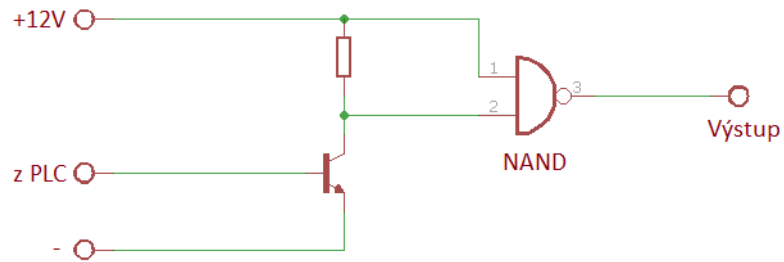
Rozměr plošného spoje byl přizpůsoben instalační liště, do které byl instalován. Pro zesílení výstupu z PLC bylo využito tranzistorové pole ULN2803AP, využívané v zapojení před úpravou, umístěné uvnitř instalační krabice. Jednotlivé tranzistory byly zapojeny do

zapojení se společným emitorem a plní funkci nejen zesílení výstupu PLC, ale i funkci negace. Proto musel být změněn typ hradla mezi tranzistorovým polem a vstupy tranzistorů hradel z AND na NAND, přičemž opět jeden vstup jednotlivých hradel byl připojen trvale na jeden pól napájení. Dle *tab. 3.1* byl jeden vstup připojen trvale na logickou úroveň jedna (+12V) a úroveň druhého vstupu je závislá na výstupu PLC.

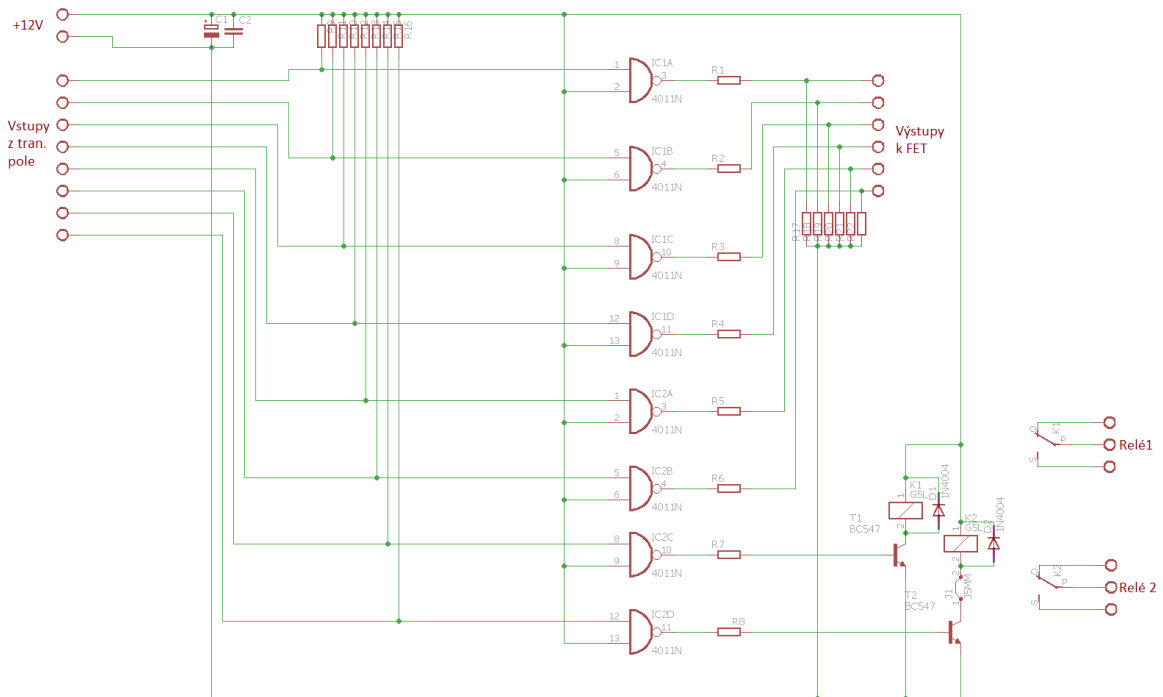
*Tab 3.1 pravdivostní tabulka hradla NAND [9]*

vstup 1	vstup 2	výstup
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

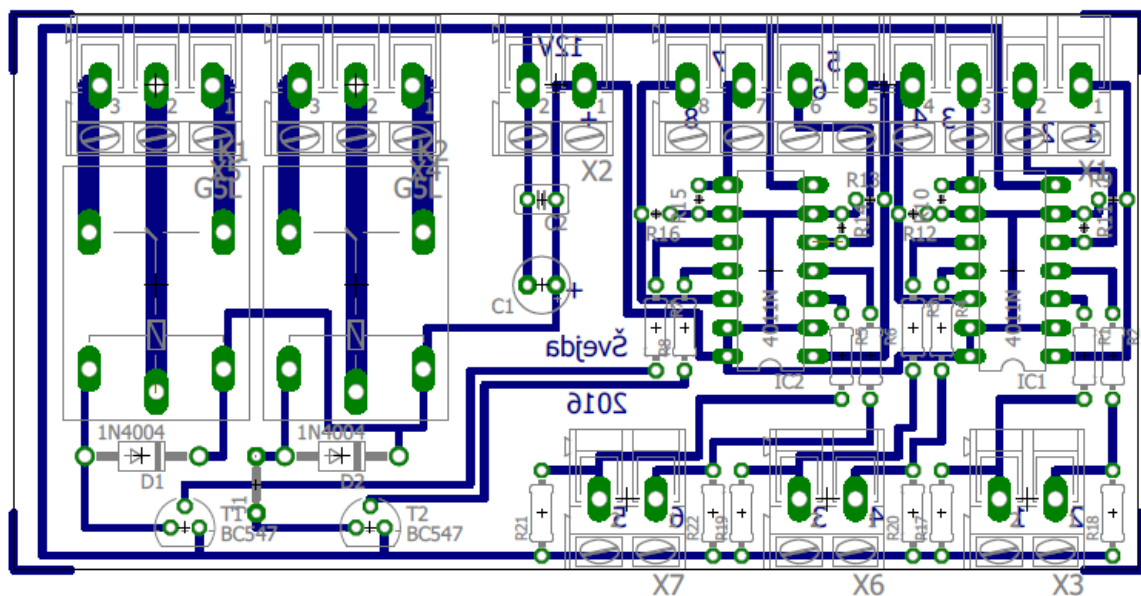
Na plošném spoji jsou umístěny dva integrované obvody CMOS 4011, z toho každý má čtyři dvouvstupová hradla NAND. Technologie CMOS byla opět zvolena z důvodu velikosti napájecího napětí. Výstupy hradel jsou nadále přiváděny na vstupy tranzistorů FET přes odpory o hodnotě 10 $\Omega$  omezující nabíjecí kapacitní proudy. Tranzistory byly umístěny mimo plošný spoj, proto jsou vstupy tranzistorů připojeny kabely pomocí svorkovnic umístěných na plošném spoji. Důležitým poznatkem při testování předchozí verze plošného spoje bylo, že při odstranění napájecí svorky ze vstupu G tranzistoru nedojde k plnému uzavření tranzistoru. Proto dalším opatřením k zaručení spolehlivosti zařízení bylo umístění přizemňovacího odporu 10k $\Omega$  k vstupu tranzistoru, aby bylo zaručeno úplné zavření tranzistoru i při případné poruše ovládání zařízení. K účelu připojení tranzistorů bylo využito jen šest výstupů hradel. Zbylá dvě hradla ovládají dvě relé. Tyto dva výstupy byly posíleny tranzistory BC547 v zapojení se společným emitorem. Mezi výstupem hradel a vstupy těchto tranzistorů byly umístěny odpory 1k $\Omega$  z důvodu omezení proudu z výstupu hradla, aby nedošlo k jeho přetížení. Antiparalelně k relé byly připojeny diody 1N4007. Obě dvě součástky plní stejné funkce jako na předchozím plošném spoji. Na plošný spoj byly umístěny odpory 10k $\Omega$  připojené na vstupy od tranzistorového pole a na kladný pól napájení v zapojení se společným emitorem k vytvoření negace, vyhlazovací kondenzátory 100 nF keramický a 2200  $\mu$ F elektrolytický a další potřebné svorkovnice k připojení.



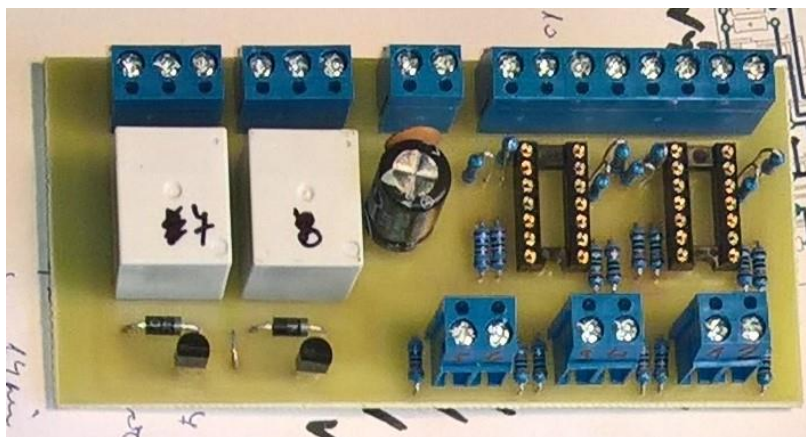
Obr. 3.7 zjednodušené schéma spojení tranzistoru v hradlovém poli, hradla NAND a odporu vytvářejícího negaci



Obr. 3.8 schéma zapojení součástek na druhé verzi plošného spoje



Obr. 3.9 návrh druhé verze plošného spoje



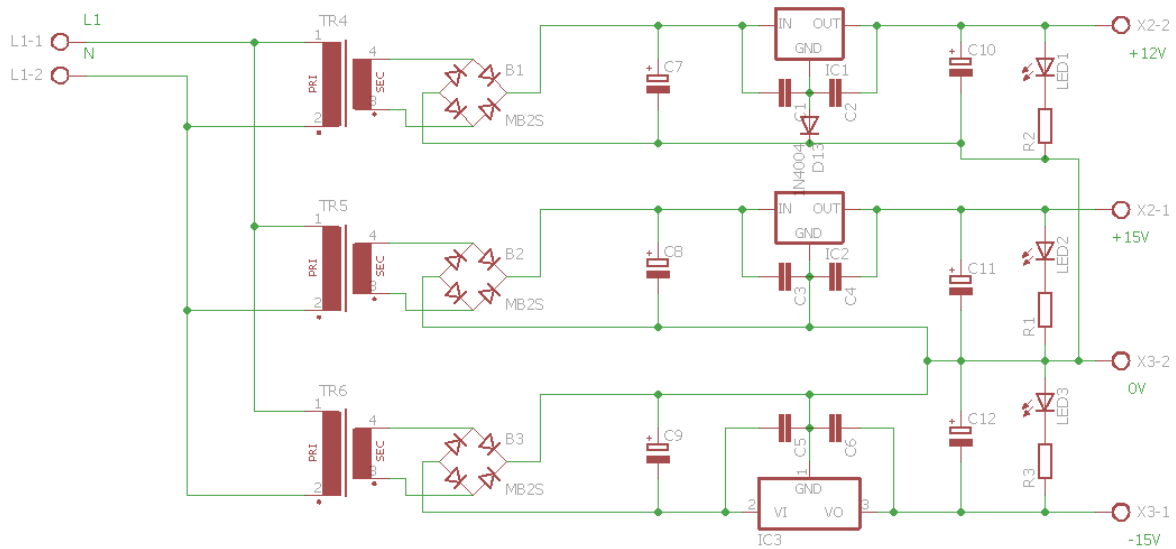
Obr. 3.10 osazená deska druhé verze plošného spoje

### 3.4 Realizace výměny spínacích prvků

Výměna spínacích prvků vyžadovala potřebné zásahy do dosavadního zapojení. Nejdůležitějším úkolem bylo odstranění starých relé. Ty byly vypájeny a zároveň, když byla vyjmuta deska plošného spoje z instalační krabice, byla provedena úprava napájecích zdrojů. Bylo upraveno zapojení hradlového pole. V dosavadním zapojení bylo hradlové pole napájeno napětím 27V a to muselo být změněno na 12V. Výstupy tohoto hradla původně vedly k relé, která byla odstraněna. Nyní je bylo nutné spojit s vstupy na plošném spoji. Toto spojení bylo provedeno kabelem LIYY 8x0,19 BAL. Dále byly z instalační krabice vyvedeny kabely potřebné k napájení plošného spoje a žárovek.

#### 3.4.1 Úprava napájecího zdroje

Pro upravené zapojení zařízení bylo potřebné napájení -15V, +15V a +12V. Napětí -15V bylo použito již v předchozím zapojení zdrojů, ale pro zaručení spolehlivosti zařízení byl kladný stabilizátor 7815 zaměněn za záporný stabilizátor 7915. Napětí +15 V bylo také již používáno v předchozím zapojení a proto zůstalo zapojení beze změn. Napětí +12V bylo získáno rozpojením bývalého sériového spojení stabilizátorů +15V a +12V, které tvořilo napětí +27V. Byla oddělena zem stabilizátoru 7812 od kladného pólu stabilizátoru 7815 a následně byly spojeny země všech stabilizátorů do jednoho uzlu.



Obr. 3.11 schéma přepojení napájecího zdroje

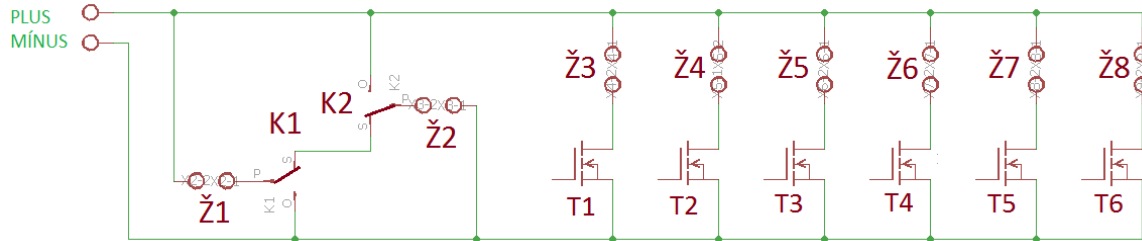
### 3.4.2 Instalace a zapojení plošného spoje

Realizovaný plošný spoj byl umístěn do instalační lišty co nejblíže k žárovkám, aby došlo k omezení silových kabelů. Plošný spoj byl přišroubován pomocí distančních sloupků. Zařízení a plošný spoj byly spojeny třemi kabely. Prvním kabelem s osmi žilami byly spojeny výstupní kontakty tranzistorového pole a vstupní svorkovnice hradel NAND na plošném spoji. Další kabel se třemi žilami 1,5 mm<sup>2</sup> (použity jen dvě žíly) byl použit k přivedení napájecího napětí +12V od stabilizátoru 7812 a třetí kabel též se třemi žilami, ale s průměrem žil 2,5 mm<sup>2</sup> (také použity jen dvě) pro přívod proudu k žárovkám. Zároveň musela být spojena ovládací a silová zem.



Obr. 3.12 umístění plošného spoje v instalační liště

První dvě žárovky jsou připojeny dle schéma na *Obr. 3.13* k relé. Jeden kontakt dalších šesti žárovek byl připojen ke kladnému pólu přívodního silového kabelu. Druhé kontakty žárovek byly připojeny k tranzistorům T1 až T6.



*Obr. 3.13 schéma zapojení silové části se spínacími tranzistory*

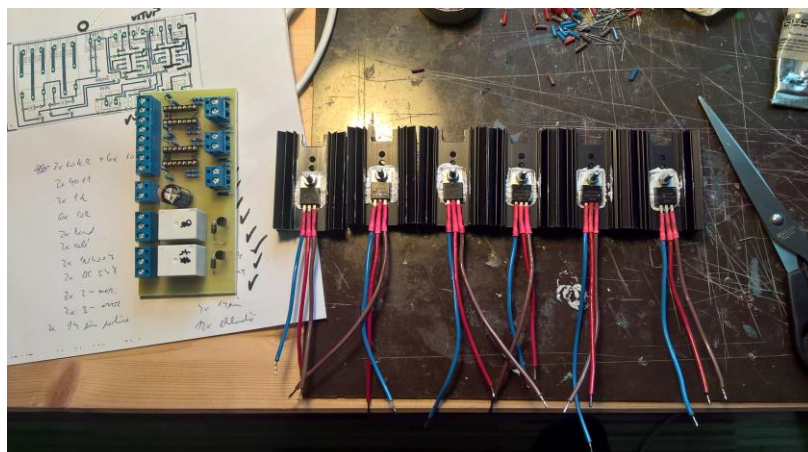
### 3.4.3 Instalace chladičů tranzistorů

Za účelem zaručení spolehlivosti zařízení bylo rozhodnuto o umístění spínacích tranzistorů na přídavné chladiče. Velikost přídavného chladiče byla určena dle zjednodušeného vzorce 3.1. Po dosazení hodnot při maximální teplotě pouzdra 175°C a naddimenzované hodnotě okolí 50°C, tepelného odporu pouzdra tranzistoru 1,15K/W, tepelného odporu slídové podložky 1,2K/W a přepokládaného experimentálně ověřeného maximálního ztrátového výkonu 6W na tranzistoru vyšel maximální tepelný odpor chladiče 18,48K/W.

Výpočet tepelného odporu:

$$t_p - t_o = (R_{POU} + R_{POD} + R_{CHL}) \cdot P \quad (3.1)$$

Dle vypočítaného maximálního tepelného odporu byly zakoupeny chladiče s menším tepelným odporem a s rozměry vyhovujícími umístění na instalační lištu. Tranzistory byly k chladičům přišroubovány a izolačně odděleny slídovou podložkou s izolační průchodkou. Dotykové plochy byly ošetřeny tepelně vodivou pastou k zlepšení přenosu případného ztrátového tepla.



Obr. 3.14 připevnění spínacích tranzistorů na chladiče



Obr. 3.15 umístění chladičů se spínacími tranzistory na instalační lištu



## 4 Odzkoušení funkčnosti zařízení

Nejprve bylo realizováno jedno zařízení a po otestování jeho funkčnosti bylo realizováno druhé. Testování zařízení bylo prováděno nejprve v laboratoři a poté byla obě zařízení testována v plném provozu na JuniorFel 2016 a na reprezentačních akcích FEL ZČU. Při těchto testováních bylo však zkoušeno jen nezávislé fungování kol. Při následném testování kol v laboratoři byla vyloučena možnost sériového spojení kol z důvodu propojení zemí do jednoho uzlu. Paralelní spojení bylo zachováno. Z teoretického hlediska by mělo toto spojení fungovat, avšak vznikal zde problém. Při výrobě výkonu na jednom kole byl měřen výkon i na druhém zařízení, které však bylo v klidu a neměl by zde být naměřen žádný výkon. Měřením bylo zjištěno, že při výrobě výkonu na jednom kole není jeho zem ve stejné hladině jako zem druhého kola v klidu. Byla snaha tento problém odstranit. Rozpojením smyčky spojených zemí, odstranění přebytečných přepínačů, atd. Konečná úvaha je, že tento problém způsobují různé průměry vodičů země, kde při spojení silové a ovládací země není známý tok silového signálu a na kabelech menších průměrů může vznikat úbytek napětí způsobující rozdíl hladin zemí mezi zařízeními.

## Závěr

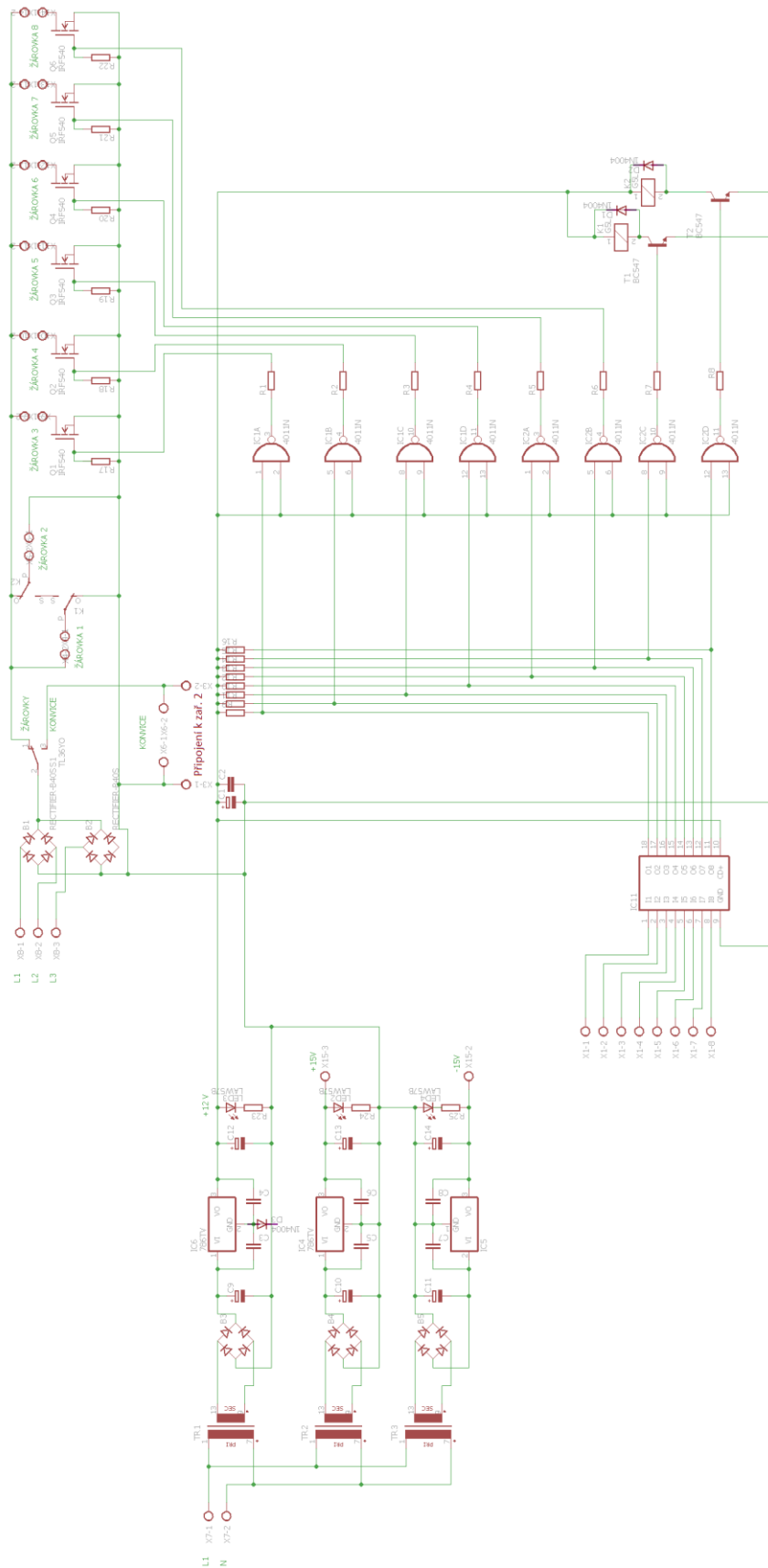
Úprava zařízení na bezkontaktní spínání přinesla své výhody i nevýhody. Výhody ale předčily nevýhody i přes to, že ve výsledku muselo dojít k vytvoření dvou verzí plošného spoje. Problémy s prvním návrhem se objevily naštěstí včas a neovlivnily termín dokončení zařízení pro prezentaci na akci JuniorFEL 2016. Hlavní výhodou je větší životnost tranzistorů oproti relé. Sice i v novém zapojení byla nutnost ponechat relé, ale nový plošný spoj umožňuje snadnou výměnu bez větších zásahu do zapojení. Byly vyrobeny čtyři desky plošného spoje navíc, z toho dvě byly plně osazeny a připraveny k případné okamžité výměně. Nevýhodou nového zapojení je vyloučení možnosti spojení kol. Sériové spojení bylo vyloučeno z principu a paralelní spojení z důvodu popsaném v poslední kapitole. Hlavní požadavky na zařízení byly ale zachovány.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PAVELKA, Jiří, ČEŘOVSKÝ, Zdeněk a LETTL, Jiří. *Výkonová elektronika*. 3. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [2] KŮS, Václav a SKÁLA, Jiří. *Elektronika a elektrické pohony*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1992. ISBN 80-7082-079-9.
- [3] STENGL, Jens a TIHANYI, Jenó. *Výkonové tranzistory MOSFET*. 1. vyd. Praha: BEN, 1999. ISBN 3-7905-0619-2.
- [4] FROHN, M. , OBERTHUR, W. , SIEDLER, H.-J. , WIEMER, M. , ZASTROW, P. *Elektronika- polovodičové součástky a základní zapojení*. 1. české vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [5] Datasheet 7812 [online]. [Cit. 30.4.2017]. Dostupné z: <https://www.ges.cz/cz/stabilizator-napeti-7812-to220-GES05002919.html>
- [6] Datasheet LM35 [online]. [Cit. 30.4.2017]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/lm35dz-to92-texas-instruments>
- [7] Datasheet IRF540 [online]. [Cit. 10.4.2017]. Dostupné z: <https://www.ges.cz/cz/mosfet-n-fet-tranzistor-irf540n-GES04913172.html>
- [8] Datasheet CMOS4019 [online]. [Cit. 30.4.2017]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/4019-dip16-texas-instruments>
- [9] BRTNÍK, Bohumil. *Číslicové systémy*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-407-1.

# Přílohy

## Příloha A - Kompletní schema zapojení zařízení 1



**Příloha B - Kompletní schema zapojení zařízení 2**

