

Seminář k absolventské práci

Oprava řídicí desky na Modelu vodního hospodářství

Vilém Prokop (Vilem.Prokop@student.copsu.cz)

2. července 2025

1 Úvod

Pro žáky Střední školy a studenty Vyšší odborné školy v Sezimově Ústí byl v Laboratorii aplikované informatiky [1] pro studijní účely vyroben Model vodního hospodářství, viz obr. 1. Pro žáky Střední školy tento model slouží pro výuku fyzikálních zákonů a pro studenty Vyšší odborné školy slouží pro modelování a řízení reálných systémů [2].



Obrázek 1: Model vodního hospodářství – převzato z [1]

Model vodního hospodářství byl navržen a vyroben v rámci absolventské práce [3] ve školním roce 2010/2011. Tento model je jednou z mnoha výukových pomůcek, která slouží k praktické výuce automatizace a studentům tak umožňuje lépe pochopit principy řízení reálných systémů. Během opakovaného používání tohoto modelu se však ukázalo, že deska, která řídí čerpadla a ventily [3, kapitoly 4.5.5, 4.5.7, 4.5.8], má vady, které komplikují provoz modelu. Jednou vadou bylo to, že docházelo k saturování řídicího obvodu odstředivého čerpadla, které následně nešlo vypnout ovládacím signálem. Druhou vadou byla chyba v řídicím obvodu proporcionálního ventilu, kdy docházelo k samovolnému odpájení napájecího vývodu jednoho z integrovaných obvodů.

Cílem této práce bylo navrhnout vylepšení desky pro řízení čerpadel a ventilů v Modelu vodního hospodářství tak, aby byly výše uvedené nedostatky odstraněny. Při návrhu řídicí desky byly také respektovány zásady pro vedení vodivých cest na plošných spojích s respektem k jejich proudové zatížitelnosti.

Struktura této práce je následující. V kapitole 2 je podrobně popsán návrh desky pro řízení čerpadel a ventilů na Modelu vodního hospodářství. V kapitole 3 je popsána výroba desky a její otestování v modelu. V kapitole 4 je prezentována chyba na řídicím obvodu odstředivého čerpadla.

2 Úprava desky pro řízení čerpadel a ventilů

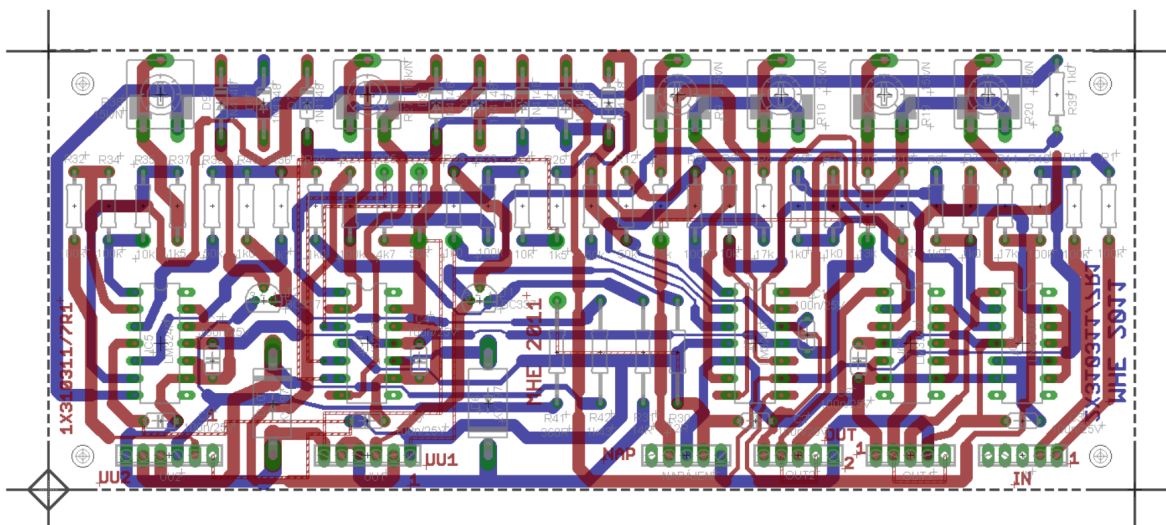
V průběhu používání Modelu vodního hospodářství se objevovaly závady na řídicí elektronice. Jednalo se o nestandardní chování řídicího obvodu odstředivého čerpadla a výpadky funkčnosti elektroniky řídicí proporcionální ventil mezi pravou a střední nádrží.

Odstředivé čerpadlo je řízeno napěťovým signálem v rozsahu 0 až 10 V, kterému odpovídá výkon čerpadla v rozsahu 0 až 100 % [3, kapitola 4.5.8]. Pokud byl ale řídicí signál nastaven na maximum, došlo k saturování řídicího obvodu, což vedlo k tomu, že čerpadlo nedokázalo snížit svůj výkon i když byl řídicí signál snížen. Podobným způsobem jsou řízeny proporcionální ventily [3, kapitola 4.5.5]. U jednoho z ventilů docházelo občas ke ztrátě funkčnosti a původní diagnostikou bylo zjištěno, že dochází k samovolnému odpájení napájecího vývodu jednoho z integrovaných obvodů s operačními zesilovači.

Důvodem těchto vad bylo to, že původní řídicí deska, viz obr. 2, byla jejím autorem navržena nesprávně. Na této desce byly následující nedostatky:

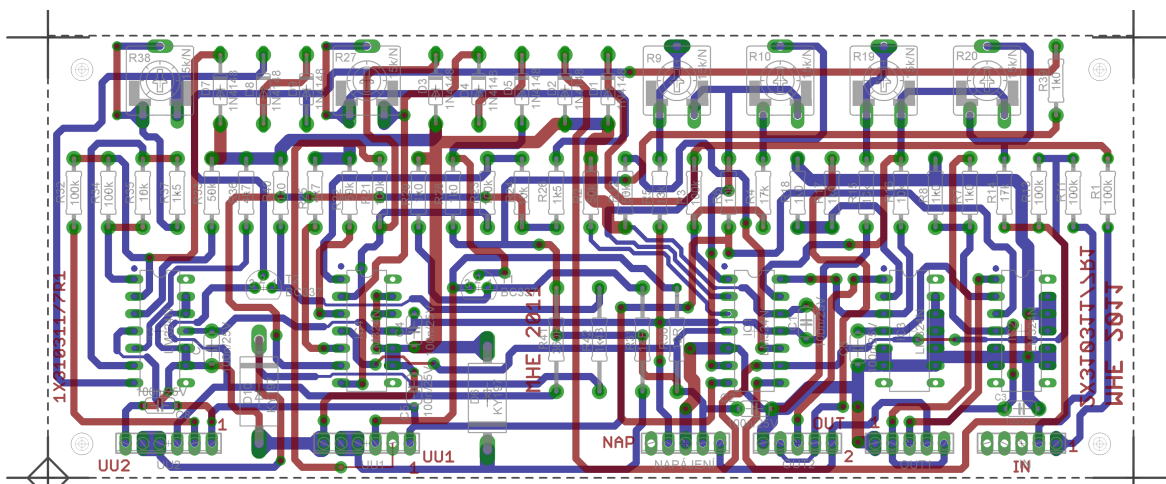
- špatně pájitelné plošky součástek (jejich malá velikost a zejména nutnost pájet ve špatně dostupných místech),
- malá tloušťka vodivých cest v silové části,
- nevhodně vedené vodivé cesty nerespektující návrhová pravidla pro plošné spoje,
- velké množství proků,
- velké množství drátových propojení,
- nevhodné umístění popisků součástek, což znesnadňovalo osazení desky a její testování.

Pro vyřešení výše popsaných nedostatků došlo v rámci této práce k několika zásadním úpravám. Především bylo přepracováno uspořádání vodivých cest tak, aby byla deska přehlednější a cesty měly jednotnou šířku. Většina cest byla také přesunuta do spodní vrstvy 16-BOTTOM,



Obrázek 2: Původní deska pro řízení čerpadel a ventilů – převzato z [3]

čímž se snížil velký počet prokovů a ubyla nutnost pájet součástky shora. Drátová propojení byla z části také odstraněna, ale na pár místech se musely přidat prokovy, které spojují cesty mezi vrstvami 1-TOP a 16-BOTTOM. Vylepšení se týkala také designové stránky desky: lomení cest bylo pod úhlem 45° , pájecí plochy u vývodů součástek byly zvětšeny, popisky součástek byly posunuty na vhodnější místa. Navržené úpravy lze vidět na následujícím obrázku.

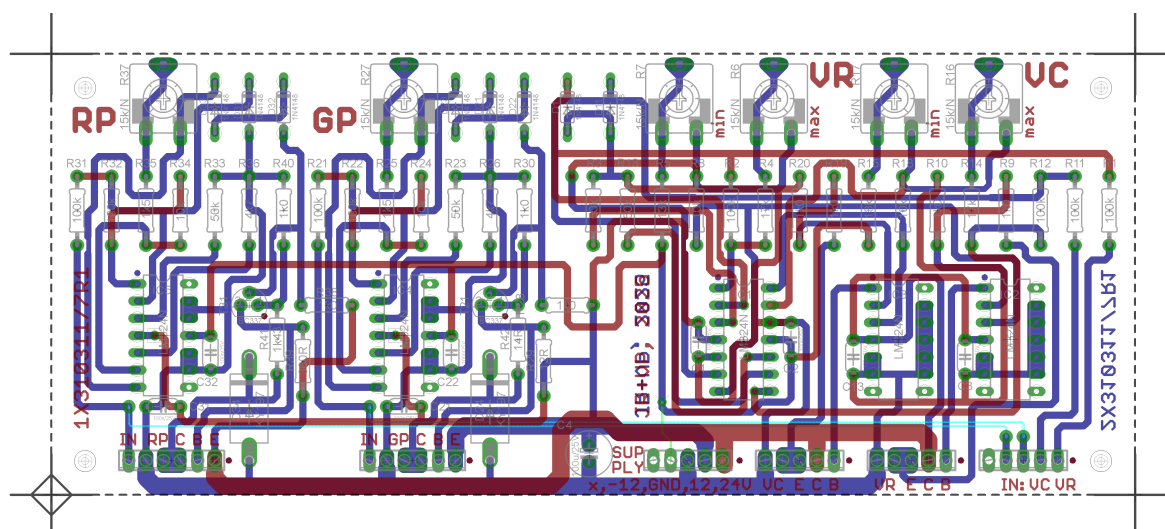


Obrázek 3: Deska pro řízení čerpadel a ventilů před konzultací s vedoucím projektu

Po konzultaci s vedoucím tohoto projektu byla provedena změna umístění některých součástek. Došlo k přepracování rezistorového pole, kde se mezi sebou prohodily rezistory, a také se změnila pozice rezistorů R41, R39, R38, R42, R28, R29, které jsou nyní umístěny u operačních zesilovačů a mají nová pouzdra. Kondenzátory byly přesunuty blíže k napájecím vývodům inte-

grovaných obvodů s operačními zesilovači, aby se eliminoval vliv šumu. Pouzdra všech diod byla také upravena na kratší vývody. Kromě toho byly pojmenovány výstupy konektorů a názvy trimrů, aby bylo možné správně připojit vodiče na konektory. Po provedených změnách bylo výrazně sníženo množství prokůvů z původních 53 na pouhých 9, což bylo možné díky lepšímu uspořádání součástek.

Dále byla řešena proudová zatížitelnost silových cest. Nejdříve se muselo zjistit, jak velký proud poteče v jednotlivých cestách, pokud čerpadla a ventily poběží na maximální výkon. V absolventské práci [3] lze nalézt maximální odběr proudu každého čerpadla a ventilu. Díky tomuto lze spočítat proud, který protéká jednotlivými cestami. Cestou +12 V tečou 2 A, cestou +24 V tečou 1,3 A. Na základě těchto znalostí bylo zjištěno, že původní šířka cest (40 mil) nebude dostačující. Proto byla tloušťka silových cest zvětšena na 100 mil. Nyní by se deska neměla ohřát více jak o 10 °C oproti okolní teplotě. Finální návrh řídicí desky lze vidět na následujícím obrázku.

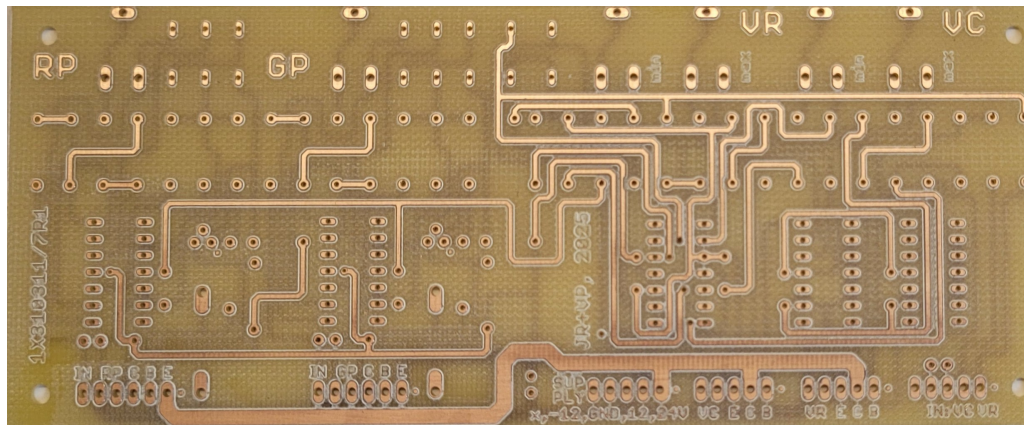


Obrázek 4: Finální návrh desky pro řízení čerpadel a ventilů

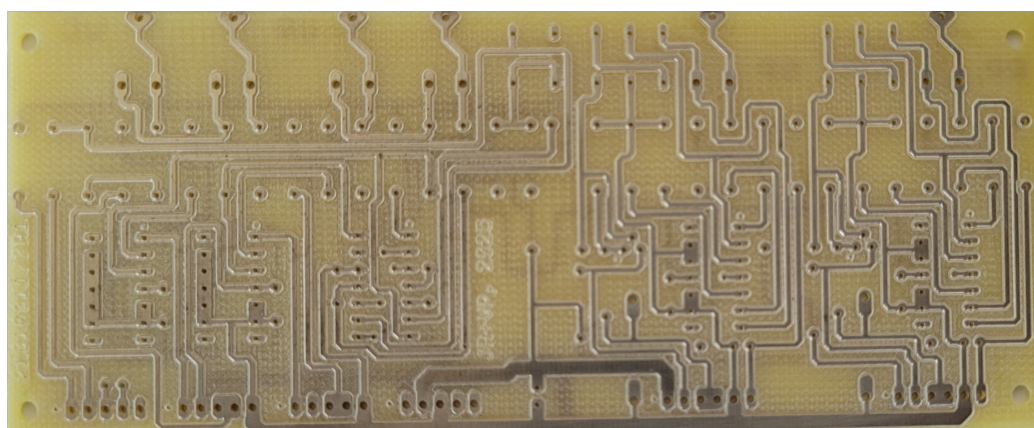
3 Výroba, osazení a testování navržené desky

Výroba plošného spoje byla provedena ve školních dílnách na CNC frézce. Touto frézkou byly vyvrtány průchodky pro nožičky součástek a vymezeny vodivé cesty a plošky podle návrhu vytvořeného v předchozí kapitole, konkrétně podle obrázku 4. Frézování umožnilo rychlou a přesnou výrobu desky bez nutnosti použití chemického leptání, viz obr. 5. Po vyfrézování byla deska chemicky pocínována, viz obr. 6. Tento proces zahrnoval ponoření desky do roztoku zvaného *chemický cín*, který vytvořil tenkou vrstvu cínu na měděných vodivých cestách. Cínování slouží nejen ke zlepšení pájitelnosti, ale také jako ochrana mědi před oxidací. Na celou desku byl

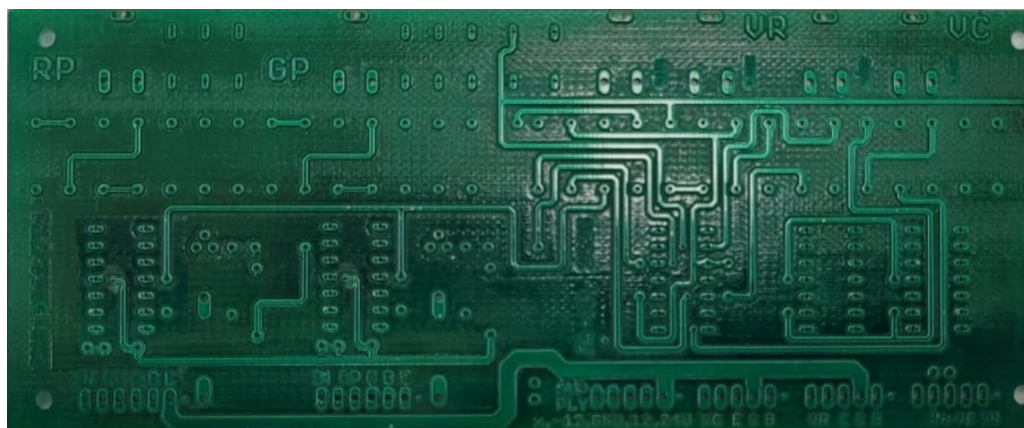
následně nanesen ochranný lak, viz obr. 7. Ten chrání nevodivé části desky před vlhkostí, prachem a mechanickým poškozením. Ochranný lak také zvyšuje životnost desky.



Obrázek 5: Vyfrézovaná nová deska (vrchní strana)

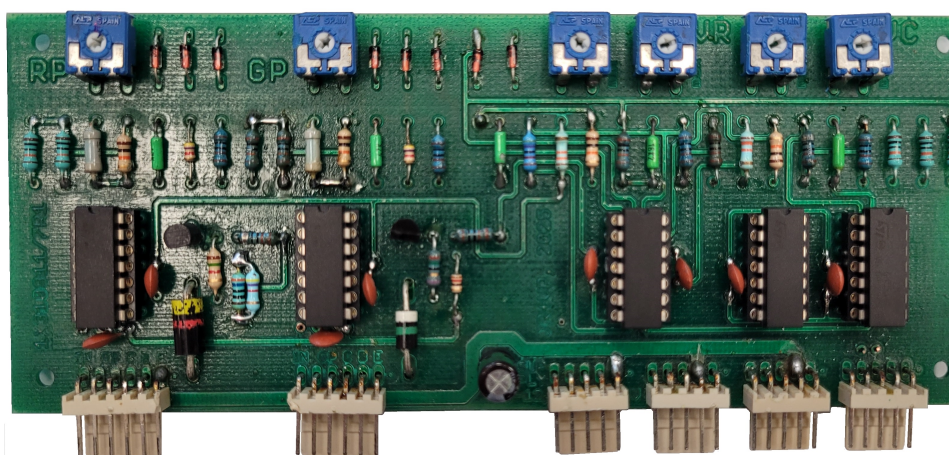


Obrázek 6: Pocínovaná nová deska (spodní strana)



Obrázek 7: Nalakovaná nová deska (vrchní strana)

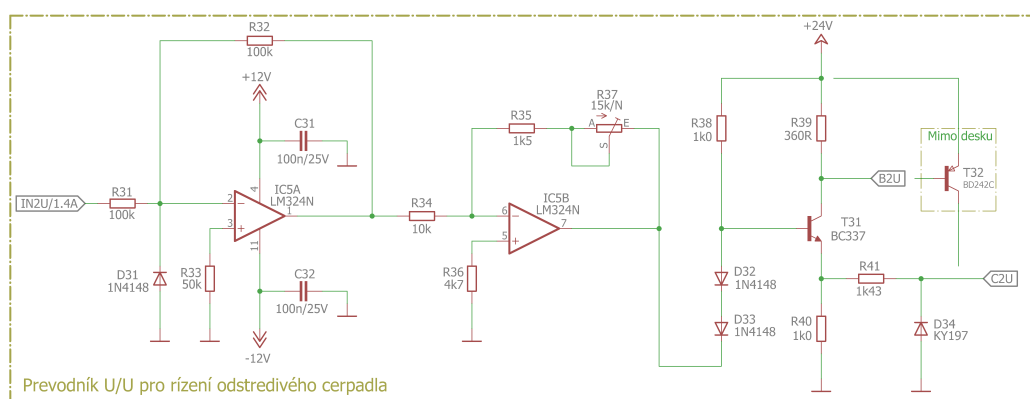
Po přípravě desky následovalo osazení elektronických součástek podle obr. 4. Součástky byly vkládány ručně a následně připájeny, viz obr. 8. Během pájení se objevily drobné komplikace způsobené ochranným lakem. Pokud se pájení provádělo s větším časovým odstupem od lakování, lak na některých ploškách ztuhl natolik, že ztěžoval smáčení plošek cínem. V těchto případech bylo nutné plošky očistit od ochranného laku, aby bylo možné vytvořit kvalitní pájený spoj. Po osazení součástkami byla deska důkladně otestována mimo model. Po zapojení napájení a vstupních signálů se ukázalo, že většina funkcí pracuje správně. Během testování však přetrvával problém s řízením odstředivého čerpadla, který byl pozorován už u původní verze desky. Tento jev bude podrobněji analyzován a řešen v následující kapitole.



Obrázek 8: Osazená nová deska pro řízení čerpadel a ventilů

4 Oprava řízení odstředivého čerpadla

Problém s tím, že se odstředivé čerpadlo, po snížení vstupního signálu, nevypíná, byl znám již dříve. Tento problém byl v rámci tohoto projektu systematicky analyzován měřením napěťo-



Obrázek 9: Schéma řídicího obvodu odstředivého čerpadla – převzato z [3]

vých poměrů v obvodu, aby bylo možné přesně určit příčinu chyby. Schéma obvodu pro řízení odstředivého čerpadla je na obr. 9.

Na původní desce bylo provedeno měření pro vstupní řídicí signál o hodnotě 3 V, 5 V a 8 V. Naměřené hodnoty napětí v různých částech obvodu proti zemi jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty napětí při testování původní desky

Měřené místo ve schématu na obr. 9	Napětí [V] pro		
	$u_{IN} = 3 \text{ V}$	$u_{IN} = 5 \text{ V}$	$u_{IN} = 8 \text{ V}$
Vstup do 1. stupně OZ (pin 2, IC5A)	0,12	0,12	0,15
Výstup 1. stupně OZ (pin 1, IC5A)	-2,70	-4,76	-7,70
Vstup do 2. stupně OZ (pin 6, IC5B)	0,12	0,12	0,15
Výstup 2. stupně OZ (pin 7, IC5B)	3,89	6,54	10,40
Báze tranzistoru T31	5,45	8,06	11,93
Kolektor tranzistoru T31	23,20	23,20	23,00
Emitor tranzistoru T31	4,80	7,45	11,30
Čerpadlo	7,50	13,08	18,15

Při druhém testu bylo vstupní napětí nejprve nastaveno na maximální hodnotu 9,5 V, čímž došlo k saturování obvodu pro řízení čerpadla. Po následném snížení vstupního signálu zpět na minimální hodnotu se však čerpadlo nevypnulo. Naměřené hodnoty napětí ve stejných místech ve schématu na obr. 9 jsou uvedeny v následující tabulce.

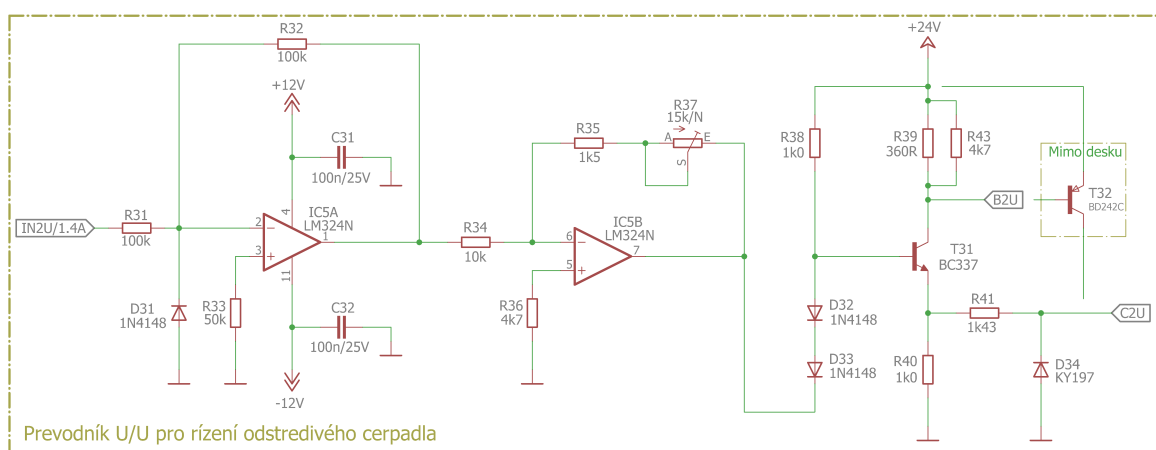
Tabulka 2: Naměřené hodnoty napětí při testování původní desky pro vstupní napětí 9,5 V a následné snížení na 0 V

Měřené místo ve schématu na obr. 9	Napětí [V]
Vstup do 1. stupně OZ (pin 2, IC5A)	0,19
Výstup 1. stupně OZ (pin 1, IC5A)	0,23
Vstup do 2. stupně OZ (pin 6, IC5B)	5,93
Výstup 2. stupně OZ (pin 7, IC5B)	13,42
Báze tranzistoru T31	14,86
Kolektor tranzistoru T31	23,01
Emitor tranzistoru T31	14,22
Čerpadlo	21,36

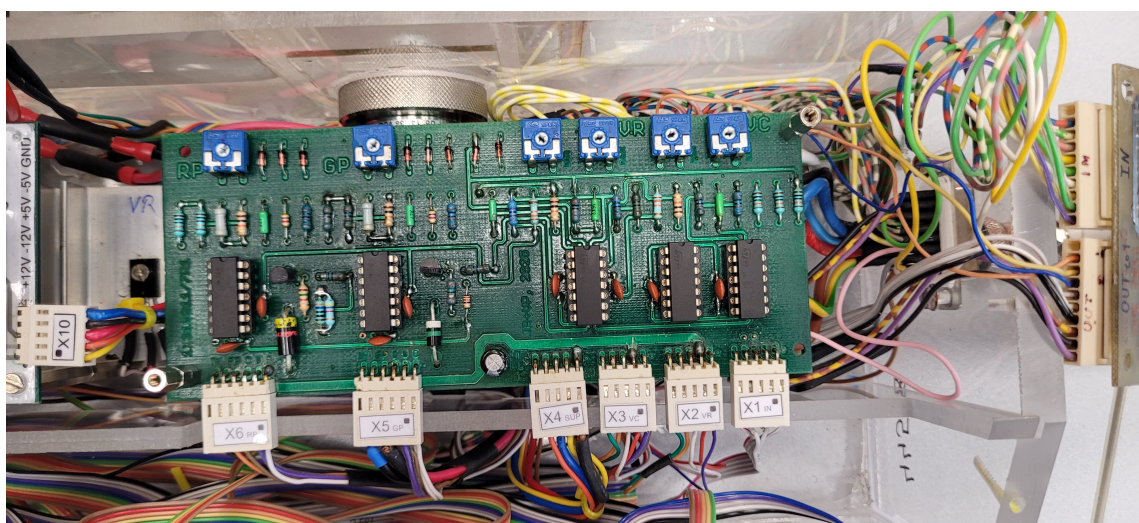
4.1 Oprava problému s vypínáním odstředivého čerpadla

Jako řešení problému popsaném v předchozí části, byl k rezistoru R39 ve schématu na obr. 9 připojen paralelně rezistor o hodnotě $4,7\text{ k}\Omega$, viz obr. 10. Tím byl výše popsán problém s řízením odstředivého čerpadla vyřešen.

Hodnota přidaného rezistoru byla zjištěna experimentálně a úprava byla provedena přímo na nové osazené desce bez nutnosti její opětovné výroby, viz obr. 11. Připojením tohoto rezistoru došlo ke snížení odporu R39, čímž byl snížen proud bázi tranzistoru T32. Tento zásah ukázal, že i drobná změna v hodnotě pasivního prvku může mít zásadní vliv na stabilitu a spolehlivost celého obvodu.



Obrázek 10: Upravené schéma pro řízení odstředivého čerpadla.



Obrázek 11: Nová řídicí deska v Modelu vodního hospodářství

5 Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření nové řídicí desky pro Model vodního hospodářství, která umožní bezproblémový chod modelu v laboratoři. Došlo k odstranění známých nedostatků původní řídicí desky. Důraz byl kladen na praktické aspekty výroby, jako je rozmístění součástek, pájitelnost plošek, přehlednost návrhu a proudová zatížitelnost silových cest, která má vliv na ohřívání desky. Vzhledem k počtu desek v modelu je nižší teplota důležitá.

Dále byl podrobně analyzován jev, kdy odstředivé čerpadlo zůstávalo v provozu i po poklesu vstupního řídicího signálu. Problém byl vyřešen úpravou rezistoru R39. Nová deska byla následně úspěšně otestována v modelu a prokázala svoji plnou funkčnost. Celkově lze říci, že výroba desky proběhla bez zásadních komplikací a přinesla cenné praktické zkušenosti s technologií frézování plošných spojů a povrchových úprav. Zejména práce s chemickým cínem a ochranným lakem ukázala, jak důležitá je správná časová návaznost jednotlivých výrobních kroků. Rovněž bylo zřejmé, že i drobné chyby v návrhu nebo výrobě mohou mít vliv na funkčnost celého obvodu, a proto je důležité každou fázi pečlivě kontrolovat. Výsledný návrh tak splňuje požadavky na spolehlivé řízení čerpadla v laboratorním prostředí.

V současnosti je projekt kompletně dokončen. Deska byla navržena, vyrobena, osazena součástkami a úspěšně otestována. Následně byla zapojena do modelu vodního hospodářství, kde plní veškeré požadované funkce.

Literatura

- [1] ROUBAL, J. A CHVÁTAL, S. *Laboratoř aplikované informatiky* [online]. [cit. 2024-05-21], (<https://LoAI.copsu.cz>), 2025.
- [2] ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. *Regulační technika v příkladech*. Praha: BEN – technická literatura, 2011.
- [3] ŠIKÝŘ, T. *Systém vodního hospodářství – laboratorní model*. (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí, 2011.

Poděkování

Autor této práce by rád poděkoval Ing. Jiřímu Roubalovi, Ph.D. za vedení tohoto projektu, věcné připomínky, rady, pomoc s návrhem řídicí desky a pomoc se samotným zpracováním tohoto textu. Další poděkování patří panu Zbyňku Zapletalovi, který desku vyfrézoval, pocínoval a nalakoval.