



F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Bakalářská práce

Inteligentní řízení propustnosti skla pomocí elektrochromické fólie

Lukáš Kubík

Elektronika a komunikace

Květen 2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kubík** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **492044**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Inteligentní řízení propustnosti skla pomocí elektrochromické fólie

Název bakalářské práce anglicky:

Intelligent Glass Transmittance Control with Electrochromic Film

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je návrh a implementace konceptu inteligentního okna s možností řízení propustnosti světla. Při vypracování se řiďte následujícími pokyny:

- 1) proveďte rešerši možností využití elektrochromických fólií pro řízení propustnosti světla
- 2) na základě studie navrhnete říditelný zdroj pro ovládání vlastností fólie
- 3) proveďte měření propustnosti skla s aplikovanou fólií
- 4) diskutujte možnosti využití navrženého konceptu v rámci chytré domácnosti

Seznam doporučené literatury:

- [1] CANNAVALE, Alessandro, et al. Smart electrochromic windows to enhance building energy efficiency and visual comfort. *Energies*, 2020, 13.6: 1449.
[2] PICCOLO, Antonio; SIMONE, Francesca. Performance requirements for electrochromic smart window. *Journal of Building Engineering*, 2015, 3: 94-103.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D. za cenné rady a poznámky, bez kterých by nebylo možné práci vyhotovit. Dále děkuji rodině a přátelům za podporu nejen při psaní této práce, ale také při průchodu studiem.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 16.5.2023

.....

Abstrakt / Abstract

Tato práce poskytuje přehled o technologii elektrochromických materiálů a jejím využití v inteligentních oknech. Popisuje a měří vlastnosti těchto materiálů. Zabývá se také návrhem a konstrukcí napájecího zdroje pro chytré okno a jeho zapojením do systému chytré domácnosti. Využití těchto materiálů v domácím a pracovním prostředí může pomoci nejen k zlepšení světelných podmínek, ale také k menší energetické náročnosti.

Klíčová slova: elektrochromické materiály, PDLC, Smart glass, úspora energie, napájecí zdroj, chytrá domácnost, Internet věcí.

This work provides an overview of electrochromic material technology and its use in smart windows. It describes and measures the properties of these materials. It also discusses the design and construction of a power supply for a smart window and its integration into a smart home system. The use of electrochromic materials in home and work environments can help not only to improve lighting conditions but also to reduce energy consumption.

Keywords: electrochromic materials, PDLC, Smart glass, energy conservation, power supply, smart home, Internet of things.

Obsah /

1 Úvod	1	4 Závěr	23
2 Teoretická část	2	Literatura	24
2.1 Druhy elektrochromických materiálů	2	A Schéma navrženého zdroje.	27
2.1.1 Suspended particle devices	2		
2.1.2 Polymer dispersed liquid crystal	3		
2.1.3 Rozdíly mezi PDLC a SPD	4		
2.2 Využití elektrochromických materiálů	4		
2.2.1 Výhody a nevýhody	5		
2.3 Použití v rámci internetu věcí a chytré domácnosti	5		
2.3.1 Význam kvalitního osvětlení	5		
2.3.2 Internet věcí	5		
2.3.3 Návrh koncepce chytrých oken v rámci chytré domácnosti	6		
2.4 Zdroje pro chytrá okna	7		
2.4.1 Požadavky na zdroj	7		
2.4.2 Možná řešení	7		
2.4.3 Návrh zdroje	7		
Transformátor	8		
Usměrňovač s plným můstkem	9		
Buck converter	9		
H-můstek	10		
Mikrokontrolér	10		
I2C sběrnice	11		
3 Praktická část	12		
3.1 Realizace zdroje	12		
3.1.1 Vstupní obvod	12		
3.1.2 Buck converter a napájení pro zbytek zdroje	13		
3.1.3 DC-AC měnič	14		
3.1.4 Vstupy a výstupy zdroje	14		
3.1.5 Zpracování	15		
3.2 Software	16		
3.2.1 Webová aplikace	17		
3.2.2 Software pro Raspberry Pi Pico	18		
3.3 Měření intenzity osvětlení	20		
3.4 Měření propustnosti spektra viditelného světla PDLC fólie.	21		

Tabulky / Obrázky

3.1 Měření intenzity osvětlení v různých vzdálenostech	21
2.1 Ukázka termochromických vlastností.	2
2.2 Zjednodušený model konstrukce elektrochromického zařízení	3
2.3 Ukázka fungování SPD	3
2.4 Schematická ukázka fungování PDLC	4
2.5 Fotografická ukázka fungování PDLC folie.....	4
2.6 Diagram propojení chytrého okna	6
2.7 Diagram návrhu zdroje	8
2.8 Transformátor napětí	8
2.9 Zapojení usměrňovače s plným můstkem	9
2.10 Typické zapojení buck convertoru.....	9
2.11 Zapojení H-můstku.....	10
2.12 Raspberry Pi pico W	11
2.13 Schéma I2C sběrnice	11
3.1 Vstupní obvod zdroje	12
3.2 Implementace Buck convertoru	13
3.3 Dvojice DC-DC měničů SRS-4812.....	13
3.4 Regulátory napětí.....	14
3.5 Schéma H-můstku.....	14
3.6 Schéma tranzistorových driverů	15
3.7 Schéma zapojení relé.....	15
3.8 Vstupní a výstupní piny	16
3.9 Sestavený zdroj.....	16
3.10 3D model pouzdra na zdroj....	17
3.11 Webové rozhraní pro ovládací zdroje	18
3.12 Přípravek pro měření vlastností PDLC fólie.....	20
3.13 Měření závislosti intenzity osvětlení na přiloženém napětí .	21

Kapitola 1

Úvod

Elektrochromické sklo je inovativní technologie, která umožňuje přepínání mezi čirým a neprůhledným stavem skla v závislosti na přiloženém napětí. Tato technologie si získává stále větší pozornost díky svému potenciálu zlepšit energetickou účinnost budov, zvýšit pohodlí uživatelů a snížit dopad budov na životní prostředí. Chytrá okna by v budoucnu mohla nahradit klasické žaluzie a obohatit tak systémy chytrých domácností a inteligentních budov o další prvek. Jednou z klíčových součástí systému, kde se využívá elektrochromického skla, je napájecí zdroj, který dodává potřebné napětí pro kontrolu průhlednosti. Často používaná řešení převzatá z jiných aplikací však mohou omezit potenciál elektrochromických materiálů a chytrých oken.

Tato práce má několik cílů. Prvním je představit čtenáři elektrochromické materiály a princip jejich fungování. Druhým je změřit propustnost elektrochromického skla, pro lepší pochopení chování elektrochromických materiálů. Dále vytvořit koncepci začlenění chytrého okna do systému chytré domácnosti. V neposlední řadě návrh a konstrukce napájecího zdroje, který umožní nejen plně využít vlastností elektrochromického materiálu, ale také propojit chytré okno do struktury chytré domácnosti.

Kapitola 2

Teoretická část

Existují materiály, které mění své optické vlastnosti na základě různých principů, např. elektrochromické, termochromické nebo fotochromické [1]. Příkladem fotochromického materiálu by mohly být samozatmavovací dioptrické brýle, příkladem termochromického může být hrnek, který je za pokojové teploty jednobarevný, ale po naplnění horkou vodou odhalí obrázek.



Obrázek 2.1. Ukázka termochromických vlastností [2].

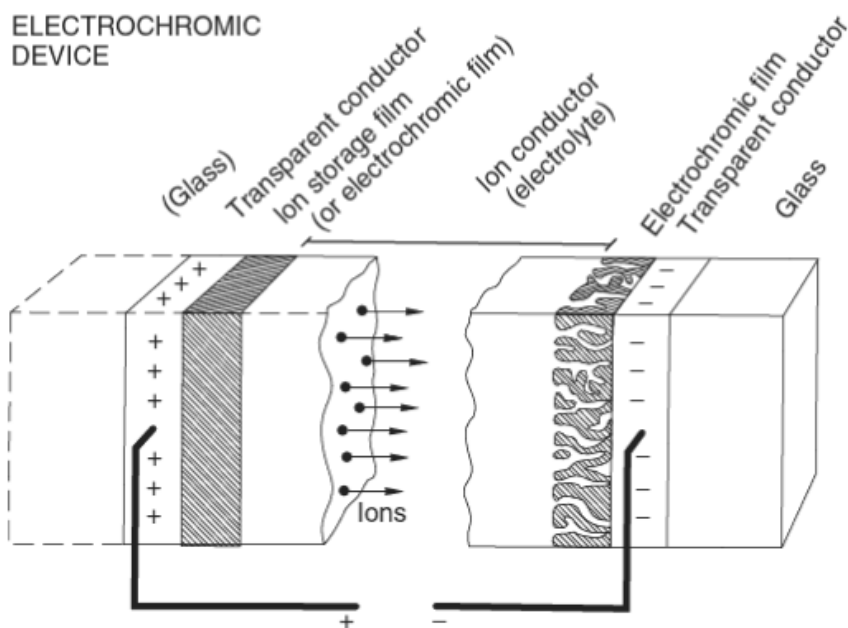
2.1 Druhy elektrochromických materiálů

Známe řadu typů elektrochromických materiálů, které využívají rozdílných jevů a technologií k dosažení požadovaného efektu. Mezi hlavní používané se řadí Polymer dispersed liquid crystal (PDLC), Suspended particle devices (SPD) a oxidy kovů např. oxid niklu [1]. Nejrozšířenějšími druhy jsou v dnešní době PDLC a SPD, a to díky svým fyzikálním vlastnostem a také ekonomickým nákladům [3].

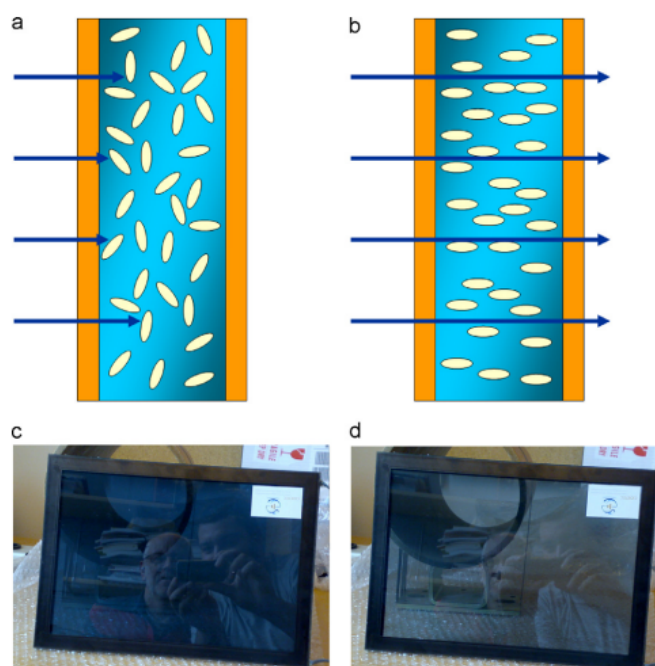
Všechny tyto technologie poté využívají podobného druhu konstrukce. U finálního zařízení je elektrochromická vrstva umístěna mezi dvěma průhlednými elektrodami, popřípadě mohou být elektrody z vnější strany chráněny vrstvou skla. Přivedení napětí na elektrody pak způsobí změnu vlastností elektrochromické vrstvy [4]. Zjednodušený model konstrukce takového zařízení pak můžeme vidět na obrázku 2.2.

2.1.1 Suspended particle devices

SPD je jednou z nejvyužívanějších elektrochromických technologií. Mezi elektrodami se nachází vrstva polymeru, ve které jsou rozprostřeny polarizovatelné částice. Bez přiloženého napětí jsou částice orientovány náhodně a materiál propouští méně světla. Přiložením napětí se začnou částice shodně orientovat, a tím propouští více paprsků světla. Při přiložení dostatečně velkého napětí dojde ke shodné orientaci všech částic a materiál se dostane do nejvyšší světelné propustnosti [6].



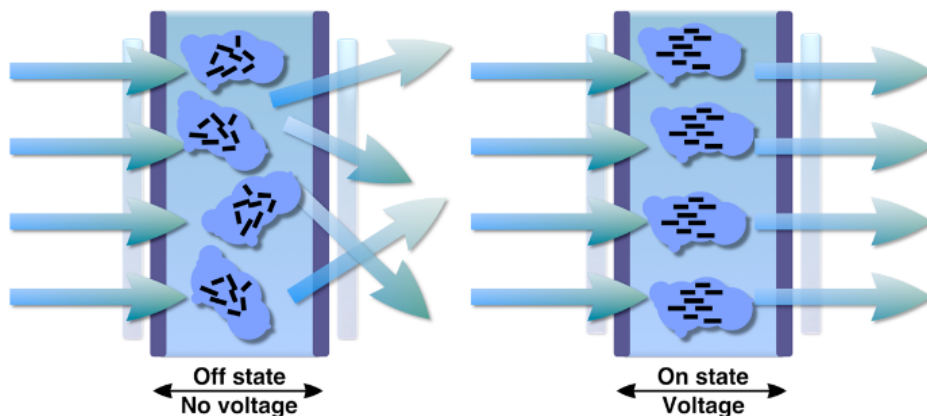
Obrázek 2.2. Obecný pětivrstvý model konstrukce elektrochromického zařízení [5].



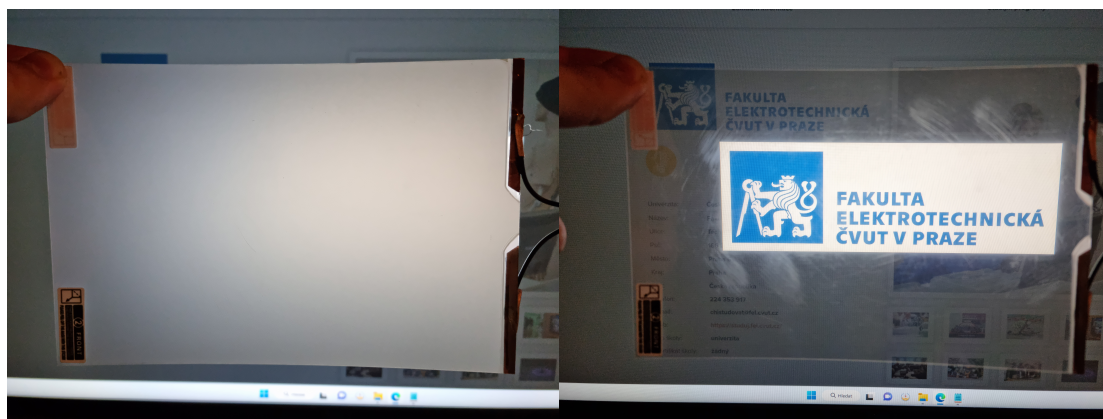
Obrázek 2.3. První dva obrázky (a,b) ukazují schéma technologie SPD bez a poté s přiloženým napětím. Spodní obrázky (c,d) jsou pak fotografie těchto stavů reálného produktu [6].

2.1.2 Polymer dispersed liquid crystal

Technologie PDLC je nejpoužívanější z elektrochromických technologií. Princip fungování je velice podobný jako u technologie SPD. Namísto pevných polarizovatelných částic jsou zde v polymerové vrstvě umístěny tekuté krystaly. Přiložením napětí se opět krystaly souhlasně orientují a propouští tak více světla [7].



Obrázek 2.4. Obrázky ukazují schéma technologie PDLC bez a poté s přiloženým napětím [8].



a) Stav bez napájení.

b) Stav s přiloženým napětím.

Obrázek 2.5. Fotografická ukázka fungování PDLC folie.

2.1.3 Rozdíly mezi PDLC a SPD

Jedním z rozdílů mezi těmito technologiemi jsou vlastnosti materiálu v neseprnutém stavu. PDLC je v neseprnutém stavu zcela neprůhledné viz obr 2.5 a poskytuje tak větší míru soukromí. Produkty s technologií SPD sice zůstávají průhledné i v neseprnutém stavu viz 2.3, ale dokáží ve větší míře blokovat infračervené záření, což zajišťuje lepší termoregulaci. Dalším rozdílem je doba seprnutí, která se u PDLC pohybuje v řádech desítek mikrosekund a u SPD jednotek sekund [9].

2.2 Využití elektrochromických materiálů

Elektrochromické materiály najdou své využití hlavně v architektuře a v automobilovém průmyslu. U automobilů se jedná např. o automatickou redukci oslňování ze zpětných zrcátek jejich ztmavením [1] nebo o nastavitelnou panoramatickou střechu.

Největší uplatnění mají elektrochromické materiály v architektuře. Technologie PDLC je vhodná do exteriérů obytných prostor, kde se uplatní jako náhrada tradičních žaluzií nebo rolet [7]. V interiérech pak může fungovat např. jako nastavitelné

oddělení kancelářských prostor, spínatelná projekční plocha nebo jako dekorativní prvek. Technologie SPD je vhodná hlavně do exteriérů. Její vlastnosti pohlcovat velké množství infračerveného záření umožňují dobrou kontrolu klimatu v prostorách, kde je technologie SPD použita ve formě oken [9].

■ 2.2.1 Výhody a nevýhody

Velkou výhodou je právě regulace vnitřního klimatu budov s okny využívajícími elektrochromických technologií. Je odhadováno, že jen v USA by se nahrazením všech oken okny chytrými¹ ušetřilo ročně až 15 miliard dolarů za energie potřebné ke kontrole klimatu a osvětlení vnitřních prostor [7]. To s sebou nese výhody nejen ekonomické, ale také ekologické.

Další výhodou je oproti standardním žaluziím rovnoměrné utlumení a elegantnější vzhled. Také použití na místech, kde není mechanické tlumení světla dobře realizovatelné, např. výše zmiňované panoramatické střechy aut.

Nevýhodami jsou rozhodně vyšší pořizovací cena, nutnost elektrické instalace a také omezená životnost. Po určitém množství cyklů se začnou vlastnosti elektrochromických materiálů zhoršovat. Tento problém je však s postupujícím vývojem čím dál více zanedbatelný [1].

■ 2.3 Použití v rámci internetu věcí a chytré domácnosti

Svoje uplatnění najdou povrchy s ovladatelnou průhledností i v rámci chytrých domácností. Svými vlastnostmi mohou přispět k zlepšení kvality života uživatelů.

■ 2.3.1 Význam kvalitního osvětlení

Kvalitní osvětlení v pracovních či studijních prostorách je často opomíjené, ale velice důležité kritérium pro efektivitu a soustředění se na danou činnost. Za správných světelných podmínek dělá člověk méně chyb a dokáže se lépe a déle soustředit. Nekvalitním či nedostatečným osvětlením může dojít k pocitu únavy, nebo dokonce narušení cirkadiánního rytmu, což může, hlavně u dětí a dospívajících, vést až ke spánkovým poruchám [10]. Použitím chytrých oken pak můžeme regulovat dostatek denního světla, nebo naopak zabraňovat zbytečnému oslňování.

■ 2.3.2 Internet věcí

Termín IoT (Internet of Things) neboli internet věcí označuje společnou síť zařízení a systémů připojených k internetu. To umožňuje komunikaci mezi jednotlivými zařízeními a tím pádem jejich vzájemnou interakci [11].

Pod pojmem IoT zařízení, nebo IoT systém, si můžeme představit širokou škálu věcí. Do kategorie spotřebitelského IoT jsou řazeny produkty pro automatizaci domácnosti, chytré spotřebiče nebo nositelná elektronika.

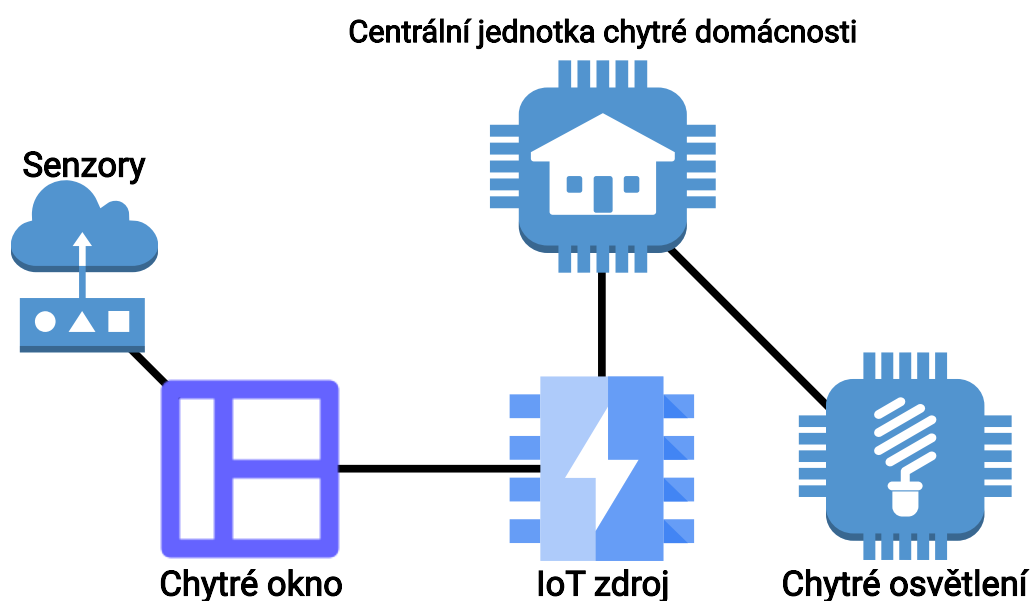
Druhou kategorií je industriální IoT. v tomto odvětví jde hlavně o průmyslovou automatizaci, snížení provozních nákladů a zvýšení efektivitu a bezpečnosti práce. Senzorové sítě a vzájemná komunikace zařízení pak může například zabránit neplánovaným odstávkám tak, že předpoví poruchu některého ze strojů předtím, než by mohla nastat, a upozorní údržbu. Dále mohou být tyto systémy v průmyslu užitečné ke správě inventáře nebo optimalizaci logistiky [12].

¹ Chytrým oknem nazýváme právě takové, které využívá vlastností elektrochromických materiálů.

2.3.3 Návrh koncepce chytrých oken v rámci chytré domácnosti

Použitím chytrých oken v rámci domácnosti můžeme dosáhnout lepší kvality osvětlení a větší míry soukromí. Pro tuto práci jsem vybral technologii PDLC, a to proto, že se jedná o technologii nejrozšířenější a nejdostupnější. Aplikace, které využívají technologii PDLC, pracují na střídavém napětí, většinou o hodnotách 40 V až 100 V a frekvenci 50 Hz až 120 Hz. Nelze je napájet ze síťového napětí, a je třeba speciálního napájecího zdroje [13].

Zakomponování chytrého okna do chytré domácnosti můžeme provést pomocí IoT napájecího zdroje, který bude okno ovládat. Návrhem zdroje se zabývá pozdější část práce.



Obrázek 2.6. Diagram propojení chytrého okna v rámci chytré domácnosti.

Existuje spousta kritérií, podle kterých lze nastavit průhlednost okna, aby bylo dosaženo největší kvality osvětlení.

První a nejjednodušší z možností je manuální nastavení průhlednosti podle aktuální potřeby uživatele. Tato možnost je také nejčastěji nabízena, jako jediný způsob ovládaní u mnoha dodavatelů chytrých oken, a to často jen s binární volbou propustnosti, tedy stavy vypnuto a zapnuto. Jako napájecí zdroj je u těchto řešení většinou použito transformátor napětí, který transformuje síťové napětí na hladinu 60 – 100 V. To však často velice omezí schopnost částečné průhlednosti technologie PDLC a možnost propojení oken s širším systémem chytré domácnosti. Lepší možností je zdroj, který zvládne dodat rozsah napěťových úrovní, a tak plně využít vlastností materiálu.

Druhou možností může být osadit okno senzory pro měření intenzity osvětlení a kontrolovat, zda jsou splněny dobré světelné podmínky. K tomu může postačit buďto pouze jeden senzor monitorující vnitřní prostory, nebo kombinace venkovního a vnitřního senzoru. V případě dvou senzorů přibývá možná funkcionality pro zajištění soukromí v případech, kdy je venku tma a v interieru rozsvíceno. V takové situaci je zvenku dobře vidět

dovnitř, což je nežádoucí stav. Okno osazené senzory pak může kontrolou dat z venkovního a vnitřního senzoru vyhodnotit, zda nedochází právě k narušení soukromí, nebo zda není příspěvek přírodního osvětlení zanedbatelný, a okno zneprůhlednit.

Třetí možností může být nastavení průhlednosti podle polohy slunce. Každé okno v domě by pak mělo přidělenou informaci o tom, na jakou světovou stranu míří a v jaké výšce se nachází. Podle těchto informací by bylo vyhodnoceno, v jaké časy přijde oslnění při východu a západu slunce. Také může být mimo dobu slunečního svitu okno neprůhledné. Další použití informace o poloze slunce může být implementace funkce solárního budíku, kdy okno vpustí do pokoje větší množství světla, a tím dojde k přirozenému probuzení uživatele.

Všechny tyto tři možnosti je nejlepší kombinovat s chytrým osvětlením, které může získávat informace o stavu okna, a zajišťovat tak ideální světelné podmínky v případech, kdy přirozené světlo nestačí nebo musí být okno z jiných důvodů zneprůhledné.

2.4 Zdroje pro chytrá okna

Tato část práce se zabývá teoretickým návrhem zdroje pro chytrá okna a porovnává možná řešení.

2.4.1 Požadavky na zdroj

Zdroj pro chytré okno by měl splňovat dva požadavky. Prvním požadavkem je nastavitelné napětí v rozsahu potřebném pro konkrétní aplikaci. To je typicky od 40 do 100 V, jak je již zmíněno v sekci 2.3.3.

Druhým požadavkem je možnost zapojení zdroje do sítě IoT. Tím se zařídí bezdrátové ovládání a možnost implementace chytrých funkcí okna.

2.4.2 Možná řešení

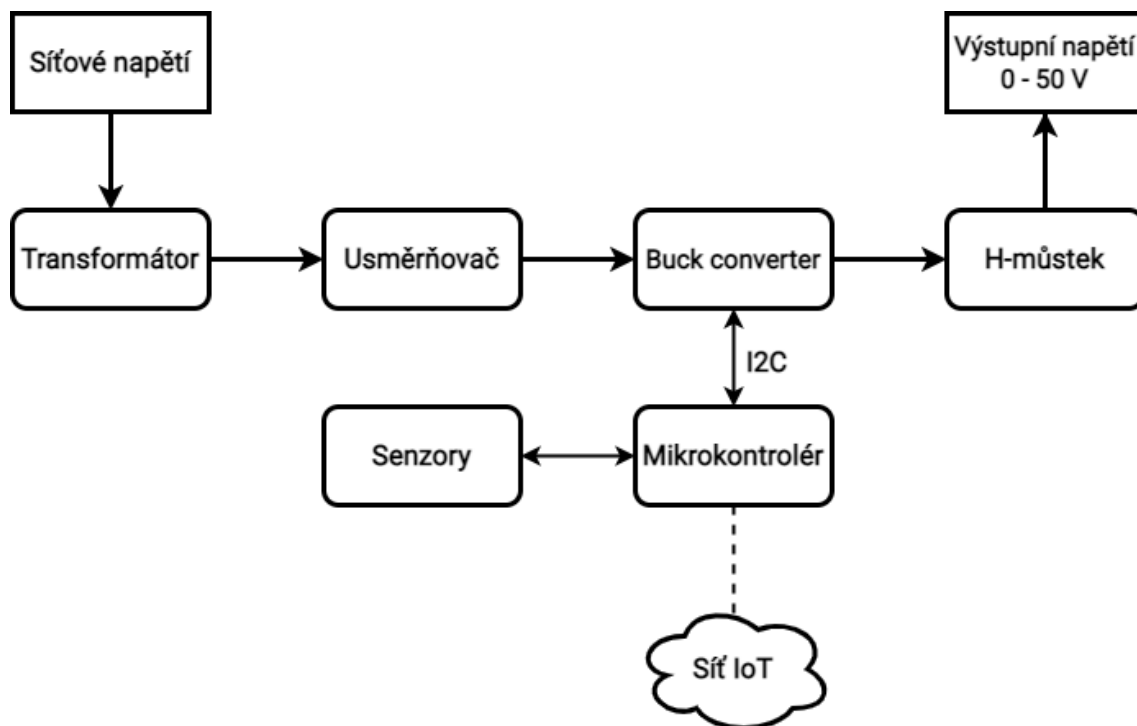
Někteří distributoři inteligentních oken a elektrochromických povrchů nabízejí jako zdroj jednoduchý transformátor napětí. Ten však nesplňuje ani jednu ze stanovených podmínek. Není ani nastavitelný, ani dobře propojitelný do sítě IoT. Toto řešení je často nabízeno v kombinaci s bezdrátovým vypínačem, což částečně řeší druhou podmínku.

Dalším typem nastavitelného zdroje střídavého napětí je variabilní transformátor. Ten vyhovuje první podmínce, ale druhá podmínka bezdrátového nastavení je těžce proveditelná. Jeho další nevýhodou je často neskladné provedení.

Způsob, kterým jsem se rozhodl realizovat napájení pro chytré okno, je ovládání rozsahu stejnosměrného napětí a jeho následné rozstřídání. Tato možnost nabízí plný napěťový rozsah a digitální řízení vhodné pro propojení se systémem IoT.

2.4.3 Návrh zdroje

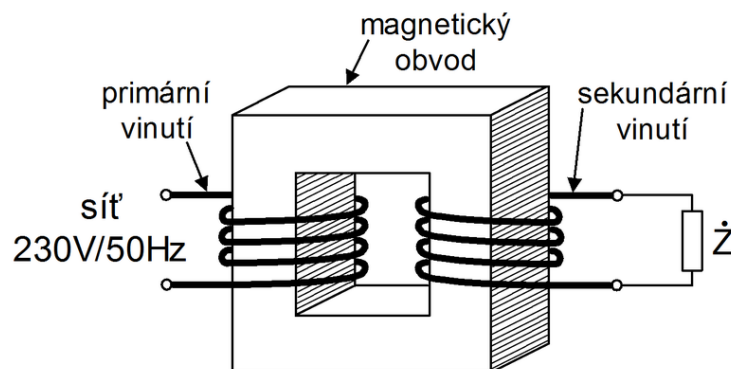
Z měření 3.3 vychází, že u vzorku, který jsem měl k dispozici, nedochází ke změnám průhlednosti nad 48 V. Zdroj jsem tedy navrhoval na práci v rozsahu 0 V až 50 V. Skládá se z pěti hlavních částí: transformátoru napětí, usměrňovače, buck convertoru, H-můstku a mikrokontroléru.



Obrázek 2.7. Diagram návrhu zdroje pro chytré okno.

■ Transformátor

Transformátor je elektrické zařízení sloužící k přenosu elektrické energie z jednoho obvodu k druhému. Skládá se ze dvou cívek navinutých na magnetickém jádru. Primární cívka je napájena střídavým napětím, což vytváří magnetické pole v jádru. Magnetické pole pak indukuje střídavé napětí na sekundární cívce. Poměr závitů na primární a sekundární cívce je zároveň poměrem vstupního a výstupního napětí [14]. V případě zdroje navrhovaného pro tuto práci se jedná o poměr 230 V vstupní napětí, 36 V výstupní napětí.



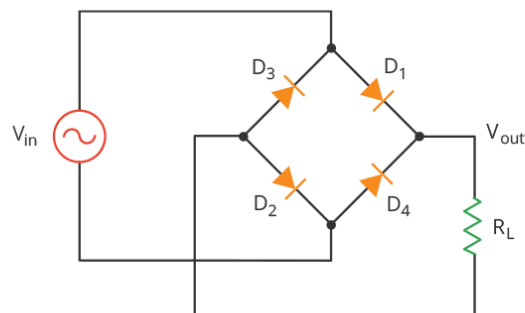
Obrázek 2.8. Transformátor napětí [15].

■ Usměrňovač s plným můstkem

Usměrňovač s plným můstkem je elektronický obvod sloužící k převodu střídavého napětí na stejnosměrné. Je sestaven ze čtyř diod zapojených do plného můstku, což zaručí, že na výstupu je vždy kladné napětí [16]. Velikost usměrněného napětí na výstupu je pro sinusový signál dána vztahem

$$V_{out} = V_{in} \cdot \sqrt{2} \text{ [V]}. \quad (1)$$

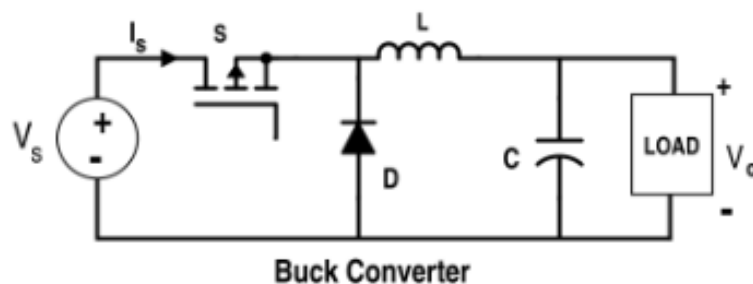
Tím je zajištěna horní hranice rozsahu stanovená v sekci 2.4.3.



Obrázek 2.9. Zapojení usměrňovače s plným můstkem [17].

■ Buck converter

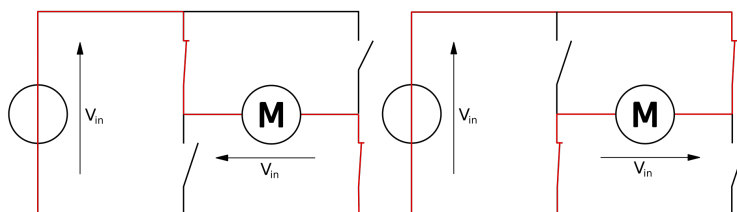
Buck converter, neboli spínaný regulátor, je typ stejnosměrného měniče, který snižuje napětí z vyšší napěťové úrovně na nižší [18]. Na výstupu usměrňovače dostáváme 51 V. Regulátor z této hladiny v navrhovaném zdroji vytváří napěťový rozsah od 51 V do 0 V.



Obrázek 2.10. Typické zapojení buck convertoru [19].

H-můstek

H-můstek je obvod většinou používaný pro kontrolu směru stejnosměrných motorů. Je tvořen čtyřmi spínači. Sepnutím dvou ze čtyř spínačů umožníme průchod kladnému napětí. Sepnutím druhé dvojice umožníme průchod napětí opačnému.



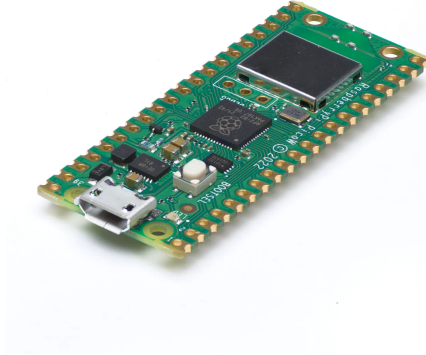
Obrázek 2.11. Zapojení a princip fungování H-můstku [20].

V případě zdroje pro chytré okno jsem použil H-můstek, který zastává funkci invertoru. V takovém případě se tomuto obvodu říká jednofázový můstkový měnič. Funkci spínačů zde plní 4 tranzistory MOSFET. Obvod má na vstupu stejnosměrné napětí vycházející z Buck convertoru. Na výstupu je napětí střídavé v podobě obdélníkového signálu.

Mikrokontrolér

Mikrokontrolér je malý počítač integrovaný na jednom čipu. Obsahuje centrální procesorovou jednotku, paměť, vstupní/výstupní periferie a další komponenty nezbytné pro jeho provoz. Mikrokontroléry se používají v nejrůznějších elektronických zařízeních, jako jsou spotřebiče, automobily, lékařské přístroje a průmyslová zařízení. Mikrokontroléry jsou velmi univerzální a lze je přizpůsobit různým aplikacím, což z nich činí základní součást při vývoji elektronických systémů. Ke komunikaci s aktuátory a senzory jsou využity komunikační sběrnice. Nejčastěji UART, SPI nebo I2C [21]. Pro sběr dat ze senzorů chytrého okna, možnost dálkového ovládní a připojení do sítě IoT jsem pro zdroj vybral mikrokontrolér Raspberry Pi pico W.

Raspberry Pi pico je deska s mikrokontrolérem založená na čipu RP2040, který je vybaven dvoujádrovým procesorem Arm Cortex-M0+ pracujícím na frekvenci až 133 MHz. Má 264 KB paměti RAM a 2 MB paměti flash. Verze W navíc dodává možnost bezdrátového připojení přes Wi-Fi nebo Bluetooth [22].

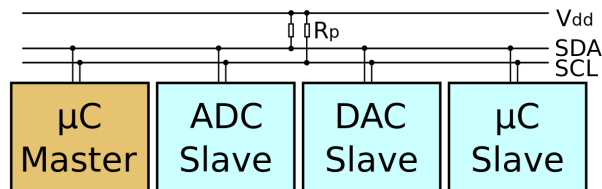


Obrázek 2.12. Raspberry Pi pico W [22].

■ I2C sběrnice

I2C (Inter-Integrated Circuit) je sériový komunikační protokol, který umožňuje komunikaci mezi elektronickými zařízeními.

I2C umožňuje připojit více zařízení k jedné komunikační sběrnici pomocí dvou vodičů: datového vodiče (SDA) a hodinového vodiče (SCL). Zařízením jsou přiřazeny unikátní adresy a komunikace je zahájena zařízením master, které vyšle na sběrnici počáteční signál. Master zařízení pak na datovou linku vyšle sekvenci bitů synchronizovanou hodinovým signálem. Slave zařízení reagují potvrzovacím signálem, který signalizuje, že data obdržela [23].



Obrázek 2.13. Schéma I2C sběrnice [24].

Kapitola 3

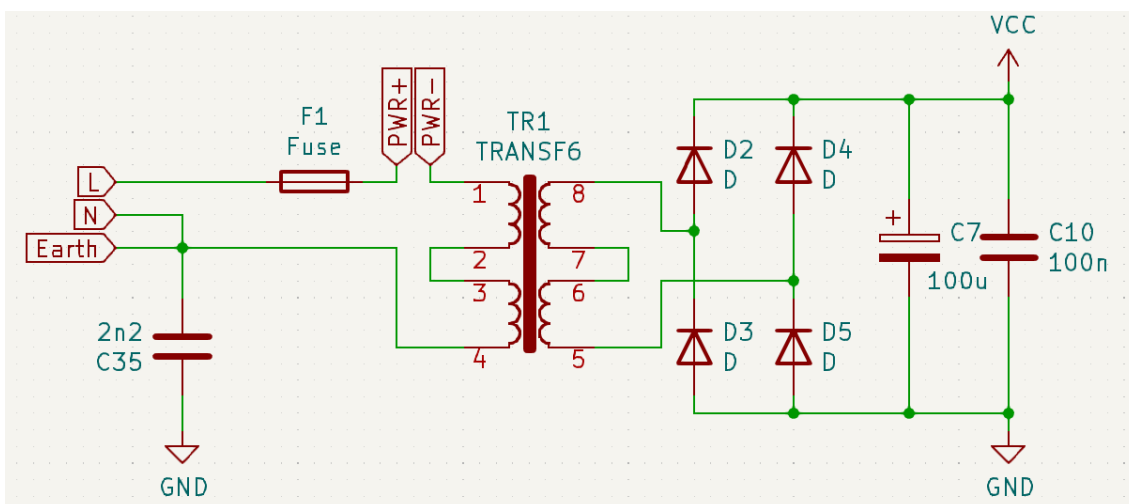
Praktická část

3.1 Realizace zdroje

Tato sekce se zabývá reálným návrhem a konstrukcí zdroje navrženého v sekci 2.4.3. Zdroj je navržen na desku plošných spojů. Návrh byl vyhotoven v programu KiCad. KiCad je open-source software pro automatizaci elektronického návrhu, který umožňuje tvorbu schémat a návrh desek plošných spojů [25].

3.1.1 Vstupní obvod

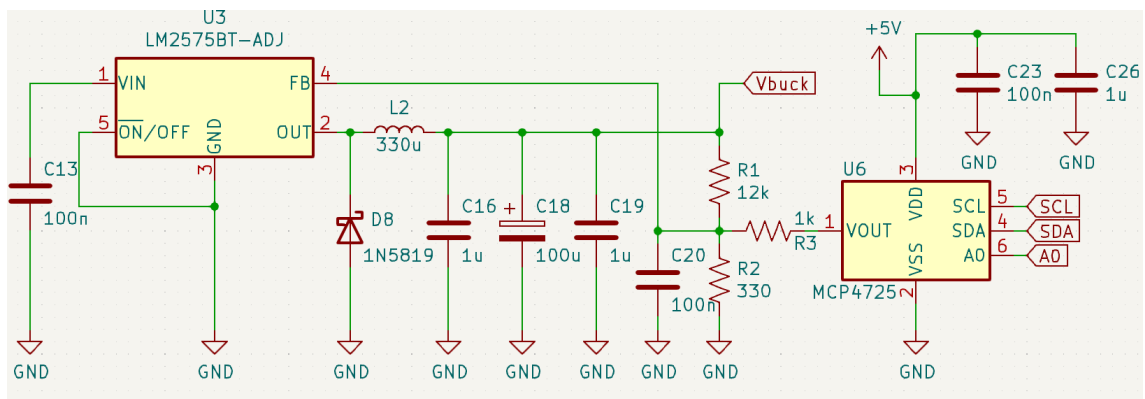
Na vstupu celého zařízení se nachází vstupní svorky pro připojení síťového napětí, pojistka, transformátor napětí a usměrňovač s plným můstkem. Transformátor převádí vstupních 230 V na 36 V. Střídavé napětí z transformátoru jde do usměrňovače, na jehož výstupní straně dostáváme dosazením do vztahu (1) 51 V stejnosměrného napětí.



Obrázek 3.1. Vstupní obvod zdroje.

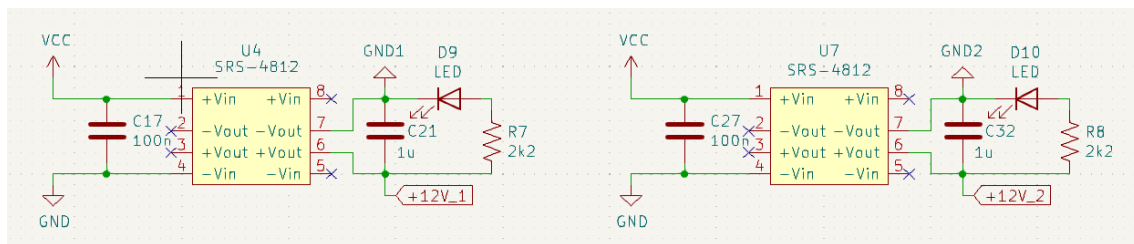
3.1.2 Buck converter a napájení pro zbytek zdroje

Buck converter je tvořen nastavitelným regulátorem napětí LM2575-ADJ. Ten je ovládán pomocí zpětné vazby a na výstupu je schopen nastavit napěťový rozsah od vstupního napětí (51 V) do 1,23 V [26]. Zpětnou vazbu pro regulátor zde zajišťuje digitálně analogový převodník MCP4725 [27]. Tento převodník je zcela zásadní součástí celého zařízení, a to díky možnosti jeho ovládnutí pomocí I2C sběrnice. Umožňuje tak nastavení napěťové úrovně pomocí mikrokontroléru a dodává zdroji funkcionalitu připojení do sítě IoT.

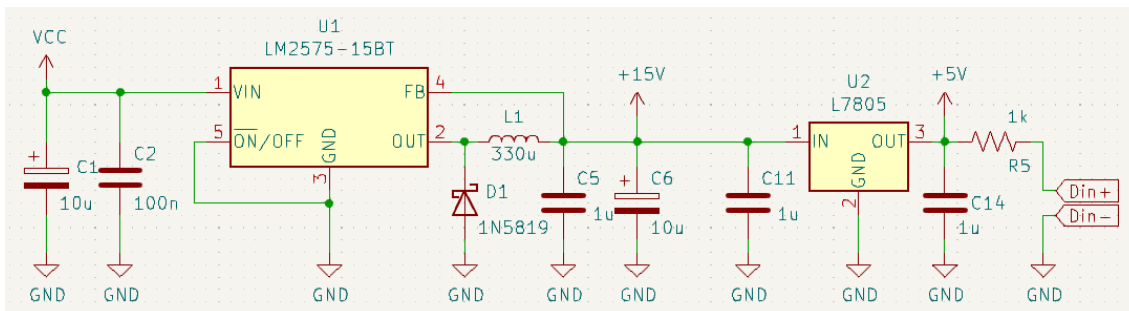


Obrázek 3.2. Implementace Buck convertoru pomocí regulátoru LM2575-ADJ a převodníku MCP4725.

Ve této části návrhu se nachází také napájení pro ostatní části zdroje. Konkrétně se jedná o dvojici DC-DC měničů SRS-4812 [28], které vstupní napětí 51 V převádí na výstupních 12 V. Zajišťují napájení pro high-side tranzistorové drivery H-můstku. Na měniče jsou napojené LED diody, které indikují, že je zařízení zapnuto. Dále regulátor napětí LM2575-15 [26], který drží na výstupu 15 V a napájí low-side tranzistorové drivery H-můstku a výstupní relé. Posledním napájecím zdrojem je napěťový regulátor L7805 [29]. Ten dodává zdroji pěti voltovou napěťovou linku, ze které je napájeno Raspberry Pi Pico a tranzistorové drivery.



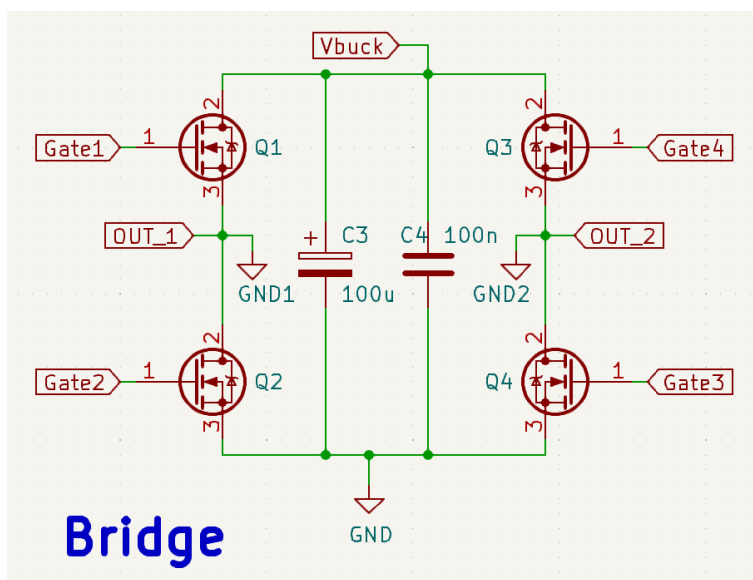
Obrázek 3.3. Dvojice DC-DC měničů SRS-4812.



Obrázek 3.4. Regulátory napětí LM2575-15 a L7805.

3.1.3 DC-AC měnič

Jak už bylo zmíněno v sekci 2.4.3, převod stejnosměrného napětí na střídavé je proveden pomocí čtyř tranzistorů MOSFET zapojených do takzvaného H-můstku.

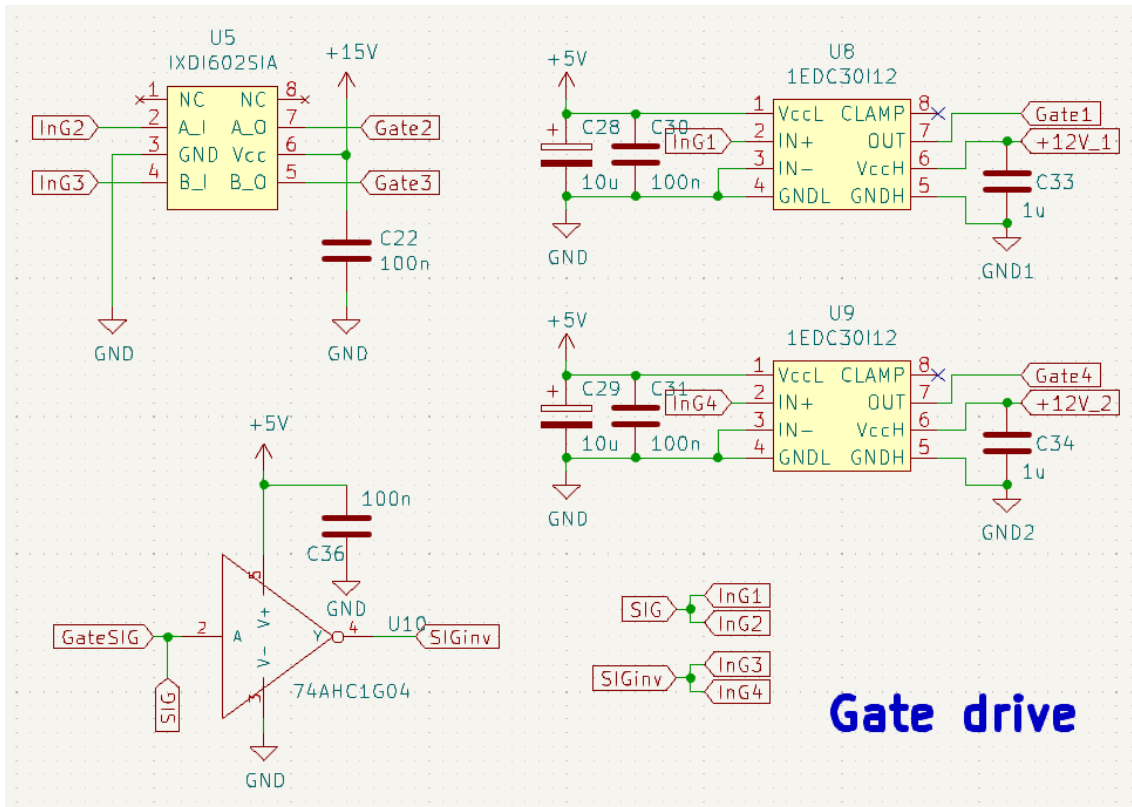


Obrázek 3.5. Schéma H-můstku.

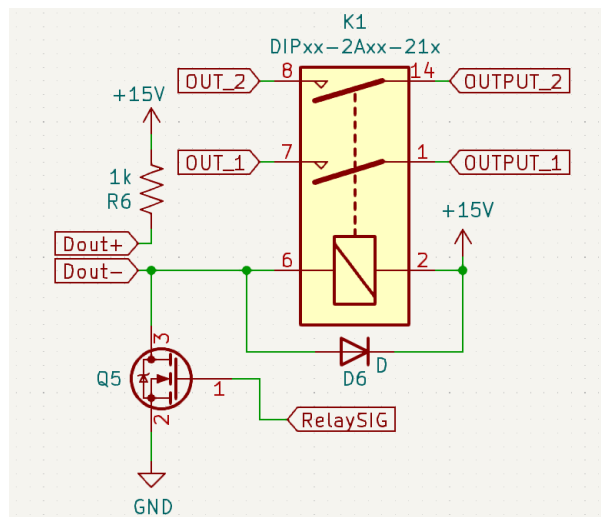
Spínání high-side tranzistorů mají na starosti tranzistorové drivery 1EDC30I12 [30]. Low-side tranzistory jsou spínány driverem IXDI602SIA [31]. Driverům je představen invertor, který invertuje signál pro třetí a čtvrtý tranzistor. Frekvenci výstupního napětí lze opět ovládat mikrokontrolérem.

3.1.4 Vstupy a výstupy zdroje

Jelikož napěťový rozsah Buck convertoru sahá jen do 1,23 V, umístil jsem na výstup relé, které dokáže zdroj rozpojit, a na výstupu je tedy, pokud je to potřeba, skutečně 0 V. Relé je spínáno tranzistorem MOSFET. To umožní jeho ovládání mikrokontrolérem. Posledním článkem návrhu jsou vstupní a výstupní piny. Tedy vstupní a výstupní napětí, piny pro připojení a napájení mikrokontroléru a testovací piny. Piny L, N a Earth slouží k připojení vstupního napětí. Piny OUTPUT 1 a OUTPUT 2 pak napětí výstupního. Piny 1–6 a 11 jsou pro připojení mikrokontroléru a ovládání zdroje, zbytek pinů je testovacích viz obr. 3.8



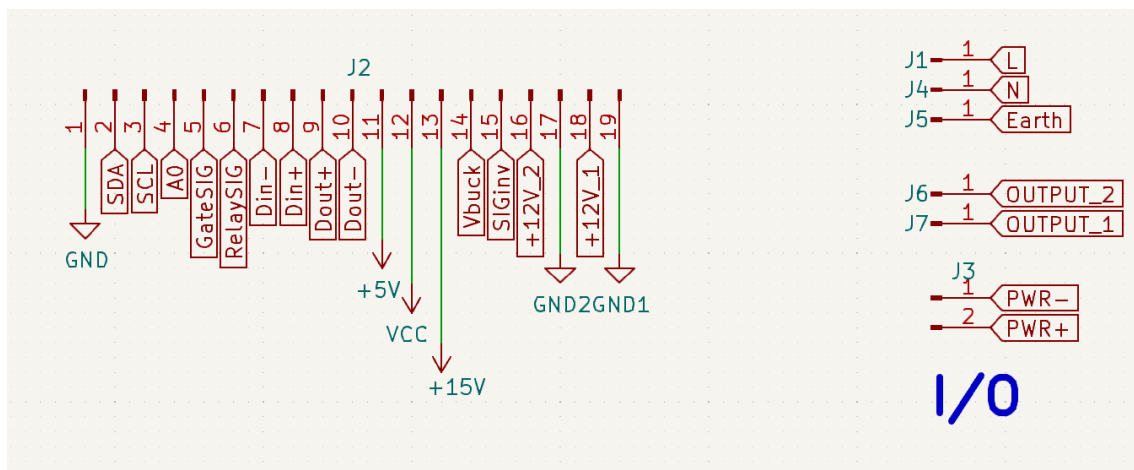
Obrázek 3.6. Schéma tranzistorových driverů.



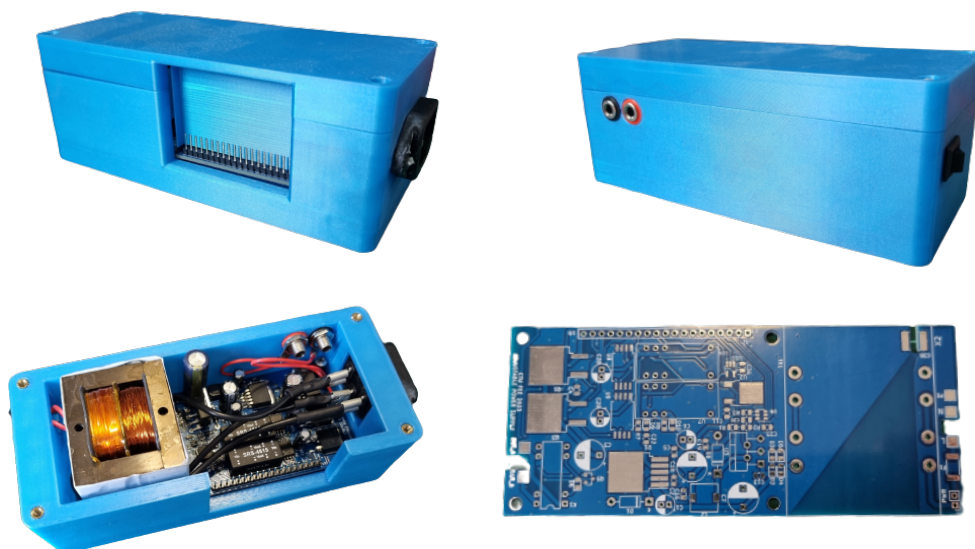
Obrázek 3.7. Schéma zapojení relé.

3.1.5 Zpracování

Navrženou desku plošných spojů jsem nechal vyrobit u JLCPCB. Pro desku jsem v programu Fusion360 vymodeloval pouzdro, které jsem následně vytiskl na 3D tiskárně. A osadil mechanickým přepínačem pro vypnutí a zapnutí zdroje, standardizovaným vstupním konektorem a výstupními konektory.



Obrázek 3.8. Vstupní a výstupní piny.



Obrázek 3.9. Fotky sestaveného zdroje a desky plošných spojů.

3.2 Software

Software pro Raspberry Pi Pico je psán v jazyce MicroPython. MicroPython je odvětví Pythonu optimalizované pro mikrokontroléry [32]. Pro bezdrátové ovládání zdroje jsem napsal jednoduchou webovou aplikaci v Pythonu pomocí knihovny Flask a HTML šablony. Framework Flask slouží právě pro tvorbu webových aplikací [33]. Webová aplikace komunikuje s Raspberry pomocí protokolu MQTT. Jedná se o úsporný protokol pro přenos informací, který se používá k odesílání zpráv z jednoho zařízení na druhé prostřednictvím internetu. MQTT se často používá v IoT aplikacích pro vzájemnou komunikaci zařízení. MQTT používá model publish/subscribe, kdy se zařízení mohou přihlásit k odběru témat a přijímat zprávy, které do těchto témat publikují jiná zařízení [34].



Obrázek 3.10. 3D model pouzdra na zdroj.

■ 3.2.1 Webová aplikace

V první části aplikace je nastavena MQTT komunikace

```
#nastaveni MQTT
app = Flask(__name__)
app.config['MQTT_BROKER_URL'] = "mqtt.eclipseprojects.io"
app.config['MQTT_BROKER_PORT'] = 1883
app.config['MQTT_REFRESH_TIME'] = 1.0 # refresh time in seconds
mqtt = Mqtt(app)
```

V druhé části jde o vykreslení HTML šablony a nastavení funkce tlačítek a slideru.

```
#uvodni stranka
@app.route('/')
def index():
    return render_template('index.html')

#slider
@app.route('/slider', methods=['POST'])
def slider():
    slider_value = request.form['slider']
    mqtt.publish('okno/slider', slider_value)
    return render_template('index.html', slider_value=slider_value)

#tlacitka
@app.route('/buttons', methods=['POST'])
def buttons():
    button_value = request.form['button']
    mqtt.publish('okno/button', button_value)
    return render_template('index.html', button_value=button_value)

if __name__ == '__main__':
    app.run(debug=True)
```



Obrázek 3.11. Webové rozhraní pro ovládání zdroje.

Aplikace nabízí 3 režimy ovládání okna viz obr. 3.11. Prvním je nastavení průhlednosti pomocí slideru. Uživatel vybere hodnotu a zmáčknutím tlačítka *Nastavit průhlednost* odešle zprávu do zdroje, který podle zvolené hodnoty nastaví napětí. Druhou možností je nastavení podle západu Slunce. Tato možnost odešle zprávu do mikrokontroléru, který má v sobě údaje o čase a zeměpisné poloze a zkontroluje, zda již zapadlo Slunce. Pokud zapadlo, zneprůhlední okno. Třetí možností je nastavení pomocí senzorů, po zvolení této možnosti kontroluje Raspberry data ze dvou senzorů intenzity osvětlení. Pokud by nebyl příspěvek přirozeného světla dostatečný nebo dochází k narušení soukromí z důvodu uvedených v sekci 2.3.3, dojde k zneprůhlednění okna.

■ 3.2.2 Software pro Raspberry Pi Pico

V první části programu je nastaveno připojení na WiFi a MQTT brokeru obdobně jako ve webové aplikaci.

V další části kódu jsem nastavil počáteční stav pinů, PWM pro určení frekvence H-můstku a sepnutí relé. Také je zde zadefinována funkce pro zápis na digitálně analogový převodník, který ovládá výstupní napětí zdroje.

```
#nastaveni pinu Raspberry a zapisu na~DAC
i2c = I2C(1,scl=Pin(19), sda=Pin(18), freq=400000)
pin_relay = Pin(2, mode=Pin.OUT)
pwm_pin = Pin(3)
pwm = PWM(pwm_pin)
#pwm a sepnuti rele
pin_relay.on()
pwm.freq(50)
pwm.duty_u16(32768)

def Write_DAC(volt):
```

```

buf=bytearray(2)
buf[0]=(volt >> 8) & 0xFF
buf[1]=volt & 0xFF
i2c.writeto(0x66, buf)
time.sleep_ms(10)

vout=0 # 0 - 3.3V
dacv = int(vout / 3.3 * 4095)
Write_DAC(dacv)

```

Poté přichází definice funkce pro zjištění dat o západu Slunce a čtení ze senzorů intenzity osvětlení. Nakonec hlavní smyčka programu, která zaručuje neustálý běh programu a kontroluje, jaký mód zvolit, a podle toho nastavuje zdroj.

```

#hlavni loop
while True:
    #prijem MQTT zpravy
    client.check_msg()

```

Pokud uživatel pohne sliderem, nastaví se hodnota průhlednosti podle hodnoty slideru.

```

if tp == 'okno/slider':
    print("slider:{}".format(data))
    voltage = round((data/100)*4095)
    Write_DAC(voltage)

```

Pokud uživatel zmáčkne tlačítko **Senzory**, zapne se ovládání pomocí dvou senzorů intenzity osvětlení.

```

if (tp == 'okno/button') and (data == 1):
    if Sensor_out() == 1:
        print("Dochazi k odlesku")
        Write_DAC(0)
    if Sensor_out() == 0:
        print("Nedochazi k odlesku")
        Write_DAC(4095)

```

Pokud uživatel zmáčkne tlačítko **Západ Slunce**, je vyhodnoceno, zda již zapadlo Slunce, pokud ano, folie se zneprůhlední.

```

if (tp == 'okno/button') and (data == 2):
    #Slunce jiz zapadlo
    if Compare_time() == 1:
        print("Je po zapadu Slunce")
        Write_DAC(0)
    #jeste nezapadlo
    if Compare_time() == 0:
        print("Je pred zapadem Slunce")
        Write_DAC(4095)

time.sleep(1)

```

Do budoucna by bylo dobré zkrášlit stránku pro ovládání zdroje, implementovat propojení do existujících systémů chytrých domácností a obohatit funkce o dynamické

rozhodování. Momentálně mají funkce západu Slunce a kontroly podle senzorů pouze binární nastavení průhlednosti fólie. Experimentem by se dalo zjistit, při jakém rozdílu intenzity venkovního a vnitřního osvětlení dochází k odlesku na vnitřní straně okna a v jakém čase před a po východu a západu Slunce dochází k největšímu oslnění. Podle těchto údajů by poté došlo k rozhodnutí, do jaké úrovně je třeba okno zneprůhlednit.

3.3 Měření intenzity osvětlení

Celkem jsem provedl dva druhy měření intenzity osvětlení. Obě měření byla provedena v prostorách s nulovou okolní intenzitou osvětlení. Zdroj světla se nacházel v neprůhledném boxu, který má jednu stěnu nahrazenou PDLC fólií.

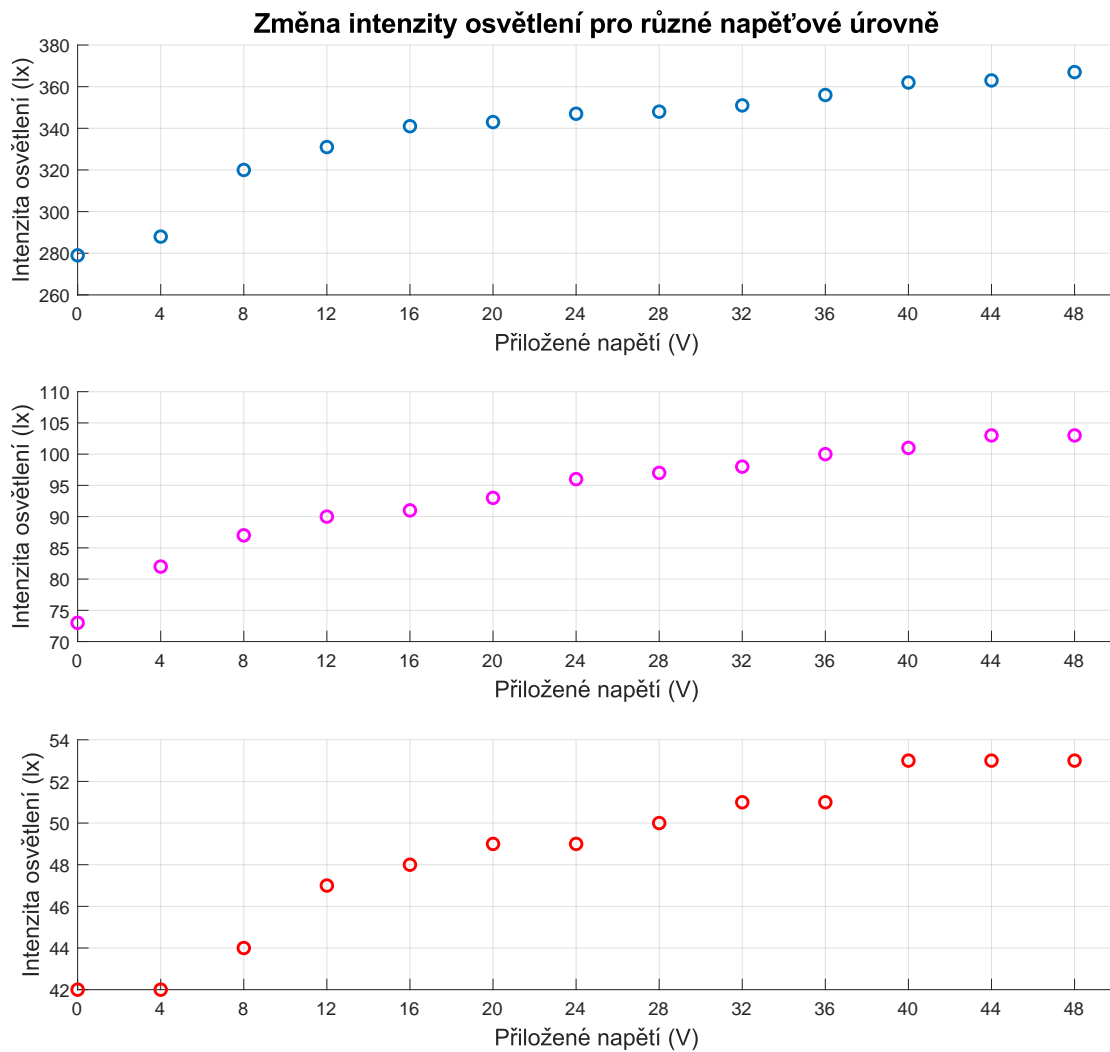
Na venkovní straně této fólie jsem pak měřil intenzitu osvětlení propuštěnou skrz.



Obrázek 3.12. Přípravek pro měření vlastností PDLC fólie bez a s přiloženým napětím.

V prvním případě bylo cílem zjistit, jak se změní intenzita osvětlení při různých napěťových úrovních. Byl zvolen rozsah 0 až 48 V. Při 0 V je fólie zcela neprůhledná. Při 48 V už je naopak zcela průhledná a naměřená intenzita už se nad tuto hodnotu neměnila. Měření jsem provedl ve vzdálenosti 7 cm od fólie na třech úrovních intenzity osvětlení viz obr. 3.13. U všech třech měření můžeme vidět rovnoměrný pokles intenzity osvětlení na napětích 48 V – 16 V. Od 16 V do 0 V pak nastává strmější pokles intenzity osvětlení.

Druhé měření mělo za cíl zjistit, jak hodně bude světlo rozptýleno, a tedy dojde ke snížení intenzity osvětlení v různých vzdálenostech od fólie. U každé z těchto vzdáleností jsem pak naměřil dvě hodnoty, první při plné průhlednosti a druhou u zcela neprůhledné fólie. Vzhledem k vlastnostem PDLC jsem předpokládal, že světlo bude s rostoucí vzdáleností od povrchu v neprůhledném stavu více rozptýleno, tedy že se vzdáleností bude přibývat rozdíl mezi intenzitou osvětlení při průhledném a neprůhledném stavu. Tato úvaha se však měřením nepotvrdila viz tabulka 3.1.



Obrázek 3.13. Měření závislosti intenzity osvětlení na přiloženém napětí.

vzdálenost od fólie [cm]	E při 48 V [lx]	E při 0 V [lx]	ΔE [lx]
5	396	342	54
10	280	262	18
20	167	138	29
40	72	60	12

Tabulka 3.1. Měření E (intenzity osvětlení) v různých vzdálenostech od fólie.

3.4 Měření propustnosti spektra viditelného světla PDLC fólie.

Další měření se zabývalo otázkou, zda fólie tlumí nějakou ze složek spektra viditelného světla. Měření jsem provedl na jedenácti napěťových úrovních od padesáti do nula Voltů, vždy po pěti voltech.

Měření ukázalo, že nedochází k výraznějšímu útlumu žádné ze složek viditelného světla.

Výsledky se shodují s měřeními zpracovanými v jiných publikacích. Zajímavé výsledky přináší práce, kde byl měřen útlum infračervené a ultrafialové složky světla, kde dochází pouze k 8% propustnosti ultrafialového záření a 44% propustnosti infračerveného záření [35].

Kapitola 4

Závěr

Využití elektrochromických materiálů má spoustu výhod. Hlavními výhodami jsou ekonomické a ekologické přínosy díky kontrole klimatu a vnitřního osvětlení, ale také světelná pohoda uvnitř obytných prostor. Plochy s kontrolovatelnou průhledností tak mohou být přínosným článkem systémů chytrých domácností a inteligentních budov. Jako největší nevýhodu elektrochromické technologie vnímám, že většina lidí nemá tušení, že existuje, což vede k malému financování vývoje a výrobních technologií a k vyšší ceně finálního výrobku. Cílem mé práce je přispět k obeznámení s elektrochromickými materiály a možnostmi jejich využití v rámci chytré domácnosti. K tomuto účelu slouží její teoretická část.

Dalším cílem práce bylo změření propustnosti PDLC fólie. Za tímto účelem byla provedena dvě měření, první měření se zabývalo intenzitou osvětlení pro různé hladiny průhlednosti fólie. Druhé měření se pak zabývalo měřením útlumu spektra viditelného světla.

Posledním cílem bylo navrhnout a konstruovat napájecí zdroj vhodný pro chytré okno. Zdroj byl nejdříve navržen konceptuálně a poté skutečně realizován. Finálním výsledkem je zdroj, který umožňuje plně využít vlastností elektrochromických materiálů a přináší možnost inteligentního ovládání chytrého okna.

Literatura

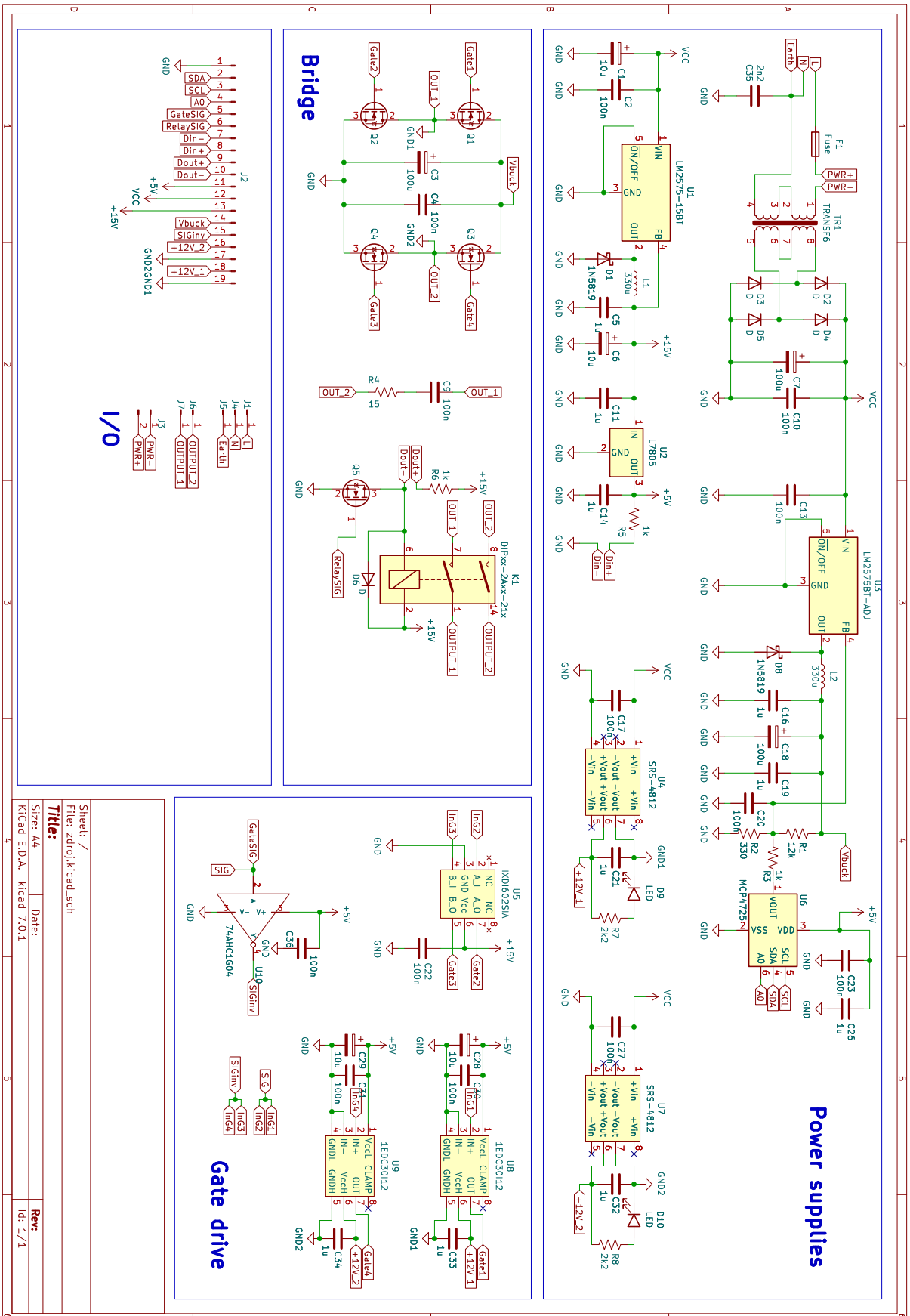
- [1] SHCHEGOLKOV, Aleksei V., E.N. TUGOLUKOV a Alexandr V. SHCHEGOLKOV. Overview of Electrochromic Materials and Devices. 2020, č. 2(18), s. 066-073. ISSN 24144606. Dostupné na DOI 10.17277/amt.2020.02.pp.066-073.
- [2] *Whatnotgems*. [vid. 2023/01/27]. Dostupné na <https://whatnotgems.com/collections/magic-mug>.
- [3] PARK, Sucheol a Jin Who HONG. Polymer dispersed liquid crystal film for variable-transparency glazing. *Thin Solid Films*. 2009, ročník 517, č. 10, s. 3183-3186. ISSN 00406090. Dostupné na DOI 10.1016/j.tsf.2008.11.115.
- [4] GRANQVIST, C.G., M.A. ARVIZU, İ. Bayrak PEHLIVAN, H.-Y. QU, R.-T. WEN a G.A. NIKLASSON. Electrochromic materials and devices for energy efficiency and human comfort in buildings. *Electrochimica Acta*. 2018, ročník 259, s. 1170-1182. ISSN 00134686. Dostupné na DOI 10.1016/j.electacta.2017.11.169.
- [5] MORTIMER, Rodger J., David R. ROSSEINSKY a Paul M. S. MONK. *Electrochromic Materials and Devices*. 1 vyd. New York: Wiley, 2015. ISBN 3527679871. Dostupné na DOI 10.1002/9783527679850.
- [6] BARRIOS, David, Ricardo VERGAZ, Jose M. SANCHEZ-PENA, Claes G. GRANQVIST a Gunnar A. NIKLASSON. Toward a quantitative model for suspended particle devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2013, ročník 111, s. 115-122. ISSN 09270248. Dostupné na DOI 10.1016/j.solmat.2012.12.012.
- [7] WONG, Kaufui V. a Richard CHAN. Smart Glass and Its Potential in Energy Savings. *Journal of Energy Resources Technology*. 2014-03-01, ročník 136, č. 1. ISSN 0195-0738. Dostupné na DOI 10.1115/1.4024768.
- [8] *Ahnoyrak*. [vid. 2023/01/26]. Dostupné na <https://www.ahnoyark.com/news/what-are-the-differences-between-pdlc-spd-and-electrochromatic-film>.
- [9] *Gauzy*. [vid. 2023/01/26]. Dostupné na <https://www.gauzy.com/liquid-crystal-spd-smart-glass-whats-the-difference/> ..
- [10] ACOSTA, Ignacio, Miguel Ángel CAMPANO, Russell LESLIE a Leora RADETSKY. Daylighting design for healthy environments. *Solar Energy*. 2019, ročník 193, s. 584-596. ISSN 0038092X. Dostupné na DOI 10.1016/j.solener.2019.10.004.
- [11] GILLIS, Alexander. *Techtarget*. [vid. 2023/04/19]. Dostupné na <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT>.
- [12] *Amazon web services*. [vid. 2023/04/19]. Dostupné na <https://aws.amazon.com/what-is/iot/>.
- [13] NASIR, Naila, Hyeryeon HONG, Malik Abdul REHMAN, Sunil KUMAR a Yongho SEO. Polymer-dispersed liquid-crystal-based switchable glazing fabricated via vacuum glass coupling. *RSC Advances*. 2020-09-01, ročník 10, č. 53, s. 32225-32231. ISSN 2046-2069. Dostupné na DOI 10.1039/D0RA05911K.
- [14] DIXON, Lloyd. Power Transformer Design. 2001. Dostupné na <https://www.ti.com/lit/ml/slup126/slup126.pdf>.

- [15] *ELUC*. [vid. 2023/05/04]. Dostupné na <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/651>.
- [16] YAZDANI, IRAVANI, AMIRNASER a REZA. *Voltage-Sourced Converters in Power Systems Modeling, Control, and Applications*. Wiley. ISBN 9780470521564.
- [17] *Lastminuteengineers*. [vid. 2023/05/04]. Dostupné na <https://lastminuteengineers.com/the-full-wave-bridge-rectifier/>.
- [18] MACK, Raymond. Basic Switching Circuits. *Power Sources and Supplies*. Elsevier, 2008, s. 13-28. Dostupné na DOI 10.1016/B978-0-7506-8626-6.00002-8.
- [19] *allabouttcircuits*. [vid. 2023/05/04]. Dostupné na <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-dc-dc-converters-in-equilibrium/>.
- [20] *Wikipedia*. [vid. 2023/05/04]. Dostupné na https://en.wikipedia.org/wiki/H-bridge#/media/File:H_bridge_operating.svg.
- [21] GUVEN, Yilmaz, Ercan COSGUN a Harun GEZICI. Understanding the Concept of Microcontroller Based Systems To Choose The Best Hardware For Applications. *International Journal of Engineering And Science*. ISSN 2278-4721. Dostupné na https://www.researchgate.net/publication/322436662_Understanding_the_Concept_of_Microcontroller_Based_Systems_To_Choose_The_Best_Hardware_For_Applications.
- [22] *Raspberrypi*. [vid. 2023/05/06]. Dostupné na <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/>.
- [23] VALDEZ, Jonathan a Jared BECKER. Understanding the I2C Bus. 2015. [vid. 2023/05/06]. Dostupné na <https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>.
- [24] *Wikipedia*. [vid. 2023/05/06]. Dostupné na <https://cs.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>.
- [25] *KiCad*. [vid. 2023/05/12]. Dostupné na <https://www.kicad.org/>.
- [26] *Alldatasheets-LM2575*. [vid. 2023/05/08]. Dostupné na <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/11657/ONSEMI/LM2575T-ADJ.html>.
- [27] *Alldatasheets-MCP4725*. [vid. 2023/05/08]. Dostupné na <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/233449/MICROCHIP/MCP4725.html>.
- [28] *Alldatasheets-SRS4812*. [vid. 2023/05/08]. Dostupné na <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/259471/MEANWELL/SRS-4812.html>.
- [29] *Alldatasheets-L7805*. [vid. 2023/05/08]. Dostupné na <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22615/STMICROELECTRONICS/L7805.html>.
- [30] *Alldatasheets-1EDC30I12MH*. [vid. 2023/05/08]. Dostupné na <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1042899/INFINEON/1EDC30I12MH.html>.
- [31] *Alldatasheets-IXDI602SIA*. [vid. 2023/05/08]. Dostupné na <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/454868/CLARE/IXDI602SIA.html>.
- [32] *Micropython*. [vid. 2023/05/12]. Dostupné na <https://micropython.org/>.
- [33] *Flask*. [vid. 2023/05/12]. Dostupné na <https://flask.palletsprojects.com/en/2.3.x/>.
- [34] *MQTT*. [vid. 2023/05/12]. Dostupné na <https://mqtt.org/>.

- [35] HEMAIDA, Abdulmohsin, Aritra GHOSH, Senthilarasu SUNDARAM a Tapas K. MALLICK. Evaluation of thermal performance for a smart switchable adaptive polymer dispersed liquid crystal (PDLC) glazing. *Solar Energy*. 2020, ročník 195, s. 185-193. ISSN 0038092X. Dostupné na DOI [10.1016/j.solener.2019.11.024](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.024).



Příloha A
Schéma navrženého zdroje.



Sheet: /	
File: zdroj.kicad.sch	
Title:	
Size: A4	Date:
Kicad E.D.A. kicad 7.0.1	
	Rev:
	Id: 1/1

