

Řízení průhlednosti elektrochromických fólií a jejich aplikace

Bc. Lukáš Bortel

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Bortel**
Osobní číslo: **A17251**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Řízení průhlednosti elektrochromických fólií a jejich aplikace**
Téma anglicky: **Controlling the Transparency of Electrochromic Films and their Applications**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Zpracujte přehled aplikací elektrochromických fólií se zaměřením na průmysl komerční bezpečnosti.
3. Ověřte možnost řízení průhlednosti elektrochromických fólií pomocí mikropočítače.
4. Provedte návrh a realizaci ukázkové aplikace použití těchto fólií.
5. Vytvořte programové vybavení při řídicí mikropočítač demonstrující možnosti řízení průhlednosti těchto fólií.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **BANZI, Massimo. Getting started with Arduino. 2nd ed. Farnham: O'Reilly, 2011. ISBN 9781449309879**
2. **CATSOULIS, John. Designing embedded hardware. 2nd ed. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2005, xvi, 377 p. ISBN 0596007558.**
3. **ELLAHI, M. a M. Y. RAFIQUE. Electro-optical properties of PDLC films using diethylenetriamine (DETA) hardener. DOI: 10.1080/15421406.2016.1222037. ISBN 1542-1406. Dostupné také z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15421406.2016.1222037>**
4. **MARGOLIS, Michael. Arduino cookbook. 2nd ed. Sebastopol, Calif.: O'Reilly, 2012, xx, 699 p. ISBN 1449313876**
5. **PINKER, Jiří. Mikroprocesory a mikropočítače. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2004, 159 s. ISBN 80-7300-110-1.**
6. **LIBRETTO, John. ELECTROCHROMIC GLASS CONTROL DEVICE. 2005. USA. US 7,375,871 B2. Uděleno 20.5.2008. Zapsáno 27.10.2005.**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Dolinay, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

30. listopadu 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2019

Ve Zlíně dne 14. prosince 2018

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 21.5. 2019

LUKÁŠ BORTEL, v. r.
.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je přinést ucelený přehled o technologii dynamicky stmívatelných fólií, jejichž průhlednost je elektricky řízena. Teoretická část se zabývá aspekty spojenými s technickým pozadím vývoje a konstrukce chytrých fólií, jejich rozdělením a možnostmi jejich aplikace v průmyslu komerční bezpečnosti i dalších oblastech lidské činnosti. Praktická část řeší návrh a realizaci zařízení sloužícího k plynulé regulaci transparentnosti fólie pomocí metody přímé modulace síťového napětí řízené mikropočítačem. Součástí řešení je rovněž funkční model demonstrující aplikaci fólie na stávajícím systému zasklení v podmínkách reálného prostředí.

Klíčová slova: Elektrochromická fólie, PDLC film, řízení průhlednosti, mikropočítač

ABSTRACT

The aim of this thesis is to bring a comprehensive overview of the technology of dynamic switchable films, whose transparency is electrically controlled. The theory section deals with aspects connected with technical background of development and construction of smart films, their classification and possibilities of their application in commercial security industry and other areas of human activity. The practical section solves the design and implementation of the device used for continuous regulation of the transparency of the film by the method of direct line voltage modulation controlled by the microcontroller. The solution includes a functional model demonstrating the application of the film to an existing glazing system in real-world conditions.

Keywords: Electrochromic foil, PDLC film, transparency controll, microcontroller

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě vyjádřil upřímné poděkování vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Dolinayovi, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a pozitivní přístup. Dále patří poděkování Ing. Martinu Pospíšilíkovi, Ph.D. za užitečnou konzultaci při řešení problémů. V neposlední řadě děkuji celé své rodině a nejbližším přátelům za skvělou podporu, zázemí a projevenou důvěru.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

„Správný úsudek vychází ze zkušenosti, zkušenost vychází z nesprávného úsudku.“

– Murphyho zákony

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TEORETICKÁ VÝCHODISKA A PRINCIP ČINNOSTI ELEKTROCHROMICKÝCH FÓLIÍ	11
1.1 HISTORIE VYUŽITÍ TECHNOLOGIE TEKUTÝCH KRYSTALŮ.....	11
1.2 ROZDĚLENÍ TEKUTÝCH KRYSTALŮ	12
1.2.1 Kalamitické tekuté krystaly.....	14
1.2.2 Diskotické tekuté krystaly.....	16
1.2.3 Lomené tekuté krystaly	17
1.3 VÝVOJOVÉ ETAPY CHYTRÝCH FÓLIÍ	18
1.3.1 První generace – technologie NCAP.....	18
1.3.2 Druhá generace – technologie PDLC.....	19
1.3.3 Třetí generace – technologie NPD-LCD.....	20
1.4 SROVNÁNÍ ELEKTRICKO-OPTICKÝCH VLASTNOSTÍ JEDNOTLIVÝCH GENERACÍ	20
1.5 SHRNUÍ I. KAPITOLY	21
2 DRUHY CHYTRÝCH FÓLIÍ	22
2.1 PASIVNÍ SYSTÉMY	22
2.1.1 Fotochromické fólie	23
2.1.2 Termochromické fólie	23
2.2 AKTIVNÍ SYSTÉMY.....	24
2.2.1 Elektrochromická skla.....	24
2.2.2 Technologie PDLC.....	27
2.2.3 Technologie SPD	29
2.3 SHRNUÍ II. KAPITOLY.....	30
3 PŘEHLED APLIKACÍ ELEKTROCHROMICKÝCH FÓLIÍ	31
3.1 APLIKACE CHYTRÝCH FÓLIÍ V PRŮMYSLU KOMERČNÍ BEZPEČNOSTI.....	31
3.1.1 Finanční instituce	31
3.1.2 Výrobní provozy	32
3.1.3 Architektura a veřejný prostor	32
3.1.4 Doprava	33
3.2 APLIKACE CHYTRÝCH FÓLIÍ V OSTATNÍCH KOMERČNÍCH OBLASTECH.....	33
3.2.1 Zdravotnictví	34
3.2.2 Ostatní oblasti.....	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	35
4 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ PRŮHLEDNOSTI CHYTRÝCH FÓLIÍ	36
4.1 EXPERIMENT	36
4.1.1 Použité přístroje a pomůcky.....	36
4.1.2 Technické parametry testovaného vzorku.....	37
4.1.3 Průběh a výsledky experimentu	38
4.2 ZPŮSOBY ŘÍZENÍ STŘÍDAVÉHO NAPĚTÍ.....	38
4.2.1 Fázově řízené regulátory	39
4.2.2 Regulátory střídavého zadržování pŮlvlň.....	39

4.2.3	PWM regulátory	40
4.3	OVLÁDACÍ PRVKY A TECHNOLOGIE	41
4.3.1	Ovládací prvky	41
4.3.2	Technologie ovládání	41
5	HARDWARE REGULÁTORU PRŮHLEDNOSTI	42
5.1	VÝKONOVÁ ČÁST OBVODU	43
5.2	ŘÍDICÍ ČÁST OBVODU	44
5.3	ELEKTRICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ	46
5.4	POMOCNÉ NAPÁJECÍ ZDROJE.....	47
5.5	POUŽITÉ KOMPONENTY	48
5.5.1	Mikrokontroler Atmel ATmega328P	48
5.5.2	Seznam použitých součástek.....	49
6	SOFTWARE REGULÁTORU PRŮHLEDNOSTI	50
6.1	VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ	50
6.2	PULSNĚ ŠÍŘKOVÁ MODULACE.....	51
6.3	HLAVNÍ SMYČKA ŘÍDICÍHO ALGORITMU	51
7	TESTOVÁNÍ PROTOTYPU A OŽIVENÍ ZAŘÍZENÍ	52
7.1	TESTOVÁNÍ PROTOTYPU	52
7.2	OŽIVENÍ ZAŘÍZENÍ	53
8	MĚŘENÍ SVĚTELNÉ PROPUSTNOSTI PDLC FÓLIE.....	56
8.1	PŘÍPRAVA EXPERIMENTU.....	56
8.2	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A POMŮCKY.....	56
8.3	PRŮBĚH MĚŘENÍ	57
8.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	58
9	DEMONSTRACE VYUŽITÍ CHYTRÝCH FÓLIÍ V PRAXI.....	60
	ZÁVĚR	62
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	66
	SEZNAM OBRÁZKŮ	67
	SEZNAM TABULEK.....	69
	SEZNAM PŘÍLOH.....	70

ÚVOD

V moderním pojetí slova bezpečnost se stále výrazněji projevují tendence ochrany soukromí, a to nejen v oblasti fyzické ochrany jednotlivců – soukromých osob, ale promítají se rovněž do komerční oblasti, průmyslu a ostatních odvětví lidské činnosti. Naproti tomu však stojí současné trendy zjednodušování stavebních konstrukcí, kdy se často setkáváme s otevřenými prostory, působícími příjemným a přehledným dojmem s velkým množstvím přírodního světla. Ruku v ruce s tímto trendem jdou nejen budovy (ať už jde o rodinné domy, nebytové prostory, nákupní centra či letištní haly), ale také dopravní prostředky všeho druhu.

Kolize výše popsaných trendů spočívá ve střetu funkční a designové podstaty stavebních a technologických konstrukcí. Ačkoli otevřený prostor působí přehledným dojmem, v řadě bezpečnostních situací může naopak znamenat problémy. Typickým příkladem může být sdělování osobních či citlivých údajů jiné osobě, vklad nebo výběr finanční hotovosti na bankovní pobočce či z bankomatu, provádění specifického pracovního úkonu podléhajícího výrobnímu tajemství aj. Zvláštním případem mohou být také veřejně známé a mediálně atraktivní osobnosti, budící všeobecný zájem ze strany široké veřejnosti.

Nyní se nabízí otázka – existuje přijatelně flexibilní řešení, zachovávající výhody všeobecně přehledného vnitřního prostředí, avšak s odpovídající úrovní soukromí a zabezpečení? Odpověď na otázku přináší technologie elektrochromických fólií, jejichž průhlednost lze ovládat a měnit podle konkrétní situace na základě lidského podnětu či automaticky.

Ve výchozím stavu je fólie neprůhledná a připomíná mléčné sklo, přičemž však stále propouští velké množství světla a je tudíž průsvitná. Po přivedení elektrického napětí fólie přechází do stavu plné průhlednosti, je tudíž čirá, zároveň však blokuje velké množství dopadajícího ultrafialového světla. Fólie mohou být instalovány dodatečně nebo může být jejich implementace přímo součástí výrobního procesu skleněných otvorových výplní.

Existuje více druhů elektrochromických fólií, lišící se fyzikálním principem i technologií výroby, jakož i způsobem řízení jejich průhlednosti. Za společný jmenovatel lze považovat zejména účel použití a nezaměnitelný estetický faktor, podtrhující moderní a futuristický design budov a dopravních prostředků.

Smyslem této práce je přinést obecný přehled o technologiích v oblasti elektrochromických fólií a zkonstruovat funkční ukázkový model – demonstrující využití fólie v praxi. Klíčovou součástí je elektronický regulátor, umožňující řídit průhlednost fólie pomocí mikropočítače.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORETICKÁ VÝCHODISKA A PRINCIP ČINNOSTI ELEKTROCHROMICKÝCH FÓLIÍ

Chytré sklo, tak zní doslovný překlad anglického pojmu *smart glass*, označující souhrnně technologie, umožňující na základě externích stimulů měnit parametry běžného skla. Ačkoli existuje široká škála alternativních pojmenování, která mohou často lépe vystihovat konkrétní produkt či technologii, obecně lze považovat za vhodná česká synonyma dynamické, stmívatelné či zatmavovací sklo. Podnětem jejich vzniku bylo objevení tekutých krystalů.

1.1 Historie využití technologie tekutých krystalů

První studie tekutých krystalů započala již v roce 1888, a to objevem rakouského botanika Friedricha Reinitzera, který se v té době zabýval rolí cholesterolu v tělech rostlin. V rámci svého výzkumu syntetizoval množství derivátů cholesterolu a během experimentu s látkou známou jako cholesteryl benzoát zjistil, že tato látka nemá pouze jednu teplotu tání, nýbrž dvě. Potvrdil to pokus, při kterém látka při dosažení teploty 145,5 °C nejdříve vytvořila sloučením krystalů neprůhlednou, kalnou tekutinu, a poté při dosažení 178,5 °C změnila svoji podobu v čirou, průhlednou tekutinu. Pozoruhodný efekt však dosažením plné transparentnosti neskončil, naopak při následném chladnutí vzorek postupně prošel tmavě modro-fialovým přechodem, který po sobě zanechal opět kalnou, neprůhlednou tekutinu. Před úplným vychladnutím a ztuhnutím vzorek ještě několikrát změnil svoji barvu. Reinitzer nedokázal vysvětlit, jak může jedna sloučenina mít dva body teploty tání a ani nedokázal určit, zda jsou barevné změny látky výsledkem fyzikálních či chemických změn. Do té doby bylo známo, že čisté sloučeniny by měly vykazovat výhradně jednu konkrétní teplotu tání. [1]

Reinitzer se obrátil na německého fyzika a chemika Otto Lehmana s žádostí o pomoc s vysvětlením onoho zvláštního jevu. Lehmann využil pro zkoumání Reinitzerovy sloučeniny svůj objev polarizačního mikroskopu. Ke svému údivu zjistil, že kalná tekutina, vznikající během přechodu mezi krystalickou a tekutou fází sloučeniny, má při pozorování v křížovém polarizovaném světle světlý barevný nádech. Lehmann věděl, co to znamená – kalná tekutina byla tzv. berifrigentní¹, což je vlastnost typicky spjatá s krystalickými látkami. [1]

¹ Berifrigence neboli dvojlomnost je optická vlastnost látek, jejichž index lomu závisí na polarizaci a směru šíření světla. [1]

Zároveň však látka měla schopnost proudit, což je naopak typická vlastnost kapalin. Kombinace výše popsaného krystalicko-kapalného chování sloučeniny vedla Lehmana k prohlášení, že krystaly se mohou vyskytovat s jemností tak vysokou, že je možné prohlásit je téměř za tekutinu. Odtud plyne konvenční pojmenování – tekuté krystaly z původního německého originálu *fliessende Kristalle* (anglicky *liquid crystals*), které se používá již více než sto let, ačkoli interpretace molekulárního významu jejich chování se již poněkud změnila. [1]

1.2 Rozdělení tekutých krystalů

Kapalně krystalický stav tzv. mezofáze nastává u tekutých krystalů v důsledku přechodu mezi izotropní (stejnorodou) kapalnou fází a anizotropní (nestejnorodou) pevnou fází. Účel spočívá v získání látky, která je schopna v kapalném stavu vykazovat pravidelné molekulární uspořádání charakteristické pro krystal. Fázové přeměny probíhají určitou rychlostí, tudíž vhodnou změnou parametrů během procesu přeměny (např. ochlazením nebo změnou koncentrace roztoku) lze zajistit přechod do pevné fáze se zachováním kapalně krystalického stavu. [2]

Tvorba kapalně krystalického stavu (tzv. fází) v organických molekulách je projevem spontánního uspořádávání (samoskladby) indukované tvarem těchto molekul. Organické sloučeniny, které jsou schopny vytvářet mezofáze, se označují jako mezogeny. [3]

Klíčovou vlastností tekutých krystalů je schopnost uspořádaných molekul reagovat na vnější stimuly, a právě touto změnou vnitřního uspořádání ovlivňovat propustnost světla. Význam těchto vlastností otevřel cestu širokému spektru aplikací a využitelnosti v mnoha oblastech.

Na základě výše uvedených procesů lze kategorizovat tekuté krystaly z hlediska vzniku do dvou hlavních skupin:

1. Termotropní – mezofáze vzniká v závislosti na změně teploty (ve většině případů se jedná o organické látky, jejichž množství se odhaduje až na 70 tisíc). [4]

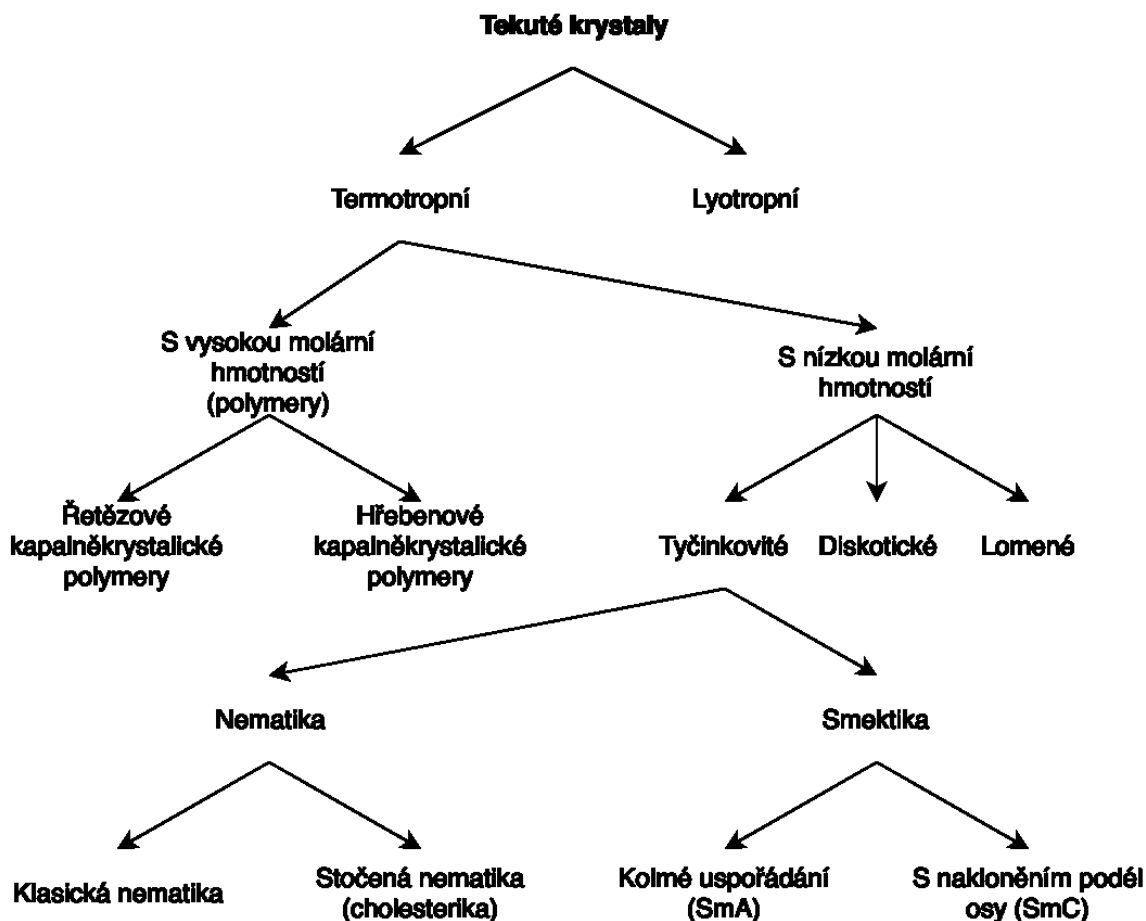
Vznik mezofází v termotropních tekutých krystalech je závislý na teplotě, přičemž stabilita mezofází se pohybuje v určitém teplotním intervalu. [3]

2. Lyotropní – mezofáze je docíleno pomocí rozpouštědel např. na bázi vody, v nichž jsou rozpuštěny krystalické molekuly. [4]

„Lyotropní kapalné krystaly se skládají z amfifilních molekul rozpuštěných ve vhodném rozpouštědle (obvykle ve vodě) a tvorba mezofází je řízena koncentrací.“ [3]

Podrobněji lze tekuté krystaly dělit na základě molární hmotnosti – na látky s vyšší a nižší molární hmotností a dále pak z hlediska tvaru molekul.

Základní rozdělení tekutých krystalů je znázorněno na následujícím obrázku níže.



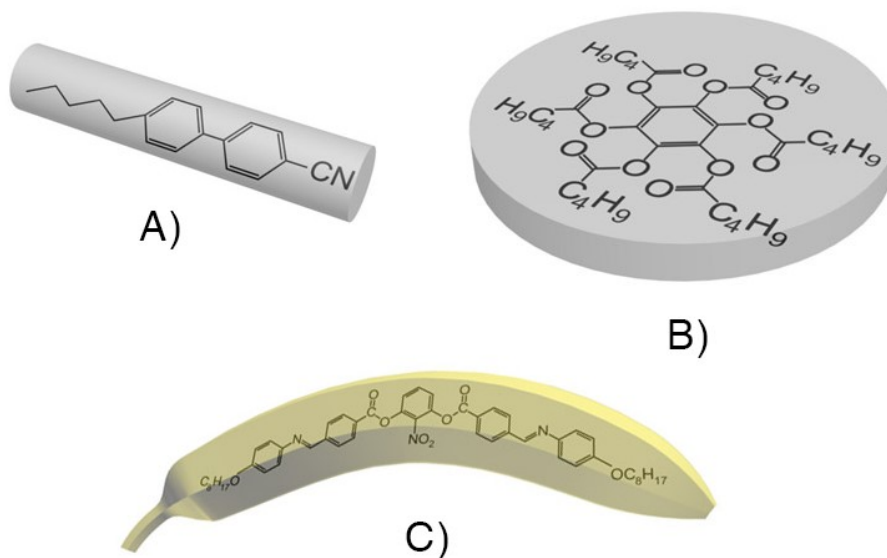
Obr. 1 - Rozdělení tekutých krystalů [vlastní]

Z hlediska tvaru molekul, formující dále jednotlivé vrstvy, rozlišujeme tři základní podskupiny termotropních tekutých krystalů:

1. Kalamitické – tyčinkovité (*rod-like*),
2. diskotické – diskovité (*disc-like*),
3. lomené – banánovité (*bent-shaped*).

Z pohledu historie byly nejdříve objeveny tyčinkovité molekuly, později diskovité a nakonec tzv. lomené kapalné krystaly, přezdívané banánovité. [3]

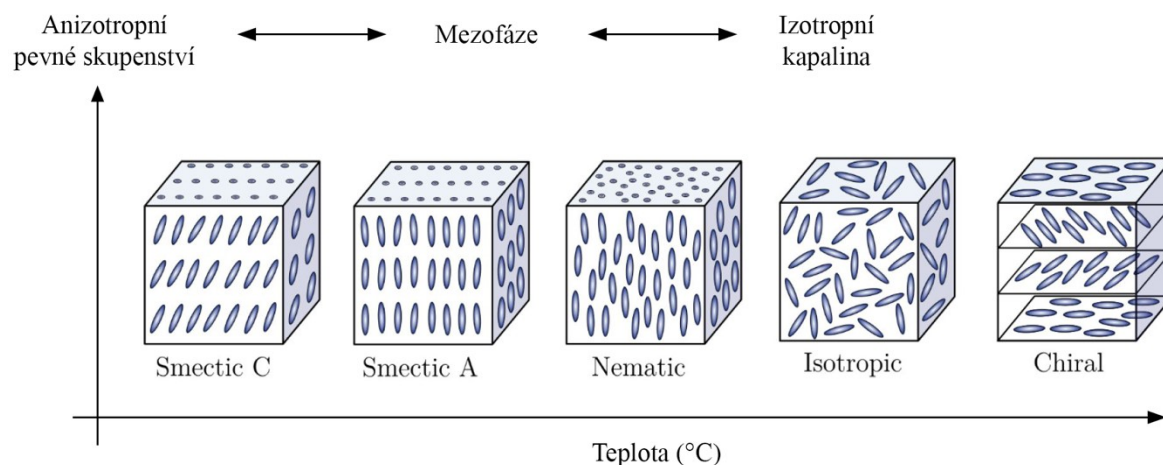
Přehled struktur jednotlivých druhů termotropních krystalů je znázorněn na obrázku níže.



Obr. 2 – A) tyčinkovité, B) diskotické, C) lomené tekuté krystalů [5]

1.2.1 Kalamitické tekuté krystalů

Kalamitické tekuté krystalů prochází při procesu zvyšování / snižování teploty běžně dvěma fázemi – nematickou a smectickou. Přechod mezi fázemi je funkcí teploty a lze jej chápat jako jev postupného tání krystalu. Z praktického hlediska je však vhodnější na proces tvorby mezofází nahlížet z opačného pohledu. Nejdříve se materiál zahřeje na teplotu těsně pod bod varu, čímž vzniká neuspořádaný stav (izotropní kapalina) a následným chladnutím vznikají různé kapalně-krystalické stavy, což vede ke zvyšování uspořádanosti molekul až do vytvoření rigidní krystalické mřížky. Proces je znázorněn na obrázku níže. [3]



Obr. 3 – Schematické znázornění rozvolňování krystalické mřížky [6]

Krystalický stav

Jedná se o výchozí stav, kdy jsou molekuly pevně svázány v krystalické mřížce v důsledku působení silných přitažlivých sil. Těžiště molekul jsou umístěna v pevných polohách, což zabraňuje naklánění os molekul, které tudíž mohou pouze kmitat kolem rovnovážné polohy, ale je vyloučeno jejich naklánění nebo otáčení. V důsledku doutníkového tvaru jsou molekuly také anizotropní. [7]

Tekuté krystaly ve smektické fázi

Smektická fáze má nejbližší k pevnému anizotropnímu skupenství. Molekuly bývají organizované ve vrstvách a jejich osy (direktory) jsou vzájemně rovnoběžné. Existuje několik druhů smektické fáze, nejznámější jsou fáze SmA a SmC, které nesou označení na základě chronologického pořadí, v jakém byly objeveny. Smektická fáze A (SmA) je charakteristická paralelní orientací os molekul ve směru kolmém na rovinu vrstvy, zatímco fáze C (SmC) má sice osy orientovány paralelně, jsou však odkloněny od normály vrstvy o určitý úhel. Odklon je závislý na teplotě, situace je znázorněna na obrázku (Obr. 3). [3][7]

Tekuté krystaly v nematické fázi

Uspořádání molekul v nematické fázi je tzv. orientační. Při ztrátě orientačního uspořádání vznikne izotropní kapalina. Molekuly tekutých krystalů jsou navzájem zcela neuspořádané, ovšem jejich direktory (osy) jsou natočeny jedním preferovaným směrem. Kvůli blízkosti k izotropnímu stavu vykazují tekuté krystaly v nematické fázi vysokou fluiditu (tekutost). Jejich povaha je však stále anisotropická, což způsobuje schopnost reagovat na přítomnost elektrického pole. Tyto vlastnosti předurčily využití tekutých krystalů v nematické fázi pro konstrukci zobrazovacích LCD displejů a elektrochromických folií první generace. [7]

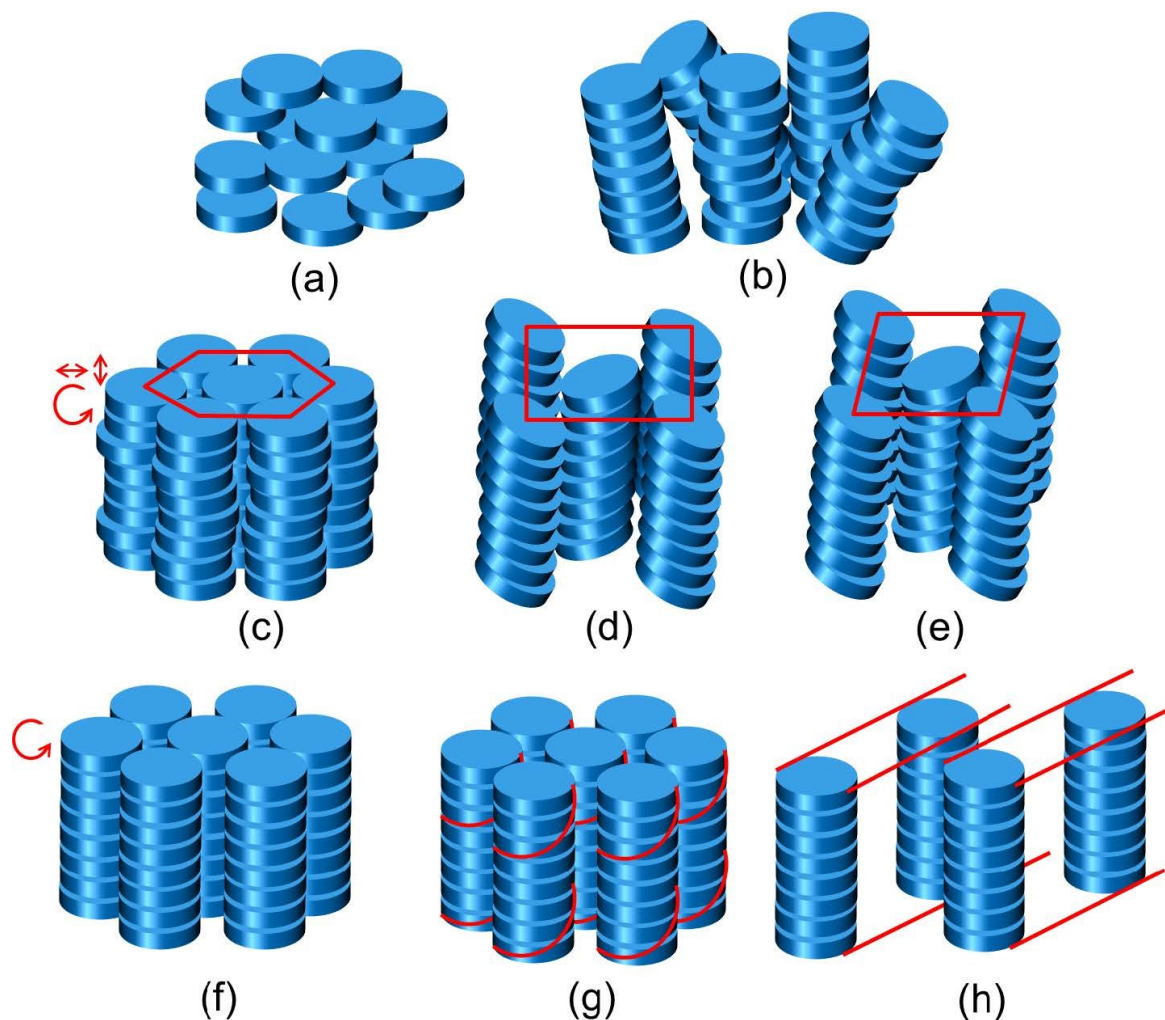
Tekuté krystaly v chirální fázi

Chirální fáze je velmi příbuzná nematické fázi. Skládá se z kvazi-nematických vrstev, jejichž direktor se mění v rámci jednotlivých vrstev vždy o fixní hodnotu. Vrstvy otočené o úhel 2π jsou ekvivalentní. Dříve byla chirální fáze označována jako cholesterická – podle cholesteryl benzoátu, na kterém byl kapalně krystalický stav objeven. Chirální (cholesterickou) fázi lze získat z nematické fáze příměsí opticky aktivních látek, čímž dojde ke stočení nematických rovinných textur. Vhodnými látkami jsou zejména estery cholesterolu. Uplatnění chirální fáze se potvrdilo s příchodem zobrazovacích panelů TN (Twisted-Nematic) LCD. [3][7]

1.2.2 Diskotické tekuté krystaly

V případě diskotických tekutých krystalů hovoříme o mezogenech složených z molekul ve tvaru disku – jedna molekulární osa je výrazně kratší oproti zbývajícím dvěma osám. Krystalické uspořádání zaniká pouze v jednom směru (tj. systém je fluidní v jedné dimenzi), což umožňuje vytváření aperiodických svazků s tendencí spontánního uspořádávání do sloupců. Jednotlivé sloupce poté vytvářejí dvourozměrnou mřížku a výsledná fáze se označuje jako kolumnární. Tato fáze se vyskytuje hned v několika formách, např. kolumnární nematická, hexagonální, obdélníková, kosodélníková, plastická, spirálovitá či lamelární fáze. [3][8]

Praktické uplatnění nachází diskotické tekuté krystaly ve fotovoltaických zařízeních, OLED technologiích (organické diody), zobrazovacích zařízeních i systémech chytrého zasklení.

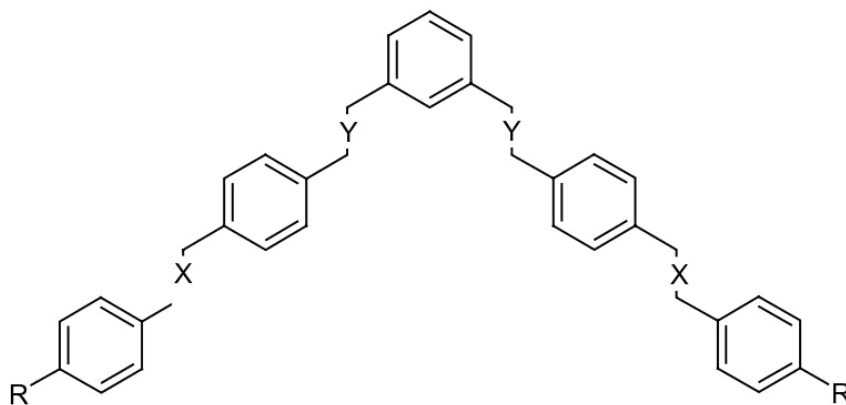


Obr. 4 – Schematické znázornění odlišných typů kolumnární fáze (a) nematická diskotická; (b) kol. nematická, (c) kol. hexagonální; (d) kol. obdélníková, (e) kol. šikmá; (f) kol. plastická; (g) kol. spirálovitá (helical); (h) kol. lamelární [8]

1.2.3 Lomené tekuté krystaly

Do poloviny devadesátých let 20. století nebyla z hlediska výzkumu věnována lomeným tekutým krystalům vyšší pozornost kvůli jejich zahnutému tvaru. Ten byl z počátku považován za nevhodný, později se však ukázalo, že právě onen banánovitý tvar by mohl vytvářet polární fáze vykazující (anti)ferroelektricitu, a to i bez přítomnosti chirálních materiálů. Navzdory obtížnosti procesu syntézy opticky čistých chirálních materiálů byl odhalen vysoký potenciál lomených krystalů v optoelektronických aplikacích. Přirozeně se dostavil také zájem o intenzivnější výzkum v této oblasti. [3]

K dosažení mezomorfního chování je klíčové, aby molekulární struktura těchto látek obsahovala alespoň 5 aromatických kruhů, jak je znázorněno na obrázku níže (Obr. 5). [3]



Obr. 5 – Obecná struktura lomených tekutých krystalů [3]

Podobně jako u kalamitických tekutých krystalů je rovněž pro geometrii lomených tekutých krystalů důležité rigidní jádro, které je zodpovědné za jejich zahnutý tvar. Nematická fáze je u lomených tekutých krystalů výjimečná, běžně se však vyskytují smektické fáze, které jsou však odlišného typu oproti kalamitickým tekutým krystalům. Nejvýznamnější pro aplikace v optoelektronice jsou tzv. B_x fáze (index značí pořadí objevení fáze). [3]

Molekuly lomených tekutých krystalů jsou individuálně symetrické, a proto jsou samostatně achirální. Experimenty však dokázaly, že uspořádáním do vrstev a za pomoci spontánního rozbití molekulární symetrie se chiralita může objevit. Tato fáze dostala označení B_2 a jedná se o tzv. dvoudimenzionální tekutinu. Molekuly získávají uniformní sklon (*tilt*) vzhledem k polarizaci vrstvy, která je dána dvojitou osou symetrie. Kvůli tiltu a přítomnosti polárních molekul s nenulovým dipólovým momentem neexistuje žádný symetrický odraz mezi vrstvami, a tyto jsou tudíž chirální. [9]

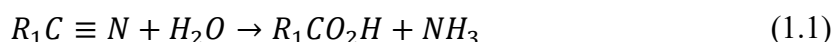
1.3 Vývojové etapy chytrých fólií

V průmyslu se běžně sdružují vývojové etapy daného produktu či komodity na základě nezávisle patentovaných technologií, čímž vznikají tzv. generace výrobku. Výzkum v oblasti stmívatelných fólií prozatím prošel třemi milníky, reprezentující následující generace.

1.3.1 První generace – technologie NCAP

První generace chytrých fólií využívá k rozptylu částic tekutých krystalů polyvinylalkohol, což je ve vodě rozpustný syntetický polymer. Tato technologie se nazývá emulzní, nebo také technologie zakřivené nematické fáze – NCAP (*Nematic Curvilinear Aligned Phase*). Na technologii se vztahoval v současnosti již expirovaný US Patent 4435047. [10]

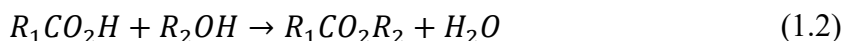
Hlavním úskalím je přítomnost stopového množství vody v použitém polymeru. Může zde dojít k hydrolytické reakci tekutých krystalů s vodou, kdy reakcí molekul dochází ke vzniku karboxylové kyseliny:



Kde $R_1C \equiv N$ reprezentuje molekulu tekutého krystalu a R_1CO_2H je vedlejší produkt, tzv. karboxylová kyselina. [11]

Hydrolyza nitrilové skupiny ($C \equiv N$) je velmi typická reakce, která se často vyskytuje i za normálních podmínek, zejména při zvýšené teplotě.

Naopak při esterifikaci, kde karboxylová kyselina reaguje s hydroxylovou (alkoholovou) skupinou v polyvinylalkoholu, dochází ke vzniku esterového derivátu $R_1CO_2R_2$ a vody:



Kde R_2OH reprezentuje alkoholovou skupinu v polyvinylalkoholu a $R_1CO_2R_2$ vzniklý ester.

Z obou výše uvedených rovnic je patrné, že molekula vody je buď využita při hydrolyze nitrilové skupiny (1.1) nebo naopak vzniká v důsledku esterifikace společně s derivátem esteru (1.2). Nutné je však poznamenat, že ve skutečnosti se voda nevyužívá ani nevyrábí, působí pouze jako katalyzátor. To znamená, že pokud v systému existuje stopové množství vody, bude podporován rozklad celého tekutého krystalu až do úplného zničení. [11]

1.3.2 Druhá generace – technologie PDLC

V případě druhé generace je použit k rozptylu částic tekutých krystalů epoxid. Doslovný anglický název – *Polymer Dispersed Liquid Crystal* je možné interpretovat jako technologii tekutých krystalů rozptýlených v polymeru. Charakteristickou vlastností je matrice kapiček tekutých krystalů rozptýlených v uniformním polymeru, získaném pomocí fázové separace. Druhá generace přinesla některé výhody, ovšem žádný významnější rozdíl se zde nenachází. Stejně jako u první generace musí být film uzavřen mezi skly kvůli zabránění absorpce vlhkosti z okolního prostředí. Stálou nevýhodou zůstává navíc nízký rozsah pracovních teplot (0 až +50 °C). Požadavky pro použití v exteriéru přitom uvažují standardní teplotní rozpětí -30 až +80 °C. [10][11]

Významnou nevýhodou systému PDLC je nutnost shody indexů lomu tekutých krystalů a použitého polymeru k dosažení požadovaných optických vlastností na úkor chemických vlastností systému. Jinými slovy zde dochází ke konfliktu mezi optickými a chemickými požadavky, jelikož chemicky požadovaný poměr 1:1 nebo 1:2 mezi reaktanty zapříčiní neschopnost dosáhnout přesnosti potřebné pro splnění optických požadavků. [11]

Pro splnění optických požadavků musí být systém po chemické stránce přizpůsoben, což znamená vyvedení z optimálního stavu. Výrobci jsou nuceni kompenzovat nepřesný poměr reaktantů pomocnými reaktanty, jako jsou epoxid či tužidlo, které však v systému zůstanou. Následkem této úpravy je přítomnost nežádoucích reaktantů, které zanechávají aktivní funkční skupiny ve fázi tekutých krystalů a působí zde jako nečistoty. [11]

Tyto polární funkční skupiny významně ovlivňují čistotu tekutých krystalů, což se projeví zejména úzkým rozsahem pracovních teplot. Tato situace má destruktivnější účinek než voda v systému NCAP, protože funkční skupiny jako kyselé (-CO₂H), aminové (-NH₂), sulfhydrylové (-SH) nebo epoxidové skupiny (-CHOCH₂) jsou mnohem více reaktivnější na kyanoskupinu (-C≡N) v molekule tekutých krystalů a v elektrochemických reakcích. [11]

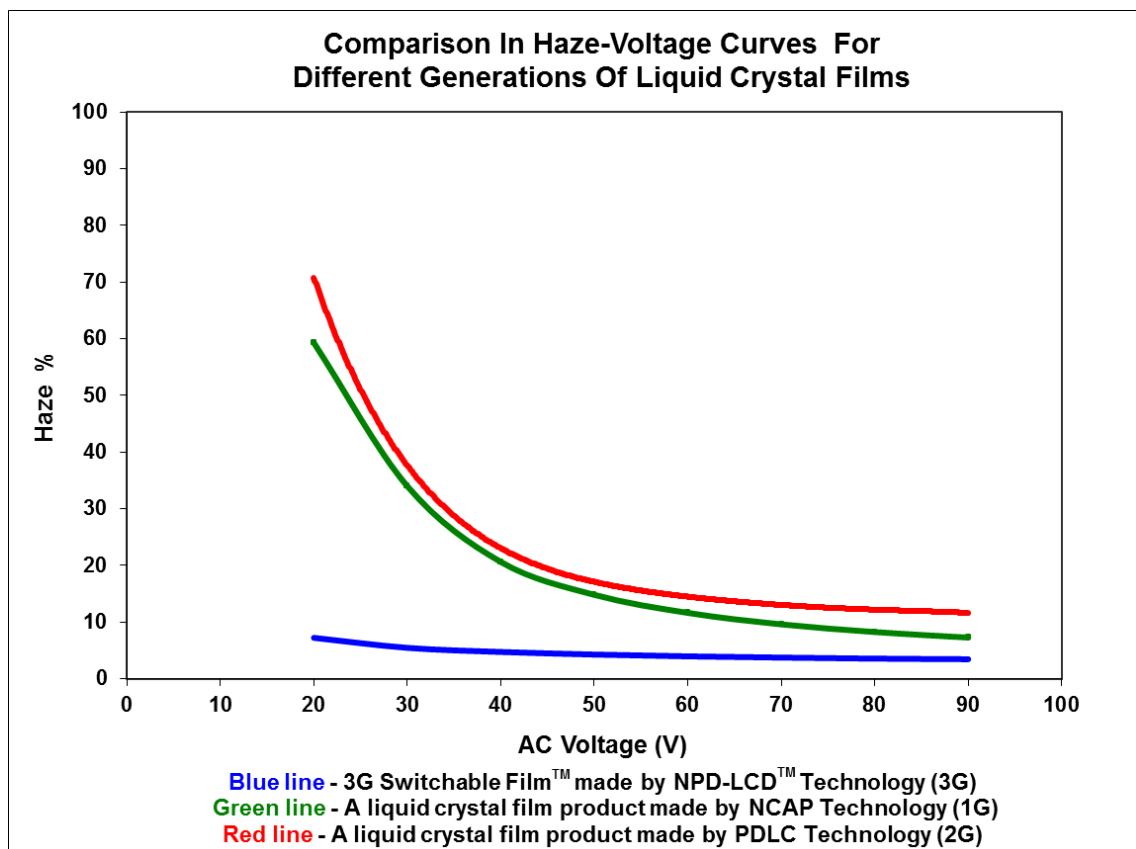
Elektrochemické reakce se mohou vyskytnout u polárních molekul. Tyto molekuly jsou nejdříve ionizovány skrze redoxní (oxidačně-redukční) reakci na elektrodách. Ionizované molekuly mohou vyvolat změnu molekul tekutých krystalů, které jsou náchylné k napadení iontovými „nečistotami“. S rostoucím množstvím nečistot roste elektrický proud; s rostoucím napětím roste rychlost redoxní reakce. Výsledkem je nižší životnost a úzký rozsah pracovních teplot společně s relativně vysokým potřebným ovládacím napětím. [11]

1.3.3 Třetí generace – technologie NPD-LCD

Třetí generace je charakteristická použitím nelineárního tuhého polymeru, získaného pomocí fázové separace. Nelinearita polymeru spočívá v postupně se měnící polymerní fázi s cibulovitou strukturou a vyžaduje pouze přizpůsobení indexu lomu mezi tekutými krystaly a vnitřní vrstvou polymerní fáze. Není však již nutné přizpůsobení celkové polymerní fázi. Tudíž zde neexistuje rozpor mezi chemickými požadavky na vytvrzování a požadavky na shodu indexů lomu mezi tekutými krystaly a hlavním polymerním tělesem. Technologie NPD-LCD (*Non-Linear Polymer Dispersed Liquid Crystal Display*) přináší vyšší stupeň polymerace, což má za následek vysokou čistotu tekutých krystalů, která se projeví také širším rozsahem pracovních teplot a zlepšením dalších elektro optických vlastností. Příkladem je lepší průhlednost, nižší provozní napětí a možnost instalace v exteriéru. S výhodami přicházejí přirozeně také požadavky na voděodolnost či zlepšení odolnosti vůči UV záření.[10][11]

V důsledku využití tekutých krystalů u všech výše popsaných generací stmívatelných fólií byl přijat souhrnný název *Liquid Crystal Microdroplet Display* (LCMD).

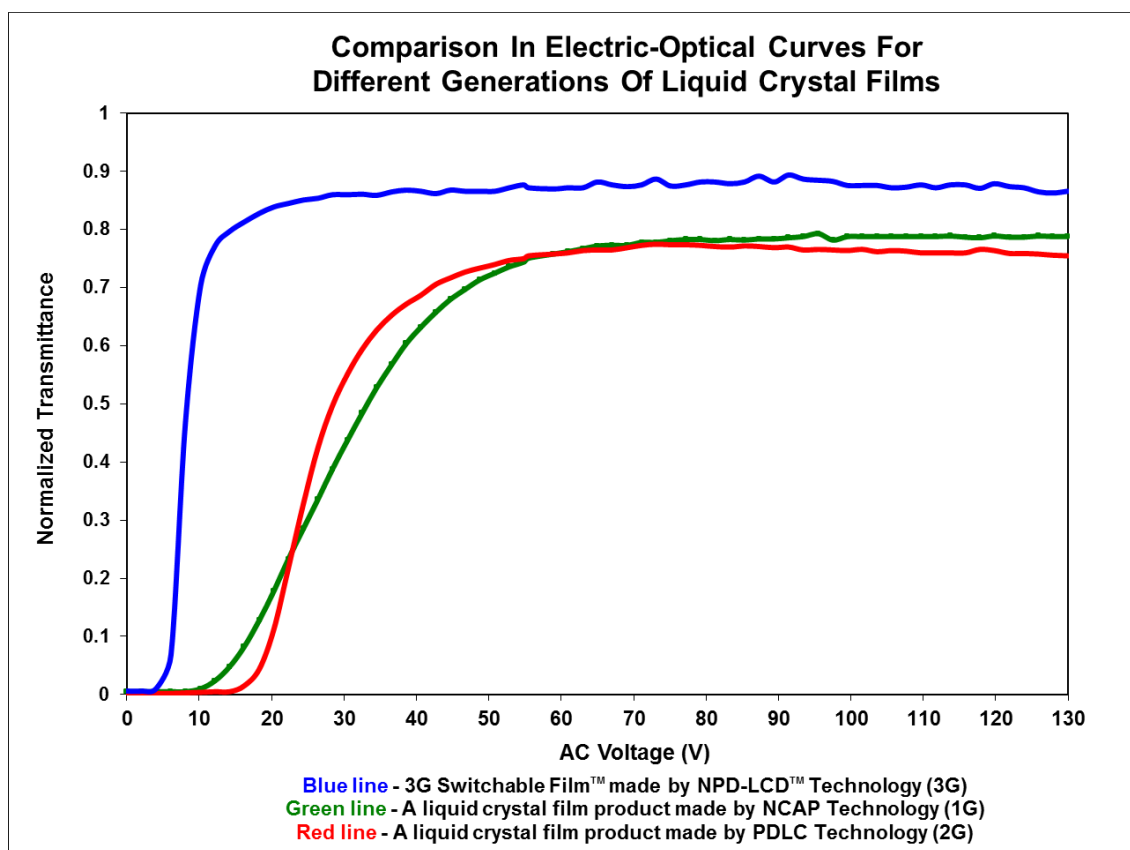
1.4 Srovnání elektricko-optických vlastností jednotlivých generací



Obr. 6 – Graf závislosti optického zamlžení na elektrickém napětí [12]

Na prvním grafu (Obr. 6) lze pozorovat závislost procentuálně vyjádřené úrovně zamlžení jednotlivých generací stmívatelných fólií vzhledem k hodnotě střídavého napětí. Zatímco úroveň zamlžení první (zeleně) a druhé (červeně) generace klesá s rostoucím napětím takřka exponenciálně; úroveň zamlžení třetí generace (modře) zůstává téměř konstantní.

Následující graf (Obr. 7) porovnává jednotlivé generace z hlediska propustnosti světelného záření ve viditelné oblasti elektromagnetického spektra opět v závislosti na přírůstku napětí. Podobně jako u předchozího grafu lze pozorovat výrazné zlepšení elektricko-optických vlastností u třetí generace chytrých fólií (modře). Prudký růst propustnosti světelného záření již v rozmezí cca. 5–15 voltů znamená výrazně efektivnější a energeticky úspornější provoz oproti zbývajícím dvěma generacím.



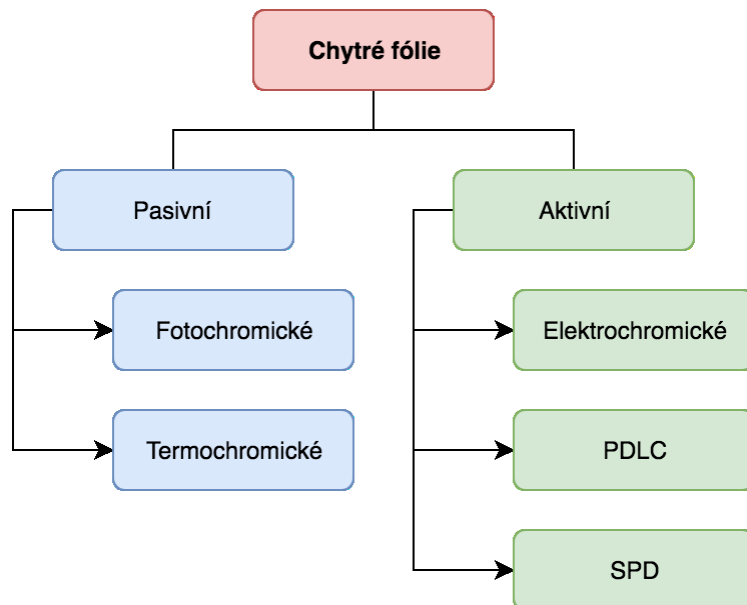
Obr. 7 – Graf závislosti normalizované propustnosti na elektrickém napětí [12]

1.5 Shrnutí I. kapitoly

Cílem první kapitoly bylo popsat problematiku tekutých krystalů za účelem objasnění principu jejich činnosti při konstrukci dynamicky stmívatelných fólií. V návaznosti byly uvedeny tři vývojové etapy těchto fólií se zaměřením na jejich chemická specifika. Na závěr jsou shrnuty rozdíly jednotlivých generací z hlediska elektricko-optických charakteristik.

2 DRUHY CHYTRÝCH FÓLIÍ

Obecně lze chytré fólie rozdělit podle dvou základních hledisek. Primárně jsou fólie klasifikovány z hlediska iniciačních stimulů, sekundárně pak dle použité technologie. Primární členění spočívá v popisu fyzikálních podmínek nutných pro změnu opticko-termických vlastností chytrých fólií, zatímco sekundární členění je reprezentováno jednotlivými podkategoriemi dvou primárních kategorií.



Obr. 8 – Rozdělení chytrých fólií [vlastní]

2.1 Pasivní systémy

Pasivní technologie chytrých fólií reagují na stimuly výhradně neelektrického charakteru. Iniciačním faktorem pro změnu opticko-termických vlastností fólie jsou tudíž podmínky ryze přírodního environmentálního typu. Nejčastěji se jedná o světlo a teplo.

Výhodou pasivních fólií je jejich nezávislost na jakékoli dotované energii a s tím související nižší pořizovací cena. Dalšími výhodami je snadná montáž bez nutnosti instalace ovládacích prvků a z toho plynoucí téměř bezúdržbový provoz s nulovými provozními náklady.

Nevýhodou pasivních systémů je absence možnosti řízení průhlednosti a kontroly úrovně ztmavení. Z hlediska využitelnosti nachází tato zařízení uplatnění zejména v prostorech, kde je vyžadováno osvětlení pouze difúzním světlem (výstavy apod.) nebo v oblasti oční optiky.

2.1.1 Fotochromické fólie

Fotochromické materiály mění své optické parametry na základě množství absorbovaného přírodního světla. Se zvyšující se intenzitou dopadajícího světelného záření dochází uvnitř materiálu k chemické reakci a fólie či sklo se postupně ztmavuje. Tato schopnost je způsobena přítomností organických či anorganických sloučenin, fungujících jako fotocitlivé médium. Příkladem mohou být halogenidy kovů (chlorid a bromid stříbrný), které reagují na ultrafialové světlo nebo plasty, absorbující sluneční energii podle změny výstupního barevného spektra. Typicky bývají tyto fotochemicky citlivé látky přímo součástí skelné hmoty. Za nejvýhodnější jsou považována skla obsahující halogenidy stříbra. [13]

Ztmavnutí fotochromického skla je vyvoláno účinkem záření vhodných vlnových délek. Opačný proces je ovlivněn složením základního skla, koncentrací a druhem halogenidů stříbra či jiných fotochemicky citlivých látek, druhem a koncentrací stabilizátoru apod. Typicky však tento proces trvá v řádu jednotek až desítek minut. [13]

Nejčastěji jsou fotochromické materiály využívány v oblasti oční optiky, ve stavitelství tento typ skla nenašel širší uplatnění. [13]

2.1.2 Termochromické fólie

Termochromní materiály jsou založeny na stimulech tepelného charakteru. V případě fólií či zasklení jsou využity vlastnosti tepelně aktivních gelů, které umožňují změnu optických vlastností v závislosti na změně teploty okolního prostředí. [13]

„Tyto gely obsahují termochromní látky, které se skládají ze dvou složek s rozdílnými indexy lomu. Při nízké teplotě vytváří obě složky homogenní a transparentní materiál. Jestliže dojde ke zvýšení teploty na limitní hodnotu (20–50 °C), složky se oddělují do velmi malých částic (s rozměry blízkými se vlnové délce světla), což způsobí silnou disperzi dopadajícího záření.“ [13]

Ačkoli jsou termochromní materiály citlivé převážně na infračervenou část elektromagnetického spektra, není účinnost jejich reakce zaručena ani při vystavení přímému slunečnímu záření. Klíčovou roli hraje zejména teplota okolního prostředí. Efektivita použití tohoto druhu dynamického systému zasklení tudíž může být do značné míry ovlivněna přírodními podmínkami, resp. geografickou polohou. [14]

Uplatnění nachází termochromní materiály také v dalších oblastech jako teplotní indikátory; v medicíně při odhalování zánětlivých a nádorových ložisek či v průmyslové defektoskopii.

2.2 Aktivní systémy

Technologie aktivních chromogenních fólií využívá reakce chemických prvků a jejich částic na přítomnost elektrického proudu. Pomocí dodané energie lze dynamicky regulovat prostup slunečního záření skrze systém a dosáhnout požadovaných optických či tepelných podmínek v daném prostoru. Aktivní systém zasklení může být ovládán přímo, nepřímo nebo kombinovaně v závislosti na účelu jeho instalace. Přímý způsob regulace spočívá v jednoduchém ovládání pomocí vypínače nebo dálkového ovladače (vhodné pro získání soukromí apod.).

Nepřímý způsob spočívá v zařazení dalšího řídicího členu do systému – nejčastěji integrované automatizační jednotky inteligentních budov. Na základě zařazení aktivního systému zasklení do energetického managementu budovy lze zajistit optimalizaci tepelných zisků a dosáhnout snížení požadavků na chlazení a ventilaci vedoucí k úspoře energie i finančních prostředků.

Kombinovaný způsob řízení integruje přímou i nepřímou variantu regulace, ovšem vyžaduje odpovídající systém nastavení priorit. Jedná se o nejsložitější způsob z výše uvedených, ať už z hlediska instalace, správy či optimalizace. V budoucnu však lze očekávat jeho popularitu zejména kvůli rostoucím požadavkům na vysokou integraci systémů a trendů spojených s příchodem nových technologií, například umělé inteligence.

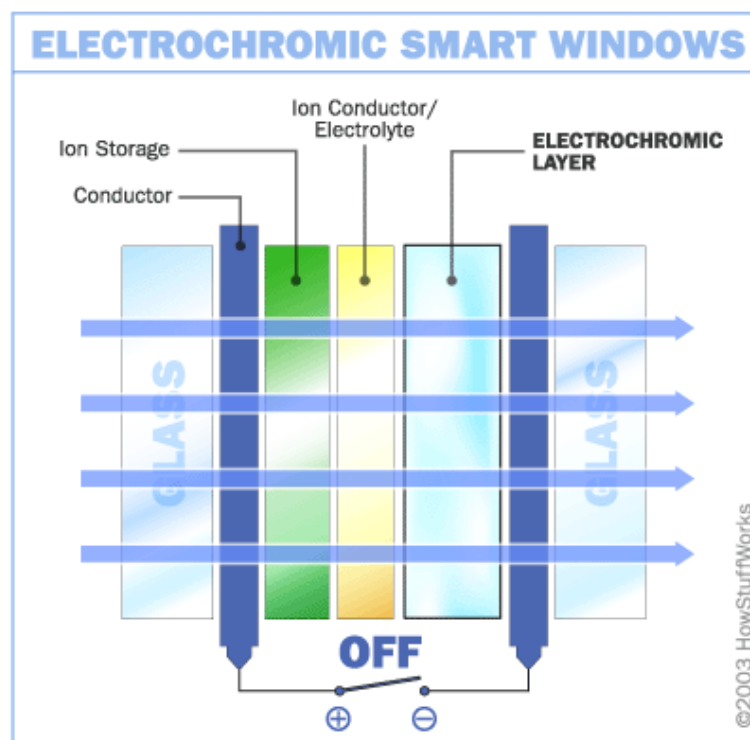
2.2.1 Elektrochromická skla

První skupinu aktivních systémů zasklení tvoří elektrochromická skla. Princip jejich činnosti je založen na fyzikálním jevu zvaném elektrochromizmus, kdy dochází ke změně optických vlastností elektricky aktivních materiálů za přítomnosti elektrického proudu. Toto označení se stalo populárním jako souhrnný název pro všechny níže popsané technologie stmívatelných fólií a druhů aktivního zasklení.

Výjimečnost elektrochromických materiálů spočívá v inverzní reakci na přítomnost elektrického proudu vzhledem k ostatním popisovaným technologiím (PDLC a SPD). Ve výchozím stavu, tj. při absenci elektrického proudu (Obr. 9), je materiál čirý a propouští maximum dopadajícího světelného záření. Naopak zvyšováním napětí mezi elektrodami ve formě průhledných vrstev (Obr. 10), dochází k postupnému ztmavení materiálu až po maximální možné úrovni. Ta je definována použitým typem technologie a odpovídajícím způsobem uspořádání vnitřních vrstev skla či fólie. Existují varianty s rozličnými barevnými odstíny nebo dokonce tzv. *mirror-like* verze schopné vytvořit jednostranně zrcadlovou plochu. [15][16]

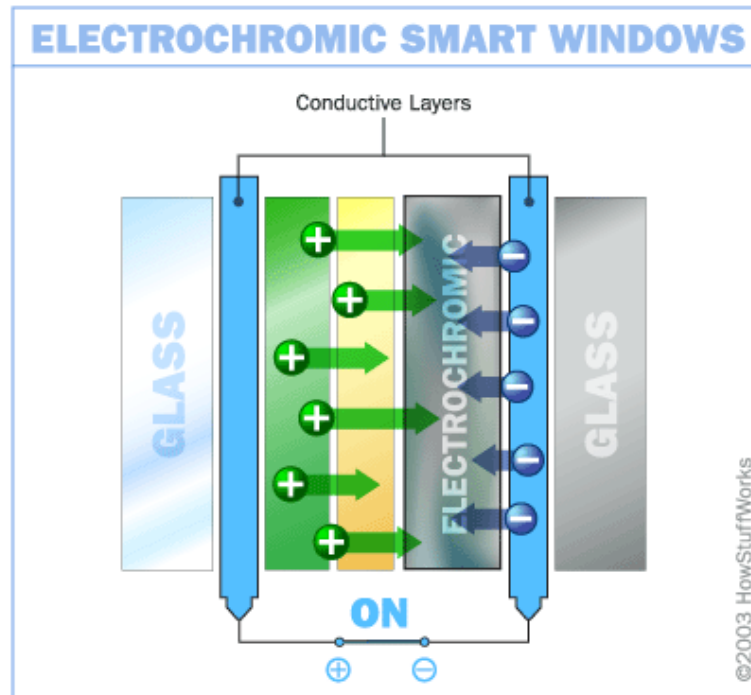
Elektrochromické sklo může vzniknout dvěma způsoby, a to přímým vložením jednotlivých vrstev do skla při procesu jeho výroby nebo dodatečnou aplikací ve formě adhesivní fólie. Fólie se skládá ze základního materiálu (tzv. substrátu), který je následně potažen několika vrstvami transparentních elektrických vodičů, separátorů a dalších vrstev nezbytných pro dosažení požadovaných optických parametrů. Proces nanášení vrstev se nazývá *sputtering*. Příkladem může být fólie založená na principu pohybu iontů lithia, jejichž vlastností se využívá také v dalších aplikacích, z nichž nejznámější jsou lithium-iontové akumulátory. [15]

Základ fólie tvoří 5 vrstev (Obr. 9) – uprostřed se nachází elektrolytový separátor, který je umístěn mezi vrstvou „iontového úložiště“ (*Ion Storage*) a elektrochromickou vrstvou. Další vrstvu tvoří transparentní materiál s elektronovou vodivostí (např. SnO_2), jež přiléhá z jedné strany k elektrochromické vrstvě a z druhé k iontovému úložišti. Na tyto vrstvy se pomocí vodivého adhesiva připevní elektrické kontakty, typicky ve formě měděných proužků. [15]



Obr. 9 – Elektrochromické materiály (výchozí stav) [17]

Připojením elektrod ke zdroji elektrického proudu se spustí chemická oxidační reakce, kdy molekuly chemické sloučeniny obsažené v iontovém úložišti (např. lithium-kobaltový oxid – LiCoO_2) ztrácejí elektron, což způsobí jejich přesun skrze separátor do elektrochromické vrstvy, tvořené typicky oxidem wolframovým (WO_3). Popsaná reakce způsobí absorpci světla na elektrochromické vrstvě, která zabrání dalšímu prostupu světla a fólie se přirozeně bude jevit jako tmavá, jak je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 10). [15][16]



Obr. 10 – Elektrochromické materiály (stav zapnuto) [17]

Při přerušení dodávky stejnosměrného elektrického napětí nedochází k okamžitému přechodu do výchozího transparentního stavu, ale existuje zde jistý paměťový efekt, který může trvat v řádu hodin ale dokonce i dnů. Přechod do výchozího stavu je však díky reverzibilitě elektrochromizmu možné uskutečnit jednoduše změnou polarity dodávaného elektrického napětí. [13]

Výhody

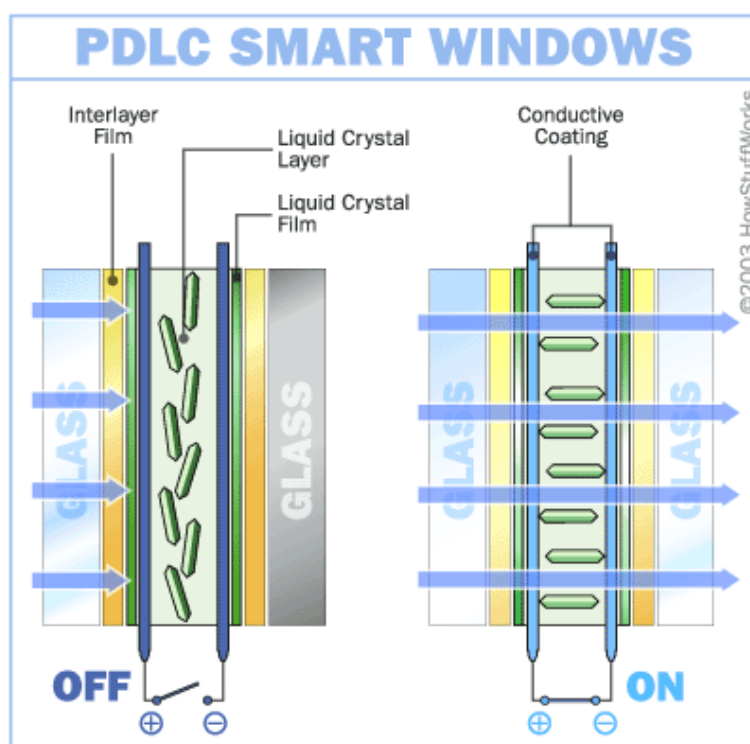
- Nevyžadují konstantní dodávku elektrické energie pro udržení jednotlivých stavů,
- energeticky úsporné,
- jemná adjustace prostupujícího záření,
- řízení nízkým stejnosměrným napětím (0–10 V DC),
- paměťový efekt,
- vysoký počet dostupných barevných variant,
- využití v automobilovém průmyslu proti oslnění (okna, zrcátka).

Nevýhody

- Poměrně dlouhá doba potřebná k přechodu mezi jednotlivými stavy (v řádu minut),
- není navrženo pro aplikace k zajištění soukromí,
- nižší pořizovací náklady.

2.2.2 Technologie PDLC

Technologie PDLC fólií (*Polymer Dispersed Liquid Crystal*), je založena na vrstvě tekutých krystalů v polymerové matrici umístěné mezi dvěma tenkými vrstvami, složenými z oxidů india a cínu, tzv. ITO filmy (*Indium-Tin Oxide*). Přivedením střídavého elektrického napětí na měděné elektrody připojené na obou stranách fólie dojde k přechodu z náhodného uspořádání molekul tekutých krystalů k jejich orientaci ve směru vzniklého elektrického pole a fólie se stává plně transparentní. Dojde-li k odpojení napájení, elektrické pole zanikne, což způsobí rychlý přechod molekul zpět do neuspořádaného stavu a fólie se opět stane neprůhlednou. [17]



Obr. 11 – Schéma vrstev PDLC fólie [17]

Výroba PDLC fólií spočívá ve vytvoření emulze tekutých krystalů (většinou kalamitických) a vhodného polymeru. Výsledná kombinace má elektro-optické vlastnosti tekutých krystalů společně s výhodnými strukturními a mechanickými vlastnostmi polymerů. Pro vznik emulze je nutné kapalně skupenství obou složek. Z toho důvodu jsou do emulze přidávána opticky vytvrzující adheziva (např. polyakryláty), která jsou později vytvrzena pomocí UV záření či tepelnou úpravou. Při procesu tvrdnutí dochází mezi tekutými krystaly a polymerem k fázové separaci, která je funkcí teploty a času. Tím lze ovlivnit výsledný tvar a velikost domén tekutých krystalů a polymeru v rámci jejich struktury. [18]

Široký prostor pro použité komponenty a výrobní metody umožňuje docílit rozmanitých elektricko-optických vlastností PDLC fólií. Jedním z klíčových faktorů při procesu výroby je koncentrace polymeru ve výsledném produktu. Zvyšování koncentrace polymeru vede k zmenšování velikosti kapiček tekutých krystalů. Z běžné velikosti v řádu mikrometrů lze dosáhnout velikostí až o jeden řád nižších. Snížením koncentrace se výsledná směs skládá převážně z čistých tekutých krystalů, což vede k dosažení elektro-optických vlastností blízkých se jejich naturální formě. Hlavní význam spočívá v dosažení rozličných parametrů vzhledem k účelu jejich aplikace. Existují tři hlavní technologie: [18]

1. *Scattering PDLCs* (rozptylové PDLC),
koncentrace polymeru: 30–50 %,
řádová velikost domén: [μm] mikrometry,
aplikace: chytré zasklení (mléčný vzhled). [18]
2. *Nano-PDLCs / Holographic PDLCs* (Nano PDLC / holografické PDLC),
koncentrace polymeru: 60–80 %,
řádová velikost domén: [nm] nanometry,
aplikace: adaptivní optika (astronomie, oční optika), konstrukce hologramů. [18]
3. *PSLC / PNLC (Polymer Stabilised / Polymer Network Liquid Crystals)*,
koncentrace polymeru: 1–10 %,
konzistence: viskózní kapalina / gel,
aplikace: komunikační modulační zařízení, polarizátory, [19]

Výhody

- Neprůhlednost při zachování dobré propustnosti světla (mléčný efekt),
- nastavitelná úroveň transparentnosti,
- dostupnost barevných provedení,
- vysoká blokáce UV záření (až 99 %). [20]

Nevýhody

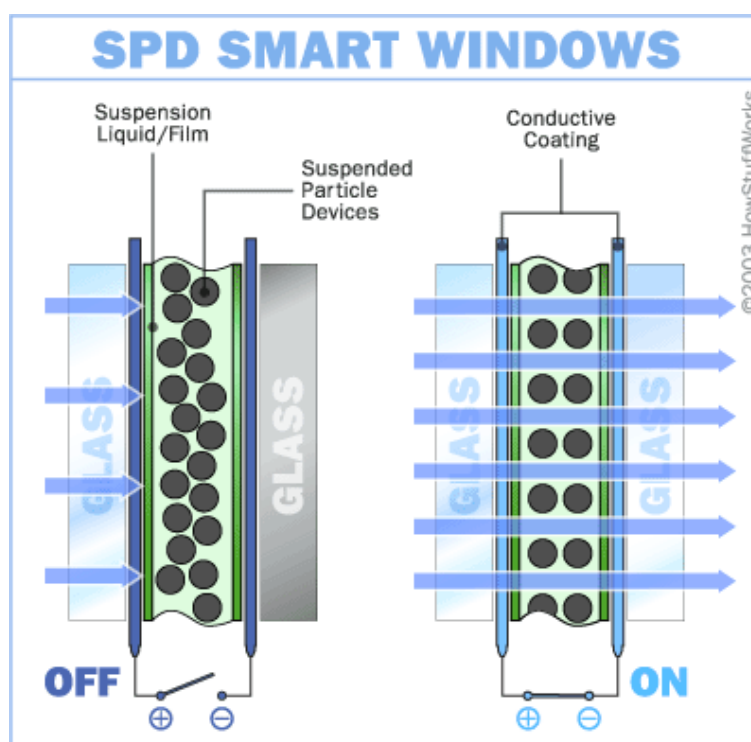
- Vyžadují konstantní dodávku elektrické energie pro udržení transparentního stavu,
- řízení vyšším střídavým napětím (60–110 V AC),
- obecně horší pozorovací úhly (kolem 150°),
- v současné době stále vysoká pořizovací cena. [20]

2.2.3 Technologie SPD

Posledním druhem aktivních systémů zasklení jsou zařízení využívající ke změně optických charakteristik suspenzi pevných částic – tzv. *Suspended Particle Devices* (SPD). Podobně jako v případě elektrochromických a PDLC fólií se i SPD fólie skládá z 3–5 vrstev. Aktivní vrstva obsahuje částice tyčinkovitého tvaru suspendované v organické kapalině nebo gelu. Tato vrstva je laminována mezi dvěma transparentními vrstvami s elektronovou vodivostí.

Není-li mezi elektrodami přítomno elektrické napětí, částice jsou vlivem Brownova pohybu uspořádány chaoticky, což zapříčiní odraz, absorpci nebo změnu trajektorie světelného paprsku v závislosti na koncentraci částic, energii dopadajícího záření apod. [21][22]

Přivedením elektrického napětí dochází k uspořádání suspendovaných částic ve směru vzniklého elektrického pole. Děje se tak na základě přemístění vnitřního náboje částic, čímž systém přejde do stavu s nejnižší vnitřní energií. Uspořádáním částic vznikne mřížka, skrze kterou může světlo procházet a fólie se stává plně transparentní (Obr. 12). [22]



Obr. 12 – Schéma vrstev SPD fólie [17]

Míra uspořádání částic a jejich počet závisí na intenzitě vzniklého elektrického pole, což umožňuje řízení optických vlastností fólie změnou napětí mezi vrstvami s elektronovou vodivostí. Tím je zajištěna schopnost regulace tohoto typu systému chytrého zasklení v jednotlivých úrovních, a to v řádu milisekund.

Na základě výše popsaného principu technologie SPD lze formulovat následující výhody a nevýhody tohoto typu dynamického zasklení.

Výhody

- Neprůhlednost při zachování dobré propustnosti světla (mléčný efekt),
- nastavitelná úroveň transparentnosti,
- široký rozsah pracovních teplot (-20 až +70 °C),
- široké pozorovací úhly,
- rychlý přechod mezi jednotlivými stavy (v řádu milisekund),
- vysoká účinnost absorpce ve viditelné části elektromagnetického spektra,
- vysoké množství dostupných barevných provedení,
- využitelné v automobilovém, leteckém průmyslu. [22]

Nevýhody

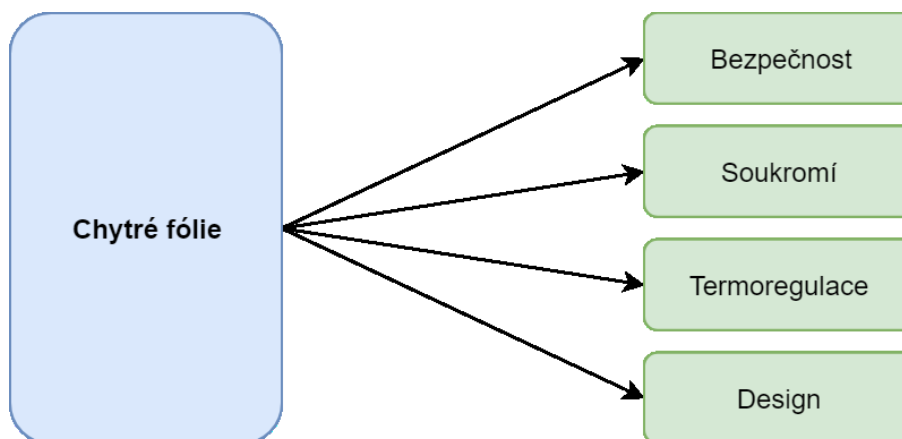
- Vyžadují konstantní dodávku elektrické energie pro udržení transparentního stavu,
- řízení vyšším střídavým napětím (60–110 V AC),
- nižší absorpce záření v infračervené oblasti elektromagnetického spektra,
- vyšší tepelná propustnost,
- méně energeticky úsporné,
- méně vhodné pro kompenzaci tepelných zisků v budovách. [22]

2.3 Shrnutí II. kapitoly

Cílem této kapitoly bylo přinést základní přehled o rozdělení systémů dynamického zasklení z hlediska iniciačních stimulů, použitých technologií a účelu jejich využití v praxi. Ačkoli kategorizace zůstává napříč vývojem zachována, jednotlivé technologie prošly řadou inovací a některé zdroje se v mnoha případech neshodují. V praxi je bezpodmínečně nutné sledovat parametry konkrétních produktů, aby nedocházelo k chybné interpretaci některých vlastností udávaných výrobcí. V současnosti jsou zákazníci poptávající systémy dynamického zasklení, vlivem situace na trhu, odkázáni zejména na zahraniční výrobce a dodavatele. Mnozí výrobci však uplatňují v rámci konkurenčního boje dezinformační obchodní taktiky s cílem vyzdvihnout vlastní produkt na úkor konkurenčních technologií. Není například výjimkou označení PDLC fólií jako *non-dimmable*, ačkoli stmívání v jednotlivých úrovních technologie umožňuje, jak je zřejmé z výstupu praktické části této práce.

3 PŘEHLED APLIKACÍ ELEKTROCHROMICKÝCH FÓLIÍ

Elektrochromické fólie nachází uplatnění napříč mnoha odvětvími lidské činnosti. Konkrétní oblasti vycházejí z požadavků na zlepšení charakteristických vlastností prostředí – zejména vyšší bezpečnost, soukromí, tepelnou pohodu a osobní komfort. Elektrochromické fólie jsou těžištěm všech výše uvedených vlastností, což přináší vysoký potenciál jejich využitelnosti v průmyslu komerční bezpečnosti i v ostatních oblastech komerčního využití.



Obr. 13 – Využitelnost chytrých fólií vzhledem k vlastnostem prostředí [vlastní]

3.1 Aplikace chytrých fólií v průmyslu komerční bezpečnosti

Zvyšující se popularita velkých prosklených ploch v architektuře i dopravních prostředcích vede k otázce rizik spojených s tímto novodobým trendem. Vizuálně přístupný prostor může vytvářet přívětivé podmínky pro pachatele trestné činnosti, například při plánování krádeží, tipování obětí nebo shromažďování informací spojených s režimovými opatřeními objektu, prvky poplachového zabezpečovacího systému apod.

3.1.1 Finanční instituce

Společným jmenovatelem finančních institucí je potřeba vytvářet odpovídající úroveň soukromí při procesu komunikace s klienty za účelem zajištění bezpečnostních požadavků na ochranu osobních a citlivých údajů. Modernizace interiérů přinesla společně se současným trendem otevřeného prostoru také potřebu zachování těchto požadavků, alespoň v průběhu úkonů vyžadujících odpovídající úroveň soukromí. Částečným řešením mohou být broušená či jinak povrchově upravená skla a přepážky, které sice splňují daná bezpečnostní kritéria, nicméně praktickým výhodám a flexibilitě aktivního zasklení konkurovat nemohou.



Obr. 14 – Příklad aplikace elektrochromických fólií v bankovních institucích [23]

Na obrázku (Obr. 14) je zobrazen funkční příklad využití dynamicky stmívatelných fólií v praxi na pobočce americké banky Nordia Bank se sídlem v Massachusetts.

3.1.2 Výrobní provozy

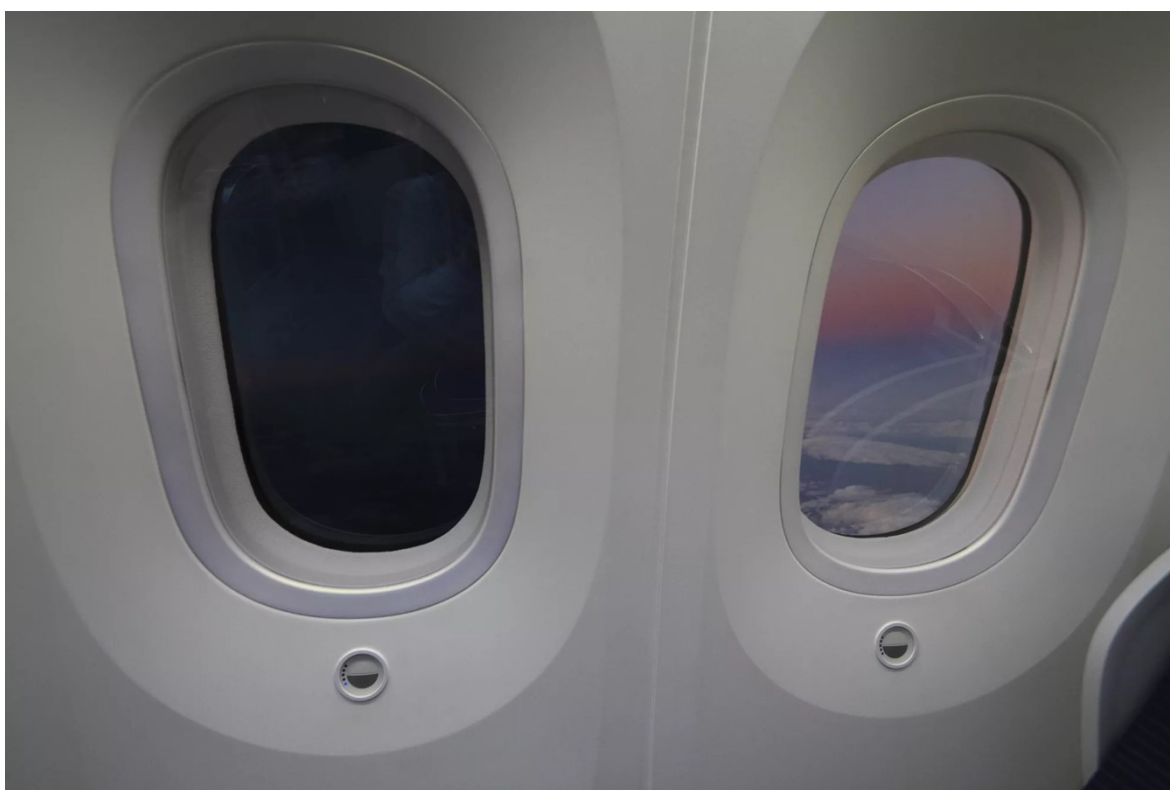
Transparentní prostory ve výrobních provozech či výzkumných zařízeních opět znamenají určité riziko, spojené například s utajovanými výrobními procesy. Pro účely zabránění úniku aktiv nehmotného charakteru mohou systémy dynamického zasklení zajistit odpovídající opatření proti jejich neoprávněnému zcizení. V objektech tohoto typu nejsou výjimkou striktní nařízení o zákazu pořizování audio-vizuálních záznamů či dokonce vnášení těchto zařízení do objektu. Pravidla běžně platí pro všechny osoby nacházející se legálně v objektu včetně návštěv. Ve zvláštních situacích však může systém dynamického zasklení i zde najít opodstatněné uplatnění.

3.1.3 Architektura a veřejný prostor

Oblast architektury a veřejného prostoru zahrnuje z hlediska využití dynamického zasklení například ambasády, muzea, obchodní domy, klenotnictví nebo obchody s luxusním zbožím. Zejména výlohy s drahými komoditami mohou lákat pachatele k trestné činnosti, a tudíž jejich ochrana pomocí dynamického zasklení může přispět ke zvýšení jejich bezpečnosti.

3.1.4 Doprava

Bezpečnostní aplikace chytrých fólií se týkají rovněž využití v dopravních prostředcích nej-různějších typů. Mohou plnit funkci ochrany řidiče vozů hromadné přepravy osob, interiéru a věcí uvnitř zaparkovaných vozidel či zajistit efektivní ochranu proti oslnění dálkovými světly. Vysoký potenciál se skrývá také v leteckém průmyslu. Jedním z pravidel bezpečnosti letového provozu je povinnost cestujících vytahovat při vzletu a přistání okenní stínidla. Důvodem je zabránění oslnění a urychlení evakuace v případě vzniku mimořádné události. Chytré fólie mohou plnit bezpečnostní funkci, zároveň přispět ke snížení hmotnosti letadla a v neposlední řadě dodat interiéru nezaměnitelný futuristický design.



Obr. 15 – Příklad aplikace elektrochromických fólií v dopravě (Boeing 787) [24]

3.2 Aplikace chytrých fólií v ostatních komerčních oblastech

Jedná se o oblasti, kde jsou faktory – soukromí, termoregulace a komfort upřednostňovány před funkcí bezpečnostní. Je však nutné poznamenat, že bezpečnostní faktor se nevytrácí ani v případě těchto aplikací. Například při neúmyslném rozbití skleněné výplně je výsledná pravděpodobnost úrazu nižší, pokud střepy zůstanou držet pohromadě. Běžná tloušťka elektrochromických fólií se pohybuje v rozmezí 200 až 1000 μm , což dostačuje k bezpečnému zafixování skleněných střepů na adhesivní vrstvě fólie.

3.2.1 Zdravotnictví

Významným benefitem chytrých fólií je jejich hygieničnost a bezúdržbový provoz, činící z nich ideální řešení oproti klasickým závěsům a žaluziím ve zdravotnických zařízeních.

Účinné zajištění soukromí ve zdravotnických zařízeních je základním předpokladem dobré zdravotní péče. Klasické žaluziové či závěsové systémy trpí usazováním prachu, který může znamenat komplikace a vyžaduje pravidelnou údržbu. Chytré fólie mohou odstranit tyto nedostatky a poskytnout další benefity – například snížit prostup slunečního záření skrze okna a tím optimalizovat tepelnou pohodu bez účasti klimatizačních jednotek se zachováním dostatečného množství přírodního světla.



Obr. 16 – Příklad aplikace elektrochromických fólií ve zdravotnictví [25]

3.2.2 Ostatní oblasti

Konečný počet aplikací elektrochromických fólií je limitován snad jen individuální kreativitou a představivostí každého člověka. Z běžných oblastí využití stojí za zmínku kanceláře, hotely, restaurace, výtahy, domácnosti, lodě, vlaky a jiné.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ PRŮHLEDNOSTI CHYTRÝCH FÓLIÍ

Základní možností řízení průhlednosti je jednoduchý vypínač, kterým lze přepínat mezi dvěma stavy – zapnuto/vypnuto. Za předpokladu, že bude zapotřebí ovládat průhlednost vzdáleně, například pomocí chytrých zařízení v domácnosti nebo na základě vnějších podmínek, (např. přímé slunce, pohyb, teplota v interiéru apod.), lze vypínač nahradit vhodným spínacím prvkem, který zajistí změnu stavu automaticky. Příkladem může být klasické jazýčkové nebo modernější SSR relé řízené nízkým napětím. V obou uvedených případech se jedná v podstatě o univerzální řešení z hlediska použitého druhu chytré fólie. Je to dáno tím, že použité prvky nejsou závislé na velikosti ani typu napájecího napětí a rozhodující roli hraje pouze použitý napájecí zdroj či transformátor. Zde však, snad s výjimkou pořizovací ceny, výhody tohoto typu řízení průhlednosti končí.

Pokročilejší možnosti řízení zahrnující plynulou regulaci, přechodové efekty či postupné zprůhlednění a ztmavení jsou již specifické pro jednotlivé technologie vzhledem k jejich požadavkům na stejnosměrné nebo střídavé napájecí napětí.

Pro účely návrhu a sestavení regulátoru průhlednosti byla v rámci této práce zvolena PDLC fólie výrobce Shanghai HoHo Industry Co., Ltd. Výrobce uvádí jako jeden z parametrů, že fólie podporuje postupné stmívání (*dimming*), jakým způsobem však již blíže nespecifikuje. Za účelem zjištění chování fólie při změně elektrických vlastností byl proveden jednoduchý experiment.

4.1 Experiment

Cílem experimentu bylo zjistit, jakým způsobem reaguje testovací vzorek PDLC fólie na změnu střídavého napájecího napětí.

4.1.1 Použité přístroje a pomůcky

- Laboratorní autotransformátor LTS 604,
- napájecí transformátor 36 V AC,
- vzorek PDLC fólie (154 x 300 mm).

Výrobce dodává společně s fólií také napájecí transformátor se jmenovitým napětím 36 V. Tento napájecí adaptér je opatřen jednoduchým vypínačem, pro rychlou demonstraci funkce PDLC fólie.

4.1.2 Technické parametry testovaného vzorku

V České republice se na trhu prozatím výrobky tohoto typu nevyskytují, vzorek byl proto objednan od čínského výrobce. Ačkoli působí katalogový list důvěryhodným dojmem, je nutné brát uvedené technické parametry vzhledem k okolnostem s patričnou rezervou.

Fyzické parametry

Tab. 1 – Fyzické parametry testovaného vzorku PDLC fólie [upraveno z: [26]]

Parametr	Hodnota
Rozsah pracovních teplot	-20 až +60 °C
Rozsah skladovacích teplot	-30 až +70 °C
Maximální rozměry	1830 x 4000 mm

Optické parametry

Tab. 2 – Optické parametry testovaného vzorku PDLC fólie [upraveno z: [26]]

Parametr	Stav	Hodnota
Paralelní prostup světla	Zapnuto	> 83 %
	Vypnuto	≤ 1 %
Prostup viditelného světla	Zapnuto	> 80 %
	Vypnuto	> 50 %
Zákal	Zapnuto	< 6 %
	Vypnuto	≥ 90 %
Pozorovací úhel	Zapnuto	≥ 140°
Doba odezvy	Vypnuto – zapnuto	< 10 ms
Blokace UV záření	Vypnuto	≥ 99 %
Blokace IR záření	Vypnuto	> 90 %

Elektrické parametry

Tab. 3 – Elektrické parametry testovaného vzorku PDLC fólie [upraveno z: [26]]

Pracovní napětí		Doba odezvy		
Vstupní	Výstupní	Zapnuto	Vypnuto	
AC 220V / DC 24V	AC 48–75V/50 Hz	< 10 ms	< 20 ms	
Minimální napětí	Spotřeba energie	Trvale zap.	Počet změn	Prac. frekv.
≤ 25 V	< 4 W/m ²	> 80 000 h	> 2 000 000	30–400 Hz

4.1.3 Průběh a výsledky experimentu

Laboratorní autotransformátor umožňuje plynulou regulaci výstupního střídavého napětí, v plném rozsahu síťového napětí 230 V. Jedná se o transformátor se společným primárním a sekundárním vinutím. Přístroj je opatřen elektrickou zásuvkou, jež slouží pro připojení testovaného spotřebiče. Připojením externího transformátoru (od výrobce fólie) se výstupní rozsah napětí změní vzhledem k maximálnímu napětí tohoto adaptéru (0 až 36 V). Přístroj je opatřen rovněž analogovým voltmetrem a ampérmetrem. Aktuální hodnotu výstupního napětí je možné získat pomocí jednoduchého přepočtu podle vzorce:

$$U_o = \frac{U_{max} \cdot U_{výst.}}{U_{síťové}}, \quad (4.1)$$

kde U_o je výsledné výstupní napětí, U_{max} je maximální napětí externího transformátoru, $U_{výst.}$ je výstupní napětí z původního rozsahu, $U_{síťové}$ je standardní napětí elektrické sítě.

Napětí bylo postupně zvyšováno v celém rozsahu. Přibližně kolem hranice 14 V začala fólie viditelně reagovat a pozvolně se stávala čirou. Zhruba poloviční transparentnost nastala v rozmezí 22 až 24 V.

Jelikož se jednalo pouze o orientační experiment, nebyl zde kladen vyšší důraz na přesnost měření. Cílem bylo otestovat, zda je skutečně možné regulovat průhlednost fólie, jak je uvedeno v katalogovém listu.

4.2 Způsoby řízení střídavého napětí

Nejjednodušším způsobem regulace střídavého napětí je výše zmíněný autotransformátor. Velká výhoda oproti všem ostatním způsobům spočívá v jeho čistém výstupním sinusovém napětí. Bohužel tato zařízení nejsou praktická kvůli svým rozměrům, hmotnosti a postrádají rovněž alternativní způsoby regulace (např. pomocí mikrokontroleru). Požadavek na řízení pomocí uživatelsky přívětivého rozhraní vedl k vývoji nových metod regulace střídavého napětí pomocí modifikace jeho amplitudy. Řízení výstupní hodnoty efektivního napětí je docíleno nejčastěji „ořezem“ části sinusového průběhu, čímž vzniká rušení v podobě vyšších harmonických kmitočtů. Konstrukce těchto regulátorů běžně vyžaduje integraci síťového filtru. Alternativním způsobem je vynechání celých půlvln vstupního napětí, což se většinou projeví nežádoucím „poblikáváním“ (tzv. *flickering*). Třetí variantu představuje relativně nová metoda přímé modulace síťového napětí pomocí pulsně šířkové modulace.

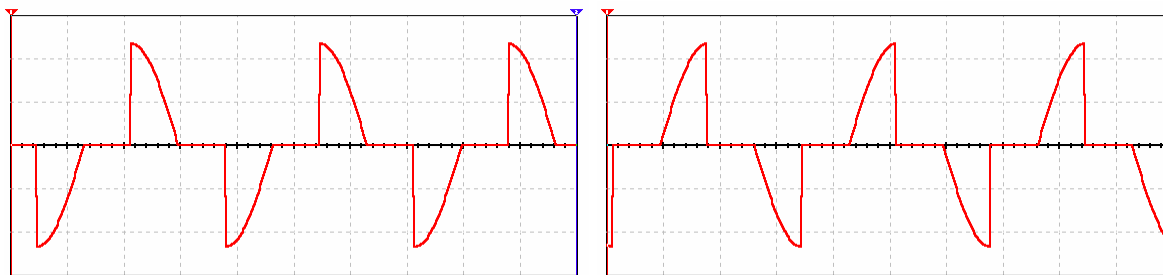
4.2.1 Fázově řízené regulátory

Princip fázově řízených regulátorů spočívá v deformaci původního harmonického napětí. Tento již zmíněný „ořez“ části sinusového průběhu může být realizován dvěma způsoby:

1. Fázové řízení na náběžné hraně,
2. fázové řízení na sestupné hraně.

V obou případech je část průběhu každé půlvlny zadržena pomocí spínacího prvku v závislosti na požadovaném výstupním napětí. Úhel představuje část průběhu v rozsahu 0–180° každé půlvlny.

Při řízení na náběžné hraně se spínací prvek otevírá v každé půlvlně spínacím impulsem a vypíná se při průchodu napětí nulou. Naproti tomu při řízení na sestupné hraně se spínací prvek otevírá při průchodu nulou a zavírá se spínacím impulsem (Obr. 17).



Obr. 17 – Fázové řízení na náběžné (vlevo) a sestupné (vpravo) hraně [27]

Spínacími prvky byly nejdříve tyristory, které byly později nahrazeny triaky, či kombinací diaku a triku. V praxi se lze často setkat s pojmem triaková regulace.

Typicky se tento způsob regulace střídavého napětí používá k stmívání světel či řízení otáček jednofázových motorů. Nejlépe se hodí pro zátěže čistě odporového charakteru. Naopak nevhodné jsou například pro indukční motory. Nevýhodou je zmíněné generování rušení.

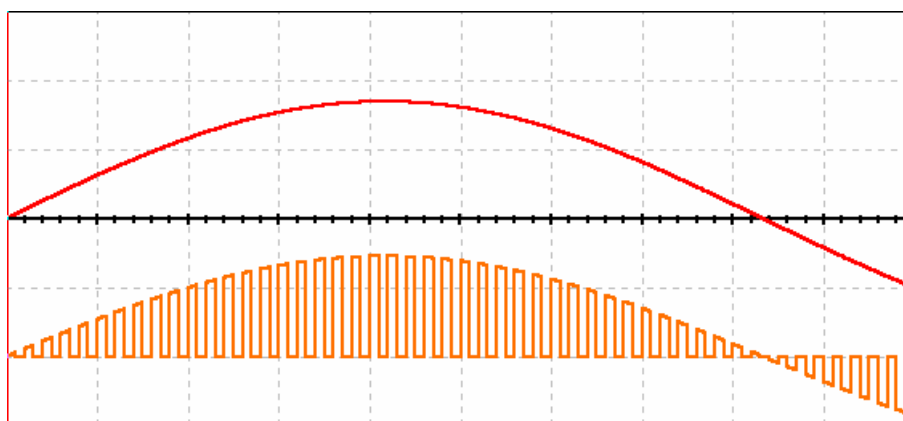
4.2.2 Regulátory střídavého zadržování půlvin

Jedná se o další ze způsobů regulace pomocí spínání vstupního napětí. Oproti fázovému řízení však nejsou vynechány pouze části každé půlvlny, nýbrž půlvlny celé nebo dokonce celé periody. Tento způsob je nejméně vhodný pro řízení jakýchkoliv zařízení, u kterých existuje předpoklad požadavku na spojitě napětí. U svítidel či zobrazovacích technologií, včetně chytrých fólií nelze logicky tento způsob považovat za vhodný.

Běžně nachází tento způsob uplatnění například u topných těles, kde nespojitost napětí v čase nehraje žádnou roli. Zpravidla tento způsob generuje parazitní akustický hluk, který je způsoben právě cyklickým přerušováním vstupního napětí.

4.2.3 PWM regulátory

Jedná se o metodu vysokofrekvenčního spínání vstupního napětí pomocí nízkonapětového generátoru PWM signálu. Tímto generátorem je zpravidla integrovaný obvod, který změnou střidy generovaného signálu mění výstupní efektivní hodnotu napětí. Změna střidy je přímo úměrná procentuální hodnotě vstupního rozsahu napětí. Použitím 8bitového DAC převodníku je dosaženo 255 úrovní, jež představují procentuální rozlišení výstupního napětí nižší než 0,5 %. [28]



Obr. 18 – PWM regulace střídavého napětí (střída 50 %) [27]

Spínacími prvky využívanými pro přímou modulaci síťového napětí jsou běžně výkonové tranzistory typu MOS-FET či stále populárnější IGBT tranzistory.

Výhodou oproti oběma výše popsaným technikám je vysoká frekvence spínání v řádu desítek až stovek kHz. Tím je zajištěn téměř spojitý průběh, který je možné dále filtrovat a dosáhnout reálného snížení amplitudy vstupního napětí, podobně jako u autotransformátoru. Požadavky na filtrování se snižují se zvyšující se frekvencí PWM signálu. Další výhodou je nízké celkové harmonické zkreslení (THD) typicky nepřevyšující 1 %.

Elektrický proud je odebírán po dobu celé periody. Následkem této symetričnosti lze připojit na výstup zařízení například elektronické transformátory pro napájení LED svítidel, halogenových žárovek apod.

Koncepčně představují zařízení tohoto typu nejvhodnější způsob regulace střídavého napětí vzhledem k požadavkům na řízení průhlednosti elektrochromických fólií. Tyto jsou běžně dodávány s externím transformátorem, jenž je dimenzován pro daný druh chytré fólie a také s ohledem na její rozměry. Regulátor tedy může pracovat v plném rozsahu napětí elektrické sítě. Připojením externího transformátoru na výstup regulátoru je rozsah patřičně omezen.

4.3 Ovládací prvky a technologie

4.3.1 Ovládací prvky

Ovládací prvky představují fyzické rozhraní, s jehož pomocí uživatel předává řídicímu systému informace o požadované změně konkrétních parametrů řízeného systému. Interpretace těchto prvků prošla markantní revolucí s příchodem chytrých zařízení, což ovlivnilo také požadavky na vybavení řídicích systémů technologiemi umožňující vzdálenou správu.

Fyzické rozhraní

- Vypínač,
- tlačítko,
- potenciometr,
- klávesnice,
- kapacitní snímač,
- dotyková obrazovka,
- IR / rádiové dálkové ovládání.

Softwarové rozhraní

- Mobilní aplikace,
- webová rozhraní,
- desktopová aplikace.

4.3.2 Technologie ovládání

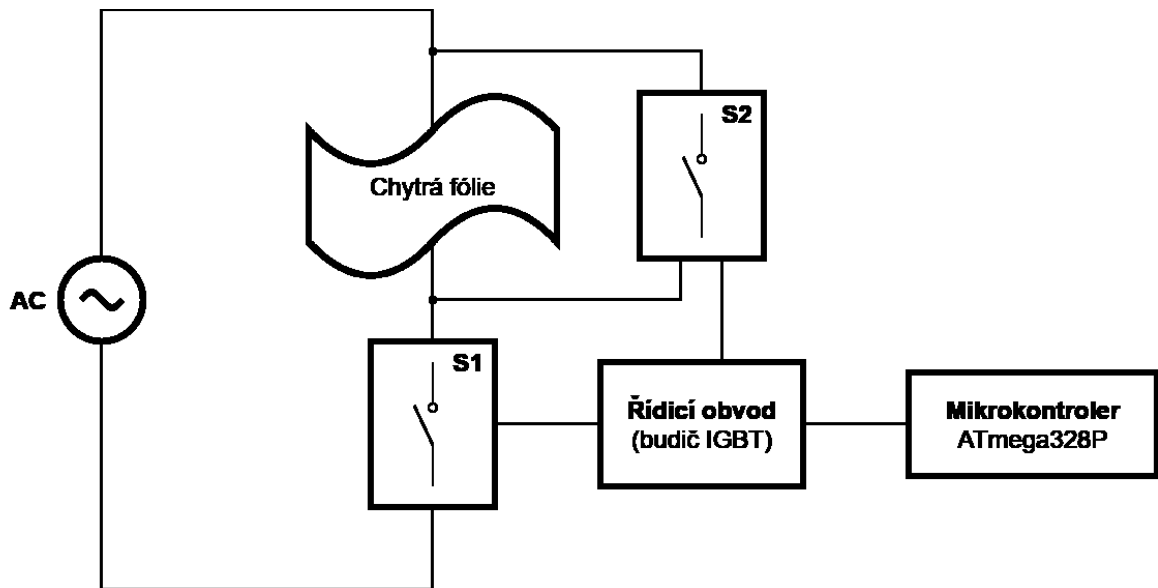
- Bluetooth,
- IrDA,
- LoRaWAN,
- NFC,
- Wi-Fi,
- ZigBee,
- Z-Wave.

Vyjmenované ovládací prvky a technologie představují širokou škálu kombinací ovládání systémů dynamického zasklení. V praxi však jednoznačně vítězí bezdrátové technologie s ohledem na prudký rozvoj v oblasti IoT (*Internet of Things*).

5 HARDWARE REGULÁTORU PRŮHLEDNOSTI

Základní myšlenkou návrhu hardwarové implementace regulátoru průhlednosti je elektrický obvod, schopný zajistit plynulou změnu efektivní hodnoty napětí (dále jen „RMS“) pomocí přímé modulace síťového napětí. Vstupní sinusový průběh je spínán pomocí obousměrného spínacího prvku (dále jen „spínač“), který je schopen zabránit průchodu elektrického proudu v jednom i druhém směru na stanovený velmi krátký čas. Tento časový interval je určen střídou PWM signálu, který je generován pomocí mikropočítače. Frekvence spínání byla stanovena pracovní na 490 Hz, což je výchozí hodnota použitého mikrokontroleru ATmega328P. Výstupní napětí RMS je přímo úměrné střídě modulačního PWM signálu.

Výhodou tohoto řešení například oproti fázově řízeným stmívačům je absence generování vyšších harmonických kmitočtů, které mohou způsobit problémy jiných zařízení v jejich blízkosti. První harmonická zůstává stejná a rovná se síťové frekvenci. Další výhodou spočívá v jednoduchosti řídicího algoritmu, např. oproti stmívačům s detektory průchodu nulou. Nevýhodou uvedeného řešení je konstantní výstupní frekvence 50 Hz, což ale nehraje roli vzhledem ke stanovenému účelu.

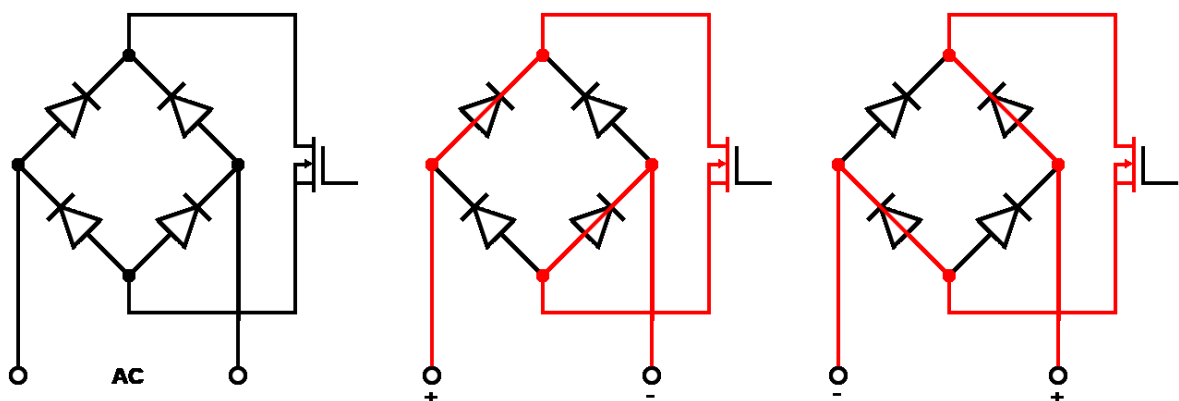


Obr. 19 – Blokové schéma navrhnutého řešení regulátoru průhlednosti [vlastní]

Na blokovém schématu lze vidět nikoli jeden, nýbrž dva spínače (S1 a S2). Je to kvůli setrvačnosti proudu zátěží, který musí být v okamžiku odpojení zátěže od sítě zkratován. Z toho důvodu je do obvodu zařazen druhý spínač (S2) paralelně k zátěži. Oba spínače musí pracovat komplementárně – tzn., že pokud je první ve stavu zapnuto, druhý musí být ve stejný čas vypnut a opačně. Obvod je rozdělen na výkonovou a řídicí část s galvanickým oddělením.

5.1 Výkonová část obvodu

Spínače S1 a S2 jsou oba implementovány v podobě Graetzova usměrňovacího můstku a společně se dvěma výkonovými tranzistory tvoří výkonovou část obvodu. Na vstupních kontaktech můstku je připojena zátěž (fólie). Mezi výstupními kontakty (usměrňená část) je zapojen spínací prvek – bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (IGBT). Je-li tranzistor uzavřen, nemůže přes můstek procházet proud a spínač je ve stavu vypnuto. Dojde-li k otevření tranzistoru, můstek je na výstupu zkratován a může skrze něj protékat proud libovolným směrem – spínač je ve stavu zapnuto. Situace je znázorněna na obrázku níže (Obr. 20).



Obr. 20 – Graetzův můstek v zapojení s IGBT tranzistorem ve funkci spínače [vlastní]

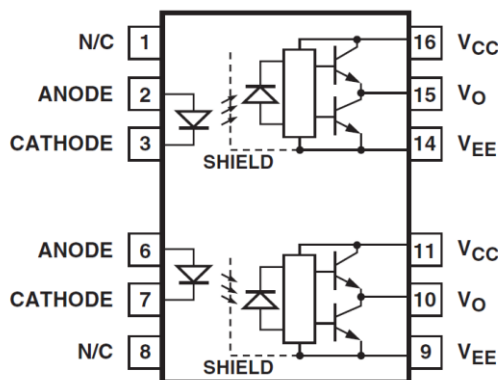
Gratzův můstek je možné sestavit z diskretních diod nebo lze použít integrované můstky, kterých na trhu existuje velké množství. Nejdůležitějšími parametry jsou maximální proud jednotlivými diodami a maximální napětí na každé z nich. Ve spínacích obvodech však hraje roli také frekvence, a proto se pro tyto účely používají „rychlejší“ tzv. Schottkyho diody.

IGBT tranzistory jsou podobně jako MOSFET tranzistory řízeny napětím, na rozdíl od BJT a jiných běžných tranzistorů, které jsou řízeny proudem bází. To znamená, že vyžadují průtok proudu hradlem pouze při přechodu mezi stavy. Jsou vlastně hybridem mezi výše zmíněnými alternativami (unipolárního a bipolárního tranzistoru), čímž si získaly svoji oblíbenost zejména v obvodech pracujících s vysokými proudy, napětími a frekvencemi. V případě navrženého obvodu je použit tranzistor se spínacím napětím V_{GE} (Gate – Emitter) 15 V. Tomu je přizpůsoben navržený pomocný zdroj napětí, kterým je napájen výstup budiče IGBT tranzistoru (viz podkapitola Pomocné napájecí zdroje).

Řídicí část je navržena tak, aby mohla pracovat se síťovým napětím 230 V. Na vstupu je za tímto účelem dimenzovaný filtrační kondenzátor 0,47 μF . Funkci ochranného prvku obvodu zde pak zajišťuje standardní rychlá pojistka F 200 mA 250 V (5 x 20 mm).

5.2 Řídicí část obvodu

Pro zajištění komplementárního spínání obou tranzistorů, resp. spínačů (S1 a S2) je použit optočlen se dvěma integrovanými spínacími elementy, jenž tvoří společně s řídicím mikrokontrolerem základ řídicí části obvodu. Uvnitř tohoto budiče IGBT tranzistorů se dále nachází dvě LED diody, každá pro jeden spínací element, čímž vzniknou dva nezávislé kanály. Tímto způsobem mohou být spínány oba spínače (S1 a S2) zcela nezávisle.



Obr. 21 – Funkční diagram optočlenu [29]

Tab. 4 – Pravdivostní tabulka optočlenu [29]

LED	VO
OFF	LOW
ON	HIGH

Posledním problémem je zajistit, aby každá z LED diod uvnitř optočlenu svítila právě tehdy, když je druhá zhasnuta. Řešením by mohlo být použití dvojice PWM signálů, přičemž jeden z nich by byl v inverzním režimu. Důmyslnějším řešením je použití invertujícího zapojení pomocí dvojice diod s RC filtry, jak je znázorněno ve schématu (Obr. 22). Při logické úrovni HIGH signálu PWM je na katodě první LED diody napětí +5 V, anoda je trvale připojena ke zdroji +5 V, tudíž dioda nesvítí. Katoda druhé LED diody je trvale připojena k digitální zemi, takže logická úroveň HIGH na anodě způsobí její rozsvícení. Při přechodu PWM signálu do logické úrovně LOW dojde k uzemnění katody první diody, čímž se první LED dioda rozsvítí, zatímco u druhé diody bude na obou vývodech nulový potenciál. Viz tabulka (Tab. 5).

Tab. 5 – Pravdivostní tabulka komplementárního zapojení optočlenu [vlastní]

PWM	Anoda 1	Katoda 1	Anoda 2	Katoda 2
HIGH	+5 V	+5 V	+5 V	GND
LOW	+5 V	GND	GND	GND

Přivedením PWM signálu na vstupní část optočlenu odpovídá doba svícení jedné LED diody přímo úměrně střídě PWM signálu, zatímco u druhé LED diody jde o nepřímou úměrnost. Jinými slovy lze říci, že čím déle jedna z diod svítí, tím kratší dobu je druhá vypnuta v rámci jedné periody PWM signálu. Na výstupní straně optočlenu se poté děje tatáž rutina, v podobě aktivace a deaktivace obou výstupů V_O vzhledem k přivedenému napětí mezi piny VCC a VEE (Obr. 21). Tímto napětím je poté buzen IGBT tranzistor. Maximální hodnota napětí se musí podle údajů v katalogovém listu optočlenu pohybovat v intervalu -0,5 až 35 V.

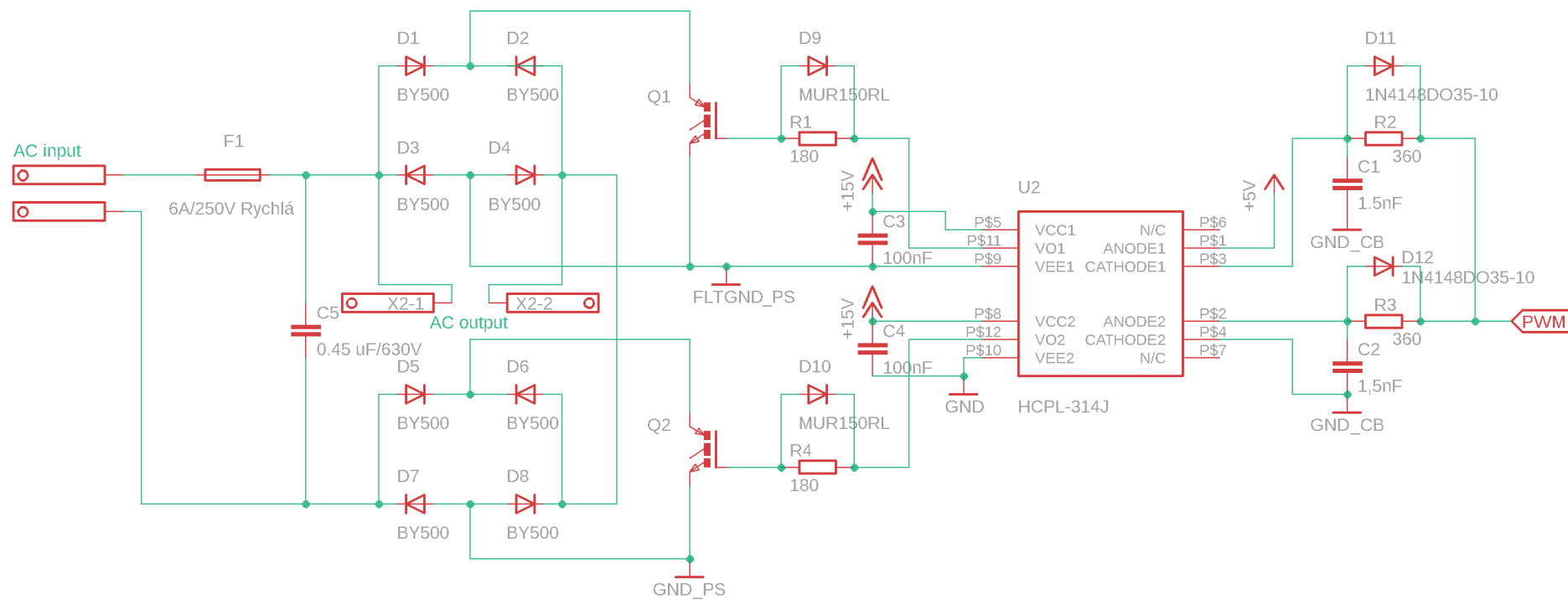
Při prvním zapojení samostatné řídicí části obvodu byla funkce optočlenu testována při nízkém napětí (5 V) pomocí dvou externích LED diod. Pokus měl představovat tzv. zrcadlový efekt, kdy s měnícím se jasnem jedné externí diody musí docházet k téže změně jasu u druhé diody, ačkoli jsou tyto galvanicky odděleny a jsou napájeny nezávisle. Bylo zjištěno, že napětí 5 V mezi vstupy VCC a VEE nestačí k dosažení potřebného proudu bází integrovaného tranzistoru, čímž nemůže dojít k jeho otevření, a tudíž sepnutí výstupu V_O . Problém byl vyřešen použitím vyššího napětí (15 V), kdy již zrcadlový efekt fungoval správně. Ověřeno tímto způsobem bylo také komplementární spínání, kdy rozsvěčováním externí diody na vstupu docházelo ke zhasínání diody na druhém výstupu optočlenu a opačně.

Jako generátor PWM signálu byla použita vývojová platforma Arduino, konkrétně vývojová deska Uno Rev3, která je osazena mikrokontrolerem Atmel ATmega328P. V elektrickém schématu zapojení (Obr. 22) je tento mikrokontroler za účelem jeho budoucí implementace na desce plošných spojů zakreslen již v samostatném zapojení s krystalickým oscilátorem s frekvencí 16 MHz. Napájení tohoto obvodu by mělo být rovněž galvanicky odděleno (viz podkapitola Pomocné napájecí zdroje).

Řídicí část dále obsahuje rozhraní pro ovládání efektivní hodnoty výstupního napětí, resp. řízení průhlednosti připojené elektrochromické fólie odpovídajícího typu. Toto rozhraní je v současné fázi vývoje omezeno na fyzické ovládání pomocí otočného 10k Ω potenciometru. Tento je připojen k 10bitovému analogově-digitálnímu převodníku, který je integrován přímo v řídicím mikrokontroleru. Analogová hodnota aktuální rezistivity potenciometru je převedena do číslicové podoby v rozmezí hodnot 0 až 1023, což při referenčním napětí 5 V odpovídá rozlišení 4,88 mV.

V rámci dalšího vývoje bude zařízení vybaveno rozhraním WIFI v podobě modulu ESP8266. Modul bude komunikovat s mikrokontrolerem skrze sériové rozhraní – zakresleno ve schématu (Příloha P I). Tímto způsobem bude možné řídit průhlednost fólií vzdáleně.

5.3 Elektrické schéma zapojení



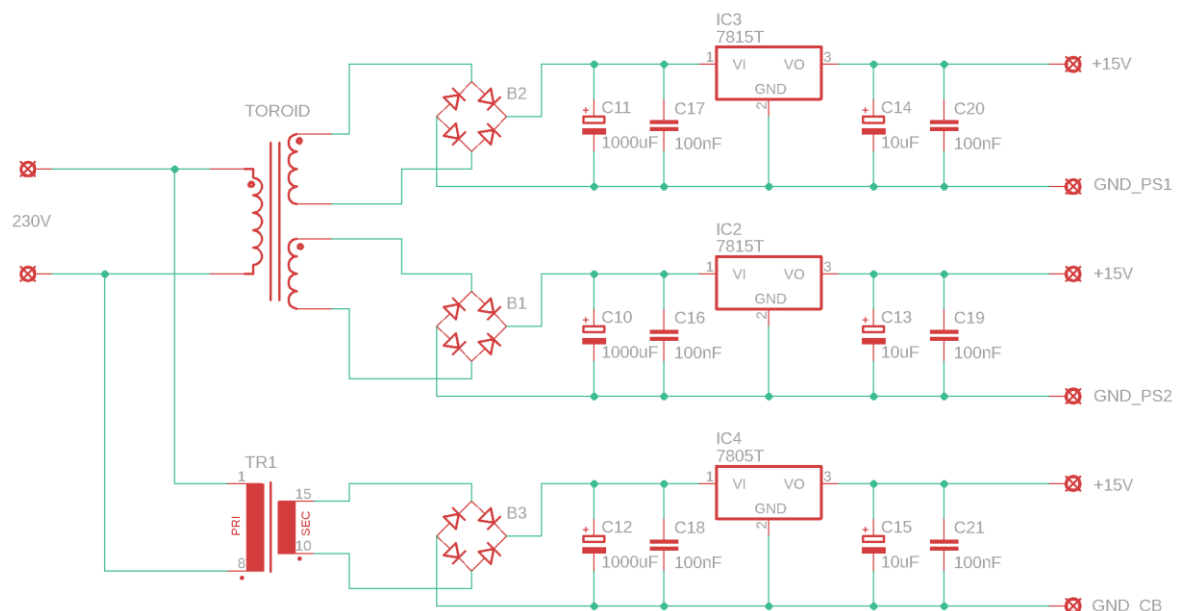
Obr. 22 – Elektrické schéma zapojení [vlastní]

5.4 Pomocné napájecí zdroje

Řešení regulace efektivní hodnoty napětí pomocí metody přímé modulace síťového napětí vyžaduje tři nezávislé napájecí zdroje stejnosměrného napětí. Jak již bylo výše uvedeno v podkapitolách 5.1 a 5.2, budící napětí použitých IGBT tranzistorů je 15 V. Oba spínací prvky jsou řízeny nezávisle a vyžadují proto dva galvanicky oddělené zdroje. Třetí zdroj 5 V slouží pro napájení řídicího mikrokontroleru a je rovněž galvanicky oddělen. Riziko úrazu elektrickým proudem je tímto plným oddělením obou částí obvodu minimalizováno.

Zdroje jsou napájeny dvěma paralelně zapojenými transformátory – klasický a toroidní se dvěma sekundárními vinutími. Jmenovité napětí sekundárních vinutí použitého toroidního transformátoru je 15 V. Klasický transformátor s jedním sekundárním vinutím má výstupní napětí 12 V. Dále jsou všechny tři napájecí větve totožné, liší se pouze použitým napěťovým stabilizátorem, aby bylo dosaženo požadovaných výstupních hodnot napětí (Obr. 23).

Nejdříve je napětí usměrněno Graetzovým můstkem. Následuje filtrace nabíjecí kapacitou a kmitočtová kompenzace nežádoucích kmitů stabilizátoru pomocí bezindukčních keramických kondenzátorů, pro které platí obecně přibližná velikost 100 nF až 1 μ F. Elektrolytické kondenzátory slouží pro filtraci zvlnění výstupního stabilizovaného napětí.



Obr. 23 – Elektrické schéma zapojení pomocných napájecích zdrojů [vlastní]

Ačkoli je pro správnou funkci stabilizátorů nutné zajistit rozdíl mezi napětím na jejich vstupu a výstupu – většinou se udává alespoň 3 V, lze 15V transformátor použít. Je to dáno efektivní hodnotou napětí na sekundárním vinutí a úbytkem napětí na dvou diodách v sérii, kterými

protéká proud vždy v kladné a záporné půlplně. Výsledná velikost usměrněného a vyhlazeného napětí je rovna 19,8 V podle vztahu:

$$U_2 = \sqrt{2} \cdot U_1 - 2 \cdot U_D, \quad (5.1)$$

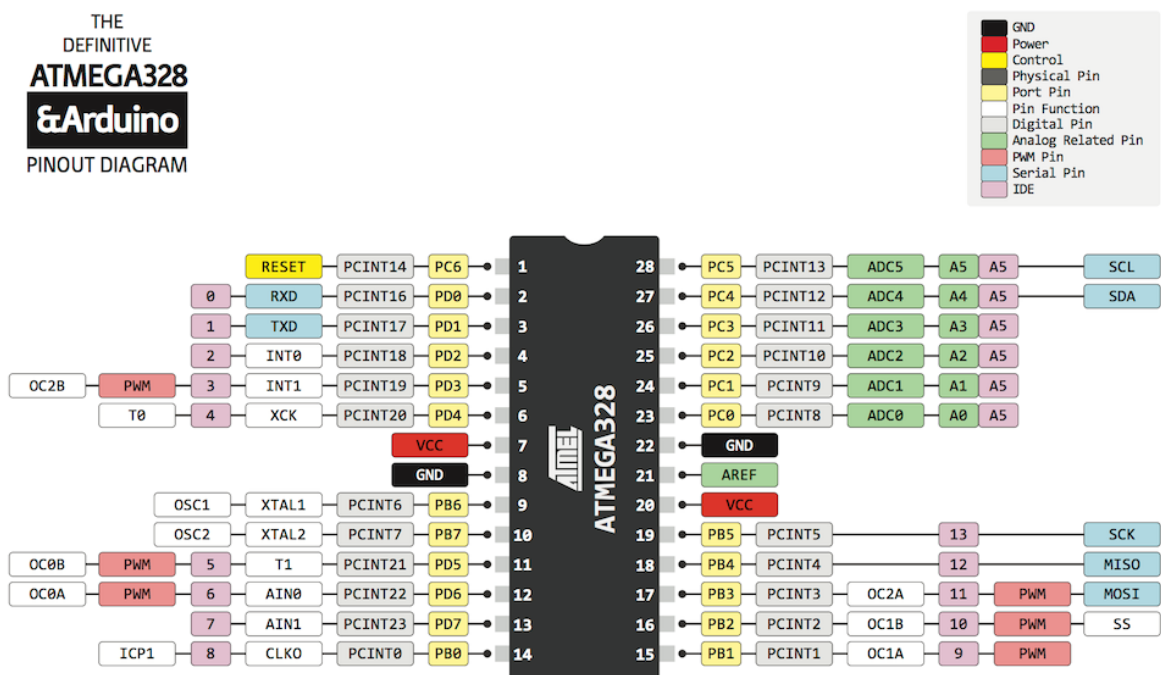
kde U_2 je výsledné napětí po usměrnění a vyhlazení, U_1 je jmenovité napětí sekundárního vinutí transformátoru a U_D úbytek napětí na jedné diodě v sérii (běžně 0,7 V). [30]

Transformátor tedy lze použít, jelikož rozdíl výstupního a vstupního napětí regulátoru je větší než 3 V.

5.5 Použité komponenty

5.5.1 Mikrokontroler Atmel ATmega328P

Mikrokontroler ATmega328P patří do rodiny 8bitových AVR mikropočítačů od společnosti Atmel Corporation. Mikrokontroler je založen na architektuře RISC s rozsáhlou instrukční sadou s 32 registry, které jsou spojeny s aritmetickologickou jednotkou. Rozhraní mikrokontroleru ATmega328P tvoří 28 pinů, jejichž označení je znázorněno na obrázku níže. Žlutě vyznačené názvy odpovídají značení ve schématu (Příloha P I). Červeně jsou vyznačeny piny podporující pulsně šířkovou modulaci. Modře poté piny pro sériovou komunikaci. Fialové číslování odpovídá označení pinů na platformě Arduino UNO.



Obr. 24 – Konfigurace pinů mikrokontroleru ATmega328P [31]

Mikrokontroler ATmega328P je vybaven integrovaným oscilátorem s frekvencí 8 MHz. Podporuje rovněž připojení externího oscilátoru, pomocí kterého je možné zvýšit pracovní frekvenci až na 20 MHz. V případě navrženého zařízení je použit krystal s frekvencí 16 MHz. Na stejné frekvenci většinou pracují rovněž platformy Arduino.

5.5.2 Seznam použitých součástek

Následující tabulka uvádí přehled použitých součástek pro kompletní budoucí zapojení na desce plošných spojů. Dočasně použitá řídicí deska Arduino UNO není v tomto seznamu uvedena.

Tab. 6 – Seznam použitých součástek [vlastní]

Název komponenty	Typ	Hodnota	Množství
Dioda	MUR1100 (spínací)	1 A	2x
Dioda	1N4148TR (spínací)	200 mA	2x
Dioda	BY500/800 (spínací)	800 V / 5 A	8x
Kondenzátor	keramický	1,5 nF	2x
Kondenzátor	keramický	100 nF	8x
Kondenzátor	elektrolytický	1000 μ F	3x
Kondenzátor	elektrolytický	10 μ F	3x
Kondenzátor	svitkový axiální	0,47 μ F	1x
Krystalový oscilátor	HC49US	16 MHz	1x
Mikrokontroler	ATmega328P	-	1x
Mikrospínač	4pinový	-	1x
Optočlen	HCPL-314J	duální	1x
Pojistka	F 5x20 mm (rychlá)	200 mA / 250 V	1x
Pojistkové pouzdro	kabelové	5 x 20 mm	1x
Potenciometr	otočný, lineární	10 k Ω	1x
Rezistor	metalizovaný	180 Ω	2x
Rezistor	metalizovaný	360 Ω	2x
Rezistor	metalizovaný	10 k Ω	1x
Transformátor	toroidní	15 V / 30 VA	1x
Transformátor	jádrový	12 V / 15 VA	1x
Tranzistor	IRG4IBC20UDPbF	$V_{GE} = 15$ V	2x
Vypínač	kolébkový s doutnavkou	250 V / 16 A	1x

6 SOFTWARE REGULÁTORU PRŮHLEDNOSTI

Použitý mikrokontroler ATmega328P se standardně programuje pomocí protokolu ICSP (*In-Circuit Serial Programming*), jenž je založen na sériové komunikaci s nadřazeným systémem. Výhodou je proti starším způsobům programování možnost programování mikropočítače dodatečně bez nutnosti vyjmutí čipu z obvodu a rovněž provádět aktualizace softwaru.

Na trhu je možné najít dvě varianty ATmega328P. Klasickou bez softwaru nebo již z výroby s tzv. bootloaderem. Jedná se o kus softwaru, který je zaveden ihned po připojení napájení a umožňuje zápis do programové paměti skrze sériovou komunikaci. Bootloader se nachází v paměti typu flash, která je vyhrazena pro samotný program o maximální velikosti 32 kB. Bootloader výrazně usnadňuje proces programování a mikrokontroler je možné programovat například pomocí USB rozhraní s odpovídajícím převodníkem – USB/TTL. Zároveň je možné použít jednoduché vývojové prostředí, například Arduino IDE. [32]

6.1 Vývojové prostředí

Jak již bylo nastíněno v úvodu kapitoly, vývojovým prostředím pro implementaci řídicího algoritmu bylo zvoleno jednoduché vývojové prostředí Arduino IDE.



```
Pot_pwm | Arduino 1.8.9
Pot_pwm
// Hlavní smyčka:
void loop() {
  // načtení hodnoty potenciometru:
  pwm = analogRead(pot);

  // výpočet hodnot efektivního napětí a střidy PWM (%):
  float voltage = pwm * (5 / 1023);
  float duty = (float)pwm / 1023 * 100;

  // výpis aktuálních hodnot na sériové rozhraní
  Serial.println((String)"Napeti: "+voltage+"; "+"strida: "+duty);

  // změna rozsahu hodnot ADC převodníku pro přizpůsobení horní hodnotě PWM counteru:
  pwm = map(pwm, 0, 1023, 0, 255);
}

Konec nahrávání.
Projekt zabírá 6376 bytů (19%) úložného místa pro program. Maximum je 32256 bytů.
Globální proměnné zabírají 220 bytů (10%) dynamické paměti, 1828 bytů zůstává pro lokální pr
5 Arduino/Genuino Uno na /dev/cu.usbmodem1421
```

Obr. 25 – Vývojové prostředí Arduino IDE [vlastní]

Základ prostředí Arduino IDE tvoří klasický textový editor s velmi omezeným množstvím funkcí, které však pro aktuální potřeby plně dostačují. Prostředí dále nabízí správu projektů, užitečný monitor sériového rozhraní a základní softwarové knihovny včetně příkladových algoritmů pro začátečníky.

Stojí za zmínku, že k programování AVR mikrokontrolerů lze použít i vyspělejší vývojová prostředí, jako např. Visual Studio IDE od společnosti Microsoft, které nabízí komplexní sadu vývojových nástrojů od pokročilého zvýraznění syntaxe, přes inteligentní dokončování až například po designery webového rozhraní.

6.2 Pulsně šířková modulace

Jedná se o způsob řízení výkonu pomocí diskrétního signálu, který je generován pomocí digitálně-analogového převodníku. Použitý mikrokontroler ATmega328P používá nativně 8bitový převodník s rozlišením 255 úrovní signálu. K nastavení této výstupní úrovně PWM signálu (resp. jeho střídání) lze použít výchozí funkci `AnalogWrite()`, která je součástí základní sady knihoven pro platformu Arduino. [33]

Mikrokontroler však obsahuje převodníků více, z nichž jeden disponuje rozlišením až 16 bitů. Prakticky tak lze dosáhnout vyššího rozlišení – konkrétně až 65535 úrovní signálu.

6.3 Hlavní smyčka řídicího algoritmu

Software mikrokontroleru po inicializaci proměnných běží v nekonečné smyčce, kterou lze popsat následující rutinou:

- Čtení hodnoty resistivity potenciometru pomocí analogově-digitálního převodníku,
- aritmetický přepočítání hodnoty střídání [%] a výpočet RMS napětí [V] PWM signálu,
- výpis aktuálně nastavených hodnot na sériovou linku,
- přizpůsobení rozsahu hodnot A/D převodníku pro rozsah funkce `AnalogWrite()`,
- generování PWM signálu pomocí funkce `AnalogWrite()`,
- časová prodleva 50 ms.

Jedná se prozatím o jednoduchý algoritmus, sloužící pro demonstraci funkce ovládání skrze fyzické rozhraní – potenciometr. V budoucnu se počítá s rozšířením algoritmu související s hardwarovou implementací bezdrátového WIFI rozhraní. Tímto způsobem bude možné ovládat výstupní napětí regulátoru skrze softwarové rozhraní a řídit průhlednost chytré fólie vzdáleně, například skrze mobilní aplikaci či webové rozhraní.

7 TESTOVÁNÍ PROTOTYPU A OŽIVENÍ ZAŘÍZENÍ

7.1 Testování prototypu

Elektrické schéma navrženého regulátoru průhlednosti je již přizpůsobeno pro výrobu desky plošných spojů. Tuto se ve stanoveném časovém horizontu bohužel nepodařilo vytvořit, a proto je obvod dočasně zapojen na zkušebním nepájivém poli. Funkci řídicího mikrokontroleru zastupuje vývojová deska Arduino UNO Rev3. V současném stavu tedy obvod z bezpečnostních důvodů nepracuje se síťovým napětím, aby nemohlo dojít vlivem přechodového odporu k zahřívání studených spojů a následnému požáru nebo úrazu elektrickým proudem. Funkce zařízení však není nijak omezena. Vstupní napětí regulátoru je pouze sníženo pomocí externího transformátoru, který bude za běžného provozu zapojen na výstupu regulátoru. Šasi bude za tímto účelem opatřeno vlastní elektrickou zásuvkou.

Testování zařízení probíhalo postupně, kdy v jednotlivých krocích byla zvlášť ověřena správná funkce jednotlivých částí obvodu při nízkém napětí. Celkově lze rozdělit testování do tří kroků:

1. Test generování PWM signálu,
2. test budiče IGBT tranzistorů,
3. test výkonové části obvodu.

Nejdříve bylo nutné zajistit generování PWM signálu mikrokontrolerem. Za tímto účelem byl vytvořen testovací algoritmus, jenž umožnil pomocí připojeného potenciometru měnit střidu PWM signálu a zároveň odesílat skrze sériové rozhraní údaje o aktuální hodnotě zpět do počítače. Pro fyzickou kontrolu byla na PWM výstup zapojena testovací LED dioda s odpovídajícím předřadným rezistorem.

V druhém kroku musela být otestována správná funkce optočlenu, resp. komplementárního zapojení pro správné buzení IGBT tranzistorů. Za tímto účelem byl proveden výše popsany test zrcadlového efektu (podkapitola Řídicí část obvodu).

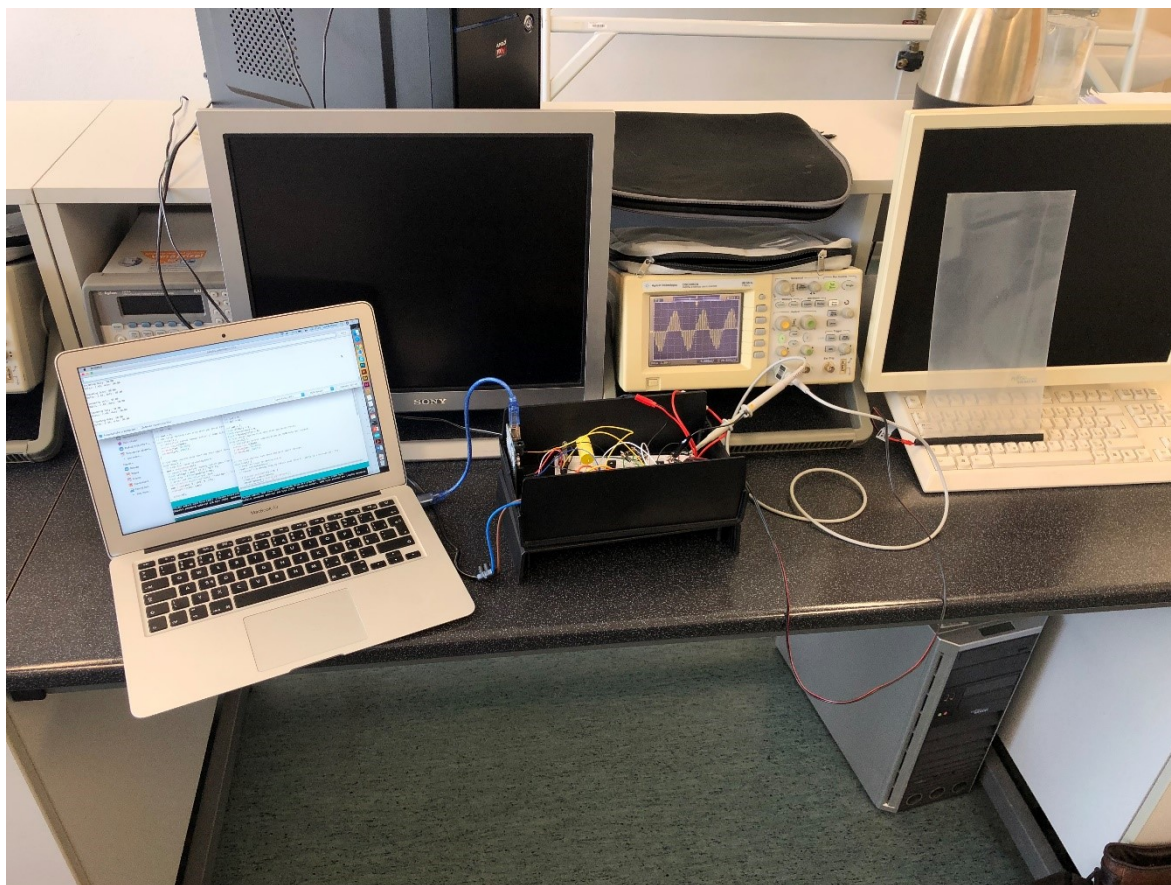
Test výkonové části obvodu proběhl nejdříve v domácích podmínkách za pomoci běžného digitálního multimetru Sinometr M-830B. Tímto byly naměřeny efektivní hodnoty výstupního napětí v rozsahu použitého externího transformátoru, připojeného na vstup regulátoru. Naměřené hodnoty velmi přesně napovídaly správnou funkci regulátoru, nicméně pro jistotu byl proveden závěrečný test průběhu výstupního napětí pomocí osciloskopu.

7.2 Oživení zařízení

Oživení sestaveného zařízení proběhlo v laboratoři C304 na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Před finálním připojením PDLC fólie na výstup regulátoru proběhl finální test pomocí osciloskopu Agilent DSO3062A. Osciloskop disponuje funkcí *auto-scale*, tudíž nebylo třeba manuálně nastavovat časovou základnu a veškeré rozsahy byly nastaveny automaticky.

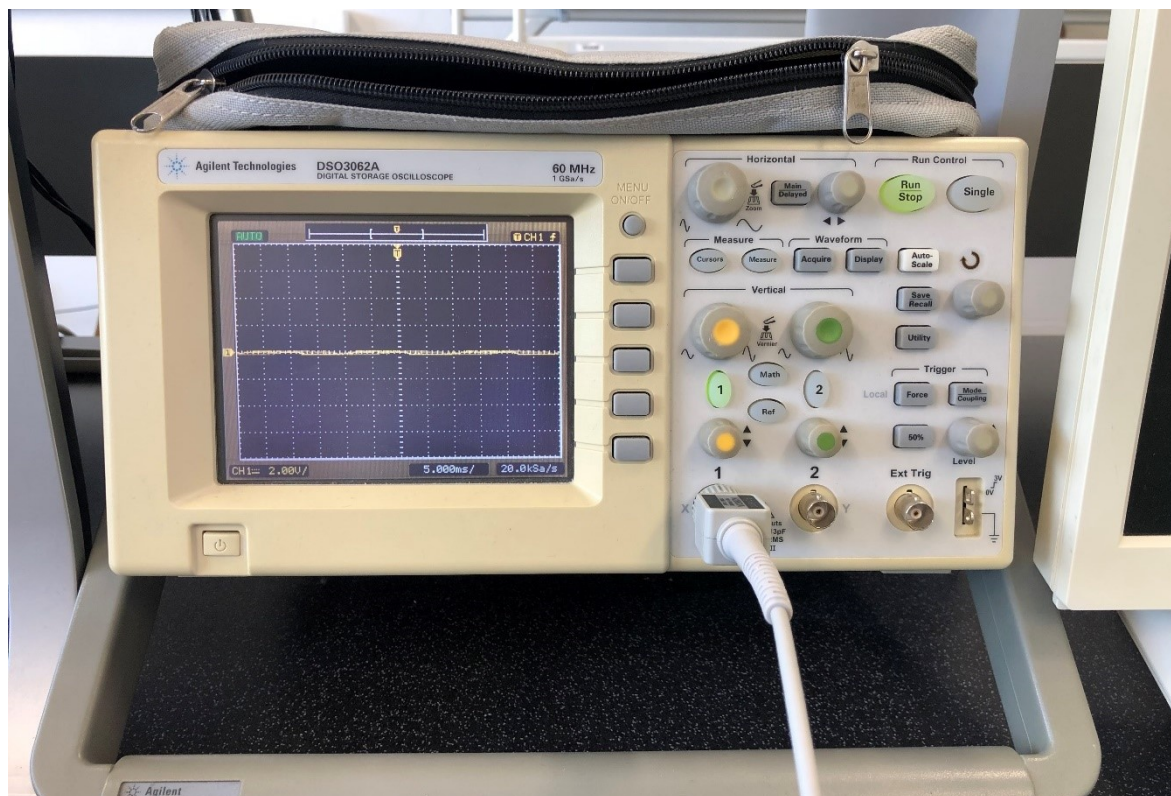
Nejdříve byl pro kontrolu prověřen průběh napětí na vstupu regulátoru, resp. čistý výstup z externího 36V transformátoru. Následně byly prověřeny průběhy napětí na zbylých transformátorech, jednotlivých výkonových tranzistorech, a konečně na výstupu zařízení.

Měření potvrdilo bezproblémový a stabilní chod zařízení po celou dobu měření. Při napětí naprázdno se na výstupu objevuje mírné zvlnění v řádu jednotek až desítek mV. Pravděpodobně se jedná o indukované napětí z toroidního transformátoru. Po připojení zátěže je toto parazitní napětí eliminováno jejím kapacitním charakterem.

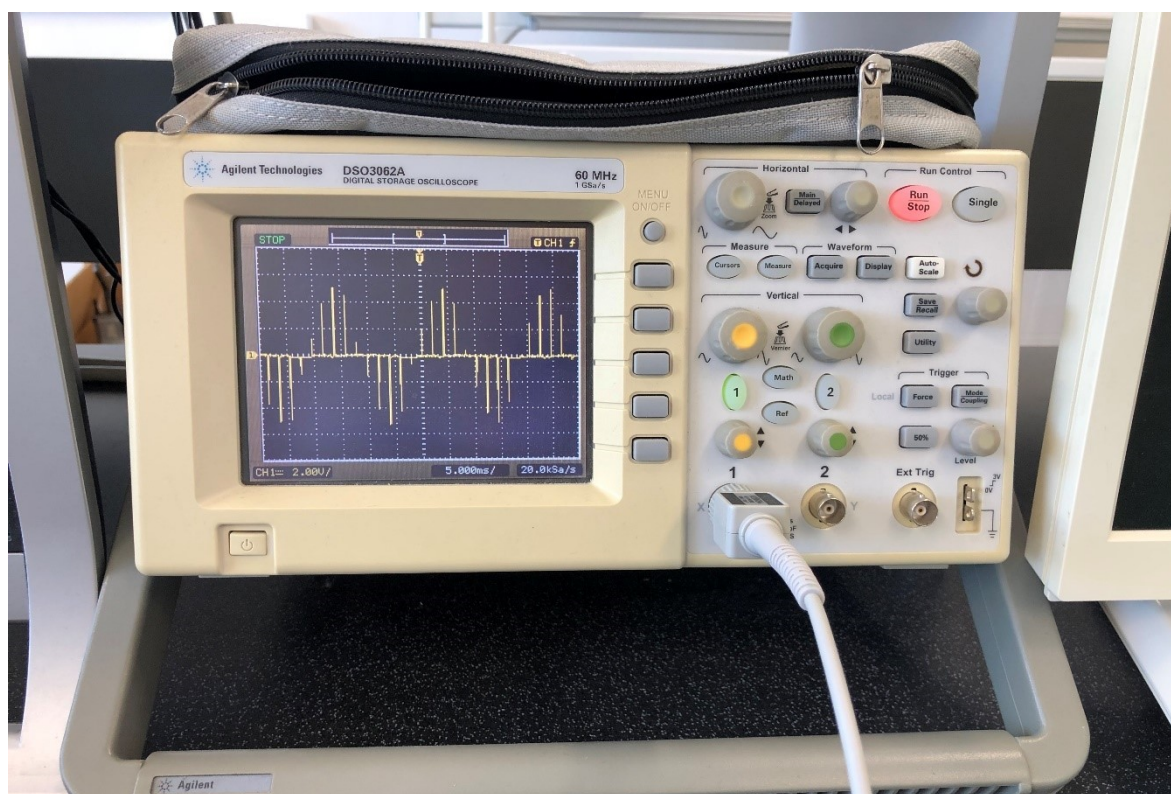


Obr. 26 – Konfigurace měřicího pracoviště v laboratoři C304 na FAI, UTB [vlastní]

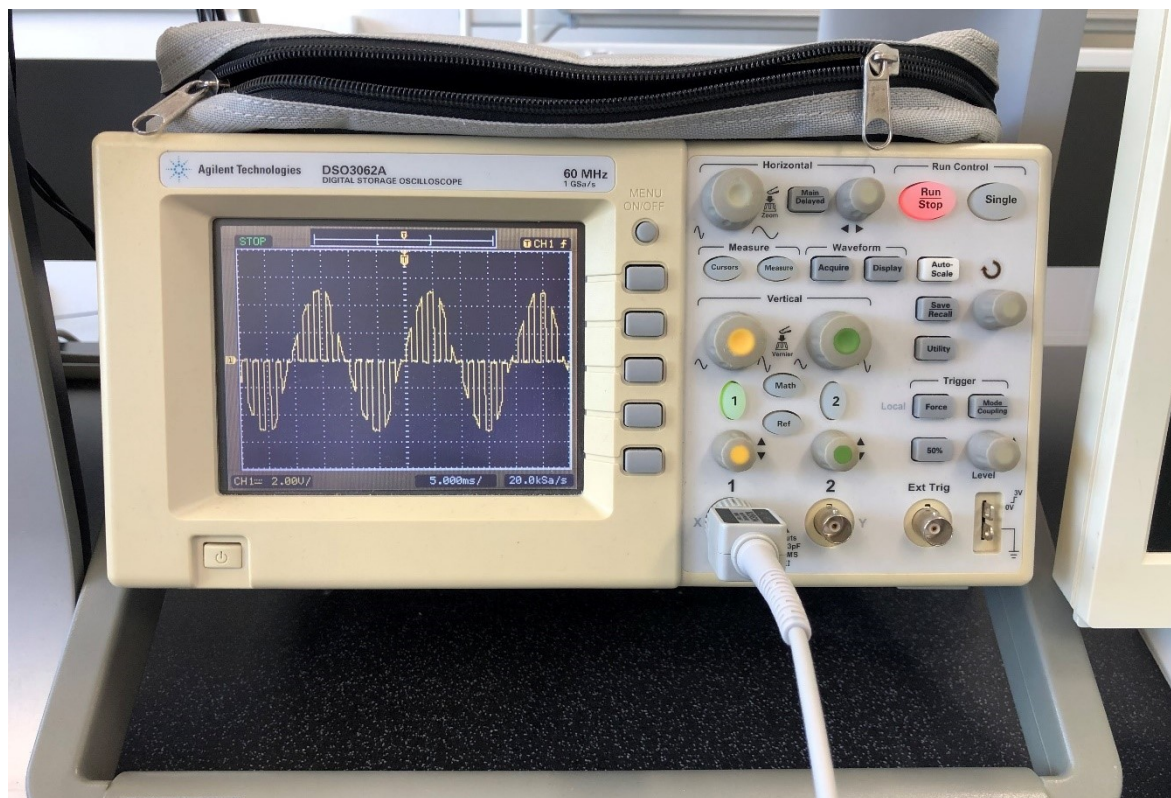
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny průběhy napětí při střídacích 0, 25, 50 a 100 %.



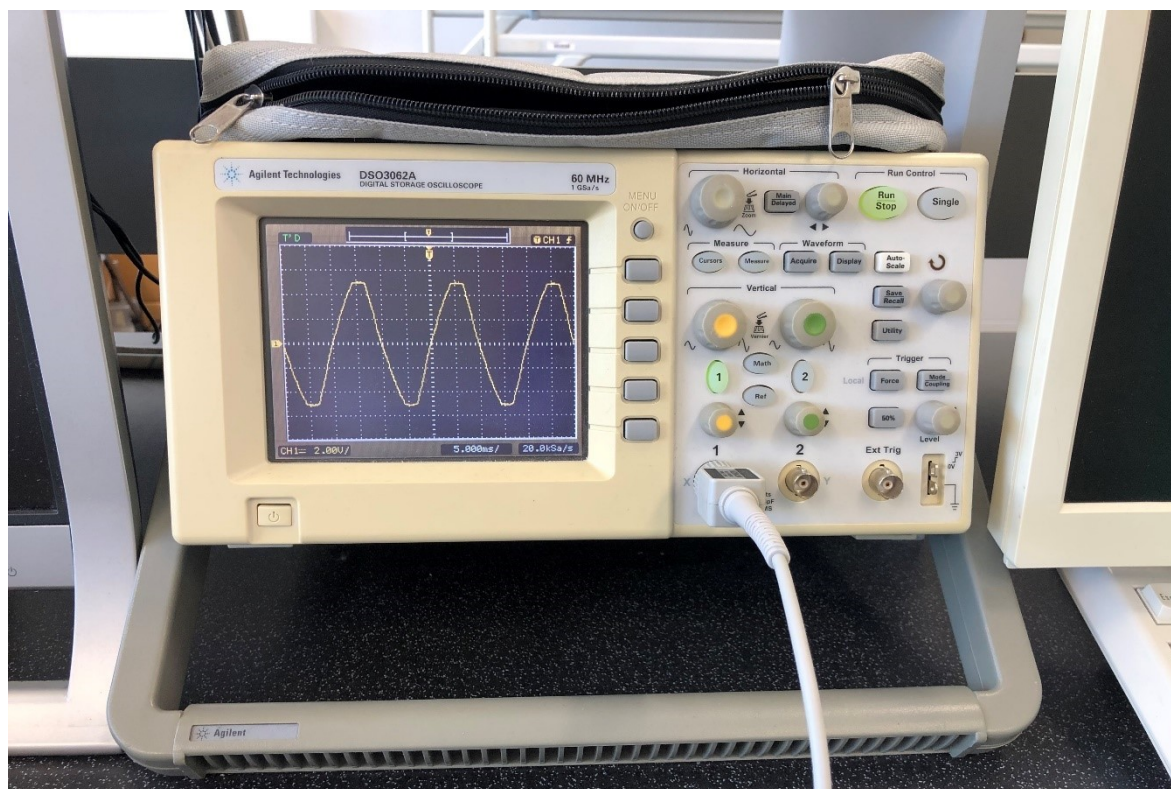
Obr. 27 – Průběh výstupního napětí regulátoru – střída 0 % [vlastní]



Obr. 28 – Průběh výstupního napětí regulátoru – střída 25 % [vlastní]



Obr. 29 – Průběh výstupního napětí regulátoru – střída 50 % [vlastní]



Obr. 30 – Průběh výstupního napětí regulátoru – střída 100 % [vlastní]

8 MĚŘENÍ SVĚTELNÉ PROPUSTNOSTI PDLC FÓLIE

Závěrečný experiment spočíval v ověření množství procházejícího světla skrze PDLC fólii při jednotlivých úrovních její nastavitelné průhlednosti pomocí zkonstruovaného regulátoru. Cílem bylo zmapovat rozsah pracovního napětí fólie za účelem jeho optimalizace.

Změna transparentnosti fólie představuje závislost efektivní hodnoty napětí na množství propuštěného světla. Toto množství je měřitelné fotocitlivými přístroji. Pro účely měření byl použit zapůjčený luxmetr s externí křemíkovou sondou.

8.1 Příprava experimentu

Vzorek PDLC fólie bylo nutné nainstalovat do předem připravené improvizované stínicí komory (Obr. 31), aby množství procházejícího světla nebylo ovlivněno okolním prostředím. Uvnitř této komory byl nainstalován křemíkový snímač, přímo naproti okénka s PDLC fólií. Potřebné kabely byly vyvedeny připraveným otvorem.

Jako zdroj světla bylo použito stolní svítidlo s obyčejnou vláknovou žárovkou o výkonu 60 W. Tento zdroj byl umístěn způsobem, aby maximum vyzářené energie dopadalo kolmo na rovinu PDLC fólie, resp. fotocitlivý snímač umístěný za ní. Zároveň byl zdroj vertikálně i horizontálně vycentrován vzhledem ke středu stínicí komory. Vzdálenost mezi zdrojem světla a komorou byla empiricky stanovena tak, aby výchozí hodnota intenzity činila 100 lx.

Experiment vyžadoval možnost konstantního a přesného ladění střídý PWM signálu, protože ovládání pomocí potenciometru není dostatečně přesné. Za tímto účelem byl upraven řídicí algoritmus, jehož prostřednictvím je možné nastavit fixní hodnotu střídý vzdáleně skrze sériové rozhraní. Tímto způsobem je eliminována potenciální fluktuace napětí vlivem nedokonalosti potenciometru.

8.2 Použité přístroje a pomůcky

- Luxmetr Sonel LXP-1,
- multimetr UNI-T UT139C,
- PDLC fólie 154 x 300 mm,
- světelný zdroj 60 W,
- sestavený regulátor průhlednosti,
- upravený řídicí algoritmus,
- improvizovaná stínicí komora.

8.3 Průběh měření

Měření probíhalo v místnosti 54/209 na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Primárně místnost slouží pro testování optických vlastností bezpečnostních kamer. Stěny místnosti jsou černé, aby pohltily maximum nežádoucího světelného záření. Na základě těchto parametrů místnost poskytla vynikající podmínky pro provedení měření.

Pomocí počítače byla postupně zvyšována střída PWM signálu s krokem 2 %. Luxmetr disponuje vnitřní pamětí pro 100 naměřených hodnot. Bylo tudíž možné ji využít a získaná data extrahovat pomocí přiloženého softwaru. Zároveň byla manuálně odečítána hodnota výstupního napětí regulátoru pomocí připojeného digitálního multimetru.

Výsledky měření byly zpracovány v tabulkovém procesoru MS Excel. Na základě nich byl vytvořen graf závislosti intenzity procházejícího světla na střídě PWM signálu (Obr. 32). Na závěr byla PDLC fólie vyjmuta za účelem zjištění tzv. opacity – poměru mezi intenzitou dopadajícího a propuštěného světla. Opacita zcela čirého materiálu je rovna 1. Úzce spojena je s tímto pojmem rovněž denzita. Je vyjádřena desítkovým logaritmem opacity. Denzita zcela čirého materiálu je tudíž rovna 0.



Obr. 31 – Měření propustnosti světla PDLC fólií při různé úrovni transparentnosti; vlevo 0 %; vpravo 100 % [vlastní]

8.4 Výsledky měření

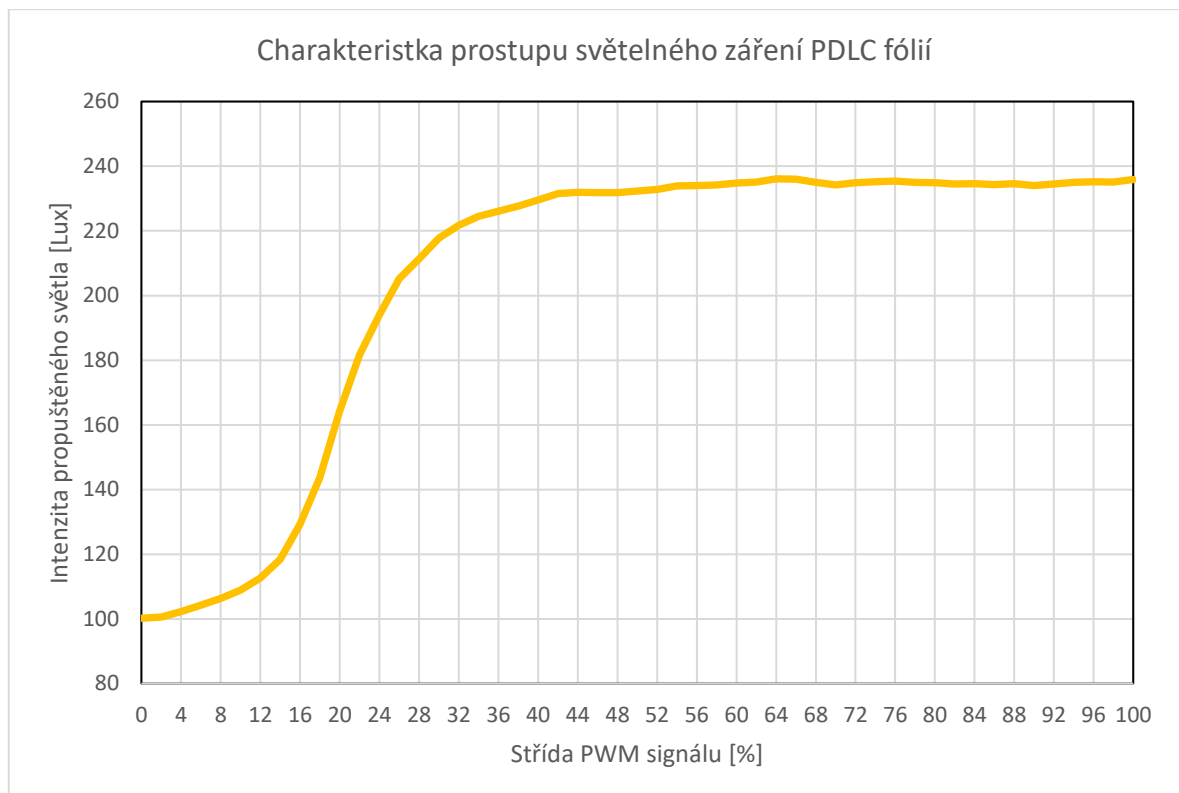
Naměřené hodnoty vykazují dle očekávání proporcionalní závislost střídý PWM signálu vzhledem k efektivnímu napětí na výstupu regulátoru. Intenzita dopadajícího světla bez fólie činila 308,5 lx.

Tab. 7 – Naměřené hodnoty zkoumaných veličin [vlastní]

#	Střída [%]	PWM ef. [V]	Intenzita [lx]	Výstup. nap. [V]	#	Střída [%]	PWM ef. [V]	Intenzita [lx]	Výstup. nap. [V]
1	0	0,00	100,2	0,00	27	52	2,59	232,8	18,76
2	2	0,10	100,6	0,52	28	54	2,69	233,9	19,60
3	4	0,20	102,2	1,20	29	56	2,78	234,0	20,09
4	6	0,29	104,2	1,97	30	58	2,88	234,2	21,29
5	8	0,39	106,3	2,82	31	60	3,00	234,8	21,85
6	10	0,49	108,9	3,57	32	62	3,10	235,1	22,22
7	12	0,59	112,6	4,32	33	64	3,20	236,1	23,18
8	14	0,69	118,4	4,89	34	66	3,29	236,0	23,94
9	16	0,78	129,3	5,94	35	68	3,39	235,0	24,56
10	18	0,88	143,7	6,31	36	70	3,49	234,2	25,55
11	20	1,00	164,3	7,12	37	72	3,59	234,9	25,85
12	22	1,10	181,6	7,91	38	74	3,69	235,2	26,96
13	24	1,20	194,0	8,85	39	76	3,78	235,4	27,62
14	26	1,29	205,2	9,56	40	78	3,88	235,0	28,59
15	28	1,39	211,3	9,99	41	80	4,00	234,9	29,22
16	30	1,49	217,8	10,71	42	82	4,10	234,5	29,49
17	32	1,59	221,7	11,88	43	84	4,20	234,6	30,24
18	34	1,69	224,5	12,59	44	86	4,29	234,3	30,99
19	36	1,78	226,1	12,81	45	88	4,39	234,6	32,23
20	38	1,88	227,7	14,01	46	90	4,49	234,0	32,57
21	40	2,00	229,6	14,39	47	92	4,59	234,5	33,28
22	42	2,10	231,5	15,11	48	94	4,69	235,0	33,98
23	44	2,20	231,9	15,93	49	96	4,78	235,2	34,82
24	46	2,29	231,8	16,50	50	98	4,88	235,1	35,81
25	48	2,39	231,8	17,23	51	100	5,00	235,9	36,50
26	50	2,49	232,3	18,18					

Z tabulky naměřených hodnot byl vytvořen graf charakteristiky prostupu světla skrze PDLC fólii. Žlutá křivka znázorňuje závislost intenzity propuštěného světla na střídě PWM signálu, resp. proporcionálního přírůstku napětí v rozsahu použitého transformátoru (0–36 V).

Křivka tvarově odpovídá červené křivce v grafu závislosti normalizované propustnosti na elektrickém napětí, viz podkapitola 1.4 v teoretické části práce. Lze tudíž téměř s jistotou prohlásit, že se jedná skutečně o technologii PDLC.



Obr. 32 – Graf závislosti intenzity propuštěného světla fólií na střídě PWM signálu [vlastní]

S transparentností materiálů v optice úzce souvisí pojmy opacita, transmitance a denzita. Jedná se o vlastnosti prostředí, které charakterizují intenzitu odraženého, propuštěného či absorbovaného světla vzhledem k referenční hodnotě dopadajícího světla na daný materiál.

Transmitance vyjadřuje poměr mezi intenzitou dopadajícího světla a intenzitou světla propuštěného. V případě plné transparentnosti vzorku PDLC fólie činí transmitance 76,46 %.

Denzita označuje optickou hustotu materiálu a jedná se o dekadicky logaritmus opacity, resp. transmitance. V případě plné transparentnosti vzorku PDLC fólie je denzita rovna 1,88.

Výrobce uvádí transmitanci ve stavu zapnuto větší nebo rovnu 80 %. Rozdíl oproti naměřené hodnotě činí 3,53 %. Výsledek lze interpretovat jako pozitivní vzhledem k možné odchylce měření, která byla zanedbána.

9 DEMONSTRACE VYUŽITÍ CHYTRÝCH FÓLIÍ V PRAXI

Za běžných podmínek se dynamicky stmívatelné fólie aplikují na stávající systém zasklení. Pro názornou demonstraci byl použitý vzorek PDLC fólie aplikován na standardní skleněnou výplň o tloušťce 5 mm. Společně s touto tabulí byl na míru vyroben také dřevěný podstavec, simulující spodní rám otvorové výplně. Pomocí dvojice těsnících proužků vznikl dilatační prostor pro měděné elektrody s přiletovanými vodiči.



Obr. 33 – Dokončený výrobek (stav zapnuto) [vlastní]



Obr. 34 – Dokončený výrobek (stav vypnuto) [vlastní]

Rozměry regulátoru bude možné výrazně zredukovat použitím SMD součástek, osazených na desce plošných spojů, která prozatím nebyla vytvořena. K výrazné úspoře velikosti, a hlavně hmotnosti zařízení přispěje také návrh spínaného interního zdroje regulátoru, což povede rovněž ke snížení spotřeby elektrické energie zařízení jako celku. Výkon zařízení ovlivněn nebude.

Příkladem aplikace chytrých fólií mohou být výlohy s luxusním zbožím, které zejména v době nepřítomnosti obsluhy (typicky v nočních hodinách) přitahují nežádoucí pozornost kriminálních živlů. Uplatnění nachází rovněž v muzeích, kde slouží k ochraně vzácných exponátů před přímým slunečním i umělým světlem. Exponát je zviditelněn v okamžiku přiblížení osoby do definované zóny. Po uplynutí stanoveného časového intervalu dochází k automatickému návratu do výchozího neprůhledného stavu.

Nevšední způsob uplatnění našly chytré fólie také ve vozidlech singapurské nadzemní dráhy (Bombardier Innovia APM 100). Ta vede v úrovni bytových jednotek a apartmánů. Pomocí zamlžení okenních výplní soupravy je chráněno soukromí obyvatelů před zraky cestujících. Jakmile drážní vozidlo opustí danou oblast, okna jsou automaticky navracena do výchozího transparentního stavu.

V dohledné době lze očekávat tržní expanzi v oblasti využití systémů dynamického zasklení, zejména kvůli rostoucí tendenci zvyšování ochrany soukromí a rozvoji v oblasti řízení tepelných zisků inteligentních budov. Významným činitelem jsou rovněž rostoucí požadavky na bezpečnost a svoji roli hraje i nezaměnitelný estetický faktor.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo přinést ucelený přehled o technologii elektrochromických fólií, resp. systémech dynamického zasklení, způsobu řízení jejich průhlednosti a možnostech jejich aplikace v průmyslu komerční bezpečnosti i mimo něj. Inspirace v zahraničí společně se značně omezenými volně dostupnými zdroji informací v dané oblasti vedla k myšlence vlastního návrhu a konstrukce regulátoru průhlednosti těchto fólií. Hlavním přínosem jsou zejména faktory týkající se ochrany soukromí, optimalizace světelných podmínek a tepelných zisků v budovách, bezpečnost a nezaměnitelný futuristický design.

V teoretické části byla popsána východiska a princip činnosti elektrochromických fólií se zaměřením na fyzikální aspekty spojené s objevem tekutých krystalů a jejich využití při procesu výroby. Dále byl zpracován přehled vývojových etap chytrých fólií, jejich druhů a oblastí využitelnosti se zaměřením na průmysl komerční bezpečnosti.

V praktické části byla ověřena možnost řízení průhlednosti fólie typu PDLC. Provedený experiment potvrdil závislost intenzity ztmavení fólie na velikosti dodaného střídavého napětí. Problém spočíval v nalezení efektivního způsobu řízení střídavého napětí pomocí mikrokontroleru v rozsahu 0 až 100 %. Zvolena byla metoda přímé modulace síťového napětí.

Hardwarové řešení regulátoru je založeno na principu pulsně šířkové modulace. Elektrický obvod je rozdělen na řídicí a výkonovou část, které jsou navzájem galvanicky odděleny. Řídicí část obsahuje mikrokontroler, který slouží jako generátor PWM signálu. Výkonová část se stará o spínání výstupního napětí. Tímto způsobem bylo dosaženo schopnosti měnit efektivní hodnotu výstupního napětí na základě změny střídavy PWM signálu.

V rámci oživení prototypu zařízení byly provedeny testy průběhu výstupního napětí pomocí osciloskopu. Dále byl proveden závěrečný experiment s cílem zmapování charakteristiky prostupu světla skrze PDLC fólii s využitím luxmetru.

Na závěr byl použitý vzorek PDLC fólie aplikován na skleněnou tabuli vyrobenou na míru. Účelem bylo co nejlépe přiblížit demonstraci využití fólie podmínkám reálného prostředí.

K plánovaným vylepšením patří vytvoření desky plošných spojů, doplnění funkce ochrany proti zkratu, rozšíření uživatelského rozhraní o bezdrátovou komunikaci prostřednictvím WIFI, vytvoření webového rozhraní a implementace pokročilejšího řídicího algoritmu. Zdroje s lineárními stabilizátory budou nahrazeny spínanými zdroji s vysokou účinností a minimem vyzařovaného tepla.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *The Third Dimension*. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2002. ISBN 978-0854046607.
- [2] *VESMÍR* [online]. 1994, 1994(73) [cit. 2019-04-04]. ISSN 1214-4029.
- [3] SVOBODA, J. a M. GLOGAROVÁ. *Kapalné krystaly* [online]. In: . Ústav organické chemie a biochemie [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/6795544/5-kapalne-krystaly>
- [4] SMOLOVÁ, Petra. *Kapalné krystaly*. Olomouc, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Fakulta přírodovědecká, Katedra experimentální fyziky.
- [5] SENYUK, B. Liquid Crystals: a Simple View on a Complex Matter. In: *Kent State University* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://www.personal.kent.edu/~bisenyuk/liquidcrystals/maintypes.html>
- [6] *Polymer dispersed liquid crystal elastomers* [online]. Ljubljana, 2018 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2017_2018/Jernej_Cernigoj_PDLCE.pdf. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko.
- [7] SINGH, Shri. Phase transitions in liquid crystals. In: *Physics Reports* [online]. 2000, 324(2-4), s. 107-269 [cit. 2019-05-07]. DOI: 10.1016/S0370-1573(99)00049-6. ISSN 03701573. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0370157399000496>
- [8] PANCHATCHARAM, U. *Ordering Properties of Oligomeric Columnar Discotic Liquid Crystals* [online]. Wageningen, Nizozemsko, 2015 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://edepot.wur.nl/361164>. Dizertační. Wageningen University.
- [9] JAKLI, Antal. *Electro-optical devices from banana shaped liquid crystals*. 2001. USA. US 2004.0033321A1. Uděleno 19.2.2004. Zapsáno 26.10.2001. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US20040033321>
- [10] How to Evaluate Smart Glass and Liquid Crystal Switchable Film. In: *Scienstry* [online]. Richardson, USA: Scienstry, 2018 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.scienstry.us/How%20to%20evaluate%20smart%20glass%20and%20liquid%20crystal%20switchable%20film.pdf>
- [11] Look at Smart Glass in a Whole New Way. In: *Scienstry* [online]. Richardson, USA: Scienstry, 2014 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.scienstry.us/Look%20at%20Smart%20Glass%20in%20a%20Whole%20New%20Way.pdf>
- [12] Electrical-Optical Curves. In: *Scienstry* [online]. Richardson (USA): Scienstry, 2012 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.scienstry.us/Curves%202012.pdf>
- [13] MOHELNÍKOVÁ, J., Fasádní skla a jejich tepelně a světelně technické vlastnosti, článek *Vytápění, větrání, instalace*, ISSN 1210-1389, ČVUT, Praha, 2007

- [14] CASINI, M. Smart windows for energy efficiency of buildings. In: *International Journal of Civil and Structural Engineering* [online]. Institute of Research Engineers and Doctors, USA, 2014, s. 273-281 [cit. 2019-05-05]. ISBN 978-1-63248-030-9. ISSN 2372-3971. Dostupné z: https://www.seekdl.org/assets/pdf/20141111_063159.pdf
- [15] WOODFORD, Chris. "Smart" windows: electrochromic glass. Explain That Stuff [online]. 2018, 5.12.2018 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/electrochromic-windows.html>
- [16] LIBERTTO, John. *ELECTROCHROMIC GLASS CONTROL DEVICE*. 2005. USA. US 7,375,871 B2. Uděleno 20.5.2008. Zapsáno 27.10.2005. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US7375871B2>
- [17] BONSOR, Kevin. *How Smart Windows Work*. In: How Stuff Works [online]. Atlanta, 2001 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://home.howstuffworks.com/home-improvement/construction/green/smart-window.htm>
- [18] Polymer dispersed liquid crystals (PDLCs). In: *CMMPE - University of Cambridge* [online]. Cambridge (Massachusetts), 2007 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: http://www-eng.cam.ac.uk/CMMPE/res_mat_pdlc.html
- [19] *Liquid Crystal Materials and Turnable Devices for Optical Communications* [online]. Orlando (Florida), 2005 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://etd.fcla.edu/CF/CFE0000485/Du_Fang_200505_PhD.pdf. Dizertační. University of Central Florida.
- [20] ELLAHI, M. a M. Y. RAFIQUE. Electro-optical properties of PDLC films using diethylenetriamine (DETA) hardener. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals* [online]. 2016, 638(1), s. 103-110 [cit. 2019-05-11]. DOI: 10.1080/15421406.2016.1222037. ISBN 1542-1406. ISSN 1542-1406. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15421406.2016.1222037>
- [21] VERGAZ, R., J. PENA, D. BARRIOS, I. PÉREZ a J. TORRES. Electrooptical behaviour and control of a suspended particle device. *Opto-Electronics Review* [online]. 2007, 15(3) [cit. 2019-05-11]. DOI: 10.2478/s11772-007-0013-9. ISSN 1896-3757. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/oere.2007.15.issue-3/s11772-007-0013-9/s11772-007-0013-9.xml>
- [22] MOSKOWITZ, Jay. *INTELLIGENT SPD CONTROL APPARATUS WITH SCALABLE NETWORKING CAPABILITIES FOR WINDOW AND MULTIMEDIA APPLICATIONS*. 2006. EP 1 929 701 B1. Uděleno 1.8.2018. Zapsáno 8.9.2006. Dostupné také z: <http://www.spdcontrols.com/images/European%20Patent%20Published%202018-08-01%20EP1929701B1.pdf>
- [23] Waiting area. In: *Nordea Bank* [online]. Cambridge (Massachusetts), [2018] [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.theworkspaceconsultants.com/wp-content/uploads/2013/02/Waiting-Area-2.jpg>
- [24] Smart glass used in Boeing 787 to replace window shades. In: *Lifewire* [online]. 2018 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.lifewire.com/smart-glass-4171874>

- [25] Gauzy LCG® - Liquid Crystal Glass Partitions in Hospitals. In: *Youtube* [online]. 24.9.2017 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Cvy93eQTi40>
- [26] *SMART GLASS • SMART PDLC FILM*. Shanghai City, China, 2018.
- [27] *ST Sinewave Dimmers: Technology Briefing*. Dallas. Dostupné také z: http://www.theatre crafts.com/archive/documents/sinewave_dimmer_technology.pdf
- [28] CATSOULIS, John. *Designing embedded hardware*. 2nd ed. Sebastopol, CA: O'Reilly, c2005. ISBN 05-960-0755-8.
- [29] *HCPL-314J: Datasheet*. Kalifornie, 2011. Dostupné také z: <http://www.farnell.com/datasheets/1266118.pdf>
- [30] HUSÁK, Miroslav. *Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku: přednášky*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3398-8.
- [31] ATmega328 Pinout Diagram. In: *ArduinoExperts* [online]. 2013 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://jobs.arduinoexperts.com/2013/03/02/arduino-atmega-pinout-diagrams/>
- [32] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0110-1.
- [33] BANZI, Massimo. *Getting Started with Arduino*. 2nd ed. Farnham: O'Reilly, 2011. ISBN 9781449309879.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AC	<i>Alternating Current</i> – střídavý proud.
AVR	Označení pro rodinu 8 bitových mikročipů od firmy Atmel.
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i> – bipolární tranzistor řízený proudem báze.
ICSP	<i>In-Circuit Serial Programming</i> – programování mikrokontrolerů v obvodu.
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> – vývojové prostředí.
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> – tranzistor s izolovaným hradlem.
ITO	<i>Indium-Tin Oxide</i> – oxidy india a cínu (vodivá transparentní vrstva).
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> – displej z tekutých krystalů.
LCMD	<i>Liquid Crystal Microdroplet Display</i> – displej z mikrokapiček tek. krystalů.
MOS-FET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> – polem řízený tranzistor.
NCAP	<i>Nematic Curvilinear Aligned Phase</i> – Zakřivená nematická fáze.
NPD-PDLC	<i>Non-Linear Polymer Dispersed Liquid Crystal Display</i> .
OLED	<i>Organic Light-Emitting Diode</i> – luminiscenční dioda s organickým materiálem.
PDLC	<i>Polymer Dispersed Liquid Crystal</i> – tekuté krystaly rozptýlené v polymeru.
PSLC	<i>Polymer-Stabilised Liquid Crystal</i> – polymerem stabilizované tekuté krystaly.
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> – pulsně šířková modulace.
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i> – architektura redukované instrukční sady.
RMS	<i>Root Mean Square</i> – efektivní hodnota.
SMD	<i>Surface Mount Device</i> – součástky určené pro povrchovou montáž.
SPD	<i>Suspended-Particles Device</i> – technologie využívající suspenzi pevných částic.
SSR	<i>Solid State Relay</i> – polovodičové relé.
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> – celkové harmonické zkreslení.
TN	<i>Twisted Nematic</i> – spirálovitě stáčivé (tekuté krystaly).
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – univerzální sériová sběrnice.
UV	<i>Ultra Violet</i> – ultra fialové (světlo).

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Rozdělení tekutých krystalů	13
Obr. 2 – A) tyčinkovité, B) diskotické, C) lomené tekuté krystaly	14
Obr. 3 – Schematické znázornění rozvolňování krystalické mřížky	14
Obr. 4 – Schematické znázornění odlišných typů kolumnární fáze	16
Obr. 5 – Obecná struktura lomených tekutých krystalů	17
Obr. 6 – Graf závislosti optického zamlžení na elektrickém napětí	20
Obr. 7 – Graf závislosti normalizované propustnosti na elektrickém napětí.....	21
Obr. 8 – Rozdělení chytrých fólií	22
Obr. 9 – Elektrochromické materiály (výchozí stav).....	25
Obr. 10 – Elektrochromické materiály (stav zapnuto).....	26
Obr. 11 – Schéma vrstev PDLC fólie	27
Obr. 12 – Schéma vrstev SPD fólie	29
Obr. 13 – Využitelnost chytrých fólií vzhledem k vlastnostem prostředí	31
Obr. 14 – Příklad aplikace elektrochromických fólií v bankovních institucích	32
Obr. 15 – Příklad aplikace elektrochromických fólií v dopravě (Boeing 787).....	33
Obr. 16 – Příklad aplikace elektrochromických fólií ve zdravotnictví.....	34
Obr. 17 – Fázové řízení na náběžné (vlevo) a sestupné (vpravo) hraně.....	39
Obr. 18 – PWM regulace střídavého napětí (střída 50 %).....	40
Obr. 19 – Blokové schéma navrhnutého řešení regulátoru průhlednosti.....	42
Obr. 20 – Graetzův můstek v zapojení s IGBT tranzistorem ve funkci spínače.....	43
Obr. 21 – Funkční diagram optočlenu	44
Obr. 22 – Elektrické schéma zapojení	46
Obr. 23 – Elektrické schéma zapojení pomocných napájecích zdrojů	47
Obr. 24 – Konfigurace pinů mikrokontroleru ATmega328P.....	48
Obr. 25 – Vývojové prostředí Arduino IDE	50
Obr. 26 – Konfigurace měřicího pracoviště v laboratoři C304 na FAI, UTB	53
Obr. 27 – Průběh výstupního napětí regulátoru – střída 0 %.....	54
Obr. 28 – Průběh výstupního napětí regulátoru – střída 25 %.....	54
Obr. 29 – Průběh výstupního napětí regulátoru – střída 50 %.....	55
Obr. 30 – Průběh výstupního napětí regulátoru – střída 100 %.....	55
Obr. 31 – Měření propustnosti světla PDLC fólií při různé úrovni transparentnosti; vlevo 0 %; vpravo 100 %	57

Obr. 32 – Graf závislosti intenzity propuštěného světla PDLC fólií na střídě PWM signálu	59
Obr. 33 – Dokončený výrobek (stav zapnuto).....	60
Obr. 34 – Dokončený výrobek (stav vypnuto)	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Fyzické parametry testovaného vzorku PDLC fólie.....	37
Tab. 2 – Optické parametry testovaného vzorku PDLC fólie.....	37
Tab. 3 – Elektrické parametry testovaného vzorku PDLC fólie.....	37
Tab. 4 – Pravdivostní tabulka optočlenu	44
Tab. 5 – Pravdivostní tabulka komplementárního zapojení optočlenu.....	44
Tab. 6 – Seznam použitých součástí	49
Tab. 7 – Naměřené hodnoty zkoumaných veličin	58

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Kompletní elektrické schéma regulátoru včetně napájecích zdrojů.
- P II Dokumentační CD s elektronickou verzí diplomové práce, software pro mikropočítač a elektronická verze elektrických schémat zapojení .

PŘÍLOHA P I: KOMPLETNÍ ELEKTRICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ

