



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH KALIBRAČNÍHO BOXU

DESIGN OF THE CALIBRATION BOX

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Šácha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Škoda, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Tomáš Šácha

ID: 195693

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh kalibračního boxu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte box osazený různými světelnými zdroji
2. Panel nasimulujte v některém ze simulačních nástrojů
3. Panel sestavte, oživte a proveďte kontrolní měření

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího semestrální práce

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá popisem základních fotometrických veličin, světelných zdrojů a jejich parametrů. Taktéž je v práci popsán jasový analyzátor LumiDISP, pro který je kalibrační box navrhován. V další části diplomové práce je řešen návrh kalibračního boxu v programu Inventor a později simulace kalibračního boxu v programu Ansys Speos. Simulace v programu Ansys Speos vedli k určení počtu světelných zdrojů v kalibračním boxu, jež pak byli použity pro výrobu. Práce dále popisuje postupy a dílčí části návrhu a výroby kalibračního boxu, včetně jeho oživení a odzkoušení.

Klíčová slova

Kalibrační box, Světelné zdroje, Světlo, Jasový analyzátor, Inventor, Ansys Speos, Eagle Autocad.

Abstract

The diploma thesis deals with the description of basic photometric quantities, light sources and their parameters. The work also describes the LumiDISP luminance analyzer, for which the calibration box is designed. The next part of the diploma thesis deals with the design of the calibration box in the Inventor program and later the simulation of the calibration box in the Ansys Speos program. The simulations in Ansys Speos led to the determination of the number of light sources in the calibration box, which were then used for production. The work also describes the procedures and partial parts of the design and production of the calibration box, including its revitalization and testing.

Keywords

Calibration box, Light sources, Light, Brightness analyzer, Inventor, Ansys speos.

Bibliografická citace

ŠÁCHA, Tomáš. *Návrh kalibračního boxu* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142897>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Škoda.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Tomáš Šácha</i>
VUT ID studenta:	<i>195693</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Návrh kalibračního boxu</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Škodovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Také bych rád poděkoval panu Ing. Alexandru Otáhalovi Ph.D. za konzultace a osazení DPS.

V Brně dne: 24. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
ÚVOD	13
1. ZADÁNÍ PRÁCE	14
1.1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VELIČINY	14
1.1.1 Světelný tok	14
1.1.2 Svítivost.....	15
1.1.3 Osvětlenost.....	15
1.1.4 Prostorový úhel.....	16
1.1.5 Jas	16
2. SVĚTELNÉ PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	17
2.1 SVĚTELNÉ ZDROJE.....	17
2.1.1 Parametry světelných zdrojů.....	18
2.1.2 Žárovky	20
2.1.3 Halogenové žárovky.....	21
2.1.4 Zářivky a kompaktní zářivky	21
2.1.5 Indukční výbojky	22
2.1.6 Vysokotlaké rtuťové výbojky	22
2.1.7 Nízkotlaké sodíkové výbojky.....	23
2.1.8 Vysokotlaké sodíkové výbojky	24
2.1.9 Halogenidové výbojky.....	24
2.1.10 Xenonové výbojky.....	25
2.1.11 Plazmový světelný zdroj	25
2.1.12 Světelné diody – LED	26
2.2 JASOVÝ ANALYZÁTOR.....	27
2.3 DIFUZNÍ NÁTĚR	28
3. NÁVRH KALIBRAČNÍHO BOXU.....	29
3.1 NÁVRH SAMOTNÉHO BOXU	29
3.1.1 První návrh boxu.....	31
3.1.2 Druhý návrh boxu	32
3.1.3 Finální návrh boxu.....	35
3.2 SIMULACE SPEOS	37
3.2.1 Ansys Speos.....	37
3.2.2 Simulace prvotního návrhu	39
3.2.3 Simulace počtu LED diod	39
3.2.4 Ověření počtu diod na novém modelu.....	43
3.3 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	46
3.3.1 Eagle Autodesk.....	46
3.4 NÁVRH KOMUNIKACE BOXU A MĚŘENÍ TEPLoty	53
4. REALIZACE KALIBRAČNÍHO BOXU.....	56

4.1	VÝROBA KALIBRAČNÍHO BOXU	56
4.2	KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ KALIBRAČNÍHO BOXU	57
4.3	KONSTRUOVÁNÍ BOXU A ZAPOJENÍ.....	58
5.	OŽIVENÍ A TESTOVÁNÍ BOXU	62
5.1	OŽIVENÍ BOXU.....	62
5.2	TESTOVÁNÍ KALIBRAČNÍHO BOXU	65
6.	ZÁVĚR.....	68

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

DPS	Deska plošných spojů
LED	Dioda, která emituje světlo
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
LDA	Jasový analyzátor

Symboly:

l	Vzdálenost	[m]
r	Poloměr	[m]
t	Doba životnosti	[h]
A	Plocha	[m ²]
E	Osvětlenost	[lx]
I	Svítivost	[cd]
L	Jas	[cd/m ²]
I	Proud	[A]
P	Výkon	[W]
U	Napětí	[V]
Ra	Index podání barev	[-]
Tc	Teplota chromatičnosti	[K]
η	Měrný výkon	[lm/W]
Φ	Světelný tok	[lm]
Ω	Prostorový úhel	[sr]
$V(\lambda)$	Poměrná světelná účinnost	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Křivka $V(\lambda)$	14
1.2	Osvětlenost na ploše a definice osvětlenosti bodového zdroje	15
1.3	Zobrazení prostorového úhlu	16
2.1	Třídění světelných zdrojů	17
2.2	Žárovka a příklad jejího spektra	21
2.3	Lineární zářivka a příklad jejího spektra	22
2.4	Indukční výbojka Osram Endura a Philips QL	22
2.5	Vysokotlaká rtuťová výbojka a příklad jejího spektra	23
2.6	Nízkotlaká sodíková výbojka a příklad jejího spektra	23
2.7	Vysokotlaká sodíková výbojka a příklad jejího spektra	24
2.8	Halogenidová výbojka a příklad jejího spektra	25
2.9	Xenonová výbojka a plazmový světelný zdroj	26
2.10	Světelná dioda-LED [1], [3]	27
2.11	Jasový analyzátor LumiDISP – LDA	28
3.1	Pracovní prostředí Autodesk Inventor Professional 2021	30
3.2	Náhled prvotního návrhu světelného boxu	31
3.3	Náhled prvotního návrhu světelného boxu s doplňujícími úpravami	32
3.4	Náhled světelného boxu v provedení šestihranu	33
3.5	Náhled rozmístění prvků na návrhu kalibračního boxu	33
3.6	Náhled kalibračního boxu sestaveného z profilů	34
3.7	Náhled konstrukce finálního návrhu boxu	35
3.8	Náhled uspořádání a vybavení finální verze boxu	36
3.9	Pracovní prostředí Ansys Speos s navrhovaným kalibračním boxem	38
3.10	Simulace jednoho světelného zdroje, v prvotním návrhu kalibračního boxu	39
3.11	Simulace v kalibračním boxu pro potřebný počet LED diod	40
3.12	Simulace v kalibračním boxu pro osvětlenost na vzorcích při použití červených diod a umístění DPS na strany boxu	44
3.13	Simulace v kalibračním boxu pro osvětlenost na vzorcích při použití zelených led diod	44
3.14	Zobrazení osvětlenosti vzorků E (lx) vlevo při umístění LED diod na sněny boxu vpravo při umístění na horní víko kalibračního boxu	45
3.15	Prvotní návrh DPS pro druhý návrh boxu se zapojením se společnou zemí pro všechny typy diod	47
3.16	Návrh DPS pro pravidelnou mřížku použitím nulových odporů	48
3.17	Návrh PDS pro separované záporné polarity napájení	49
3.18	Náhled DPS při použití nových Wago svorek	50
3.19	Finální návrh DPS pro výrobu	51
3.20	Náhled konstrukce finálního návrhu boxu	52
3.21	Náhled umístění komponent pro komunikaci rozhraní DALI	53
3.22	Princip zapojení komunikace na principu DALI	54
3.23	Princip zapojení teplotního snímače	55
4.1	Konstrukční provedení pevnostního uchycení stěn boxu v kalibrační části boxu	58
4.2	Konstrukční provedení uchycení rohových desek boxu	59
4.3	Konstrukční provedení uchycení DPS ke konstrukci boxu	60
4.4	Konstrukční rozložení prvků v elektro části boxu	61
5.1	Kontrola zapojení kalibračního boxu	62
5.2	Nastavený ovládací program kalibračního boxu	63
5.3	Testování funkce všech LED diod v boxu	64

5.4	Testování kalibračního boxu, pomocí jasového analyzátoru.....	65
5.5	Výstup z měření pomocí jasového analyzátoru.....	66

SEZNAM TABULEK

2.1	Tabulka s přehledem měrných výkonů a příkonů běžně vyráběných světelných zdrojů.....	18
2.2	Tabulka s přehledem orientační životností pro různé typy světelných zdrojů.....	19
2.3	Tabulka s přehledem teplot chromatičností pro různé světelné zdroje.....	20
3.1	Přehled LED zdrojů, maximálním počtem a typem zapojení v první variantě boxu.....	41
5.1	Přehledem naměřených hodnot na jasovém analyzátoru.	67

ÚVOD

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh kalibračního boxu pro kalibraci jasového analyzátoru. Práce se v prvotní části zabývá popisem základních světelných veličin a také popisuje jednotlivé světelné zdroje. V první části je také popsáno základní rozdělení světelných zdrojů včetně základních parametrů světelných zdrojů. Následuje popis jednotlivých světelných zdrojů s jejich typickým použitím. Následuje část zaměřená přímo na jasový analyzátor, pro který je kalibrační box vytvořen. Je zde popsán základní princip přístroje i jeho využití v praxi.

Dále se práce zabývá návrhem světelného boxu, respektive jeho různými návrhy, jež byli v průběhu práce navrhovány. V této části jsou postupně popsány všechny návrhy kalibračního boxu, jež byli v rámci možností navrhovány a postupně upravovány, či měněny na nové rozměry nebo také se měnil jejich koncept úplně.

V následující části, je již řešeno provedení zvoleného návrhu kalibračního boxu. Je zde probíráno, jak vypadá kalibrační box, ale i jak vypadá elektro prostor s elektro zapojením či komunikací. V této části jsou také sepsány v tabulce všechny použité světelné zdroje.

Následně se diplomová práce zabývá již samotnou realizací kalibračního boxu. V této části je popsána výroba kalibračního boxu z pohledu jako celku i jako dílčích částí. Dá se tedy v této části najít konstrukční provedení kalibračního boxu, výroba komponent, i princip pevnostního uchycení stěn a desek.

V závěrečné části je popsáno oživení kalibračního boxu, jeho programování a následné testování ve světelné laboratoři. Včetně porovnání naměřených hodnot.

1. ZADÁNÍ PRÁCE

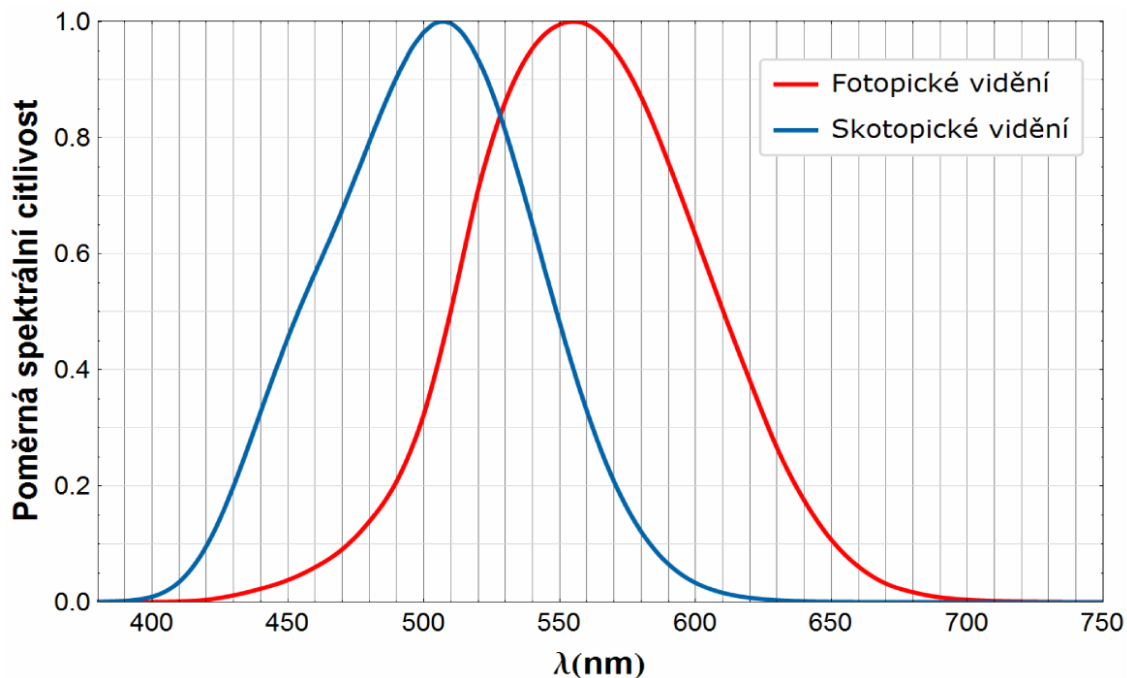
Tématem semestrální práce je vytvoření a nasimulování 3D modelu kalibračního boxu. Kalibrační box bude osazen 12 různými světelnými zdroji, umístěné kolem středu, kde budou umístěny obrazce různých barev pro kalibraci.

1.1 Základní fyzikální veličiny

Pro lepší pochopení souvislostí a snadnější orientaci v celé práci budou v této části práce popsány základní světelné technické parametry.

1.1.1 Světelný tok

Světelný tok představuje energetickou hodnotu světla, která se vztahuje na citlivost lidského oka. Lidské oko vnímá různé vlnové délky světla s rozdílnou citlivostí. Experimentálně byla stanovena takzvaná křivka V_λ , která se používá jako standart při výpočtu světelného toku. Křivka $V(\lambda)$ pro fotopické vidění a křivka $V'(\lambda)$ pro skotopické vidění je zobrazena na obrázku číslo 1.1.



Obrázek 1.1 Křivka $V(\lambda)$.

Světelný tok se označuje řeckým písmenem Φ a jednotkou lumen [lm]. Závislost zářivé energie na světelném toku je dána vztahem (1.1)

$$\Phi = 683 \int_0^\infty \left(\frac{\Delta\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda V(\lambda) d\lambda, \quad (1.1)$$

1.1.2 Svítivost

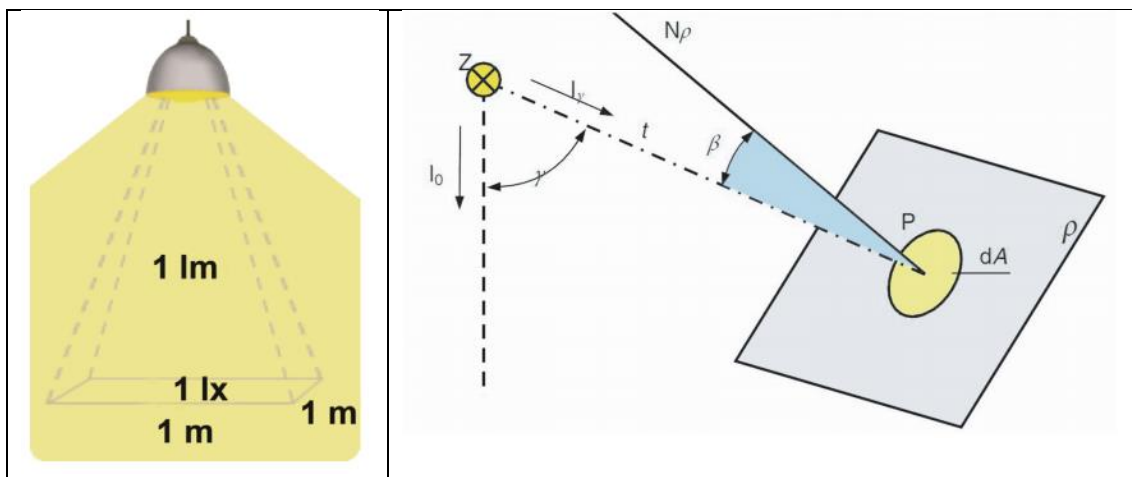
Svítivost patří mezi základní fyzikální veličiny. Je také světelně technická veličina, která popisuje distribuci světelného záření do prostoru. Svítivost udává, kolik světelného toku vyzaří zdroj v prostorovém úhlu do určitého směru. Jednotkou svítivosti je kandela [cd]. Kandela je definována jako svítivost zdroje, jenž vyzařuje pod určitým úhlem monochromatické záření s intenzitou $1/683 \text{ W/Sr}$ a frekvenci $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$. Střední hodnota svítivosti se tedy dá určit ze světelného toku Φ vyzařujícím v jednotkovém prostorovém úhlu Ω

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad [\text{cd}, \text{lm}, \text{sr}], \quad (1.2)$$

Svítivost se určuje pro bodový zdroj, což znamená že musí mít zanedbatelné rozměry vůči vzdálenosti z které se provádí kontrolní měření. V praxi musí být vzdálenost kde se provádí kontrolní měření alespoň 5krát tak velká jako rozměr světelného zdroje.

1.1.3 Osvětlenost

Osvětlenost, nebo také intenzita osvětlení, představuje další odvozenou fotometrickou veličinu. Udává hodnotu světelného toku dopadající na jednotkovou plochu. Osvětlenost se značí písmenem E a jednotkou osvětlení je lux [lx]



Obrázek 1.2 Osvětlenost na ploše a definice osvětlenosti bodového zdroje

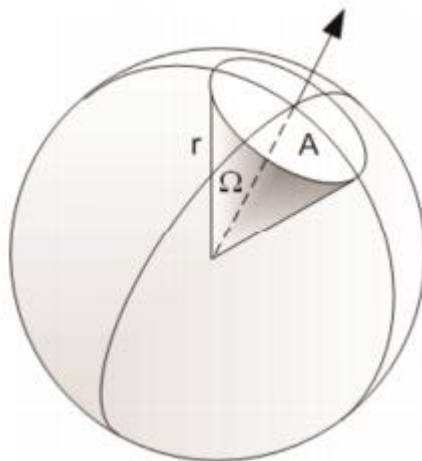
$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad [\text{lx}, \text{lm}, \text{m}^2], \quad (1.3)$$

Osvětlenost bodového zdroje lze vyjádřit i pomocí svítivosti, čtvercového a kosinového zákona. Na obrázku 1.2 je zobrazena rovina ρ , na které je ve vzdálenosti l osvětlen bod P, jehož bezprostřední okolí tvoří plocha dA . Normála roviny N_ρ svírá s paprskem světla úhel β . Hodnotu osvětlení lze poté počítat pomocí svítivosti I_γ dle vzorce:

$$E = \frac{I_\gamma \cdot \cos \beta}{l^2} \quad [lx, cd, -, m], \quad (1.4)$$

1.1.4 Prostorový úhel

Pro výpočty ve světelné technice je velmi důležitý prostorový úhel. Představuje část prostoru, který je vymezen kuželovou plochou, jenž na kouli o poloměru r vytvoří plochu A . Prostorový úhel se značí řeckým písmenem omega Ω a jeho jednotkou je steradián [sr].



Obrázek 1.3 Zobrazení prostorového úhlu

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad [sr, m^2, m], \quad (1.5)$$

Ze vzorce je také patrné, že maximální hodnota prostorového úhlu je maximálně 4π sr.

1.1.5 Jas

Jas, nebo také měrná svítivost, se poté vypočítá z podílu svítivosti I a průměru svítící plochy S_p , kterou pozorovatel vidí. Pokud plochu by byla plocha viděna pod jiným úhlem, bude průmět této plochy menší než skutečná plocha [1].

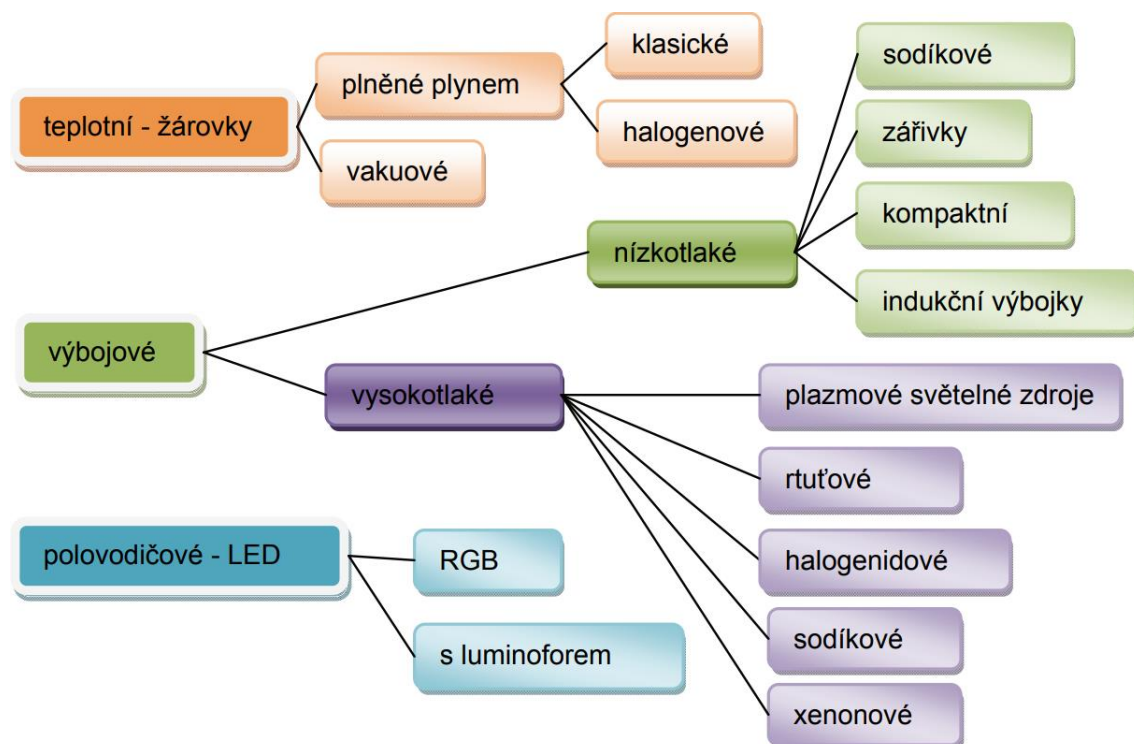
$$L = \frac{I}{S_p} \quad [cd \cdot m^{-2}, cd, m^2], \quad (1.6)$$

2. SVĚTELNÉ PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

2.1 Světelné zdroje

Světelné zdroje jsou základním prvkem osvětlovacích soustav a slouží k přeměně elektrické energie na světelnou. Mezi základní parametry světelných zdrojů patří světelný tok Φ (lm), elektrický výkon P (W), měrný výkon η (lm/W), doba životnosti t (h), index podání barev R_a (-) a teplota chromatičnosti T_c (K). Podle způsobu vzniku světla se elektrické zdroje dělí na teplotní, výbojové a polovodičové (LED).

Světelné zdroje můžeme rozdělit do tří základních skupin, což jsou teplotní (žárovky a halogenové žárovky), výbojové (zářivky neboli výbojky) a světelné diody (LED).



Obrázek 2.1 Třídění světelných zdrojů.

U teplotních světelných zdrojů dochází k zahřívání vodivé látky (kovu), průchodem elektrického proudu, na vysokou teplotu, což má za následek, že tato látka vysílá v důsledku tepelného pohybu optické záření.

Výbojové světelné zdroje využívají principu elektrických výbojů v plynech a parách různých kovů a využívají přeměnu elektrické energie na kinetickou energii elektronů, která se při srážkách s atomy plynů mění na optické záření.

Světelné diody (LED) pracují na principu vyzařování energie v podobě fotonů při samovolném návratu elektronů z vybuzeného stavu do základního energetického stavu.

2.1.1 Parametry světelných zdrojů

Měrný výkon η (lm/W)

Měrný výkon představuje u světelného zdroje míru přeměny elektrické energie na světelnou, tedy definuje vztah mezi produkovaným světelným tokem a elektrickým příkonem světelného zdroje. Elektrický příkon se přemění na světelný tok, při čemž se zohledňuje to, jak oko vnímá světelné záření. Teoretické maximum vypočtené pro fotonické vidění je 683 lm/W, nejúčinnější světelné zdroje dosahují měrných výkonů až 200 lm/W. Přehled měrných výkonů je v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1 Tabulka s přehledem měrných výkonů a příkonů běžně vyráběných světelných zdrojů

Druh světelného zdroje	Příkon (W)	Měrný výkon (lm/W)
Obyčejná žárovka	15-200	6-15
Halogenová žárovka	10-2000	14-26
Kompaktní zářivka	5-60	56-88
Lineární zářivka T8	10-58	65-90
Lineární zářivka T5	14-80	70-104
Vysokotlaká sodíková výbojka	50-1 000	88-150
Nízkotlaká sodíková výbojka	18-180	130-200
Halogenidová výbojka	35-3 500	94-103
Indukční výbojka	50-400	70-93
Rtuťová výbojka	50-1 000	50-80
Plazmový světelný zdroj	až 250	Až 85
Xenonová výbojka	25-10 000	Až 95
Výkonová LED	1-20	Až 140

Doba životnosti t (h)

Životnost světelných zdrojů je jednou z velmi důležitých parametrů, který nám určuje, jak dlouho vydrží daný světelný zdroj hospodárně svítit. V případě žárovky je životnost určena mezním stavem wolframového vlákna a jeho přepálením. Pro definici jiných zdrojů nám ovšem taková definice nevystačí. Během funkčního období života zářivky nebo LED dochází zákonitě k poklesu světelného toku. Po určitém čase je potom provoz takového svítidla i navzdory tomu že svítí nevhodný a vyžaduje výměnu. I z tohoto důvodu rozlišujeme dvě definice životnosti.

- Průměrná životnost – jedná se o průměrnou životnost jednotlivých světelných zdrojů provozované za předem určených podmínek. Doba je daná časem, za který bude svítit přesně polovina ze sledovaného počtu světelných zdrojů, tedy do momentu, kdy míra výpadků dosáhne 50 %.
- Užitečná životnost nebo také ekonomická se definuje vzhledem k postupnému poklesu světelného toku zdrojů během života. Konec užitečného života se dosáhne tehdy, když světelný tok zdroje bude na úrovni 80 % počáteční hodnoty světelného toku.

Tabulka 2.2 Tabulka s přehledem orientační životností pro různé typy světelných zdrojů

Druh světelného zdroje	Průměrná životnost (h)	Užitečná životnost (h)
Obyčejná žárovka	1 000	1 000
Halogenová žárovka	2 000-3 000	2 000-3 000
Kompaktní zářivka	15 000	6 000-15 000
Lineární zářivka	20 000	10 000-18 000
Vysokotlaká rtuťová výbojka	16 000-24 000	10 000-20 000
Vysokotlaká sodíková výbojka	32 000	20 000
Nízkotlaká sodíková výbojka	16 000	16 000
Halogenidová výbojka	10 000	4 000
Indukční výbojka	60 000	20 000
Výkonová LED	50 000- 100 000	25 000-50 000
Plazmový světelný zdroj	50 000	50 000
Xenonová výbojka	1 000-3 000	1 000-3 000

Index podání barev Ra (-)

Pomocí indexu barev se popisuje spektrální složení světla světelných zdrojů. Totiž pokud dva světelné zdroje mají stejnou barvu, mohou vykazovat rozdílné podání barev. Index podání barev značíme jako R_a a je udáván bez jednotky od 0 do 100. Pokud světelný zdroj nabývá hodnoty chromatičnosti 0 znamená to, že spektrum složení světla je složeno pouze ze světla jedné vlnové délky nebo v úzkém spektru vlnových délek. Světlo světelných zdrojů, jež obsahuje celé barevné spektrum má poté index podání barev 100.

Teplota chromatičnosti T_c (K)

Teplota chromatičnosti slouží k popisu barevných vlastností světla. U teplotních světelných zdrojů odpovídá teplota chromatičnosti teplotě vlákna, u výbojových světelných zdrojů se používá pojem náhradní teplota chromatičnosti, která odpovídá ekvivalentnímu teplotnímu zdroji s podobným spektrálním složením. Stručný přehled teplot chromatičnosti pro různé typy světelných zdrojů je uveden v tabulce 2.3. Na teplotě chromatičnosti taktéž rozlišujeme tři základní kategorie barvy světla, jež jsou teple bílá pro teplotu chromatičnosti menší než 3 300 K, bílou v rozmezí 3 300 – 5 000 K a denní s teplotou chromatičnosti nad 5 500 K.

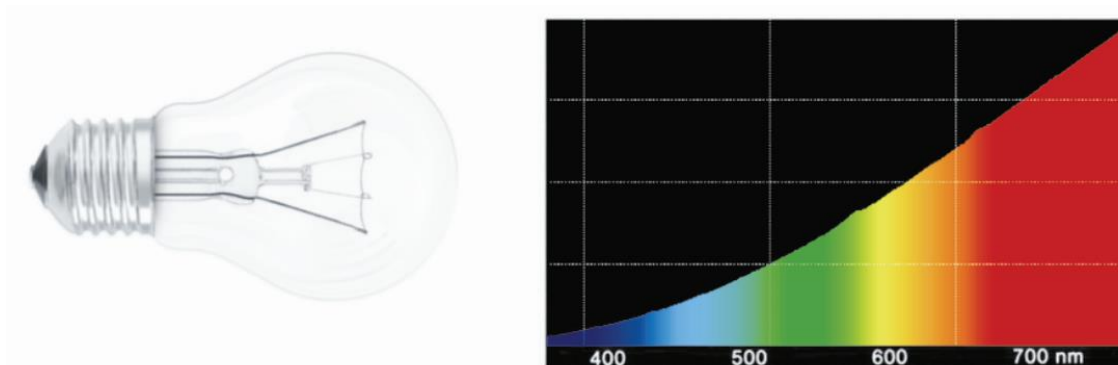
Tabulka 2.3 Tabulka s přehledem teplot chromatičností pro různé světelné zdroje

Druh světelného zdroje	T_c (K)
Zářivka studené denní světlo	6 500 a více
Zářivka denní světlo	5 400
Jasná obloha	6 500
Slunce v létě v poledne	5 500
Zářivka studená bílá	4 000
Slunce při západu	3 500-4 000
Žárovka, žárovka teple bílá	2 700
Plamen svíčky	2 800

2.1.2 Žárovky

Princip žárovek spočívá ve žhavení odporového vlákna, tvořeného wolframem, procházejícím elektrickým proudem. Tímto dochází k vzniku ztrát a přeměně elektrické energie na teplo způsobené zahříváním odporového vlákna, jež se při vysoké teplotě stává

zdrojem záření. Z principu žárovek vyplývá, že se až 95 % dodané elektrické energie mění na teplo jež je odváděno ze žárovky zářením v infračervené oblasti spektra, pomocí kondukce a konvence a pouze 5 % elektrické energie se mění na světelné záření.



Obrázek 2.2 Žárovka a příklad jejího spektra

2.1.3 Halogenové žárovky

Princip funkce halogenových žárovek je velice podobný funkci klasických žárovek. Vylepšením je zde náplň tvořená příměsí halových prvků ve vnitřním prostředí baňky (j, Br, Xe). U klasických žárovek dochází postupně k odpařování wolframu ze zahřátého vlákna, a to vede k postupnému usazování na vnitřním povrchu a černání baněk žárovek, což způsobuje menší propustnosti světla. Taktéž díky vypařování wolframu dochází k přepalování vláken. Toto je vyřešeno u halogenových žárovek pomocí tlaku plnicího plynu. Delší životnost je také dána i halogenovým cyklem probíhající v žárovce, kde vypařený wolfram se slučuje s halogeny při nižší teplotě (u baňky), sloučenina se poté vlivem tepelného pole vrací na vlákno a vlivem teploty se i na vlákno rozkládá.

2.1.4 Zářivky a kompaktní zářivky

Zářivky jsou nízkotlaké rtuťové výbojky, jež vyzařují hlavně v oblasti ultrafialového záření, které je nutno transformovat do viditelného spektra pomocí luminoforu. Princip funkce zářivek ve skleněné trubici jsou vlivem elektrického pole mezi elektrodami vybuzeny páry rtuti, ve kterých dochází k emisi neviditelného UV záření, jež je pomocí látky zvané luminofor, umístěného na vnitřním povrchu trubice, přeměněno na světlo. Volbou luminoforu taktéž můžeme ovlivňovat spektrum vyzařovaného světla. Pro zapálení výboje je nutné u zářivek používat předřadných přístrojů. Po zapálení výboje dochází k poklesu napětí na zářivce oproti síťovému napětí.



Obrázek 2.3 Lineární zářivka a příklad jejího spektra

2.1.5 Indukční výbojky

Indukční výbojky jsou stejně jako zářivky. Taktéž jsou rtuťové nízkotlaké výbojky ovšem na rozdíl od zářivek nemají elektrody. Pro zapálení se zde využívá vysokofrekvenční elektromagnetické pole vyrobené cívkami. U indukčních výbojek se používá elektronický předřadník. Mezi výhody použití patří vysoký měrný výkon až 93 lm/W a dlouhá životnost až 60000 h. Indukční výbojky také disponují rychlým náběhem světelného toku po jejich zapnutí. Z důvodu dlouhé doby životnosti se používají na místech s vysokou náročností výměny světelných zdrojů, což jsou například tunely, průmyslové haly nebo mosty.

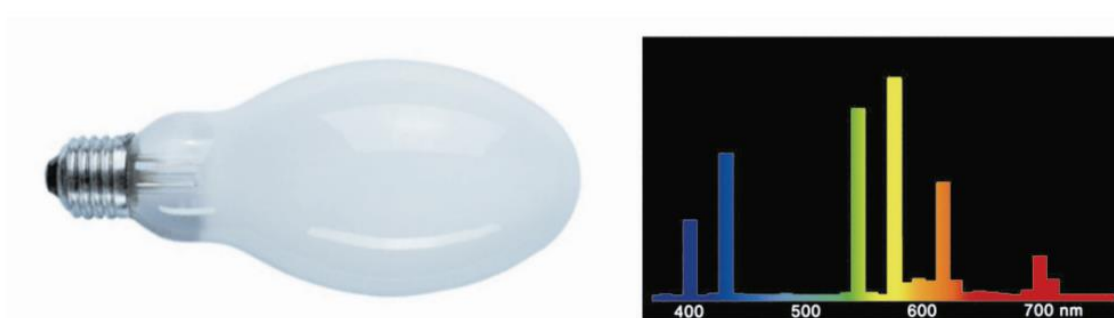


Obrázek 2.4 Indukční výbojka Osram Endura a Philips QL

2.1.6 Vysokotlaké rtuťové výbojky

Viditelné záření u vysokotlakých rtuťových výbojek vzniká obloukových výbojem v parách rtuti při tlaku 0,1 MPa ve výbojové trubici z křemenného skla. Stejně jako u zářivek je nutno u vysokotlakých rtuťových výbojek používat k transformaci na viditelné světlo luminofor, z důvodu velkého množství vyzářené energie na vlnové délce UV záření, a to převážně na vlnové délce 365 nm. Záření se pomocí luminoforu transformuje do červené oblasti spektra. Zbylé záření cca 15 % je vyzářeno v oblasti

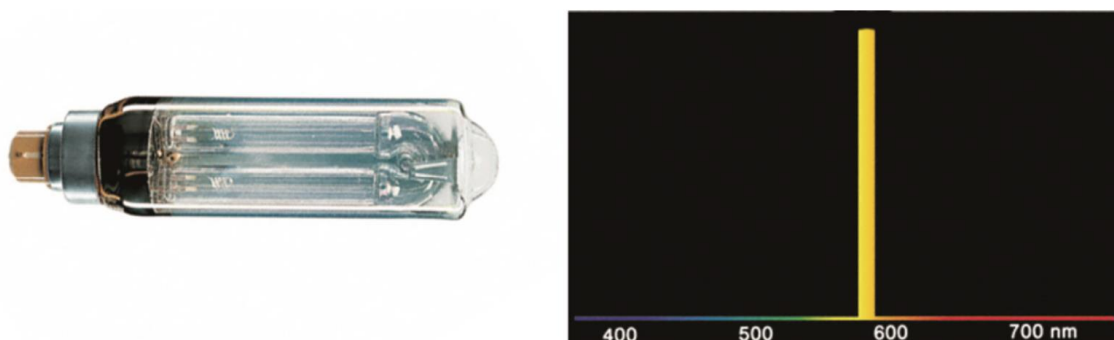
modrobílé až modrozelené. Pro ustálení výboje je nutno u vysokotlakých rtuťových výbojek potřebný čas od 3 do 5 minut a v případě přerušení výboje dojde k znovu zapálení až po 7 minutách. Jedna z výhod těchto světelných zdrojů je ten, že během života dochází k malému poklesu světelného toku, jsou odolné proti změnám teploty i otřesům. Životnost dosahuje 12000-15000 h, index podání barev je roven $R_a=60$ a měrný výkon nabývá hodnot od 50 do 80 lm/W. Kvůli svým špatným vlastnostem, jako je nízký index podání barev v kombinaci s dlouhou prodlevou před znovu zapálením, již využití těchto světelných zdrojů není a nahrazují se ve všech oblastech osvětlování jinými světelnými zdroji.



Obrázek 2.5 Vysokotlaká rtuťová výbojka a příklad jejího spektra

2.1.7 Nízkotlaké sodíkové výbojky

Nízkotlaké sodíkové výbojky jsou na principu primárního výboje vzniklého ve výbojové trubici z boritého skla v plynném prostředí argonu a neonu. Primární výboj má neonové barvy. Po určité době, při tlaku sodíku 0,5Pa a teplotě stěny 300 °C, kdy sodík přejde do plynného skupenství se vyzáří monochromatické záření o vlnových délkách oblasti žlutého spektra 589 nm a 589,6 nm. Měrný výkon u nízkotlakých sodíkových výbojek dosahuje hodnot 130-200 lm/W, index podání barev je $R_a=0$ a dosahují životnosti až 24000 h. Z důvodu špatného podání indexu podání barev se omezilo používání nízkotlakých sodíkových výbojek pouze na osvětlování silnic a dálnic.



Obrázek 2.6 Nízkotlaká sodíková výbojka a příklad jejího spektra

2.1.8 Vysokotlaké sodíkové výbojky

Vysokotlaké sodíkové výbojky jsou provozovány v základu stejně jako nízkotlaké a také jejich základní část spektra se nachází v okolí žluté části spektra. Rozdíl je v tom že se zde používají vyšší tlaky než u nízkotlakých. Vyššího tlaku se dosahuje snížením objemu výbojového prostoru nebo také dalšími parametry například složením amalgamu sodíku nebo druhu plnicího plynu. Těmto tlakům musí být přizpůsoben i výbojový prostor, proto musí být tvořen z polykrystalického či monokrystalického oxidu hlinitého neboli syntetického korundu.

S rostoucím tlakem par sodíku dochází také k výraznému rozšíření spektrálního vyzařování a ke vzniku silného spojitého záření. Z tohoto plyne, že výsledné vyzařování roste do dlouhovlnné části spektra a dochází tak k lepšímu indexu podání barev. Vysokotlaké sodíkové výbojky se používají hlavně ve veřejném osvětlování, kde doba jejich náběhu na jmenovitý světelný tok dosahuje až 5 minut.

Výkonové řady vysokotlakých sodíkových výbojek se pohybují v rozmezí od 50 W do 1000 W. Index podání barev se poté pohybuje okolo $R_a=25$ a doba živostnosti při správném dodržování provozních podmínek dosahuje až 30000 h. U konce živostnosti se projevují tím, že často dochází k zhasínání a znovu zapalování výboje.

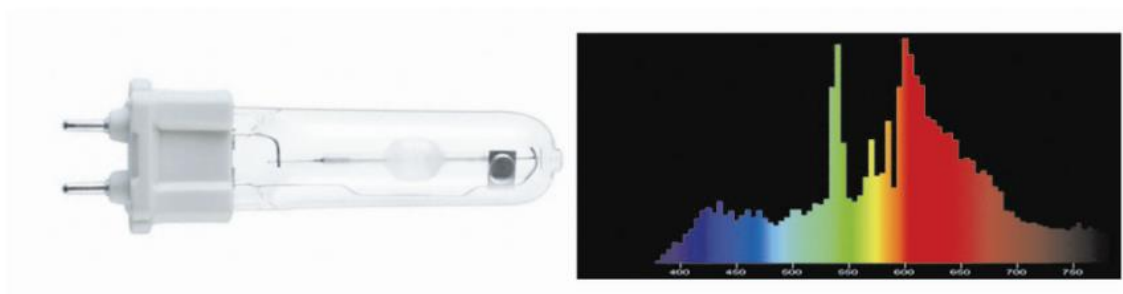


Obrázek 2.7 Vysokotlaká sodíková výbojka a příklad jejího spektra

2.1.9 Halogenidové výbojky

Viditelné záření u halogenidových výbojek vzniká jednak v parách rtuti, ale u 90% záření vzniká hlavně z halogenidů, což jsou sloučeniny halových prvků s galiem, thaliem či sodíkem. Toto vede k zvýšení indexu podání barev až na hodnotu $R_a=90$ a měrného výkonu až na hodnotu 130 lm/W a dosahují životnosti až 15000 h. U hořáků z křemene či keramiky vzniká cyklus podobný regeneračnímu cyklu u halogenových žárovek. Výkonové řady halogenidových výbojek se pohybují v rozmezí od 35 W do

3500 W a na jmenovité parametry výbojka nabíhá zhruba 10 minut, čas náběhu je závislý na velikosti a na příkonu.



Obrázek 2.8 Halogenidová výbojka a příklad jejího spektra

2.1.10 *Xenonové výbojky*

Xenonové výbojky jsou typické hlavně pro automobilový průmysl, kde se používají v automobilových světlometech, nebo v projekční a osvětlovací technice. Xenonové výbojky potřebují pro svůj zážeh výboje vysokonapěťový impuls přes 20 kV, jejich provozní napětí se poté u většiny výbojek pro automobily pohybuje okolo 85 V /100 Hz, což způsobuje nutnost speciálního měniče pro připojení. Výbojky pro osvětlování v osvětlovací technice bývají v trubicovém provedení, a mohou dosahovat výkonu až 10 kW, kde jsou chlazeny vodou či vzduchem. Náhradní teplota chromatičnosti je u xenonových výbojek nejčastěji v rozmezí 4000–12000 K a spektrum vyzařování se blíží dennímu světlu. Měrný výkon dosahuje až 95 lm/W a živostnost je cca 2500 h.

2.1.11 *Plazmový světelný zdroj*

Jedná se o nejnovější typ bezelektrodového výbojového zdroje, nebo také plazmového světelného zdroje, jež je ve vývoji od roku 2007. Světelné zdroje jsou v malém hořáku naplněny směsí halogenidů, jež jsou pomocí mikrovlnného zdroje ionizovány za účelem generování světelné energie a to, aniž by bylo nutné do hořáku umístit elektrody, jako u klasických výbojek.



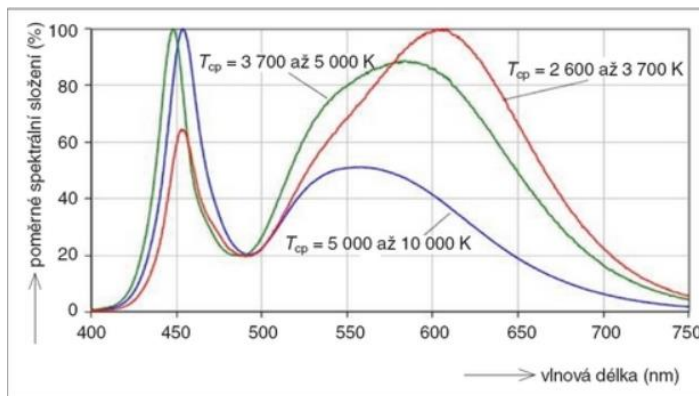
Obrázek 2.9 Xenonová výbojka a plazmový světelný zdroj

2.1.12 Světelné diody – LED

Světelné LED diody jsou ve stále větší míře využívány ve všech odvětvích osvětlovací techniky. Tento trend vděčí za své rozšíření především rostoucímu měrnému výkonu. LED představují elektronický prvek, který generuje světelné záření při průchodu elektrického proudu polovodičovým přechodem. LED světelné zdroje pracují na úplně jiném fyzikálním principu než všechny zmiňované světelné zdroje, taktéž na rozdíl od přechozích zdrojů LED vyzařují ve velmi úzkém spektru, kde primární záření je v podstatě monochromatické. LED světelné diody jsou v dnešní době vysoce účinné světelné zdroje, které se více prosazují na místo konvenčních světelných zdrojů jako jsou například žárovky. V budoucnu se počítá s velkým potenciálem LED diod. Jelikož světlo LED diod je v podstatě monochromatické je potřeba světelný tok upravit na bílou barvu. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby.

První způsob je pomocí mísení komplementárních vlnových délek určitého výkonového poměru. Nejčastější je trichromatický světelný zdroj, jež vzniká z tří monochromatických LED zářičů. Také dále platí, čím více monochromatických složek, tím lepší bude barevné podání výsledného spektra a vyšší hodnota Ra.

Druhý způsob získání bílého světla u LED diod je pomocí konvertoru vlnových délek. Tento způsob je založen na principu využívajícího primárního záření v oblasti kratších vlnových délek, nejčastěji v modré oblasti, jež je pomocí konvertorového materiálu absorbováno a znovu vyzářeno, jako světelné záření o vyšší vlnové délce. Nejčastěji se jako konvertory vlnových látek používají látky na bázi fosforu [1].



Obrázek 2.10 Světelná dioda-LED [1], [3]

2.2 Jasový analyzátor

Jasový analyzátor je v podstatě digitální fotoaparát, jež je laboratorně kalibrovaný na citlivost dle křivky $V(\lambda)$, pro citlivost lidského oka. Fotoaparát určený pro jasový analyzátor je digitální zrcadlovka, jež je velice precizně a kvalitně vyrobený přístroj v rozumné cenové relaci. Jasový analyzátor umožňuje, na rozdíl od klasických jasoměrů, snímat jasové mapy s rozlišovací schopností danou prostorovým úhlem snímaným jedním pixelem. K navýšení dynamického rozsahu snímaných jasových map je využíváno softwarové překrývání několika identických snímků pořízených při různých expozicích.

Vyhodnocení jasů se poté provádí pomocí softwarového programu LumiDISP, jež je vyvíjen speciálně pro typ fotoaparátu Nikon D7200. Software také umožňuje plné ovládání fotoaparátu z počítače, včetně ostření a živého náhledu. Také dokáže převést surová data z fotoaparátu prostřednictvím kalibračních funkcí na jasovou informaci, jejímž výsledkem může být takzvaná jasová mapa. Nad touto mapou je pak možné provádět nejrůznější výpočty a statistiky, jako například jasové řezy, histogramy, výpočty kontrastů a měření úhlových vzdáleností. Rozšířené funkce pak nabízejí skládání snímků do HDR obrazu, výpočty oslnění podle metodiky UGR, mapování pravoúhlé sítě na perspektivní plochy a analýzu jasů v referenčních bodech mříže [2].



Obrázek 2.11 Jasový analyzátor LDA –LumiDISP.

2.3 Difuzní nátěr

Difuze je proces samovolného rozptylování částic v prostoru. Difuzor tedy rozptyluje světlo tak, aby světelný zdroj působil v boxu jako plošný zdroj světla. Pro zlepšení vlastností povrchu samotného kalibračního boxu bude nutné stěny boxu opatřit potřebným difuzním nátěrem. To by mělo vést k rovnoměrnému rozprostření paprsků světla v celém prostoru boxu a zlepšení podmínek měření [4].

3. NÁVRH KALIBRAČNÍHO BOXU

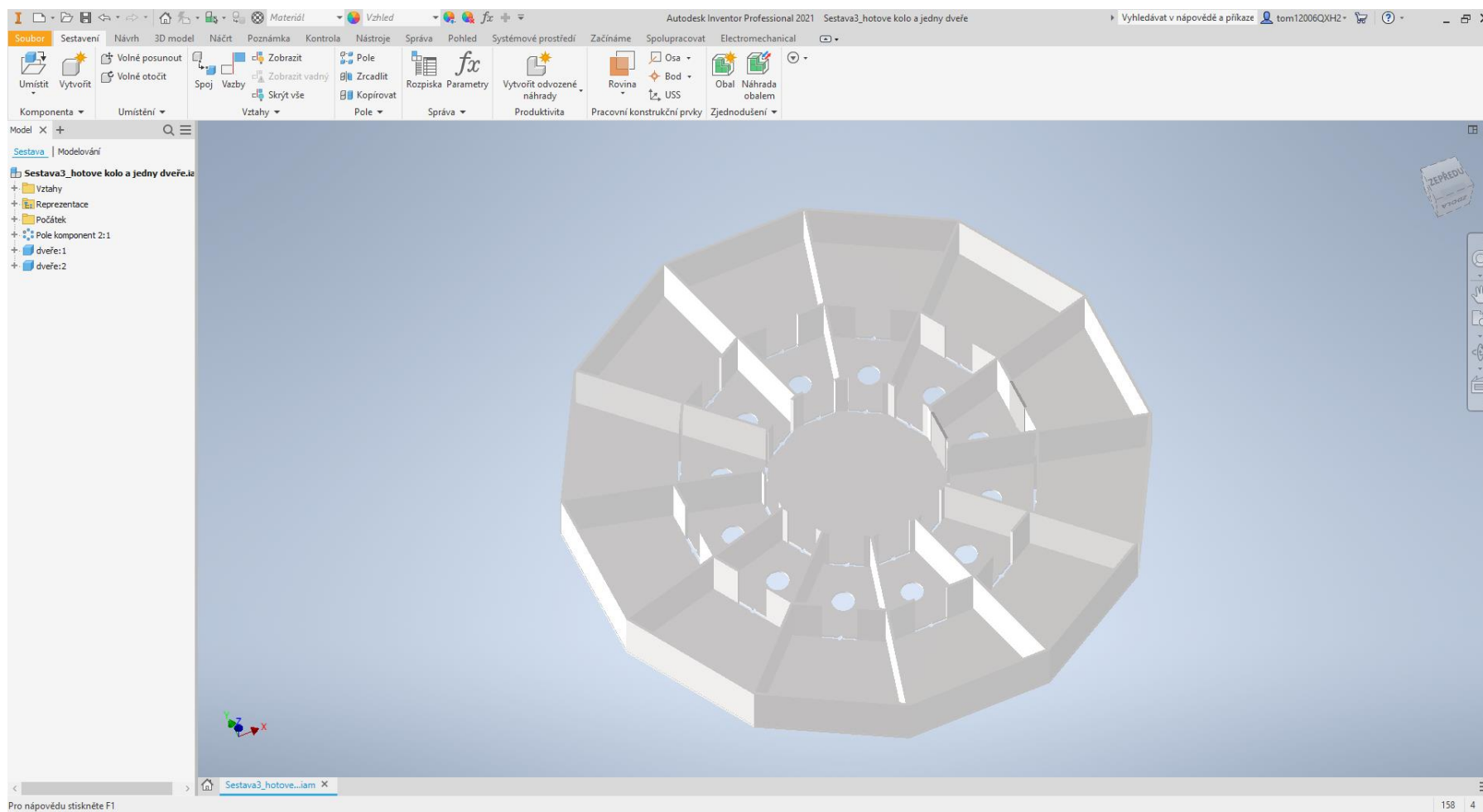
Návrh kalibračního boxu lze rozdělit do vícero částí. Tyto části se skládají například ze samotného návrhu kalibračního boxu, tedy jeho celkového designu

3.1 Návrh samotného boxu

Pro samotný návrh designu, uspořádání a následné technické dokumentace pro výrobu kalibračního boxu bylo využito programu Autodesk Inventor Professional. Program Autodesk Inventor Professional nabízí i mimo jiné studentské licence právě pro účely výuky a zpracování studentských projektů v rámci akademických prací.

Program Autodesk Inventor Professional je jeden z nejrozšířenějších výukovým CAD programem. Mezi jeho základní funkce se dá zařadit tvorba 3D modelů, vytváření simulací, pevnostních simulací a analýz, vytváření výkresové dokumentace a prezentací. Pomocí nákresů a prostorových funkcí je umožněno modelovat 3D modely a ty je poté možno zakomponovat do sestav a posléze je možné je promítnout i do výkresové dokumentace. Nové verze programu Inventor navíc disponují mnoha různými druhy analýz materiálů a taky namáhání mezi jednotlivými komponentami. Pro účely návrhů 3D modelů je zde přínosná rozsáhlá knihovna struktur, materiálů a také komponent jež vychází přímo z normy ISO a do sestav se tak mohou importovat bud hotové normalizované komponenty či normalizované šrouby a jiné spojovací materiály. Modely z programu Inventor je možné exportovat do mnoha typů souborů například v našem případě do souborů s příponou .SAT, která nám umožňuje vkládat 3D modely a sestavy z Inventoru do programu Ansys Speos [5].

Program je v diplomové práci využívám pro všechny typ modelování návrhu kalibračního boxu a taktéž z modelů byla poté vytvořena výkresová dokumentace, sloužící k následné výrobě kalibračního boxu.

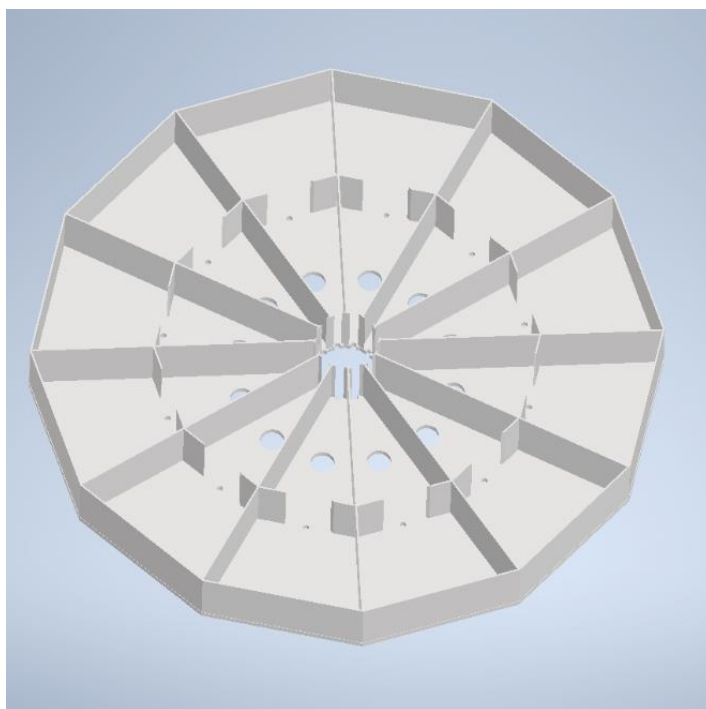


Obrázek 3.1 Pracovní prostředí Autodesk Inventor Professional 2021.

3.1.1 První návrh boxu

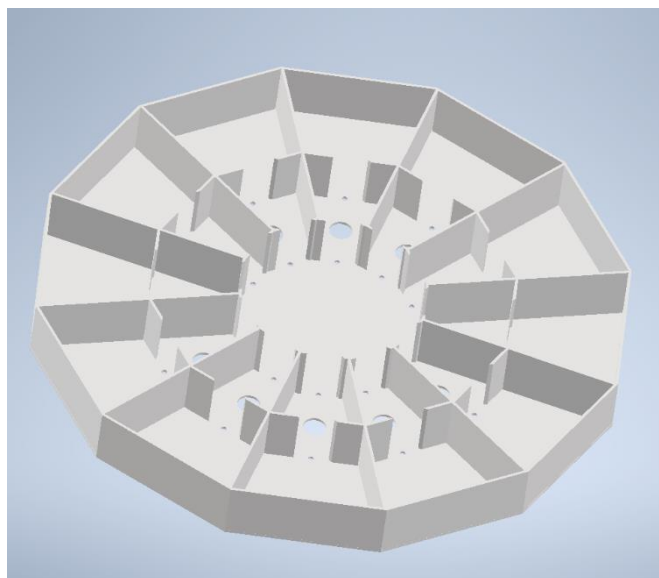
První návrh boxu vychází ze zadání, kdy bylo počítáno s 12 různými světelnými zdroji, umístěných v kruhovém uspořádání kolem středu, kde by byli umístěny kontrolní vzorky barev a z vnějšího kruhového uspořádání, které by sloužilo jako orientační měření bez vzorků. Regulace osvětlenosti obou ploch by byla provedena pomocí dveří, jež by byli řízené pomocí krokových motorků. Tento návrh počítal se třemi částmi boxu a jeho rozměry měli být na šířku do jednoho metru a do hloubky dle zvolených světelných zdrojů tak, aby zde byl dostatečný prostor pro jejich umístění včetně prostoru kolem nich.

V první části by se nacházela samotná kalibrační část, jež by obsahovala světelné zdroje, přechodové dveře určené k regulaci osvětlenosti, a komůrky v nichž by probíhalo měření. Druhá část měla sloužit jako pevný podklad pro celou konstrukci kalibračního boxu. Tato část by navíc obsahovala i uchycení jednotlivých částí světelných zdrojů jako jsou objímky, a také by obsahovala i uchycení středu regulačních dvířek pro jejich plynulý pohyb. Třetí část tohoto návrhu měla sloužit jako část obsahující všechny komponenty zabezpečující kompletní funkčnost celého boxu. Tudiž by zadní část boxu obsahovala napájení pro jednotlivé světelné zdroje a motorky, byli by zde i samotné krokové motorky a také by tu byl řídicí systém pro automatické krokování motorků pomocí systému arduino.



Obrázek 3.2 Náhled prvotního návrhu světelného boxu.

První navržený model byl čistě jen orientační a po provedení prvních kontrol bylo patrné, že návrh nemůže být nadále realizován, a to ze dvou důvodů. První důvod byl malý prostor pro umístění barevných vzorků a druhý důvod byl úzký prostor pro uložení světelných zdrojů. Tohle řešení by vedlo k přehřívání boxu a špatnému odvodu tepla od samotných světelných zdrojů.



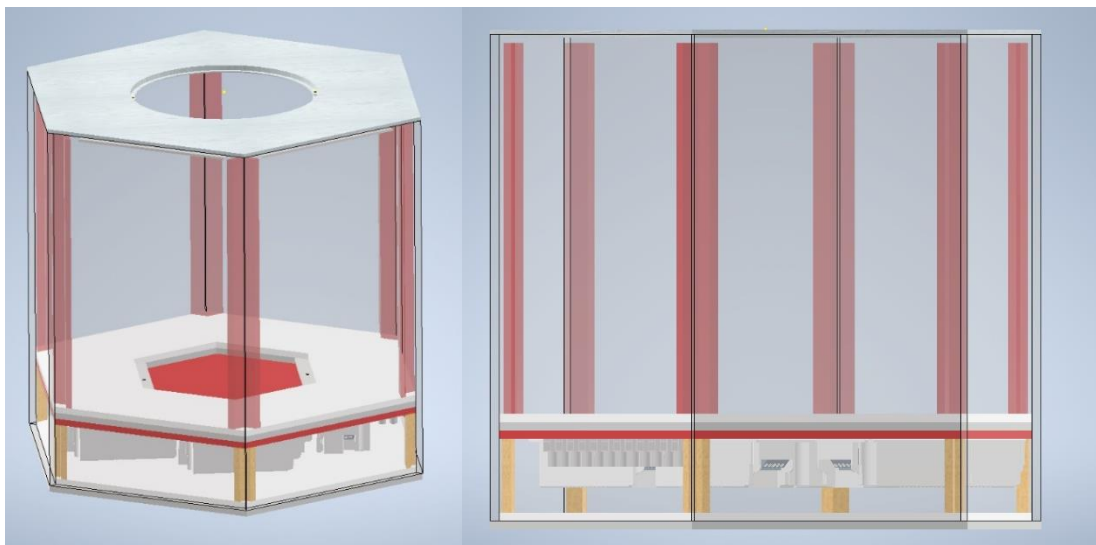
Obrázek 3.3 Náhled prvotního návrhu světelného boxu s doplňujícími úpravami.

I když se jednalo o první návrh boxu, z náhledů je patrné, že již v prvním návrhu bylo nutné upravovat velikosti jednotlivých komor, sloužící pro umístění vzorků, tak i pro referenční měření. Provedením změn bylo dosaženo optimálního místa pro osazení barevnými vzorky a taktéž více prostoru kolem světelných zdrojů.

3.1.2 Druhý návrh boxu

U dalšího návrhu již byla praktikována úprava z 12 světelných zdrojů na pouze jeden typ světelného zdroje. Jako nový typ světelného zdroje byli zvoleny LED diody. Návrh vychází z toho, jak rozmanité spektrum diod je na trhu a je tak možná jejich kombinace. V tomto případě se vybralo 12 různě barevných typů barev LED diod. Šest typů diod bylo zvoleno jako barevné diody a dalších 6 typů LED diod byli zvoleny bílé diody, ovšem každá měla jinou teplotu chromatičnosti, a to od 2700 K až po 6500 K.

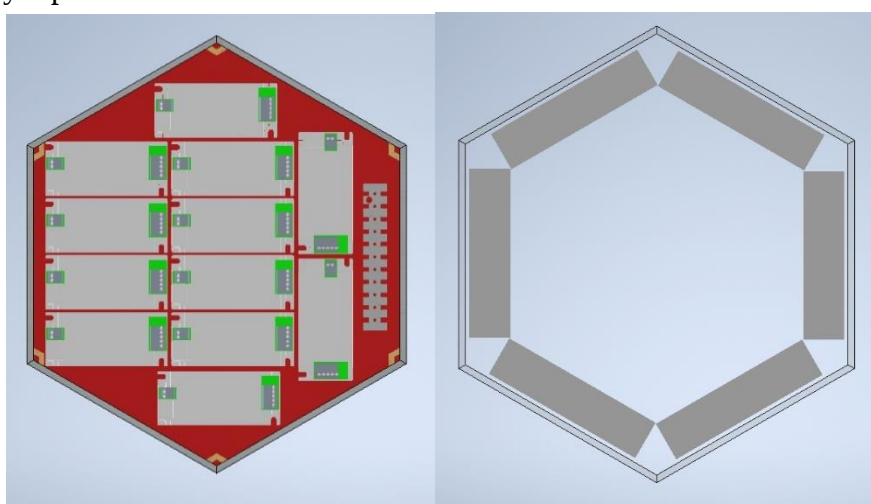
Nově zvolený světelný zdroj také vedl k úpravě návrhu boxu na nový tvar. Nový tvar byl zvolen jako šestihran. Tento tvar byl zvolen kvůli možnosti skládání více kalibračních boxu k dohromady. Skládání boxu k sobě by umožnilo měření současně více různých barevných scénářů.



Obrázek 3.4 Náhled světelného boxu v provedení šestihranu.

Na obrázku 3.4 lze vidět grafický návrh kalibračního boxu v provedení šestihranu. Návrh kalibračního boxu ve tvaru šestihranu byl do velikosti kompaktnější než prvotní návrh v provedení pro 12 komor. Provedení v tomto návrhu, co se týče rozměrů tak bylo do 30 cm, jak do šířky, tak i do hloubky.

Box měl být složen z šesti základních stěn, jež měly tvořit plášť boxu. Stěny boxu poté měly držet svůj tvar díky středovému šestiúhelníku, který by taktéž sloužil pro umístění vzorků na vrchní části a ze spodu pro přichycení předřadníků pro napájení LED. Hlavním prvkem, jež by držet tvar celého boxu by byli profily z ohnutého plechu, které by drželi jednotlivé stěny k sobě. Profily by taktéž sloužili k přichycení středové části a její stabilizace uvnitř boxu. Napájení LED diod by bylo zajištěno pomocí vodičů, jež by byli ukryty v profilech v rozích boxu.



Obrázek 3.5 Náhled rozmístění prvků na návrhu kalibračního boxu

Z obrázku 3.5 je patrné, že by umístění prvků do kalibračního boxu bylo velmi obtížné a nebyla by zde žádná rezerva v případě potřeb větších desek plošných spojů, či použití jiných komponent pro napájení boxu. Z obrázku vpravo je zřejmé, že desky se téměř dotýkali stěn boxu a sami sebe navzájem. Na levém obrázku je vidět, jak již není možné obsazení boxu nijak dále kombinovat, z důvodu malého prostoru uvnitř části pro napájení boxu. Nedostatek prostoru byl v tomto případě i důvod změny rozměrů a celé koncepce kalibračního boxu.

Pro druhý návrh boxu bylo řešeno i několik typů jeho výroby, co do možnosti jednoduchosti a praktičnosti. V rámci jednoho typu byla navržena konstrukce boxu pomocí konstrukčních profilů, jež by následně byli osazeny deskami, respektive by desky byly zapuštěny a přichyceny mezi profily, výsledná tvar by z vnějšího pohledu nebyl přímo úhledný šestistěn. Pro přívody napájení a komunikace by bylo zvoleno tažení vodičů v samotných profilech, a tak by se dosáhlo i jeho minimalistického umístění přímo uvnitř boxu.

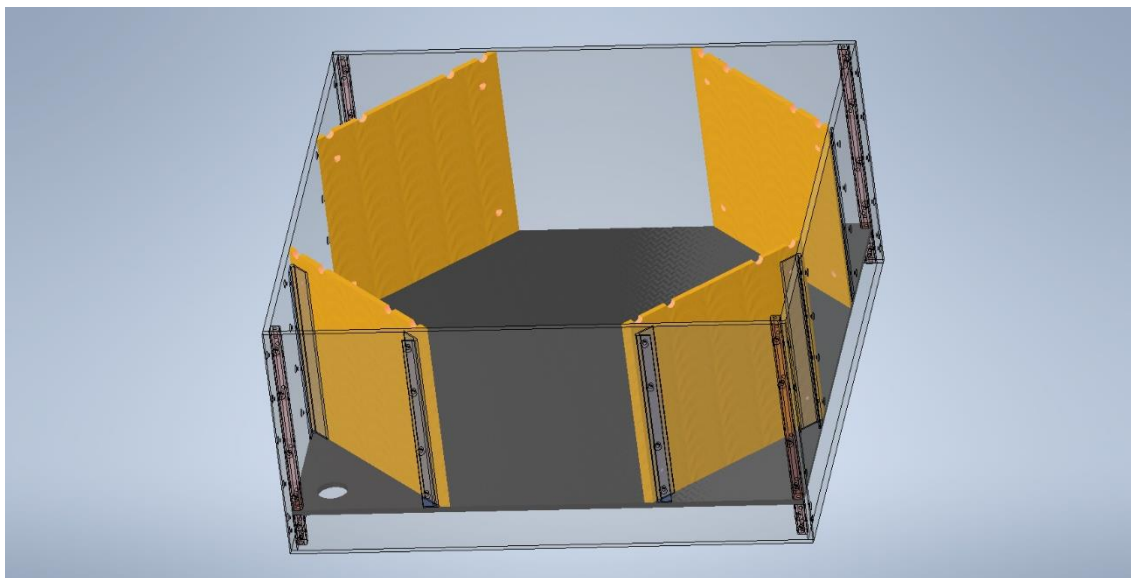
Na obrázku 3.6 lze vidět návrh konstrukčního řešení pro výrobu boxu z konstrukčních profilů. Návrh z konstrukčních profilů by dodal boxu moderní vzhled ve stylu průmyslových konstrukcí, ovšem byl později kvůli své ceně, kvůli nepravidelnému vzhledu a kvůli volbě celé nové konstrukce zamítnut.



Obrázek 3.6 Náhled kalibračního boxu sestrojeného z profilů

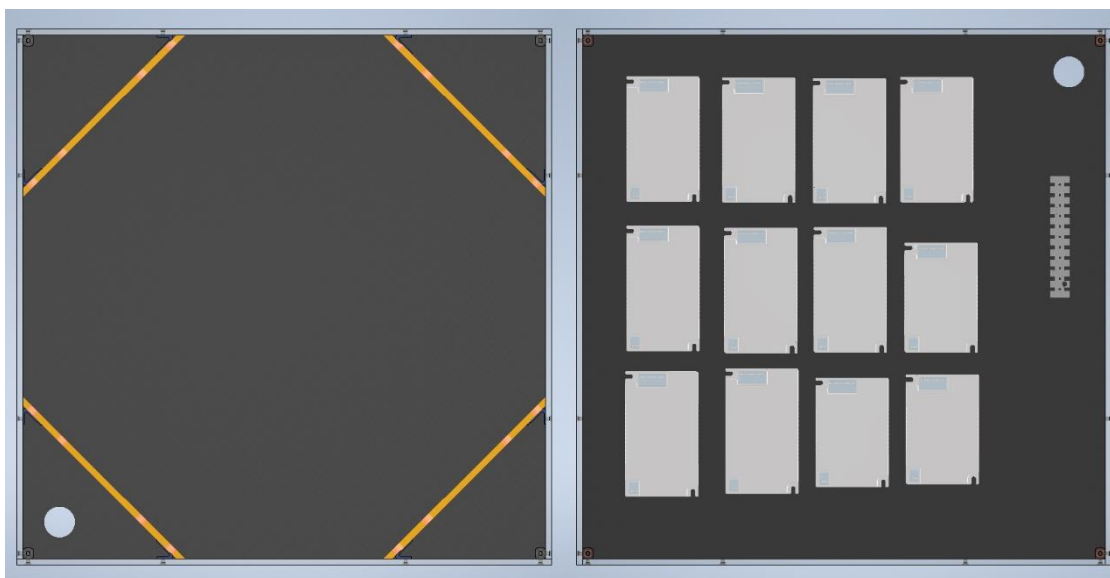
3.1.3 Finální návrh boxu

Konečná verze boxu obsahuje z každého návrhu část převzatých prvků. Z prvního návrhu obsahuje 12 světelných zdrojů. Z druhého návrhu, zůstal kalibračnímu boxu počet a uspořádání desek plošných spojů, které vychází z počtu světelných zdrojů a také z předchozího uspořádání samotného boxu do šestistěnu. Finální konstrukce verze boxu lze vidět na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7 Náhled konstrukce finálního návrhu boxu

Návrh vychází hlavně z jednoduchosti konstrukce samotného boxu. Box ve tvaru kvádru, byl zvolen z důvodu lepší stability oproti verzi v šestistěnném provedení. Navíc aktuální návrh boxu přináší větší možnosti co do návrhu desky plošného spoje, tak i pro umístění komunikačních modulů do prostoru boxu.



Obrázek 3.8 Náhled uspořádání a vybavení finální verze boxu

Na předchozím obrázku 3.8 je zobrazeno uspořádání a vybavení finální verze kalibračního boxu. V návrhu se kvůli nedostatku předřadníků pro LED diody na trhu, použili náhradní předřadníky, jež byli aktuálně k dostání. Nové předřadníky pro LED diody jsou ovšem objemnější než původní předřadníky pro LED diody. U předchozího návrhu by nastal problém s nedostatkem místa a nedostatečným naddimenzování elektro prostoru. Na základě těchto údajů se již s předchozími návrhy nemohlo počítat. Z obrázků je parné, jak je v boxu nyní dostatek místa na konfigurace a uspořádání prvků v boxu.

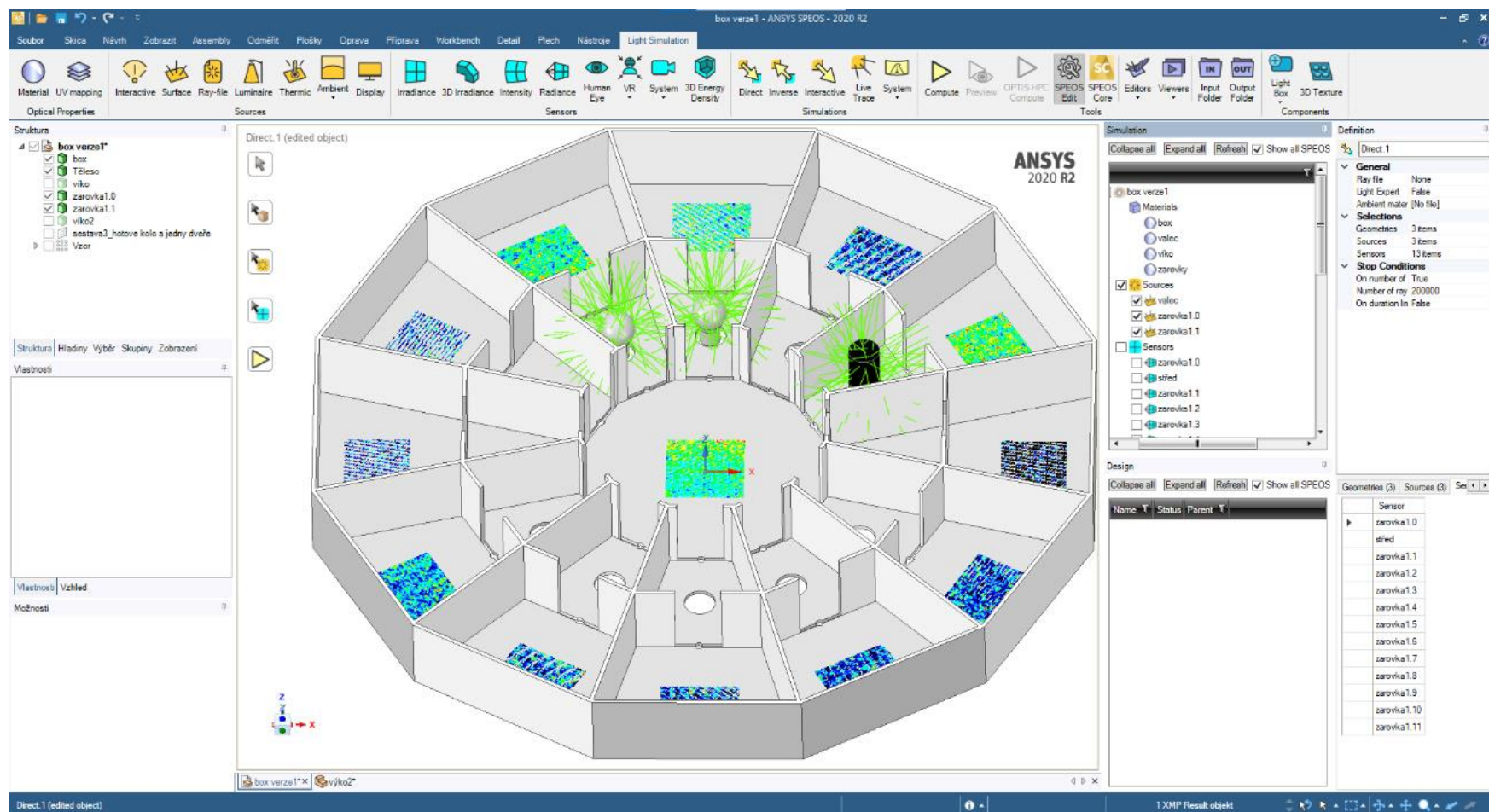
3.2 Simulace Speos

Pro samotný kalibrační box je potřeba mít co nejlepší parametry. Z toho důvodu se musí světelný box nasimulovat v simulačním programu a optimalizovat tak svůj tvar pro lepší světelné podmínky uvnitř jednotlivých komor. Simulace je poslední fází před kompletací světelného boxu. Dle výsledků simulací je možné vytvořit výkresovou dokumentaci pro výrobu boxu.

3.2.1 Ansys Speos

Ansys Speos patří do rodiny fyzikálních simulací programu Ansys. Program předpovídá osvětlení a optický výkon systému, čímž šetří čas a náklady na prototypování a zároveň zvyšuje účinnost celého systému. Pro optimalizaci optických systémů, Speos kombinuje modelování světelného výkonu s rozsáhlými specializovanými knihovnami a optimalizačními schopnostmi. Program umožňuje studovat interakce fotonů s mechanickými geometriemi a optickými vlastnostmi materiálů a rychleji tak může pomoci vytvořit funkční model [6].

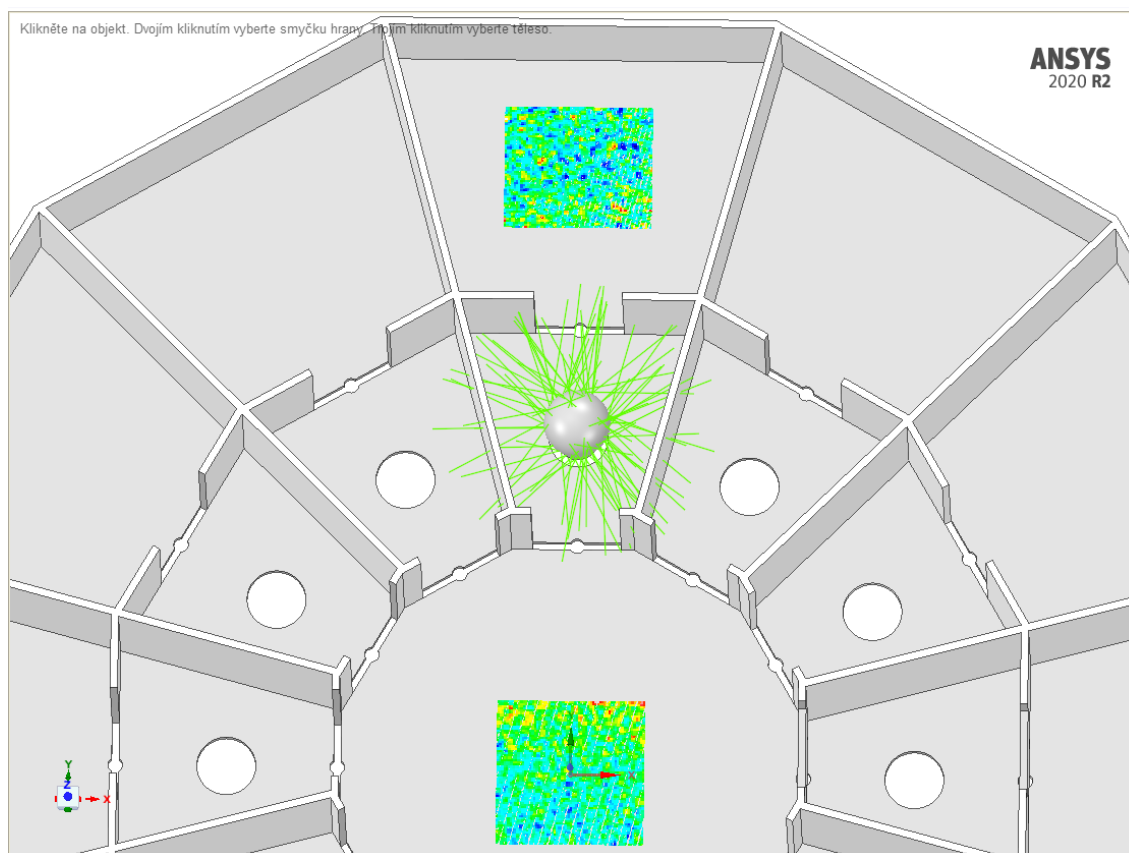
Pro případ simulace světelného boxu se bude jednat o optimalizaci komor, pro lepší optické vlastnosti a lepší homogenní světelné prostředí. Pro výpočet se vychází ze základního modelu boxu, jak lze vidět na modelu jež je na obrázku 3.9.



Obrázek 3.9 Pracovní prostředí Ansys Speos s navrhovaným kalibračním boxem.

3.2.2 Simulace prvotního návrhu

Obrázek 3.10 představuje prvotní návrh modelu kalibrační komory pro jeden světelný zdroj. Jedná se o základní model, kde se vychází ze základního proporcionálního rozložení hlavních příček boxu. Tento model ovšem se vyznačuje tím, že má dva tupé úhly v rozích, jež neumožňují plně využití potenciálu boxu. Pro lepší světelné podmínky uvnitř boxu je tedy nutnost navrhnout tyto prostory opticky optimalizované pro vytvoření opticky homogenního pole a dosažení co nejlepších optických vlastností.

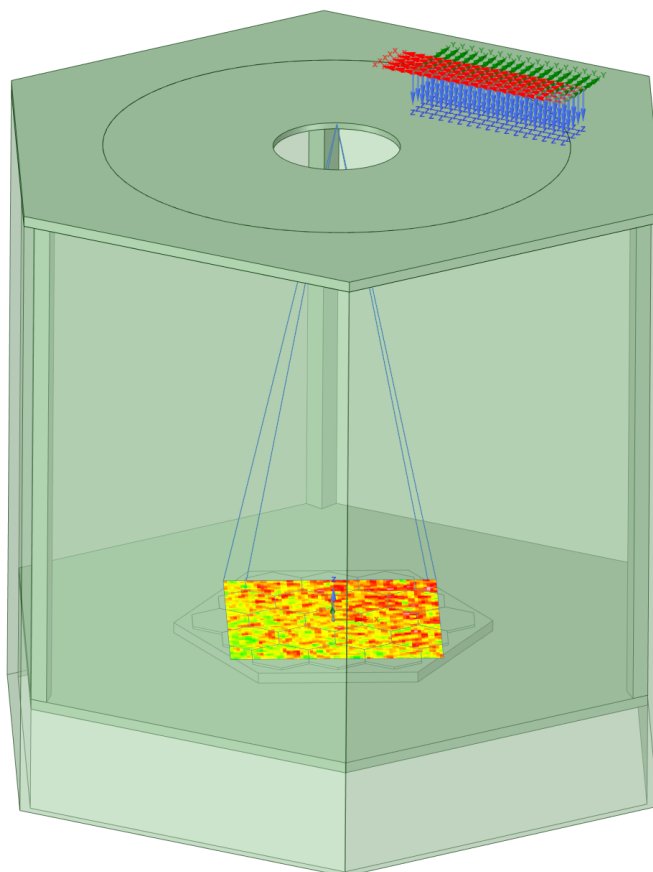


Obrázek 3.10 Simulace jednoho světelného zdroje, v prvotním návrhu kalibračního boxu

3.2.3 Simulace počtu LED diod

Z důvodu změny více typů světelných zdrojů za jeden a také díky nové koncepci kalibračního boxu, musela být vytvořena nová simulace osvětlenosti boxu. Pro započetí simulací bylo nutné prvně určit počet diod potřebných pro simulace. Jako referenční číslo počtu diod byl maximální počet diod, jež je možný provozovat při maximálním možném zatížení předřadníku pro každý typ diod.

Tento maximální počet vycházel jen z výpočtu maximálního výkonu předřadníku, a nerespektovat tak serio-paralelní zapojení diod. Výpočet vycházel z datasheetu použitých LED diod od firmy OSRAM.



Obrázek 3.11 Simulace v kalibračním boxu pro potřebný počet LED diod

Na obrázku 3.11 lze vidět simulaci pro LED diody typu Barevne 3, kde v simulaci bylo použito 85 LED diod, ale do boxu jich bylo použito pouze 18. Simulace vyobrazená na obrázku 3.11 byla prvotní simulace pro určení potřebného počtu diod pro kalibrační box. Pro tyto účely bylo použito prvně vždy 85 LED diod pro barevné diody a 20 LED diod pro bílé barvy, k určení potřebného počtu diod. Z obrázku je i patrné, že výsledná simulace byla pouze orientační pro výpočet počtu LED diod, jak lze vidět na obrázku, tak rozložení osvětlení v tomto typu rozložení LED diod bylo neakceptovatelné. I z tohoto důvodu bylo pozdější rozmístění LED diod upraveno na rozmístění LED diod mezi všechny desky plošných spojů a nikoli pouze na jeden.

Tabulka 3.1 Přehled LED zdrojů, maximálním počtem a typem zapojení v první variantě boxu

Bílé LED – Označení výrobce	Barva	U (V)	I (mA)	Ks max	Označení	Počet LED	Použito	DPS serie	na DPS v serii	na DPS	Uc (V)	Ic (mA)	Ec (lm)
GA PSLR31.13-JQJS-A1A2-1	PC Amber	6,25	150	26	Bíle 1	20	24	3	2	4	37,5	600	552
GW PSLT33.EM-K5L1-XX58	2700 K	6,13	150	27	Bíle 2	10	12	3	1	4	18,39	600	546
GW PSLT33.EM-LVL1-XX57	3000 K	6,13	150	27	Bíle 3	10	12	3	1	4	18,39	600	
GW PSLT33.EM-LWL1-XX55	4000 K	6,13	150	27	Bíle 4	10	12	3	1	4	18,39	600	
GW PSLT33.EM-LWL1-XX53	5000 K	6,13	150	27	Bíle 5	10	12	3	1	4	18,39	600	
GW PSLT33.EM-LXL3-XX51	6500 K	6,13	150	27	Bíle 6	10	12	3	1	4	18,39	600	
Barevné – Označení výrobce													
GB PSLM31.13-ETFR-56-1	Blue	2,93	100	85	Barevne 1	85	108	6	3	6	52,65	600	554
GT PSLM31.13-HRHT-26-KM	True Green	2,88	100	87	Barevne 2	27	30	6	1	5	17,28	500	508
GW PSLM32.UL-JSJU-NC-1	Lime PC	3,1	100	81	Barevne 3	16	18	6	1	3	18,6	300	514
GY PSLM31.13-HQHS-5F5G	Yellow PC	3,07	100	82	Barevne 4	29	36	6	1	6	18,42	600	551
GA PSLM31.23-GQGS-23-1	Amber	2,24	100	113	Barevne 5	48	60	6	2	5	26,88	500	553
GR PSLM31.23-FTGR-46-1	Red	2,24	100	113	Barevne 6	58	72	6	3	4	40,32	400	551

Tabulka 3.1 zobrazuje LED diody použité v kalibračním boxu. Dále jsou v tabulce zobrazeny vlastnosti jednotlivých typů LED diod, jako je barva světla, napětí na diodě, či proud diodou. Tabulka také obsahuje popis označení jednotlivých typů LED diod, použitých v práci pro zkrácení celého názvu. Taktéž tabulka obsahuje maximální počet diod, jež mohli být použity pro kalibrační box, kde bylo původně počítáno s maximálním výkonem předřadníku 25 W. Jak je ovšem vidět z tabulky, tak pro LED diodu Barevne 1 byl zvolený předřadník bohužel nedostačující a musel jej nahradit předřadník 45 W.

Tabulka 3.1 dále zobrazuje i počet použitých LED diod a jejich uspořádání na prvním zapojení desce plošných spojů, schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 3.15. Hodnota DPS série udává, kolik je pro daný typ diod použito desek plošných spojů zapojeno k sobě v sérii. Hodnota na DPS v sérii, poté udává, kolik je LED diod zapojeno do série na jedné desce plošných spojů a hodnota na DPS || udává kolik je LED diod zapojeno na jedné desce plošných spojů paralelně. Tabulka také obsahuje optimální počet diod Počet LED, jež vychází na základě prvotní simulace, a celkový počet použitých diod pro každý typ diod. Dále pak obsahuje i napětí a proud, jež budou diody potřebovat pro správnou funkci v daném zapojení. Na konci tabulky je poté sloupec s výslednou hodnotou osvětlenosti v rovině nad vzorky E_c .

Maximální počet diod je počítám za pomoci podílu výkonu a součinu napětí a proudu. Příklad výpočtu pro první řádek v tabulce 3.1:

$$K_{S_{MAX}} = \frac{P_{MAX_{předřadík}}}{U \cdot I} = \frac{25}{6,25 \cdot 0,15} = 26 \text{ Kusů} , \quad (3.1)$$

kde $P_{MAX_{předřadík}}$ představuje maximální výkon použitého předřadníku, U představuje napětí na jedné diodě, a I je proud jednou diodou.

Celkové napětí, jež bude potřebné pro LED diody pro jednu barvu je dáno součinem napětí na jedné diodě a počtem diod zapojených do série. Příklad výpočtu pro první řádek v tabulce 3.1:

$$U_c = U \cdot DPS_{serie} \cdot naDPS_{vserii} = 6,25 \cdot 3 \cdot 2 = 37,5 \text{ V} , \quad (3.2)$$

kde U představuje napětí na jedné diodě, DPS_{serie} představuje počet desek plošných spojů, jež jsou zapojeny v sérii, a $naDPS_{vserii}$ představuje počet diod zapojených do série na jedné desce plošných spojů.

Celkový proud, jež bude potřebné pro LED diody pro jednu barvu je dáno součinem proudu na jedné diodě a počtem diod zapojených paralelně. Příklad výpočtu pro první řádek v tabulce 3.1:

$$I_c = I \cdot naDPS_{||} = 150 \cdot 4 = 600 \text{ mA} , \quad (3.3)$$

kde I představuje proud jednou diodou, $naDPS_{||}$ představuje počet diod zapojených paralelně na jedné desce plošných spojů.

Po výpočtu maximálního počtu LED diod byla použita simulace, jež obsahovala od každé LED diody referenční počet diod. Tato simulace sloužila k výpočtu osvětlenosti

plochy v prostoru vzorků. Dle výsledku simulace byla zvolena referenční dioda s nejmenší osvětleností. U ostatních LED diod se tedy ručně spočítal potřebný počet diod do kalibračního boxu dle výsledků simulace poděleným počtem diod výsledek byl následně použit jako dělitel pro hodnotu výsledku u referenční diody.

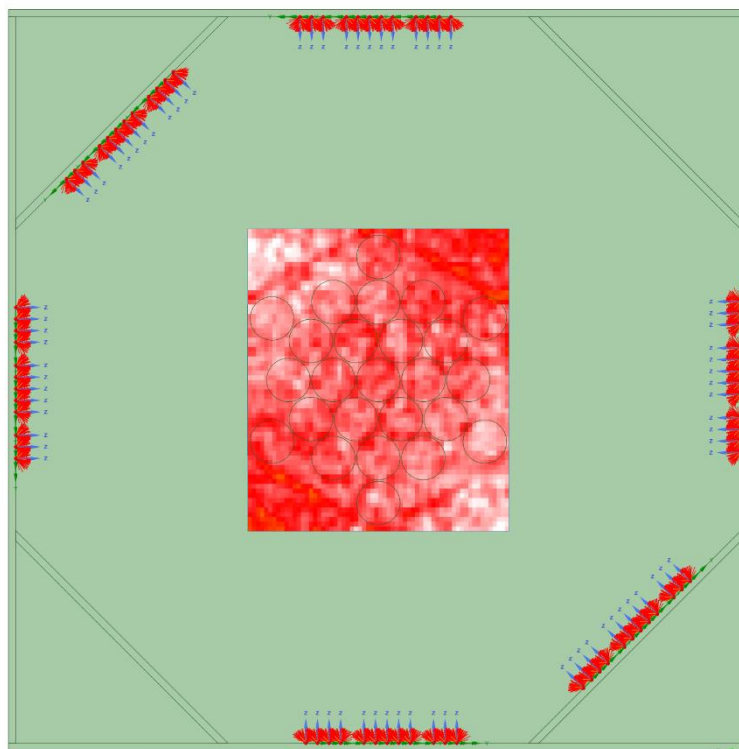
Po výpočtu počtu LED diod byl provedena opětovná simulace osvětlenosti na referenční rovině nad vzorky. Výsledné simulace vyšli téměř dle očekávání a všechny simulace byli v přijatelném rozmezí osvětlenosti. Výsledné hodnoty osvětlenosti simulace jsou uvedeny v tabulce 3.1.

3.2.4 Ověření počtu diod na novém modelu

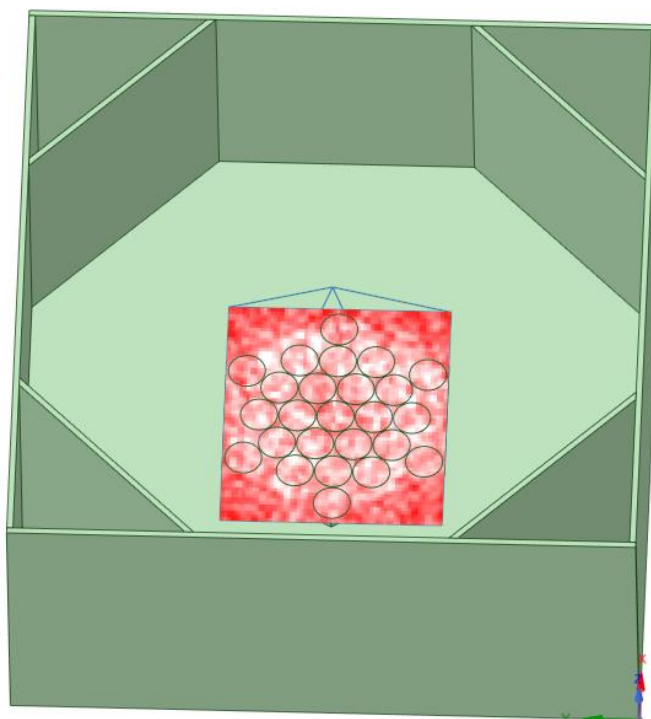
Jelikož byla provedena změna konceptu celého boxu, musela být znovu provedena simulace osvětlenosti na referenční rovině nad vzorky. Nově provedené simulace v nově navrhnutém boxu nezjistili, že by nový návrh boxu nějak výrazně ovlivnil osvětlenost v boxu.

Kvůli novému prostoru boxu byla i provedena simulace výpočtu osvětlenosti při umístění diod na strany boxu. Při srovnání tedy osvětlenosti ze stran boxu, a z vrchní desky boxu je evidentní, že u osvětlení z boku, nebude osvětlenost na všech vzorcích stejná. Navíc z obrázku 3.14 je patrné, že při osvětlení ze stran boxu, bude na vzorcích menší osvětlenost nežli při umístění diod na horní víko kalibračního boxu.

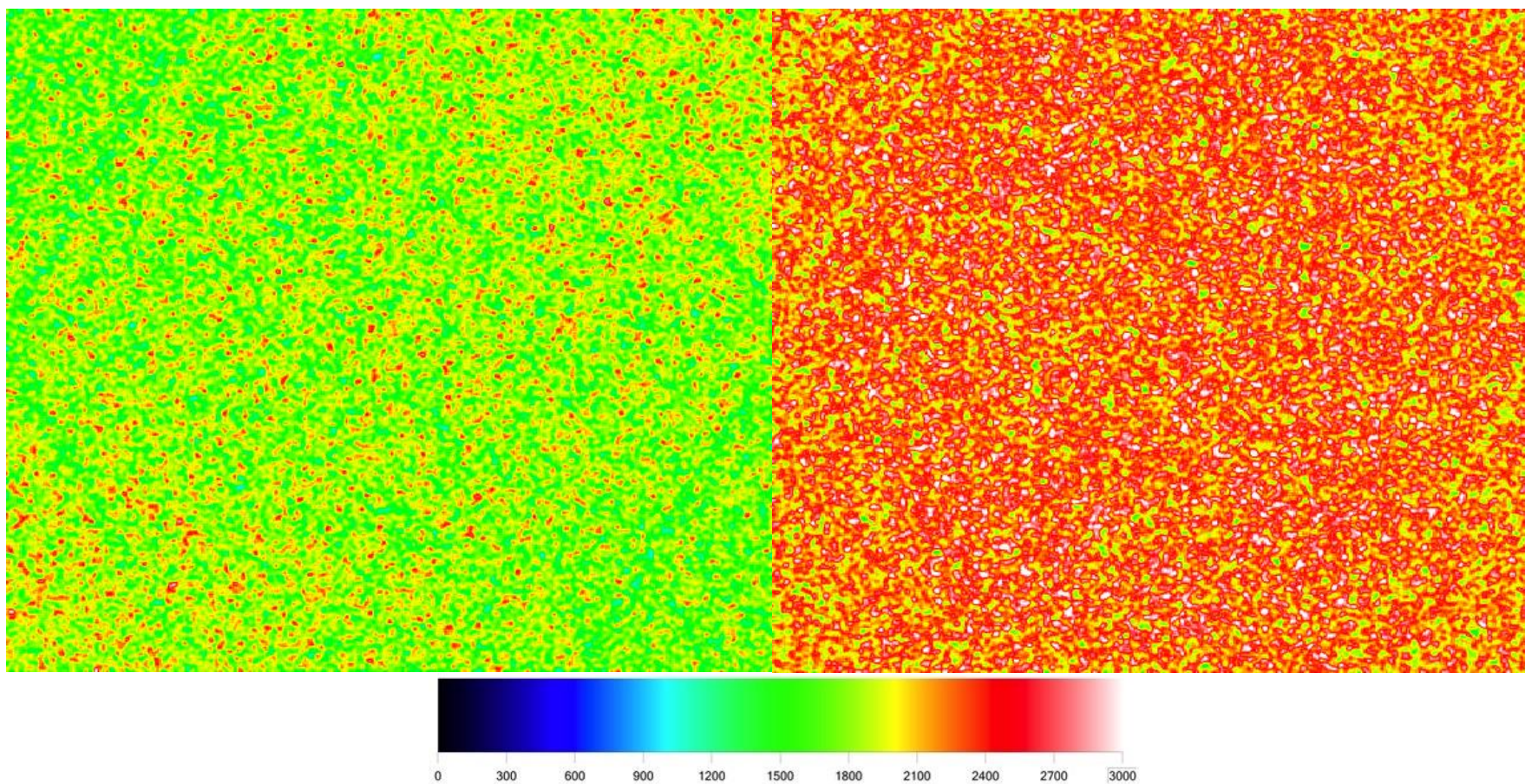
Níže lze vidět umístění vzorků v kalibračním boxe pro oba případy simulací, a to jak pro umístění LED diod na stěny kalibračního boxu, kde dochází k neosazení dvou stěn boxu, tak i pro umístění LED diod na horní víko kalibračního boxu.



Obrázek 3.12 Simulace v kalibračním boxu pro osvětlenost na vzorcích při použití červených diod a umístění DPS na strany boxu



Obrázek 3.13 Simulace v kalibračním boxu pro osvětlenost na vzorcích při použití zelených led diod



Obrázek 3.14 Zobrazení osvětlenosti vzorků E (lx) vlevo při umístění LED diod na sněhy boxu vpravo při umístění na horní víko kalibračního boxu

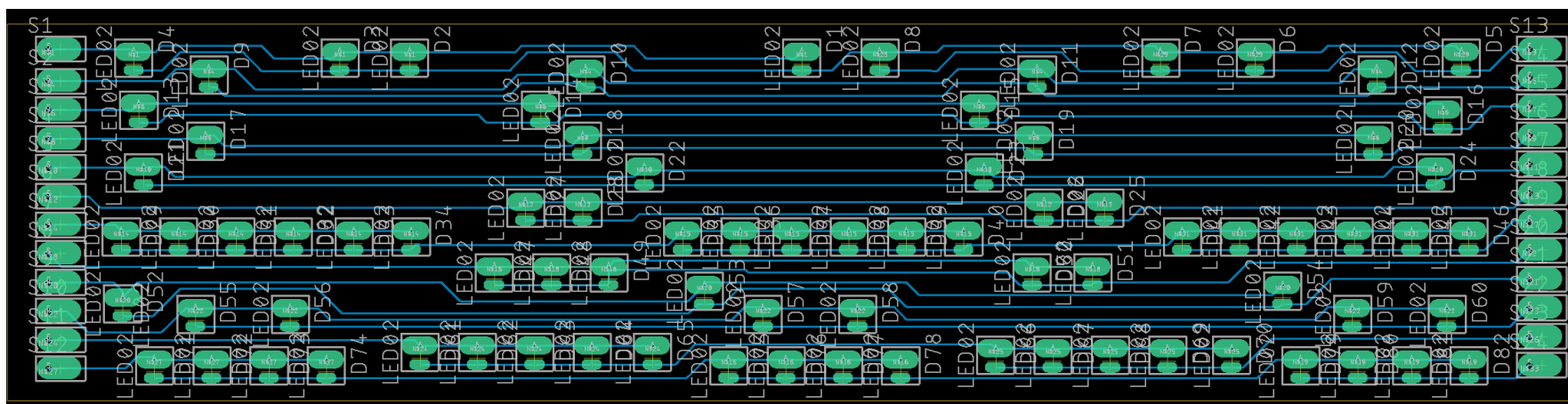
3.3 Návrh desky plošných spojů

V této kapitole bude probrán návrh desky plošného spoje, včetně jeho postupného upravování od prvního návrhu až po finální verzi desky plošného spoje. V této kapitole také bude probráno jaké důvody byli voleny pro dané typy řešení jak zapojení tak i rozmístění na desce plošného spoje.

3.3.1 Eagle Autodesk

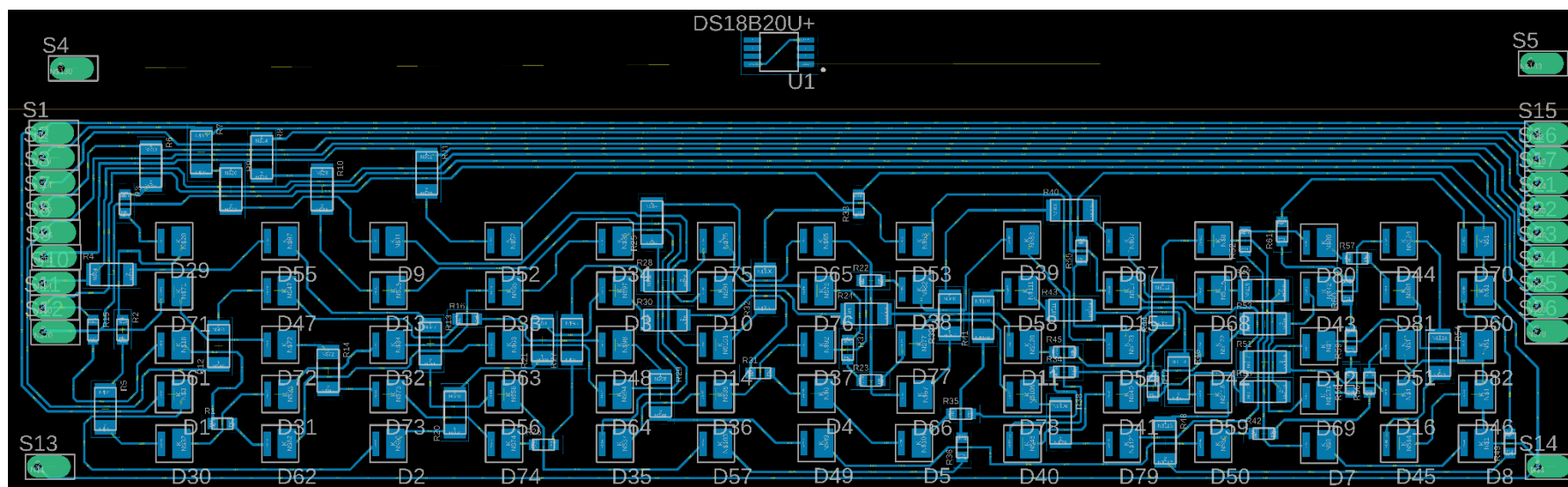
Program Eagle je software od společnosti Autodesk sloužící k automatizaci elektronickému návrhu – EDA (z anglického názvu electronic design automation), který umožňuje návrhářům desek plošných spojů (DPS) navrhovat elektrická schémata, a na jejich základě pak umožňuje vytvářet osazení, volit si vlastní trasování vodivých cest a designovat samotnou desku plošného spoje, jež pak z vygenerovaných dat je možno nechat vyrobit v reálnou DPS. K samotné realizaci slouží uživatelům rozsáhlá knihovna samotného programu Eagle, která obsahuje nejrůznější elektrické komponenty a také možnost nahrát si do knihovny komponent jakoukoli vlastní komponentu.

Program Eagle je dostupný zdarma, ovšem limituje uživatele k návrhu DPS do rozměrů maximálně 80 cm². Ovšem pro potřeby diplomové práce je tato plocha dostačující. Navíc program má výhodu že jej lze ovládat na více operačních systémech na rozdíl od předešlých dvou programů, jež byli kompatibilní pouze se systémem Windows [7].



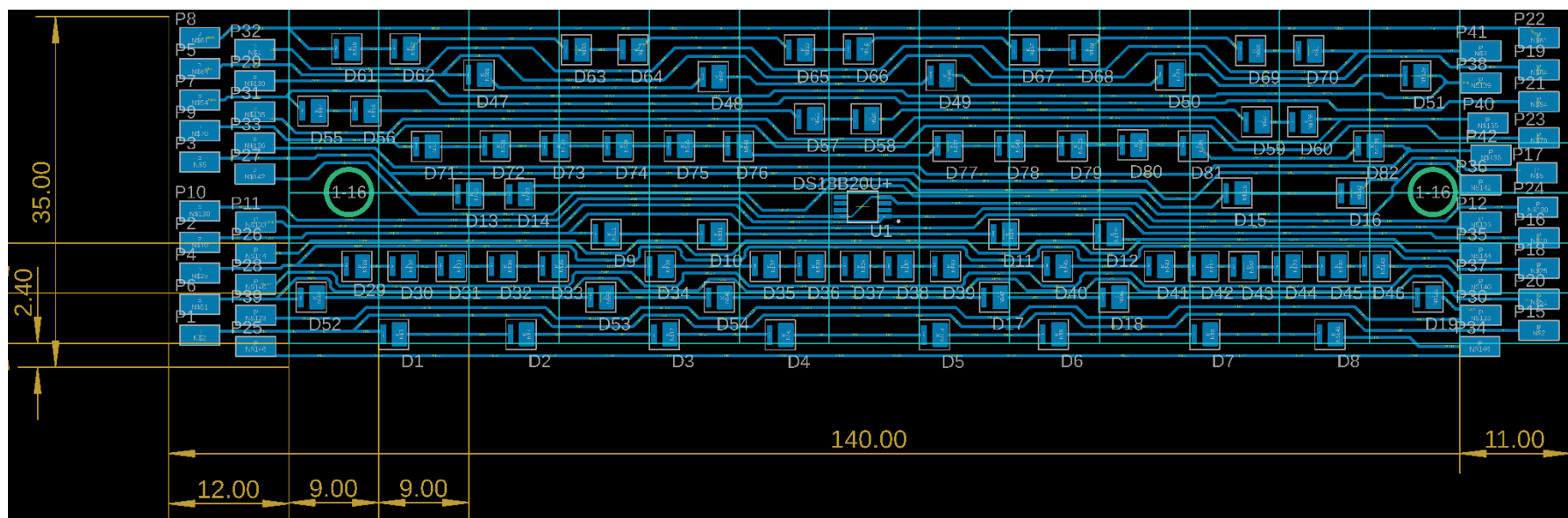
Obrázek 3.15 Prvotní návrh DPS pro druhý návrh boxu se zapojením se společnou zemí pro všechny typy diod

Na základě simulací z programu Ansys Speos, který ze simulací spočítal potřebný počet LED diod, bylo možné navrhnout schéma zapojení desky plošných spojů. Schéma zapojení bylo navrženo na základě volt-ampérového grafu zatížení předřadníků pro LED diody. Graf zatížení předřadníků definoval možné kombinace zapojení LED diod jak na jednotlivé desce, tak i jako zapojení celku. Popis tohoto rozvržení LED diod je v tabulce 3.1. Na obrázku 3.15 je zobrazeno schéma prvního návrhu zapojení desky plošných spojů. Schéma zapojení vycházelo ze sério – paralelního zapojení s tím, že by desky plošných spojů, byli k sobě zapojeny sériově, a na deskách by poté bylo další sério – paralelní zapojení LED diod. Původní návrh byl tety z hlediska provedení nejjednodušší, co do složitosti návrhu a zapojení. Návrh byl poté co do rozměrů 128 mm na 30 mm.



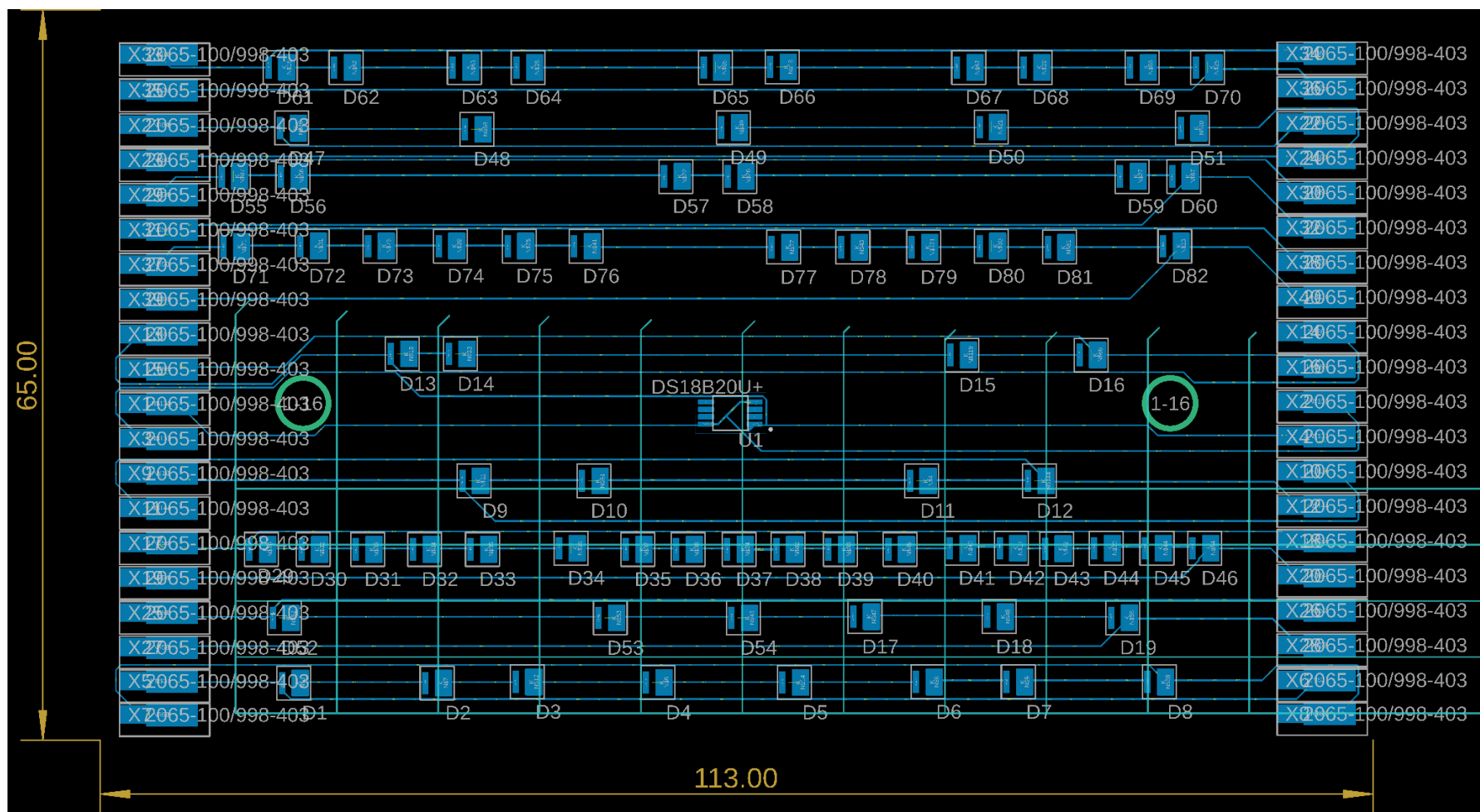
Obrázek 3.16 Návrh DPS pro pravidelnou mřížku použitím nulových odporů

Obrázek 3.17 zobrazuje druhý návrh zapojení desky plošných spojů. Tento typ zapojení již respektoval dvě podmínky zapojení. První podmínka tohoto zapojení byla uspořádání LED zdrojů do pravidelné mřížky na desce plošných spojů, a taktéž splňovalo podmínku jež říkala, že by LED diody měli být rozmístěné rovnoměrně po celé ploše DPS. Aby tyto dvě podmínky byly splněny, bylo nutné první navrhnout zapojení, jež by spojilo všechny země předřadníků LED diod v jednu, a desky plošných spojů by propojovali LED diody paralelně mezi sebou. Na deskách by poté byli LED diody zapojeny do série, aby se splnila podmínka tolerance volt – ampérové charakteristiky Led předřadníků. Pro to, aby bylo zapojení možno realizovat, bylo nutné použít k propojení vodivých cest, mezi některými LED diodami nulových odporů, které sloužili jako vodivá cesta přes vodivé cesty LED diod.

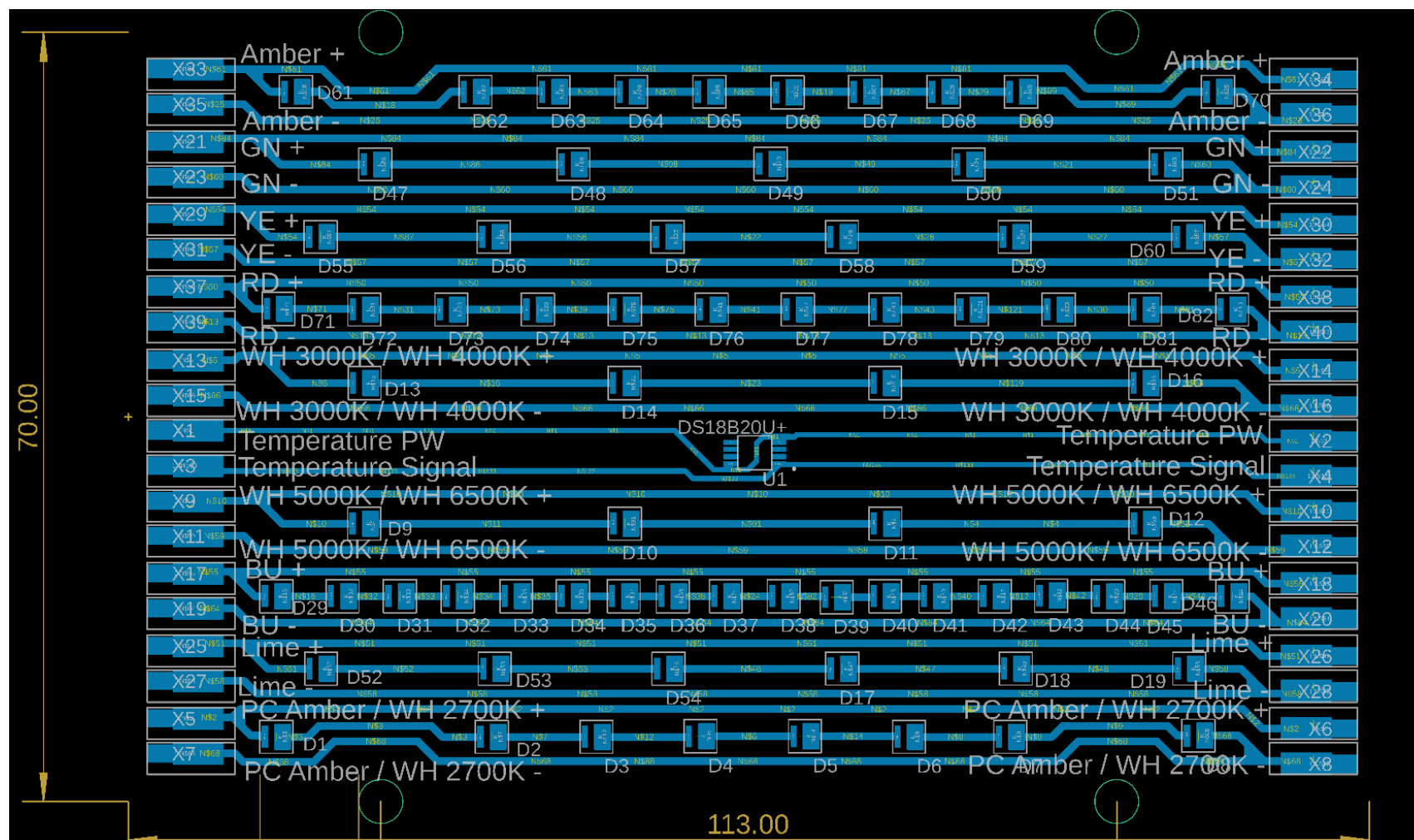


Obrázek 3.17 Návrh PDS pro separované záporné polarity napájení

Další návrh již počítal s vedením vodivých cest jak pro kladnou, tak i zápornou polaritu napájení. Oproti předešlému návrhu, bylo však v tomto návrhu použito oddělených záporných polarit, pro každý předřadník zvláště. Jak lze vidět na obrázku 3.17, tak zapojení obsahovalo i teplotní snímač, pro snímání teploty desky plošného spoje, a taktéž již zde bylo počítáno s možností přichycení desky plošného spoje do kalibračního boxu, a to pomocí přišroubování šroubem o metrickém závitu M4. Velikost nové desky plošného spoje byla také kvůli více místu pro oddělené kontakty zvětšena, i když nový návrh již nerespektovat zapojení s uspořádáním dle pravidelné mřížky. Ovšem více konektorů a více náročnosti na připevnění desky plošného spoje si tohle zvětšení vyžádala. Nový rozměr tudíž byl 140 mm na 35 mm.



Obrázek 3.18 Náhled DPS při použití nových Wago svorek

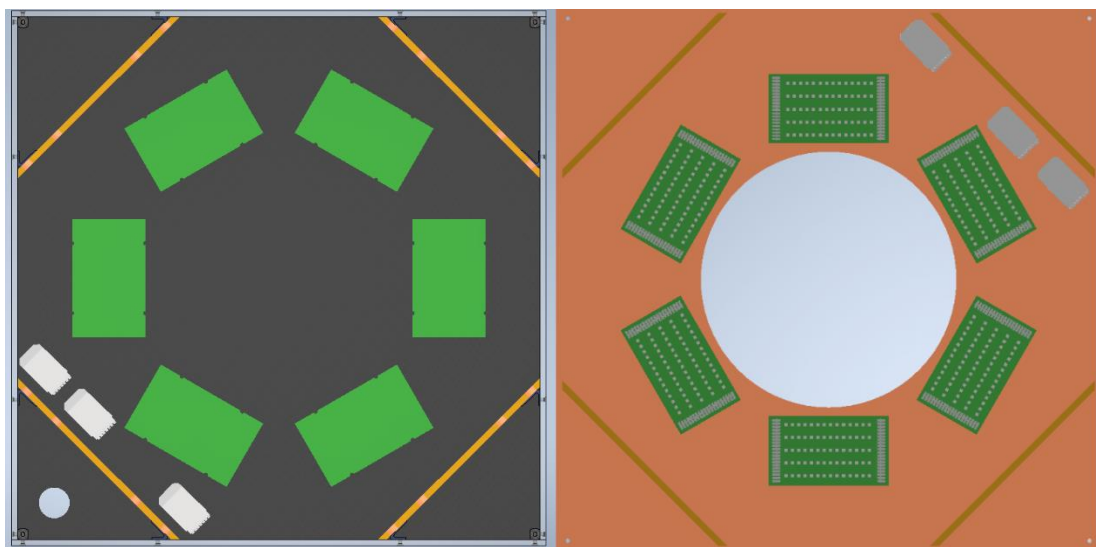


Obrázek 3.19 Finální návrh DPS pro výrobu

Jak již bylo zmíněno v kapitole výše, tak nový koncept boxu, umožňuje větší možnosti návrhu desky plošných spojů. Jak můžeme vidět v návrhu na obrázku 3.18 či na finální podobě desky na obrázku 3.19. V prvním ze zmíněných bylo již použito místo pájecích kontaktů na desce plošných spojů možnost osazení desky pájecími wago svorkami, pro připojení napájení na desky a propojení jednotlivých desek vodiči. Tyto wago svorky totiž umožňují přichycení vodičů pomocí drženého kontaktu zvaného push-in.

Ovšem osazení svorek novými svorkami si vyžadovalo i změnu celkového designu desky plošného spoje. Aby bylo možné totiž osadit desky, novými wago svorkami, bylo nutné celou desku zvětšit hlavně do šířky. Nové svorky totiž zabírají poměrně dost místa na napájení i do prostoru, jež potřebují pro manipulaci.

Jelikož v novém návrhu boxu bylo i nadále místo pro zvětšení rozměrů desky plošného spoje, bylo toho využito pro více místa mezi svorkami pro připojení vodiče a také k posílení tloušťky vodivých tras a také k zvětšení mezer mezi vodivými cestami. Výsledný návrh desky plošného spoje, jež je použit v kalibračním boxu je na obrázku 3.19. Finální rozměry desky tudíž dosahují rozměrů 133 mm na 70 mm.



Obrázek 3.20 Náhled konstrukce finálního návrhu boxu

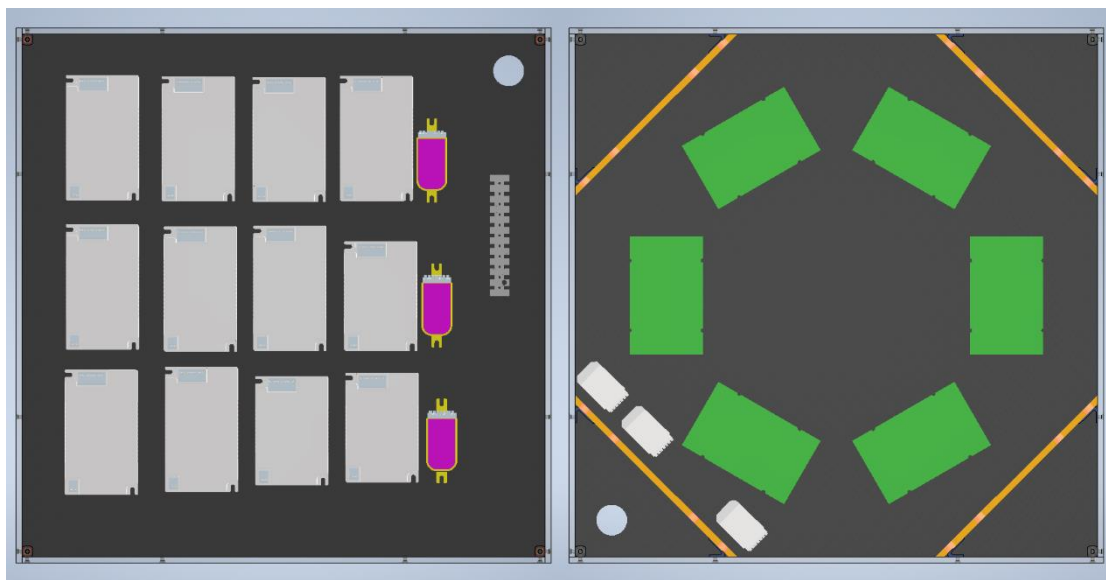
Na obrázku 3.20 je možné vidět rozmístění desek plošných spojů v kalibračním boxu. Desky jsou umístěny v kalibračním boxu pod vrchní deskou, kde je také umístěn otvor. Na obrázku vlevo lze vidět pohled do boxu na uspořádání prvků bez vrchní desky. Na obrázku vpravo se nachází pohled na rozmístění prvků při pohledu od zad boxu na desky plošných spojů.

3.4 Návrh komunikace boxu a měření teploty

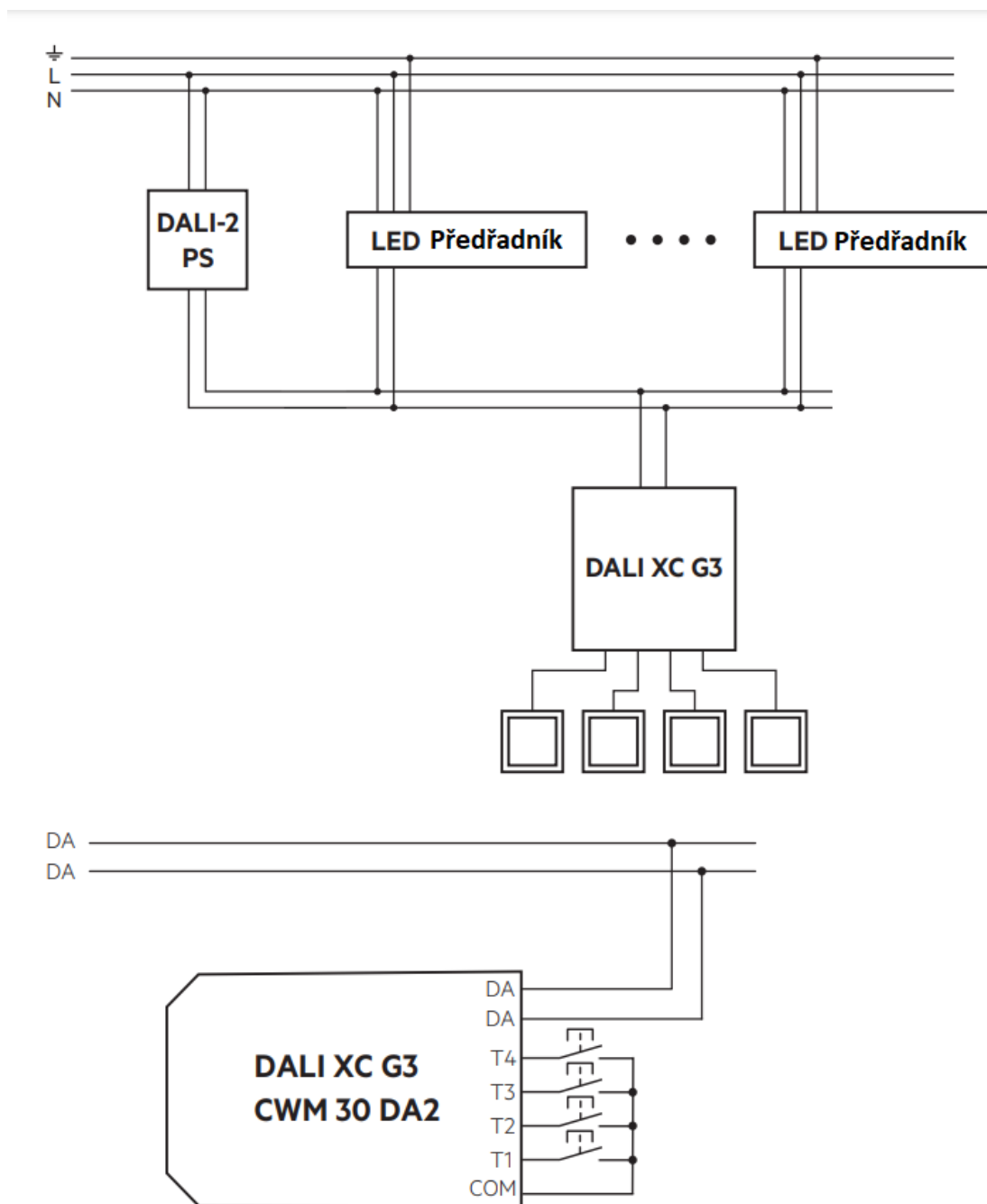
Ovládání jednotlivých předřadníků v boxu je řešeno pomocí rozhraní DALI. DALI je otevřený standard, jež pomocí dvoulinky umožňuje komunikaci mezi vysílačem a předřadníkem. K tomuto účelu slouží v kalibračním boxu celkem tři dali rozhraní, jež každé dokáže ovládat zároveň 4 předřadníky. Dali pracuje na principu jednoho zdroje, jednoho vysílače a připojených předřadníků. Schéma principu zapojení ovládání předřadníků pomocí rozhraní dali je na obrázku 3.22 níže.

V případě kalibračního boxu je možnost ovládání buďto pomocí dali rozhraní v mobilním telefonu, přes připojení k Bluetooth vysílači umístěném v boxu, či pomocí tlačítek, jež jsou umístěny na stěně boxu, a umožňují ovládání bez nutnosti připojení se k vysílači pomocí mobilního telefonu.

Na obrázku 3.21 lze vidět návrh umístění komponent komunikace pomocí DALI rozhraní. Primárně byl účel umístit komunikační jednotky s rozhraním Bluetooth do prostoru kalibračního boxu, a to z důvodu lepšího signálu pro připojení, jelikož v zadní části boxu by nemuselo být možné se připojit k rozhraní pomocí mobilního zařízení, a to z důvodu, že by samostatná kontrakce boxu fungovala jako Faradayova klec.

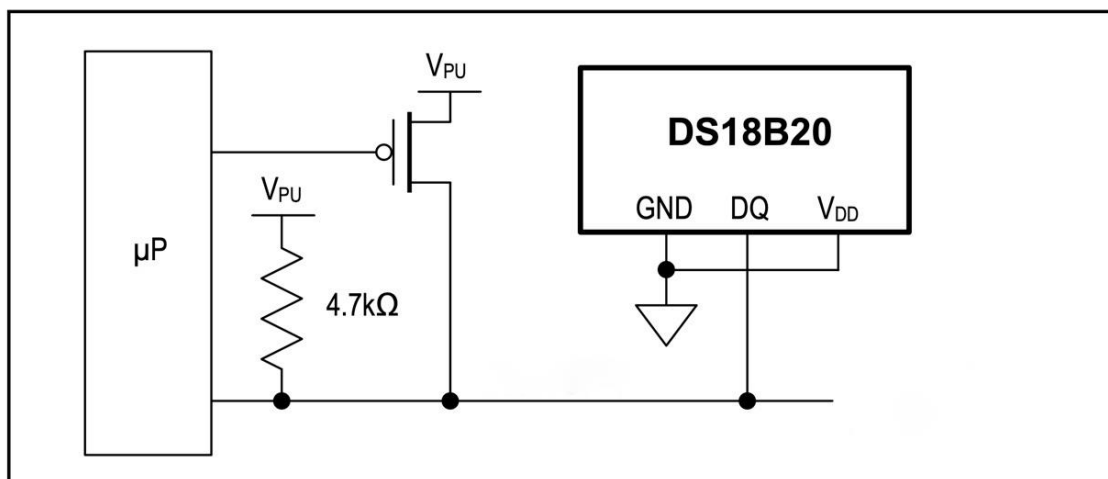


Obrázek 3.21 Náhled umístění komponent pro komunikaci rozhraní DALI



Obrázek 3.22 Princip zapojení komunikace na principu DALI

Pro kontrolu a možnost vyhodnocení teploty desek plošných spojů, jsou desky osazeny teplotními snímači DS18B20U+. Teplotní snímače jsou do 125 °C a mohou tak přesně určit teplotu desek. Tyto teplotní snímače navíc mají jedno velké pozitivum, a to je možnost napájení jedním přívodním vodičem a k tomu druhým vodičem zajišťuje komunikaci. Tudiž samotné teplotní snímače stačí zapojit na dva vodiče a je tak zajištěna jejich plná funkčnost.



Obrázek 3.23 Princip zapojení teplotního snímače

4. REALIZACE KALIBRAČNÍHO BOXU

Všechny předchozí kroky vedli k tomu, aby mohl být box realizován dle předchozích výpočtů a návrhů. Tudíž dle předchozích kapitol, se začal kalibrační box konstruovat. Realizace kalibračního boxu probíhala dle výkresové dokumentace, jež je přiložena v přílohách diplomové práce.

4.1 Výroba kalibračního boxu

Pro potřeby výroby prvků pro kalibrační box, bylo potřeba dané prvky prvně navrhnout. Co se týče konstrukce opláštění boxu, horního a dolního víka, mezidesky pro umístění vzorků a desek do rohů boxu, tak bylo nutné vytvořit výkresovou dokumentaci pro výrobu desek na míru pro kalibrační box. Výkresová dokumentace vycházela z modelu, jež byl zmíněn v předchozích kapitolách. 3D model konstrukce boxu se nachází na obrázku 3.8.

Další částí kalibračního boxu, jež bylo nutné zadat do výroby, byli desky plošných spojů. DPS se navrhli v programu Autocad Eagle a byli zaslány ve formátu Gerber 274X do PCB Benešov, kde byli desky vyráběny. Pro výrobu bylo ještě upřesněno, aby DPS bylo IMS deska na hliníkové podložce, s bílou nepájivou maskou, pocínování HAL a potiskem dle zaslaného návrhu viz obrázek 3.19.

Po vyrobení desek v PCB Benešov se desky nechali osadit na Ústavu mikroelektroniky, v laboratoři mikroelektronických technologií a pouzdřením pod vedoucím Ing. Alexandrem Otáhalem.

4.2 Konstrukční provedení kalibračního boxu

Konstruování kalibračního boxu probíhalo od sestavení konstrukce, přes upevnění prvků až po elektro zapojení prvků. Celá montáž se dá tedy rozdělit do dvou částí. První z nich je samotná konstrukce boxu, a ta druhá je zapojení elektro do již hotové konstrukce. V této části bude probráno konstrukční řešení, jež spojuje kalibrační box do jednoho celku.

Jako první konstrukční prvek bylo nutno vyřešit pospojování vyrobených desek dohromady, aby drželi tvar a vytvořili pevnou konstrukci. Pro tento účel byli vytvořeny z hliníkové tyče o čtvercovém profilu tyče o délce 204 mm pro část kalibračního boxu a délky 34 mm pro část se zapojením elektro. Po zakrácení na požadované délky byli do profilů udělány závity pro přichycení šroubů. Provedení profilu pro část kalibračního boxu lze vidět na obrázku 4.1.

Jako další bylo potřeba vyrobit uchycení rohových desek do kalibrační části boxu. Pro tyto účely se nechali vyrobit profily z plechu nerezové oceli o tloušťce 1,5 mm, jež měli délku 190 mm a byli ohnuty do úhlu 45 stupňů. Do daných profilů se pak vyvrtali díry, a udělali se závity pro uchycení ke stranám boxu a přichycení rohových desek. Provedení přichycení je na obrázku 4.2.

Po vyrobení pevnostních částí boxu, se ještě dodělali do desek boxu k dírákům pro přichycení k profilům zahloubení, aby došlo po použití šroubů se zápusťnou hlavou k zapuštění daných šroubů do boxu což mělo za následek konstrukci, jež ničím nevyčnívala do prostoru mimo box.

4.3 Konstruování boxu a zapojení

Samotná část kalibračního boxu, lze konstrukčně rozdělit do čtyř částí. První z částí je samotná konstrukce kalibračního boxu, jež se sestává z hliníkových profilů se závity, jež drží pohromadě opláštění boxu, tvořené z desek Dibondu o tloušťce 6 mm. K propojení desek a hliníkových profilů bylo použito metrických šroubů velikosti M4 a délce 16 mm. Tyto šrouby taktéž spojovali horní i spodní víko boxu k výše zmíněným profilům z hliníku. Provedení spojení části boxu lze vidět na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1 Konstrukční provedení pevnostního uchycení stěn boxu v kalibrační části boxu



Obrázek 4.2 Konstrukční provedení uchycení rohových desek boxu

Druhá část boxu je opět konstrukčního charakteru a je jím prostor kalibračního boxu, jež bude sloužit pro měření. Tato část je tvořena deskami, jež jsou umístěny v rozích, aby vnitřní tvar boxu připomínal co nejvíce kruh a dosáhli jsme tak co nejlepších světelných podmínek. Pro přichycení daných desek se využívá ohýbaný plech do úhlu 45 stupňů, o tloušťce 1,5 mm, pro zajištění ukotvení desek na požadovaném místě. Samotný prostor za deskami poté slouží jako prostor pro vedení napájení k deskám plošných spojů, samotného napájení boxu a také pro manuální ovládání předřadníků. Provedení uchycení rohových desek k boxu je na obrázku 4.2.



Obrázek 4.3 Konstrukční provedení uchycení DPS ke konstrukci boxu

Třetí konstrukční část je částí, jež obsahuje horní víko, ke kterému jsou připevněny desky plošných spojů. Provedení je zajištěno pomocí zapuštěných šroubů z vnější strany boxu a na vnitřní straně na straně desek plošných spojů, jsou ony desky připevněny maticemi. Použité šrouby pro připevnění DPS jsou opět metrické šrouby M4, ovšem délky 10 mm. Konstrukční provedení přichycení včetně pospojování desek plošných spojů je na obrázku 4.3.



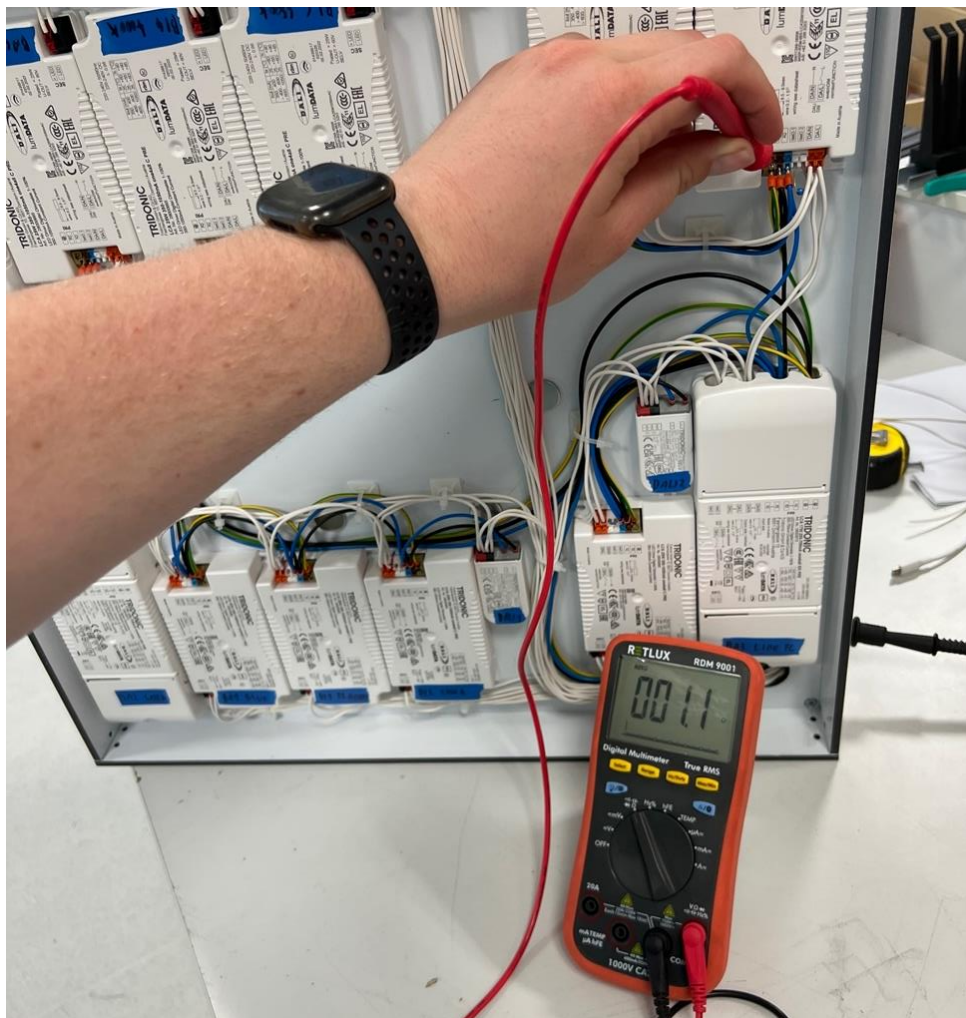
Obrázek 4.4 Konstrukční rozložení prvků v elektro části boxu

Čtvrtá část kalibračního boxu se skládá z elektro prostoru na zadní straně kalibračního boxu. Zde se nachází předřadníky pro napájení LED diod a také napájení pro ovládání po rozhraní DALI. Připevnění prvků je provedeno pomocí oboustranné pásky umístěné mezi mezidesku a předřadníky. Zapojení elektro prostoru a rozmístění prvků v elektro prostoru je na obrázku 4.4

5. OŽIVENÍ A TESTOVÁNÍ BOXU

5.1 Oživení boxu

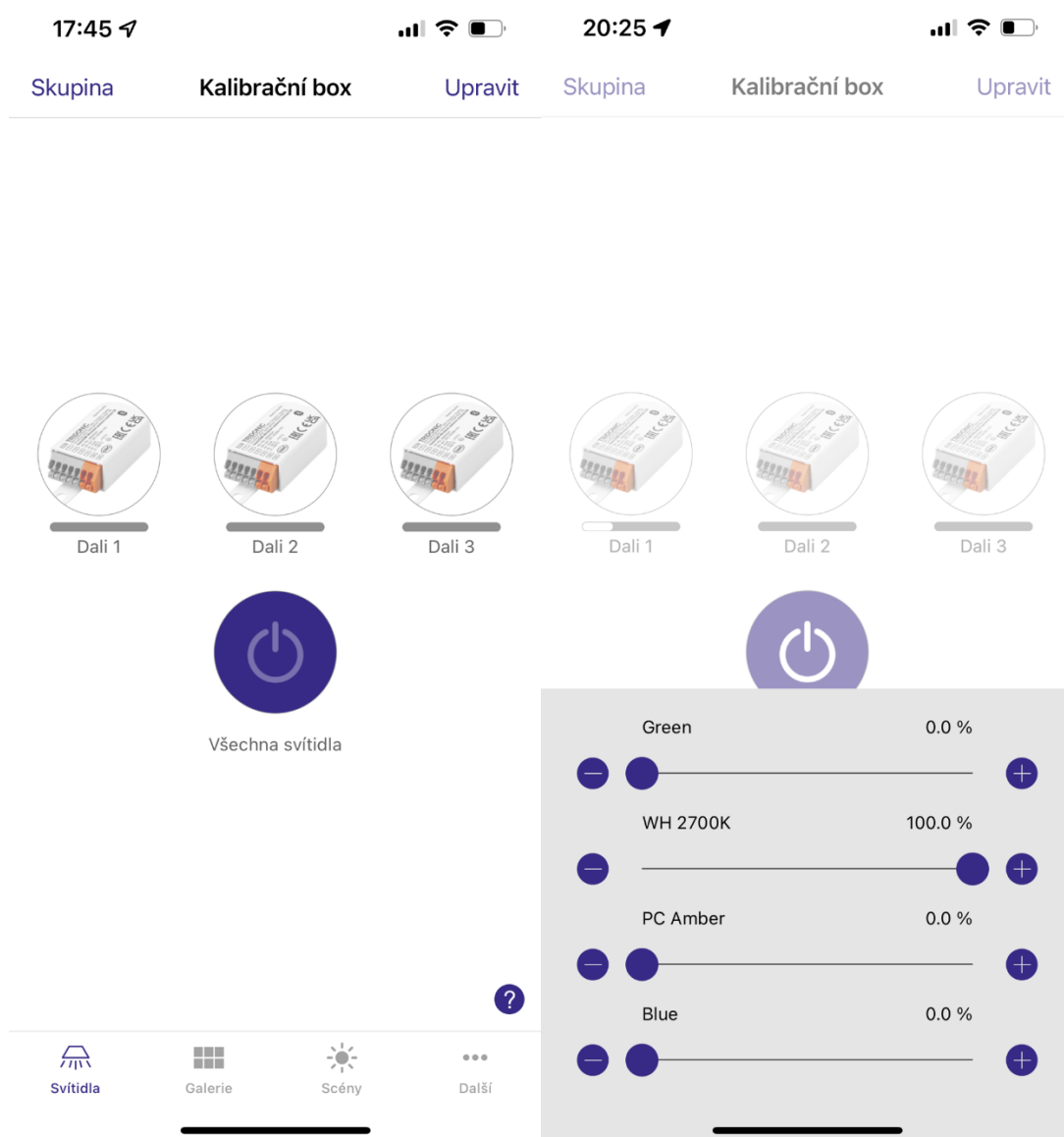
Po sestavení kalibračního boxu, mohlo být zahájeno jeho ožívování. Ovšem před zahájením ožívování, bylo nutné provést kontrolu zapojení. Pro tyto čely bylo provedeno měření správného zapojení, jak zapojení na straně síťového napájení, tak na straně napájení z předřadníků pro LED diody. Další test, jež byl proveden, bylo testování izolačních odporů zapojení, zda nedošlo během zapojení k špatnému připojení v boxu, či během instalace nedošlo k poškození vodičů či spojení konektorů.



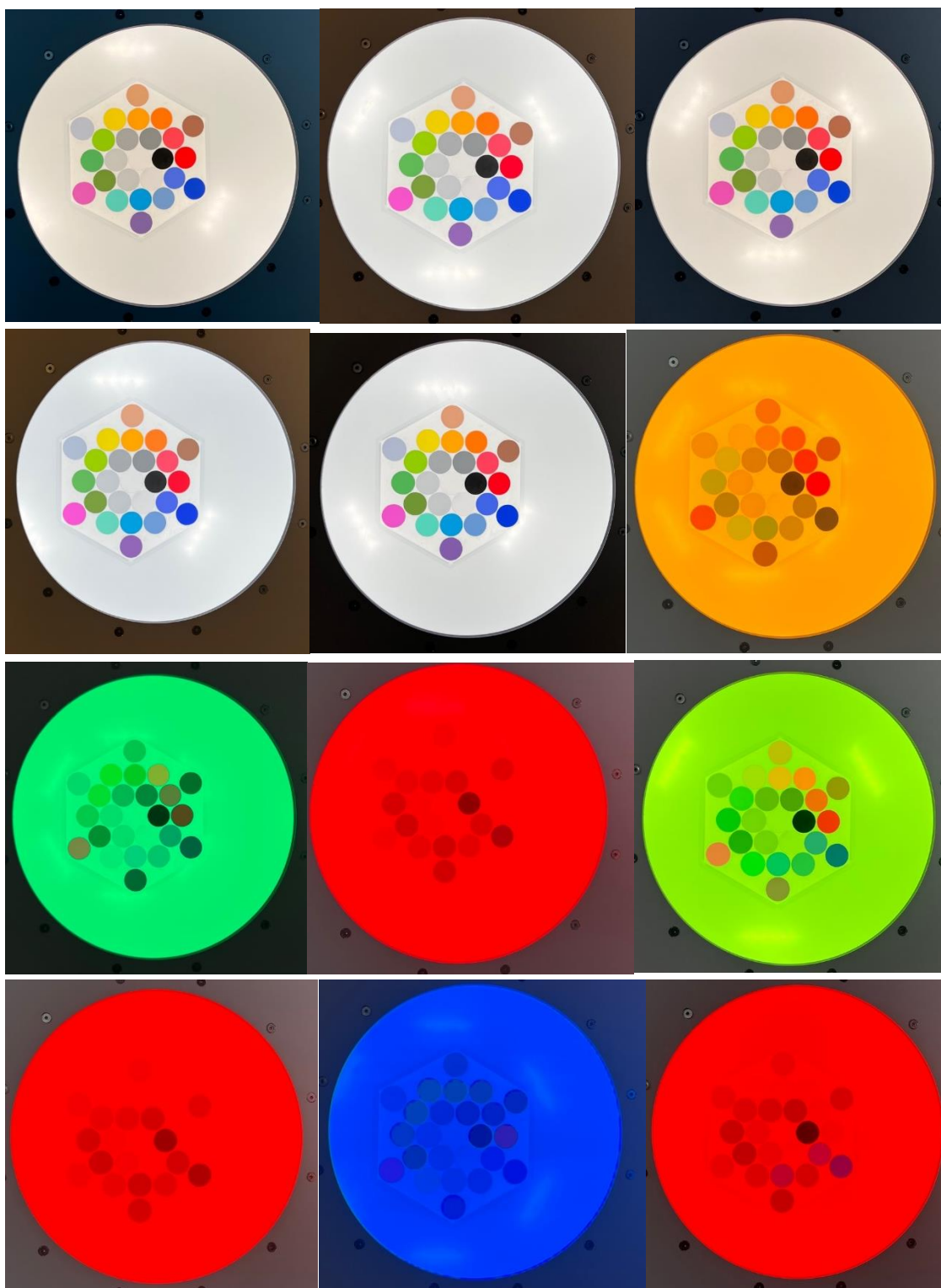
Obrázek 5.1 Kontrola zapojení kalibračního boxu.

Po provedení kontroly zapojení bylo provedeno oživení kalibračního boxu. Než proběhl test všech LED diod v kalibračním boxu, museli být prvně naprogramovány tlačítka pro ovládání boxu bez příslušné aplikace. Pro účely lepší orientace v programovacích a ovládacím programu, byly prvně pojmenovány všechny kanály a diody, jež ovládají. Naprogramované kanály s diodami lze vidět na obrázku 5.2.

Následně byl proveden test funkčnosti všech diod a byli naprogramované tlačítka pro možnost manuálního ovládání bez přístupu k aplikaci. Funkčnost všech led diod je vidět na obrázku 5.3.



Obrázek 5.2 Nastavený ovládací program kalibračního boxu.



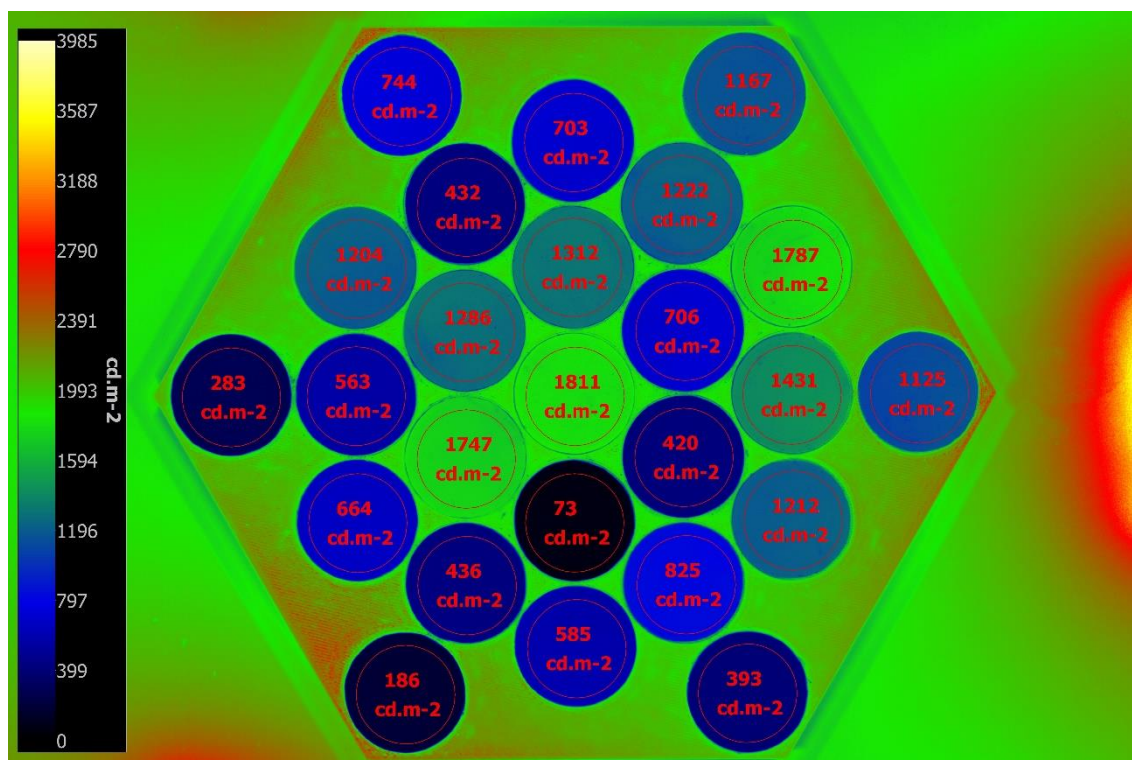
Obrázek 5.3 Testování funkce všech LED diod v boxu.

5.2 Testování kalibračního boxu

Po provedení testování funkčnosti celého boxu, bylo provedeno měření na kalibračním boxu pomocí jasového analyzátoru. Měření bylo provedeno pro Bílé diody o barvě chromatičnosti 2700 K, což by mělo odpovídat světlu klasické žárovky.



Obrázek 5.4 Testování kalibračního boxu, pomocí jasového analyzátoru



Obrázek 5.5 Výstup z měření pomocí jasového analyzátoru

První bylo provedeno měření pomocí jasové analyzátoru. Výsledek tohoto měření lze vidět na obrázku 5.5. Následně bylo provedeno měření pomocí spektrometru. Jelikož měření pomocí spektrometru lze považovat za přesné měření, jsou tyto hodnoty považovány za referenční hodnoty k určení odchylky měření pomocí jasového analyzátoru.

Výsledné hodnoty z obou měření byly vloženy do tabulky 5.1, kde bylo také vypočteno, jakou odchylku jasový analyzátor má od referenční hodnoty. Z tabulky je patrné, že výsledná odchylka nebyla v žádné z naměřených hodnot vyšší než 4 %.

Tabulka 5.1 Přehledem naměřených hodnot na jasovém analyzátoru.

Kontrolní vzorek	L _{referenční}	L _{měřené}	ΔL	δL
číslo:	(cd*m ⁻²)	(cd*m ⁻²)	(cd*m ⁻²)	(%)
1	1853	1811	42	2,24
2	1767	1747	20	1,12
3	1310	1286	24	1,85
4	1331	1312	19	1,46
5	721	706	15	2,02
6	430	420	10	2,24
7	75	73	2	2,74
8	603	585	18	3,05
9	849	825	24	2,78
10	1253	1212	41	3,31
11	1471	1431	40	2,71
12	1810	1787	23	1,29
13	1228	1222	6	0,51
14	706	703	3	0,38
15	438	432	6	1,32
16	1208	1204	4	0,36
17	567	563	4	0,79
18	669	664	5	0,69
19	442	436	6	1,26
20	194	186	8	3,98
21	293	283	10	3,38
22	765	744	21	2,72
23	1184	1167	17	1,46
24	1156	1125	31	2,70
25	406	393	13	3,19

Naměřená odchylka je rozdíl referenční hodnoty jasu, naměřené pomocí spektorradiometru, a naměřené hodnoty pomocí jasového analyzátoru. Příklad výpočtu pro první řádek v tabulce 5.1:

$$\Delta L = L_{\text{REFERENČNÍ}} - L_{\text{MĚŘENÉ}} = 1853 - 1811 = 42 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}, \quad (5.1)$$

kde $L_{\text{referenční}}$ představuje hodnoty naměřené pomocí spektorradiometru a $L_{\text{měřené}}$ představuje naměřené hodnoty pomocí jasového analyzátoru.

Naměřená procentuální odchylka je podíl naměřené odchylky a referenční hodnoty jasu. Příklad výpočtu pro první řádek v tabulce 5.1:

$$\delta L = \frac{\Delta L}{L_{\text{REFERENČNÍ}}} \cdot 100 = \frac{42}{1853} \cdot 100 = 2,24 \%, \quad (5.2)$$

kde $L_{\text{referenční}}$ představuje hodnoty naměřené pomocí spektrálního analyzátoru ΔL představuje vypočtenou hodnotu odchylky.

6. ZÁVĚR

V úvodu diplomové práce byli shrnuty poznatky, které jsou důležité pro orientaci ve světelné technice v oblasti měření a návrhu kalibračního boxu. Jedná se o základní popis fyzikálních veličin a jednotek užívaných ve světelné technice, popis druhů světelných zdrojů, jejich základní parametry a typické hodnoty.

Pro kalibrační box bylo vytvořeno několik návrhů jeho možného sestavení a celkové konstrukce. Ovšem při návrzích se začali ukazovat nedostatky daných návrhů, jež by nesplnili další požadavky pro osazení kalibračního boxu. Proto při návrhu docházelo k postupné změně původního návrhu až do finální verze kalibračního boxu, jež byla vyrobena a zkonstruována.

V jedné z částí diplomové práce se provádí simulace světelného boxu. Ta vede k optimalizaci boxu pro jeho výrobu. Pomocí simulací byl poté navrhnout optimální tvar jednotlivých částí světelného boxu a také celkové rozložení a umístění jednotlivých prvků v návrhu. V rámci diplomové práce bylo provedeno několik návrhů a pro ně byli simulované i světelné podmínky uvnitř kalibračního boxu. Navíc simulace určili potřebný počet LED diod do finální verze kalibračního boxu. Pro finální verzi kalibračního boxu byla také v rámci diplomové práce provedena simulace, zda je lepší umístit LED diody na horní stranu kalibračního boxu, či na boční strany kalibračního boxu. Z výsledků simulací bylo rozhodnuto pro horní víko, z důvodu lepšího rozložení jasů na vzorcích.

Na základě simulací, byl určen potřebný počet LED diod pro osazení desek plošných spojů. Návrh desek plošných spojů byl prováděn v programu Eagle Autocad. Po určení počtu potřebných LED diod bylo možno navrhnout desku plošného spoje. Navrhování desky probíhalo průběžně se simulacemi, a tudíž bylo navrženo opět několik typů desek plošných spojů. Ovšem díky nově zvolenému typu kalibračního boxu, bylo možno i upravit rozměry DPS. Díky tomu bylo možné osadit DPS wago svorkami pro možnost rychlejšího propojení jak jednotlivých DPS mezi sebou, tak i samotného napájení všech DPS. Pro lepší možnost ovládání kalibračního boxu byla také zvolena komunikace předřadníků po lince DALI, s možností bezdrátového ovládání pomocí mobilního telefonu.

Další část diplomové práce se zabývala samotným finálním návrhem kalibračního boxu. Pro toto řešení zde byla popsána výroba kalibračního boxu, a také konstrukční provedení pospojování boxu. V této části bylo také popsáno přichycení jednotlivých komponent kalibračního boxu.

Poslední část diplomové práce se zabývá oživením a testováním kalibračního boxu. Oživení kalibračního boxu bylo provedeno až po kontrole zapojení. Po oživení kalibračního boxu, bylo nutné nastavit pomocí rozhraní Bluetooth komunikaci DALI, aby tlačítka umístěné na boxu mohli ovládat jednotlivé předřadníky. Po nastavení linky DALI, bylo možné provést testování funkčnosti všech předřadníků. Po kontrole funkčnosti kalibračního boxu, bylo provedeno kontrolní měření, pomocí jasového analyzátoru. Kontrolní měření na kalibračním boxu vyšlo tak, že procentuální odchylka byla v rozmezí 0,38 – 3,98 %. Výsledné hodnoty odchylky jsou velmi dobré pro daný přístroj, a to je ještě nutné brát v potaz, že měření probíhalo po sobě a mezi jednotlivými měřeními mohlo dojít k ustálení teploty LED diod, a tudíž i změně parametrů.

Pro kalibraci jasového analyzátoru, je nyní široké spektrum kombinací, jež lze s novým kalibračním boxem dosáhnout. Kalibrovat nyní lze na 25 různých barevných vzorcích, na které se dá svítit 12 různými světelnými zdroji a jejich kombinacemi.

Literatura

- [1] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Marek BÁLSKÝ, et al. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. : il. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [2] *Jasový analyzátor LDA-LumiDISP* [online]. Brno: LumiDISP, 2022 [cit. 2022-5-18]. Dostupné z: <http://www.lumidisp.eu/>.
- [3] ING. DVOŘÁČEK, Vladimír. *Nobelova cena za fyziku do Japonska za modrou světelnou diodu* [online]. Praha: Světlo, 2014 [cit. 2022-5-18]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/nobelova-cena-za-fyziku-do-japonska-za-modrou-svetelnou-diodu--749>.
- [4] Difuze. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-5-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Difuze>.
- [5] *Autodesk inventor professional 2021* [online]. San Rafael, Kalifornie, USA: Autodesk Inc., 2022 [cit. 2022-5-18]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/inventor>.
- [6] *Ansys speos* [online]. Canonsburg, Pensylvánie , USA: Ansys, 2022 [cit. 2022-5-18]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/optical/ansys-speos>
- [7] *Autodesk Eagle* [online]. San Rafael, Kalifornie, USA: Autodesk Inc., 2022 [cit. 2022-5-18]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle>

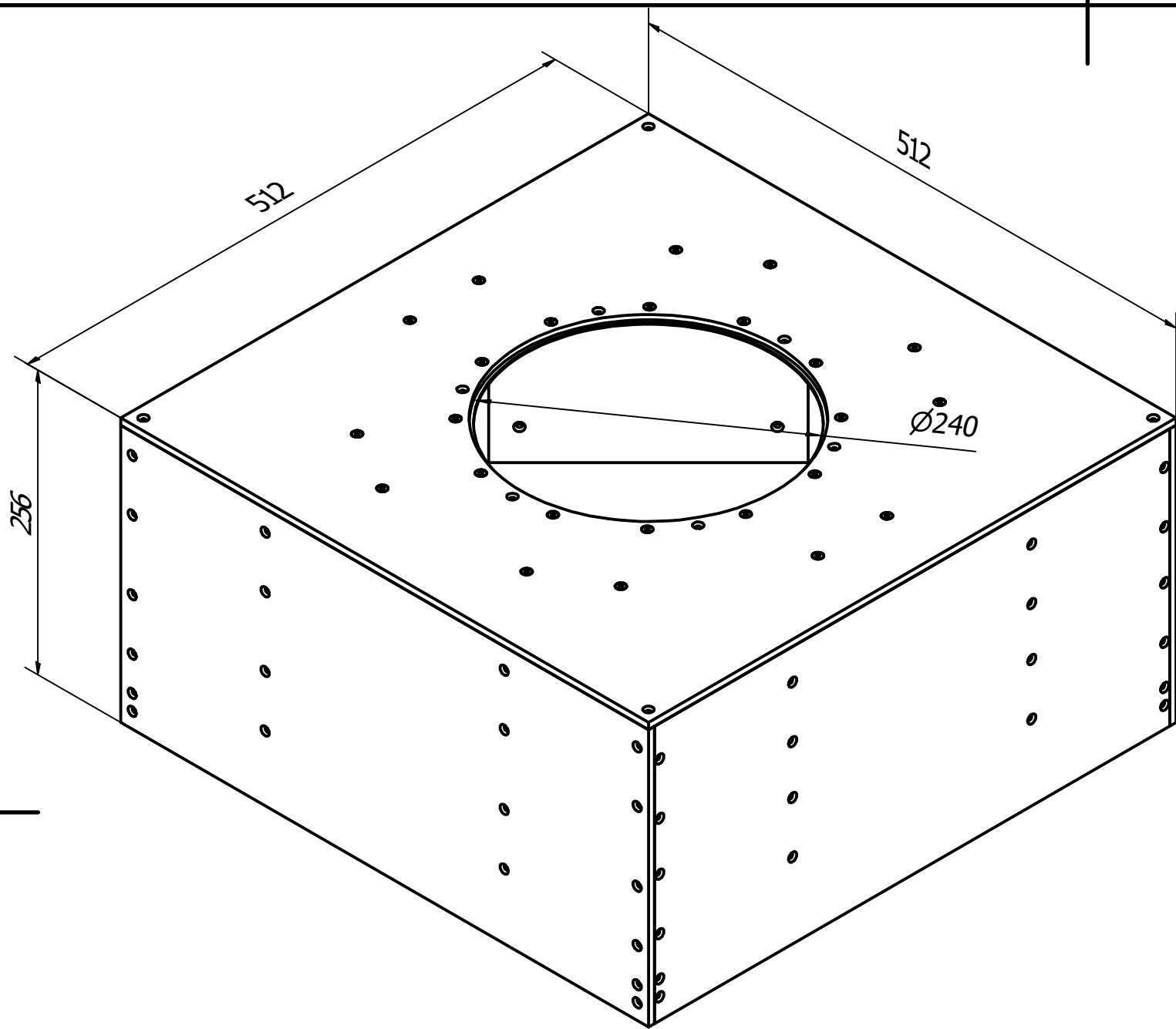
Použité přístroje pro měření:

Jasový analyzátor LDA-LumiDISP D7500 výrobní číslo: 18320-LDA-2019-4
Spektroradiometr JETI Specbos 1211UV, výrobní číslo:2015926,
Multimetr RETLUX RDM 9001

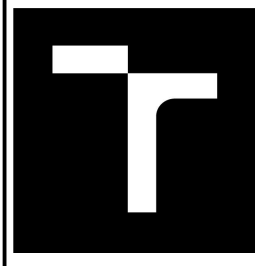
Použité programy

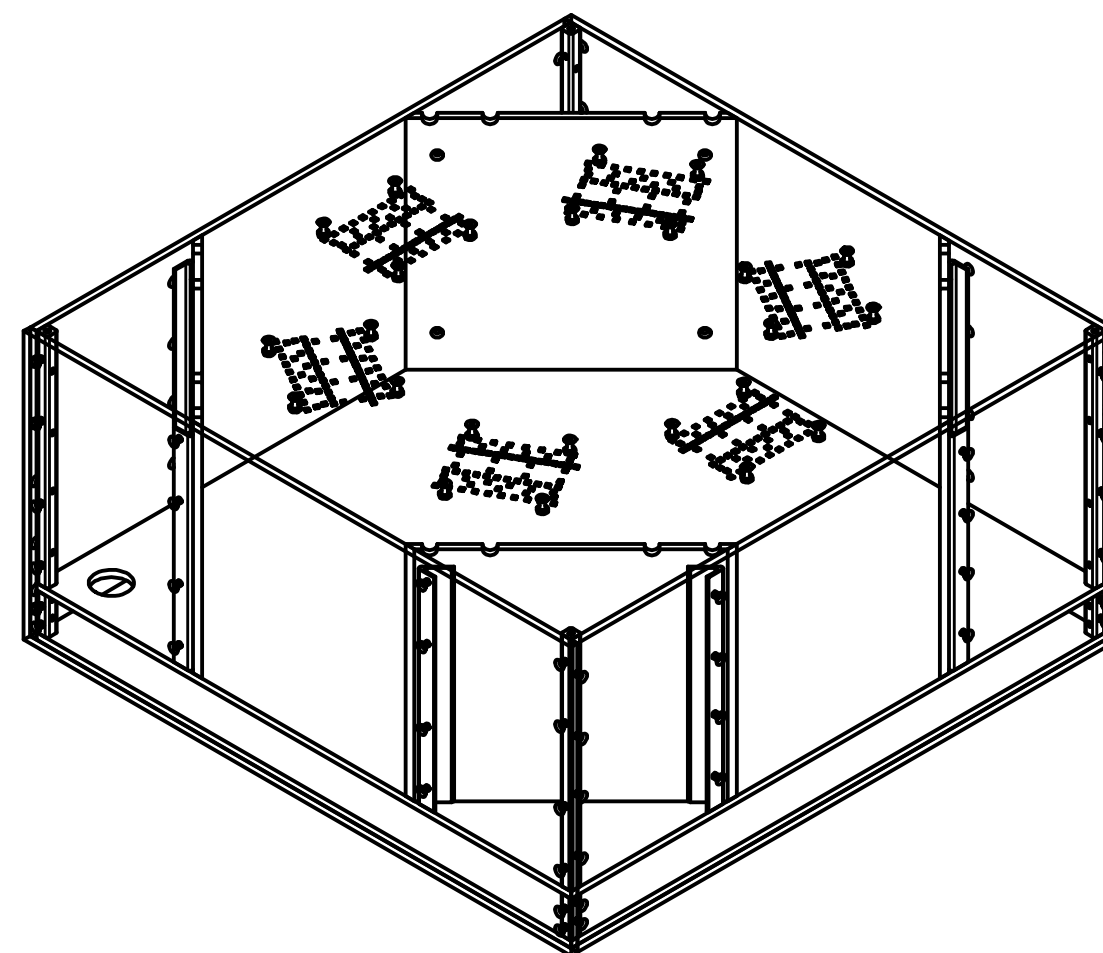
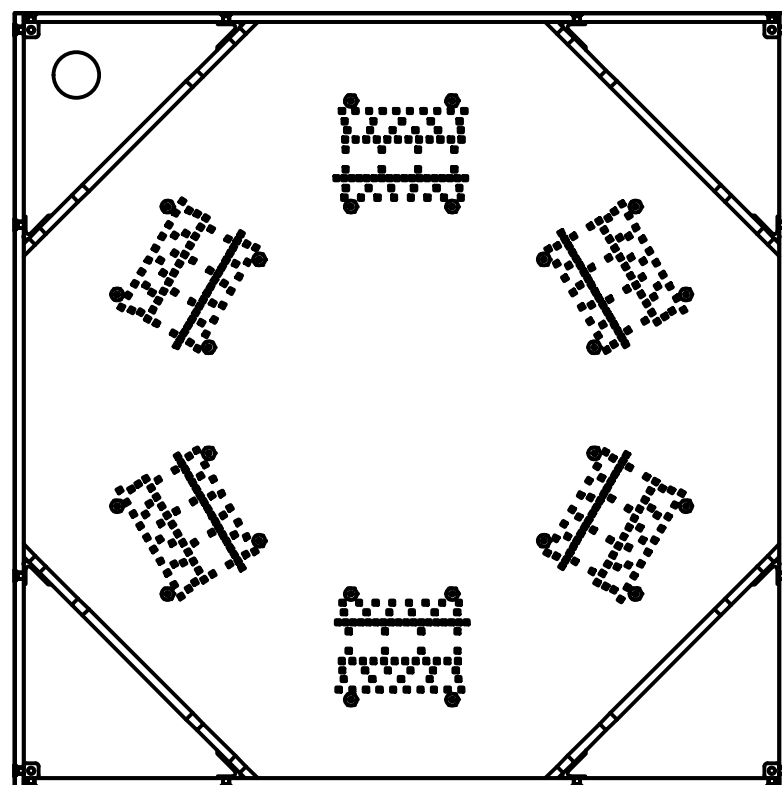
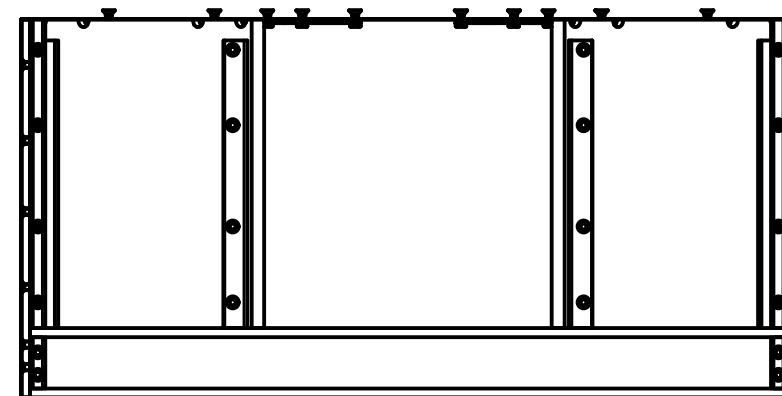
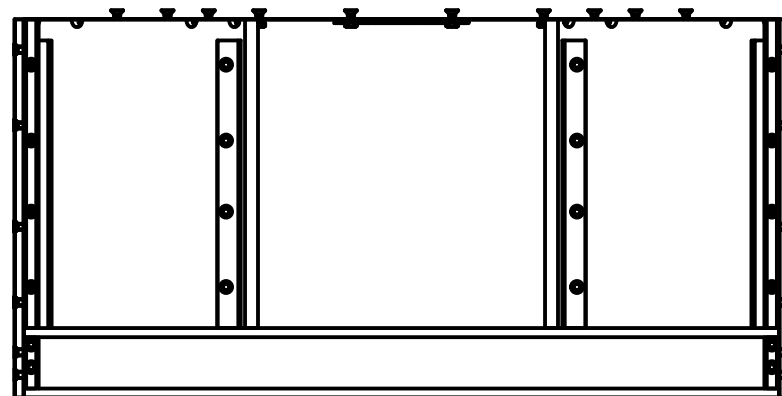
- [8] Ansys Speos – simulace
- [9] Autodesk Inventor Professional – výkresová dokumentace
- [10] Autodesk EAGLE – návrh DPS

Příloha A - Přílohy: Výkresová dokumentace boxu

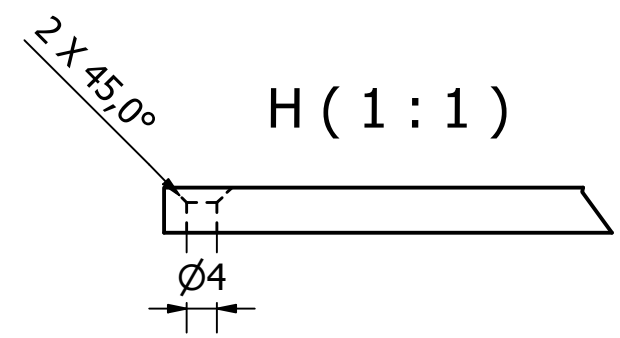
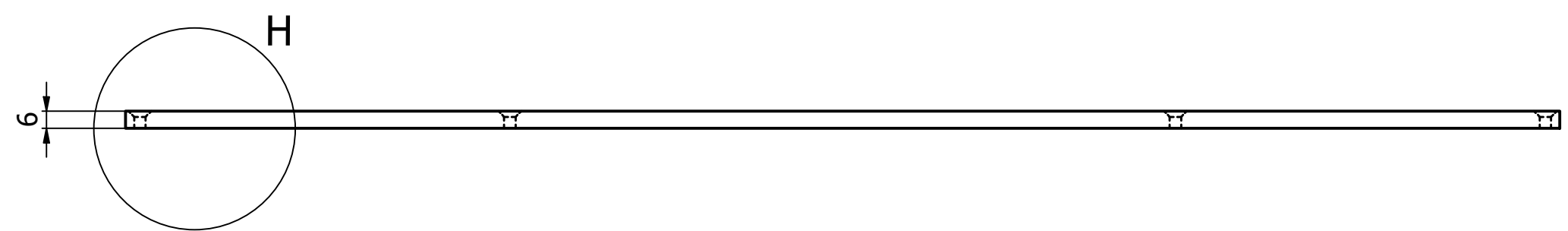
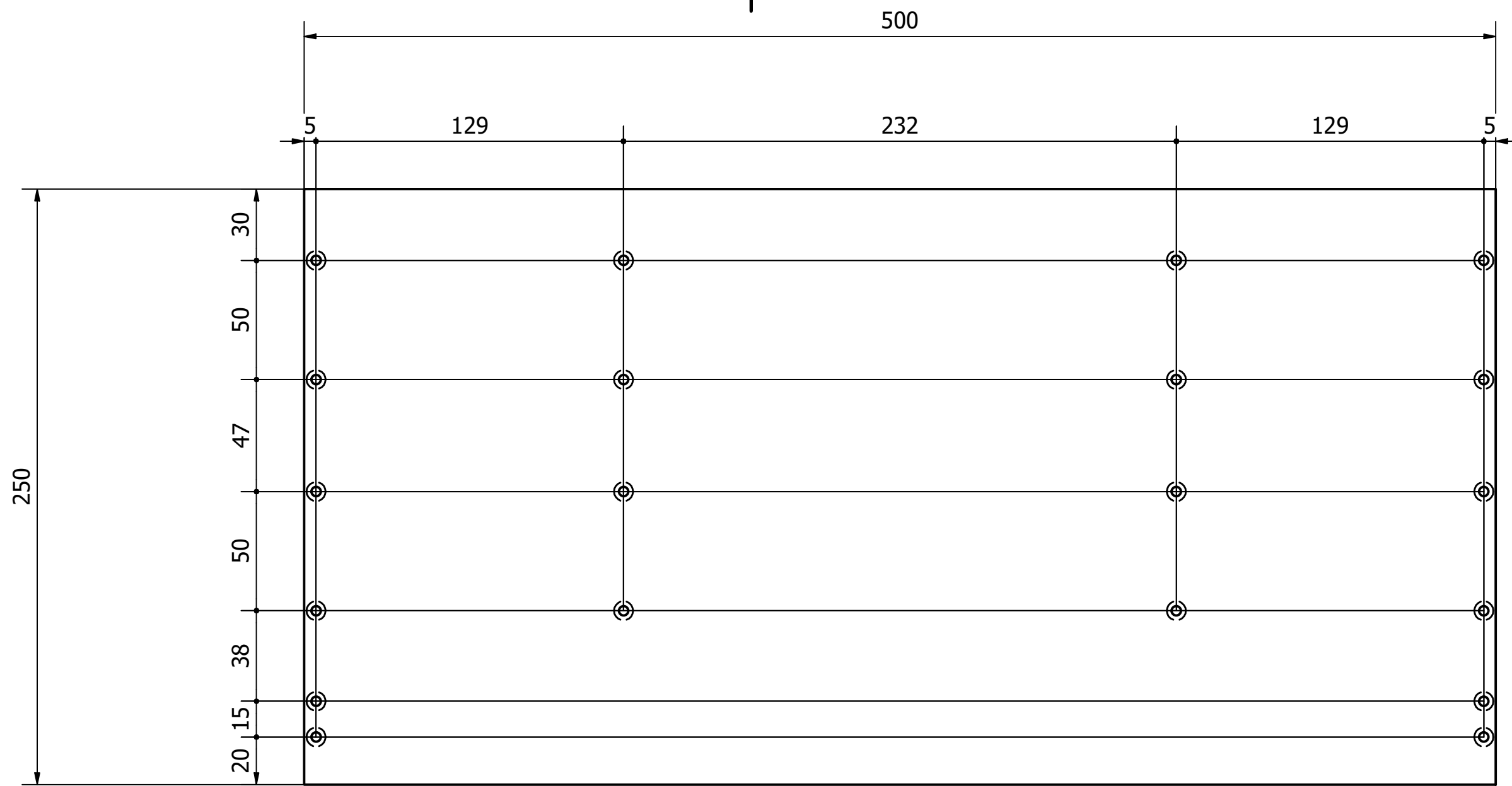


KUSOVNÍK		
POLOŽKA	KS	ČÍSLO SOUČÁSTI
1	4	deska
2	1	mezistěna
3	2	Stěna_1
4	2	Stěna_2
5	1	spodni_strana
6	1	horni_strana
7	4	jakl 34
8	4	jakl 204
9	8	jakl 204_45
10	9	15009238_25-45W
11	3	15009424_17W
12	1	svorkovnice
13	3	15012863_Power
14	3	15013792_Bluetooth
16	6	PDS s vybavou
18	56	DIN 7991 - M4x16
19	72	DIN 7991 - M4x10
20	4	DIN 7991 - M4x8
21	24	DIN 934 - M4

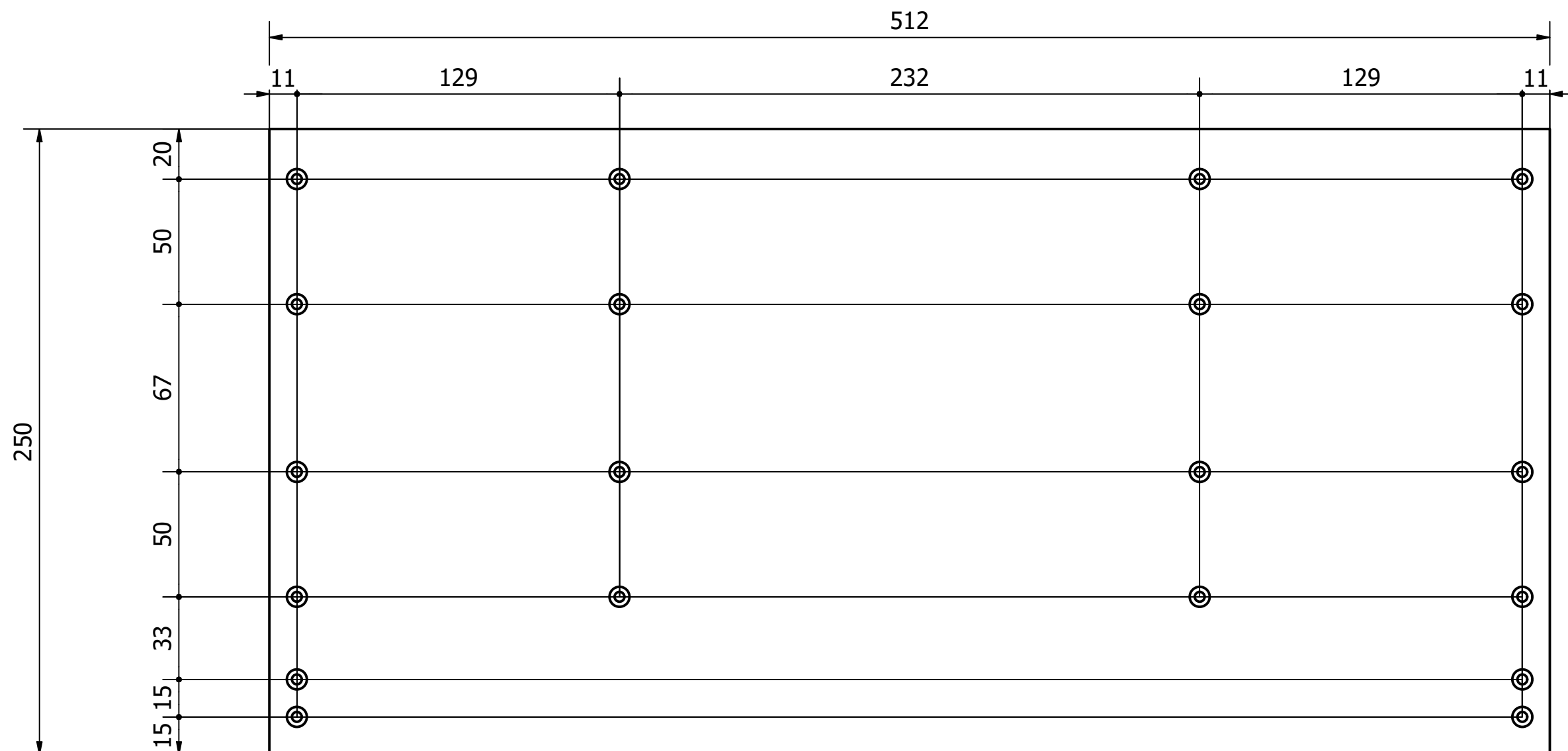
Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítka 1:4	Přesnost ISO 2768-mH	
					Promítání 	
					Sestava Box	
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky		Materiál	Polotovary Boxu		Hmotnost 6,51 kg	Chráněno podle ISO 16016
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky			Schválil		Název Kalibrační box
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.		
				Datum vydání		Číslo dokumentu 000-001
				25.05.2022		
						List 1/15



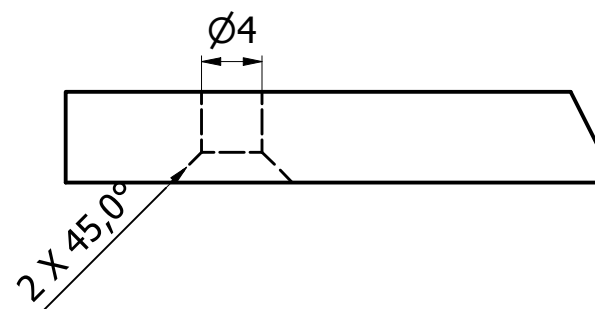
Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítko 1:4	Přesnost ISO 2768-mH
					Promítání 
					Sestava Box
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky	Materiál	Polotovary Boxu		Hmotnost 6,51 kg	Chráněno podle ISO 16016
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky			Schválil	Název Kalibrační box
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.	
				Datum vydání	Číslo dokumentu 000-001
				25.05.2022	
				List 2/15	



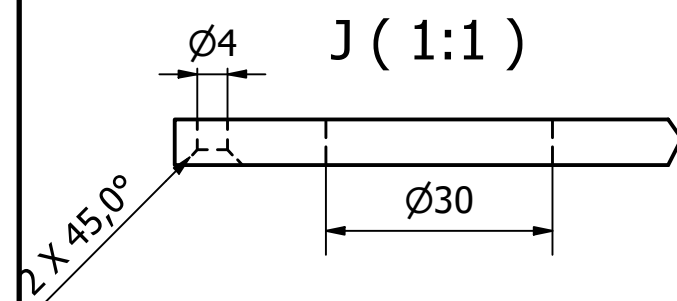
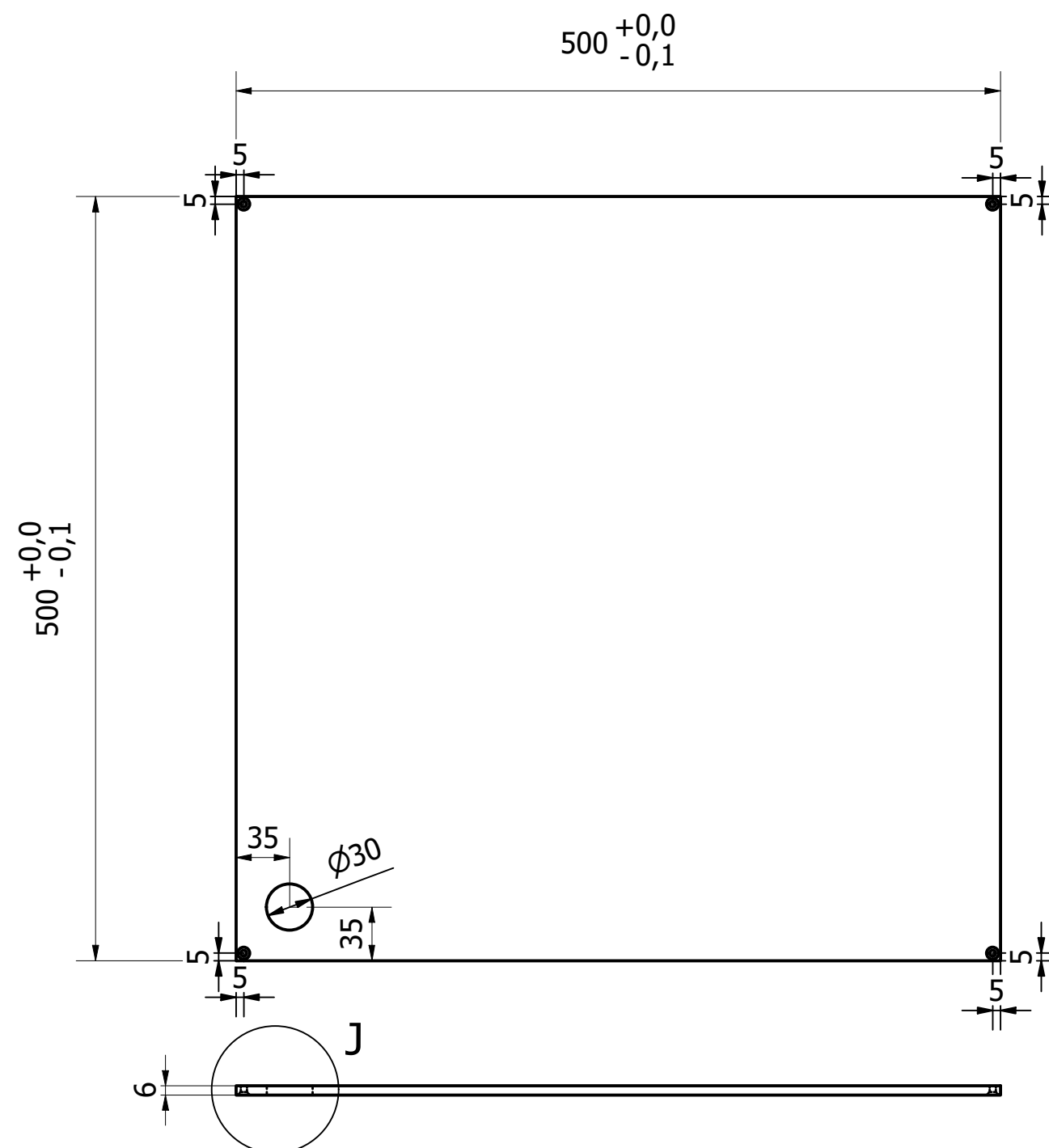
Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítko 1:4	Přesnost ISO 2768-mH
					Promítání 
					Sestava Box
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky		Materiál	Polotovary Boxu	Hmotnost 0,29 kg	Chráněno podle ISO 16016
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky			Schválil	Název Kalibrační box
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.	
				Datum vydání	Číslo dokumentu 000-001
				25.05.2022	
					List 3/15



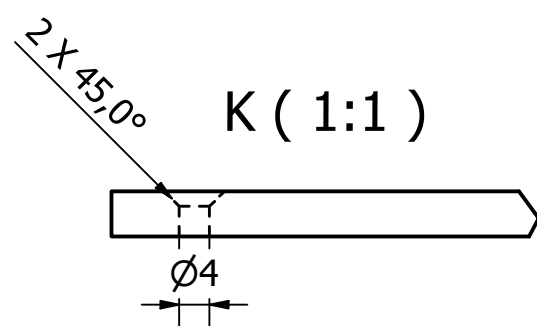
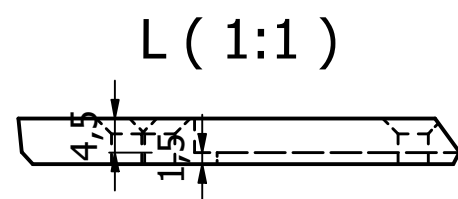
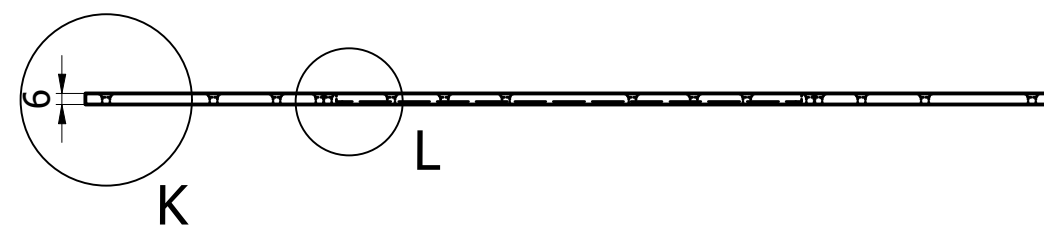
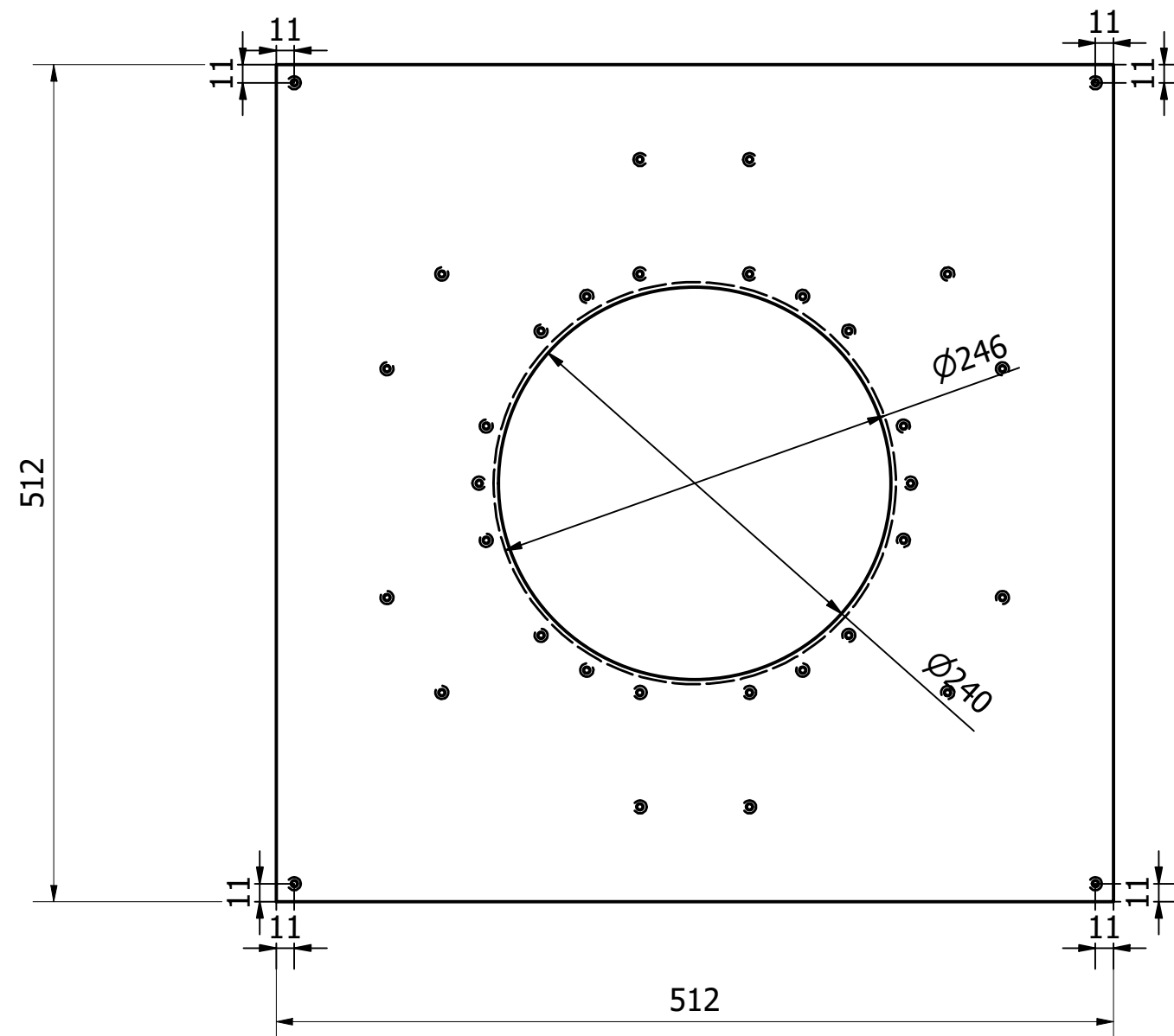
G (2 : 1)



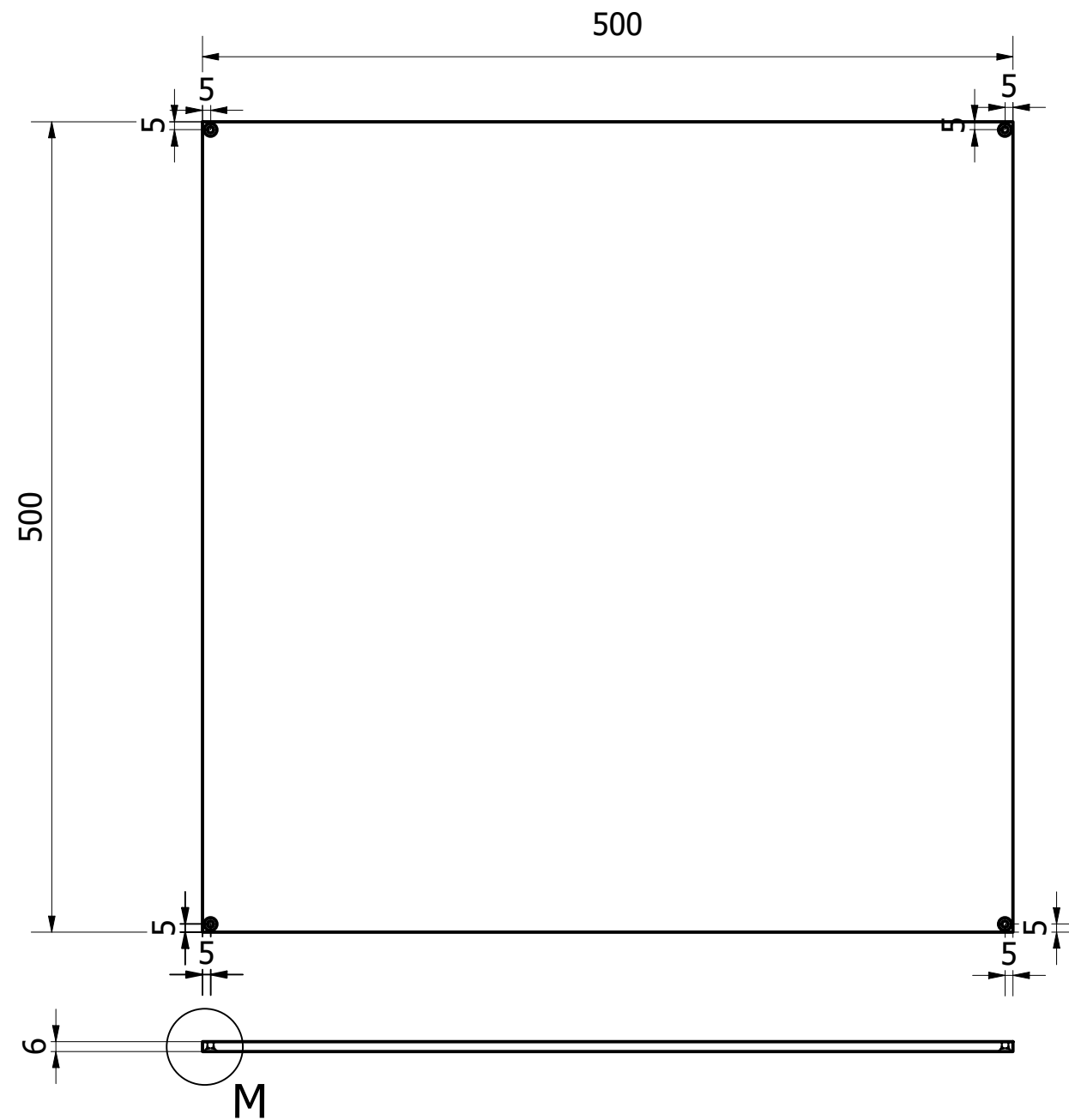
Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítko 1:4	Přesnost ISO 2768-mH
					Promítání 
					Sestava Box
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky	Materiál	Polotovary Boxu		Hmotnost 0,29 kg	Chráněno podle ISO 16016
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky			Schválil	Název Kalibrační box
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.	
				Datum vydání	Číslo dokumentu 000-001
				25.05.2022	
					List 4/15



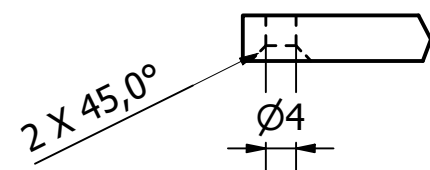
Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítko 1:4	Přesnost ISO 2768-mH	
					Promítání	
					Sestava Box	
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky		Materiál	Polotovar Boxu		Hmotnost 0,57 kg	Chráněno podle ISO 16016
 FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ústav elektroenergetiky				Schválil	Název Kalibrační box	
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.		
				Datum vydání	Číslo dokumentu 000-001	
				25.05.2022		
				List 5/15		



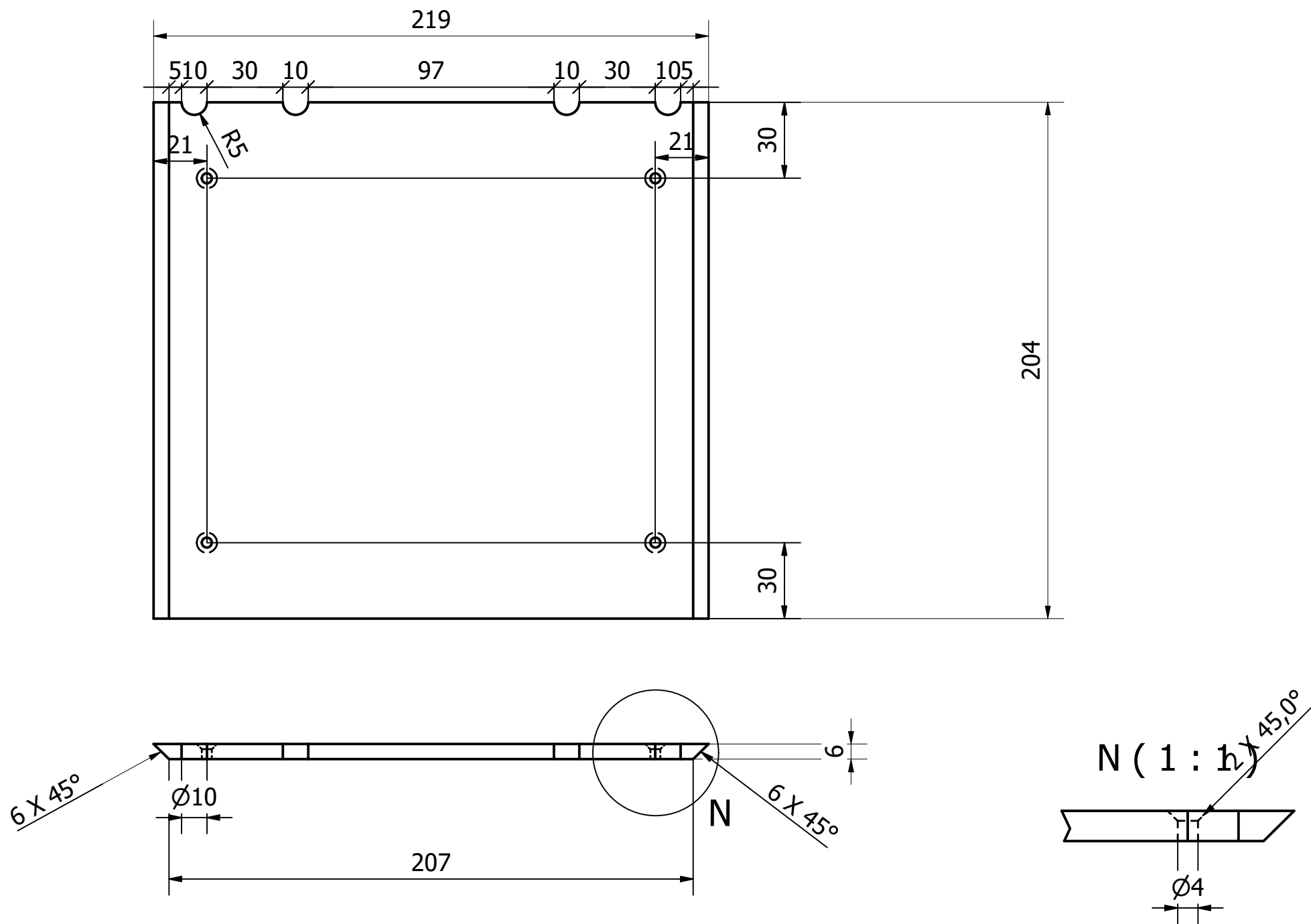
Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítka 1:4	Přesnost ISO 2768-mH
					Promítání 
					Sestava Box
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky		Materiál	Polotovar Boxu	Hmotnost 0,49 kg	Chráněno podle ISO 16016
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky			Schválil	Název Kalibrační box
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.	
				Datum vydání	Číslo dokumentu 000-001
				25.05.2022	
					List 6/15



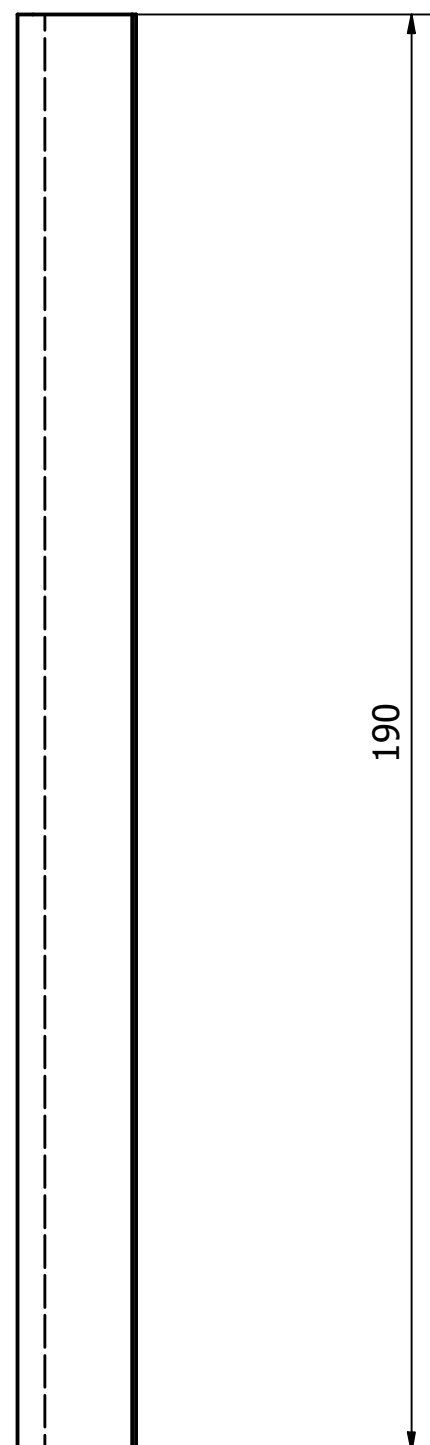
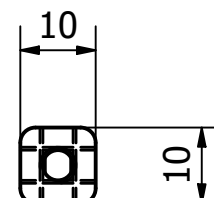
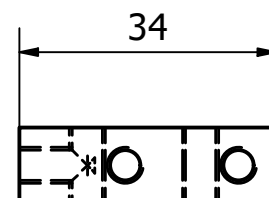
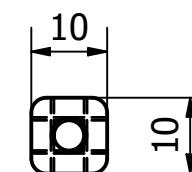
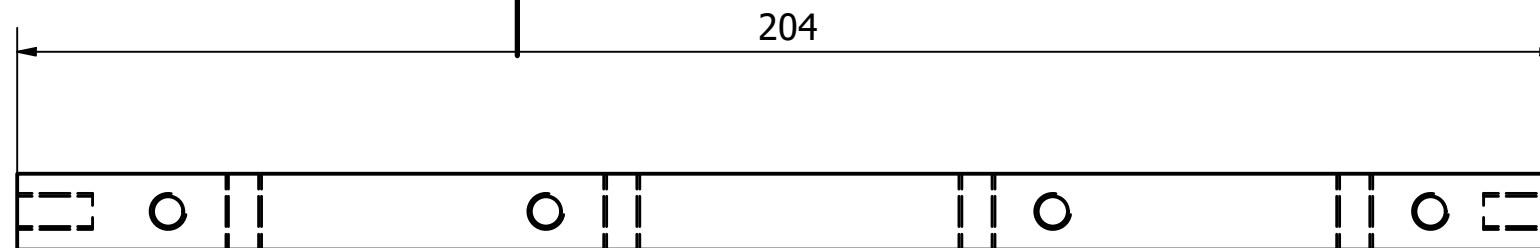
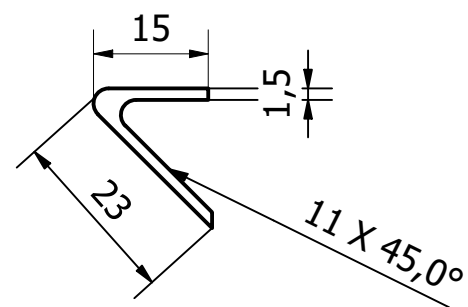
M (1:1)



Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu		Hrany	Měřítko 1:4	Přesnost ISO 2768-mH
						Promítání 
						Sestava Box
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky		Materiál	Polotovary Boxu		Hmotnost 0,58 kg	Chráněno podle ISO 16016
 FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky			Schválil		Název Kalibrační box	
			Ing. Jan Škoda, Ph.D.			
			Datum vydání		Číslo dokumentu 000-001	
			25.05.2022			
						List 7/15

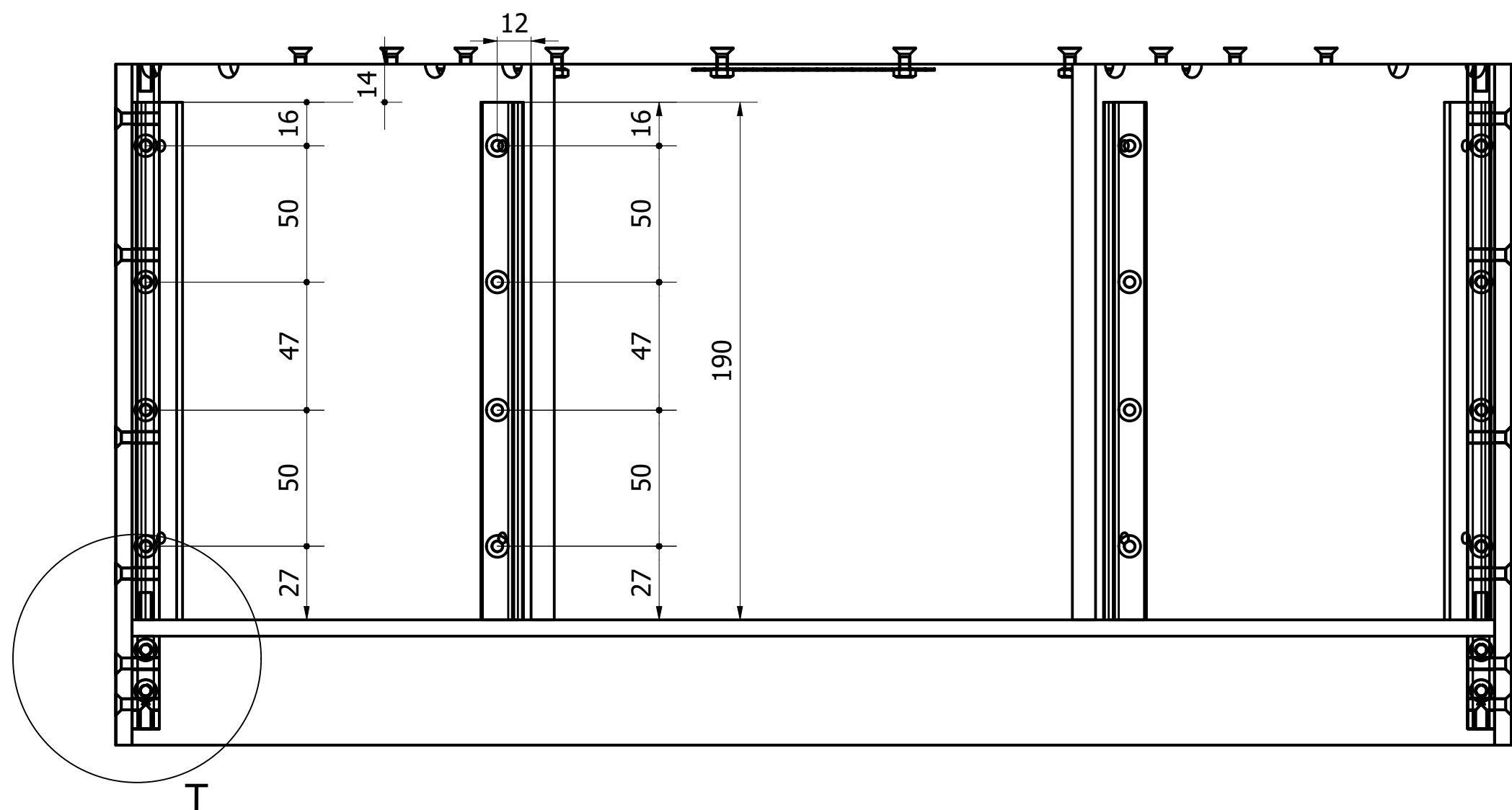


Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu		Hrany	Měřítka 1:4	Přesnost ISO 2768-mH	
						Promítání 	
						Sestava Box	
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky		Materiál	Polotovary Boxu		Hmotnost 0,10 kg	Chráněno podle ISO 16016	
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky				Schválil		Název Kalibrační box
					Ing. Jan Škoda, Ph.D.		
					Datum vydání		Číslo dokumentu 000-001
					25.05.2022		

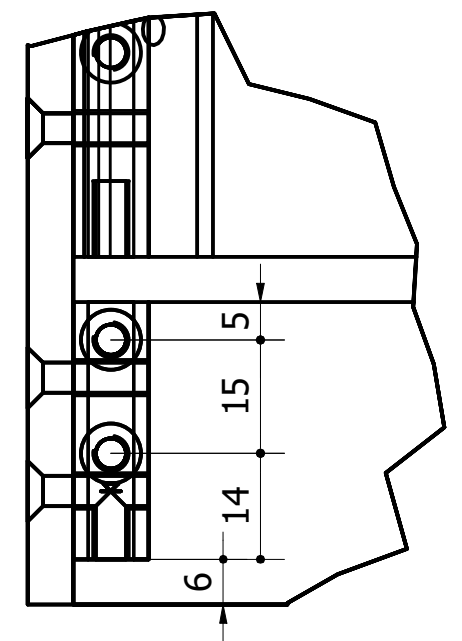


KUSOVNÍK			
POLOŽKA	KS	ČÍSLO SOUČÁSTI	POPIS
7	4	jakl 34	
8	4	jakl 204	
9	8	jakl 204_45	
18	56	DIN 7991 - M4x16	Šrouby se zapuštěnou hlavou s vnitřním šestihranem
19	72	DIN 7991 - M4x10	Šrouby se zapuštěnou hlavou s vnitřním šestihranem
20	4	DIN 7991 - M4x8	Šrouby se zapuštěnou hlavou s vnitřním šestihranem
21	24	DIN 934 - M4	Šestihranná matice

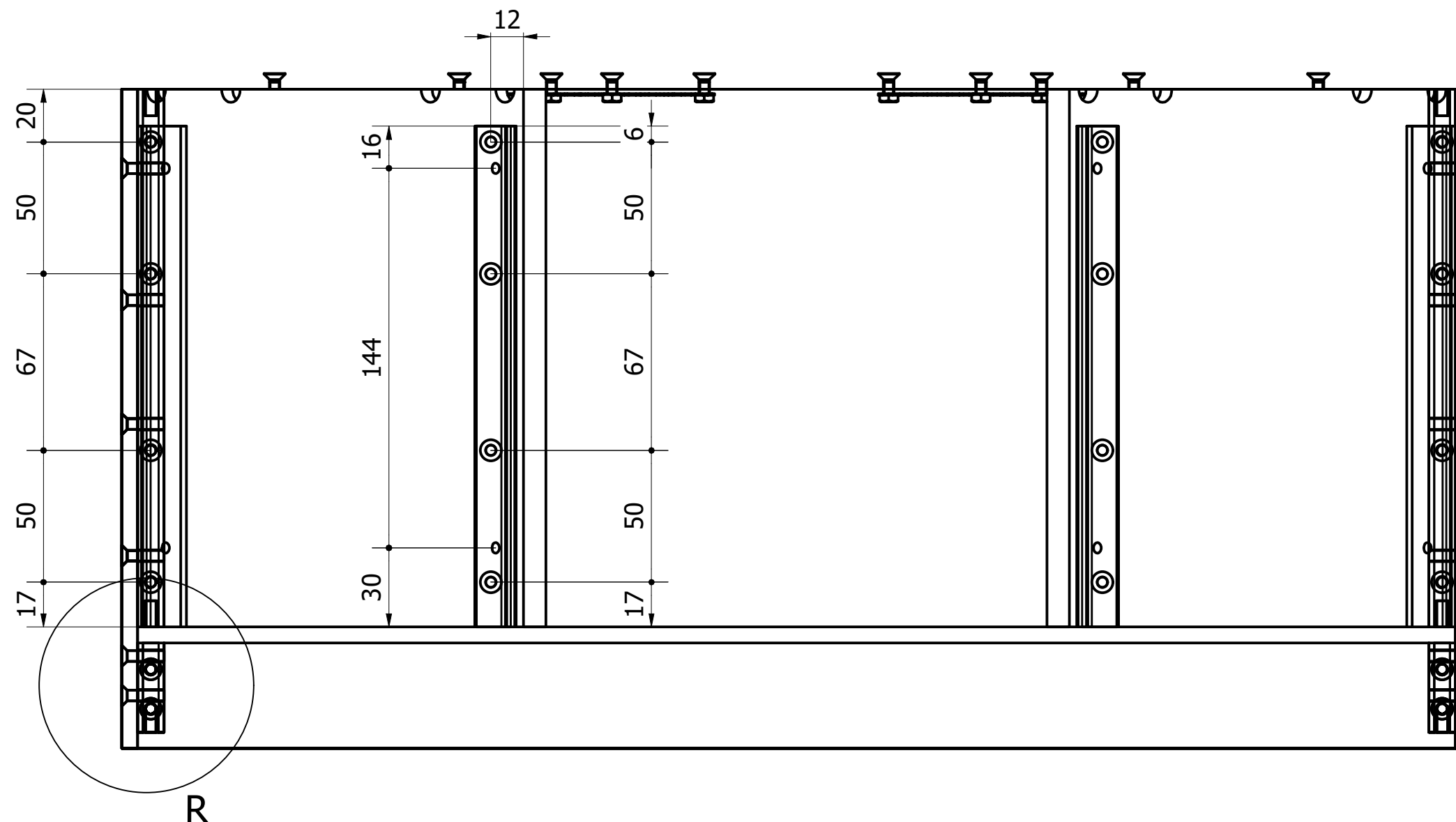
Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítka 1:4	Sestavená matice	
					Přesnost ISO 2768-mH	
					Promítání	
					Sestava Box	
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky		Materiál	Polotovary Boxu		Hmotnost 0.03 kg	Chráněno podle ISO 16016
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky			Schválil	Název Kalibrační box	
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.		
				Datum vydání	Číslo dokumentu 000-001	
				25.05.2022		



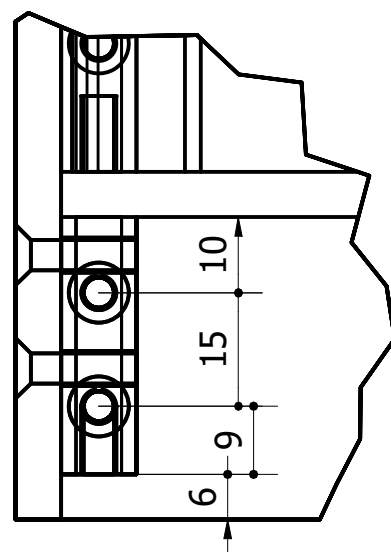
T (1:1)

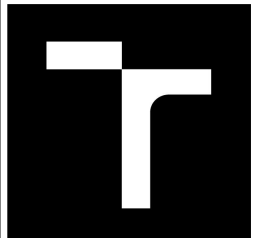


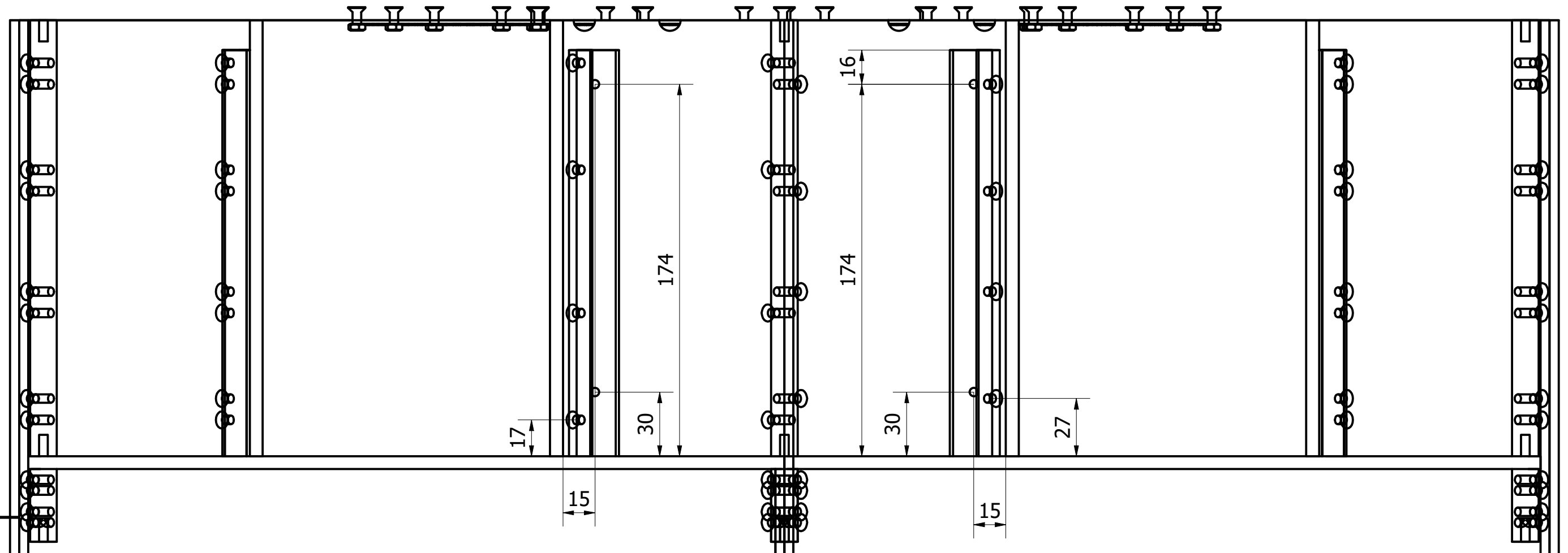
Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítka 1:4	Přesnost ISO 2768-mH	
					Promítání	
					Sestava Box	
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky		Materiál	Polotovary Boxu		Hmotnost 6,51 kg	Chráněno podle ISO 16016
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky			Schválil		Název Kalibrační box
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.		
				Datum vydání		Číslo dokumentu 000-001
				25.05.2022		
						List 11/15

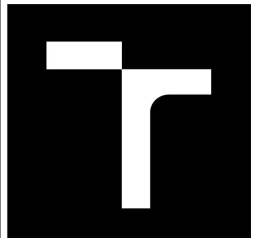


R (1 : 1)

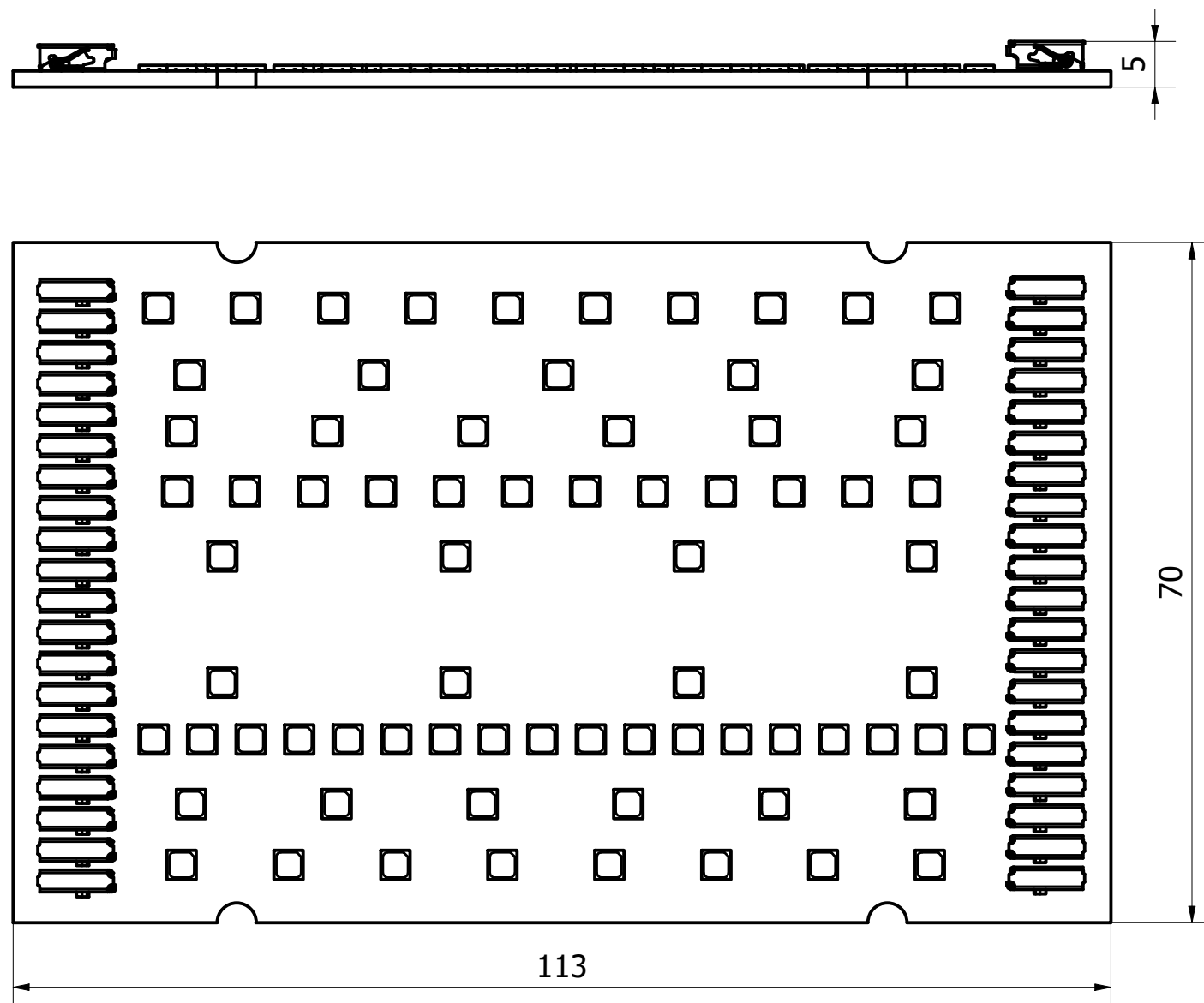


Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítka 1:4	Přesnost ISO 2768-mH
				Promítání	
				Sestava Box	
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky	Materiál	Polotovary Boxu		Hmotnost 6,51 kg	Chráněno podle ISO 16016
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky			Schválil	Název Kalibrační box
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.	
				Datum vydání	Číslo dokumentu 000-001
				25.05.2022	
					List 12/15



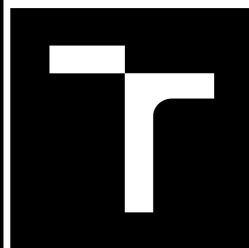
Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítka 1:4	Přesnost ISO 2768-mH	
					Promítání 	
					Sestava Box	
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky		Materiál	Polotovary Boxu		Hmotnost 6,51 kg	Chráněno podle ISO 16016
 FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky				Schválil	Název Kalibrační box	
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.		
				Datum vydání	Číslo dokumentu 000-001	
				25.05.2022		

List 13/15



POLOŽKA

KUSOVNÍK		
POLOŽKA	KS	ČÍSLO SOUČÁSTI
1	1	DPS
2	73	GX_PSLX31_20170612_ geometry
3	20	2065-100/998-403
4	20	2065-100_998-403_MIR

Druh dokumentu MONTÁŽNÍ SCHÉMA	Kreslil Tomáš Šácha	Drsnost povrchu	Hrany	Měřítka 1:4	Přesnost ISO 2768-mH
				Promítání	
VUT FEKT Ústav elektroenergetiky		Materiál	Polotovary Boxu	Hmotnost 0,01 kg	Sestava Box
		FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH ústav TECHNOLOGIÍ elektroenergetiky		Schválil	Název
				Ing. Jan Škoda, Ph.D.	Kalibrační box
				Datum vydání	Číslo dokumentu
				25.05.2022	000-001

List 15/15

Příloha B - Výkresová dokumentace pro DPS

Návrh DPS

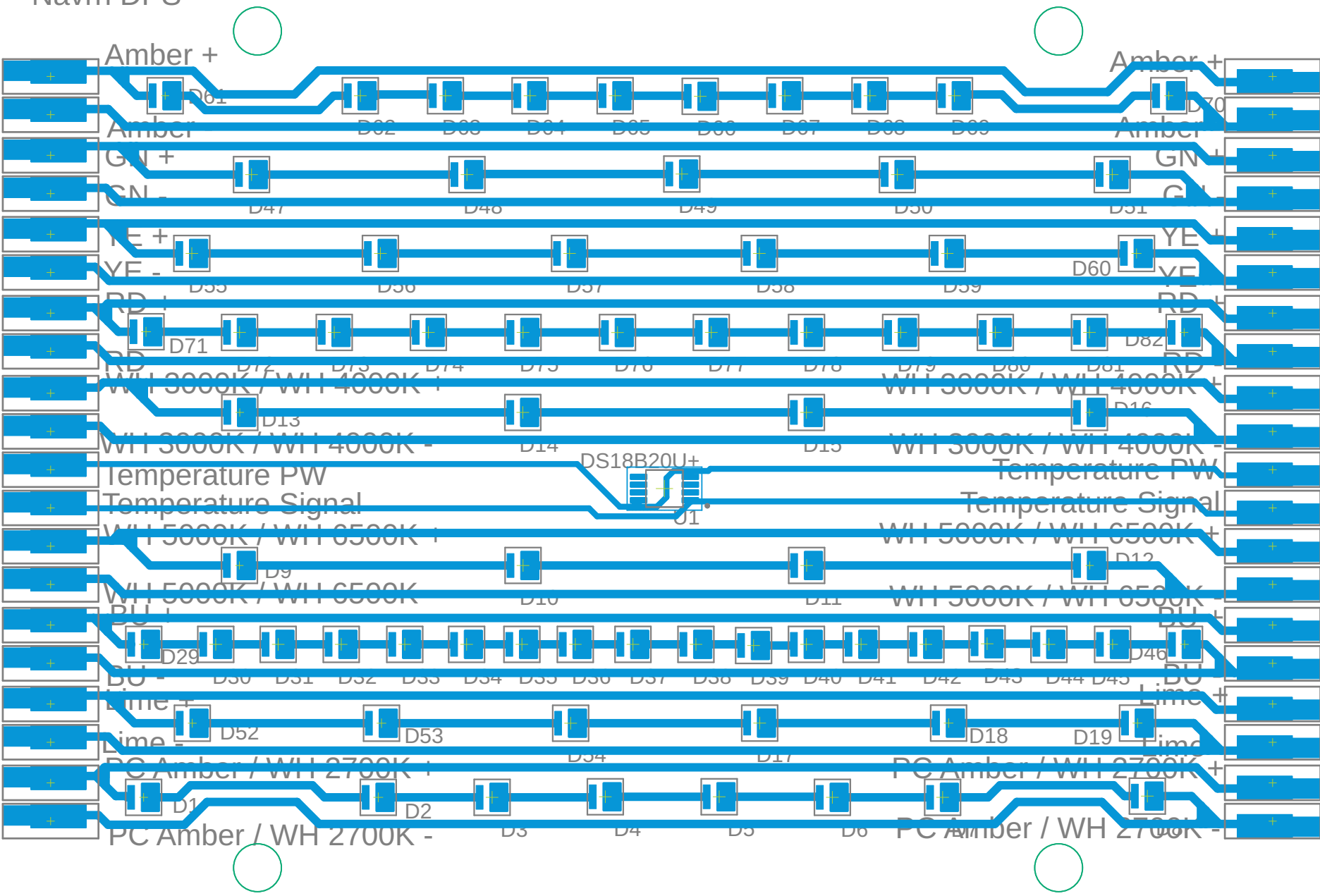


Schéma zapojení DPS

