



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra teoretické elektrotechniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektronické digitální materiály a miniaturní roboty

Autor práce: Bc. Vojtěch Lapuník
Vedoucí práce: Ing. František Mach, Ph.D.

Plzeň 2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch LAPUNÍK**
Osobní číslo: **E19N0064P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Téma práce: **Elektronické digitální materiály a miniaturní roboty**
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

1. Popište problematiku digitálních materiálů, jejich výroby, technologií a algoritmů jejich kompozice/dekompozice a možností využití. Zaměřte se především na oblast elektroniky a mechatroniky.
2. Vyberte vhodné elektronické součástky a materiály pro vytvoření jednotlivých bloků elektronických obvodů. Navrhněte technické řešení jejich funkčního spojení a rozpojení.
3. Zkonstruujte vybrané bloky a miniaturní roboty potřebné k ověření základního konceptu. Otestujte spojení a rozpojení jednotlivých bloků.
4. Navrhněte algoritmus umožňující automatické skládání elektronických obvodů pomocí miniaturních robotů.
5. Proveďte základní experimenty a ověřte tím funkčnost navrženého konceptu elektronických digitálních materiálů.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

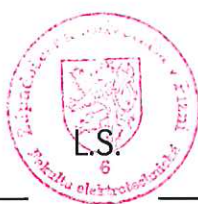
Seznam doporučené literatury:


1. Gershenfeld, Neil, Alan Gershenfeld, and Joel Cutcher-Gershenfeld. Designing reality: How to survive and thrive in the third digital revolution. Basic Books, 2017.
2. Sitti, Metin. Mobile Microrobotics. MIT Press, 2017.
3. Langford, Will, et al. „Hierarchical assembly of a self-replicating spacecraft.“ 2017 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2017.
4. Langford, Will, and Neil Gershenfeld. „A Discretely Assembled Walking Motor.“ 2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS). IEEE, 2019.
5. Kuthan, Jiří, Martin Juřík, and František Mach. „Magnetic Actuation of Multiple Robots by the Coplanar Coils System.“ 2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS). IEEE, 2019.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. František Mach, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Ačkoliv na počátku nebylo zcela jisté, jakým směrem se projekt bude vyvíjet, cíl byl jednoznačný. Přenést všechny přednosti a výhody konceptu digitálních materiálů do výroby elektroniky. Kladné vlastnosti tohoto konceptu mohou mít velký dopad na výrobu DPS rovnou v několika různých aplikacích. V rámci projektu bylo zapotřebí provést výzkum digitálních materiálů pro účely elektroniky hned v několika ohledech. Bylo nutné navrhnout a otestovat různé typy digitálních materiálů, ať už co do tvaru, velikosti, nebo způsobu jejich propojování na mechanické i elektrické bázi. Dále musel být zhotoven algoritmus pro návrh kompozice jednotlivých bloků tak, aby tvořily požadovaný obvod, a následně další algoritmus, který zprostředkoval samotné sestavení bloků do kompletní funkční DPS. Cílem rozhodně nebylo vytvoření masové výroby DPS pomocí tohoto konceptu, ale pouze poukázání na fakt, že tato alternativa existuje a že může nabízet celou řadu benefitů. Celý projekt byl postaven na míru již vytvořené magnetické platformě, na níž se digitální materiály sestavují. Aby bylo možné s digitálními materiály po platformě pohybovat, bylo nutné jednotlivé stavební dílky osadit permanentními magnety. Magnety ve spolupráci s přilepenými kovovými plíšky navíc zajišťují jak mechanické, tak elektrické spojení jednotlivých bloků. Každý blok je vybaven určitou elektrickou součástí, která může být připojena několika různými způsoby tak, aby z různých typů bloků bylo možné sestavit jakýkoliv elektrický obvod. Nakonec byl vytvořen také algoritmus, který na základě požadovaného elektrického obvodu vytvoří kompozici bloků takovou, aby výsledná DPS sestavená z jednotlivých bloků vykonávala požadovanou elektronickou funkci. Další algoritmus poté používá právě onu kompozici ke skutečnému sestavení obvodu. Dosažené výsledky lze považovat za uspokojivé a jasně potvrdily, že ve výzkumu v oblasti digitálních materiálů pro potřeby elektroniky se rozhodně vyplatí dále pokračovat.

Klíčová slova

digitální materiály, magnetická platforma, technologie výroby DPS, genetický algoritmus

Abstract

Lapuník, Vojtěch. *Electronic digital materials and miniature robots* [*Elektronické digitální materiály a miniaturní roboty*]. Pilsen, 2021. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Theory of Electrical Engineering. Supervisor: František Mach

Although at the beginning it was not entirely certain in which direction the project would develop, the goal was clear. The goal was to transfer all the advantages and benefits of the concept of digital materials to the production of electronics. The positive features of this concept can have a major impact on PCB production in several different applications. For purpose of this project it was necessary to conduct research in the field of digital materials, starting with the shape, size, or method of connecting individual blocks and finally the creation of algorithms for their design and assembly. The aim was not to create mass production of PCBs using this concept, but only to point out the fact that this alternative exists and that it can offer several benefits. The whole project was created to fit an already existing magnetic platform, on which digital materials are assembled into a complete PCB. In order to move digital materials on the platform, it was necessary to equip the individual building blocks with permanent magnets. Magnets together with glued metal plates also ensure mechanical and electrical connection of individual blocks. Every block carries a certain electrical component. The electrical component can be connected to one block in many different ways, and it is thus possible to create any electrical circuit. Finally, an algorithm which obtains the composition of the blocks was designed. Another designed algorithm uses the composition from the first algorithm to assemble the circuit with the blocks. The achieved results can be considered satisfactory, as all points of the assignment were met. And the results clearly confirmed that it is definitely worth continuing research into the field of digital materials used in electronics.

Keywords

digital materials, magnetic platform, PCB production technology, genetic algorithm

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 27. května 2021

Bc. Vojtěch Lapuník

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Františku Machovi Ph.D. za skvělé vedení a neustálou motivaci k dosahování co nejlepších výsledků. Mé poděkování patří také Ing. Martinovi Juříkovi za cenné rady a postřehy během celého projektu. A v neposlední řadě bych také chtěl poděkovat Mgr. Lukáši Adamovi Ph.D. (ČVUT), který podal pomocnou ruku a díky svým znalostem byl schopen vymyslet a navrhnout nový algoritmus pro vytvoření kompozice bitů na základně zadaného netlistu. Jeho pomoc byla také velmi hodnotná pro celkový konečný obraz projektu.

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam symbolů a zkratk	x
1 Úvod	1
1.1 Digitální materiály	1
1.2 Původní myšlenka	1
1.3 Motivace	2
2 Koncept digitálních materiálů	3
2.1 Ve stavebnictví	4
2.2 V elektronice	7
3 Magnetická platforma pro ovládání miniaturních robotů	13
3.1 Princip	13
3.2 Platformy	15
4 Návrh digitálních materiálů v technologii výroby DPS	17
4.1 Mechanické bity	18
4.2 Magnetické bity	19
4.3 Magnetické bity samostatně schopné pohybu	20
5 Konstrukce digitálních materiálů v technologii výroby DPS	23
5.1 Vývoj prototypů	23
5.1.1 Výroba nosných destiček a osazování magnetů	23
5.1.2 Vodivé magnetické plíšky	25
5.1.3 Vodivé cesty a elektronické součástky	28
5.2 První verze plnohodnotných prototypů	30
5.3 Druhá verze plnohodnotných prototypů	31
6 Algoritmus pro návrh DPS v konceptu digitálních materiálů	33
6.1 Genetický algoritmus	33
6.2 Algoritmus pro návrh kompozice bitů	35
6.2.1 Reprezentace bitů v programu	36

6.2.2	Objektová struktura programu	38
6.2.3	Algoritmus pro výpočet netlistu	40
6.2.4	Selekce a elity	44
6.2.5	Křížení	44
6.2.6	Mutace	44
6.2.7	Účelová funkce	44
6.2.8	Konečná úprava nalezené kompozice bitů	47
6.2.9	Vykreslení desky	48
6.2.10	Dosažené výsledky	48
6.3	Odlišný přístup	51
7	Návrh řídicí aplikace pro skládání DPS z digitálních materiálů	52
7.1	MagNet	52
7.2	Rozšíření aplikace MagNet	53
7.2.1	Uživatelský vstup a vytvoření návrhu	53
7.2.2	Manuální režim	54
7.2.3	Automatický režim	54
7.2.4	Budoucí vývoj aplikace	55
8	Závěr	57
	Reference, použitá literatura	59
	Přílohy	61
A	Aplikace MagNet	61
B	Skládání bitů	64
C	Fotky z experimentů	65

Seznam obrázků

2.1	Návrh domu postaveného z digitálních materiálů Diamond Strata (2016)[1].	5
2.2	Ukázka stavebních prvků použitých v projektu Diamond Strata [1].	5
2.3	Návrh domu postaveného z pizzabotů [3].	6
2.4	Ukázka konceptu digitálních materiálů GIK.	7
2.5	Dva bloky stavebního materiálu v konceptu šestiúhelníků se dvěma spojkami typu "H".	8
2.6	Struktura postavená z šestiúhelníků se spojkami typu "H".	8
2.7	Ukázka konceptu použitého v práci Williama K. Langforda [5].	9
2.8	Struktury vyrobené z digitálních materiálů v rámci práce Williama K. Langforda [5].	10
2.9	Tranzistor typu MOSFET v konceptu digitálních materiálů použitým v práci Williama K. Langforda [5].	11
2.10	Zařízení pro skládání digitálních materiálů v konceptu použitém v práci Williama K. Langforda [5]. Videozáznam pořízený při procesu skládání dostupné z [6].	12
3.1	Magnetická platforma na ovládání miniaturních robotů Gryllus ²	13
3.2	Základna pro magnetické platformy.	14
3.3	Základní uspořádání cívek v magnetické platformě pro ovládání miniaturních robotů. Kromě rozložení cívek je na obrázku zobrazen i robot s pěti permanentními magnety, včetně naznačené orientace magnetů. <i>Převzato z [10].</i>	15
3.4	Rozložení cívek v magnetické platformě Gryllus ² . <i>Převzato z [12].</i>	16
4.1	Plastové dílky použité při testování mechanického spojování na magnetické platformě za pomoci robotů.	18
4.2	Návrh digitálních materiálů v technologii DPS sériové uspořádání (vlevo), paralelní uspořádání (ve středu), robot navržený pro manipulaci s bity (vpravo)	18

4.3	Součástky navržené pro magnetické spojování digitálních materiálů. Horní řada ukazuje rozebranou součástku, kde jsou vidět různé plastové nosiče, válcové magnety, a vodivé plíšky. Spodní řada potom ukazuje kompletní poskládanou součástku.	19
4.4	Destičky plošných spojů navržené pro koncept digitálních materiálů s použitím magnetického spojování. Obrázek odpovídá součástkám na obr. 4.3	20
4.5	Návrh digitálních materiálů samostatně schopných pohybu a spojovaných na magnetické bázi.	21
4.6	Složitější struktura složená z digitálních materiálů samostatně schopných pohybu a spojovaných na magnetické bázi.	22
4.7	Všechny zvažované velikosti destiček a varianty rozmístění magnetů na nich v konceptu bitů samostatně schopných pohybu a spojovaných na magnetické bázi.	22
5.1	Jeden z prvních zkonstruovaných prototypů konceptu magneticky spojovaných digitálních materiálů schopných samostatného pohybu. Velikost použitých destiček je 10×10 mm.	23
5.2	Detail dvou bitů odpuzujících se kvůli vzájemnému působení magnetů. Červené magnety představují jednu polaritu, zatímco modré polaritu opačnou.	24
5.3	Magnetický bit osazen ideálním rozmístěním magnetů v konceptu magnetických bitů schopných samostatného pohybu.	25
5.4	Magnetické bity osazené kovovými plíšky různých tvarů.	26
5.5	Všechny navržené typy vodivých cest na magnetických bitech.	29
5.6	První vyrobená verze plnohodnotných bitů s rozměry destiček 10×10 mm.	30
5.7	Druhá vyrobená verze plnohodnotných bitů, také o rozměrech destiček 10×10 mm.	31
5.8	Sériový obvod vytvořen z druhé verze plnohodnotných prototypů. Jedná se o bity se součástkami rezistoru, LED diody, tlačítka bez aretace a lithiového akumulátoru 3V.	32
6.1	Orientační schéma genetického algoritmu.	34
6.2	Příklad matice <i>pairs</i> (vpravo) pro uvedené vodivé cesty na bitu (vlevo). . .	37
6.3	Příklad matice <i>pairs</i> a vlastnosti <i>beyond component</i> (vpravo) pro uvedené vodivé cesty na bitu (vlevo).	38
6.4	Příklad netlistu ve formátu algoritmu (vpravo) pro ukázkový obvod (vlevo).	39
6.5	Grafické znázornění výpočtu netlistu ze skladby bitů.	41
6.6	Příklad pro výpočet netlistu ze zadané skladby bitů	43
6.7	Ukázka postupu při výpočtu účelové funkce, konkrétně zhotovení matic <i>A</i> a <i>B</i>	45
6.8	Ukázka postupu při výpočtu účelové funkce, konkrétně dosazení matic <i>A</i> a <i>B</i> do rovnice 6.3.	46

6.9	Ukázka vykreslených desek pomocí funkce <i>DrawBoard</i> (viz kapitola 6.2.9) před použitím funkce <i>Post_process</i> a po ní.	48
6.10	Ukázka závislosti hodnoty účelové funkce (kvality) na počtu iterací algoritmu během dvou různých výpočtů jednoho a toho samého obvodu. Červené průběhy odpovídají průměrné hodnotě účelové funkce napříč celou populací, zatímco modré průběhy odpovídají hodnotě účelové funkce nejlepšího jedince v populaci.	50
6.11	Výstup z algoritmu založeném na celočíselném programování [16].	51
A.1	Úvodní domovská záložka aplikace MagNet.	61
A.2	Záložka <i>Settings</i> v aplikaci MagNet.	62
A.3	Nově vytvořená záložka určená pro skládání digitálních materiálů v aplikaci MagNet.	63
B.1	Soubor obrázků představující postupné pohyby bitů po magnetické platformě během skládání. Čísla označují posloupnost obrázků v čase. Pro tento pokus byla použita druhá verze bitů bez součástek s dočasnými improvizovanými plíšky z první verze bitů.	64
C.1	Jedno z prvních testování spojení bitů na magnetické platformě. Lze si všimnout, že magnety v destičce drží pomocí izolační pásky a nikoliv za pomoci lepidla a rozložení magnetů není ideální.	65
C.2	Příklad spojení bitů pomocí většího počtu menších vodivých plíšků. Plíšky jsou upevněny na jeden z bitů pomocí izolační pásky, ale magnety jsou již připevněny lepidlem UNIVERSUM. Bity mají netradiční velikost 8×8 mm.	65
C.3	Příklady prvních prototypů bitů s velikostí 8×8 mm.	66
C.4	Testování ideální tloušťky DPS pro potřeby bitů. Na obrázku jsou k vidění tloušťky 0,5 mm vlevo a 1 mm u destiček vpravo.	66
C.5	Měření přechodového odporu druhé verze plnohodnotných prototypů. Měření probíhá přímo na vývodech dvou součástek v sériovém obvodu, který je rozpojený tlačítkem. Měření tudíž probíhá pouze skrze dvojici magnetů, po jednom na každém bitu, a přes jeden magnetický plíšek, čili přes jeden kompletní spoj dvou bitů.	67

Seznam symbolů a zkratek

DPS	Deska plošných spojů. Printed circuit board.
SMD	Surface mount device. Součástka pro povrchovou montáž.
GIK	The Great Invention Kit. Stlačením spojovaná sada materiálů.
ZČU	Západočeská univerzita. University of West Bohemia.
DED	Digital Electronics Designer. Návrhář digitální elektroniky.

1

Úvod

1.1 Digitální materiály

Digitální materiály představují alternativní prostředek k budování 3D struktur. V podstatě jde o způsob založený na elementárních stavebních blocích, které lze skládat a zase rozkládat libovolným způsobem. Za názorného představitele digitálních materiálů lze uvést velice známou dětskou stavebnici LEGO. Právě tato oblíbená stavebnice splňuje všechny požadavky, které musí materiály splnit, aby je bylo možné označit za digitální. Konkrétní požadavky (a více informací k digitálním materiálům) jsou uvedeny a popsány v kapitole 2. Z LEGO lze postavit např. dům, následně ho rozebrat a postavit ze stejných kostiček vesmírnou loď. To vše bez potřeby speciálních nástrojů za velmi jednoduchého procesu. Žádný způsob výroby nenabízí takovou rekonfigurovatelnost a možnost robotizace jako digitální materiály. A právě z těchto vlastností plyne největší potenciál použití tohoto konceptu napříč různými obory. Jednotlivé stavební bloky navíc nemusí tvořit pouze fyzickou strukturu, ale mohou disponovat různými fyzikálními vlastnostmi, či speciálními funkcemi. Ve světě již proběhly výzkumy digitálních materiálů v oblasti elektroniky a položily určitý základ i pro projekt popisovaný v této práci.

1.2 Původní myšlenka

Na prvním počátku jsme si položili otázku, jak bychom mohli implementovat koncept digitálních materiálů do oboru elektroniky v našich laboratorních podmínkách. Jako rozumná varianta se nabízelo využití jiného, již existujícího, projektu a sice magnetické platformy pro ovládání miniaturních robotů (viz kapitola 3). Tento zmíněný projekt dosahuje skvělých výsledků a skládání digitálních materiálů právě na této platformě by mohlo dát magnetické platformě opět nový rozměr. Kvůli omezení platformy, pouze na plošný pohyb, jsme usoudili, že skládání elektroniky na bázi jednotlivých součástek bude vhodnější, než snaha o skládání jednotlivých druhů materiálů (vodič, izolant, polovodič). Na těchto základech tedy vzniklo zadání této diplomové práce. Už z prvních plánů bylo zřejmé,

že cílem práce není sestavit funkční systém pro velkovýrobu elektrických obvodů skládaných z digitálních materiálů, ale pouze poukázání na skutečnost, že tato myšlenka je realizovatelná a s dalším vývojem může dosáhnout skvělých výsledků.

1.3 Motivace

Mluvíme-li o digitálních materiálech v kontextu výroby elektroniky, je důležité si uvědomit, že se s největší pravděpodobností nebude jednat o náhradu klasické výroby, nýbrž o její doplnění. Z vlastností popsaných v kapitole 2 lze domýšlet celou řadu uplatnění, kde by mohl tento netradiční způsob výroby elektroniky najít své místo.

Například v oblasti konstrukce prototypů desek plošných spojů mohou být DPS složené z digitálních materiálů velmi užitečné. V dnešní době je možné vytvářet prototypy např. pomocí nepájivého pole, kde je ale nutné zmínit nevýhodu v podobě složitosti zapojení SMD součástek. Další možností, jak vytvořit prototyp DPS, je samozřejmě využití tradičních postupů, ale tyto postupy jsou zpravidla časově náročné.

Nyní si představte, že jediné, co musíte pro zkonstruování prototypu DPS udělat, je zadání požadovaného obvodu v podobě schématu nebo netlistu, do výrobního zařízení a prototyp se automaticky sám vytvoří během několika minut. Právě takové možnosti by digitální materiály v elektronice mohly v budoucnu nabídnout. Proces skládání prototypů by byl navíc plně reverzibilní, takže pokud by u návrhu vznikla jakákoliv chyba, tak je prototyp jednoduše opravitelný. Od výměny jedné součástky až po úplnou změnu charakteru obvodu, nic z toho by nebylo v tomto konceptu problémem. Mimoto, po otestování prototypu v provozu by mohl být prototyp zpětně rozebrán na jednotlivé části, které lze plnohodnotně využít na stavbu dalších prototypů. Proces rozebírání desky by byl stejně snadný jako jeho sestavení, neboť by se o veškerou práci opět postaralo zkonstruované výrobní zařízení. To kromě toho znamená, že při výrobě tímto způsobem vzniká nulový odpad, a tím pádem také minimální ekologická zátěž. Hledisko ekologie je samo o sobě dostatečný důvod, proč se vyplatí na konceptu digitálních materiálů pracovat, neboť v současné době se elektronika jen málokdy vyplatí opravovat a z velké části je zkrátka vyhazována do odpadu. I z tohoto hlediska by mohly digitální materiály způsobit malou revoluci, jelikož jednotlivé součástky by mohly pracovat skutečně až do konce své životnosti. Opravy, a nebo dokonce technologické inovace by mohly být prováděny bez lidského fyzického zásahu, masově a jen pomocí k tomu určených zařízení.

Nyní se zkusme přenést v myšlenkách o trochu výše, konkrétně až do vesmíru. Právě ve vesmíru totiž nastává problém způsobený vlivem velmi omezených zdrojů materiálu. Při dlouhodobějším pobytu mimo naši planetu je žádoucí disponovat komplexním systémem pro výrobu všelijaké elektroniky, a to systémem takovým, který dokáže elektrické obvody vytvářet, opravovat, rozkládat a tvořit z nich obvody nové a to jen za spotřeby elektrické energie. A jak bylo výše zmíněno, právě to by mohl koncept digitálních materiálů poskytnout, prozatím alespoň v teoretické rovině.

2

Koncept digitálních materiálů

Koncept digitálních materiálů je novátorský způsob budování fyzicky rekonfigurovatelných 3D struktur. Vychází z myšlenky rozložení celku do jednotlivých stavebních bloků, které lze podle potřeby libovolně skládat a zase rozkládat. Lze tedy říct, že tento koncept mění pohled na výrobu jako takovou napříč různými obory. Ať už se jedná o základní stavební bloky ve stavebnictví, či strojírenských konstrukcích, nanoroboty měnící nejen fyzikální vlastnosti objektu, nebo např. utváření rekonfigurovatelných mechatronických soustav, to vše si lze pod pojmem digitální materiály představit.

Slovo "digitální" se sice nejčastěji používá v kontextu informatiky a elektroniky, ale zde ho používáme v kontextu samotné fyzické organizace objektu. Obecně pak lze uvést, že digitální materiály jsou diskrétní elementární bloky, mají omezenou možnost propojení s binární logikou a relativním umístěním. Vytvářejí objekty, které jsou diskrétní ve své fyzické podstatě a kromě toho jsou plně reverzibilní. To znamená, že je lze rozkládat a znovu sestavovat do jiných typů objektů, čímž minimalizují odpad a maximalizují efektivitu výroby. Stěžejní výhodou je obrovské zjednodušení robotizace, automatizace a paralelizace výroby. Díky výše zmíněným vlastnostem, jako binární propojení nebo relativní umístění, se výrazně snižují technické požadavky na zařízení, jež tyto digitální materiály skládá a díky tomu se celý proces výroby nejen zrychluje, ale také zlevňuje.

Mimo jiné tento přístup také umožňuje úplně nové typy konstrukcí robotů, jež digitální materiály sestavují, oproti tradičním robotům používaným v různých oborech. Postup při robotizaci a automatizaci je dnes silně zaměřen na triviální převedení lidského způsobu vykonávání práce na ten robotický. Např. technika frézování pomocí CNC strojů vychází z velice starých řemeslných postupů. Tyto řemeslné postupy zpravidla sdílí vlastnost kontinuálního přidávání, nebo odebrání materiálu. V případě procesů přidávání materiálu se procesy nazývají aditivní a příkladem může být např. 3D tisk. Naopak, pokud se materiál kontinuálně odebírá, je proces nazvaný subtraktivní a příkladem může být právě CNC fréza. Kontinuální systémy mohou mít nevýhody v nedokonalém přechodu materiálů při výrobě, zpravidla nejsou reverzibilní, a často vyžadují velké množství času na výpočet a výrobu. To souvisí s další výhodou digitálních materiálů, u kterých je většinou snadné zakomponování výpočetních metod, díky obdobnosti organizace fyzických částí s organizací

digitálních dat ve výpočetním zařízení.

Pro zjednodušení je možno představit si princip na velice známé stavebnici LEGO. Jednotlivé kostičky lze skládat do libovolných objektů, následně je zase rozkládat a to bez použití speciálních prostředků, čímž je splněna reverzibilita. Binární logika propojení je vytvořena spínacími výstupky na horní straně kostičky a otvorem pro ně na její spodní části. Díky tomu je zajištěná přesnost a jednoduchost spojení. Relativní umístění je také dáno samotnými spínacími výstupky, které definují odstup dvou kostiček od sebe v jedné rovině. Bez použití měřících přístrojů lze s velkou přesností uvést, jakou relativní vzdálenost od sebe dvě konkrétní kostičky mají. S mírnou nadsázkou je možno uvést, že LEGO je jedním z nejdokonalejších představitelů digitálních materiálů.

Vyjma výše uvedených výhod se digitální materiály také můžou chlubit velkou přesností spojení bez potřeby speciálních nástrojů. Za příklad je možné uvažovat postavení rovné cihlové zdi, které si žádá poměrně složitý mechanický proces, zatímco spojení kostiček LEGO v rovnou zeď je mechanický proces takřka primitivní, a navíc nabídne výrazně lepší přesnost.

Neil Gershenfeld se svým týmem na MIT Center for Bits and Atoms [2] položili základy výzkumu digitálních materiálů napříč hned několika obory. Na základě jejich výzkumu vznikají práce i celé programy zabývající se digitálními materiály po celém světě. Výjimkou není ani tato diplomová práce.

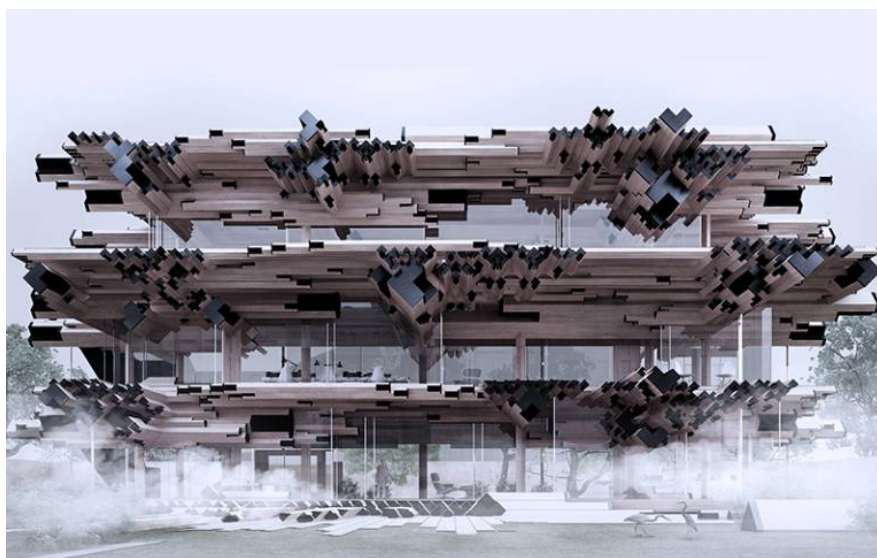
2.1 Ve stavebnictví

Potom, co byl představen obecný základ konceptu digitálních materiálů, je na místě vznést otázku, proč by jeho aplikování mělo být výhodné zrovna v oboru architektury a stavebnictví. Stejný důvod je podobný jako u většiny jiných oborů, a sice možnost robotizace a automatizace. Podle slov světoznámého architekta Gillesa Retsina jsou digitální materiály klíčové pro zavedení robotiky do oblasti architektury, jak zmiňuje ve své práci [1]. Podle Retsina je nutné uvědomit si rozdíl mezi diskretností v návrhu a diskretností v samotné fyzické organizaci, která otvírá spoustu nových možností.

Pravděpodobně dosud nejúspěšnějším pokusem o automatizaci ve stavebnictví je aditivní výroba v podobě 3D tisku. 3D tisk ukázal velký potenciál, ale v jeho neprospěch hovoří velice dlouhá doba výroby a také nutná homogenita materiálu. Těžko si představit tisk skla, železa, betonu a izolačních materiálů v jednom procesu. Tiskárny, jež dokáží tisknout více druhů materiálů, sice existují, ale spektrum materiálů je velmi omezeno technologií tisku. Zatímco spojování digitálních materiálů z různorodých látek nepředstavuje vůbec žádnou překážku. Čas výroby je možná ještě výraznější nedostatek 3D tisku, zvláště pokud se jedná o rozměrově náročné stavby. Ve srovnání s tím by skládání digitálních materiálů mohlo být potenciálně účinnější. Toto jsou hlavní důvody, proč se koncept digitálních materiálů zdá být perspektivnější i v oboru stavebnictví.

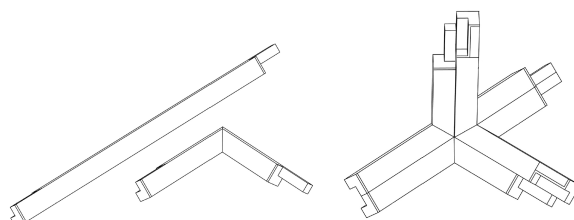
Otázkou tedy zůstává, jak mají digitální materiály pro účely architektury vypadat.

Jedna z variant, která se automaticky nabízí, je použití již existujících klasických cihel jako základního bloku. Cihly ale nenaplňují všechny požadavky, aby se daly označit za digitální, jelikož nedisponují propojením s binární logikou. Cihly lze sestavovat nekonečně mnoha způsoby. Tím je myšleno, že je lze na sebe umístit s natočením o libovolný úhel a také libovolnou hranou k sobě. Cihly také nelze spojovat bez přidaného materiálu např. v podobě malty, díky čemuž výsledná stavba není reverzibilní. V Gilles Retsin Architecture byly vyvinuty hned dva koncepty digitálních materiálů, jeden pro projekt Blokhut (2015) a druhý pro projekt Diamond Strata (2016). Prefabrikované betonové výlisky ve tvaru šipek vyrobené pro projekt Blokhut nenaplňují plný potenciál digitálních materiálů, protože pro jejich pevné spojení bylo zapotřebí výlisky lepit a také některé z prvků musely být přizpůsobeny pro konkrétní použití. Mnohem dokonalejší ukázkou digitalizace organizace materiálu odhalil projekt Diamond Strata (viz obr. 2.1).



Obr. 2.1: Návrh domu postaveného z digitálních materiálů Diamond Strata (2016)[1].

Zde byly použity dva typy stavebních prvků, a to prvek ve tvaru písmene L a prvek rovný, jak je vidět na obrázku 2.2. Tyto prvky, vyrobené ze dřeva, lze vzájemně spojovat pomocí lišt na bocích všech prvků.



(a) Přehled obou typů stavebních prvků.

(b) Struktura postavená ze čtyř prvků ve tvaru písmene L.

Obr. 2.2: Ukázka stavebních prvků použitých v projektu Diamond Strata [1].

Další klíčová vlastnost prvků je, že jsou vyrobeny v různých měřítkách, a proto lze vytvořit kostru stavby z velkých prvků a zbytek prostoru vyplnit menšími a lehčími stavebními prvky. Tímto způsobem se podařilo docílit jak odstranění nutnosti přizpůsobovat prvky pro konkrétní použití, tak i plně reverzibilního spojení.

S ještě odvážnější myšlenkou přišel tým designerů (viz [3]) jenž představil svůj návrh na materiály, které nejen že splňují požadavky na to, aby se daly označit jako digitální, ale navíc každý jeden stavební blok je sám o sobě zároveň robot a dokáže se pohybovat. Jednotlivé bloky jsou nazvány pizzaboti, protože jejich tvar připomíná krabici od známé italské pochoutky. Roboti se dokáží nejen pohybovat, ale také se vzájemně spojovat, díky čemuž jsou schopni vytvářet složité 3D struktury. Výstavba potom probíhá zcela autonomně, nepotřebuje lidský mechanický zásah a dokonce ani další stroje nebo zařízení pro sestavení objektu. V tomto případě se tedy jedná o materiály schopné kompletního sebesestavení. Vývoj pizzabotů je zatím na svých začátcích, ale již byly vytvořeny první prototypy a také simulace, jak by měl celý systém fungovat. Model domu postaveném z pizzabotů je zobrazen na obrázku 2.3.

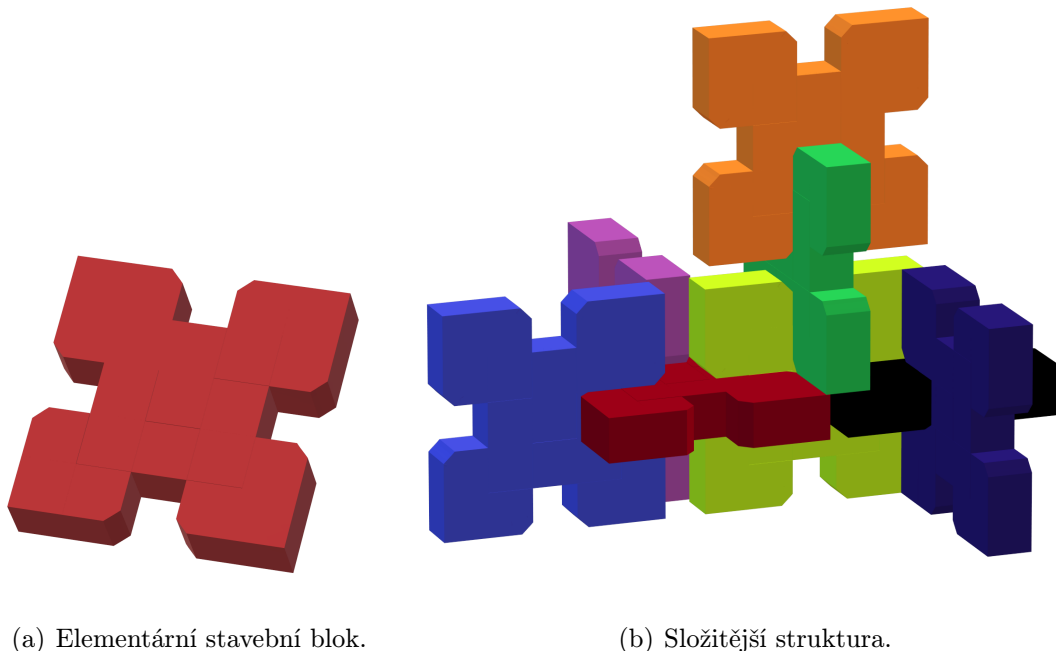


Obr. 2.3: Návrh domu postaveného z pizzabotů [3].

Nutno však říci, že digitální materiály jsou i na poli stavebnictví žhavá novinka a nad jejich aplikováním v masovém měřítku stále visí celá řada otazníků.

2.2 V elektronice

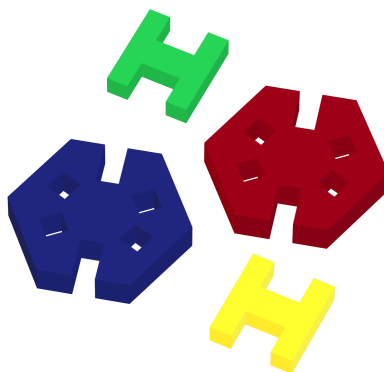
Pro potřeby této práce jsou samozřejmě primární digitální materiály v oblasti elektroniky. Stejně jako je tomu u digitálních materiálů napříč všemi obory, tak i zde klíčová otázka spočívá v mechanickém spojení jednotlivých stavebních bloků. Ve výzkumu probíhající na výše zmíněném centru na MIT [2] se zaměřují na spojování digitálních materiálů v elektronice především jednoduchým přitlačením dvou částí k sobě. Digitální materiály v jejich podání totiž mají takové zářezy, aby na sebe navzájem navazovaly a vliv tření poté zaručuje poměrně robustní spojení. Jedním z prvních typů digitálních materiálů v elektronice byl tzv. GIK [8], který vychází ze známé stavebnice LEGO a nabízí poměrně dobré mechanické vlastnosti, díky čemuž se stává základem pro další různé typy digitálních materiálů. Jeden blok stavebního elementu v konceptu GIK je zobrazen na obrázku 2.4 (a). Komplexnější systém spojení je potom zřejmý z obrázku 2.4 (b).



Obr. 2.4: Ukázka konceptu digitálních materiálů GIK.

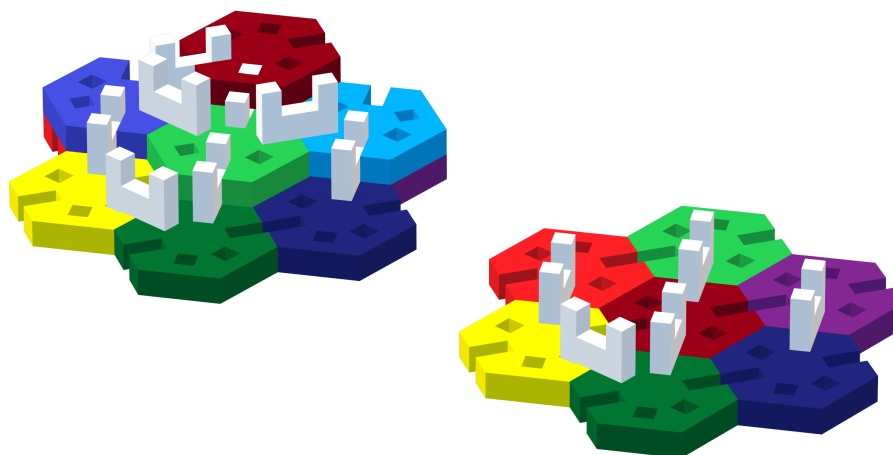
U materiálů, které jsou často spojovány a zase rozpojovány na mechanické bázi obecně časem dochází ke ztrátě reverzibility. Ale právě konstrukce GIK dovoluje velké množství těchto spojení a rozpojení bez výrazného efektu opotřebení materiálu. Navíc po několika rozloženích a složeních se síla potřebná k těmto úkonům stává téměř konstantní. Mírnou nevýhodou konceptu GIK je poměrně malá hustota výsledného objektu. U většiny digitálních materiálů v oblasti elektroniky je snaha, aby digitální materiály plně zaplnily výsledný objekt, a to z důvodu lepších elektrických i mechanických vlastností. Hustota výsledného objektu však často stojí proti jednoduchosti osazovacího stroje, který je pro celý koncept klíčový. Z toho důvodu je vždy zapotřebí najít vhodný kompromis, mezi těmito hledisky.

Celou řadu kladných vlastností vykazuje také varianta GIK používající tvary připomínající písmena "O" a "H". Jak je již z názvu patrné, tak na rozdíl od svého předchůdce, jsou v této variantě použity dva odlišné tvary, které se navzájem doplňují. Myšlenka dvou typů tvarů, kde jeden slouží jako stavební blok a druhý jako spojka byl ještě vylepšen a vznikl tak koncept šestiúhelníků se spojkami typu "H" viz obr. 2.5.



Obr. 2.5: Dva bloky stavebního materiálu v konceptu šestiúhelníků se dvěma spojkami typu "H".

Tento typ přináší téměř stoprocentní hustotu výsledného objektu a také skvělé mechanické vlastnosti. Systém spojení, který není na první pohled tak zřejmý, jako tomu bylo u GIK, je zachycen na obrázku 2.6. Obrázek na pravé straně ukazuje pouze jednu vrstvu, zatímco obrázek vlevo přidává vrstvu druhou a třetí.

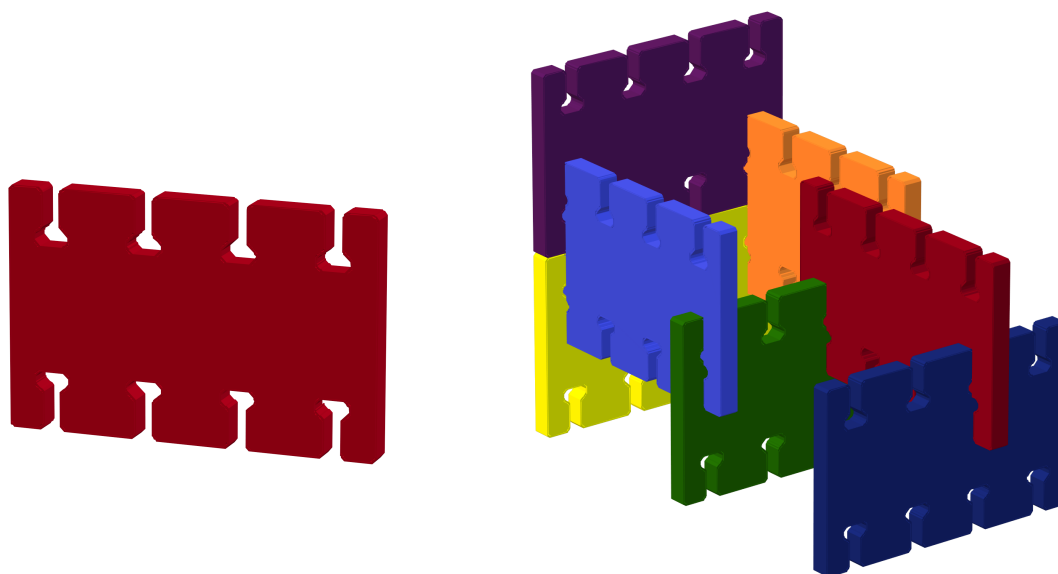


Obr. 2.6: Struktura postavená z šestiúhelníků se spojkami typu "H".

Šestiúhelníky spojují části ve tvaru písmene "H", které jsou umístěny do otvorů v šestiúhelnících. Aby bylo možné těmito spojkami spojovat více vrstev, musí být šestiúhelníky v jedné vrstvě vždy natočeny stejným směrem, zatímco šestiúhelníky ve vrstvě následující musí být vždy pootočený o 60° . Zářezy umístěné vždy na dvou protilehlých hranách šestiúhelníku potom zaručují, že spojky ve tvaru "H" nebudou překážet šestiúhelníkům v

jiných vrstvách. Značnou výhodou tohoto konceptu je snadná aplikace multi-měřítkového zpracování. Pokud totiž doprostřed každého šestiúhelníku vytvoříme otvor ve tvaru pravidelné dvanácticípé hvězdy, tak je možné tento otvor využít k zasunutí řádově větší spojky a tím získáme propojení s řádově větším šestiúhelníkem. Naopak v neprospěch tohoto konceptu hovoří poměrně vysoká složitost osazovacího stroje, který musí zvládnout práci se dvěma typy materiálů.

William Kai Langford si ve své práci [5] (2014) vybral geometrii úzce vycházející ze základní myšlenky GIK. Tvar stavebního bloku lze vidět na obrázku 2.7 (a). Spojení jednotlivých stavebních bloků pak zachycuje obr. 2.7 (b). Na první pohled je patrné, že tento design nemá příliš velkou hustotu výsledného objektu, avšak disponuje velice dobrými vlastnostmi z hlediska osazovacího stroje. To je způsobeno tím, že výsledný objekt vzniká vertikálně a je možné skládat materiály po jednom. Výhodou také je, že celý systém je striktně ortogonální, čímž se zjednodušuje nejen konstrukce sama o sobě, ale také náročnost na výpočetní algoritmy pro práci s těmito materiály. V neposlední řadě je potřeba zmínit výhodu v podobě velice jednoduchého zpracování do multi-měřítkového konceptu. Ta spočívá ve speciálních spojovacích blocích, které mají na každé hraně jinou velikost výřezů. Tím je docíleno, že z jedné strany je možné spojovat bloky většího měřítka a ze strany druhé zase bloky měřítka menšího. Navíc zásluhou jednoduchosti stavebního bloku je možné vytvořit velmi širokou škálu rozměrů od jednotek centimetrů až do stovek nanometrů.



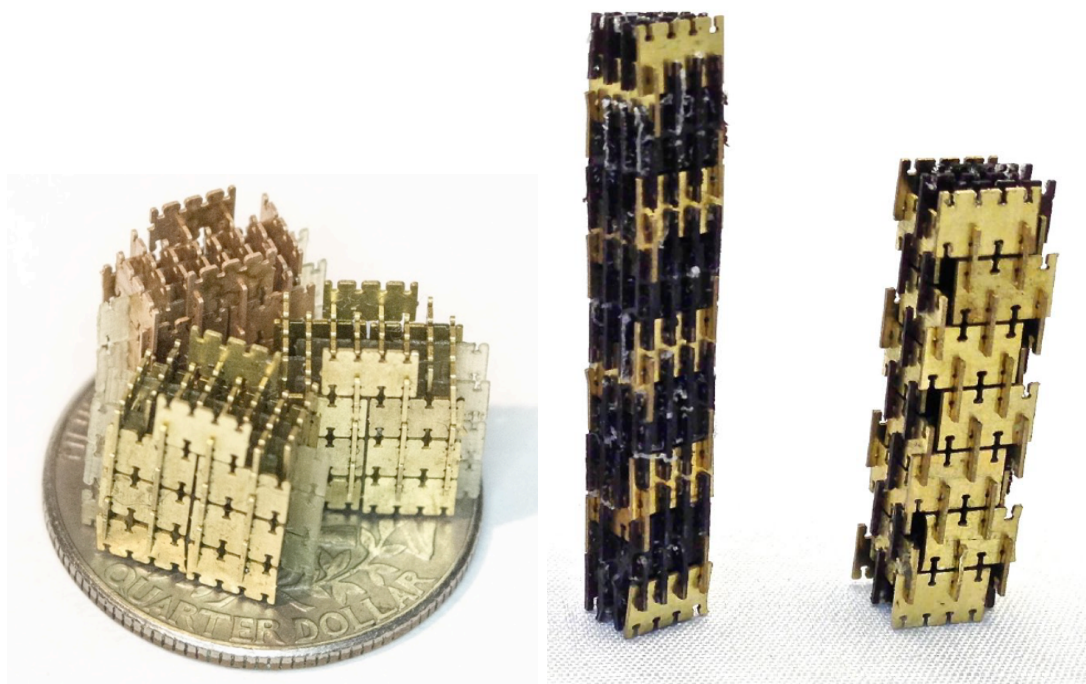
(a) Elementární stavební blok.

(b) Složitější struktura.

Obr. 2.7: Ukázka konceptu použitého v práci Williama K. Langforda [5].

Kromě mechanického spojování jednotlivých stavebních bloků, je potřeba pro účely elektroniky také vymyslet řešení konstrukce různých elektrických součástek, ať už pasiv-

ních či aktivních. Zbytek kapitoly je věnován práci Williama Kai Langforda, která může být svým způsobem považována za základ digitálních materiálů v oblasti elektroniky. Rozdílné elektrické součástky vyžadují celou řadu různých materiálů a právě výběr materiálů je v tomto směru klíčový. Vytvořené struktury z elementárních dílků vyrobených z různých materiálů ukazují obrázky 2.8.



(a) Obrázek naznačující velikost digitálních materiálů v porovnání s mincí čtvrt dolaru. (b) Obrázek zachycující dvě reálně sestavené součástky. Vlevo induktor a vpravo kapacitor.

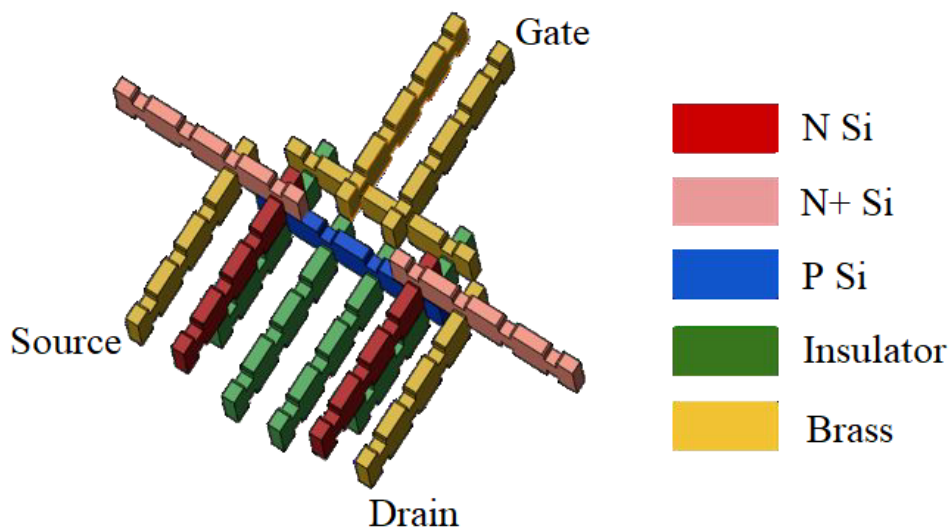
Obr. 2.8: Struktury vyrobené z digitálních materiálů v rámci práce Williama K. Langforda [5].

Jako ideální izolační materiál byl vybrán kompozit Garolite označován také G-10. Jedná se o epoxidovou pryskyřici vrstvený laminát ze skelných vláken vykazující dobrou elektrickou pevnost a slušnou teplotní stabilitu.

Na materiál pro tvorbu vodivých spojů byli kladeny požadavky nejen na vlastnosti týkající se elektrické vodivosti, ale také vlastnosti mechanické. Např. měď vykazuje skvělé elektrické vlastnosti, ale je poměrně měkká a díky tomu je obtížné zpracovat ji pro potřeby digitálních materiálů. Z toho důvodu dostala před mědí přednost její slitina se zinkem a sice mosaz.

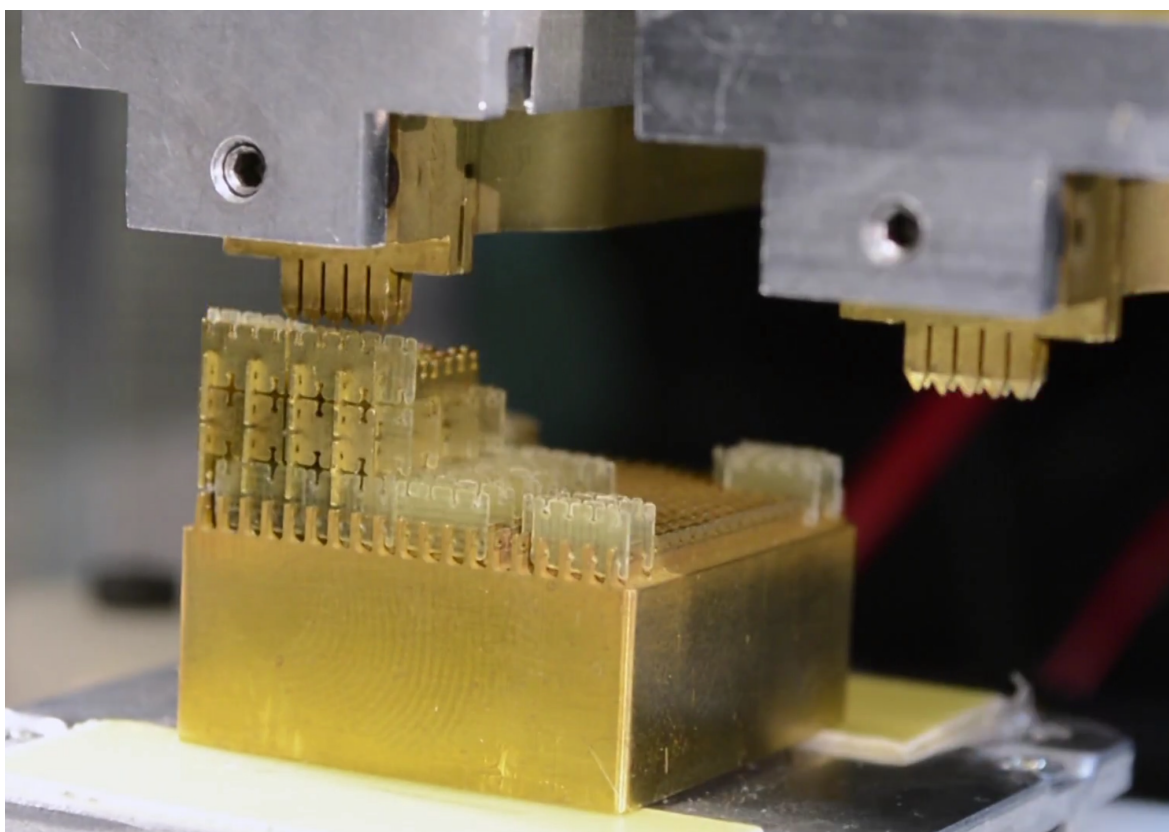
Bavíme-li se o materiálech používaných pro výrobu běžných rezistorů, může se jednat např. o velice tenké kovové fólie v případě přesných rezistorů, nebo např. o směsi uhlíku a keramiky, v případě těch méně přesných rezistorů. Avšak pro potřeby digitálních materiálů zvolil Langford statický disipativní plast. Bylo to z důvodu, že jednotlivé stavební bloky vykazovali odpor okolo $100\text{k}\Omega$. Taková výchozí hodnota se zdála být ideální, neboť paralelním či sériovým spojováním bloků lze vytvořit širokou škálu běžně používaných hodnot rezistorů.

Pro účely polovodičů byl nepřekvapivě použit dopovaný křemík, stejně jako je tomu u výroby klasických polovodičových součástek. V konstrukci Schottkyho diody bylo navíc zapotřebí využití speciálních kovů k vytvoření ohmického kontaktu. K těmto účelům byli využity bloky z hliníku a mědi, kvůli jejich dostupnosti a snadné výrobě. Z těchto výše zmíněných materiálů lze poskládat různé pasivní, ale dokonce i aktivní součástky. Kondenzátory a cívky jsou vytvořeny jednoduchým uspořádáním vodivých bloků, zatímco k sestavení aktivních součástek je zapotřebí složitějších struktur. I přesto se povedlo sestavit např. funkční tranzistor MOSFET, nebo Schottkyho diodu. Složitější strukturu lze vidět na obrázku 2.9. Jedná se právě o tranzistor typu MOSFET.



Obr. 2.9: Tranzistor typu MOSFET v konceptu digitálních materiálů použitým v práci Williama K. Langforda [5].

Zařízení pro skládání digitálních materiálů v tomto konceptu zachycuje obr. 2.10, na kterém je také vidět skládání obvodu ze dvou různých materiálů. V toto případě se jedná o materiál izolační a vodivý. Součástky z digitálních materiálů obecně vykazují horší elektrické vlastnosti, než jaké nabízí součástky vyrobené tradičním způsobem. Ale už samotný fakt, že je možné skládat i aktivní polovodičové součástky, je v tomto směru velký úspěch.



Obr. 2.10: Zařízení pro skládání digitálních materiálů v konceptu použitém v práci Williama K. Langforda [5]. Videozáznam pořízený při procesu skládání dostupné z [6].

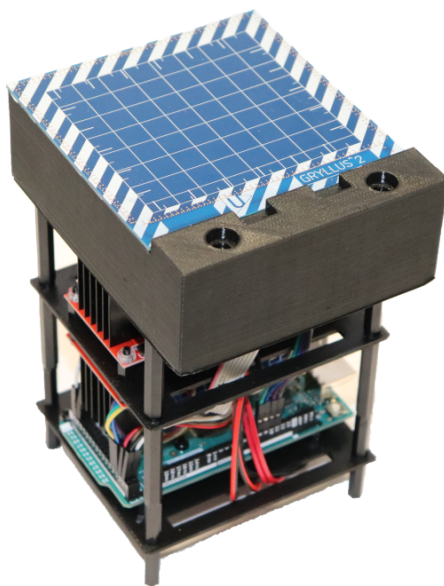
3

Magnetická platforma pro ovládání miniaturních robotů

Jak již bylo řečeno v úvodu (1.2), celý koncept digitálních materiálů v našem podání byl vytvořen na míru magnetické platformě pro ovládání miniaturních robotů. Z toho důvodu je nutné, podrobněji vysvětlit základní princip fungování platformy a také si představit několik dosud zkonstruovaných verzí. Více o projektu magnetické platformy se lze dočíst v [10],[11],[12],[13].

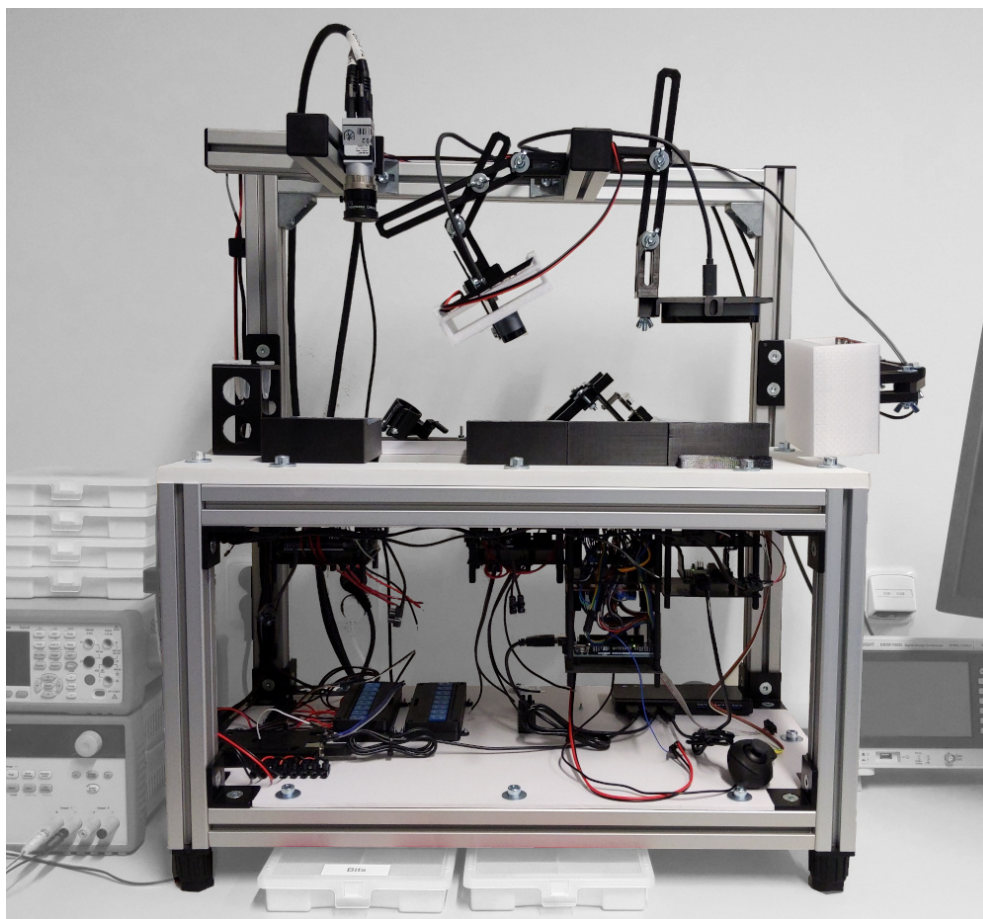
3.1 Princip

Projekt magnetické platformy pro ovládání miniaturních robotů je již po několik let vyvíjen na Katedře teoretické elektrotechniky na plzeňské ZČU. Hlavní myšlenka spočívá v ovládání permanentních magnetů pomocí magnetického pole vyvolaného koplanárními cívkami. K tomu účelu byla navržena a sestrojena platforma viz obr. 3.1.



Obr. 3.1: Magnetická platforma na ovládání miniaturních robotů Gryllus².

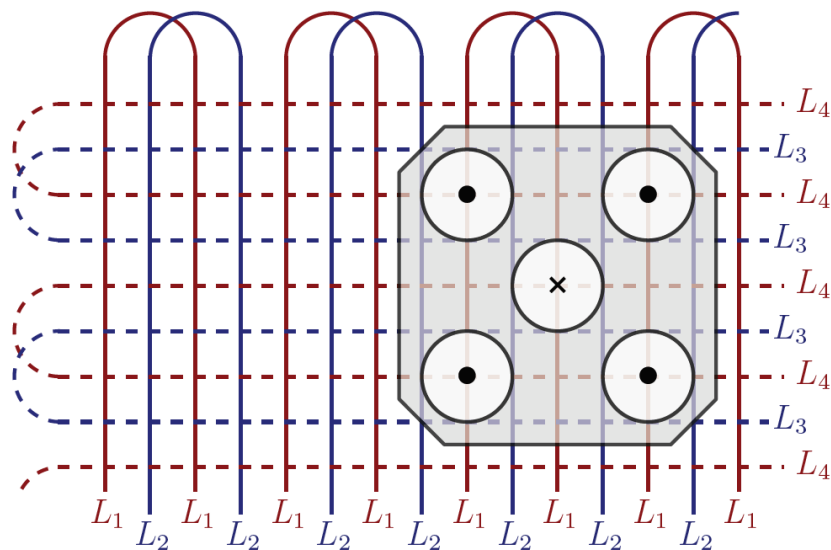
Modrá plocha, pod kterou se nachází systém koplanárních cívek, je velká 100×100 mm. Ve spodku plastové konstrukce je také patrná deska plošného spoje s mikroprocesorem a nad ní řídicí jednotka v podobě H-můstku. Pro platformy byla vyrobena i základna, kam je možné jednotlivé platformy umísťovat a následně řídit. Základna obsahuje vestavěné osvětlení, kameru, rozvod napájení nebo např. propojení s řídicím PC.



Obr. 3.2: Základna pro magnetické platformy.

Základní systém je založen na postupném spínání jednotlivých koplanárních cívek v rozložení viz obr. 3.3. Díky spínání jednotlivých cívek v čase je dosaženo proměnlivého magnetického pole, které je schopné po platformě pohybovat permanentním magnetem, resp. roboty z permanentních magnetů složených. Kvůli rozložení cívek po ploše platformy existují určité požadavky na umístění permanentních magnetů v robotu tak, aby magnetické síly působily na roboty pouze v požadovaném směru. Z výše zmíněného obrázku 3.3 je patrné, že cívky L_1 a L_2 slouží pro pohyb ve vertikálním směru, zatímco cívka L_3 a L_4 zase pro pohyb ve směru horizontálním, z pohledu obrázku. Při buzení cívek L_1 a L_2 v pravidelných intervalech, v řádu nižších desítek ms, je docíleno magnetického působení ve vybraném směru doleva nebo doprava. Magnety v každém robotu jsou usazeny v pomyslené mřížce s velikostí oka 1×1 mm, což musí odpovídat vzdálenosti jednotlivých závitů jedné cívky od sebe a zároveň také šířce jednoho závitu. Tato vzdálenost je na všech dosud vyrobených platformách 1 mm. Další koplanární cívka je potom totožná, pouze posunutá

o 0,5 mm oproti cívce první. Zbylé dvě cívky jsou opět totožné, jen kolmé na první dvě viz obr. 3.3. Usazení magnetů v pomyslené mřížce s okem 1×1 mm navíc není jediná podmínka pro umístění magnetů. Další podmínkou je totiž dodržení správné polaroty magnetů v robotu. I to je naznačené ve vzpomínaném obrázku pomocí teček, resp. křížku uprostřed každého magnetu. Robot může mít libovolnou velikost a také libovolný počet magnetů. Ale všechny magnety v lichých řadách i lichých sloupcích pomyslené mřížky musí obsahovat magnety s polaritou v jednom směru. Kdežto všechny řady a sloupce sudé musejí obsahovat magnety orientované ve směru opačném. Tento aspekt je zejména důležitý při návrhu digitálních materiálů viz kapitola 4.3.



Obr. 3.3: Základní uspořádání cívek v magnetické platformě pro ovládání miniaturních robotů. Kromě rozložení cívek je na obrázku zobrazen i robot s pěti permanentními magnety, včetně naznačené orientace magnetů. *Převzato z [10].*

O spínání jednotlivých cívek se stará jednodeskový počítač Arduino Uno skrze H-můstek. Pokyny pro konkrétní pohyby robotů po platformě jsou posílány sériovou komunikací z řídicího PC. Zprávy jsou posílány v programovacím jazyku určeného pro obráběcí stroje, a sice G kódu, který je pro tyto účely ideální. Pokročilejší řízení je dostupné pomocí aplikace MagNet běžící na řídicím PC viz kapitola 7.1.

3.2 Platformy

Magnetická platforma byla při následném vývoji zhotovena hned v několika verzích. Každá verze má svůj unikátní název a také unikátní vlastnosti díky různému uspořádání koplárných cívek. Z principu vysvětleného výše, který odpovídá platformě s názvem Scarabeus (viz [10]), je zřejmé, že není možné pohybovat více roboty nezávisle na sobě. Sepnutí kterékoliv cívky totiž vytvoří magnetické pole po celé ploše platformy a tudíž rozpohybuje všechny roboty na platformě, nezávisle na tom, kde se roboti zrovna nachází. Proto novější

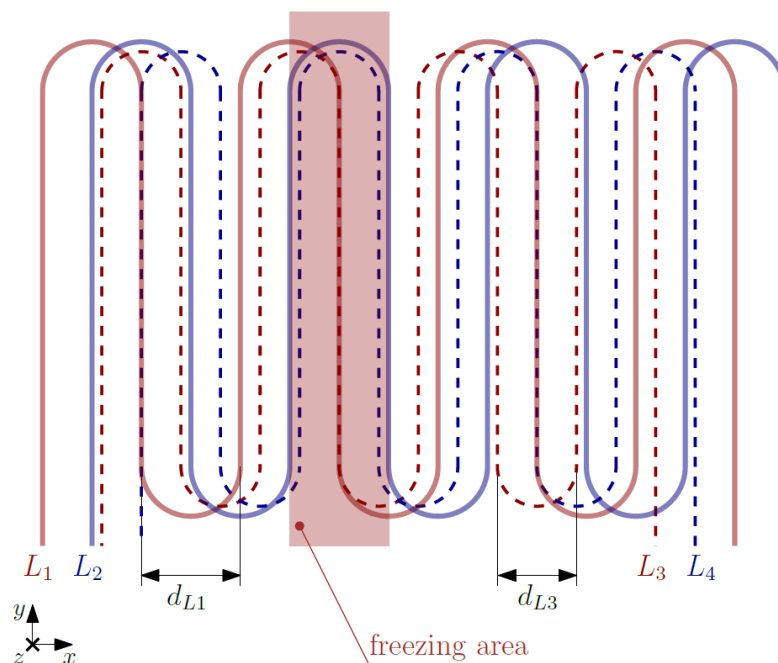
platformy přichází z různými inovacemi, jak nezávislý pohyb více robotů po platformě zajistit.

Platforma s názvem Isoptera (viz[11]) využívá čtyři segmenty, kde každý segment disponuje vlastní čtveřicí koplanárních cívek. Díky tomu dokáže Isoptera ovládat čtyři roboty nezávisle na sobě, ale pouze za předpokladu, že každý robot je umístěn právě v jednom segmentu.

Výrazně pokročilejší metodou nabízí řada verzí Gryllus (viz [11], [12]). Zde je využito systému superpozicí více magnetických polí tak, aby na určitých místech došlo k jejich potlačení. Pokud totiž pod koplanární ovládací cívku umístíme vodič, dokážeme spínáním tohoto vodiče vytvořit magnetické pole přesně opačné, než kterým působí magnetické pole vyvolané cívkou. Díky tomu dochází v daném místě k vyrušení magnetických sil a robot na takovém místě může stát, zatímco další robot se po platformě pohybuje.

Tato myšlenka byla vylepšena tak, že místo použití jednoduchého vodiče pro vytvoření magnetického pole s opačnou polaritou, byla využita další koplanární cívka, velmi podobná cívkě ovládací. Rozložení obou cívek ukazuje obr. 3.4. Tento systém je použit v platformě Gryllus² a díky němu je možné vytvořit hned několik míst, kam lze v případě potřeby s robotem zajet a jeho pozici na tomto místě ukotvit. Na zmíněném obrázku 3.4 lze vidět L_1 a L_2 , které představují klasické ovládací cívky viz obr. 3.3. Dvojce cívek L_3 a L_4 potom představuje právě cívky pro zamrazení robotů na místě. Na obrázku je pozice, ve které je možné robota ukotvit naznačená červenou barvou.

Kromě výše zmíněných verzí platform, byly také vytvořeny verze s různými unikátními vlastnostmi. Jedná se například o možnost otočit robota o 90° , nebo vzdálit od sebe dva roboty, kteří jsou umístěni hned vedle sebe.



Obr. 3.4: Rozložení cívek v magnetické platformě Gryllus². Převzato z [12].

4

Návrh digitálních materiálů v technologii výroby DPS

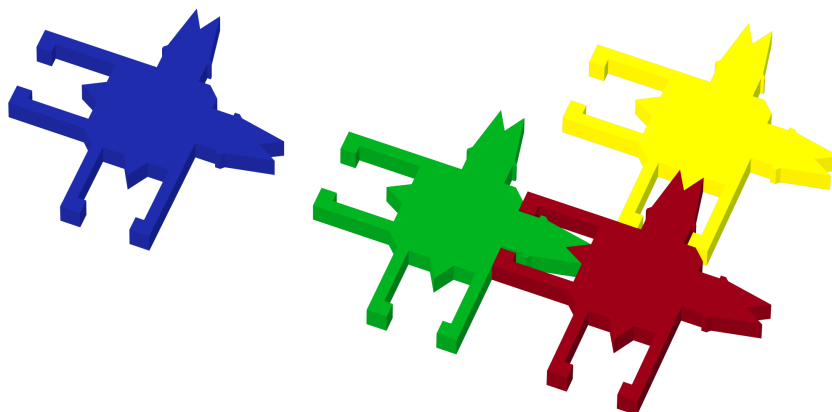
Před tím, než budou představeny různé návrhy digitálních materiálů v technologii výroby DPS, je nutné vysvětlit, co přesně označuje slovo "bit" v našem podání. V kapitole 2 bylo řečeno, že digitální materiály jsou diskrétní elementární bloky. My jsme se snažili vnést tento koncept do technologie výroby DPS, a tudíž pro nás jeden elementární blok představuje destička s elektrickou součástkou, která je schopná navázat jak mechanické, tak i elektrické spojení s dalšími destičkami. Destička obsahuje libovolné vodivé cesty propojující pady součástek s různými hranami tak, aby bylo z propojených bitů možné poskládat libovolný elektrický obvod. Tento celek destičky se součástkou a s vodivými cestami jsme pracovníčně nazvali bit. Terminologie vyplývá z uspořádání dat v diskrétní elektronice, kde právě jeden bit představuje nejmenší možnou informaci. Po převedení diskrétnosti do fyzické struktury tedy bit označuje nejmenší elementární blok, čili destičku se součástkou a vodivými cestami. Sestavením bitů je posléze možné vytvořit plnohodnotnou DPS.

V kapitole 2.2 bylo podrobně představeno hned několik typů konstrukcí digitálních materiálů využitelných pro účely elektroniky. Pro naše potřeby bylo ale nutné, navrhnout konstrukci zcela novou, jelikož žádná z předchozích konstrukcí nepočítá s realizací omezenou pouze v jedné rovině. Běžný postup při návrhu digitálních materiálů je nejdříve navrhnout samotnou konstrukci a až posléze vytvářet zařízení k jejich skládání. V našem případě jsme posloupnost otočili a navrhovali jsme konstrukci digitálních materiálů na již vytvořené zařízení. Naše konstrukce tedy musela být schopna, kromě jiného, také plynulého pohybu po magnetické platformě viz 3, což návrh zkomplikovalo.

Následující podkapitoly se věnují návrhům digitálních materiálů, a to především z pohledu jejich mechanického a elektrického spojování. To je totiž nutným základem pro vytvoření funkční digitální struktury v elektronice.

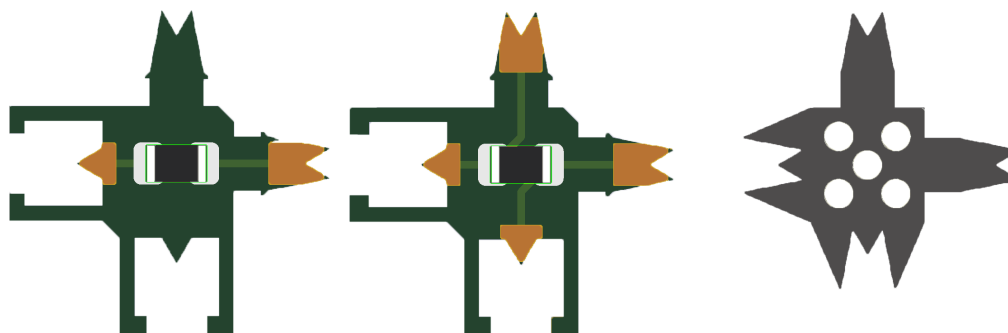
4.1 Mechanické bity

Nápad využít magnetickou platformu pro sestavování digitálních materiálů byl založen na předchozích pokusech, které testovaly různé typy mechanického spojování plastových těles. Jednalo se o plastové části zhotovené pomocí 3D tisku viz obr. 4.1, jež ke vzájemnému spojování využívaly pružnost materiálu. Plastové části potom byly za pomoci robotů, popsanych v kapitole 3.1, natlačeny k sobě a tím také spojeny, jak je z obrázku patrné.



Obr. 4.1: Plastové dílky použité při testování mechanického spojování na magnetické platformě za pomoci robotů.

Prvotní idea tedy byla, vzít tento koncept mechanického spojování, vyrobit ho z materiálu vhodného pro výrobu DPS, umístit na každý dílek součástku s určitými vodivými cestami a zařídit, aby při mechanickém spojení nastalo také spojení elektrické. Návrh zachycuje obrázek viz 4.2.



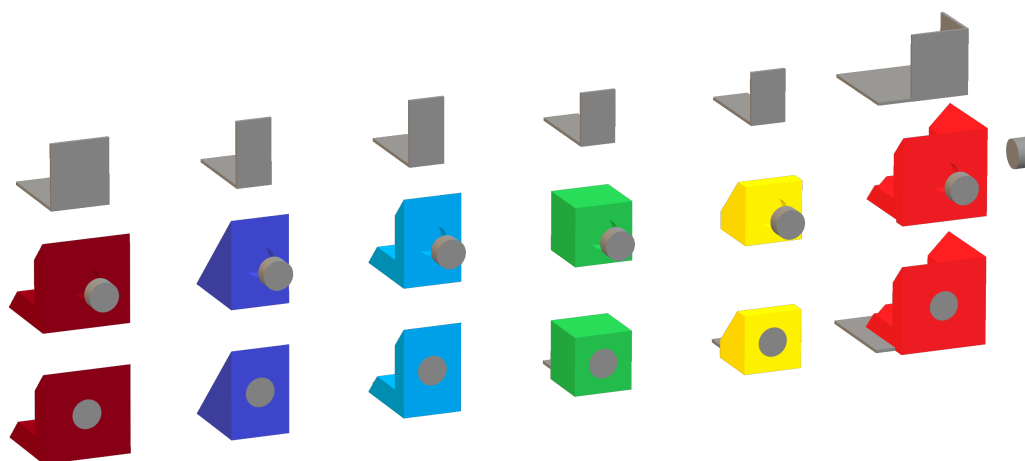
Obr. 4.2: Návrh digitálních materiálů v technologii DPS sériové uspořádání (vlevo), paralelní uspořádání (ve středu), robot navržený pro manipulaci s bity (vpravo)

Elektrického spojení mělo být docíleno pomocí vodivého plíšku, připájeného na pájecí plošky na dvou hranách každého bitu. Vodivý plíšek by nejspíše musel disponovat určitým prohnutím, aby bylo zajištěno dobré kontaktování mezi bity. Společně se systémem

spojování byl navržen také speciální robot viz obr. 4.2 (vpravo), který by byl schopný přesné manipulace s bity po magnetické platformě. Pět otvorů v robotu by bylo zaplněno magnety a tělo robota by bylo vytvořeno 3D tiskem. Tento koncept nikdy nebyl zhotoven, neboť v konkurenci se zbytkem návrhů se nezdál být perspektivní. Velké otazníky visely nad pevností výsledné desky, nad silou potřebnou ke spojení dvou bitů a v neposlední řadě nad elektrickým odporem mezi plíškem jednoho bitu s vodivou ploškou bitu druhého.

4.2 Magnetické bity

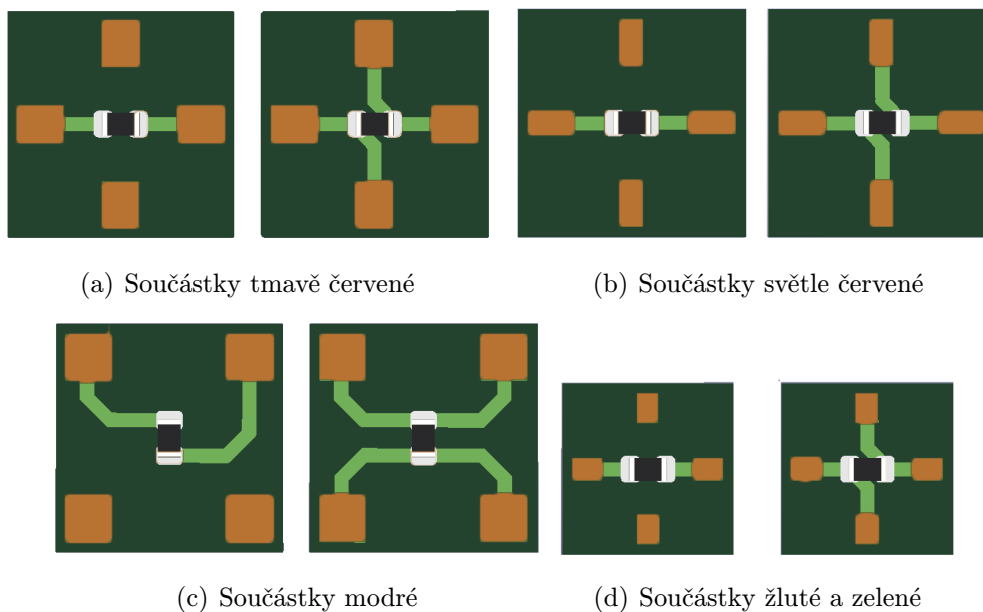
Úplně odlišný přístup nabízí návrh, který místo mechanického spojování bitů využívá spojování na bázi válcových magnetů. Pro tento účel byla navržena speciální součástka viz obr. 4.3. Tato součástka je složena z plastové schránky, válcového magnetu a kovového plíšku, jak je na zmíněném obrázku vidět. Plastová schránka disponuje otvory jak pro magnet, tak pro kovový plíšek. Magnet je umístěn tak, aby součástka nijak neovlivňovala magnetickou platformu a ani platforma součástku. Spojení mezi magnetem a pájecí ploškou určenou pro tuto součástku by zajišťoval právě kovový plíšek, tentokrát ale ohnutý do pravého úhlu a zasunutý dovnitř plastové schránky. Součástku by bylo možné připájet k destičce plošného spoje, kde by se nacházela také daná elektronická součástka s určitým zapojením vodivých cest viz obr. 4.4.



Obr. 4.3: Součástky navržené pro magnetické spojování digitálních materiálů. Horní řada ukazuje rozebranou součástku, kde jsou vidět různé plastové nosiče, válcové magnety, a vodivé plíšky. Spodní řada potom ukazuje kompletní poskládanou součástku.

Na obrázku 4.4 vidíme hned čtyři dvojice destiček. Každá dvojice ukazuje příklad sériového(vlevo) a paralelního(vpravo) spoje a odpovídá konkrétnímu rozměru součástek z obr. 4.3. Přesněji dvojice destiček vlevo nahoře (a) odpovídá tmavě červené součástce,

dvojice nahoře vpravo (b) součástkám modrým, dvojice vlevo dole (c) součástce světle červené a nakonec dvojice dole vpravo (d) odpovídá součástkám žluté a zelené. Všechny zobrazené návrhy, až na jeden, počítají se součástkou zajišťující spojení uprostřed každé hrany destičky. Návrh na obrázku vlevo dole (c) má ale spojovací součástku umístěnou ve všech rozích destičky. Díky tomu by byl tento koncept schopný odlišného způsobu vytváření obvodů, než všechny ostatní návrhy. Pokud dojde ke spojení v konceptu se spojovací součástkou umístěnou uprostřed hrany, je možné, aby přes vodivé cesty došlo ke spojení jedné pájecí plošky elektronické součástky prvního bitu s jednou pájecí ploškou elektronické součástky bitu druhého. Oproti tomu koncept s propojovacími součástkami umístěnými v rozích dovoluje propojit obě pájecí plošky elektronické součástky nezávisle na sobě. V důsledku toho by docházelo k potřebě menšího počtu bitů na sestavení DPS a tím také k jejímu celkovému zmenšení. To lze považovat za velmi kladnou vlastnost, jelikož právě výsledné rozměry DPS jsou drobnou nevýhodou všech konceptů prezentovaných v celé kapitole.



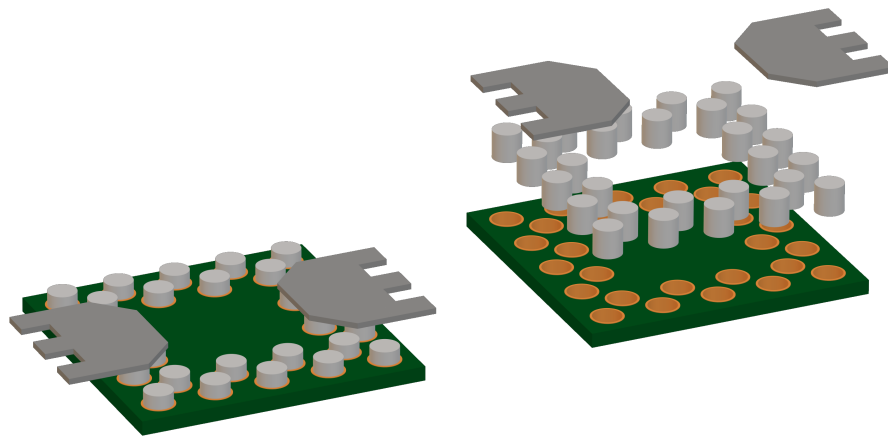
Obr. 4.4: Destičky plošných spojů navržené pro koncept digitálních materiálů s použitím magnetického spojování. Obrázek odpovídá součástkám na obr. 4.3

Manipulaci s bity by u všech návrhů z obrázku 4.4 zajišťovali obyčejní roboti jakýchkoliv tvarů či rozměrů. Ani tento koncept se však nedostal do fáze výroby, jelikož třetí varianta uvedená v kapitole 4.3 se zdála být nejperspektivnější hned v několika ohledech.

4.3 Magnetické bity samostatně schopné pohybu

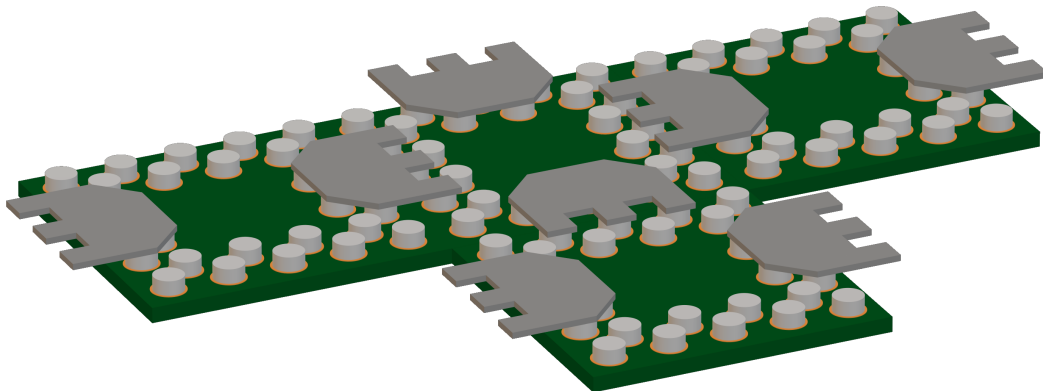
Předchozí dva návrhy vždy počítaly s tím, že bity určitých tvarů budou skládány za pomoci různých magnetických robotů. Tento třetí koncept však mění celkový pohled na

problematiku jako takovou, neboť zcela odstraňuje potřebu robotů. Pohybu bitů po magnetické platformě může být docíleno bez robotů ve chvíli, kdy samotné bity budou obsahovat permanentní magnety ve správných vzdálenostech a se správnou orientací. Jinak řečeno, se bity v podstatě samy stanou roboty. Magnety mohou být navíc využity pro účel spojování jednotlivých bitů mezi sebou. Aby vzniklo pevné mechanické spojení a zároveň také spojení elektrické, dopomáhají magnetům opět elektricky vodivé a zároveň magnetické plíšky. Plíšky jsou přilepené vodivým lepidlem vždy k magnetům na dvou protilehlých hranách každého bitu. Plíšky mohou disponovat různými tvary či velikostmi. Po přiblížení plíšků jednoho bitu k hraně bitu druhého, kde plíšky přilepeny nejsou, dochází k vzájemnému přitažení bitů a navázání elektrického spojení. Stejně jako u předchozích konceptů, i zde mohou bity obsahovat různé vodivé cesty. Cesty v tomto konceptu vždy propojují pájecí plošku elektronické součástky s minimálně jedním magnetem na hraně bitu. Právě tento magnet pak vytváří vodivé spojení skrze plíšek a stejně situovaný magnet na druhém bitu. Vodivé spojení nabývá skvělých parametrů, neboť magnety aktivně přitahují plíšky k sobě čímž minimalizují mezeru mezi sebou a tudíž zabezpečují velmi robustní spojení. Obrázek 4.5 zobrazuje celý návrh jednoho bitu. Na pravé straně obrázku je vidět substrát s měděným pokovením, válcové magnety a kovové plíšky. Na straně levé je potom celý bit složen dohromady. Na obrázcích naopak chybí vodivé cesty a elektrické součástky z důvodu přehlednosti. Na dalším obrázku 4.6 je ukázka více bitů spojených do složitější struktury.



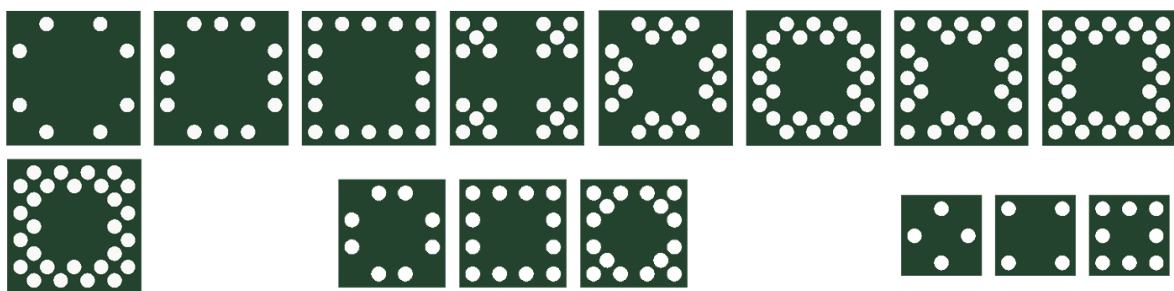
Obr. 4.5: Návrh digitálních materiálů samostatně schopných pohybu a spojovaných na magnetické bázi.

S touto myšlenou vznikla celá řada prototypů a variant, které byly testovány, a ze kterých nakonec vzešla současná podoba našich bitů. Kvůli požadavkům na umístění magnetů, blíže popsanych v kapitole 3.1, vzniklo hned několik alternativ rozmístění magnetů na několika různých velikostech destiček viz obr. 4.7. Horní řada na obrázku ukazuje destičky o velikosti 10×10 mm s různými počty magnetů rozmístěnými striktně syme-



Obr. 4.6: Složitější struktura složená z digitálních materiálů samostatně schopných pohybu a spojovaných na magnetické bázi.

tricky. Spodní řada obsahuje tři destičky o velikosti 8×8 mm, tři destičky o velikosti 6×6 mm, všechny opět se striktně symetricky rozmístěnými magnety a navíc ještě jednu destičku o velikosti 10×10 mm. Tato destička se však lehce liší od destiček v první řadě a to konkrétně v rozmístění magnetů. Sice i zde jsou magnety uspořádány na první pohled symetricky, ale pokud bychom do obrázku doplnili orientaci magnetů podle pravidel vylíčených v kapitole 3.1, zjistíme, že se symetrie ztrácí. Kvůli ztrátě symetrie není tento typ rozmístění magnetů vhodný, jelikož by zbytečně komplikoval proces výroby i následnou multifunkčnost výsledného bitu.



Obr. 4.7: Všechny zvažované velikosti destiček a varianty rozmístění magnetů na nich v konceptu bitů samostatně schopných pohybu a spojovaných na magnetické bázi.

Detaily ohledně výběru nejvhodnější varianty velikosti destičky, počtu a rozmístění magnetů, nebo tvaru vodivého plíšku následují v kapitole 5.1. Následující kapitola také blíže představuje dosud vytvořené verze bitů, včetně zhodnocení jejich funkčnosti.

5

Konstrukce digitálních materiálů v technologii výroby DPS

V kapitole 4.3 byl vysvětlen základní návrh digitálních materiálů pro technologii výroby DPS. Tento návrh byl testován a upravován tak, aby dosáhl co nejlepších vlastností pohybu a mechanického i elektrického spojování. Následující kapitola prezentuje postupné kroky při konstrukci, testování a následné úpravě právě tohoto návrhu.

5.1 Vývoj prototypů

5.1.1 Výroba nosných destiček a osazování magnetů

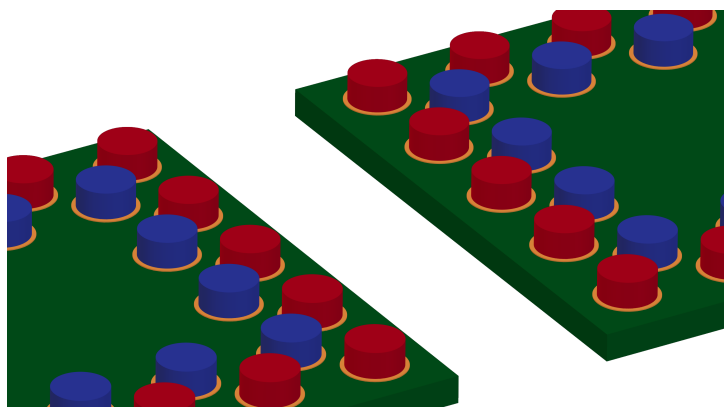


Obr. 5.1: Jeden z prvních zkonstruovaných prototypů konceptu magneticky spojovaných digitálních materiálů schopných samostatného pohybu. Velikost použitých destiček je 10×10 mm.

První prototypy byly vyrobeny z klasického materiálu pro výrobu DPS, a sice laminátu FR4. Stříhány byly na pákových nůžkách a otvory pro magnety byly zhotoveny pomocí

ručně ovládané frézy. Přesnost rozměrů destičky nebyla tak důležitá, jako přesnost otvorů pro magnety, kvůli charakteru magnetické platformy viz 3.1. Testovány byly hned dvě velikosti destiček, a to 8×8 mm a 10×10 mm. Varianta 6×6 mm nikdy nebyla testována z důvodu, že na takto malou destičku by nebylo možné umístit jiné, než pasivní součástky. Tloušťka testovaných prototypů 0,5 mm se ukázala mít ideální vlastnosti jak z hlediska robustnosti, tak z hlediska váhy, neboť váha ovlivňuje plynulost pohybu po magnetické platformě. Použité magnety s válcovým tvarem disponovaly rozměry 0,5 mm v poloměru a výškou 1 mm. Z toho vyplývá, že osazené magnety z destiček výrazně vyčnívají, což se ukázalo jako poměrně velký problém viz následující kapitola 5.1.2. Osazování válcových magnetů probíhalo pomocí většího magnetu, aby po čas osazování bylo možné kontrolovat polaritu osazovaných magnetů. Aby magnety pevně držely na svých místech, bylo použito lepidlo UNIVERSUM, které je schopné pevně spojit kovy i umělé hmoty a proto je ideální pro upevnění neodymových magnetů k destičkám FR4. Příklad osazené a zalepené destičky ukazuje obr. 5.1.

Všechny prototypy byly vrtány na maximální počet magnetů. To znamená v případě destiček s velikostí 10×10 mm, druhá řada úplně vpravo na obr. 4.7. A v případě destiček 8×8 mm zase třetí řada úplně vpravo na stejném obrázku. Následně byly destičky testovány s různým počtem osazených magnetů v různých uspořádáních. Testování odkrylo komplikaci, se kterou se v původním návrhu nepočítalo. Při osazení magnetů podle požadavků známých z kapitoly 3.1 dochází k odpuzování jednotlivých bitů od sebe. Tento fakt se snaží zachytit obrázek 5.2, kde jsou bity plně osazeny magnety.



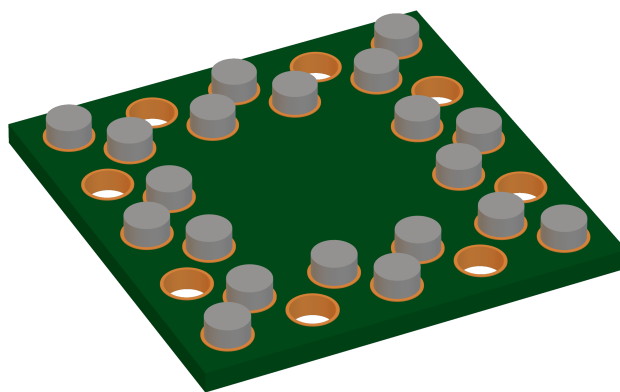
Obr. 5.2: Detail dvou bitů odpuzujících se kvůli vzájemnému působení magnetů. Červené magnety představují jednu polaritu, zatímco modré polaritu opačnou.

Magnety modré reprezentují jednu polaritu magnetů, zatímco magnety červené reprezentují polaritu opačnou. Obrázek záměrně opomíjí vodivý plíšek, aby bylo na magnety dobře vidět. Při působení magnetických polí dochází k odpuzování tak silnému, že jej není možné na magnetické platformě překonat a bity fyzicky složit. Osazení jednoho z těchto bitů magnety s přesně opačnou polaritou nebylo přípustné, jelikož výsledná deska by porušovala pravidla pro rozmístění magnetů a se složenou deskou by se tak nedalo po platformě pohybovat. Navíc by tak bity ztratily magnetickou homogenitu a při skládání

bitů by bylo nutné rozlišovat dva různé typy z hlediska umístění magnetů.

Prvním možným řešením problému s odpuzováním bylo oddálení magnetů od hrany bitu, resp. zvětšení hrany bitu tak, aby magnety dvou různých bitů měli mezi sebou více prostoru. Toto řešení ale buď zmenšuje prostor pro součástku, nebo zbytečně zvětšuje výslednou velikost obvodu. Dalším nedostatkem tohoto řešení je fakt, že není příliš efektivní. Ve chvíli, kdybychom odebrali všechny magnety označené červenou barvou v obrázku 5.2, odpuzování bitů by stále bylo tak silné, že bychom bity nebyli schopni na magnetické platformě spojit.

Výrazně lepší taktikou, jak odpuzování omezit, je alespoň částečné vyrovnaní počtu magnetů obou polarit na každé hraně bitu. To však musí být provedeno tak, aby byla stále dodržena pravidla pro polaritu magnetů. Na destičkách o velikosti 8×8 mm nelze vyrovnaní počtu magnetů dosáhnout a z toho důvodu byla tato velikost destiček zcela zavržena. U destiček 10×10 mm se povedlo zmírnit vliv odpuzování pomocí uspořádání magnetů viz obr. 5.3. Z hlediska odpuzování funguje toto rozložení magnetů skvěle, protože hrana disponuje třemi magnety v bezprostřední blízkosti hrany s jednou polaritou a čtyřmi magnety lehce vzdálenými od hrany s polaritou opačnou, tudíž jsou magnetická pole téměř vyrušena. Toto rozložení magnetů také vykazuje uspokojivé vlastnosti pohybu po platformě a navíc přidává pozitivní vlastnost v podobě přesnějšího spojení dvou bitů. Díky vynechaným magnetům je totiž vodivý plíšek jednoho bitu centrován přesně na střed bitu druhého, ke kterému se chce připojit. Centrování je ale podmíněno také tvarem vodivého plíšku, který také musel projít jistým vývojem. Bližší informace o tvaru vodivého plíšku jsou vylíčeny v následující kapitole.



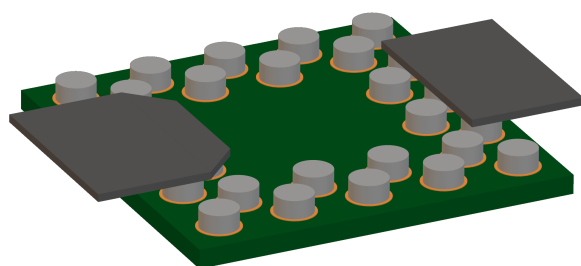
Obr. 5.3: Magnetický bit osazen ideálním rozmístěním magnetů v konceptu magnetických bitů schopných samostatného pohybu.

5.1.2 Vodivé magnetické plíšky

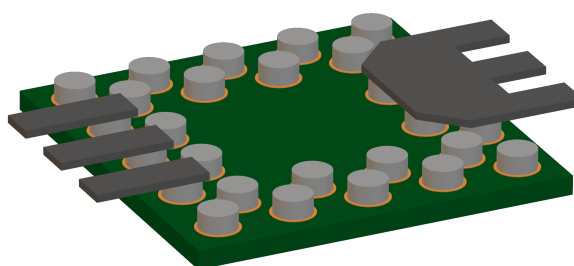
Klíčovou částí bitu jsou kovové plíšky spojující jednotlivé bity mezi sebou mechanicky i elektricky. Musí být vyrobeny z pevného feromagnetického materiálu se slušnými parametry elektrické vodivosti. Feromagnetismus je potřebný jak pro přesné přitažení dvou bitů k

sobě, tak i pro dostatečně pevné fyzické spojení několika bitů, neboť deska musí držet pohromadě. Elektrická vodivost je potom zřejmým požadavkem, protože právě skrze kovový plíšek je veden elektrický signál z jednoho bitu na druhý. Jako poměrně solidní materiál k těmto účelům se ukázal ocelový plech o tloušťce 0,2mm. Konkrétně se jednalo o kalenou pružinovou ocel z materiálu č. 1.1274. Zhotovené plíšky jsou k magnetům lepeny pomocí stejného lepidla, jako tomu bylo u lepení magnetů do destiček. Navíc však bylo použito ještě vodivé lepidlo XeredEx XD-120 pro zlepšení elektrických vlastností přechodu plíšku a magnetu, přes který je přenášen signál.

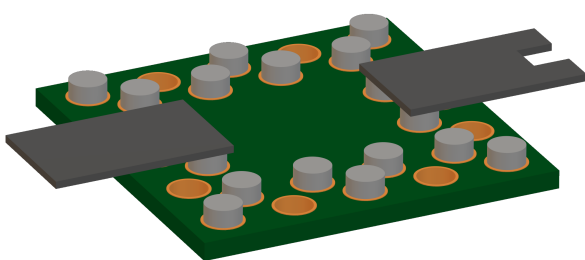
Jak již bylo několikrát zdůrazněno, pro pohyb magnetických těles po platformě je stěžejní dodržet určitá pravidla o rozložení magnetů (viz kapitola 3.1). Tato pravidla musí být dodržena i za předpokladu, že se jedná o dvě spojená tělesa dohromady. Přesnost spojení jednotlivých bitů tak hraje naprosto ústřední roli. Pokud se bity spojí s milimetrovou mezerou, dojde ke ztrátě schopnosti pohybu po platformě ve směru spojení. Navíc chyby spojení více bitů se sčítají a potenciálně tak při spojení několika bitů opět může dojít ke ztrátě schopnosti pohybu. Z toho důvodu musí mít plíšky velmi přesný tvar a musí být také velmi přesně lepené, aby po spojení nezůstala mezi bity právě ona nežádoucí mezera. Určitý vývoj tvaru plíšků zachycuje obrázek 5.4.



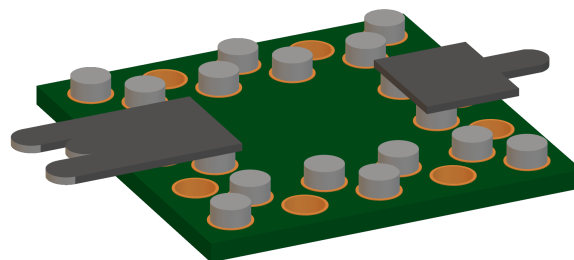
(a) Plíšky celistvé bez výřezů



(b) Plíšky s výřezy přesně na jednotlivé magnety



(c) Plíšky pro bity s ideálním osazením magnetů



(d) Plíšky ze zaoblením

Obr. 5.4: Magnetické bity osazené kovovými plíšky různých tvarů.

Na obrázku jsou k vidění čtyři bity osazené hned osmi různými typy kovových plíšků. Bit nahoře vlevo (a) ukazuje plíšky celistvé bez výřezů. Jednalo se o první prototypy plíšků, a ač je jejich výroba nejsnazší, zase zaostávají s výslednou přesností spojení jednotlivých bitů. Druhý bit nahoře vpravo (b) odhaluje typy plíšků, které vykazují výrazně

lepší vlastnosti ohledně přesnosti spojování bitů. Na levé straně bitu je osazena hned trojice menších plíšků, namísto jednoho většího plíšku přes celou hranu bitu. Každý plíšek je usazen pouze na jednom magnetu a nasměřovaný je tak, aby se spojil s protějším magnetem na druhém bitu. Díky tomu se bity spojí přesně, i pokud během spojování dojde k drobné nepřesnosti vzájemné polohy. K chybě potom může dojít jen za předpokladu, že vzájemná poloha bitů je větší než 1mm a v takovém případě se spojení sice provede špatně, ale nijak nezabrání v pohybu bitů po platformě, protože pravidla pro rozmístění magnetů nebudou porušena. V takové případě pak může dojít k následnému rozpojení bitů a opakovanému pokusu o spojení. Nevýhody využití tří menších plíšků spočívají ve složitosti osazení, jelikož je rázem potřeba osadit třikrát takové množství plíšků. Mimoto také výroba menších plíšků obnáší větší požadavky na výrobní proces. S jistou odpovědí na nevýhody tohoto typu plíšků přichází ten, který je vidět také na obrázku označeném písmenem (b), ale na protější pravé straně. Plíšek ve tvaru písmene E si totiž nechává všechny výhody tří oddělených plíšků, ale zároveň odstraňuje problém s náročností osazování a vykazuje větší robustnost spojení. Navíc zaručuje, že všechny tři plíšky budou vzájemně přesně rovnoběžné a tím pádem opět dojde k zpřesnění spojování jednotlivých bitů.

Jak bylo zmíněno v kapitole 5.1.1, ideální osazení magnetů značně zasáhlo do návrhu samotného kovového plíšku. Na zmiňovaném obrázku 5.4 horní dvojice ukazuje plíšky pro plně osazené bity, zatímco spodní dvojice ukazuje bity s ideálním rozložením magnetů. Je zřejmé, že plíšky z horní dvojice bitů nelze pro ideální rozložení bitů použít. Magnety, které byli v plně osazených bitech použity pro spojení, totiž osazený v ideálním rozložení nejsou a plíšky tak musí tvořit spojení mezi magnety jinými. Na obrázku (c) vlevo je opět plíšek celistvý bez výřezů, který trpí stejnými nevýhodami, jako plíšky na obrázku (a). Bit na obrázku (c) vpravo pro změnu uplatňuje výhody zmíněné u tvaru plíšků na obrázku (b). Poslední bit (d) vlevo obsahuje plíšek s tvarem ještě vylepšeným, jelikož plíšek je zaoblen přesně podle tvaru magnetů. Tím je maximalizována přesnost spojení a díky tomu také celkové elektrické i mechanické vlastnosti výsledné DPS. Bohužel jak testování ukázalo, i tento typ plíšku trpí určitými neduhy. Koncept plíšku byl navržen tak, aby spojení plíšku s druhým bitem proběhlo rovnou skrze trojici magnetů. Jedná se o magnet uprostřed hrany a dva prostřední magnety z řady magnetů vzdálenějších od hrany. Při testování spojení ale docházelo často k efektu, kde se levá, nebo pravá strana plíšku, určená pro zadní dvojici magnetů, přichytila hned na prostřední magnet u hrany. Spojení tak sice navázáno bylo, ale s příliš velkou mezerou mezi bity a ještě velmi křivé. Z těchto důvodů byl navržen poslední plíšek zobrazen na obrázku (d) vpravo. Už na první pohled je zřejmé, že tento typ plíšku nezajišťuje ani zdaleka tak robustní a pevné spojení, jako např. plíšky na bitu (b), ale na druhou stranu poskytuje největší přesnost spojení a také velmi malou mezeru mezi bity.

5.1.3 Vodivé cesty a elektronické součástky

Velice důležitá část návrhu spočívala také v nákresu všech možných vodivých cest na jednotlivých bitech a výběru vhodné velikosti a typu součástek. Velká rozmanitost součástek a vodivých cest na bitech je stěžejní pro sestavení libovolných elektrických obvodů z jednotlivých bitů.

Nejprve bylo potřeba určit počet vývodů každého bitu. Aby všechny bity byly vzájemně kompatibilní, je potřeba, aby všechny měly stejný počet vyvedených cest. Obrázek 5.4 (b) vlevo ukazuje variantu třech rozdělených kovových plíšků, která by teoreticky dovolovala vést až tři rozdílné signály z každé hrany bitu. Celkem by tak mohly bity disponovat až dvanácti vývody, což by dovolovalo osazení i součástek s větším počtem vývodů na jeden standartě velký bit. Naopak nevýhodou velkého počtu vývodů jednoho bitu je obrovské navýšení počtu typů bitů. Velký počet typů bitů komplikuje návrhový algoritmus, ale také zvyšuje nároky na počet vyrobených bitů. Aby celý systém digitálních materiálů v tomto odvětví fungoval, je zapotřebí, aby byla předem vyrobená celá řada bitů, s různými vodivými cestami a různými součástkami o rozmanitých hodnotách. Z toho vyplývá, že čím větší počet vývodů na jednotlivých bitech bude, tím větší bude počet typů bitů a tím větší počet bitů bude celkově nutné vyrobit a skladovat. Oproti tomu menší počet vývodů na jednotlivých bitech zase zvětšuje počet bitů potřebných k realizaci rozmanitých obvodů.

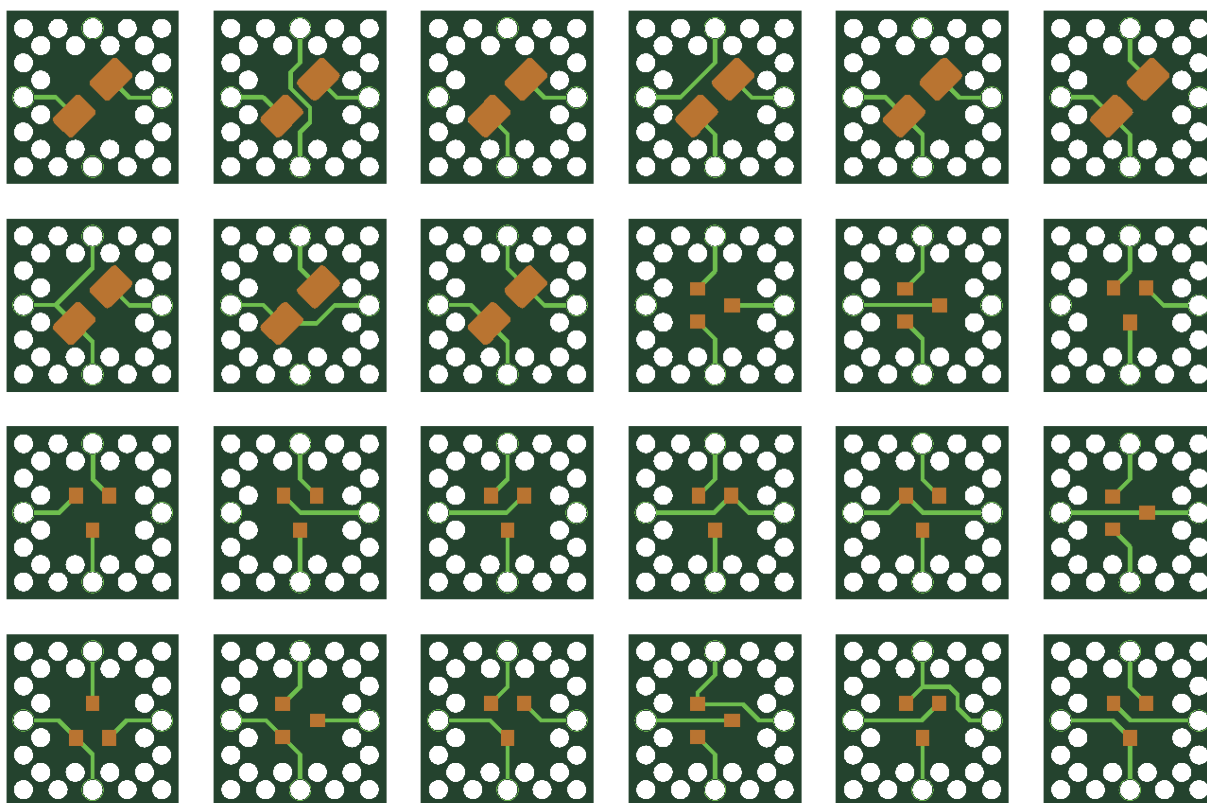
V souladu se základní myšlenkou digitálních materiálů jsme se rozhodli držet se menšího počtu typů elementárních stavebních bloků a tudíž nejmenšího možného počtu vývodů z každého bitu. Vzhledem k čtvercovému tvaru bitu byl tedy vybrán jeden vývod z každé hrany bitu. Je patrné, že při maximálně čtyřech vývodech z každého bitu nedává smysl umisťovat na bit součástku s více než čtyřmi vývody. Taková součástka potom musí být umístěná na speciální bit s větší velikostí než mají standardní bity. Velikost speciálních bitů může být pouze v násobcích velikosti standardního bitu. Např. je-li potřeba užití součástky s osmi vývody, je možné využít bit 20×20 mm, který už disponuje osmi vývody, namísto užití standardní velikosti bitu 10×10 mm.

Potom, co byla vyřešena otázka ohledně počtu vývodů, bylo zapotřebí vytvořit již kompletní návrhy všech typů bitů. Všechny varianty vodivých cest na bitech zachycuje obr. 5.5.

Samozřejmě všechny bity lze libovolně otáčet o násobky devadesáti stupňů. Vidíme zde devět typů vodivých cest pro součástky s dvěma pájecími ploškami. Jedná se o všechny možné varianty, které lze vytvořit v jedné vrstvě DPS. Pokud bychom pracovali s návrhem ve dvou vrstvách, mohla by být vytvořena ještě jedna varianta. Jedná se o variantu, kde dvě protější hrany bitu jsou připojeny k jedné pájecí plošce a zbylé dvě protější hrany jsou zase připojeny k pájecí plošce druhé. Tato varianta ale vytvořena nebyla, jelikož druhá vrstva bitů byla využita jinak. Bity byly vytvořeny ve dvou vrstvách, ale na každou vrstvu byla umístěna jiná varianta vodivých cest. Tato možnost byla použita, jelikož nebylo předem jisté, jaké množství, které varianty bude potřeba. Díky tomu byl k

dispozici dostatečný počet variant vodivých cest i přes vyrobení pouze malého testovacího množství destiček.

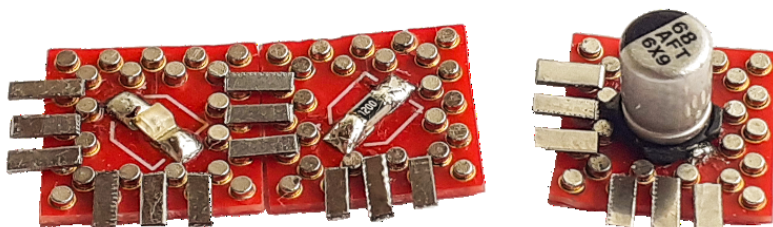
Z obrázku si lze také povšimnout, že bity navržené pro součástky s dvěma pájecími ploškami disponují právě pájecími ploškami poměrně velkými a navíc jsou natočené o 45° . To souvisí s výběrem součástek a multifunkčností destiček. Takto navržené destičky lze totiž osadit jak pasivními součástky v pouzdře typu 805, tak pouzdry elektrolytických kondenzátorů o průměru až 4 mm. Takoveto velikosti součástek byly vybrány z důvodu snadného ručního osazování. V případě potřeby lze používat i součástky výrazně menší. Natočení pájecích plošek o 45° je zde pouze pro maximální možné využití prostoru na každém bitu. Kromě zmíněných devíti typů vodivých cest pro součástky s dvěma pájecími ploškami je na obr. 5.5 hned 15 typů cest pro součástky se třemi pájecími ploškami. Zde se jedná o pájecí plošky navržené pro pouzdro SOT-23, které je určeno především k osazení tranzistorů. Podle očekávání i u bitů se součástkami se třemi pájecími ploškami byl navrhnout a vyroben maximální možný počet variant zapojení vodivých cest. Počet variant je u bitů se třemi pájecími ploškami samozřejmě vyšší, než u bitů s dvěma pájecími ploškami. Větší počet pájecích plošek totiž zajišťuje větší počet kombinací zapojení plošek k hranám bitů.



Obr. 5.5: Všechny navržené typy vodivých cest na magnetických bitech.

5.2 První verze plnohodnotných prototypů

Po rozsáhlém testování prototypů přišla na řadu výroba první plnohodnotné verze bitů. Výsledek výroby lze vidět na obrázku 5.6. Konkrétně obrázek obsahuje dva spojené bity se součástkami LED a rezistor, a vedle nich nepřípojený bit osazen elektrolytickým kondenzátorem.



Obr. 5.6: První vyrobená verze plnohodnotných bitů s rozměry destiček 10×10 mm.

Na první pohled je patrné, že bity nejsou osazeny ideálním počtem magnetů a ani nevyužívají ideální tvar kovových plíšků, tak jak bylo vylíčeno v kapitolách 5.1.1 a 5.1.2. Je to způsobeno tím, že v době výroby první verze bitů ještě nebyl k dispozici žádný dobře funkční systém na přesnou výrobu kovových plíšků. Kovové plíšky byly vyráběny na pákových nůžkách, dopadem čehož vznikalo jejich lehké zakřivení. Navíc na nůžkách nebylo možné vytvořit milimetrové výřezy v plíškách a nebylo tak možné použít jejich ideální tvar. S ideálním rozložením magnetů tak byl otestován pouze plíšek z obrázku 5.4 (c) vlevo. Tento plíšek však naprosto nevyužil potenciál ideálního rozložení magnetů, neboť se při spojení bitů uchytil pouze na magnet uprostřed hrany bitu a spojení tak vzniklo se značnou mezerou a velmi křehké. Z tohoto důvodu bylo pro první verzi bitů využito plné zaplnění bitu magnety a místo jednoho plíšku s výřezy byly osazeny tři menší celistvé plíšky. Tato verze tak ale posloužila spíše jako názorná ukázka efektu odpuzování bitů od sebe. Jejich spojení na magnetické platformě bylo prakticky nemožné. Jediný způsob jak ho docílit bylo zapření jednoho z bitů o pevný objekt na platformě.

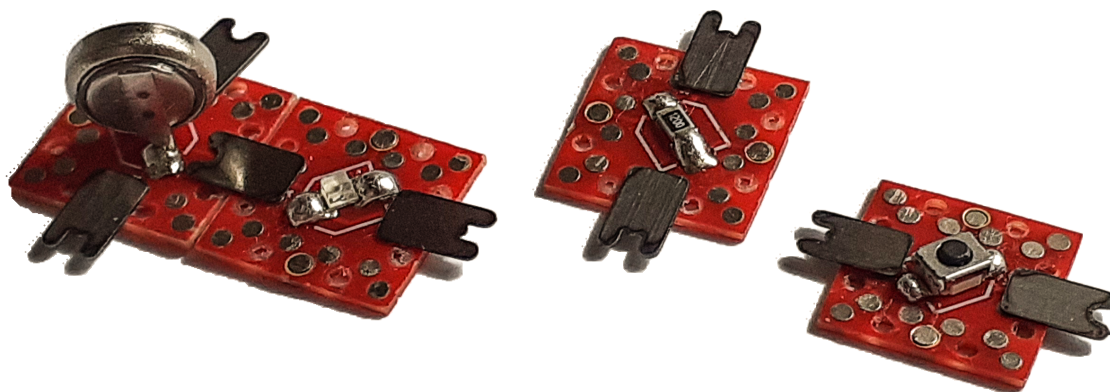
Kovové plíšky ale nebyli jedinou slabinou první verze bitů. Ukázalo se totiž, že zakoupené magnety s údajným průměrem 1 mm jsou vyrobeny velice nepřesně a jejich průměr je lehce větší. Následkem toho byly otvory pro magnety příliš těsné a při osazování bylo třeba magnety postupně zkoušet a hledat ty nejužší. I přes nalezení těch nejužších bylo stejně zapotřebí na magnety vyvinout značnou sílu, aby se do otvorů vešly. To však vedlo k velice častému mechanickému poškození samotných destiček. Vůbec největší požadavky na přesnost zakoupených magnetů byly na pozicích magnetů přes které je veden elektrický signál, protože násilné osazení magnetu jinak vedlo k odstranění pokovení otvoru a magnet tak nenavázal elektrické spojení s vodivou cestou. Ještě větší problémy v rozměrech magnetů však přinesla jejich rozdílná výška. Vlivem rozdílné výšky magnetů ve spolupráci s lehce zakřivenými kovovými plíškami, měly bity se spojováním velké problémy. Plíšky nebylo možné vycentrovat tak, aby byly umístěny rovnoběžně s destičkami a už

vůbec nebylo možné zajistit, aby všechny plíšky byly umístěny ve stejné výšce.

I přes všechny výše zmíněné problémy, jsme byli schopni, pomocí první verze bitů provést spojení čtyř destiček, a vytvořit tak náš první, magnetickou platformou sestavený, primitivní obvod z digitálních materiálů. Bohužel obvod nebyl funkční právě z důvodu, že osazování magnetů u některých z destiček poškodilo pokovení spojující magnet s vodivou cestou. Z chyb ale vzniklo ponaučení a začala se připravovat druhá verze bitů.

5.3 Druhá verze plnohodnotných prototypů

Duhou verzi bitů lze vidět na obrázku 5.7. Jedná se o čtyři bity se součástkami rezistoru, LED diody, tlačítka bez aretace a lithiového akumulátoru.



Obr. 5.7: Druhá vyrobená verze plnohodnotných bitů, také o rozměrech destiček 10×10 mm.

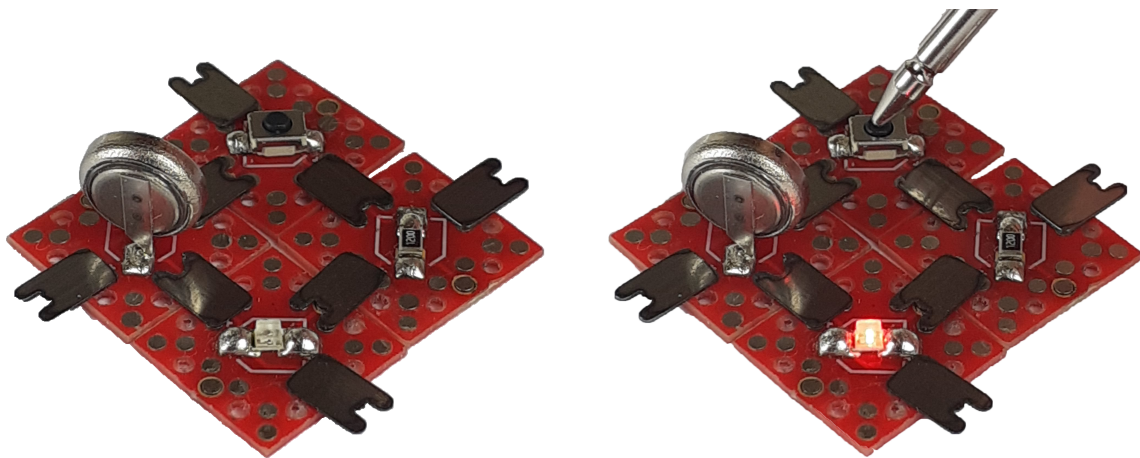
Na první pohled je patrné, že druhá verze bitů nese celou řadu změn. Velmi výrazná změna oproti první verzi je v rozměrech magnetů. Zatímco první verze disponovala magnety s rozměry 0,5 mm v poloměru a výškou 1 mm, tak druhá verze nese shodné průměry magnetů, ale jejich výška je pouze 0,5 mm. Magnety těchto rozměrů jsou vyráběny přesněji a tudíž jejich použití už samo o sobě zajišťuje lepší přesnost spojení bitů. Navíc jelikož i samotné destičky mají shodnou výšku 0,5 mm, tak destička společně s magnety tvoří celistvou rovinu a díky tomu jsou plíšky umístěny ve shodné výšce a to přesně rovnoběžně s rovinou bitu. Osazení magnetů je provedeno podle schématu ideálního rozložení (viz kap.5.1.1), díky čemuž dochází k minimálnímu odpuzování bitů od sebe. V otvorech pro magnety také zmizelo zbytečné pokovení vyjma otvorů umístěných uprostřed každé hrany, protože těmito otvory, potažmo magnety jsou vedeny elektrické signály. V neposlední řadě i vodivé plíšky prošly vývojem, konkrétně byly použity plíšky z obrázku 5.1.1 (d) vlevo a jejich výroba probíhala pomocí laseru, nikoliv pákových nůžek. Z toho důvodu jsou na hranách plíšků patrné stopy opálení.

Tato novější verze výrazně vylepšila téměř všechny vlastnosti bitů a rozhodně ji lze považovat za určitý krok vpřed. Především ideální rozložení magnetů ve spojení s použitím menší výšky magnetů vytvořilo skvělé vlastnosti pohybu a téměř odstranilo efekt

odpuzování bitů od sebe. I usazení všech kovových plíšků v konstantní výšce výrazně podpořilo celý proces spojování. Vodivé plíšky také nevykazují žádné prohnutí, či jiné deformace, neboť výroba plíšků laserem se v tomto směru ukázala být šetrnější. Opálení na plíškách je sice znatelné, ale nijak nezhoršuje jejich klíčové vlastnosti.

Jednoznačně největší slabinou této verze jsou ale opět kovové plíšky. Problém tkví v jejich tvaru. V kapitole 5.1.2 již byl vysvětlen problém tohoto konkrétního tvaru plíšku. Tyto plíšky byly tedy provizorně nahrazeny těmi z první verze bitů a veškeré testování probíhalo s nimi. Pro následující vývoj byli navrženy a v současné době jsou vyráběny vodivé plíšky viz obr. 5.4 (d) vpravo. Ve chvíli, kdy se podaří objevit ideální stavbu bitu, bude vhodné vytvořit raznici a ideální tvar plíšků vyrábět právě ražbou. Ta oproti laseru nebude opalovat hrany plíšků a navíc zaručí nezávislost na externí firmě, která výrobu zajišťuje nyní.

Nehledě na nedostatky, pomocí druhé verze prototypů jsme byli schopni vytvořit jednoduchý sériový elektrický obvod složený z rezistoru $120\ \Omega$, tlačítka bez aretace, LED diody a lithiového akumulátoru s napětím 3 V. Tento obvod je plně funkční a tlačítkem lze rozsvěcet LED diodu jak je z obrázků 5.8 patrné. Přechodový odpor přes magnety a kovový plíšek u žádného spoje nepřesáhl hodnoty $5\ \Omega$. U nejlepších spojení dosahoval dokonce hodnot menších než $1\ \Omega$. Z tohoto pohledu nabízí druhá verze prototypů skvělé elektrické vlastnosti.



(a) Rozepnutý obvod.

(b) Sepnutý obvod.

Obr. 5.8: Sériový obvod vytvořen z druhé verze plnohodnotných prototypů. Jedná se o bity se součástkami rezistoru, LED diody, tlačítka bez aretace a lithiového akumulátoru 3V.

6

Algoritmus pro návrh DPS v konceptu digitálních materiálů

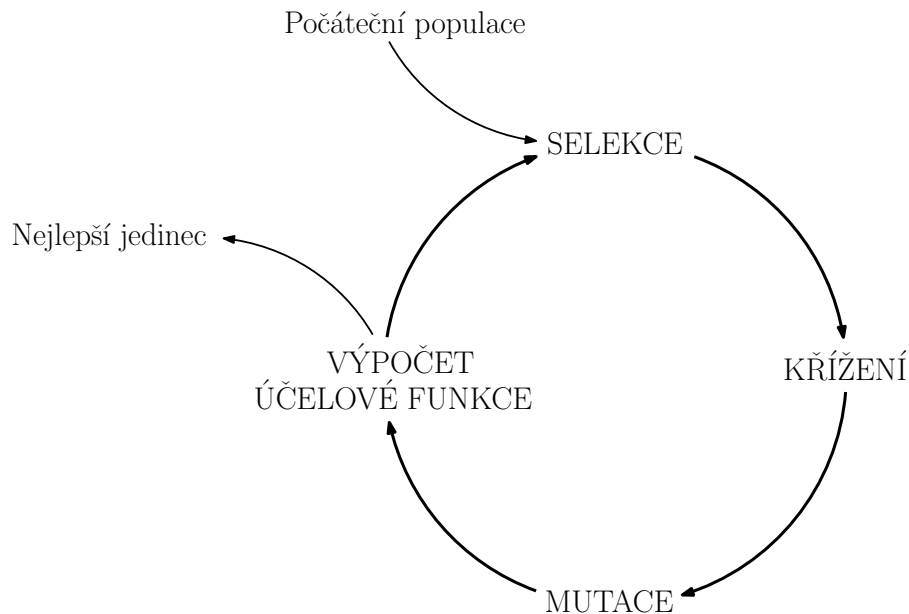
Koncept digitálních materiálů ve výrobě DPS by nedostal svému potenciálu, kdyby uživatel musel magnetické platformě předat přesné informace, jaké bity jakým způsobem složit, aby vytvořily požadovaný obvod. Z toho důvodu bylo nezbytné zhotovit algoritmus, jehož účelem je právě naplánování kompozice bitů. Na vstupu algoritmu se očekává netlist v určitém formátu, zadaný ručně, nebo importovaný z některého návrháře elektrických zapojení. Výroba DPS by díky tomu měla obnášet pouze zadání netlistu a o vše ostatní se postará navržený algoritmus ve spolupráci s magnetickou platformou.

Vytvoření funkce pro přímý návrh kompozice bitů není vůbec primitivní úlohou. V porovnání s tím je vytvoření účelové funkce genetického algoritmu pro tento účel mnohem snazší. Z toho důvodu bylo rozhodnuto že bude navržen právě genetický algoritmus. Následující kapitola seznamuje s principem genetického algoritmu obecně a následně prezentuje náš vytvořený algoritmus.

6.1 Genetický algoritmus

Genetický algoritmus je alternativní metoda k řešení optimalizačních problémů. Za optimalizační problém lze označit každou úlohu, kterou lze převést na hledání maxima účelové funkce. Hledání maxima potom probíhá pomocí změn vstupních parametrů této funkce. Algoritmus pracuje s množinou potencionálních řešení, kde jedno řešení se nazývá jedinec, a množina řešení je potom nazývána populace. Výpočet algoritmu probíhá v iteracích, kde každá iterace disponuje odlišnou populací. Každá iterace získá novou populaci použitím tzv. genetických operátorů na populaci předchozí. Genetické operátory existují hned tři a patří mezi ně selekce, křížení a mutace. Průběh algoritmu se snaží naznačit obrázek 6.1.

Je zde vidět počáteční populace vstupující do koloběhu, ve kterém jsou obsaženy všechny genetické operátory a také výpočet účelové funkce. Počáteční populace je vytvořena buď zcela náhodně, nebo alespoň s určitým prvkem náhodnosti. V každé populaci pak



Obr. 6.1: Orientační schéma genetického algoritmu.

jednotliví jedinci reprezentují konkrétní řešení daného problému. O tom jak moc kvalitní jedinec je, rozhoduje tzv. účelová funkce, často nazývaná také fitness funkce.

Po vstupu počáteční populace do algoritmu začíná cyklus genetickým operátorem selekce. Selekcce slouží k vybrání pouze kvalitních jedinců pro další výpočet. Existuje hned několik metod jak selekci provést. Tradičním představitelem je tzv. turnajová selekce, která je založená na náhodném vytvoření dvojic ze všech jedinců v populaci. Jeden z dvojice je poté vyřazen na základě hodnoty účelové funkce s přispěním většího, či menšího prvku náhodnosti. Kvalitnější jedinec má tedy menší šanci na vyřazení, ale i přes to může být vyřazen na úkor jedince méně kvalitního. Dalším způsobem jak aplikovat selekci v genetickém algoritmu je takzvaná vážená ruleta. Princip vychází ze známé hazardní hry, ale místo čísel jsou zde náhodně vybírány jedinci. Náhodnost je i zde omezená účelovou funkcí tak, aby méně kvalitní jedinci měli větší šanci na vyřazení, než jedinci kvalitnější. Aby vlivem náhodnosti v selekci nedocházelo k vyřazení nejkvalitnějších jedinců, může genetický algoritmus obsahovat systém elit. Mezi elity jsou zařazeny nejkvalitnější jedinci v populaci předtím, než započne selekce. Elity do selekce nijak nezasahují a rovnou se připojují k jedincům, jež v selekci uspěli.

Jedinci, kteří nebyli v selekci vyřazení pokračují do druhé fáze genetického algoritmu nazvané křížení. Zatímco cíl selekce je vyřazení některých jedinců, účel křížení je přesně opačný. Během křížení vznikají noví jedinci pomocí spojení genetických informací dvou náhodně vybraných jedinců. Jedince si lze představit jako digitální data v bitové podobě, tj. jedničky a nuly. Křížení potom probíhá tak, že nový jedinec dědí jednu polovinu bitů od prvního vybraného jedince a druhou polovinu od druhého vybraného jedince. Tento proces je opakován tolikrát, aby nových jedinců bylo stejné množství, jako bylo jedinců předchozí generace před selekcí. Tímto způsobem jsou vytvořeny jedinci nové populace a

stará populace může být zapomenuta.

Následujícím krokem je mutace. Mutace náhodně vybere několik jedinců, kterým změní několik bitů na náhodných pozicích. Díky tomu se algoritmus nikdy nezasekne v určitém lokálním extrému účelové funkce.

U všech genetických operátorů byl v určitém bodě použit prvek náhody. Tato náhoda může disponovat různou intenzitou na základě vstupních parametrů genetického algoritmu. Pro ideální odladění genetického algoritmu je zapotřebí nalézt vhodné hodnoty velikosti jedné populace, počtu jedinců označených za elitu, pravděpodobnost, že při selekci zvítězí kvalitnější jedinec, atd.

Jak bylo zmíněno výše, genetický algoritmus je jistá alternativa k řešení problémů vyjádřených účelovou funkcí. A právě výpočet účelové funkce přichází na řadu po provedení mutace. Pod pojmem účelová funkce, si lze představit výpočetní metodu vracející hodnotu s kvalitou jedince. Chceme-li tedy genetický algoritmus použít, musíme být schopni ohodnotit správnost jedince na základě jeho podoby, čili na základě genetické informace složené z jednotlivých bitů. Ne vždy je možné tuto funkci navrhnout, nebo funkce nemusí plně vystihovat účel úlohy. Svým způsobem se tak jedná o reverzní přístup k řešení úlohy, neboť místo vytvoření funkce, která dokáže řešení jednoduše vypočítat, je vytvořena funkce, která dokáže ohodnotit, jak moc je dané řešení kvalitní. Potom už záleží na konkrétní úloze, kterou z těchto dvou funkcí je výhodnější sestavit.

Po výpočtu účelové funkce může algoritmus skončit a vrátit nejlepší zjištěné řešení, nebo může provést další iteraci počínaje selekcí atd., a snažit se řešení ještě vylepšit. Zda dojde k ukončení, nebo další iteraci lze rozhodnout několika způsoby. Prvním je ukončení algoritmu po dosažení určité hodnoty účelové funkce. Tento způsob je vhodný pokud je nutné získat řešení s určitou přesností a příliš nezáleží na délce výpočtu. Druhý způsob ukončení genetického algoritmu může být po předem daném počtu iterací. Tento způsob je pro změnu vhodný v situaci, kde je nutné, aby se výpočet učinil v omezeném čase a na dosaženou hodnotu účelové funkce není kladen takový důraz. Určitým kompromisem mezi těmito způsoby může být ukončení algoritmu ve chvíli, kdy účelová funkce delší dobu nenavysňuje svoji hodnotu. Tento způsob je však náchylný na ukončení po zaseknutí účelové funkce v lokálním extrému.

6.2 Algoritmus pro návrh kompozice bitů

Převedení netlistu na obvod složený z našich digitálních materiálů není typický optimační problém. Primárním cílem algoritmu je totiž seskládání funkčního obvodu a až následujícím sekundárním cílem může být jistá optimalizace velikosti výsledného řešení. I přes to lze úlohu upravit tak, aby ji bylo možné počítat genetickým algoritmem.

Algoritmus byl napsán v prostředí Matlab, protože tento skriptovací jazyk nabízí skvělé prostředí pro výpočty tohoto typu. Navíc ve stejném prostředí je napsána i aplikace pro ovládání magnetické platformy viz kapitola 7.1 a tím pádem následná implementace al-

goritmu pro návrh kompozice bitů do této aplikace byla jednodušší.

6.2.1 Reprezentace bitů v programu

Jelikož bit je poměrně komplexní objekt, který musí obsahovat informaci o součástce, vodivých cestách a pozici v obvodu, byla vytvořena rovnou celá třída reprezentující právě jeden bit. Třída nese nepřekvapivý název *bit* a obsahuje následující vlastnosti:

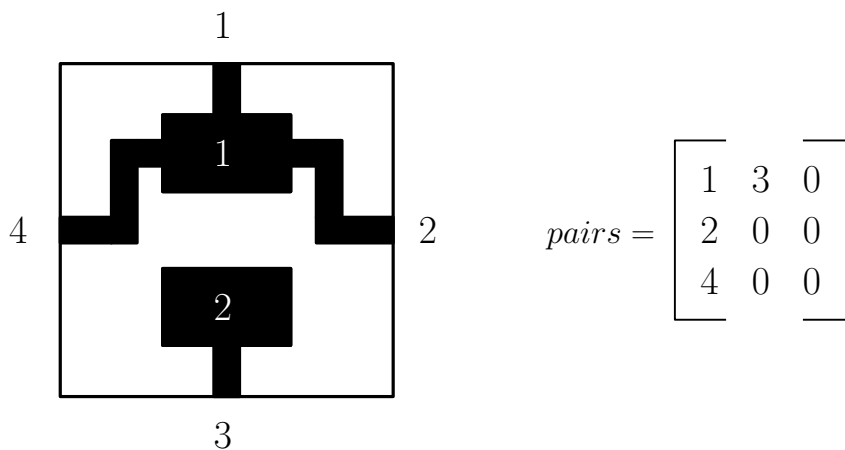
- *component*: Celočíslná proměnná obsahující ID součástky.
- *pads*: Celočíslná proměnná vyjadřující počet pájecích plošek na součástce.
- *pairs*: Matice celých čísel ukazující vodivé spojení součástky s hranami bitu.
- *beyond_component*: Booleovská proměnná určující výskyt cesty mimo součástku.
- *pX*: Celočíslná proměnná s hodnotou pozice bitu ve složené DPS v ose x .
- *pY*: Celočíslná proměnná s hodnotou pozice bitu ve složené DPS v ose y .

Celý algoritmus je zcela oproštěn od elektronického významu součástek. Třída *bit* rozlišuje pouze dva druhy součástek, kterými jsou součástky s dvěma a se třemi pájecími ploškami. Po zadání vstupu v podobě netlistu je uložena tabulka součástek, jejich hodnot a k nim přiřazené unikátní ID. Algoritmus celý výpočet využívá pouze hodnotu ID a poté co je výpočet u konce, dosadí za ID zpět skutečné součástky s jejich hodnotami. Pokud se na bitu nenachází žádná součástka a bit tak slouží pouze jako vodič, je hodnota ID tohoto bitu nula. Nula je tak jediná hodnota ID, které se může opakovat. Všechny ostatní hodnoty ID musí být větší než jedna a jejich počet tak odpovídá počtu součástek v obvodu. Tímto oproštěním od elektrické povahy součástek se celý algoritmus zrychluje.

Vlastnost *pads* algoritmu jednoduše říká, kolik pájecích plošek součástka má a podle toho algoritmus s bitem pracuje. Větší složitost přináší vlastnost *pairs*. Jedná se o celočíselnou matici s rozměry 3×3 , která vyjadřuje vodivé cesty na bitu. Vodivé cesty nemusí propojovat jen jednu hranu bitu s jednou pájecí ploškou, ale klidně několik hran bitu k jedné pájecí plošce. Každý sloupec v matici odpovídá jedné pájecí plošce součástky. Ve sloupci se potom mohou nacházet hodnoty od jedné do čtyř. Hodnoty se v matici nesmí opakovat, protože každá ze čtyř hodnot odpovídá jedné ze čtyř hran bitu. To se snaží zachytit obr. 6.2.

Na obrázku vlevo je symbolicky znázorněn bit se dvěma pájecími ploškami. Plošky jsou označené číslicemi jedna a dvě. Označené jsou taky všechny hrany bitu číslicemi od jedné do čtyř. Naznačené vodivé cesty spojují první plošku s hranami 1,2 a 4. Druhá ploška je připojena k hraně tři. Matice *pairs* má potom podobu jako na vzpomínaném obrázku 6.2 vpravo. První sloupec odpovídající první plošce obsahuje čísla vyjadřující příslušné hrany bitu (1,2,4). Druhý sloupec obsahuje pouze číslo tři a zbytek matice je vyplněn nulami. Třetí sloupec v tomto případě ani nemůže obsahovat žádné číslo odpovídající kterékoliv

hraně, neboť součástka na bitu disponuje pouze dvěma pájecími ploškami. Samozřejmě ne všechny hrany musí být v matici nutně obsaženy. Např. pokud bychom v matici na obrázku nahradili číslice čtyři a dva nulami, dostali bychom pouze vodivé cesty propojující horní hranu se spodní skrze součástku. Matice ale vždy musí obsahovat alespoň jednu hranu přiřazenou ke každé pájecí plošce. Nikdy nemůže nastat situace, že by součástka nebyla plně zapojena v rámci bitu. Takto sestrojená matice je potom schopná jednoznačně vyjádřit veškeré vodivé cesty propojující součástku a hrany bitu.



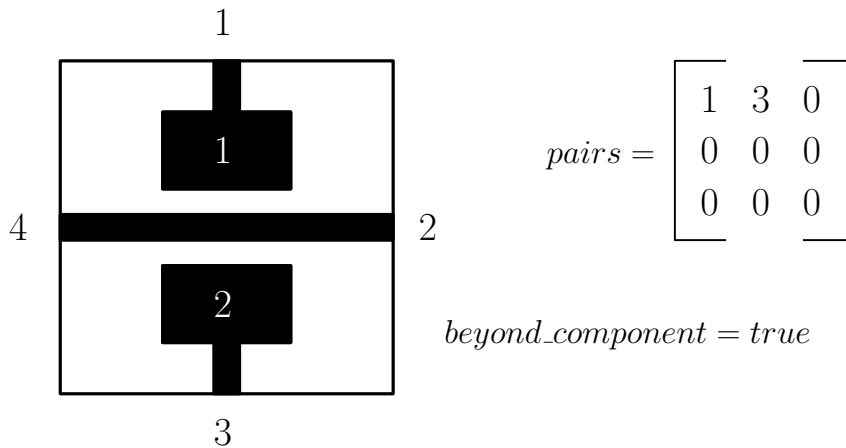
Obr. 6.2: Příklad matice *pairs* (vpravo) pro uvedené vodivé cesty na bitu (vlevo).

Kromě cest propojujících pájecí plošky s některou z hran bitu, mohou být na bitu také cesty mimo součástku. Tyto cesty mohou být pouze na bitech se součástkami o dvou pájecích ploškách, protože vodivé cesty na bitu nikdy nesmějí být slepé. Pokud má tedy bit pouze dvě pájecí plošky a zároveň pouze dvě uvedené hrany v matici *pairs*, může také disponovat vodivou cestou propojující zbylé dvě hrany bitu. Příklad takových bitů zobrazuje obrázek 6.3. Vlastnost *beyond_component* má hodnotu *true*, pokud se na bitu cesta mimo součástku nachází, v opačném případě nese hodnotu *false*. Zbylé dvě vlastnosti jsou velmi jednoduché, vyjadřují totiž pozici bitu ve složené DPS. Hodnoty nabývají pouze kladných celých čísel a počáteční pozice $x = 1$, $y = 1$ se nachází vlevo nahoře. Hodnota x definuje řadu, hodnota y zase sloupec.

Třída *bit* neobsahuje pouze vlastnosti definující bit, ale také konstruktor a dvě statické metody. Konstruktor je velice jednoduchý a obsahuje vstupní argumenty v podobě všech vlastností a vstupy jednoduše k vlastnostem přiřadí. Zajímavější je ale dvojice statických metod:

- *New_Random_Bit*: Statická metoda pro vytvoření náhodného bitu.
- *New_Random_Board*: Statická metoda pro vytvoření celé náhodné desky z bitů.

Statická metoda *New_Random_Bit* jednoduše vytvoří náhodný bit. Vstupními argumenty jsou ID součástky, počet pájecích plošek a pozice ve výsledné desce. Metoda vrátí objekt typu *bit* s požadovaným ID součástky, pozicí v desce a počtem pájecích plošek, ale



Obr. 6.3: Příklad matice *pairs* a vlastnosti *beyond_component* (vpravo) pro uvedené vodivé cesty na bitu (vlevo).

také s náhodně rozloženými vodivými cestami na bit, tj. matice *pairs*. Tato metoda je primárně volána především ve druhé statické metodě s názvem *New_Random_Board*. Jejím účelem je vytvoření celé náhodné desky, jak je z názvu patrné. Vstupem metody je požadovaný rozměr desky a požadovaný netlist. Netlist je nutný, aby algoritmus znal počet a typ jednotlivých součástek. Následuje potom vytvoření náhodných bitů a jejich umístění do desky. Nedostatkem algoritmu je, že nedokáže dynamicky měnit rozměr desky, ten musí být předem daný a s takovým rozměrem algoritmus pracuje celý výpočet. Výstupem metody *New_Random_Board* je potom pole obsahující všechny bity na desce. Metoda tedy zaručuje, že deska bude sice náhodně vytvořena, ale zároveň bude obsahovat pouze požadované součástky správného typu a zbytek bitů zaplní zkratované bity v rolích pouhých vodičů (bity s ID = 0).

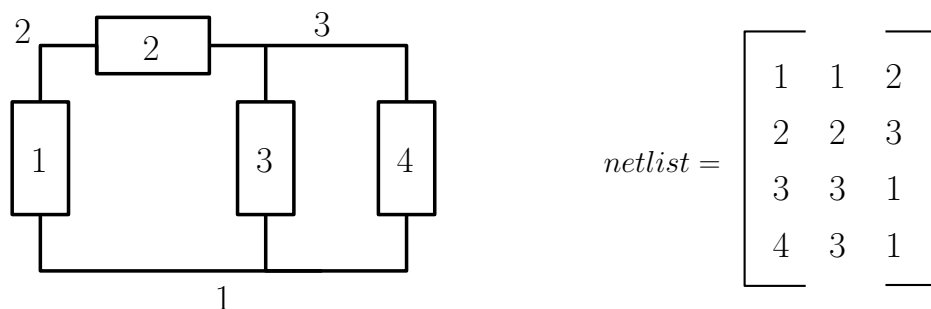
6.2.2 Objektová struktura programu

Jak vyplývá z předchozí podkapitoly, algoritmus nese prvky objektového programování. Jednotlivé bity jsou definovány třídou *bit*, jednotliví jedinci zase třídou *individual*. Třída *individual* disponuje hned pěti vlastnostmi:

- *board*: Pole typu *bit* obsahující všechny bity na desce.
- *circuit_size*: Dvouprvkový vektor celých čísel určující velikost desky (v ose *x* a *y*).
- *netlist*: Matice celých čísel ve tvaru současného netlistu.
- *request*: Matice celých čísel ve tvaru požadovaného netlistu.
- *quality*: Desetinné číslo v rozsahu 0 až 1 vyjadřující kvalitu jedince.

Ve vlastnosti *board* se neskrývá nic jiného, než pole obsahující všechny bity v totožném formátu, jak jej vrací metoda *New_Random_Board* v třídě *bit*. Vlastnost *circuit_size* je

dvouprvkový vektor celých čísel s rozměrem desky. Na první pozici ve vektoru je rozměr v ose x , na druhé zase rozměr v ose y . Následuje vlastnost *quality*, která obsahuje desetinné číslo v rozsahu 0 až 1 a vyjadřuje kvalitu obvodu. Kvalita obvodu je číselné vyjádření toho, jak moc je současný obvod podobný požadovanému. O výpočet kvality se stará účelová funkce blíže popsaná v podkapitole 6.2.7. Poslední dvojice vlastností nese názvy *netlist* a *request*, kde obě obsahují netlist v určitém formátu. Zatímco *netlist* obsahuje současný netlist desky, vlastnost *request* reprezentuje netlist s požadovaným obvodem. Formát netlistu lze vidět na obr. 6.4.



Obr. 6.4: Příklad netlistu ve formátu algoritmu (vpravo) pro ukázkový obvod (vlevo).

Vidíme, že součástky jsou označeny pomocí ID a jejich elektrický charakter je ignorován. Číslicemi jsou na obrázku také označeny uzly, neboli propoje mezi součástkami. Obvod představuje dvě paralelní součástky 3 a 4 zapojené do série se součástkami 1 a 2. ID součástek je v netlistu zobrazeno vždy v prvním sloupci, z čehož plyne, že hodnoty v prvním sloupci musí být vždy unikátní. Následné dva sloupce reprezentují uzly, kterými jsou součástky propojeny. Z prvního řádku lze tedy vyčíst informaci, že součástka jedna je umístěna mezi uzly jedna a dva, atd. Pokud součástky disponují třemi pájecími ploškami, netlist je jednoduše rozšířen o další sloupec.

Stejně jako třída *bit*, tak i třída *individual* obsahuje konstruktor a několik metod. Konstruktor zde není tak jednoduchý, neboť kromě jednoduchého přiřazení požadovaného netlistu, a požadované velikosti desky ze vstupních argumentů, musí zbytek vlastností dopočítat. Vlastnost *board* je zaplněna použitím statické metody *New_Random_Board* ze třídy *bit* (viz 6.2.1). Pro výpočet netlistu ze současné podoby desky je použita metoda *Board_To_Netlist*. Kvůli složitosti metody je jí věnována celá podkapitola viz 6.2.3. Nakonec je v konstruktoru přiřazena hodnota kvality do vlastnosti *quality*, vypočtena účelovou funkcí (viz 6.2.7). Ve třídě tedy kromě konstruktoru vystupují ještě tři statické metody:

- *Recalculate*: Metoda pro vyvolání přepočtu netlistu a kvality.
- *Get_Quality*: Statická metoda pro výpočet kvality.
- *Board_To_Netlist*: Statická metoda pro výpočet netlistu.

Jak již bylo zmíněno statické metody *Board_To_Netlist* a *Get_Quality* jsou blíže vysvětleny v podkapitolách 6.2.3 resp. 6.2.7. Poslední metoda ve třídě *individual* s názvem

Recalculate slouží pouze k přepočtu netlistu a kvality na základě nově vytvořené desky. Metoda tedy pouze přiřadí vlastnostem *netlist* a *quality* hodnotu zavoláním statických metod *Board_To_Netlist* a *Get_Quality*.

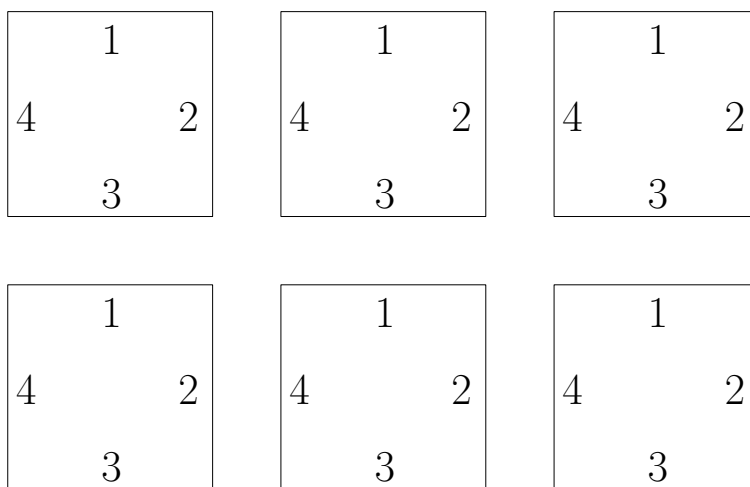
6.2.3 Algoritmus pro výpočet netlistu

První složitější výzvou v algoritmu bylo vytvoření metody pro výpočet netlistu z dané skladby bitů. Tento účel plní statická metoda nazvaná intuitivně *Board_To_Netlist*. Vstupním argumentem metody jsou velikost desky a samozřejmě pole s obsahem všech bitů na desce. Obrázky 6.5 zachycují počáteční proces při výpočtu netlistu. Jak je popsáno v podkapitole 6.2.1, každý bit obsahuje vlastnost *pairs*, která jasně určuje, mezi kterými hranami bitu je součástka propojena. Zanedbáme-li pro přehlednost vodivé cesty i součástky na bitech, můžeme si situaci představit jako na zmíněném obrázku (a). Máme zde šest bitů, jež budeme chtít seskládat v desku a vypočítat její netlist. Vidíme že všechny bity mají označeny hrany číslicemi jedna až čtyři přesně tak, jak tomu je u vlastnosti *pairs* viz obr. 6.2. Ve chvíli kdybychom bity spojili v desku, označení hran by ztratilo jedinečnost, tudíž musí být k hranám bitů přiřčeny určité hodnoty, aby se žádná hodnota hrany neopakovala. Výpočet nových hodnot hran je vyjádřen vzorečkem 6.1, kde H_n je nová hodnota hrany, H_p je původní hodnota hrany a P_b je pořadové číslo bitu.

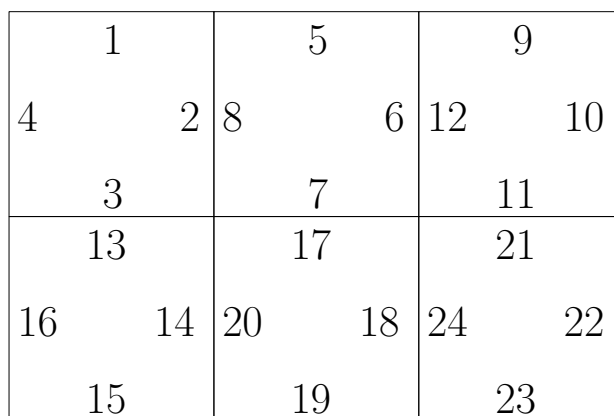
$$H_n = H_p + (4 \times P_b) \quad (6.1)$$

Stav po přepočítání hodnot hran ukazuje obrázek 6.5 (b). V této chvíli můžeme vytvořit základní tvar netlistu, který bude následně výrazně upravován. Tento první nástřel je zhotoven tak, že je vytvořena matice $n \times 4$, kde n odpovídá celkovému počtu součástek. Do prvního sloupce jsou vloženy ID součástky a do zbylých tří sloupců je uvedena dvojice, resp. trojice hran, mezi nimiž je součástka zapojena. Samozřejmě o dvojici hran se jedná u bitů se součástkami se dvěma pájecími ploškami a trojici hran zase u bitů se součástkami se třemi pájecími ploškami. Tyto dvojice, resp. trojice přesně odpovídají první řádce ve vlastnosti *pairs* každého bitu, pouze s úpravou viz vzoreček 6.1. Počet hran, ke kterým je součástka připojena ale může být větší než dvě (zbylé řádky vlastnosti *pairs*). Pro takový případ je vytvořena druhá matice, do které jsou ukládány všechny sloupce z vlastnosti *pairs*, pouze transponované. V kapitole 6.2.1 bylo vysvětleno, že hrany uvedené ve vlastnosti *pairs* v jednom sloupci odpovídají hranám spojeným k jedné pájecí plošce. Tím pádem se jedná o hrany vzájemně zkratované, a proto by měly mít z pohledu netlistu stejné označení (jedná se o jeden uzel). To znamená, že tato druhá matice obsahuje v prvním sloupci hodnotu hrany, která se nutně musí objevovat také v nástřelu netlistu, a v následujících sloupcích případné hrany, které jsou s hranou v prvním sloupci vodivě propojeny. Příklad takové matice ukazuje obrázek 6.6 vpravo, kde je vidět taky název matice, a sice *same*.

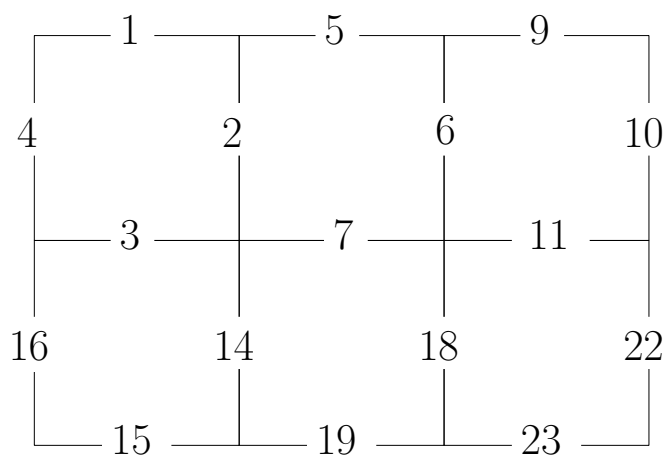
Díky předchozí úpravě podle vzorečku 6.1 byla zaručena jedinečnost každé hrany, ale nyní naopak některé hrany disponují rovnou dvojím označením. V příkladu na obrázku



(a)



(b)



(c)

Obr. 6.5: Grafické znázornění výpočtu netlistu ze skladby bitů.

6.5 (b) jsou to např. hrany 3 a 13, nebo 6 a 12 atd. Jednoduše jedna a ta samá hrana je označena dvěma různými číslicemi. Abychom hraně určili pouze jedno jediné označení, odečteme u daných hran určité hodnoty. Sousedí-li bit po levé straně s dalším bitem, je od jeho hodnoty levé hrany odečtena hodnota 6. Díky tomu je hodnota stejná, jako u totožné hrany právě sousedního bitu. Fakt, že hodnota je právě 6, souvisí se zvoleným označením hran jednoho bitu. Ve vzpomínaném obrázku 6.5 (b) se lze přesvědčit, že rozdíl mezi označením těchto hran skutečně vždy odpovídá hodně 6. Např. $8-2=6$, nebo $24-18=6$, atd. Tímto způsobem byly sjednoceny hodnoty hran ve všech řadách desky. Abychom mohli stejnou úpravu provést i ve sloupcích, musíme hodnotu pro odečtení vypočítat vzorečkem 6.2. Zatímco hodnota rozdílu dvou sousedících bitů v řadě je stabilně 6, hodnota ve sloupcích je závislá na počtu bitů v řadě. Proto hodnotu, kterou je potřeba odečítat, lze vypočítat z uvedeného vzorce.

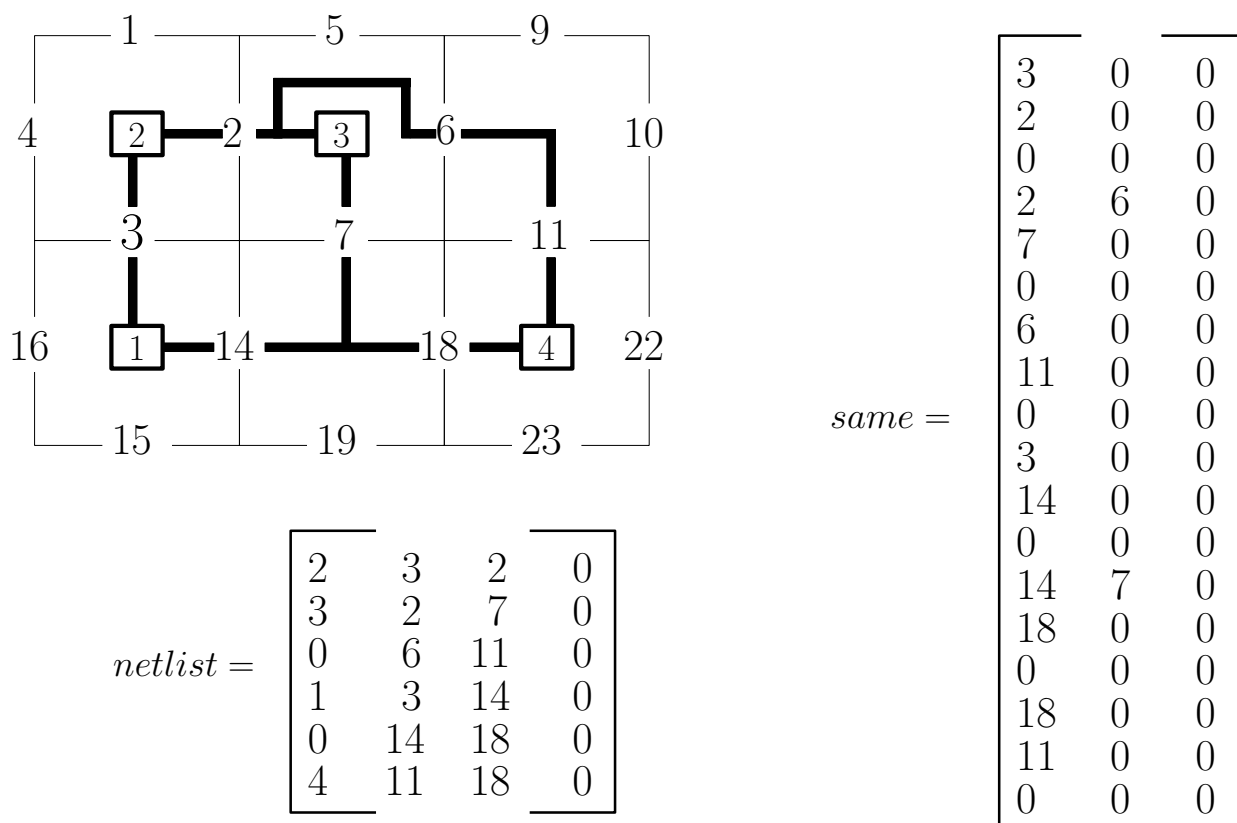
$$Ho = 6 + (4 \times (Sd - 2)) \quad (6.2)$$

Ve vzorci Sd odpovídá počtu bitů v jedné řadě a Ho hodnotě, kterou musím odečíst od horní hrany bitů, které z horní strany sousedí s dalším bitem. Pro názornost lze opět aplikovat postup na příklad z obrázku 6.5. Jedna řada obsahuje tři bity. Po dosazení čísla 3 za Sd získáme výraz: $6 + (4 \times (3 - 2)) = 6 + 4 = 10$. Opět se můžeme přesvědčit na zmíněném obrázku, že rozdíl mezi hranami sousedících ve sloupcích je skutečně 10. Např. $13-3=10$, nebo $21-11=10$, atd. Výsledné znázornění popisu hran po úpravách zobrazuje obr. 6.5 (c). Každá hrana má svou unikátní hodnotu a zároveň žádná hrana nedisponuje dvěma hodnotami.

Vraťme se k příkladu z obrázku 6.4. Stejný obvod složený z bitů by mohl vypadat např. jako na obrázku 6.6 vlevo nahoře. Obvod je zasazen do mřížky s popisem hran odpovídajícím úpravám z obrázku 6.5 (c). Netlist získaný z tohoto obvodu výše popsáním způsobem je vidět na obrázku 6.6 vlevo dole. Lze vidět že první nástřel netlistu v tomto stavu naprosto neodpovídá skutečnému netlistu z obrázku 6.4. Proto je potřeba dalších dodatečných úprav.

První z nich musí být sjednocení hodnot hran, které jsou vzájemně zkratovány. Pro tento účel je využita dříve vzpomínaná matice, do které byly ukládány všechny sloupce z vlastnosti *pairs* v transponované podobě. Tato matice je zobrazena na obrázku 6.6 vpravo a nese název *same*. Díky způsobu získání této matice každý řádek obsahuje hodnoty hran, které jsou zkratované. Např. řádek $[2 \ 6 \ 0]$, ukazuje, že hrana dva a šest odpovídají stejnému uzlu (jsou zkratovány) a toto propojení je viditelné také na obrázku 6.6 na druhém bitu v první řadě. Samozřejmě většina matice je vyplněna nulami, protože drtivá většina bitů žádné hrany nezkratuje. Také si lze povšimnout, že každá třetí řádka je naprosto celá vyplněna nulami, stejně jako celý poslední sloupec v matici netlistu. Příčinou toho je, že na desce není ani jedna součástka se třemi pájecími ploškami.

Další zkratované hrany jsou vytvářeny součástkami s ID nula. Proto je matice *same* doplněna o řádky netlistu začínající nulou. Aby rozměry matice seděly, je z řádku vynechána počáteční nula reprezentující ID součástky. V příkladu na obrázku to znamená, že



Obr. 6.6: Příklad pro výpočet netlistu ze zadané skladby bitů

matice *same* by se rozrostla o řádky $[6 \ 11 \ 0]$ a $[14 \ 18 \ 0]$. Stejně řádky jsou pro změnu z matice *netlist* odstraněny, protože netlist musí obsahovat pouze skutečné elektronické součástky.

Informace z matice *same* jsou potom aplikovány na netlist tak, že čísla z jednotlivých řádek matice *same* jsou sjednocena pouze na jednu cifru v netlistu. V našem příkladu na obrázku se v netlistu nahradí pouze čtveřice čísel. Např. číslice 6 je v netlistu nahrazena číslicí 2 atd. Po takové úpravě je netlist prakticky hotový. Jediné, v čem se nyní netlist liší od netlistu uvedeného v obrázku 6.4, je hodnota jednotlivých uzlů. V netlistu nezáleží na číselné hodnotě uzlů, ale pouze na tom, zda jsou součástky mezi uzly zapojeny požadovaným způsobem. To znamená, že pokud jsou součástky propojeny skrze uzel 2, nebo uzel 14 nehraje roli, ale musí být u obou těchto součástek číslo stejné a nesmí se opakovat jinde v netlistu. I přesto je netlist upraven, aby obsahoval uzly číslované od jedné do celkového počtu uzlů. Nakonec je netlist seřazen podle ID součástek tak, aby první řádek odpovídal součástce s ID jedna, druhý řádek součástce s ID dva atd.

Metoda pro získání netlistu z vytvořeného obvodu je naprosto klíčová pro fungování celého algoritmu. Její optimalizace je velmi žádoucí, protože z celkové doby výpočtu, je většina času spotřebována právě na výpočet netlistů. To je z důvodu, že metoda musí být zavolána pokaždé, kdy jedinec prodělá jakoukoliv změnu kompozice bitů (mutace, křížení).

6.2.4 Selekcce a elity

V kapitole 6.2.2 byl naznačený proces vytvoření náhodné populace, v kapitole 6.2.3 potom výpočet netlistu na základě vytvořených desek, neboli jedinců. Na řadu tedy přichází první genetický operátor a tím je selekcce. Pro účely tohoto algoritmu byl vybrán jeden z klasických způsobů a to turnajová selekcce. Ještě před selekcí jsou z populace vyjmuty elity. Jejich počet závisí na zadaném vstupním argumentu algoritmu. Zbytek populace vytvoří náhodné dvojice, ze kterých je jeden jedinec vyřazen a druhý se přidává k elitám. Pravděpodobnost, že vyhraje jedinec s vyšší hodnotou účelové funkce (kvalitou) je zase dána vstupním argumentem. Elity společně s vítězi turnajové selekcce pokračují algoritmem ke křížení.

6.2.5 Křížení

Křížení představuje druhý genetický operátor, který na rozdíl od selekcce populaci neeliminuje, ale naopak vytváří populaci novou. V křížení jsou vždy zcela náhodně vybráni dva jedinci z předchozí populace složené z elit a vítězů z turnajové selekcce. Z vybraných jedinců poté vzniká nový jedinec. Vznik nového jedince může nastat hned dvěma způsoby. První způsob vezme jednoho z jedinců a u 50% jeho bitů změní vodivé cesty podle vzoru jedince druhého. Druhým způsobem je přehození pozic součástek. Poloha 50% součástek bitů jednoho jedince je změněna na rozložení součástek jedince druhého. Při tomto procesu ale musí být kontrolováno, aby nedošlo ke zdvojení jedné součástky, nebo naopak ke ztrátě součástky. I přes nutnost náhodného křížení totiž stále musí být zachován počet součástek na desce s jedinečnými ID. O tom, který ze způsobů křížení nastane, rozhoduje opět náhodný faktor. Křížení má přesně 50% šanci na prohození pozic součástek a 50% šanci na prohození vodivých cest na bitech.

6.2.6 Mutace

Nová populace vzešlá z křížení následně postupuje k poslednímu genetickému operátoru v algoritmu. Tím je mutace a její funkce je velice jednoduchá. Nehledě na kvalitu jedinců prostě náhodně vybere určité množství z nich a buď jim náhodně změní vodivé cesty na několika bitech, nebo prohodí pozici dvou celých bitů. Procento jedinců, kteří projdou mutací je závislé na vstupním argumentu funkce. O tom, zda nastane prohození bitů, nebo změna vodivých cest rozhoduje opět náhodný prvek nastavený přesně na 50%.

6.2.7 Účelová funkce

Na začátku této kapitoly bylo řečeno, že problém, který jsme se rozhodli pomocí algoritmu řešit, není typickou optimalizační úlohou. Je to z důvodu, že účelová funkce našeho problému má předem známou maximální hodnotu. Účelová funkce byla totiž navržena tak,

aby porovnávala podobnost dvou netlistů. Jelikož cílem algoritmu je sestavit z bitů konkrétní obvod vyjádřený v podobě netlistu, je zřejmé, že účelová funkce nabude maximální hodnoty ve chvíli, kdy porovnávané netlisty budou naprosto stejné. Protože je maximální hodnota účelové funkce známá, lze nakalibrovat stupnici funkce tak, aby odpovídala rozsahu nula až jedna. Kde hodnota jedna odpovídá naprosté shodě porovnávaných netlistů a hodnota nula naopak vyjadřuje netlisty zcela odlišné. Z podstaty účelové funkce vyplývá, že nemá schopnost nijak ohodnotit zapojení bitů jako takové. Nedokáže např. říct, jestli je řešení vhodné z hlediska velikosti desky, ale dokáže říct, kdy je zapojení funkční z elektrického hlediska, neboli má správný netlist.

K tomu, aby se netlisty funkčně shodovaly, není potřeba aby se přímo číselně rovnaly. Je zapotřebí pouze, aby se uzly u součástek nacházely na stejných pozicích v obou netlistech. Pro výpočet podobnosti netlistů je využit jejich maticový charakter a tento proces zachycují obrázky 6.7 a 6.8. Na začátku obrázku 6.7 je netlist požadovaný a s ním netlist porovnávaný.

požadovaný netlist:

$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 2 & 0 \\ \hline 2 & 2 & 3 & 0 \\ \hline 3 & 3 & 1 & 0 \\ \hline 4 & 3 & 1 & 0 \\ \hline \end{array} \longrightarrow \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 0 \\ \hline 2 & 3 & 0 \\ \hline 3 & 1 & 0 \\ \hline 3 & 1 & 0 \\ \hline \end{array} \longrightarrow \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} = A$$

porovnávaný netlist:

$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 2 & 0 \\ \hline 2 & 3 & 2 & 0 \\ \hline 3 & 4 & 5 & 0 \\ \hline 4 & 2 & 5 & 0 \\ \hline \end{array} \longrightarrow \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 0 \\ \hline 3 & 2 & 0 \\ \hline 4 & 5 & 0 \\ \hline 2 & 5 & 0 \\ \hline \end{array} \longrightarrow \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} = B$$

Obr. 6.7: Ukázka postupu při výpočtu účelové funkce, konkrétně zhotovení matic A a B .

Jelikož netlisty obsahují vždy stejný počet součástek a zároveň jsou seřazeny podle ID, je možné vyškrtnout z netlistů první sloupec s hodnotami ID součástek a porovnávat tak jen samotné uzly. To zachycuje první krok v obrázku. Samotné porovnání poté probíhá v několika cyklech pomocí dvou odvozených matic A a B . V jednom cyklu je vždy

kontrolována jedna pozice v netlistu. Z obou netlistů je vytvořena matice jedniček a nul o velikosti shodné s netlisty. Jedničky jsou na všech pozicích, kde se v netlistu nachází stejné číslo, jako na kontrolovaném místě. Nezáleží na tom, o jaké číslo se jedná. Záleží pouze na tom, kde všude se v netlistu vyskytuje. V příkladu na obrázku je v požadovaném netlistu aktuálně kontrolována pozice druhý řádek, druhý sloupec. Pozice je označena červenou přerušovanou čarou a nachází se na ní číslice 3. Matice A potom zobrazuje všechny pozice, kde se číslo 3 vyskytuje a označí je číslicemi 1. Zbytek pozic zaplní nulami. Stejný proces je proveden na porovnávaném netlistu, kde se ale na kontrolované pozici nachází číslice 2. Matice B opět ignoruje číselnou hodnotu a zobrazuje pouze pozice, kde se číslice 2 nachází. Obě matice poté prochází výpočtem viz rovnice 6.3. Výsledkem je matice označená S , a jedná se o modifikovaný součet matice A a B .

$$S = 2 \times A + B \quad (6.3)$$

Výpočet matice S v našem příkladu prezentuje obr. 6.8. Výsledná matice S již velmi hezky zobrazuje, jak jsou na tom netlisty z pohledu podobnosti. Číslice 3 vyjadřuje pozice v netlistu, které jsou v požadovaném i porovnávaném netlistu obsazeny hodnotou z kontrolované pozice. Tím pádem vyjadřují shodnost netlistů na těchto pozicích. Číslice 2 vyjadřuje pozice, kde požadovaný netlist obsahuje stejnou hodnotu jako kontrolovaná pozice, ale porovnávaný netlist nikoliv. Čili ukazuje na pozice, které by měl porovnávaný netlist doplnit hodnotou z kontrolované pozice, aby byli netlisty shodné. A nakonec číslice 1 reprezentuje pozice, kde porovnávaný netlist disponuje hodnotou z kontrolované pozice, ale požadovaný netlist hodnotu z kontrolované pozice na těchto pozicích nemá. Tudíž na pozicích označených jedničkou porovnávaný netlist vyloženě selhává, protože propojuje součástky tam, kde je propojovat nesmí.

$$2 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{matrix} 1 \times 1 \\ 1 \times 2 \\ 2 \times 3 \end{matrix}$$

Obr. 6.8: Ukázka postupu při výpočtu účelové funkce, konkrétně dosazení matic A a B do rovnice 6.3.

Konečná operace jež musí být provedena pro získání hodnoty účelové funkce je určité ohodnocení shody netlistů. To probíhá pomocí rovnice viz 6.4, kde q je hodnota kvality, q_p je hodnota kvality z předchozích iterací, a_1 odpovídá počtu jediček v matici S , a_2 počtu dvojek v matici S a a_3 počtu trojek v matici S . Již bylo zmíněno, že výpočet probíhá v iteracích. To je z důvodu, že postupně se musí zkontrolovat všechny pozice v netlistu. Proměnná q tak každou iterací narůstá, nebo naopak klesá. Konečná hodnota proměnné q

už číselně reprezentuje podobnost netlistů. V rovnici je vidět, že k hodnotě dosud spočtené kvality (v první iteraci je rovna nule) jsou přičteny nebo odečteny hodnoty v závislosti na četnosti jednotlivých číslic v matici S . V uvedeném příkladu se vyskytovala číslice 1 jednou, číslice 2 také jednou a číslice 3 dvakrát. Kromě četnosti jednotlivých cifer se v rovnici 6.4 také objevují konstanty 5,3,2. Lze si výpočet představit tak, že k hodnotě q je vždy přičteno pět bodů, za každý správně vyskytující se uzel. Odečteny tři body za každý špatně umístěný uzel a nakonec odečteny další dva body za každý uzel, který by v porovnávaném netlistu měl být, ale chybí. Pro prezentovaný příklad z obrázků vychází, že celkově je přičteno ke kvalitě v této iteraci pět bodů, za dva správně umístěné uzly, jeden špatně umístěný a jeden chybějící.

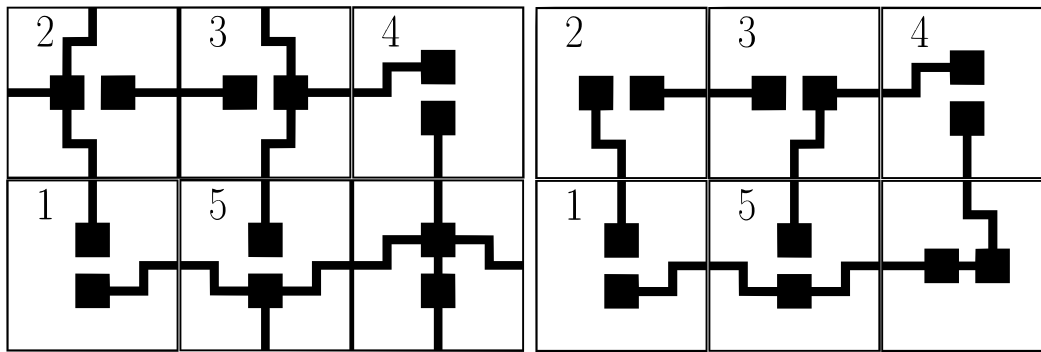
$$\begin{aligned} q &= q_p + (5 \times a_3) - (3 \times a_1) - (2 \times a_2) \\ &= q_p + (5 \times 2) - (3 \times 1) - (2 \times 1) \\ &= q_p + 5 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Poslední úpravou kvality je její kalibrace do rozsahu nula až jedna. Toho je docíleno tak, že hned na začátku genetického algoritmu je volána účelová funkce, kde ale za požadovaný i porovnávaný netlist je dosazen právě požadovaný netlist. Tím získáme hodnotu účelové funkce, kterou netlist dosáhne v momentě, kdy bude zcela shodný s požadovaným. Touto hodnotou pak jednoduše dělíme dosažené výsledky účelové funkce během výpočtu genetického algoritmu. Takto je docíleno vytvoření účelové funkce, která když nabyde hodnoty jedna, je porovnávaný netlist shodný s požadovaným a kompozice bitů je správná.

6.2.8 Konečná úprava nalezené kompozice bitů

V předešlé kapitole byl podrobně vysvětlen výpočet účelové funkce. Pokud ani jeden z jedinců v populaci nedosáhne hodnoty účelové funkce rovno jedné, následuje ve výpočtu další iterace. Pokud ale alespoň jeden z jedinců dosáhne hodnoty jedna, genetický algoritmus končí a předává daného jedince do funkce nazvané *Post_process*. Pomocí vstupního argumentu genetického algoritmu lze nastavit počet správných jedinců, kteří musí být nalezeni, aby byl genetický algoritmus ukončen. Tato možnost byla implementována, aby si uživatel mohl případně vybrat z více než jedné správné kompozice bitů.

Jmenovaná funkce *Post_process* poté zajistí, aby v obvodu nebyly zbytečné slepé cesty. Kvůli charakteru účelové funkce se totiž může stát, že obvod bude obsahovat cesty, které nijak neovlivňují výsledný netlist. Právě pro odstranění těchto cest je funkce *Post_process* vytvořena. Funkce prohledá všechny jednotlivé bity a zkusí jim postupně odstranit jednu vodivou cestu po druhé. Po odebrání každé cesty přepočítá netlist a zkontroluje, zda se netlist změnil, či nikoliv. Pokud nastala změna, vodivou cestu vrátí a zkouší odstraňovat další cesty. Pokud ale netlist zůstane stejný, odstraněnou cestu již nevrátí. Díky tomuto jednoduchému zpracování dochází k odstranění zbytečných cest na bitech. Obrázek 6.9 ukazuje desku před post-procesem (a) a po něm (b).



(a) Sestavená deska před post procesem.

(b) Sestavená deska po post procesu.

Obr. 6.9: Ukázka vykreslených desek pomocí funkce *DrawBoard* (viz kapitola 6.2.9) před použitím funkce *Post_process* a po ní.

6.2.9 Vykreslení desky

Pro jednoduché zobrazení desky, ať už během výpočtu, nebo na jeho konci, je zde implementována funkce *DrawBoard*. Funkce jednoduše identifikuje každý bit na základě vodivých cest a vybere příslušný předkreslený obrázek bitu. Obrázky vodivých cest se skládá podle informace pozic v rámci každého bitu a nakonec dosadí do obrázku číslice reprezentující ID součástek. výsledná podoba může vypadat např. jako na obr. 6.9.

6.2.10 Dosažené výsledky

Navržený algoritmus je funkční a dokáže kompozici bitů na základě zadaného netlistu nalézt. Problém je však v době potřebné k nalezení obvodu. S rostoucí velikostí desky vzrůstá také počet všech variant kompozic bitů a díky tomu také čas potřebný k nalezení správné kompozice. Na základě toho se ukázalo, že zvolení genetického algoritmu pro tento typ problému nebylo nejšťastnějším řešením. Ve chvíli, kdy algoritmus hledá zapojení desky např. o velikosti 2×2 bitů, trvá zde výpočet řádově jen jednotky vteřin. Ale jakmile zvýšíme velikost desky na 3×2 bitů, rázem může výpočet trvat i několik minut. Při snaze spočítat zapojení astabilního klopného obvodu na desce o velikosti 4×4 bitů, tak algoritmus ani po třiceti dnech výpočtu nebyl schopný správnou kompozici bitů nalézt. V tomto stavu není samozřejmě algoritmus použitelný pro komplikovanější obvody.

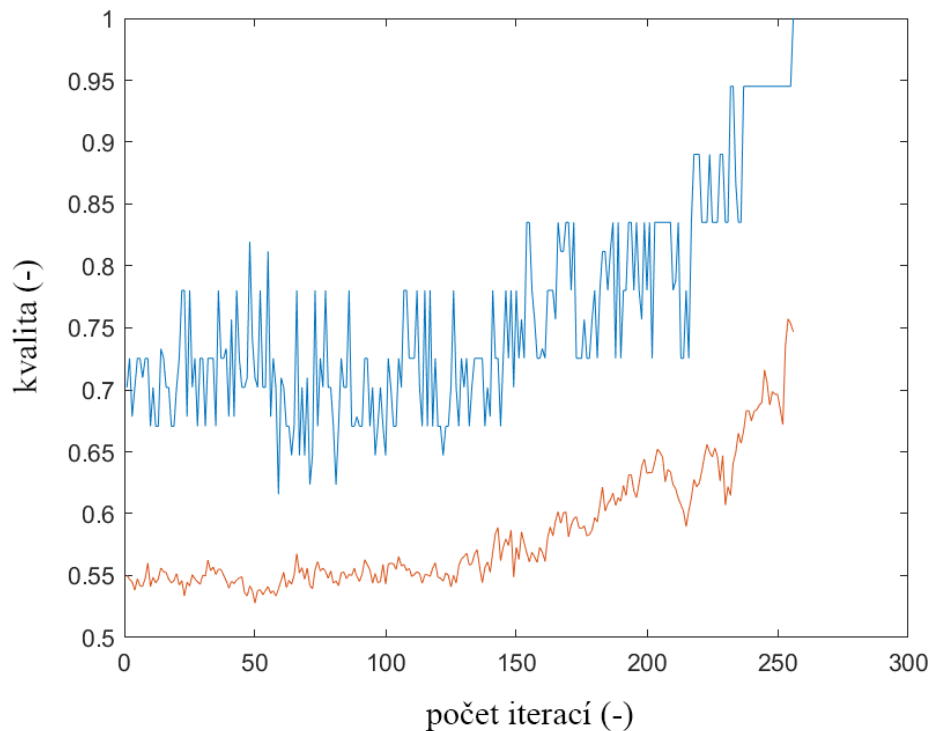
Otázkou bylo, zda výpočet u větších desek trvá tak dlouho, kvůli špatně navrženému algoritmu, nebo zda je počet kombinací skutečně tak vysoký, že k nalezení správného obvodu je potřeba počítat takhle dlouho. Abychom byli schopni odpovědět na tuto otázku, musela být zhotovena podrobnější analýza výpočtu. Pro zjištění funkčnosti algoritmu bylo nutné spočítat, jak dlouho by trvalo, kdybychom se snažili místo genetického algoritmu jednoduše vytvořit postupně všechny možné kompozice bitů. Počet všech možných kompozic lze vypočítat pomocí vzorce 6.5,

$$k_c = (r \times t_s)^{p_b} \times p_b! \quad (6.5)$$

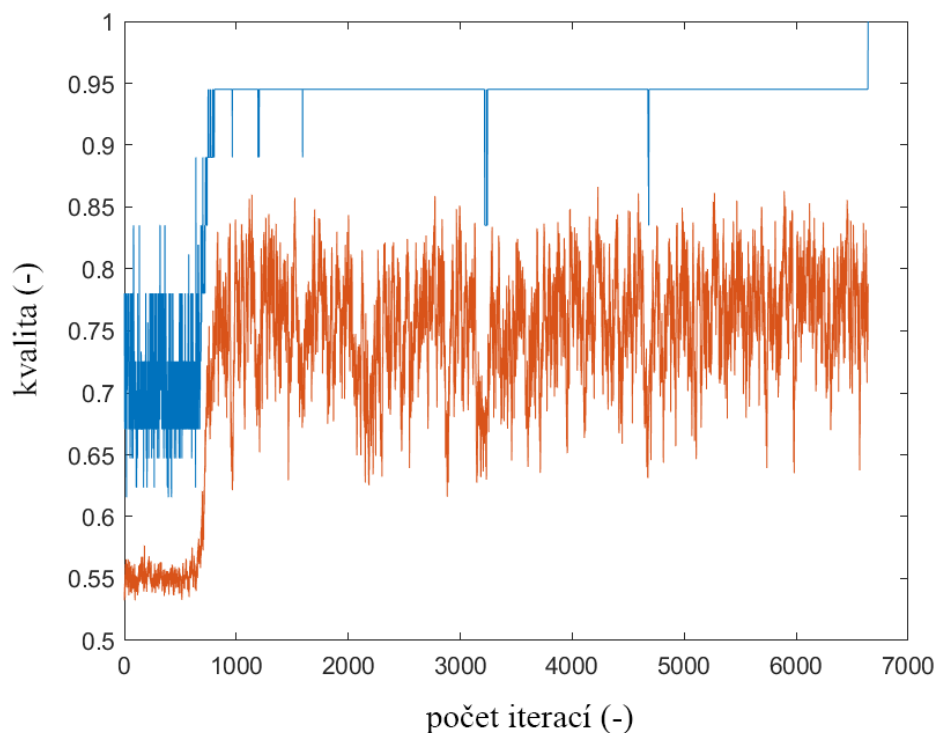
kde k_c je celkový počet kombinací, t_s je počet všech možných typů vodivých cest na jednom bitu, r je rotace, protože každý typ vodivé cesty může být rotován do čtyřech různých směrů a p_b je celkový počet bitů na desce. Počet typů vodivých cest na bitu se dvěma pájecími ploškami je devět. Možné směry rotace jsou samozřejmě čtyři a počet bitů na desce je závislý na velikosti desky. Např. pro velikost obvodu 2×2 bity je počet bitů čtyři.

Dosadíme-li hodnoty pro desku 2×2 bity do vzorce, dostáváme přes 40 milionů možných kombinací, konkrétně 40 310 784 různých kompozic bitů. Bylo změřeno, že vytvoření jedné kompozice trvá v algoritmu zhruba 0,002124s. To znamená, že vytvoření všech kombinací desky by trvalo 0,99 dne, s tím, že správných kombinací je ale hned několik. Náš genetický algoritmus oproti tomu desku o takové velikosti řeší v řádu jednotek sekund. Pokud je stejný výpočet aplikován na velikost desky 3×2 bitů, čas potřebný ke zhotovení všech kompozic se vyšplhá na 105,55 let. Takovou velikost desky je náš algoritmus schopný spočítat v řádu minut. Výpočet všech kombinací pro desku o rozměrech 4×4 bitů by potom trval dokonce $1,12 \times 10^{28}$ let. Takovou velikost desky už ani náš navržený algoritmus spočítat nedokázal.

Pro bližší náhled na funkčnost algoritmu byla také zhotovena analýza závislosti účelové funkce na počtu iterací algoritmu. Příklad výsledků této analýzy lze vidět v grafech na obrázcích viz 6.10. Každý graf obsahuje průběh kvality nejlepšího jedince v populaci označený modrou barvou a průběh průměrné hodnoty kvality celé populace označený barvou červenou. Analýza probíhala na obvodu s velikostí desky 3×2 bitů, a to na stejném obvodu jako byl k vidění na obrázku 6.4. Zatímco graf označený písmenem (a) ukazuje velice příznivý průběh účelové funkce, kde jak průměrná, tak maximální kvalita jedinců postupně stoupá až do chvíle, kde jeden z jedinců dosáhne kvality jedna. Počet iterací, jež bylo potřeba k dosažení správného jedince byl 254 iterací. Zcela odlišný průběh nabízí druhý graf na obrázku označen písmenem (b). V tomto případě bylo zapotřebí téměř 7000 iterací. Navíc je patrné, že v prvních 1000 iteracích se obvod dostal na poměrně dobrou kvalitu, ale stále nebyl správný. Trvalo dalších téměř 6000 iterací, než byl algoritmus schopný nalézt správné řešení. Zde je patrné, že algoritmus sice plní svou funkci a jedinci vytvoření algoritmem disponují nadprůměrnými vlastnostmi, ale za správné je označit nelze. Je to způsobeno tím, že i když je jedinec velmi blízko správnému řešení a k jeho úplné správnosti zbývá např. už pouze jedna jediná změna vodivé cesty na jednom bitu, tak počet proměnných, které se v takovém jedinci mohou změnit, je tak velké množství, že k potřebné změně dané vodivé cesty jen zřídka kdy dojde. Resp. dojde k ní s velmi malou pravděpodobností. Je tedy zřejmé, že problém netkví v odladění algoritmu, nebo jeho struktuře, ale přímo v použití genetického algoritmu pro tento typ problému. Příliš velký počet proměnných v každém jedinci algoritmu zabraňuje jeho účinnému použití.



(a) Analýza účelové funkce pro poměrně úspěšný výpočet genetického algoritmu.

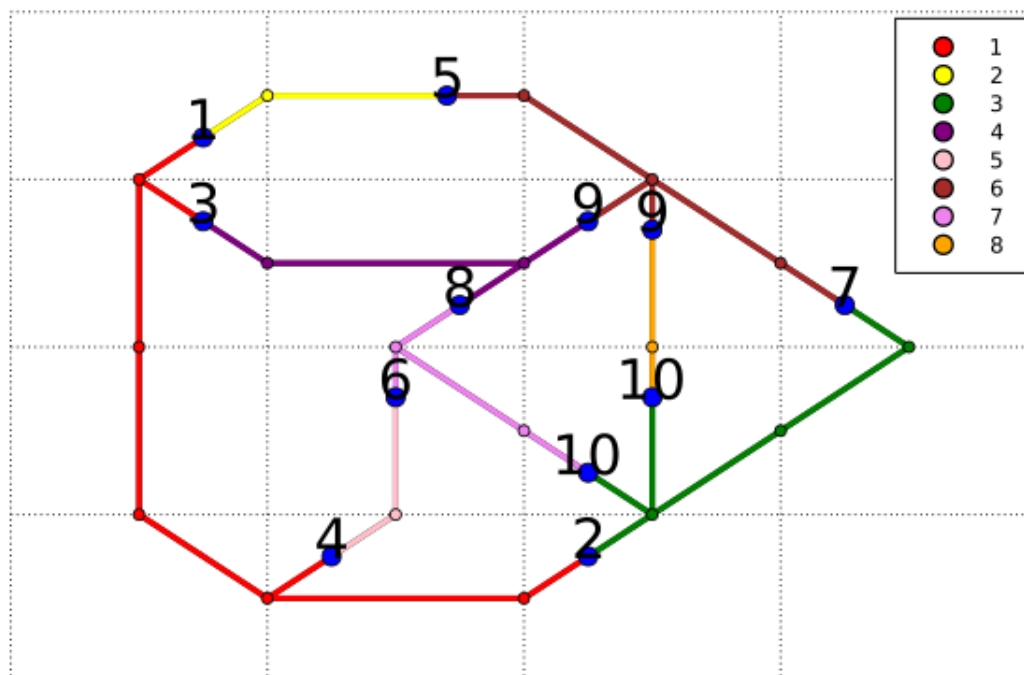


(b) Analýza účelové funkce pro poměrně neúspěšný výpočet genetického algoritmu.

Obr. 6.10: Ukázka závislosti hodnoty účelové funkce (kvality) na počtu iterací algoritmu během dvou různých výpočtů jednoho a toho samého obvodu. Červené průběhy odpovídají průměrné hodnotě účelové funkce napříč celou populací, zatímco modré průběhy odpovídají hodnotě účelové funkce nejlepšího jedince v populaci.

6.3 Odlišný přístup

Kvůli malé efektivitě navrženého genetického algoritmu bylo potřeba vymyslet jiný způsob, jak získávat návrh kompozice bitů pro požadovaný elektrický obvod. Z toho důvodu byla navázána spolupráce s Mgr. Lukášem Adamem, Ph.D.(ČVUT), který dokázal poskytnout odlišný pohled na problematiku. Místo využití genetického algoritmu Mgr. Adam využil pro řešení našeho problému algoritmus založený na principu celočíselného programování. Celočíselné programování je optimalizační metoda, která spočívá v hledání minima účelové funkce za pomoci spojité i kombinatorické optimalizace. Bližší informace ohledně teorie celočíselného programování si lze přečíst v práci [15]. Nově navržený algoritmus je pro změnu k dispozici v repositáři [16]. Zde si lze prohlédnout celý algoritmus, ale také si o něm přečíst podrobné informace. Příklad výstupu algoritmu ukazuje obrázek 6.11. Na obrázku je obvod, který původní genetický algoritmus nedokázal spočítat ani za 30 dní výpočtu. Algoritmu založeném na celočíselném programování výpočet trval jen několik minut, čímž jasně překonává funkčnost genetického algoritmu. Na obrázku jsou naznačeny jednotlivé bity pomocí šedivé mřížky, do které je usazen požadovaný počet součástek v podobě modrých teček. U každé tečky je číslo odpovídající součástce v netlistu. Lze si povšimnout, že některá čísla se opakují u více teček. Jedná se o součástky se třemi pájecími ploškami, a i přesto, že se čísla opakují, jsou vždy umístěny pouze v rámci jednoho bitu definovaného mřížkou. Barevně jsou poté znázorněny jednotlivé uzly mezi součástkami. Pokud bychom do tohoto konkrétního rozložení bitů na obrázku zasadili vhodné součástky, dostaly bychom astabilní klopný obvod s diodami, neboli blikáč.



Obr. 6.11: Výstup z algoritmu založeném na celočíselném programování [16].

7

Návrh řídicí aplikace pro skládání DPS z digitálních materiálů

7.1 MagNet

Návrh řídicí aplikace pro skládání DPS z digitálních materiálů byl pouze doplněním již vytvořené aplikace MagNet [9]. Aplikace je vytvořena v prostředí Matlab app designer pro potřeby snadného ovládání magnetických těles po magnetické platformě. V kapitole 3.1 bylo řečeno, že ovládání těles po platformě je zajištěno pomocí G kódů odesílaných z řídicího PC. Aby však uživatel nebyl nucen k odesílání jednotlivých G kódů skrze sériový komunikátor z řídicího PC, byla vyvinuta právě tato aplikace. Aplikace nabízí velmi jednoduché a intuitivní prostředí. V aplikaci si uživatel může snadno vybrat ovládání jedné z připojených platforem viz 3.2, měnit hodnoty proudu a napětí platformy na připojeném zdroji, nebo rozsvěcet či zhasínat osazené osvětlení. Dále také zobrazit obraz z kamery umístěné nad platformami a v neposlední řadě samozřejmě taky pohybovat s roboty. Pohyb může být vyvolán joysticky ovladače, nebo za použití myši a klávesnice. V aplikaci je možné nastavit rychlost pohybu robotů, a v případě pokročilejších platforem také vybrat pouze určité segmenty platformy, jež budou aktivní. V neposlední řadě je třeba zmínit, že aplikace obsahuje hned trojici algoritmů pro vyhledávání trasy. Pomocí myši či joysticku ovladače lze nastavit výchozí a finální pozici robotu a pokud je pohyb možno provést, tak aplikace použije jeden z algoritmu na nalezení nejkratší trasy a pohyb provede. Do cesty robotům mohou být také přidány virtuální překážky, kterým se vyhledávací algoritmy budou vyhýbat.

Hlavní okno aplikace MagNet obsahuje dvě záložky. Záložka *Settings*, kde jsou zobrazena všechna detekovaná zařízení (platformy, zdroj napětí, světla), dále se zde nachází např. nastavení rozlišení kamery. Druhá záložka s názvem *Home* obsahuje dvě okna. Okno se zobrazeným výstupem kamery a okno vyhrazené pro řízení robotů. Okno pro ovládání robotů kopíruje rozměry platformy a je možné myší, nebo ovladačem určovat startovní a cílovou polohu robota. Např. kliknutím do levého horního rohu pro určení startu a násled-

ným kliknutím do pravého dolního rohu pro určení cíle, robot okamžitě vykoná zadaný pohyb. Kromě hlavního okna se zde vyskytuje také spodní lišta s možností ovládání napěťového zdroje, ručního posílání G kódů a výběr ovládané platformy včetně po případného výběru pouze určitého ovládaného segmentu platformy. Náhled aplikace si lze prohlédnout v přílohách A.1 a A.2.

7.2 Rozšíření aplikace MagNet

V rámci implementace tvorby DPS v konceptu digitálních materiálů byla aplikace rozšířena o další záložku v hlavním okně aplikace. Záložka nese název *DED*, neboli Digital Electronics Designer a lze ji vidět v přízole A.3. Jedná se o záložku kompletně věnovanou návrhu a sestavení digitálních materiálů. Na obrázku je zachycena již ve stavu sestavování bitů. Podrobnější popis celého procesu sestavení bitů popisují následující tři podkapitoly.

7.2.1 Uživatelský vstup a vytvoření návrhu

Potom co je spuštěna aplikace MagNet, zapnut napěťový zdroj a vybrána příslušná platforma, může se uživatel prokliknout do záložky *DED*. Okno je téměř prázdné, až na jeho levou část, kde se nachází tři textová okna a čtyři tlačítka. Celá tato část slouží pro zadání netlistu obvodu, který má být vytvořen. K zadání netlistu lze využít jeden ze tří způsobů. První spočívá v napsání netlistu v daném formátu včetně hodnot součástek přímo do prvního textového okna, označeného nápisem *Request netlist*. Pokud uživatel nezná vyžadovaný formát netlistu, může kliknout na tlačítko s nápisem *Help*. Tlačítko *Help* vyplní okno *Request netlist* ukázkovým netlistem a popíše ho tak, aby uživatel pochopil formát netlistu.

Druhý způsob jak zadat požadovaný netlist je napsat ho do textového pole *App netlist*, kde ale aplikace očekává lehce odlišný formát netlistu. Zaprvé čísluje uzly i součástky od jedničky místo od nuly a navíc je zde ignorována elektrická povaha součástek i jejich hodnoty. Tento způsob slouží především k testování aplikace. Poslední, třetí, způsob je importovat netlist ze souboru pomocí tlačítka *Import*. Očekává se textový soubor typu *.cir*, který je vytvořen při kreslení schématu v programu PSpice. Do aplikace bude v nejbližší době implementováno několik dalších formátů netlistů, tak aby se uživatel nemusel v návrhu obvodu omezovat pouze na jeden konkrétní software pro návrh elektrického schématu. Poté, co uživatel využije jednu z možností zadání netlistu, je možné stiskem tlačítka *Calculate* spustit výpočet návrhu desky. Pokud by chtěl uživatel smazat zadaný netlist a vložit místo něj jiný, stačí stisknout poslední tlačítko s nápisem *Clear* a netlist je kompletně smazán.

Jestliže byl vstup zadán pomocí importovaného netlistu, nebo zadáním do textového okna *Request netlist*, aplikace po stisku tlačítka *Calculate* vrátí v textovém okně *Output* určitou formu výstupu. Tento výstup popisuje jaká elektrická součástka odpovídá danému

ID součástky na bitech včetně hodnoty elektrické součástky. Kromě zobrazení tohoto výstupu se po stisku tlačítka *Calculate* také spustí genetický algoritmus viz 6.2. Ve chvíli kdy algoritmus dokončí výpočet, výslednou kompozici bitů zobrazí do volného prostoru v okně po pravé straně od uživatelského vstupu. Automaticky je také spuštěna kamera snímající platformu a vyskočí dvě radio tlačítka pro výběr mezi manuálním a automatickým složením bitů.

Aby bylo možné bity seskládat, je nutné, aby byly vybrané bity na platformu umístěny. K tomu by v budoucnu mohla sloužit určitá osazovací hlavice se zásobníkem všech různých typů bitů, včetně různých velikostí součástek i vodivých cest. Zásobník by pak jednoduše umístil bity na magnetickou platformu tak, aby bylo co nejsnazší jejich složení ve výsledný obvod. V současné době je nutné, aby vybrané bity umístil na platformu sám uživatel, což trochu kazí celkový pohled na automatizaci systému. Ale je nutné uvědomit si, že tato práce popisuje jen úvodní nástřel funkčnosti digitálních materiálů v technologii výroby DPS a bude potřeba ještě spousta práce, aby celý systém fungoval podle prvotních představ.

7.2.2 Manuální režim

Jak již bylo řečeno, po vypočtení kompozice bitů se objeví okno s kamerou v reálném čase namířenu na magnetickou platformu. Manuální režim potom funguje velmi intuitivně. Jediné co je potřeba pro seskládání bitů dělat, je vždy kliknout na daný bit v obraze kamery a následně kliknout na polohu, do které se má bit přesunout. Tento postup je třeba vykonávat tak dlouho, dokud nejsou bity spojeny a nevytvoří tak kompletní obvod. Před začátkem je dobré zkontrolovat umístění kamery, která musí být nakalibrována přesně na rozměr magnetické platformy, jinak reálná velikost pohybů po platformě nebude odpovídat vzdálenosti zobrazené na obrazu z kamery.

7.2.3 Automatický režim

Automatický režim je schopen složit bity bez potřeby jejich přímého ovládní. Bohužel ale v systému magnetické platformy stále není implementováno rozpoznání obrazu v reálném čase. Na tomto rozpoznání se nyní intenzivně pracuje a jistě bude už brzy k dispozici. Do té doby je ale nutné aplikaci určit, kde na platformě se jednotlivé bity nachází. To uživatel provede tak, že na každý z bitů klikne. Vlevo od obrazu kamery se nachází skupina radio tlačítek, kde si vždy uživatel vybere číslo příslušného bitu a následně k němu přiřadí kliknutím do obrazu kamery jeho souřadnice. Ve chvíli, kdy jsou ke všem bitům přiřazeny příslušné souřadnice, objeví se tlačítko *Start*. Po jeho stisknutí dojde k automatickému sestavení bitů v kompletní desku. Sestavení v současné době počítá s využitím magnetické platformy Isoptera (viz 3.2). Tato platforma dokáže ovládat pouze čtyři různá tělesa nezávisle na sobě a tomu je také podřízen proces sestavení desky. Lze tedy skládat pouze obvody ze čtyř bitů, kde každý bit je umístěn na jeden segment

platformy. Proces složení je následně velmi triviální, neboť platforma jen posune bity k sobě tak, aby vytvořil dvě dvojice a následně dvojice spojí v kompletní obvod (viz obr. B.1). Pokud v kterékoliv fázi sestavení bitů chce uživatel proces zastavit, stačí stisknout tlačítko *Clear*.

7.2.4 Budoucí vývoj aplikace

Budoucí vývoj řídicí aplikace vychází z požadavků zmíněných v podkapitolách výše. Prvním nutným krokem bude zakomponovat do aplikace algoritmus pro vyhledávání kompozice bitů založený na celočíselném programování (viz 6.3). V doposavad nejnovější verzi aplikace je stále algoritmus, založený na genetice, který ale nedosahuje potřebných výsledků.

Následný postup ve vylepšení aplikace bude rozhodně v implementaci rozpoznání objektů na platformě v reálném čase, který v případě automatického režimu skládání odstraní potřebu určovat startovní pozice všech bitů ručně. Rozpoznání obrazu je již vyvinuto, ale implementováno prozatím nebylo.

Ještě podstatnější, než výše zmíněné vylepšení, je však sestavení zařízení, které bude schopné umístit bity na platformu. V podkapitole 7.2.1 byl zmíněn návrh zásobníku s osazovací hlavicí, který by mohl být pro tento účel vhodný. Zásobník by nebyl nijak složitý. Obsahoval by bity všech variant vodivých cest hned pro celou řadu hodnot součástek. Pro každou variantu vodivé cesty a velikosti součástky by byl vyhrazen jeden slot v zásobníku, do kterého by se dalo umístit určité množství stejných bitů. Zásobník by poté byl vytvořen tak, aby osazovací hlavička byla pouhá skluzavka, která by dokázala pojmout součástky ze všech slotů. Čistě za pomoci gravitace a určitého systému pro vypuštění vždy pouze jednoho bitu ze slotu, by bylo dosaženo umístění požadovaného bitu na magnetickou platformu. Hlavička by dokonce nemusela být ani pohyblivá, protože pokaždé, když by byl vypuštěn jeden bit, magnetická platforma by ho mohla okamžitě posunout na příslušné místo a tím rovnou tvořit požadovaný obvod.

Dalším způsobem jak bity na platformu umisťovat, by mohl být určitý karusel s lineárním aktuátorem pro výběr konkrétního bitu. Karusel by obsahoval všechny možné typy bitů a pomocí jeho otáčení by bylo možné vybrat požadovaný bit. O umístění bitu na platformu by se poté postaral právě lineární aktuátor. To, který způsob bude aplikován v našich laboratorních podmínkách není zatím jisté, ale mechanismus pro umístění bitů na magnetickou platformu je pro budoucí vývoj projektu rozhodně velmi důležitý.

Samotné skládání digitálních materiálů bylo v rámci práce omezeno pouze na platformu *Isoptera* (viz 3.2), která ale nenabízí příliš velké možnosti v nezávislém ovládní jednotlivých bitů. Vzhledem k tomu byl vystavěn i algoritmus pro sestavování bitů. Při použití dokonalejších platform by bylo možné ovládat větší množství bitů nezávisle na sobě a i algoritmus by potom mohl nabízet mnohem více možností ovládní. Ve spolupráci s optickou lokalizací bitů v reálném čase by bylo možné docílit nejen skládání, ale také rozkládání obvodů, nebo např. výměny konkrétního bitu v desce. V tu chvíli by musel na-

stat výzkum v oblasti strategie skládání. Kvůli současné konstrukci bitů je nejlepší způsob skládání pouze pohyby v ortogonálním směru. Pohyby ve směru diagonálním mohou způsobit nechtěné zachycení kovových plíšků jednoho bitu na magnety umístěné v rozích bitu druhého. Z toho důvodu se v současné době jeví skládání jednotlivých řad bitů a posléze jejich spojení v celistvý obvod, jako nejlepší varianta. Ovšem jaká strategie skládání by fungovala nejlépe při použití jiné platformy není prozatím jisté a v tomto ohledu bude na projektu určitě velké množství práce do budoucna.

Vylepšením celého systému by také mohla být detekce kvality spojení jednotlivých bitů. Bity se totiž ne vždy spojí ideálním způsobem a detekce kvality spojení by předešla následným potížím s použitím takové desky. Detekce by byla založena nejspíše na bázi optického snímání. Ve chvíli, kdy by detekce mohla probíhat přímo za běhu skládání obvodu, mohl by algoritmus pro skládání bitů okamžitě reagovat rozpojením a znovu spojením problémových bitů. Kdyby ani poté kvalita spojení neodpovídala požadavkům, mohly by být bity zcela nahrazeny za jiné.

8

Závěr

Pro zhodnocení dosažených výsledků je nutné uvědomit si, s jakým cílem projekt vznikl. Tím rozhodně nebylo zkonstruovat systém na velkovýrobu desek plošných spojů z digitálních materiálů, ale pouze posunutí konceptu digitálních materiálů v elektronice na další úroveň. Digitální materiály minimálně v teoretické rovině nabízí výrazné benefity z hlediska robotizace a automatizace výroby, možnosti masivní rekonfigurace, nebo např. kladného ekologického dopadu. Pokud je pak dosaženo konstrukce digitálních materiálů takové, že tyto benefity převyšují možné nevýhody, stává se celý koncept velmi perspektivní nejen v oblasti elektroniky. Avšak ne náhodou jsou digitální materiály spojovány zejména s oborem elektroniky, neboť právě v tomto oboru mají velkou šanci naplno uplatnit všechny své přednosti.

Nám se podařilo v rámci práce vytvořit několik návrhů digitálních materiálů pro účely výroby DPS, vybrat z nich tu nejperspektivnější variantu, a v našich laboratorních podmínkách ji také zkonstruovat. Následně konstrukce prošla testováním a vylepšováním až do současné podoby, kdy je schopna efektivně tvořit funkční elektrické obvody. Návrh digitálních materiálů byl navíc uzpůsobený pro sestavování elektrických obvodů bez nutnosti lidského mechanického zásahu, a sice za pomoci magnetické platformy. V neposlední řadě byly také vytvořeny algoritmy pro návrh takové kompozice bitů, aby byl vytvořen požadovaný elektrický obvod na základě zadané topologie elektrického obvodu. Jeden z algoritmů byl začleněn do aplikace pro ovládání magnetické platformy, která byla rozšířena o možnost jednoduchého skládání námi vytvořených digitálních materiálů. Celý koncept byl experimentálně ověřen a lze jej považovat za funkční. Z tohoto pohledu byl učiněn velký krok vpřed a práci lze shledat za úspěšnou.

Naše provedení samozřejmě naráží hned na několik omezení. Tím největším je bezpochyby nepřesnost výroby samotných digitálních materiálů, a to především kvůli odchylkám ve velikostech magnetů. Magnetická platforma je poměrně citlivá na umístění magnetů, a to jak v rovině platformy, tak i v ose z . Je nutno brát v úvahu, že i z drobných chyb ve spojení bitů mohou vyplynout poměrně zásadní problémy. Omezení způsobují i chyby ve výrobě kovových plíšků, či samotných destiček, zde je však nepřesnost řádově nižší, než u magnetů. Pochopitelně i samotná magnetická platforma vytváří jisté požadavky

na velikost a rozmístění magnetů, čímž vytváří další hranice použitelnosti. Snadno si lze představit naši konstrukci digitálních magnetů s menšími rozměry destiček, součástek i magnetů, ale společně s tímto zmenšováním by bylo nutné upravovat také magnetickou platformu. V poslední řadě také algoritmus pro sestavení digitálních materiálů naráží na současnou nedokončenost vývoje magnetické platformy a jejího řízení. Obecně pro vytvoření chytřejších algoritmů k sestavení, rozebrání, nebo třeba výměny určitého bitu v obvodu je potřeba zpětná vazba v podobě rozpoznání obrazu v reálném čase. Na takovém rozpoznání obrazu se v současné době pracuje, avšak použitelné ještě není.

Všechna výše zmíněná omezení jsou ale pouze otázkou dalšího vývoje, jak magnetické platformy, tak samotných digitálních materiálů a proto nijak nesnižují celkovou hodnotu projektu. Projekt si na svém začátku kladl poměrně ambiciózní cíle a ty se podařilo naplnit, jak již bylo řečeno.

Budoucí vývoj v oblasti samotných digitálních materiálů se může zaměřit např. na propojení magnetického a mechanického spojení bitů, kde by fyzický tvar bitu dopomáhal směřovat bity k sobě tak, aby magnety vytvořily ideální spojení. Navíc koncept může být použitelný i v odlišných aplikacích. Např. jednotlivé bity by nemusely obsahovat pouze jednu součástku, ale celé elektrické obvody. Místo bitů by se tak v podstatě jednalo o celé moduly poskytující různé elektrické funkce. Z hlediska magnetické platformy může dojít k vylepšenému mechanismu pro ovládání více robotů nezávisle na sobě, nebo například k celkovému zvětšení platformy tak, aby bylo možné na ni skládat i rozměrově náročnější obvody. Samotný algoritmus pro skládání digitálních materiálů může být pro změnu doplněn o systém rozkládání, či výměnu bitů v obvodu, jak již bylo zmíněno. Osobně soudím, že vývoj v těchto směrech může v budoucnu přinést až překvapivě úspěšné výsledky a digitální materiály si dobudou své místo nejen v oblasti výroby DPS.

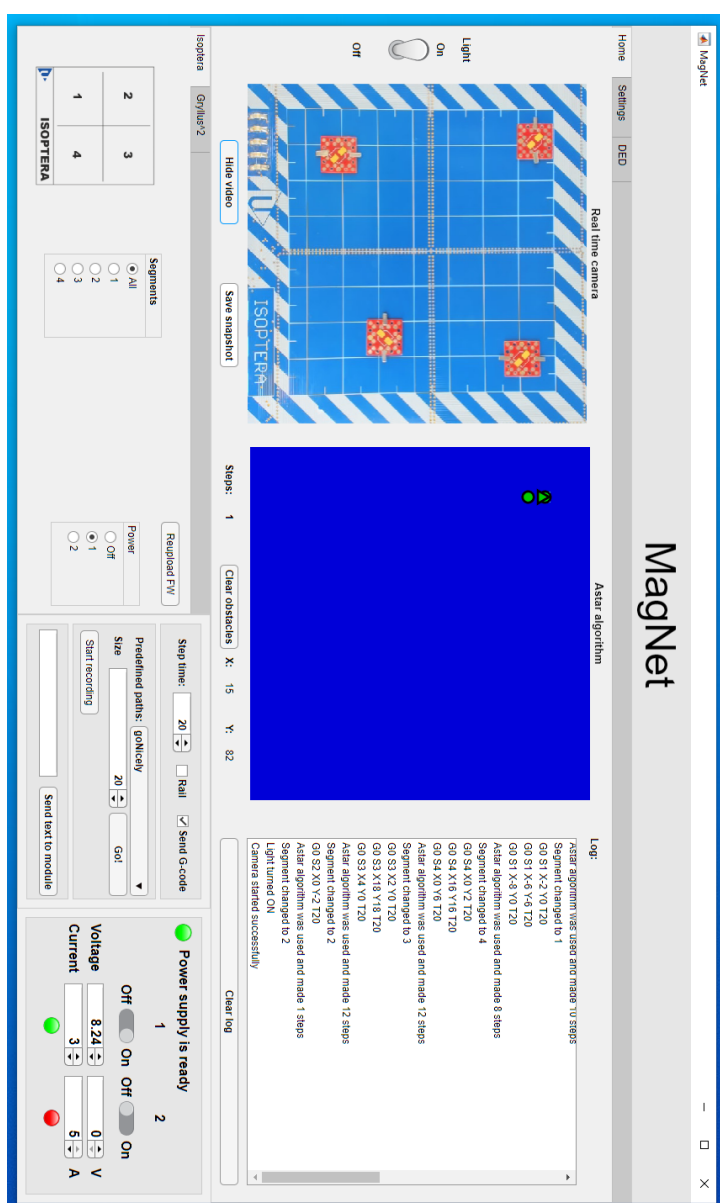
Literatura

- [1] Retsin G.: *Discrete Assembly and Digital Materials in Architecture* [online]. Poslední změna 2015. [Cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2016_221.pdf
- [2] Massachusetts Institute of Technology: *The Center for Bits and Atoms* [online]. [Cit. 24. 2. 2021]. Dostupné z: <https://cba.mit.edu/>
- [3] The Bartlett BPro and Pizzabot teams: *RC4 - PizzaBot 2018* [Cit. 24. 2. 2021]. Dostupné z: <https://vimeo.com/304108480>
- [4] Langford F., Ghassaei A. P., Gershenfeld N.: *Automated Assembly of Electronic Digital Materials* 2016 [Cit. 24. 2. 2021]. Dostupné z: <http://cba.mit.edu/docs/papers/16.07.msec.stapler.pdf>
- [5] Langford F.: *Electronic Digital Materials* 2014 [Cit. 23. 2. 2021]. Dostupné z: <http://cba.mit.edu/docs/theses/14.08.Langford.pdf>
- [6] MIT Center for Bits and Atoms: *Automated Assembly of Electronic Digital Materials* 2019 [Cit. 24. 2. 2021]. Dostupné z: <https://vimeo.com/330843884>
- [7] Ghassaei A. P.: *Rapid Design and Simulation of Functional Digital Materials* 2016 [Cit. 24. 2. 2021]. Dostupné z: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/107567>
- [8] Popescu G. A., Mahale T., Gershenfeld N.: *Digital materials for digital printing* 2016 [Cit. 24. 2. 2021]. Dostupné z: http://cba.mit.edu/docs/papers/06.09.digital_materials.pdf
- [9] Šedivec J.: *Systém na ovládání miniaturních robotů* 2020 [Cit. 5. 3. 2021]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/41856/1/BP_Sedivec.pdf
- [10] Kuthan J.: *Key Aspects of Magnetically Guided Actuation on Planar Surfaces* 2018 [Cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/30716/3/Kuthan.pdf>
- [11] Kuthan J.: *Robotic System Based on Magnetically Guided Actuation on the Planar Surfaces* 2017 [Cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/26445/1/Kuthan.pdf>

- [12] Kuthan J.: *Collective Planar Actuation of Miniature Magnetic Robots Towards Individual Robot Operation* 2020 [Cit. 19. 4. 2021]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/42571/1/Mach_09307877.pdf
- [13] Kuthan J.: *Magnetic Actuation of Multiple Robots by the Coplanar Coils System* 2019 [Cit. 19. 4. 2021]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8860963>
- [14] Wikipedie: *Genetický algoritmus* [online]. Poslední změna 12. 7. 2019 v 09:10 [Cit. 7. 5. 2021]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Genetický_algoritmus
- [15] Hladík M.: *Celočíselné programování* 2017 [Cit. 10. 5. 2021]. Dostupné z: https://kam.mff.cuni.cz/~hladik/CP/text_cp.pdf
- [16] Adam L.: *Repositář Circuits* 2021 [Cit. 10. 5. 2021]. Dostupné z: <https://github.com/sadda/Circuits>

Příloha A

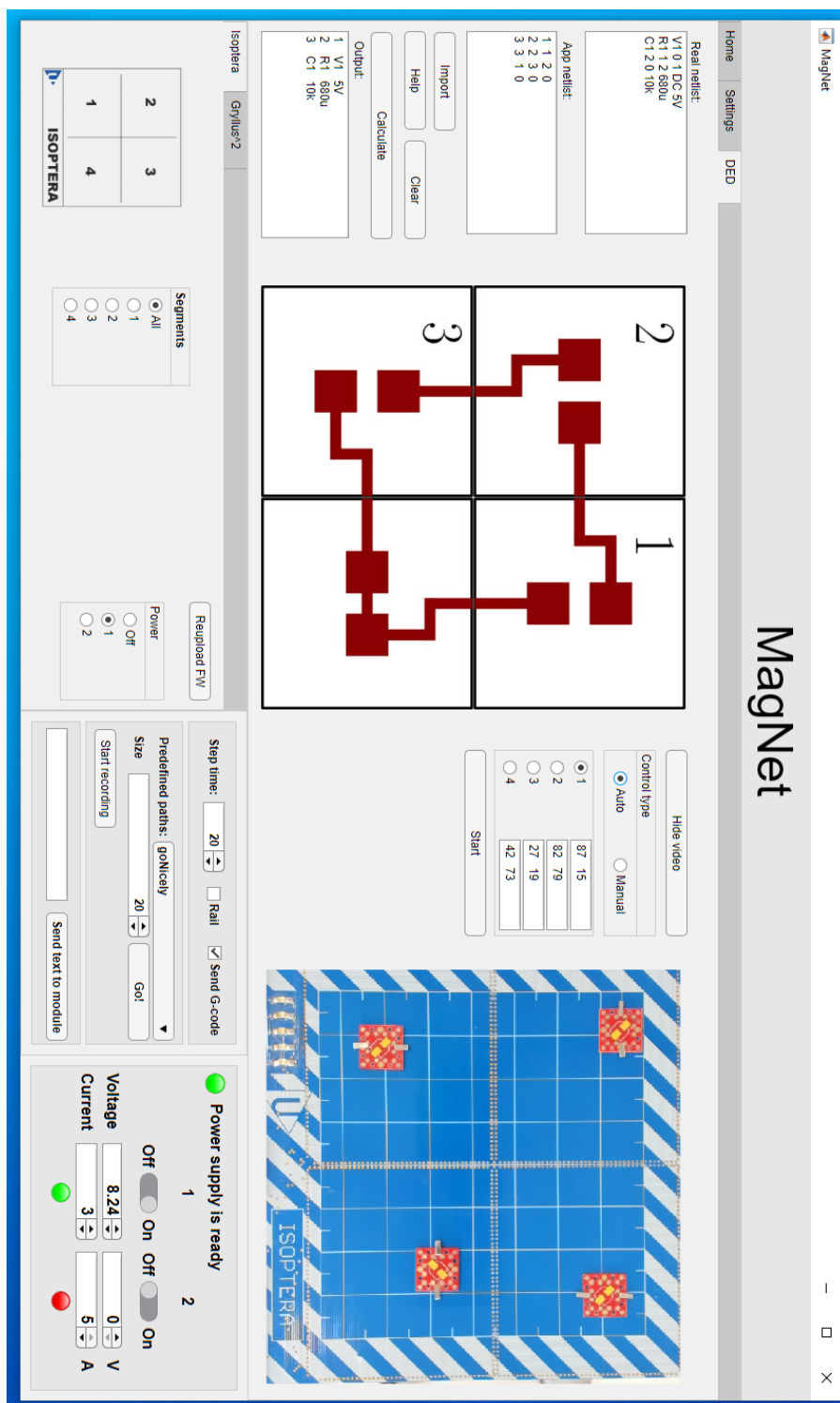
Aplikace MagNet



Obr. A.1: Úvodní domovská záložka aplikace MagNet.



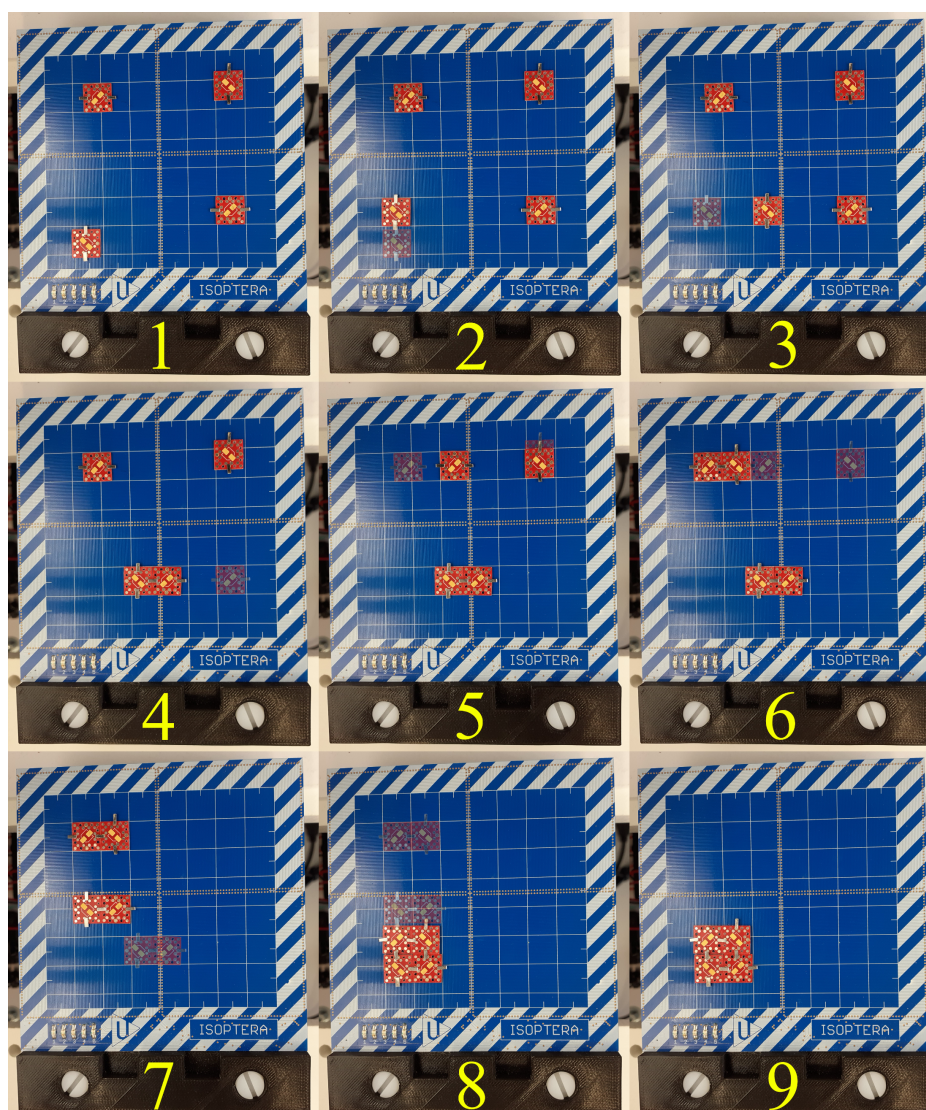
Obr. A.2: Záložka *Settings* v aplikaci MagNet.



Obr. A.3: Nově vytvořená záložka určená pro skládání digitálních materiálů v aplikaci MagNet.

Příloha B

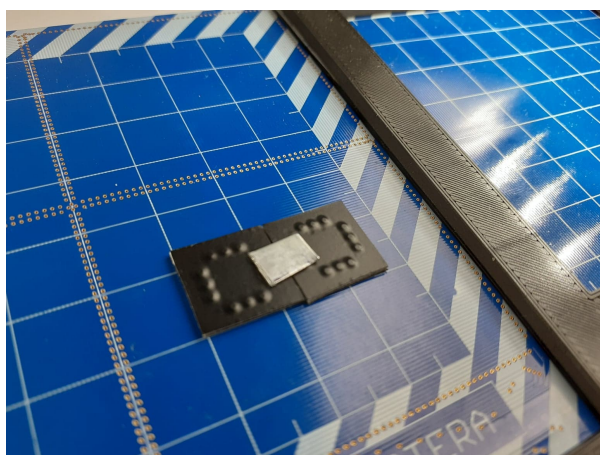
Skládání bitů



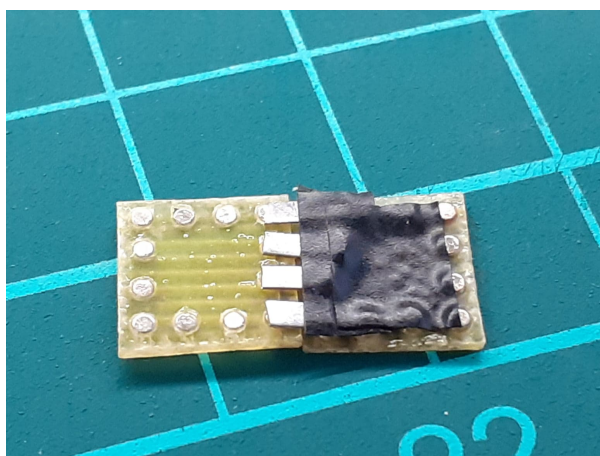
Obr. B.1: Soubor obrázků představující postupné pohyby bitů po magnetické platformě během skládání. Čísla označují posloupnost obrázků v čase. Pro tento pokus byla použita druhá verze bitů bez součástek s dočasnými improvizovanými plíšky z první verze bitů.

Příloha C

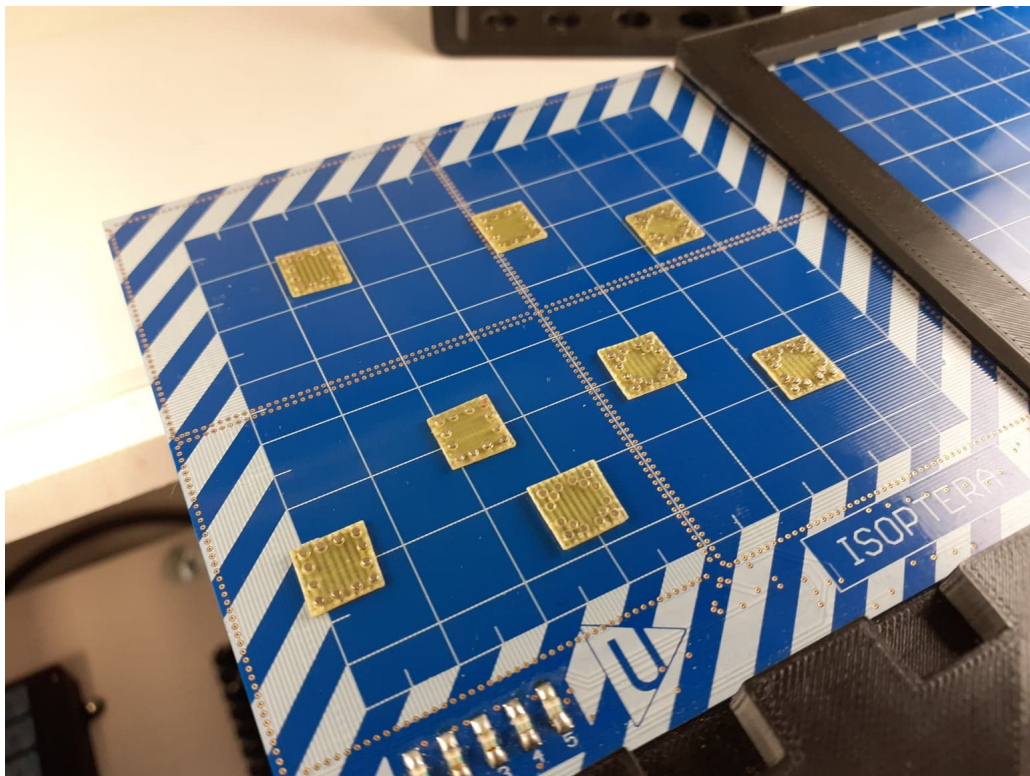
Fotky z experimentů



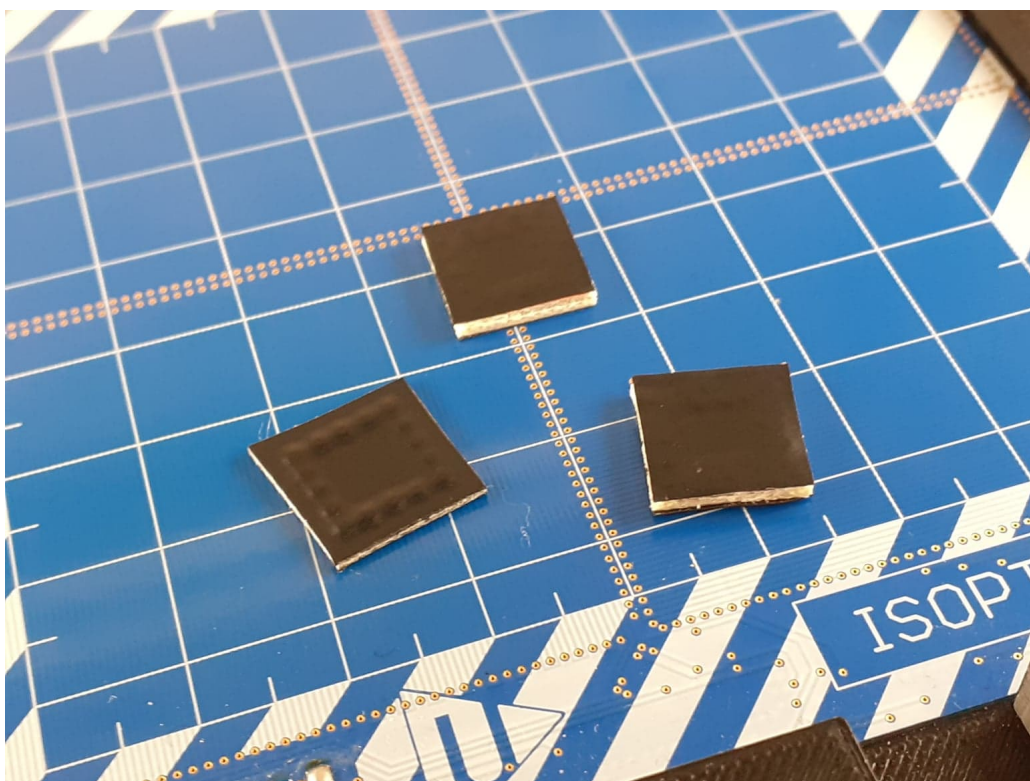
Obr. C.1: Jedno z prvních testování spojení bitů na magnetické platformě. Lze si všimnout, že magnety v destičce drží pomocí izolační pásky a nikoliv za pomoci lepidla a rozložení magnetů není ideální.



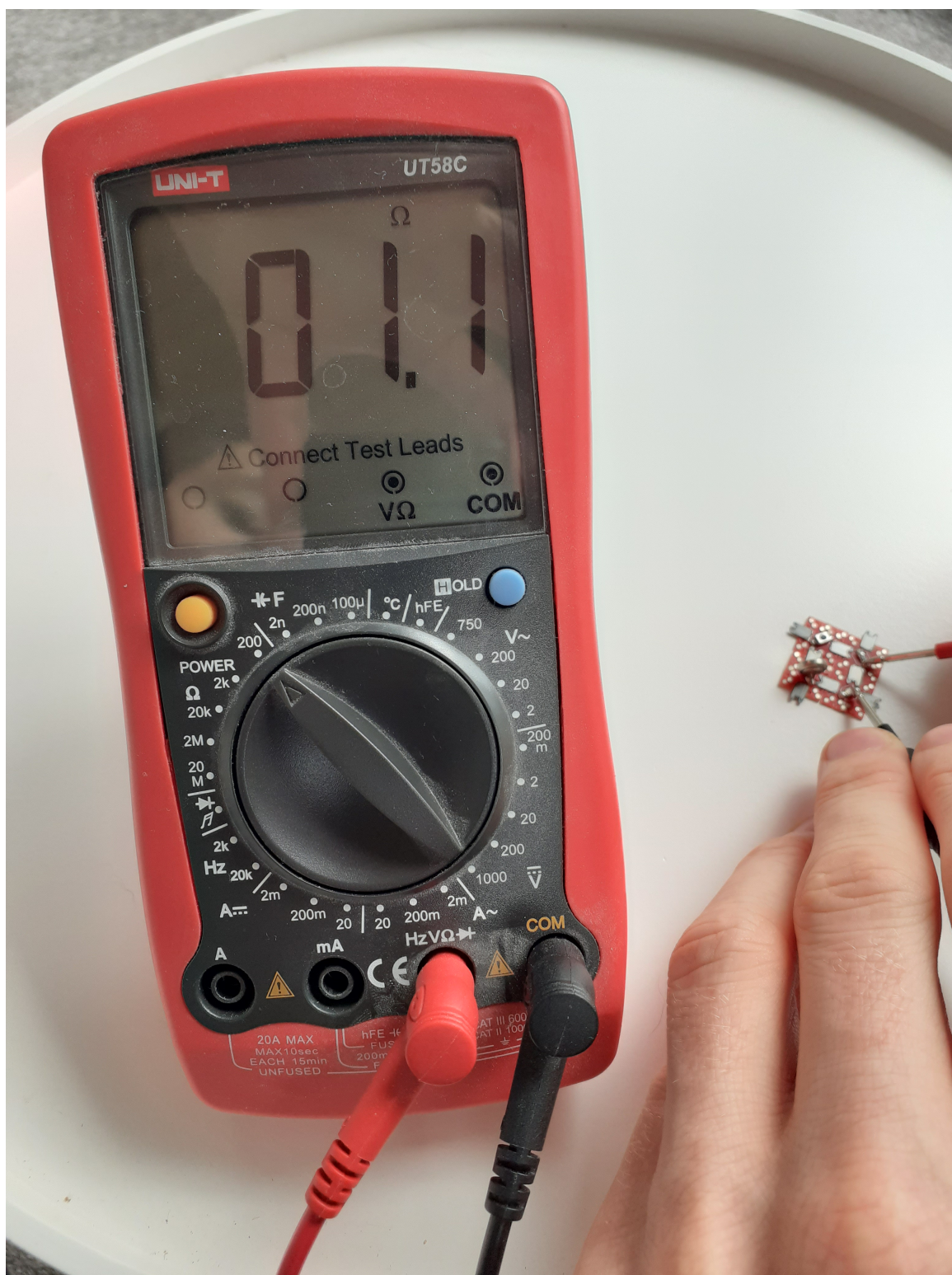
Obr. C.2: Příklad spojení bitů pomocí většího počtu menších vodivých plíšků. Plíšky jsou upevněny na jeden z bitů pomocí izolační pásky, ale magnety jsou již připevněny lepidlem UNIVERSUM. Bity mají netradiční velikost 8×8 mm.



Obr. C.3: Příklady prvních prototypů bitů s velikostí 8×8 mm.



Obr. C.4: Testování ideální tloušťky DPS pro potřeby bitů. Na obrázku jsou k vidění tloušťky 0,5 mm vlevo a 1 mm u destiček vpravo.



Obr. C.5: Měření přechodového odporu druhé verze plnohodnotných prototypů. Měření probíhá přímo na vývodech dvou součástek v sériovém obvodu, který je rozpojený tlačítkem. Měření tudíž probíhá pouze skrze dvojici magnetů, po jednom na každém bitu, a přes jeden magnetický plíšek, čili přes jeden kompletní spoj dvou bitů.