



Středoškolská technika 2024

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Funkce logických členů v kalkulačce

Lenka Weisová

Gymnázium Teplice
Čs. Dobrovolců 11, 415 01 Teplice

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

FUNKCE LOGICKÝCH ČLENŮ V
KALKULAČCE

THE FUNCTION OF LOGICAL GATES IN
CALCULATOR

AUTOR	Lenka Weisová
ŠKOLA	Gymnázium Teplice, Čs. Dobrovolců
KRAJ	Ústecký
ŠKOLITEL	RNDr. Zdeněk Vácha
OBOR	10. Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Teplice 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že svou práci na téma *Funkce logických členů v kalkulačce* jsem vypracoval/a samostatně pod vedením RNDr. Zdeněk Vácha a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že tištěná i elektronická verze práce SOČ jsou shodné a nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Teplicích dne: _____

Lenka Weisová

Anotace

Tato práce se zabývá fungováním logických členů a jejich sestavením z tranzistorů a rezistorů. Poté se práce zabývá sestavením kalkulačky schopné sčítání, odčítání a násobení z logických členů.

Klíčová slova

Kalkulačka, logický člen, binární soustava, sčítání, odečítání, násobení

Annotation

This work is about the functioning of logical gates and construction of logical gates from tranzistors and rezistors. This work is salso about the construction of calculator capable of addition, subtraction and multiplication from logical gates.

Keywords

Calculator, logical gates, Binary number, addition, subtraction, multiplication

Obsah

Úvod	7
1 Teoretická část	8
1.1 Logický člen	8
1.1.1 Součástky potřebné pro stavbu logického členu	8
1.1.2 Logické funkce	13
1.1.3 Logický člen AND	13
1.1.4 Logický člen OR	14
1.1.5 Logický člen XOR	15
1.1.6 Logický člen NOT	16
1.1.7 Logický člen NAND	17
1.1.8 Logický člen NOR	18
1.2 Kalkulačka	19
1.2.1 Sčítací kalkulačka	19
1.2.2 Odčítací kalkulačka	21
1.2.3 Sčítací-odčítací kalkulačka	23
1.2.4 Násobící kalkulačka	24
2 Praktická část	25
2.1 Konstrukce logických členů	25
2.1.1 Breadboard	25
2.1.2 Konstrukce logického členu AND	26
2.1.3 Konstrukce logického členu OR	30
2.1.4 Konstrukce logického členu XOR	33

2.1.5	Konstrukce logického členu NOT	36
2.1.6	Konstrukce logického členu NAND	38
2.1.7	Konstrukce logického členu NOR	41
2.1.8	Použité součástky na konstrukci logických členů	41
2.2	Konstrukce kalkulačky	43
2.2.1	Sčítací kalkulačka	43
2.2.2	Odčítací kalkulačka	52
2.2.3	Sčítací a odčítací kalkulačka	57
2.2.4	Násobící kalkulačka	59
2.2.5	Sčítací, odčítací a násobící 4-bitová kalkulačka	61
2.2.6	Použité součástky ke stavbě kalkulačky	64
Závěr		65
	Literatura a zdroje	69
	Seznam obrázků	73

Úvod

Každý den se setkáváme se zařízeními jako počítač, mobilní telefon a televize. Všichni víme, že tato zařízení v sobě mají své počítače, ale počítače jsou i v pračkách, automatech nebo v autech. Jelikož jsme dnes počítači úplně obklopeni a v případě techniky v autě nebo letadlech jim dokonce svěřujeme své životy, tak je podstatné rozumět základům fungování těchto strojů.

První počítače, jak naznačuje název, byly určeny k počítání a ačkoliv dnes, už umí provádět mnohem složitější operace, tak tato práce je zaměřena na sestavení zařízení schopného provádět jednoduché početní operace jako je sčítání, odčítání a násobení. Tyto kalkulačky lze sestavit zapojením logických členů. Tato práce je zaměřena na vysvětlení a ukázání, jak tyto logické členy fungují, a i jejich skutečné sestavení. Poté je práce zaměřena na použití těchto logických členů ve sčítací, odčítací a násobící kalkulačce.

Kapitola 1

Teoretická část

Teoretická část se zabývá vysvětlením logických členů a jejich následnému použití v kalkulačce.

1.1 Logický člen

Logický člen vyčísluje určitou logickou funkci. Na základě jedné nebo více vstupních hodnot 0 nebo 1 vyprodukuje jednu výslednou hodnotu 0 nebo 1. Tyto hodnoty jsou také často nazývány jako pravda pro 1 a nepravda pro 0.[1] Logický člen představuje vytvoření obvodu schopného provádět logické funkce. [2] [3]

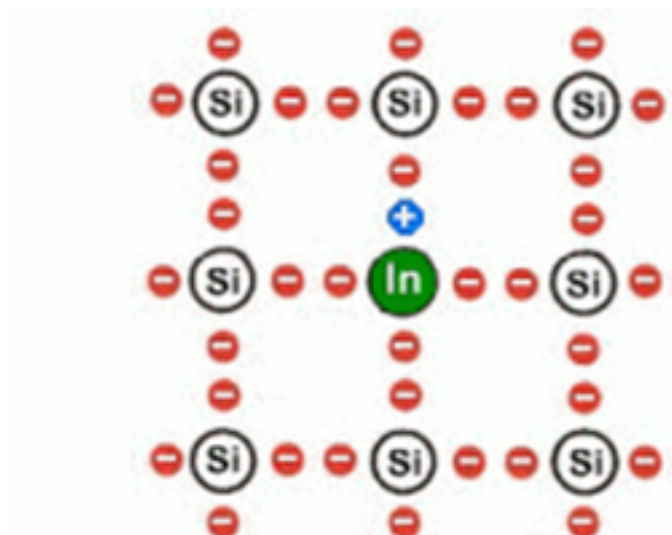
V následujících kapitolách budou popsány součástky ze kterých se moderní logické členy staví. Následně také budou podrobně popsány základní logické členy AND, OR, XOR, NOT, NAND a NOR. A sestaveny budou v praktické části.

1.1.1 Součástky potřebné pro stavbu logického členu

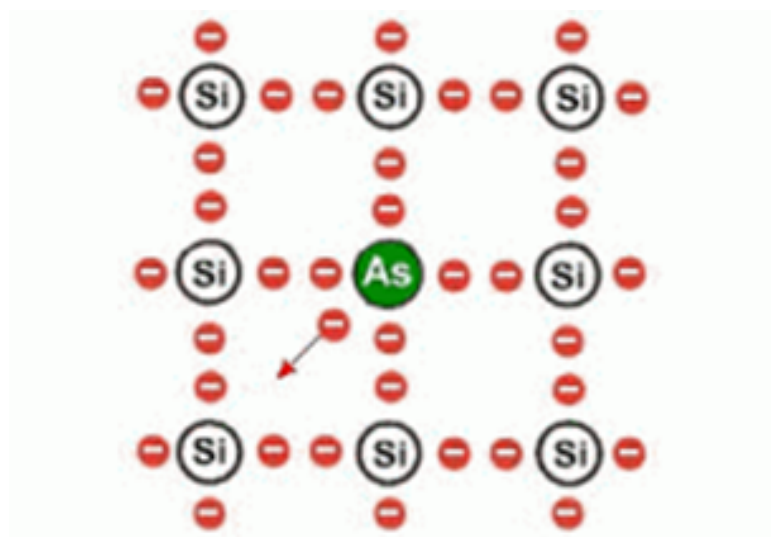
Logický člen je složen z tranzistorů, rezistorů a vodivých spojení. Na základě zapojení těchto součástek poté vyčísluje určitou logickou funkci. LED bude zobrazovat výsledný stav.

Tranzistor

Tranzistor je složen ze tří vrstev polovodičů typu N a P. Polovodič typu P je nevlastní polovodič s příměsí třívalného prvku. (viz obr. 1.1) Polovodič typu N je nevlastní polovodič s příměsí pěti vazného prvku. (viz obr. 1.2)

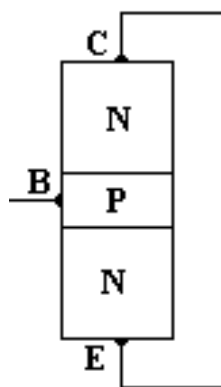


Obrázek 1.1: Polovodič typu P [4]



Obrázek 1.2: Polovodič typu N [4]

Polovodiče typu N a P se v tranzistoru střídají. V tranzistoru tak vzniknou dva PN přechody. Skrz PN přechod prochází proud s minimálním odporem pouze jedním směrem. Pokud je PN přechod opačným směrem, pak by skrz něj ideálně neměl procházet žádný proud. Díky této vlastnosti PN přechodů slouží tranzistor k regulaci, zesilování a jako spínač. V logických členech bude použit jako spínač. Pokud do báze jde proud, tak tranzistor proud propouští. Pokud do báze proud nejde, tak tranzistor proud nepropouští. [5] [6]



Obrázek 1.3: Zobrazení tranzistoru NPN [5]

Symbyly tranzistorů použité v této práci pro tranzistor PNP (viz obr. 1.4) a pro tranzistor NPN (viz obr. 1.5) .



Obrázek 1.4: Symbol tranzistoru PNP [7]



Obrázek 1.5: Symbol tranzistor NPN [7]

Rezistor

Rezistor je součástka s elektrickým odporem. Rezistor se obvykle používá k ovlivnění proudu a snížení napětí. Pro standartní rezistor se používají dva různé symboly. [8] Symbol používaný převážně v evropě (viz obr. 1.6) a symbol používaný převážně v USA a Japonsku (viz obr. 1.7). [9]



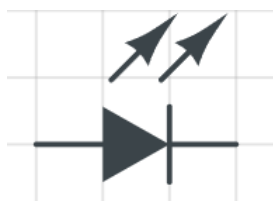
Obrázek 1.6: Symbol rezistoru IEC [7]



Obrázek 1.7: Symbol rezistoru US [7]

LED

LED je zkratka z anglických slov Light-Emitting Diode. Je to dioda vyzařující světlo. Uvnitř LEDky je jeden PN přechod, proto prochází diodou proud pouze jedním směrem.



Obrázek 1.8: Symbol LED [7]

1.1.2 Logické funkce

Logická funkce vrací pro konečný počet vstupních hodnot logické hodnoty. Nás budou zajímat pouze logické funkce s maximálně dvěma vstupy. Z těchto logických funkcí je možné sestavit všechny ostatní. [10]

1.1.3 Logický člen AND

Logický člen AND provádí logický součin, má pravdivou hodnotu pouze, když jsou oba jeho vstupy pravdivé. Tedy pro vstupní hodnoty 1 a 1 je výstupní hodnota 1 a pro všechny ostatní kombinace vstupních hodnot je výsledná hodnota 0. [11] [12]



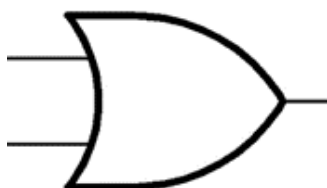
Obrázek 1.9: Symbol logického členu AND [13]

Vstupní hodnoty		Výstupní hodnota
A	B	
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Obrázek 1.10: Pravdivostní tabulka logického členu AND

1.1.4 Logický člen OR

Logický člen OR provádí logický součet, má pravdivou hodnotu, pokud je alespoň jedna vstupní hodnota pravdivá. Tedy má pro vstupní hodnoty 1 a 1, 1 a 0 a pro 0 a 1 výstupní hodnotu 1 a pro vstupní hodnoty 0 a 0 má výstupní hodnotu 0. [14] [15]



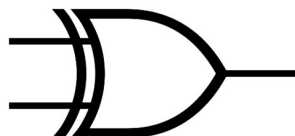
Obrázek 1.11: Symbol logického členu OR [16]

Vstupní hodnoty		Výstupní hodnota
A	B	
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Obrázek 1.12: Pravdivostní tabulka logického členu OR

1.1.5 Logický člen XOR

Logický člen XOR má pravdivou hodnotu, když je právě jedna vstupní hodnota pravdivá. Tedy pro vstupní hodnoty 1 a 0 a pro 0 a 1 je výstupní hodnota 1 pro vstupní hodnoty 0 a 0 a pro 1 a 1 je výstupní hodnota 0. [17]



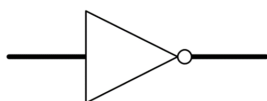
Obrázek 1.13: Symbol logického členu XOR [18]

Vstupní hodnoty		Výstupní hodnota
A	B	
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Obrázek 1.14: Pravdivostní tabulka logického členu XOR

1.1.6 Logický člen NOT

Logický člen NOT provádí logickou negaci. Je to jediný ze zde zmíněných členů, který má jednu vstupní a jednu výstupní hodnotu. Logický člen NOT neguje vstupní hodnotu. Pro vstupní hodnotu 1 bude výstupní hodnota 0 a pro vstupní hodnotu 0 bude výstupní hodnota 1. [19] [20]



Obrázek 1.15: Symbol logického členu NOT [21]

Vstupní hodnota	Výstupní hodnota
1	0
0	1

Obrázek 1.16: Pravdivostní tabulka logického členu NOT

1.1.7 Logický člen NAND

Logický člen NAND je negace logického součinu tedy kombinace logického členu NOT a AND. Pro vstupní hodnoty 0 a 1, 1 a 0 a pro 0 a 0 je jeho výstupní hodnota 1. [22] [23]



Obrázek 1.17: Symbol logického členu NAND [24]

Vstupní hodnoty		Výstupní hodnota
A	B	
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

Obrázek 1.18: Pravdivostní tabulka logického členu NAND

1.1.8 Logický člen NOR

Logický člen NOR je negace logického součtu tedy tvořen z logického členu NOT a OR. Logický člen má negované výstupní hodnoty logického členu OR. Tedy pouze pro vstupní hodnoty 0 a 0 je výstupní hodnota 1. [25] [26]



Obrázek 1.19: Symbol logického členu NOR [27]

Vstupní hodnoty		Výstupní hodnota
A	B	
1	1	0
1	0	0
0	1	0
0	0	1

Obrázek 1.20: Pravdivostní tabulka logického členu NOR

1.2 Kalkulačka

Kalkulačka je elektronické zařízení, které provádí matematické výpočty. Tato práce je zaměřena na tvorbu sčítací, odčítací a násobící kalkulačky, která bude operovat v binární soustavě.

1.2.1 Sčítací kalkulačka

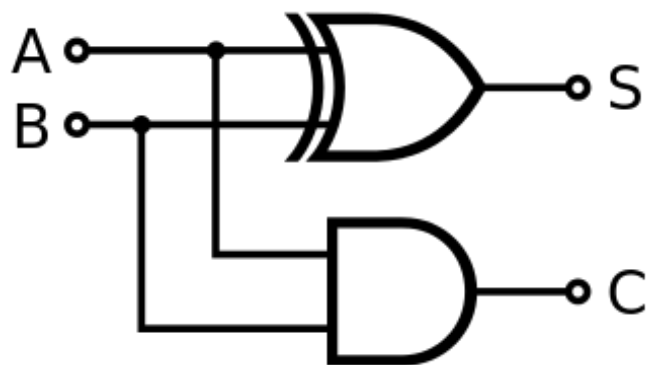
Sčítání je jednou z nejjednodušších matematických operací. Sčítání v binární soustavě je stejné jako sčítání v desítkové soustavě, ale k přenosu 1 do vyššího řádu dochází u $1+1=10$.

$$\begin{array}{r} 110 \\ + \underline{101} \\ \hline 1011 \end{array}$$

Obrázek 1.21: Příklad binárního sčítání

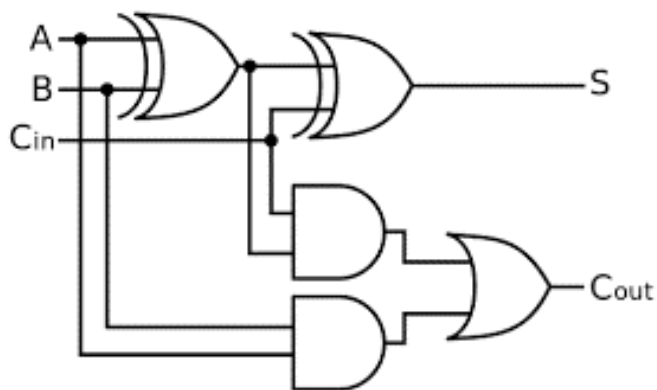
K sestavení 1-bitové sčítací kalkulačky, která zvládne vypočítat $1+1=2$ v desítkové soustavě nebo $1+1=10$ v binární soustavě, je potřeba 1 XOR a 1 AND logických členů. S bude signalizovat 2^0 a C bude signalizovat 2^1 . (viz obr. 1.22) Nazývá se neúplná sčítačka a s touto sčítačkou nelze provádět vícebitové sčítání. V zapojení bude označována podle svého anglického názvu Half Adder nebo zkratkou HA.

Pokud je právě jeden ze vstupů A nebo B zapnutý, pak po průchodu logickým členem XOR bude suma signalizovat pravdu. Pokud budou oba vstupy pravdivé, tak po průchodu logickým členem AND bude C signalizovat pravdu. Pokud nebude žádný ze vstupů zapojen žádný ze vstupů nebude signalizovat pravdu. Výsledkem bude 0. [28] [29]



Obrázek 1.22: Neúplná sčítačka [30]

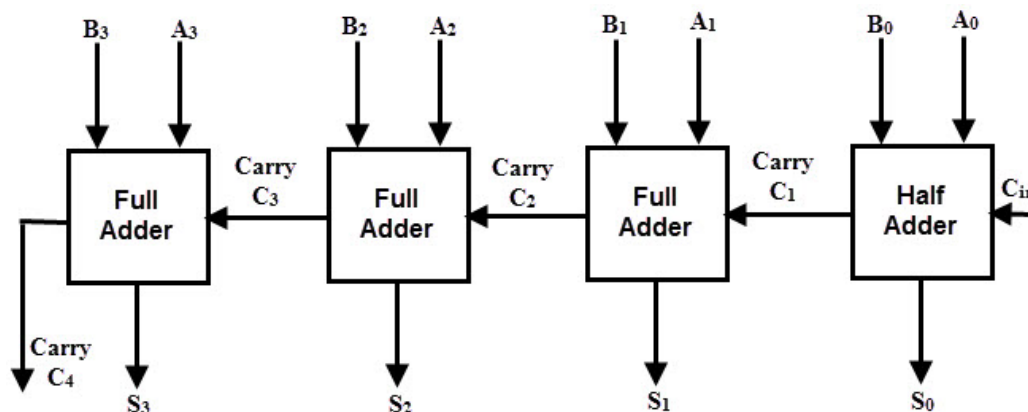
Pro kalkulačku s více vstupy je potřeba úplná sčítačka, která počítá nejen s A a B, ale i s možností, že předchozí součet byl přenesen do vyššího řádu. Úplná sčítačka se skládá ze 2 logických členů XOR, 2 logických členů AND a 1 logického členu OR. (viz obr. 1.23) V zapojení bude označována podle svého anglického názvu Full Adder nebo zkratkou FA.



Obrázek 1.23: Úplná sčítačka [31]

Všechny tyto kalkulačky jsou omezené počtem vstupů, počet vstupů je také označován jako počet bitů, tedy 1-bitová kalkulačka může mít vstupní hodnoty pouze 1 nebo 0, třeba 4-bitová kalkulačka má čtyři vstupy tedy její nejvyšší možná hodnota je 1111 v desítkové soustavě 15. K sestavení 4-bitové sčítací kalkulačky, která zvládne přijmout vstupy 1111 a tedy vypočítat

$15+15=30$ nebo $1111+1111=11110$ je zapotřebí 1 neúplná sčítačka a 3 úplné sčítačky (viz obr. 1.24), tedy 7 XOR, 7 AND a 3 OR logických členů. [32]



Obrázek 1.24: Zapojení 4-bitové sčítačky [33]

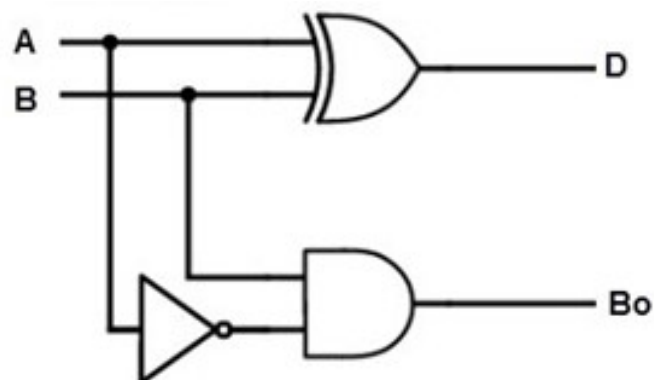
1.2.2 Odčítací kalkulačka

Odčítací kalkulačka provádí matematickou operaci odčítání.

$$\begin{array}{r} 111 \\ - 010 \\ \hline 101 \end{array}$$

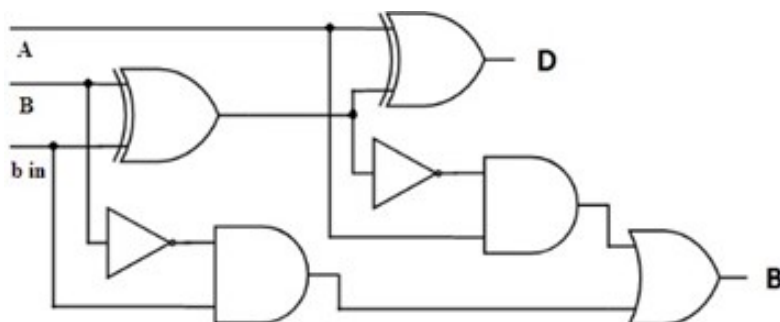
Obrázek 1.25: Příklad binárního odčítání

Stejně jako u sčítací kalkulačky máme neúplný odčítač, který zvládne pouze 1-bitové početní operace. Skládá se z 1 logického členu XOR, 1 logického členu NOT a 1 logického členu AND. Počítá $A-B$. Kde D je rozdíl a B_0/B je půjčení z vyššího řádu. Zapůjčení z vyššího řádu na posledním výpočtu značí, zda je výsledek záporný nebo ne.



Obrázek 1.26: Neúplná odčítačka [34]

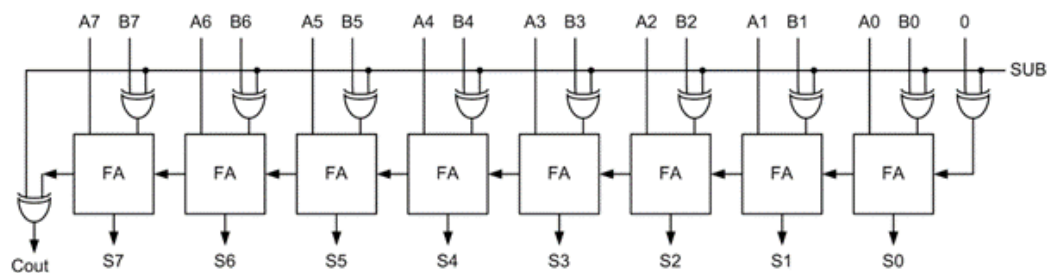
Pro vícebitové počítání je potřeba úplný odčítač, který počítá s čísly z vyšších řádů. Úplný odčítač se skládá z 2 logických členů XOR, 2 logických členů AND, 2 logických členů NOT a 1 logického členu OR. [35]



Obrázek 1.27: Úplná odčítačka [36]

1.2.3 Sčítací-odčítací kalkulačka

Kalkulačky nemají pouze jednu operaci, ale jsou schopné několika operací podle toho, které je vybraná. Sčítací a odčítací kalkulačka je schopna dvou matematických operací. K jejímu sestavení jsou zapotřebí úplné sčítačky a logické členy XOR. Pokud se podíváte na úplnou sčítačku (viz obr. 1.23) a úplnou odčítačku (viz obr. 1.27) můžete si všimnout, že se liší pouze 2 logickými členy NOT. Tuto funkci můžou v tomto specifickém zapojení zastávat i logické členy XOR. Sčítá při zapojení a odčítá při stisknutí SUB. Tato kalkulačka už ale nepočítá se záporným výsledkem, takže je nutné aby $A > B$.



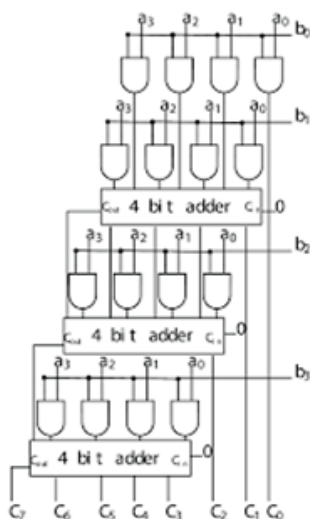
Obrázek 1.28: Sčítací-odčítací kalkulačka [37]

1.2.4 Násobící kalkulačka

Následující matematickou operací je násobení. Násobení je v desítkové soustavě mnohem náročnější než sčítání a odčítání, ale ve dvojkové soustavě je to jinak. Jednociferné násobení v binární soustavě může proběhnout pouze třemi způsoby. První je $1 \times 1 = 1$, druhý je $1 \times 0 = 0$ a $0 \times 1 = 0$ a třetí $0 \times 0 = 0$. Takto vypadá přesně pravdivostní tabulka logického členu AND. Takže pouze znásobíme a sečteme jako při násobení pod sebou (viz obr. 1.29). Proto lze kalkulačku sestavit ze sčítacích kalkulaček a logických členů AND (viz obr. 1.30) (4 bit adder je z angličtiny 4-bitová sčítačka). [38]

$$\begin{array}{r}
 1101 \\
 \times 11 \\
 \hline
 1101 \\
 1101 \\
 \hline
 100111
 \end{array}$$

Obrázek 1.29: Příklad binárního násobení



Obrázek 1.30: 4-bitová násobící kalkulačka [39]

Kapitola 2

Praktická část

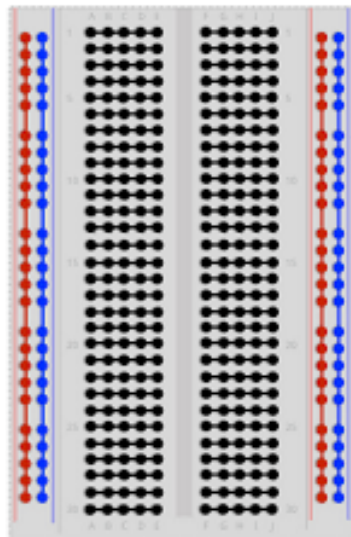
Praktická část se zabývá sestavením základních logických členů a sčítací, odčítací a násobící kalkulačka.

2.1 Konstrukce logických členů

Pro stavbu logických členů budou použity tranzistory NPN a metaloxidové rezistory. Pro sestavení bylo použito nepájivé pole Breadboard.

2.1.1 Breadboard

Zapojení součástek v nepájivém poli breadboard umožňuje vícekrát využít stejnou součástku. Zároveň v případě chyby je jednoduché ji napravit. Breadboard má propojené dva sloupce na každé straně pro napájení a také má propojené řádky. (viz obr. 2.1)

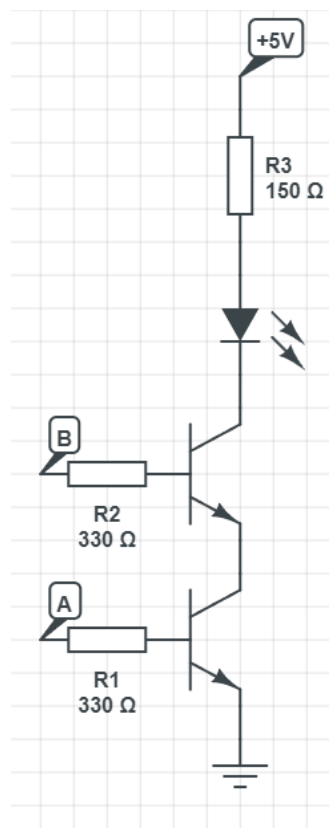


Obrázek 2.1: Breadboard [40]

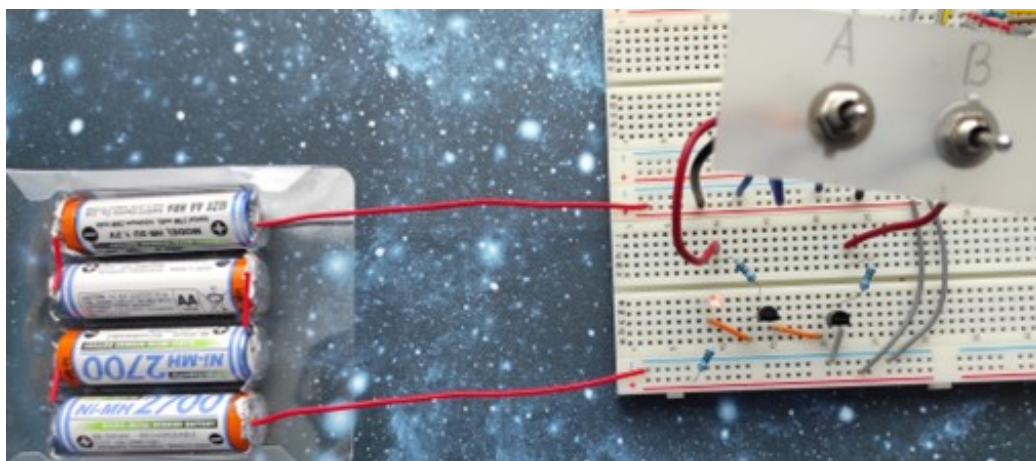
Všechny komponenty připojené k jednomu řádku jsou spojeny vodiči umístěnými uvnitř Breadboard, což umožňuje lehkou konstrukci elektronických obvodů bez pájení.

2.1.2 Konstrukce logického členu AND

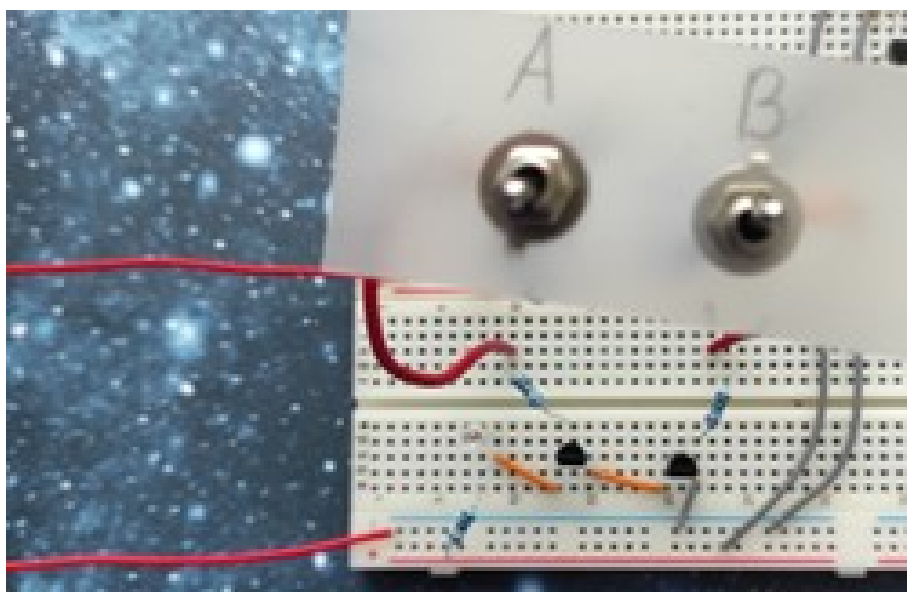
Pro sestavení logického členu AND byly potřeba dva přepínače, dva NPN tranzistory a dva rezistory o odporu 330 ohmů umístěné mezi přepínači a tranzistory a jeden rezistor o odporu 150 ohmů před LEDkou. (viz obr. 2.2) V nákresu obvodu značí A a B vstupy, tedy přepínače.



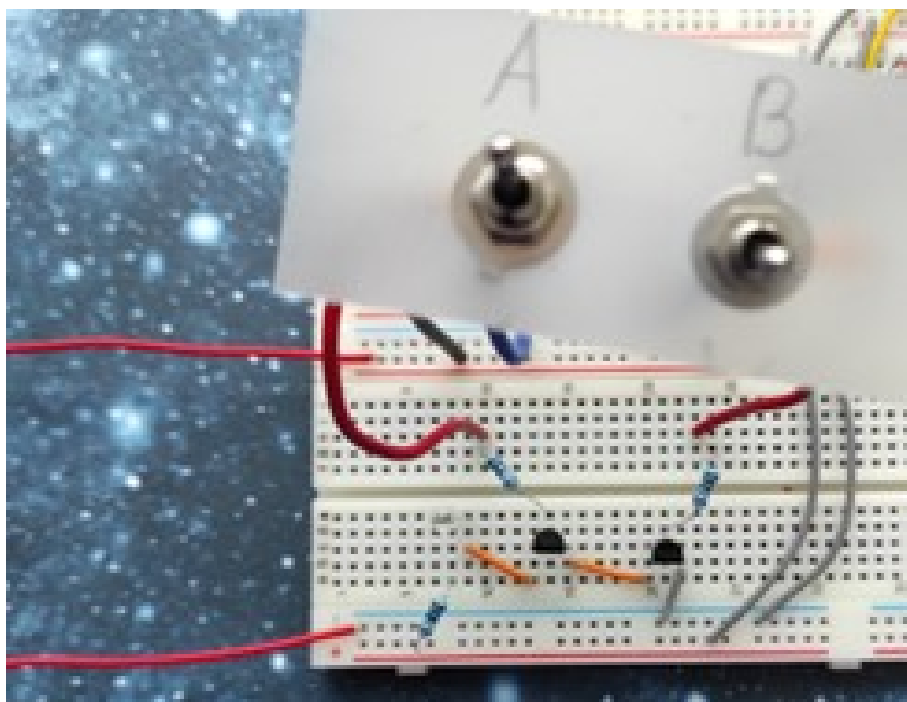
Obrázek 2.2: Schema zapojení logického členu AND [7]



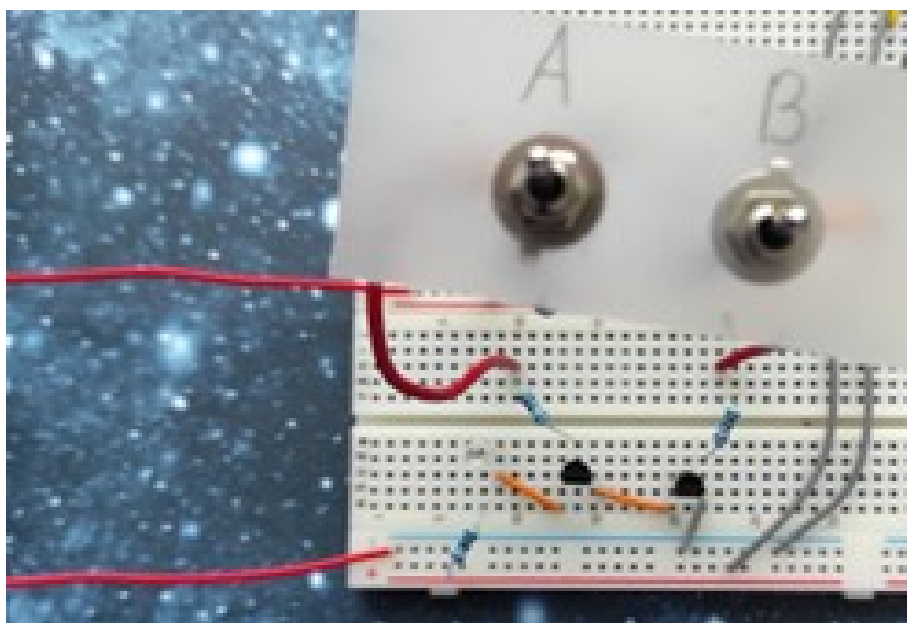
Obrázek 2.3: Logický člen AND se vstupními hodnotami 1 a 1



Obrázek 2.4: Logický člen AND se vstupními hodnotami 1 a 0



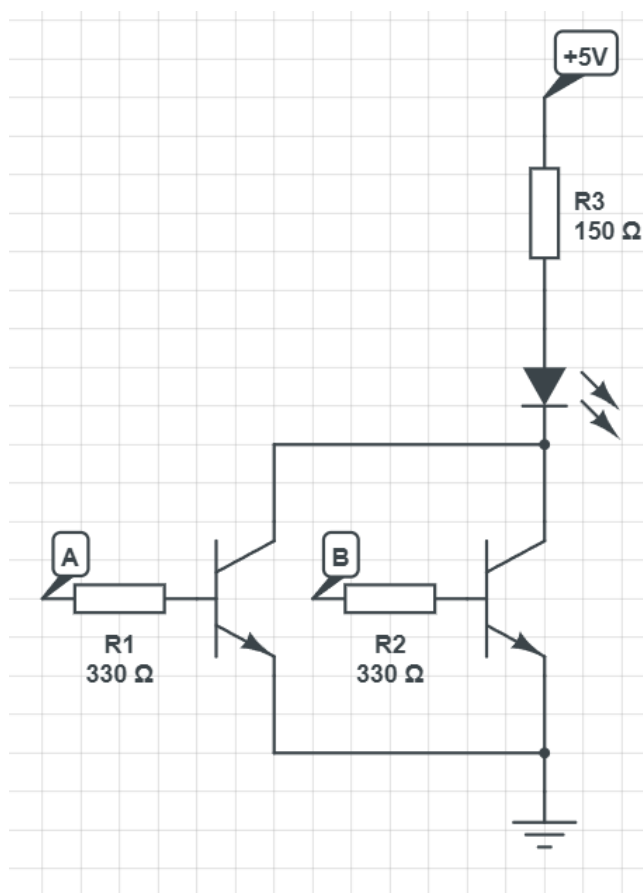
Obrázek 2.5: Logický člen AND se vstupními hodnotami 0 a 1



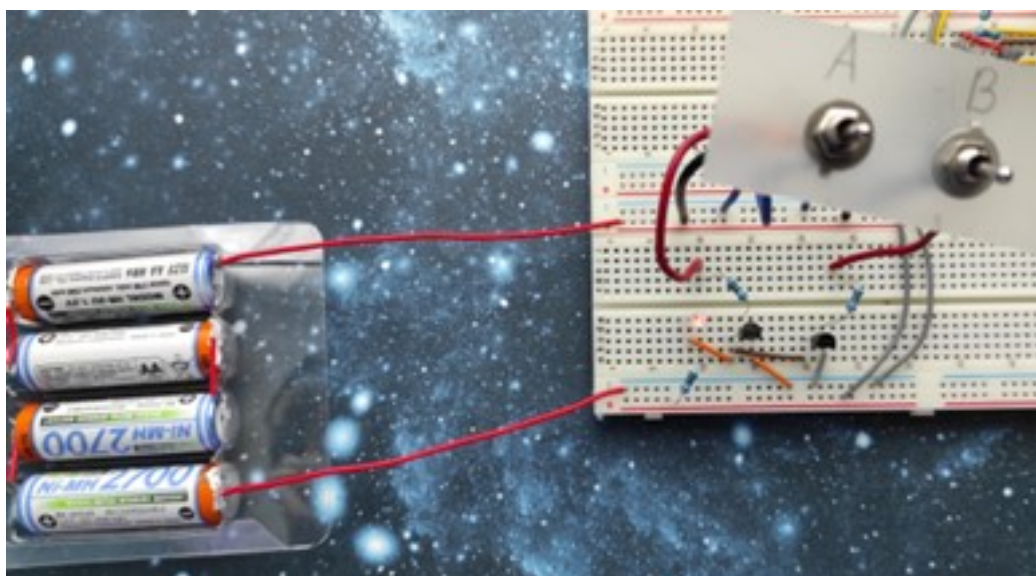
Obrázek 2.6: Logický člen AND se vstupními hodnotami 0 a 0

2.1.3 Konstrukce logického členu OR

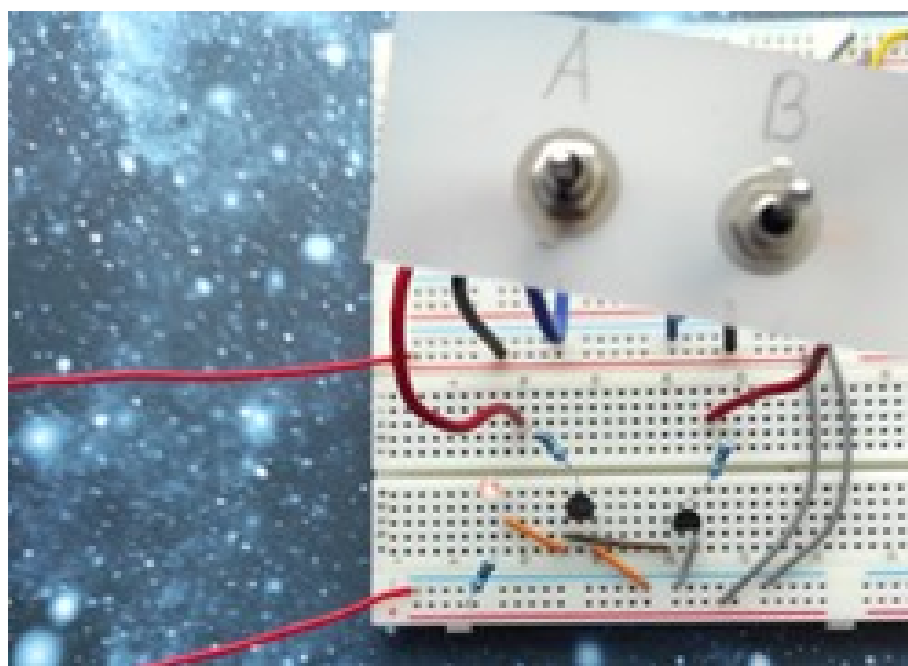
Pro sestavení logického členu OR byly potřeba dva NPN tranzistory, dva přepínače a dva rezistory o odporu $330\ \Omega$ umístěné mezi přepínači a tranzistory a jeden rezistor o odporu $150\ \Omega$ před LEDkou. V nákresu obvodu značí A a B vstupy, tedy přepínače. (viz obr. 2.7)



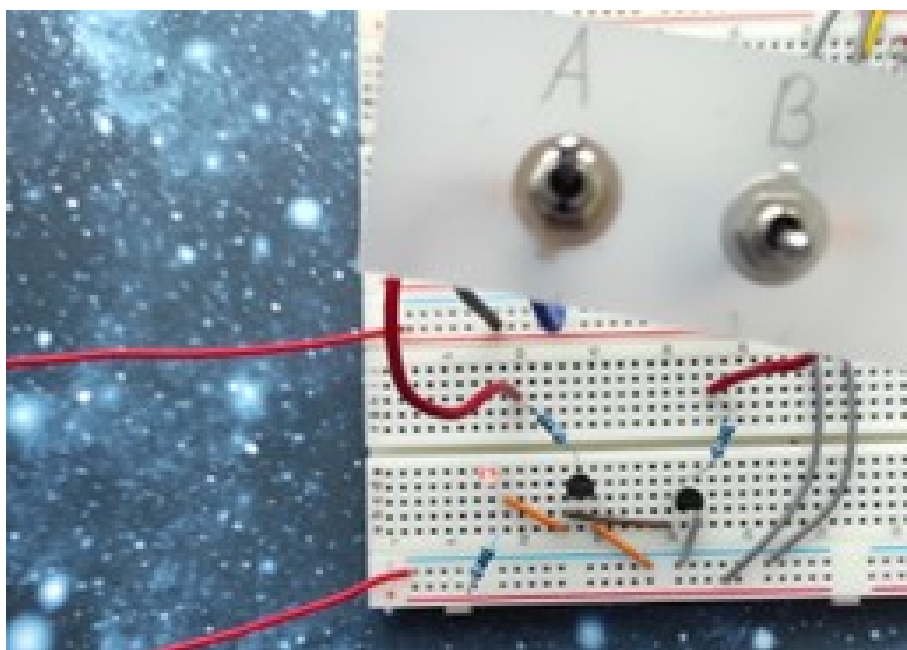
Obrázek 2.7: Schema zapojení logického členu OR [7]



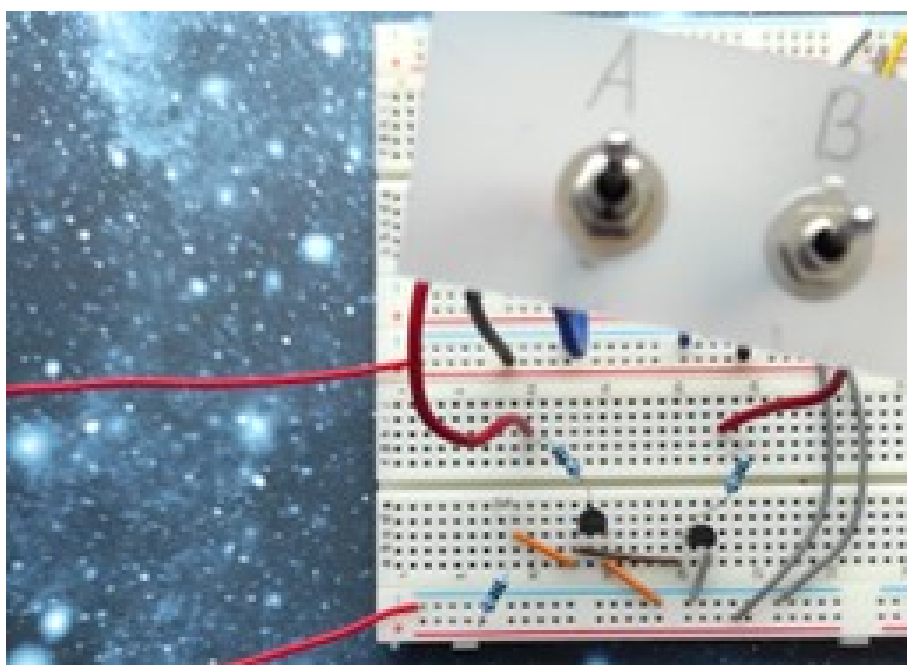
Obrázek 2.8: Logický člen OR se vstupními hodnotami 1 a 1



Obrázek 2.9: Logický člen OR se vstupními hodnotami 1 a 0



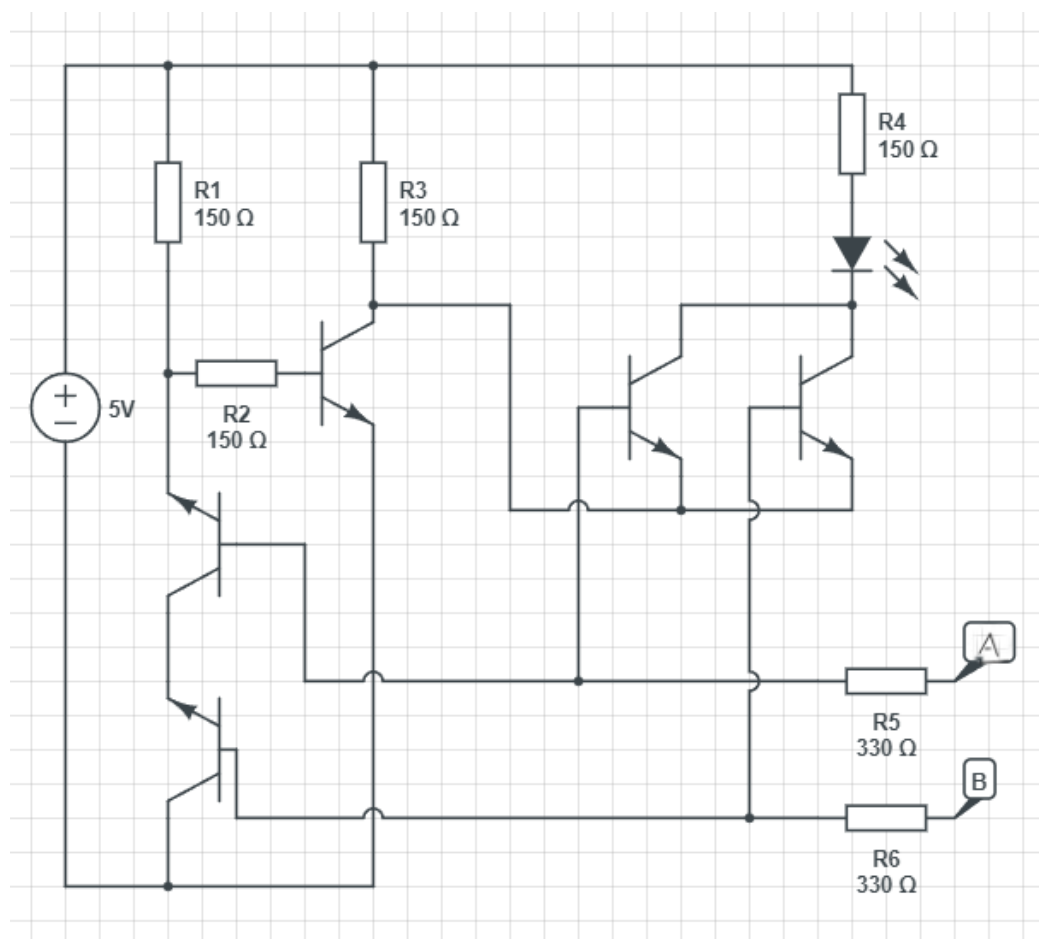
Obrázek 2.10: Logický člen OR se vstupními hodnotami 0 a 1



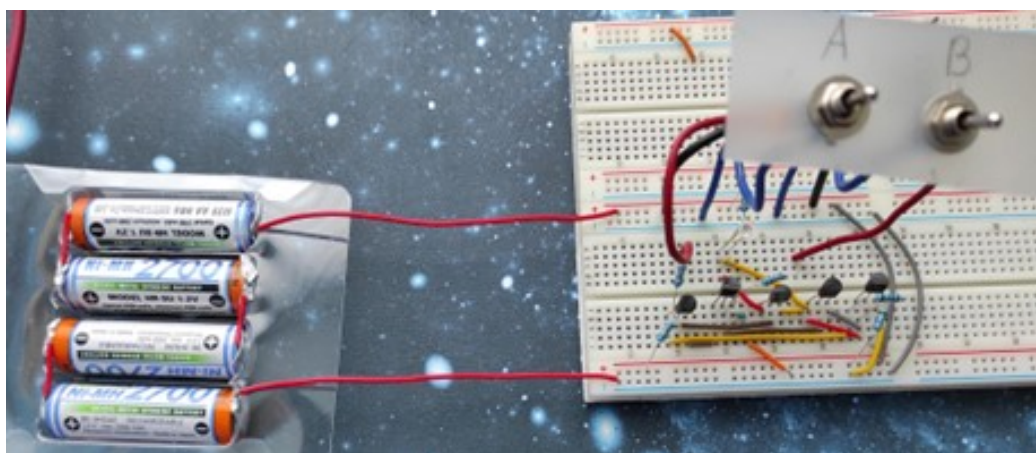
Obrázek 2.11: Logický člen OR se vstupními hodnotami 0 a 0

2.1.4 Konstrukce logického členu XOR

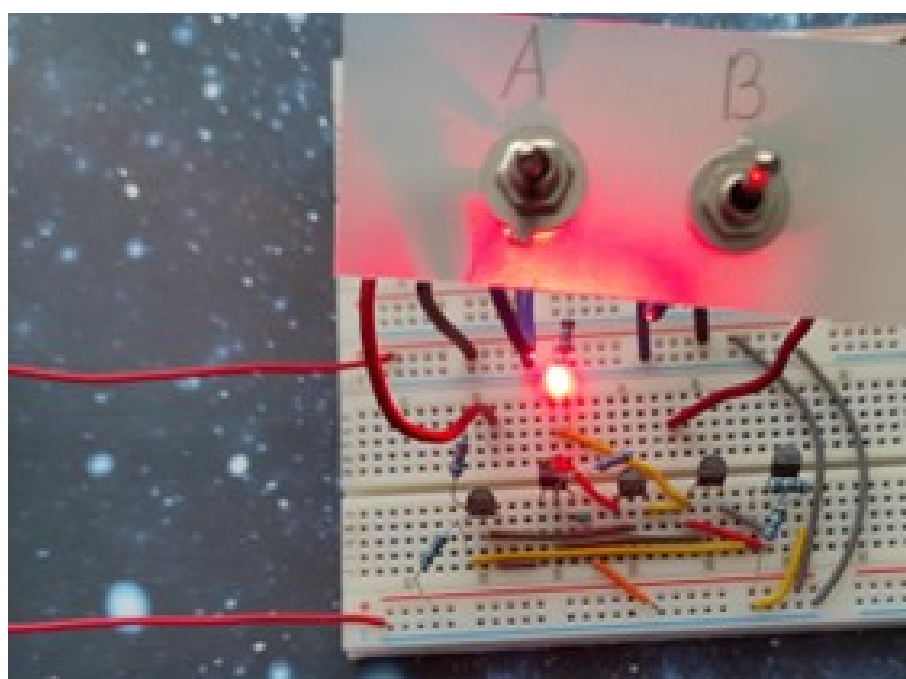
Pro sestavení logického členu XOR bylo potřeba pět NPN tranzistorů, dva přepínače, čtyři rezistory o odporu 150 ohmů a dva rezistory o odporu 330 ohmů umístěné u přepínačů. (viz obr. 2.12) V nákresu obvodu značí A a B vstupy, tedy přepínače.



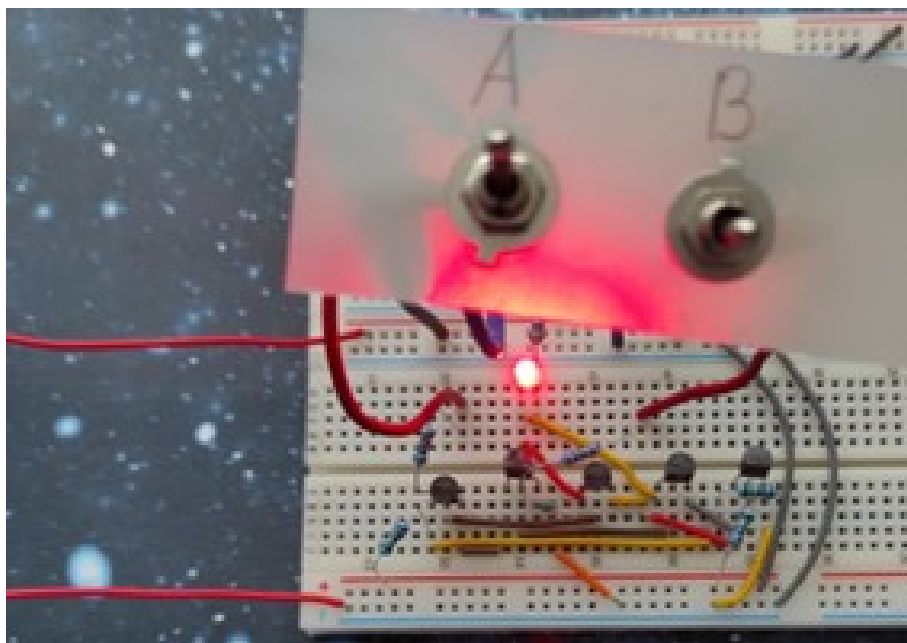
Obrázek 2.12: Schema zapojení logického členu XOR [7]



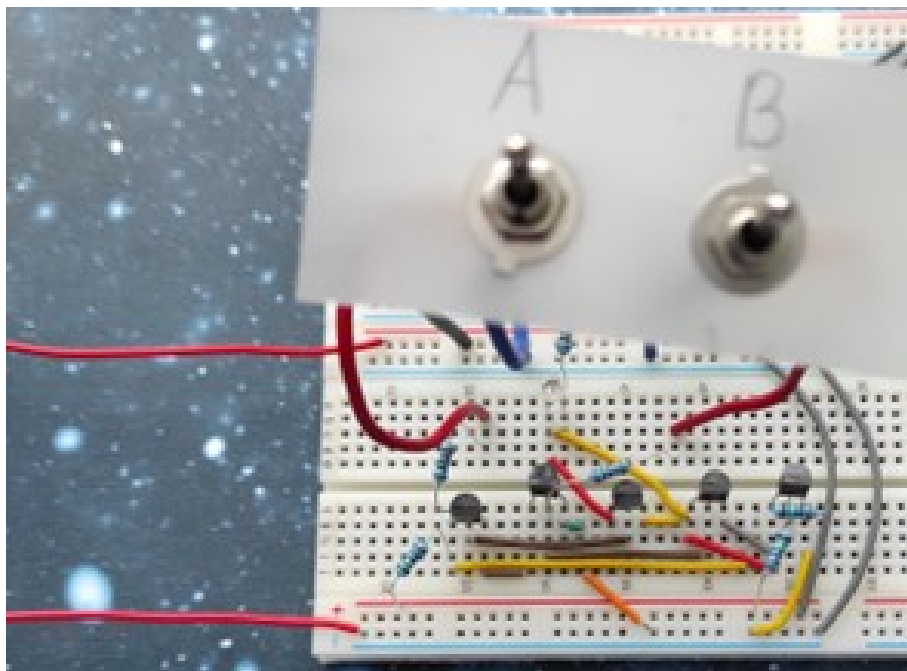
Obrázek 2.13: Logický člen XOR se vstupními hodnotami 1 a 1



Obrázek 2.14: Logický člen XOR se vstupními hodnotami 1 a 0



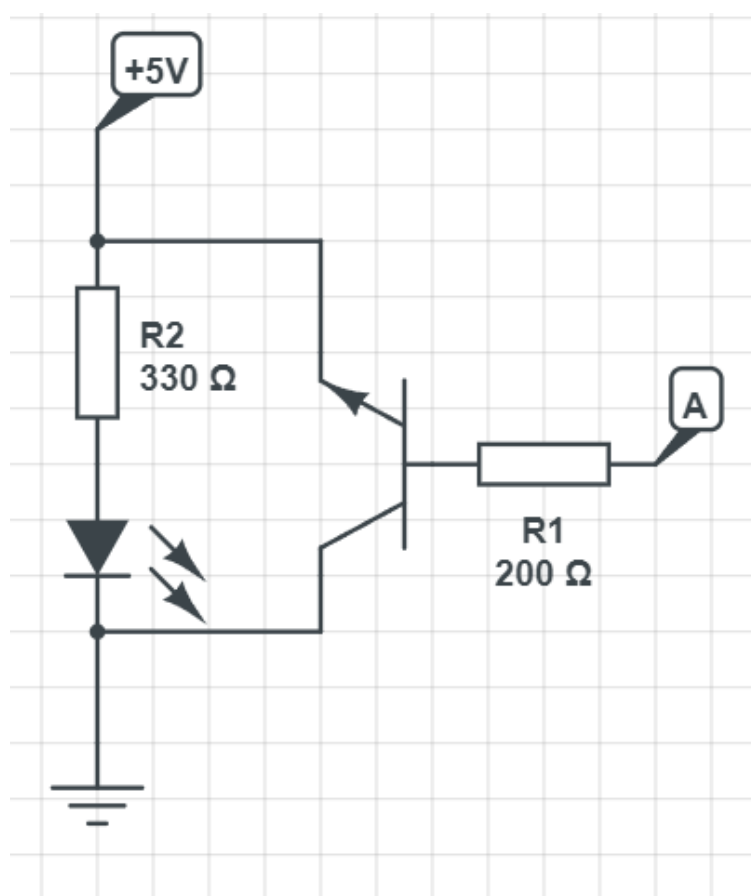
Obrázek 2.15: Logický člen XOR se vstupními hodnotami 0 a 1



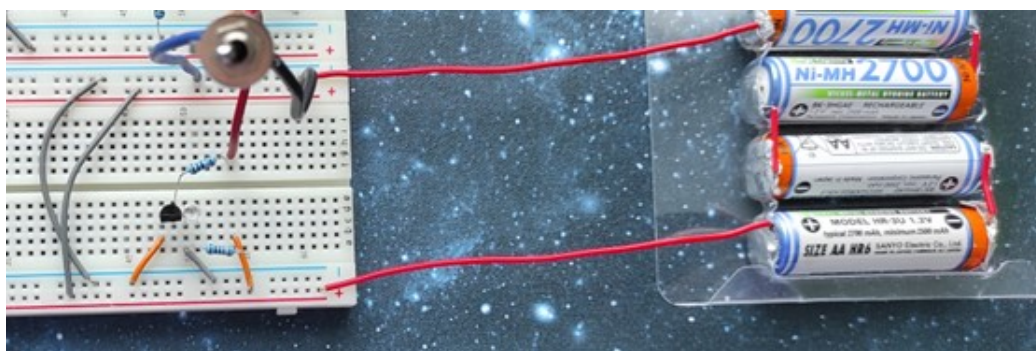
Obrázek 2.16: Logický člen XOR se vstupními hodnotami 0 a 0

2.1.5 Konstrukce logického členu NOT

Pro postavení logického členu NOT je potřeba jeden NPN tranzistor, jeden přepínač a jeden rezistor o odporu 200 ohmů umístěného mezi přepínačem a tranzistorem a jeden rezistor o odporu 330 ohmů umístěný mezi anodou diody a zdrojem. Logický člen ukazuje hodnotu 0, když je jeho vstupní hodnota 1 tedy je zapojen a hodnotu 1, když je jeho vstupní hodnota 0, tedy je vypojen. V nákresu obvodu značí A a B vstupy, tedy přepínače. (viz obr. 2.17)



Obrázek 2.17: Schema zapojení logického členu NOT [7]



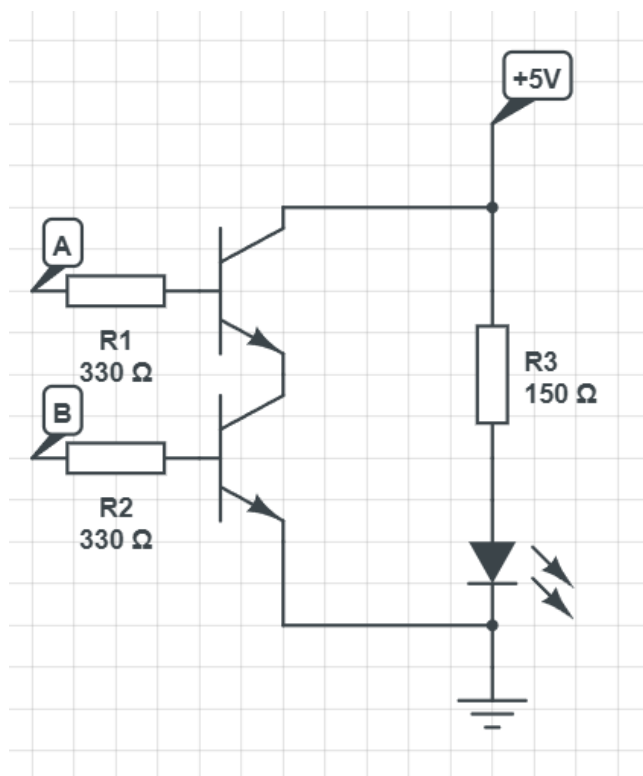
Obrázek 2.18: Logický člen NOT se vstupní hodnotou 1



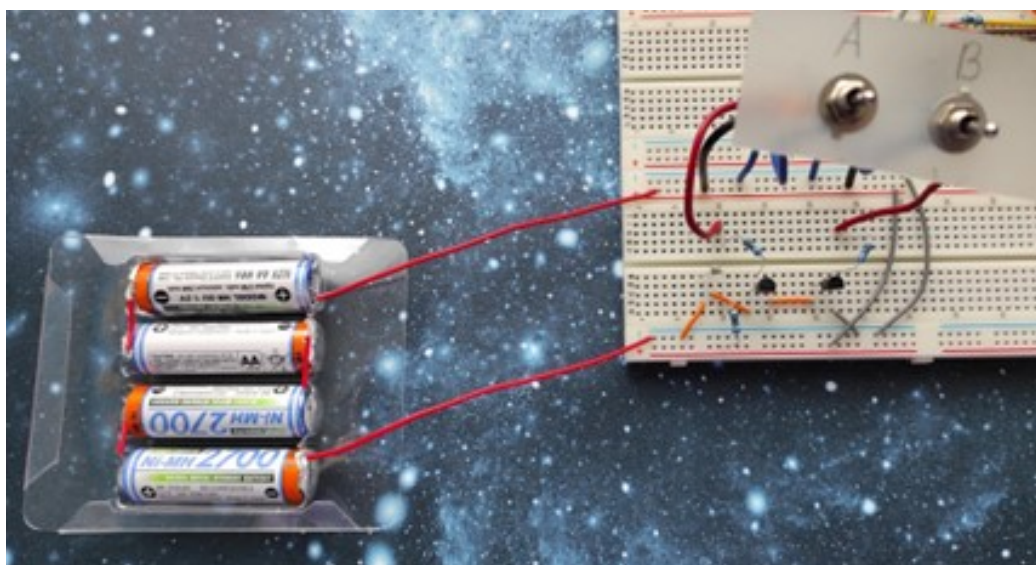
Obrázek 2.19: Logický člen NOT se vstupní hodnotou 0

2.1.6 Konstrukce logického členu NAND

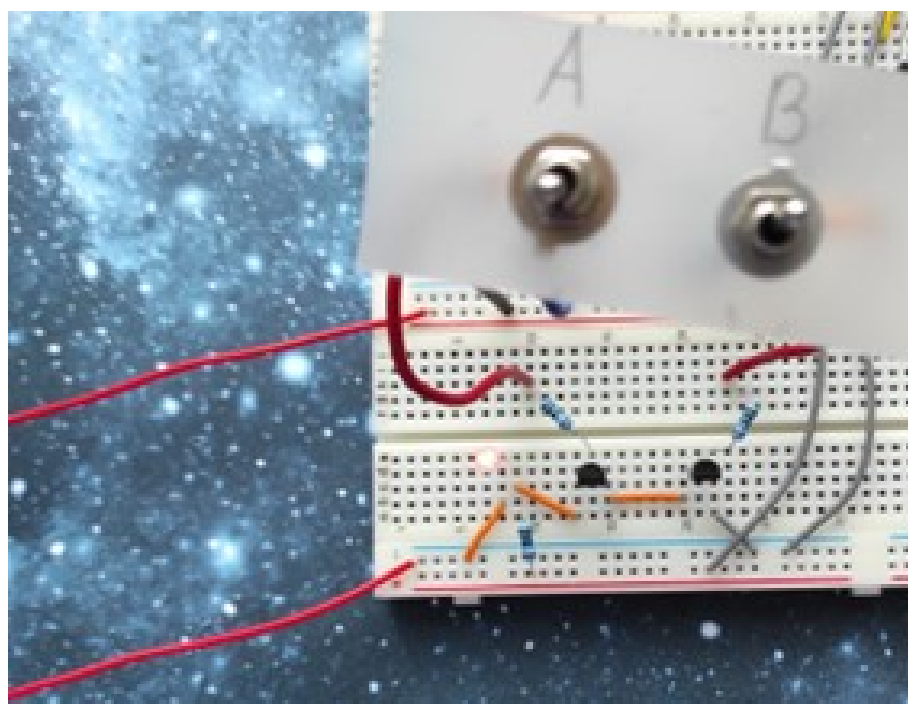
Pro sestavení logického členu NAND jsou potřeba dva NPN tranzistory, dva přepínače a tři rezistory o odporu 200 ohmů. (viz obr. 2.20) V nákrese obvodu značí A a B vstupy, tedy přepínače.



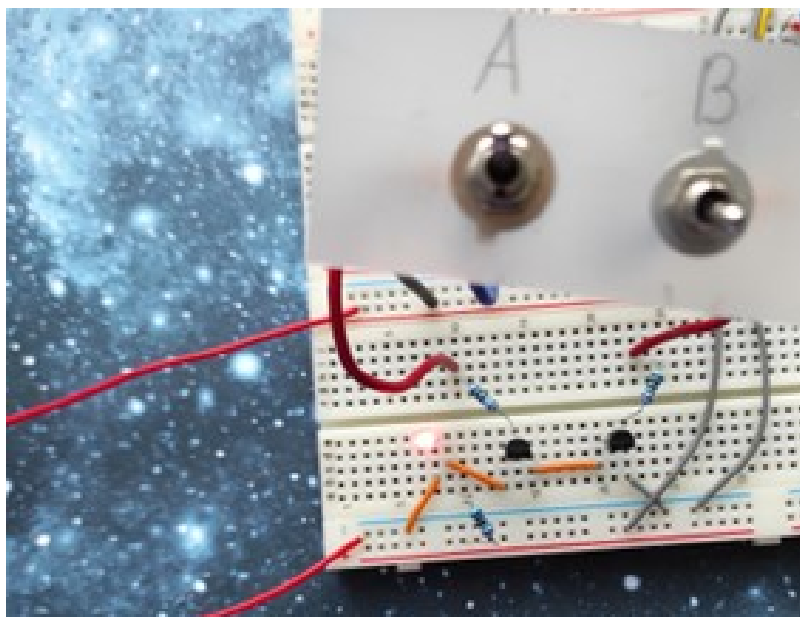
Obrázek 2.20: Schema zapojení logického členu NAND [7]



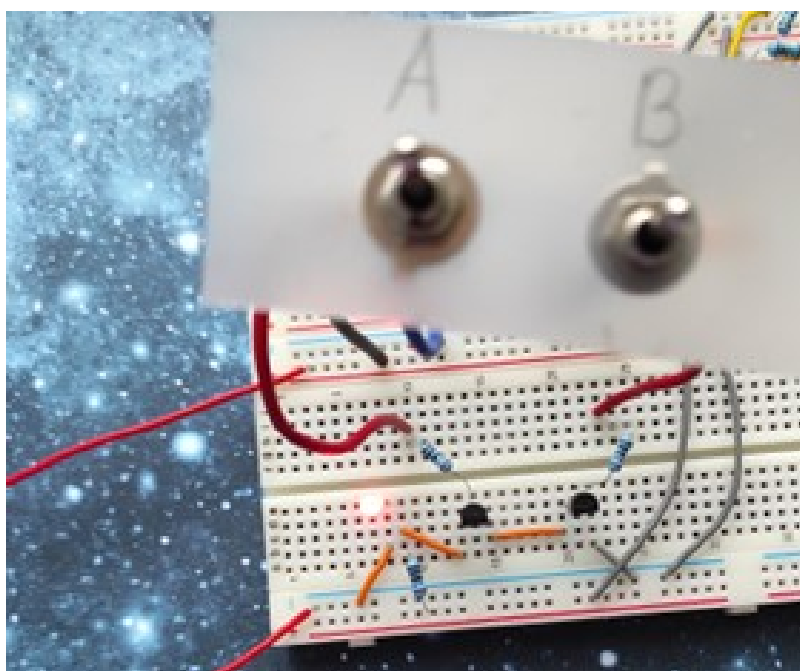
Obrázek 2.21: Logický člen NAND se vstupními hodnotami 1 a 1



Obrázek 2.22: Logický člen NAND se vstupními hodnotami 1 a 0



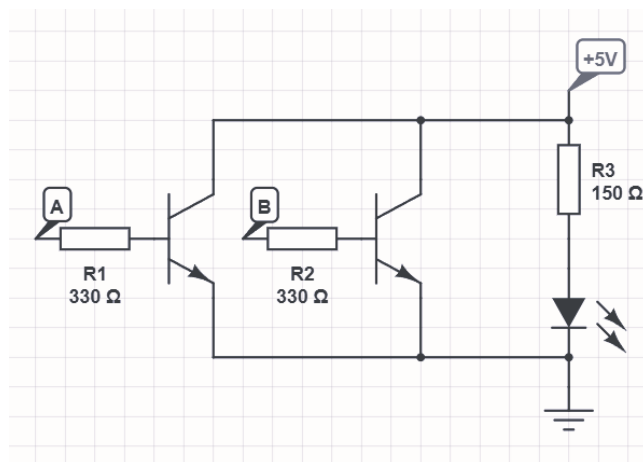
Obrázek 2.23: Logický člen NAND se vstupními hodnotami 0 a 1



Obrázek 2.24: Logický člen NAND se vstupními hodnotami 0 a 0

2.1.7 Konstrukce logického členu NOR

Pro sestavení logického členu NOR jsou potřeba dva NPN tranzistory, dva přepínače a tři rezistory o odporu 200 ohmů. (viz obr. 2.25) V nákrese obvodu značí A a B vstupy, tedy přepínače.



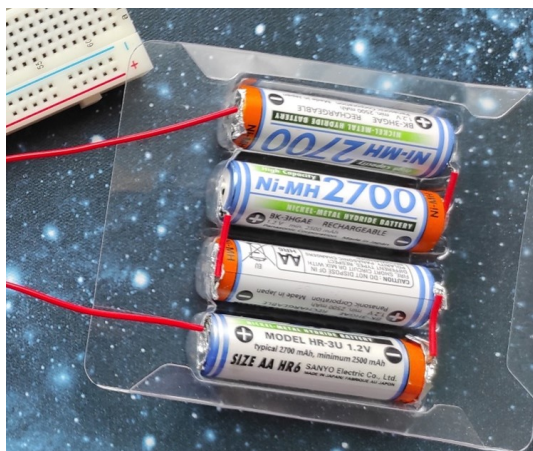
Obrázek 2.25: Schema zapojení logického členu NOR [7]

2.1.8 Použité součástky na konstrukci logických členů

Logické členy jsou z tranzistorů a rezistorů. Podle zapojení tranzistorů a rezistorů lze sestavit určité logické členy. Hodnoty vstupů zařizují přepínače a výsledky zobrazuje LED dioda. Obvod je napájen zdrojem o 4,8 voltech.

Zdroj

Byl použit zdroj o napětí 4,8 voltů. Tohoto se dosáhlo zapojením čtyř baterek, každé s napětím 1,2 voltů.



Obrázek 2.26: Zdroj

Rezistory

Použity byly různé rezistory v závislosti na obvodu. Rezistory byly hlavně použity ke snížení napětí působícím na LEDku. Nejčastěji byly použity rezistory o odporu 150 ohmů, 200 ohmů, 220 ohmů a 330 ohmů.

LED

Použité LEDky: 304VC4B-V1-2BD. Tyto LED diody mají typickou svítivost 1000 mcd při 20mA a 2 V, jejich maximální propustný proud je 30mA.

Tranzistory

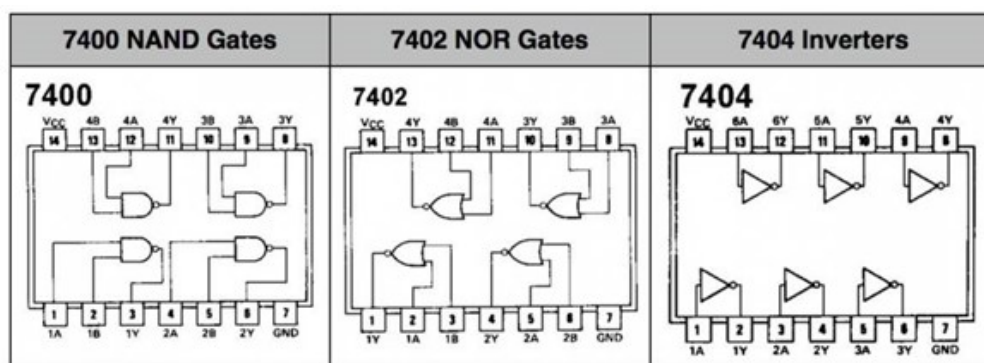
Byly použity NPN tranzistory. Použité tranzistory: BC337-25.

Přepínače

Byl použit páčkový přepínač: SMTS-102. Tento přepínač je určen maximálně do proudu 1,5 A a napětí 250 V AC.

2.2 Konstrukce kalkulačky

Kalkulačku lze sestavit pomocí logických členů, sestavených z tranzistorů a rezistorů, které jsme si již sestavili. Takové sestavení je možné, ale náročné na čas a prostor. Proto bude kalkulačka sestavena z již předem vyrobených čipů. Bude používat čipy obsahující čtyři logické členy a v případě logického členu NOT zde bude šest logických členů. (viz obr. 2.27)



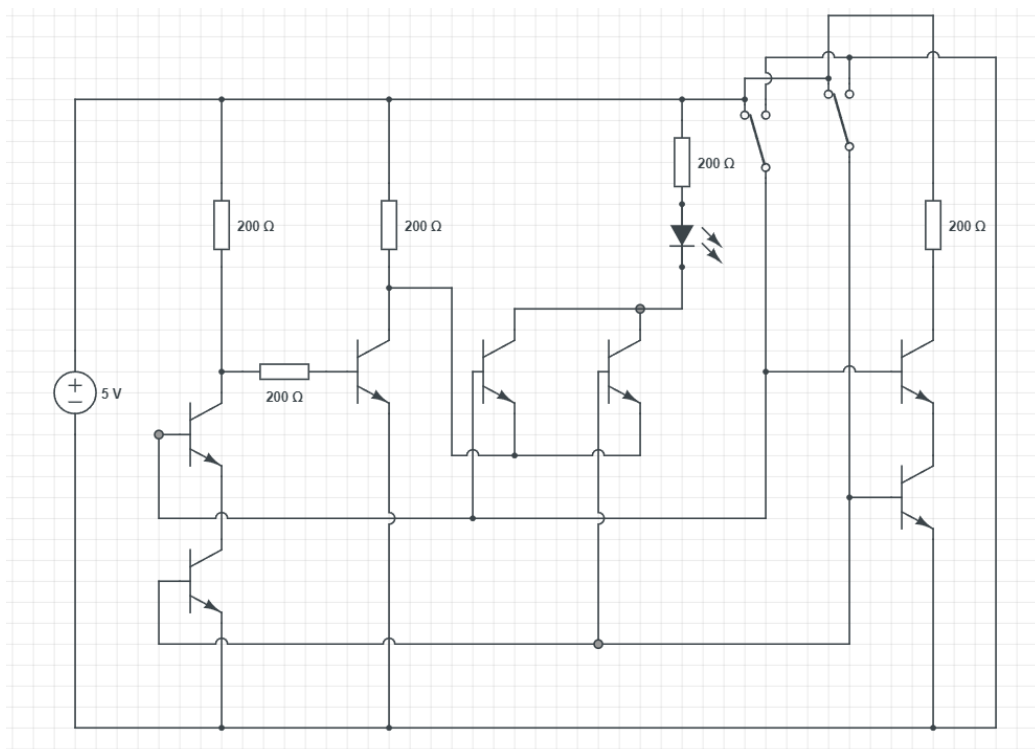
Obrázek 2.27: Uspořádání logických členů v čipu [41]

2.2.1 Sčítací kalkulačka

Sčítací kalkulačka je kalkulačka schopná provádět matematickou operaci sčítání. Je nejjednodušší na sestavení a v následujících dvou kapitolách bude sestavena nejprve pouze z tranzistorů a rezistorů a poté z logických členů.

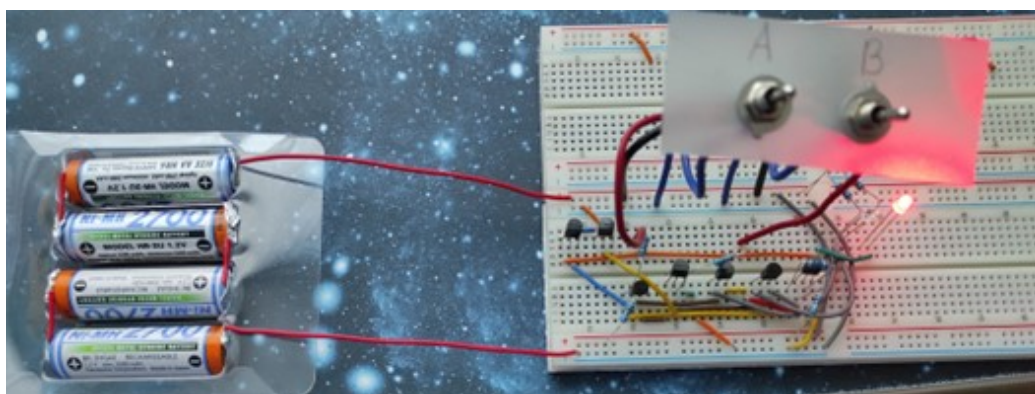
Sčítací kalkulačka z tranzistorů a rezistorů

Sestavení sčítací kalkulačky pomocí tranzistorů a rezistorů. Pro 1bitovou sčítací kalkulačku je potřeba mít 1 logický člen AND a 1 logický člen XOR. Je to takzvaný neúplný sčítač. Na jeho sestavení je potřeba sedm tranzistorů a pět rezistorů o odporu 200 ohmů. (viz obr. 2.28)

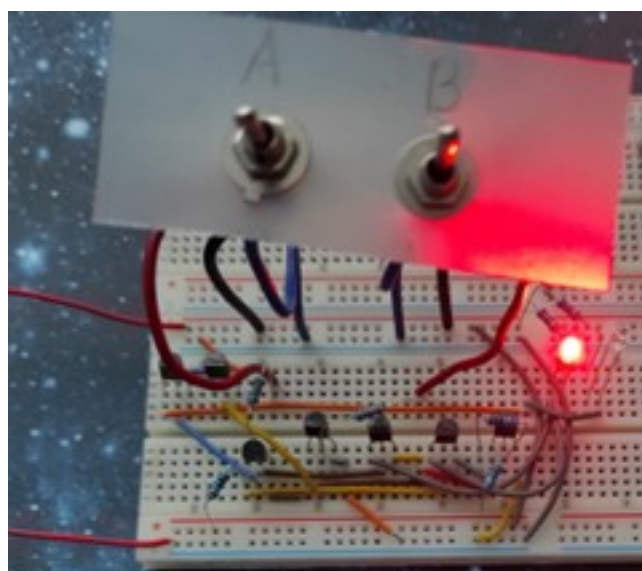


Obrázek 2.28: Zapojení 1bitové sčítací kalkulačky za použití tranzistorů a rezistorů [7]

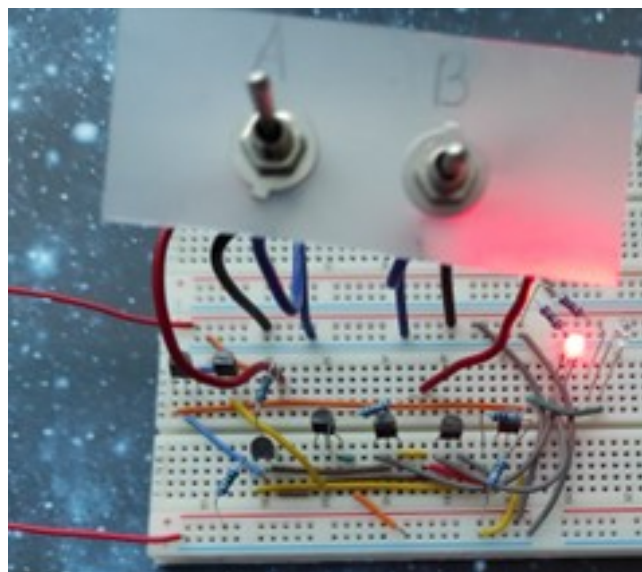
LED dioda vlevo zobrazuje hodnotu 2^0 , tedy 1, a LED vpravo zobrazuje hodnotu 2^1 , tedy 2. LED diody mohou být ve dvou stavech, buď jsou rozsvícené nebo zhasnuté, rozsvícená LED dioda znázorňuje hodnotu 1 a zhasnutá 0. LED dioda vpravo je 2^0 a vlevo 2^1 . Čtyři základní, 1-bitové, počty jsou $1+1=2$, v binární soustavě $1+1=01$ nebo $1 * 2^0 + 1 * 2^0 = 0 * 2^0 + 1 * 2^1$ (viz obr. 2.29), $1+0=1$, v binární soustavě $1 * 2^0 + 0 * 2^0 = 1 * 2^0$ (viz obr. 2.30), $1+0=1$, v binární soustavě $0 * 2^0 + 1 * 2^0 = 1 * 2^0$ (viz obr. 2.31), $1+0=1$, v binární soustavě $0 * 2^0 + 0 * 2^0 = 0 * 2^0$ (viz obr. 2.36).



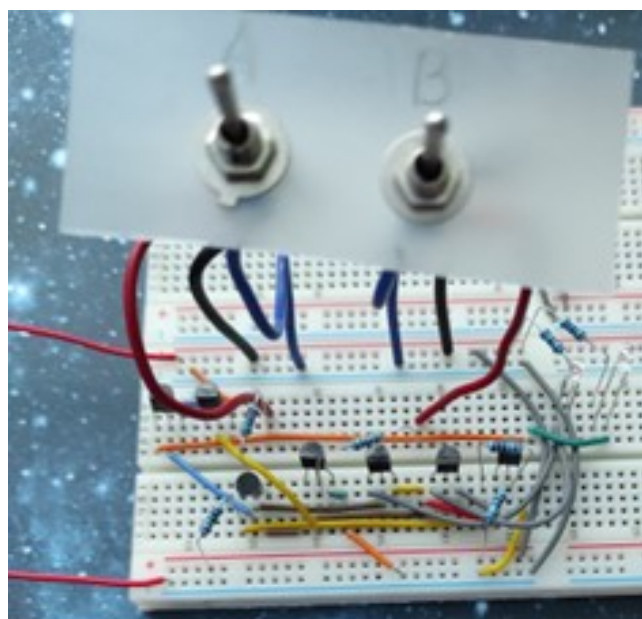
Obrázek 2.29: 1-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 1 a 1



Obrázek 2.30: 1-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 1 a 0



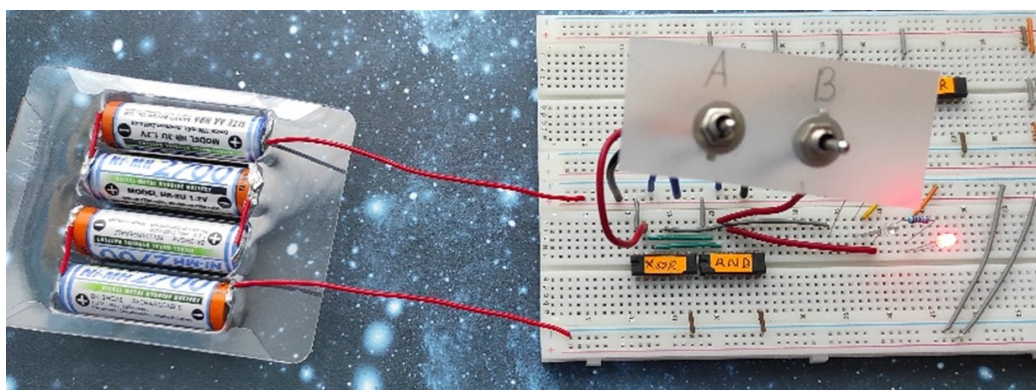
Obrázek 2.31: 1-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 0 a 1



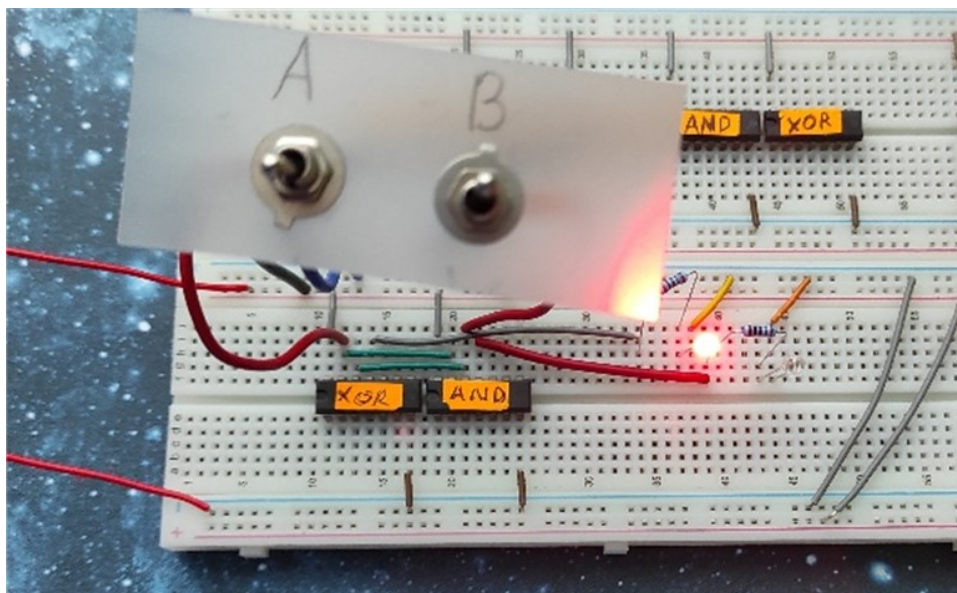
Obrázek 2.32: 1-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 0 a 0

Sčítací kalkulačka z čipů

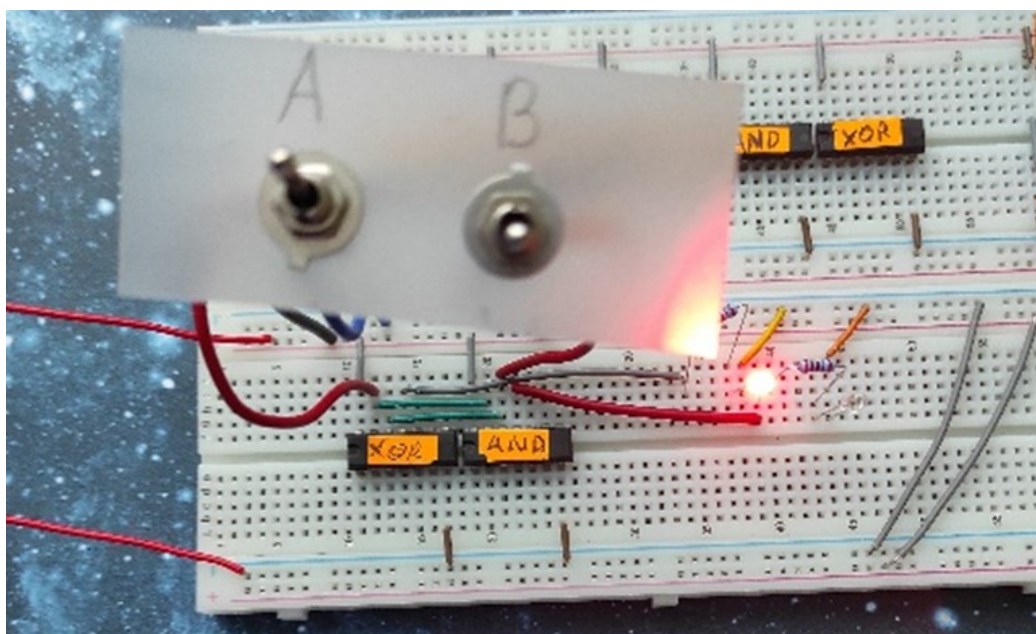
Sestavovat kalkulačku z tranzistorů a rezistorů je velmi prostorově náročné. Proto budou nadále používány předem sestavené čipy. Pro porovnání s 1-bitovou sčítačkou (viz obr. 2.29) (viz obr. 2.30) (viz obr. 2.31) (viz obr. 2.36) je tu 1-bitová kalkulačka z čipů (viz obr. 2.33) (viz obr. 2.34) (viz obr. 2.35) (viz obr. ??).



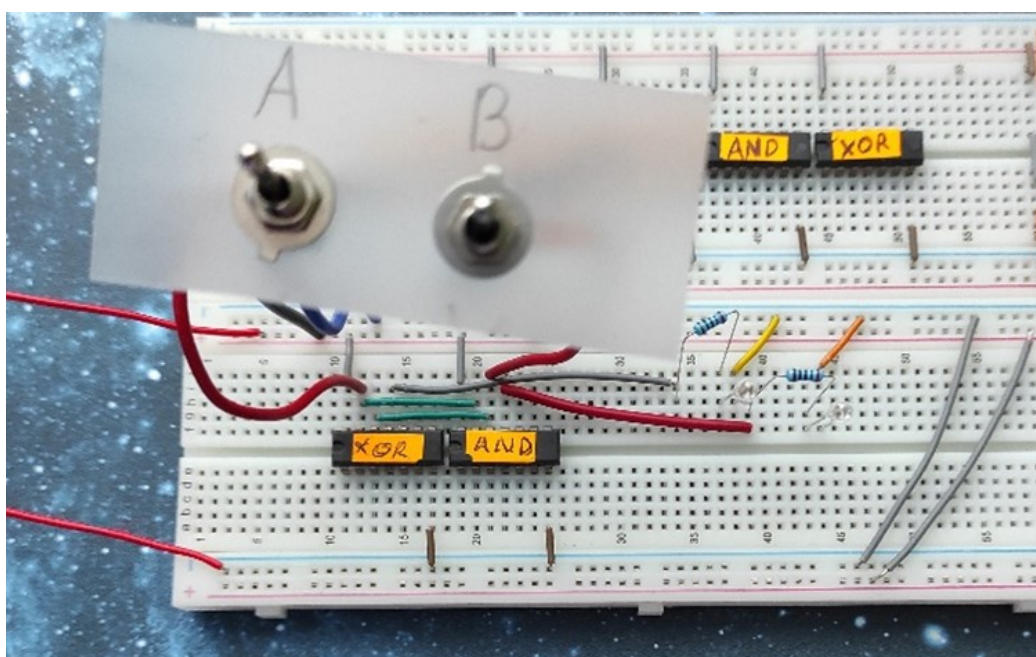
Obrázek 2.33: 1-bitová sčítací kalkulačka z čipů se vstupy 1 a 1



Obrázek 2.34: 1-bitová sčítací kalkulačka z čipů se vstupy 1 a 0

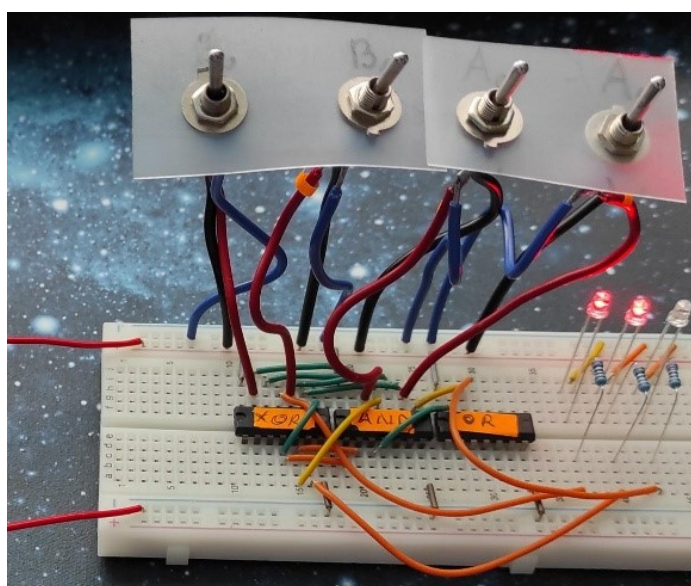


Obrázek 2.35: 1-bitová sčítací kalkulačka z čipů se vstupy 0 a 1

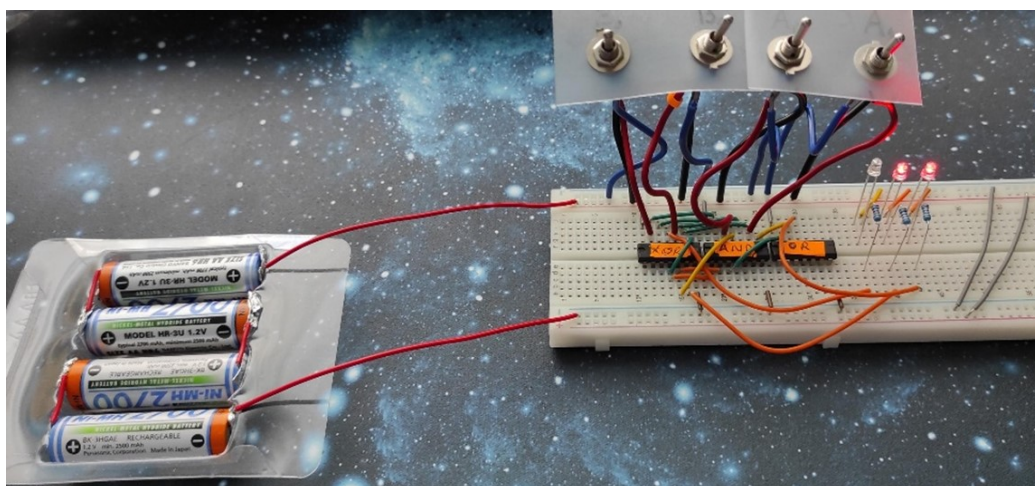


Obrázek 2.36: 1-bitová sčítací kalkulačka z čipů se vstupy 0 a 0

V několika bitových sčítačkách, už je potřeba úplný sčítač, který se skládá z dvou XOR, dvou AND a jednoho OR logického členu. Úplný sčítač sčítá čísla ze tří vstupů. Číslo přenesené z nižšího řádu a dvě čísla tohoto řádu z původních sčítaných čísel. Jsou tu dva příklady $1+2=3$, v binární soustavě $1+10=11$ nebo $0 * 2^0 + 1 * 2^1 + 1 * 2^0 + 0 * 2^1 = 1 * 2^0 + 1 * 2^1$ (viz obr. 2.37) a $3+3=6$, v binární soustavě $11+11=110$ nebo $1 * 2^0 + 1 * 2^1 + 1 * 2^0 + 1 * 2^1 = 0 * 2^0 + 1 * 2^1 + 1 * 2^2$ (viz obr. 2.38).

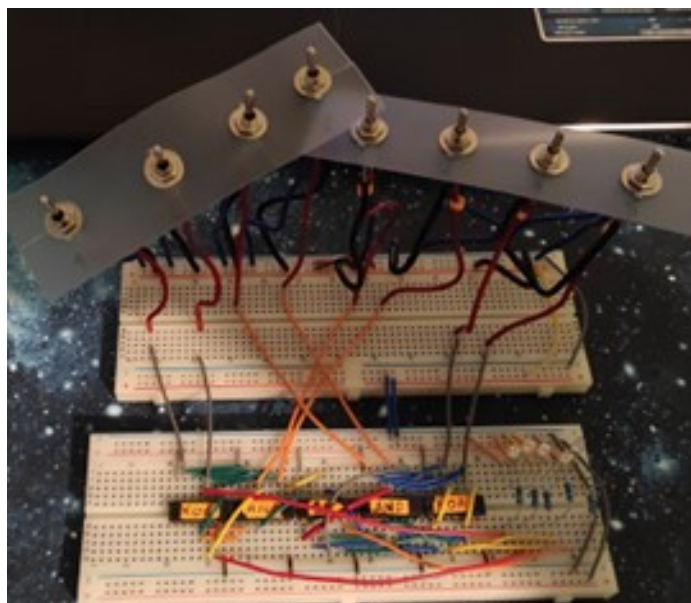


Obrázek 2.37: 2-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 1 a 10

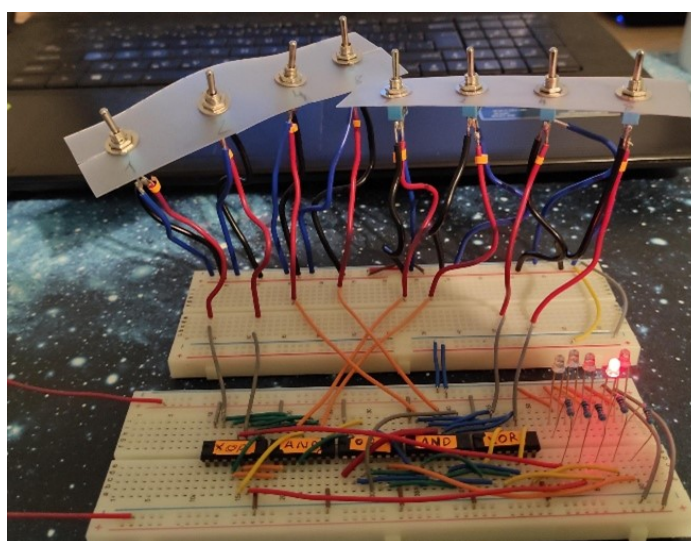


Obrázek 2.38: 2-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 11 a 11

Pro 4bitovou sčítací kalkulačku jsou potřeba jedna neúplná sčítačka a tři úplné sčítačky. Je potřebujeme 7 logických členů XOR, 7 logických členů AND a 3 logické členy OR. Zapojíme podle zapojení v kapitole 1.2.1 Sčítací kalkulačka (viz obr. 1.24). Zapojení (viz obr. 2.39) a příklad $3+5$, v binární soustavě $011+101=1000$ nebo $0 * 2^2 + 1 * 2^1 + 1 * 2^0 + 1 * 2^2 + 0 * 2^1 + 1 * 2^0 = 1 * 2^3 + 0 * 2^2 + 0 * 2^1 + 0 * 2^0$ (viz obr. 2.40).



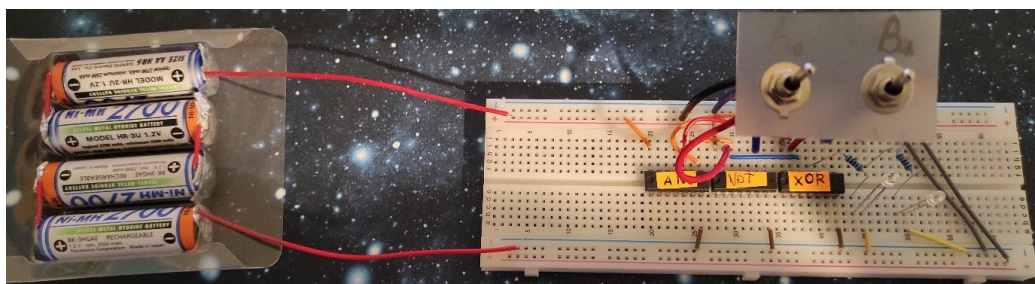
Obrázek 2.39: Zapojení 4-bitové sčítací kalkulačky



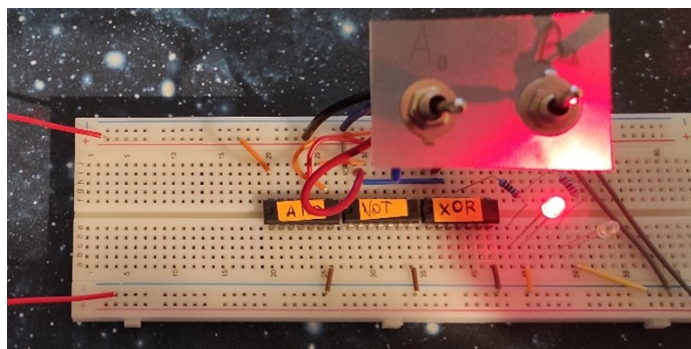
Obrázek 2.40: 4-bitová sčítačka se vstupy 3 a 5

2.2.2 Odčítací kalkulačka

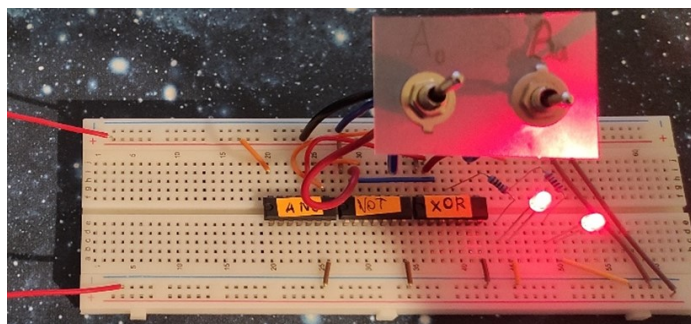
V této kapitole je sestavená neúplná odčítací kalkulačka z čipů, která počítá vždy $A-B$. První LED zleva je rozdíl a druhá indikuje zda je výsledek záporný. Takhle to, ale funguje pouze u 1bitové sčítačky. Zapojení v kapitole 1.2.2 Odčítací kalkulačka. (viz obr. 1.26)



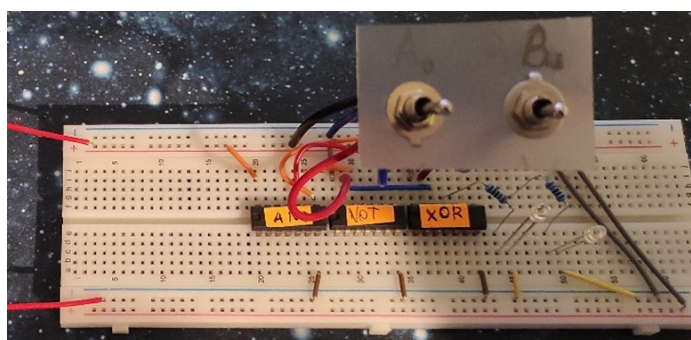
Obrázek 2.41: Zapojení 1-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 0 a 0



Obrázek 2.42: Zapojení 1-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 1 a 0

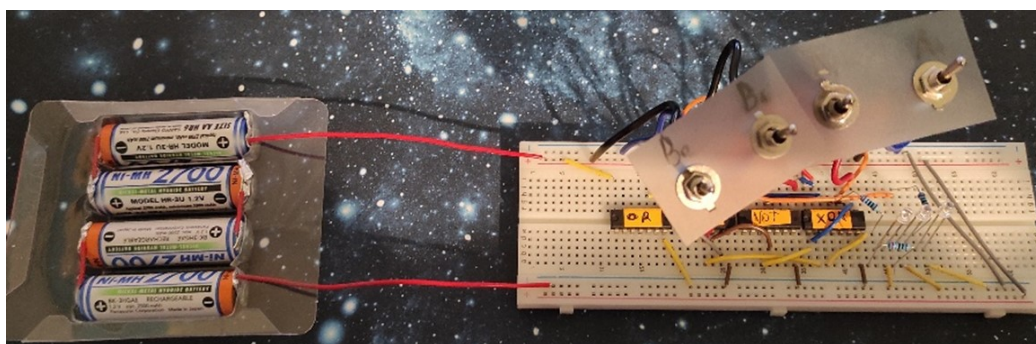


Obrázek 2.43: Zapojení 1-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 0 a 1

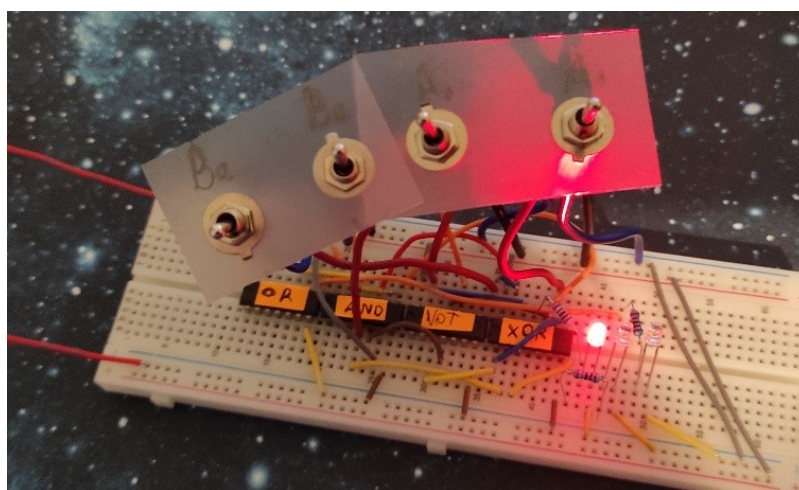


Obrázek 2.44: Zapojení 1-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 1 a 1

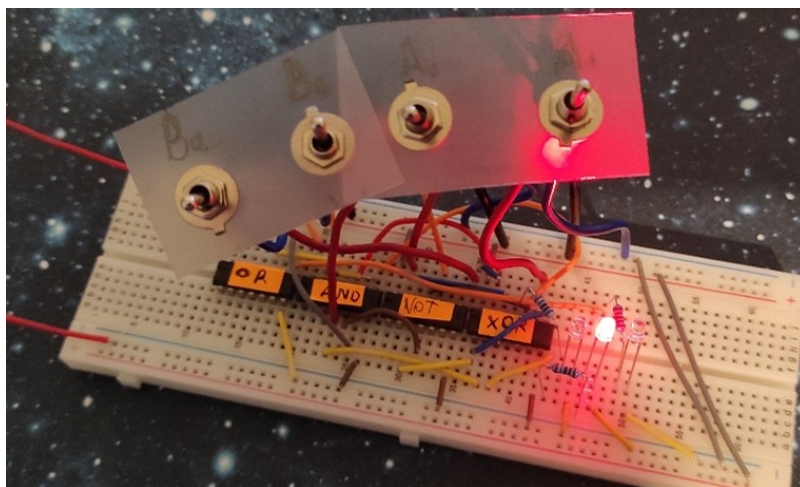
Po dokončení 1bitové odečítačky musíme pro počítání s vyššími řády přidat úplnou odečítačku. Zároveň stále musí být $A > B$. Pokud by tak ale nebylo, tak se rozsvítí poslední LED zleva a dá najevo, že výsledek bude záporný. (viz obr. 2.45) (viz obr. 2.46) (viz obr. 2.47) (viz obr. 2.48) Pokud je výsledek záporný, nedozvíme se rozdíl čísel, ale pouze to, že je záporný. (viz obr. 2.49)



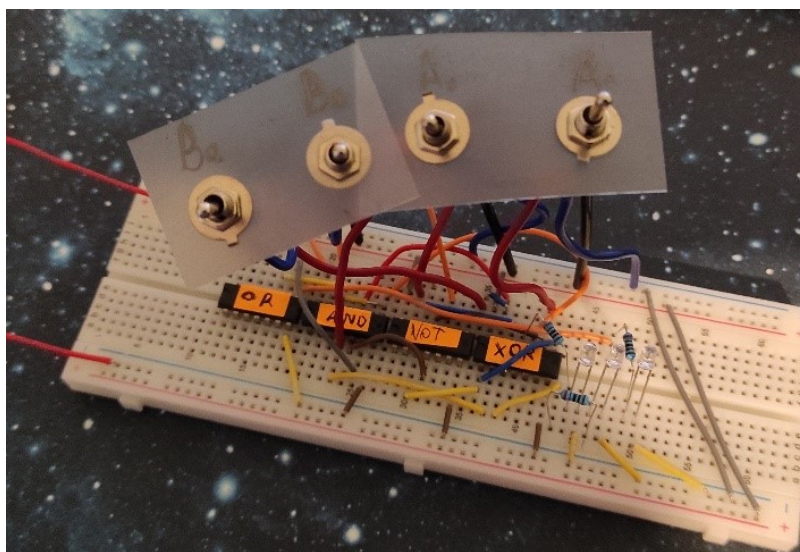
Obrázek 2.45: Zapojení 2-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 0 a 0



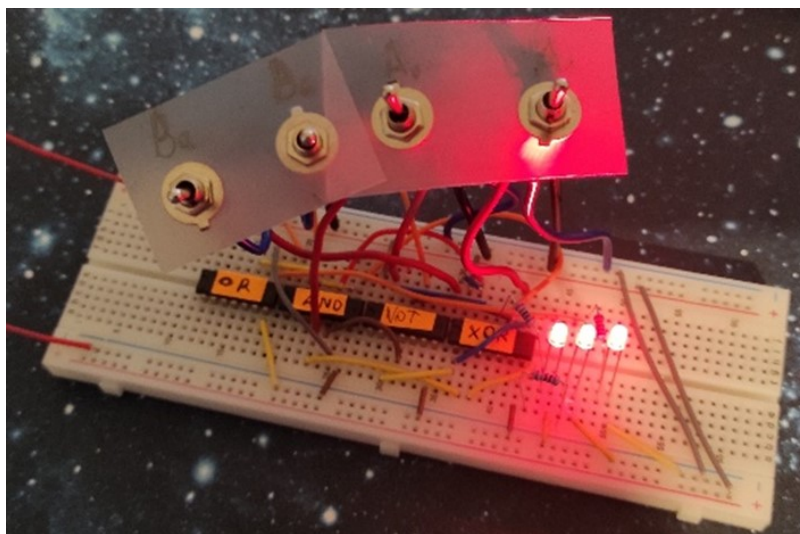
Obrázek 2.46: Zapojení 2-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 2 a 1



Obrázek 2.47: Zapojení 2-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 3 a 1



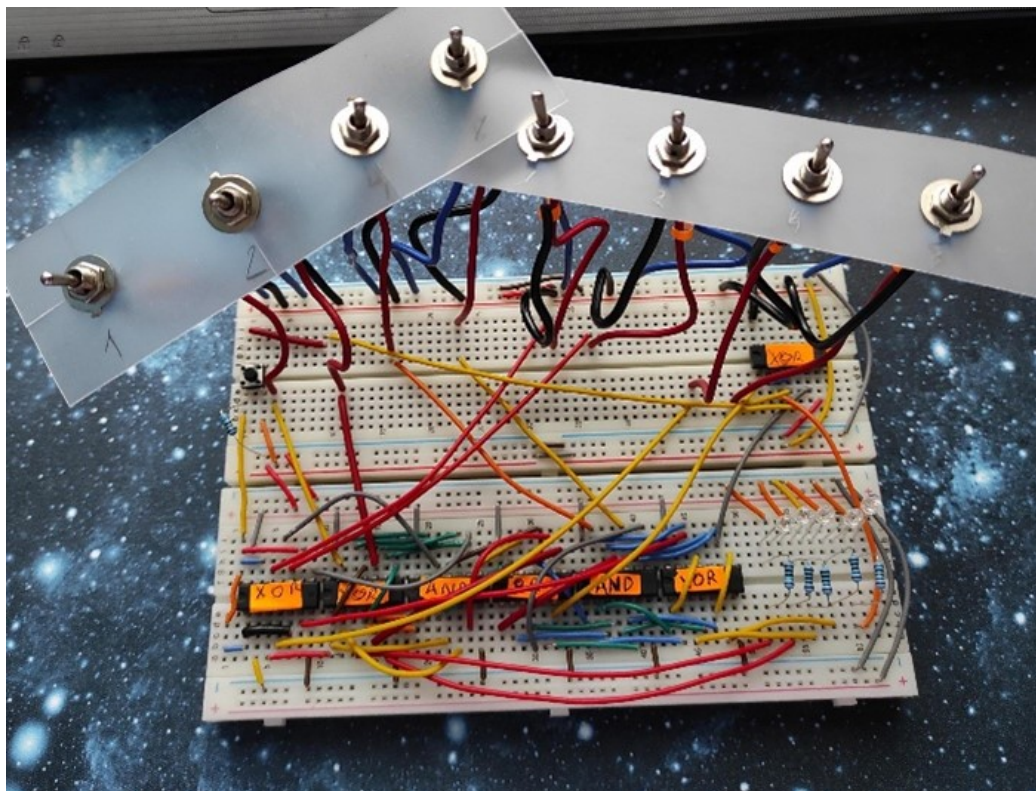
Obrázek 2.48: Zapojení 2-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 3 a 3



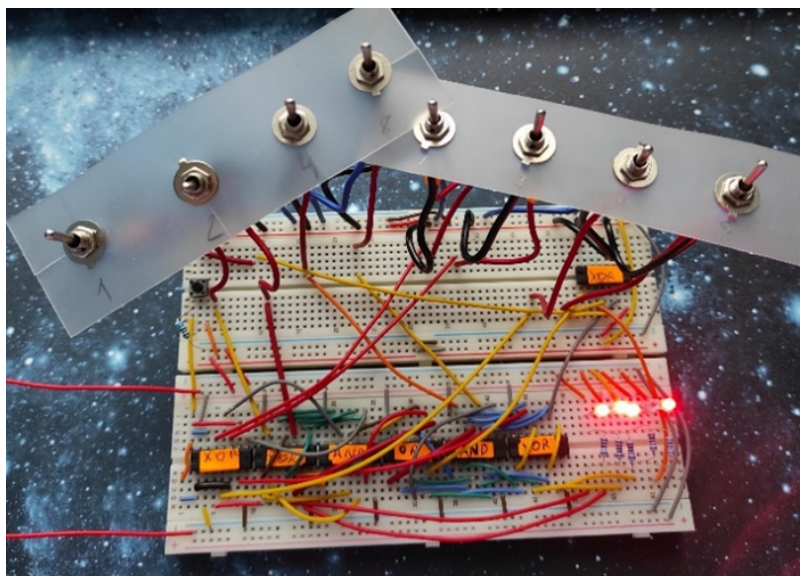
Obrázek 2.49: Zapojení 2-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 2 a 3

2.2.3 Sčítací a odčítací kalkulačka

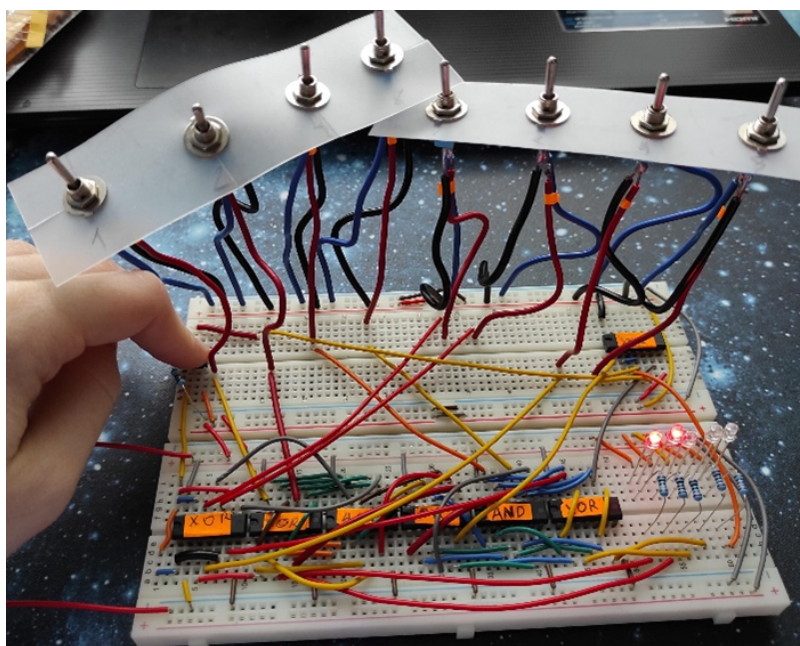
V dnešní době potkáme kalkulačky schopné několika matematických operací, které určíme stisknutím jednoho tlačítka. Spojení sčítací a odčítací kalkulačky je v celku jednoduché (pokud stále dodržujeme $A > B$). Zapojení této kalkulačky je v kapitole 2.2.3. Sčítací odčítací kalkulačka. Sestavení (viz obr. 2.50) a příklady $13+10=23$, v binární soustavě $1101+1010=10111$ nebo $1*2^3+1*2^2+0*2^1+1*2^0+1*2^3+0*2^2+1*2^1+0*2^0=1*2^4+0*2^3+1*2^2+1*2^1+1*2^0$ (viz obr. 2.51) a $13-10=3$, v binární soustavě $1101-1010=11$ nebo $1*2^3+1*2^2+0*2^1+1*2^0-(1*2^3+0*2^2+1*2^1+0*2^0)=1*2^1+1*2^0$ (viz obr. 2.52).



Obrázek 2.50: Zapojení 4-bitové sčítací a odečítací kalkulačky



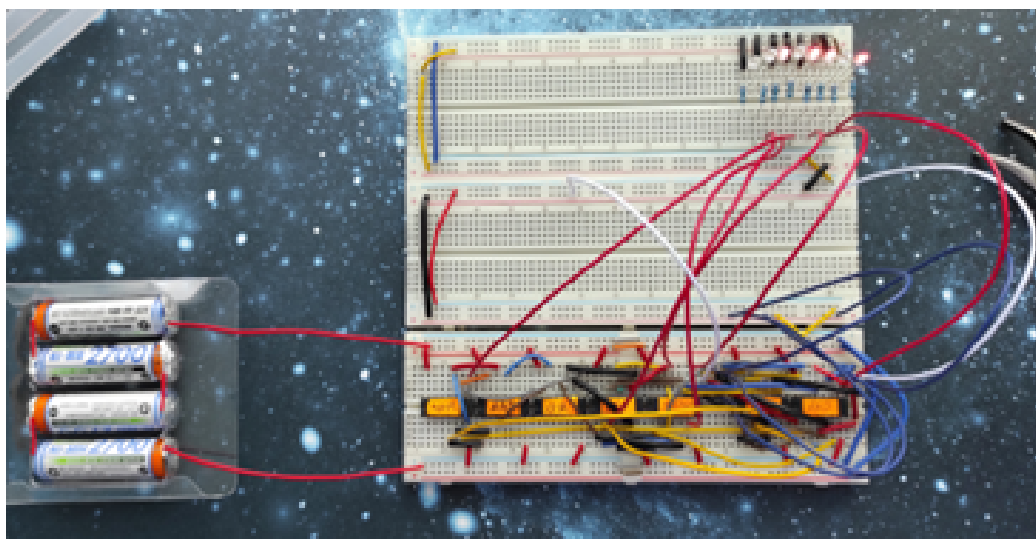
Obrázek 2.51: 4-bitová sčítací a odečítací kalkulačka se vstupy 13 a 10



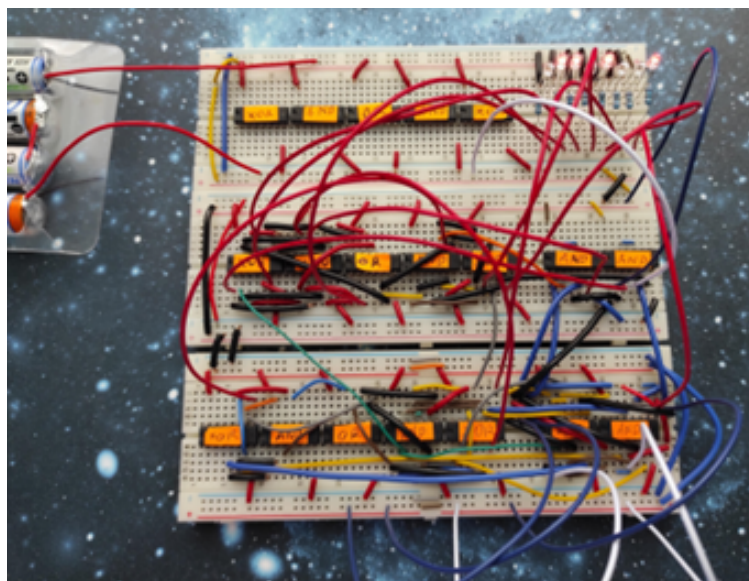
Obrázek 2.52: 4-bitová sčítací a odečítací kalkulačka se vstupy 13 a 10 se zmáčknutým tlačítkem pro odečítání

2.2.4 Násobící kalkulačka

V této kapitole bude průběh i finální sestavení násobící kalkulačky. Pro sestavení n -bitové násobící kalkulačky je potřeba $n-1$ bitových sčítaček a $n \times n$ AND logických členů. Zapojení v kapitole 1.2.4 Násobící kalkulačka (viz obr. 1.30). Násobící kalkulačku můžeme sestavovat postupně. Je to dobré pro kontrolu funkčnosti sčítaček. Postupně můžete vidět násobící kalkulačku s jedním 2-bitovým a jedním 4-bitovým vstupem, počítající příklad $3 \cdot 15 = 45$, v binární soustavě $11 \cdot 1111 = 101101$ nebo $(1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0) \cdot (1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0) = 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$ (viz obr. 2.53), poté s jedním 3 bitovým a jedním 4-bitovým vstupem, počítající příklad $7 \cdot 15 = 105$, v binární soustavě $111 \cdot 1111 = 1001000$ nebo $(1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0) \cdot (1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0) = 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$ (viz obr. 2.54).



Obrázek 2.53: Násobící kalkulačka s jedním 2-bitovým a jedním 4-bitovým vstupem počítající $3 \cdot 15 = 45$

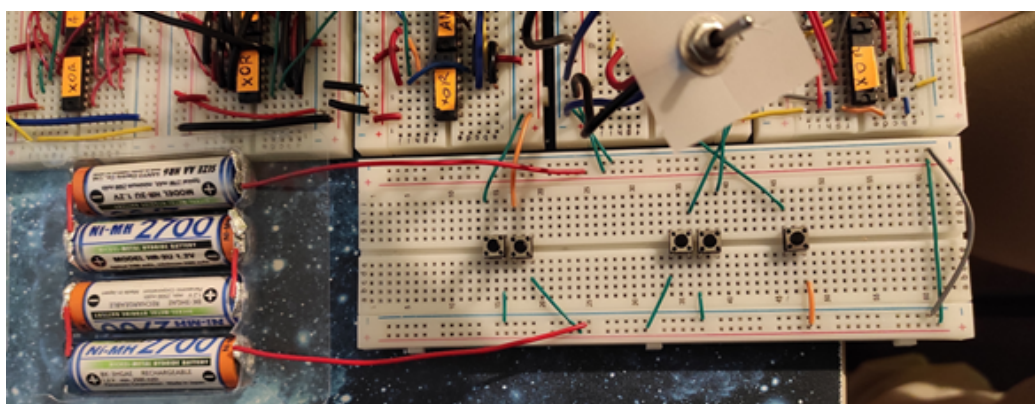


Obrázek 2.54: Násobící kalkulačka s jedním 3-bitovým a jedním 4-bitovým vstupem znázorňující $7 \cdot 15 = 105$

Po částečném sestavení násobící kalkulačky, už zbývá jenom finální verze, násobící kalkulačka se 4-bitovými vstupy. Tuto kalkulačku uvidíte v další kapitole spolu se sčítací a odčítací.

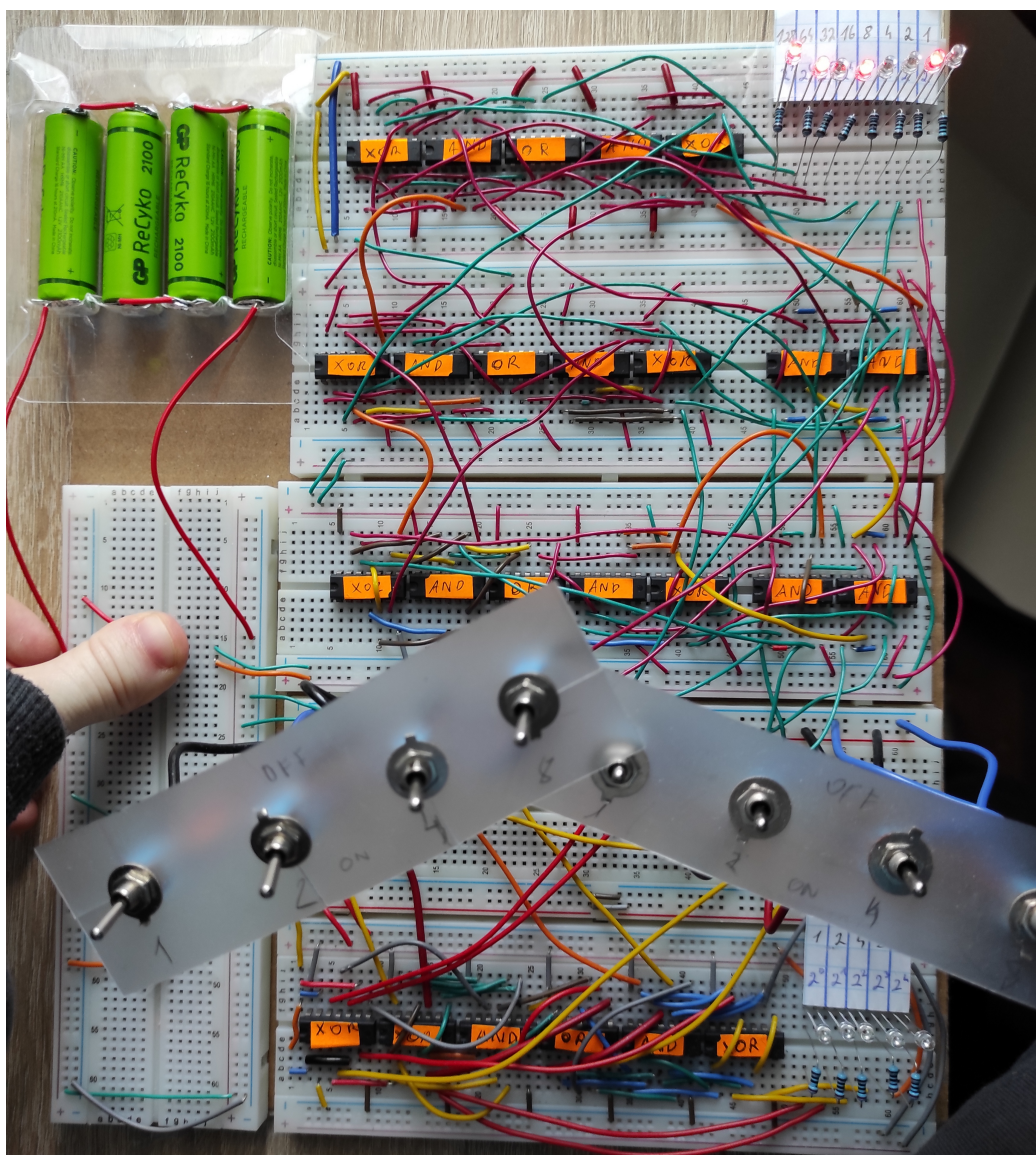
2.2.5 Sčítací, odčítací a násobící 4-bitová kalkulačka

Nyní spojíme odčítací a sčítací kalkulačku s násobící. Připojíme přepínače ke vstupům z obou kalkulaček a přidáme breadboard s tlačítky (viz obr. 2.55), které budou ovládat, která operace bude probíhat. Dvě tlačítka úplně vlevo při stisknutí uzavřou obvod násobící kalkulačky. Dvě tlačítka ve prostřed uzavřou obvod sčítací-odčítací kalkulačky, která bude sčítat a se stisknutím tlačítka napravo bude odčítat.

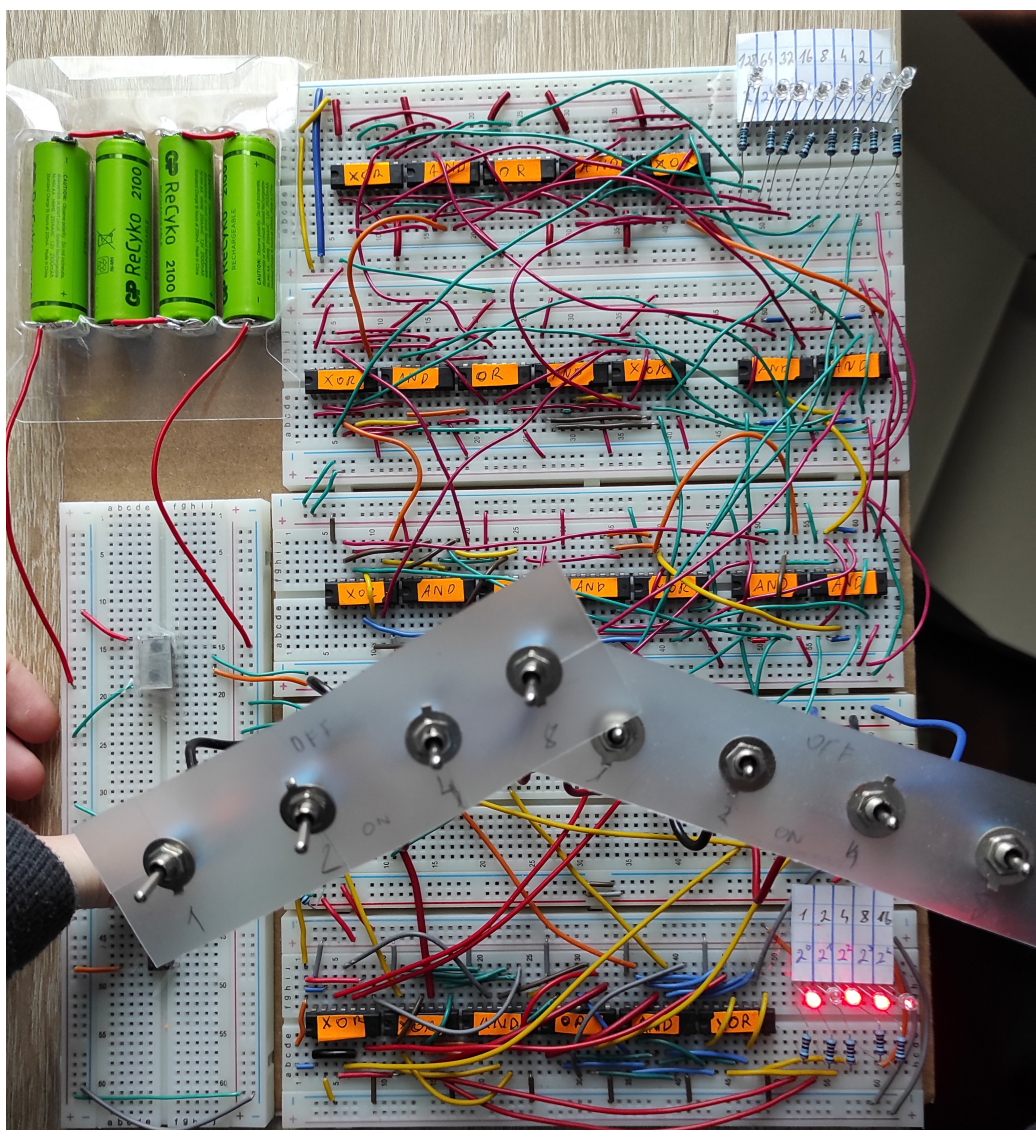


Obrázek 2.55: Tlačítka pro spuštění sčítání odečítání nebo násobení

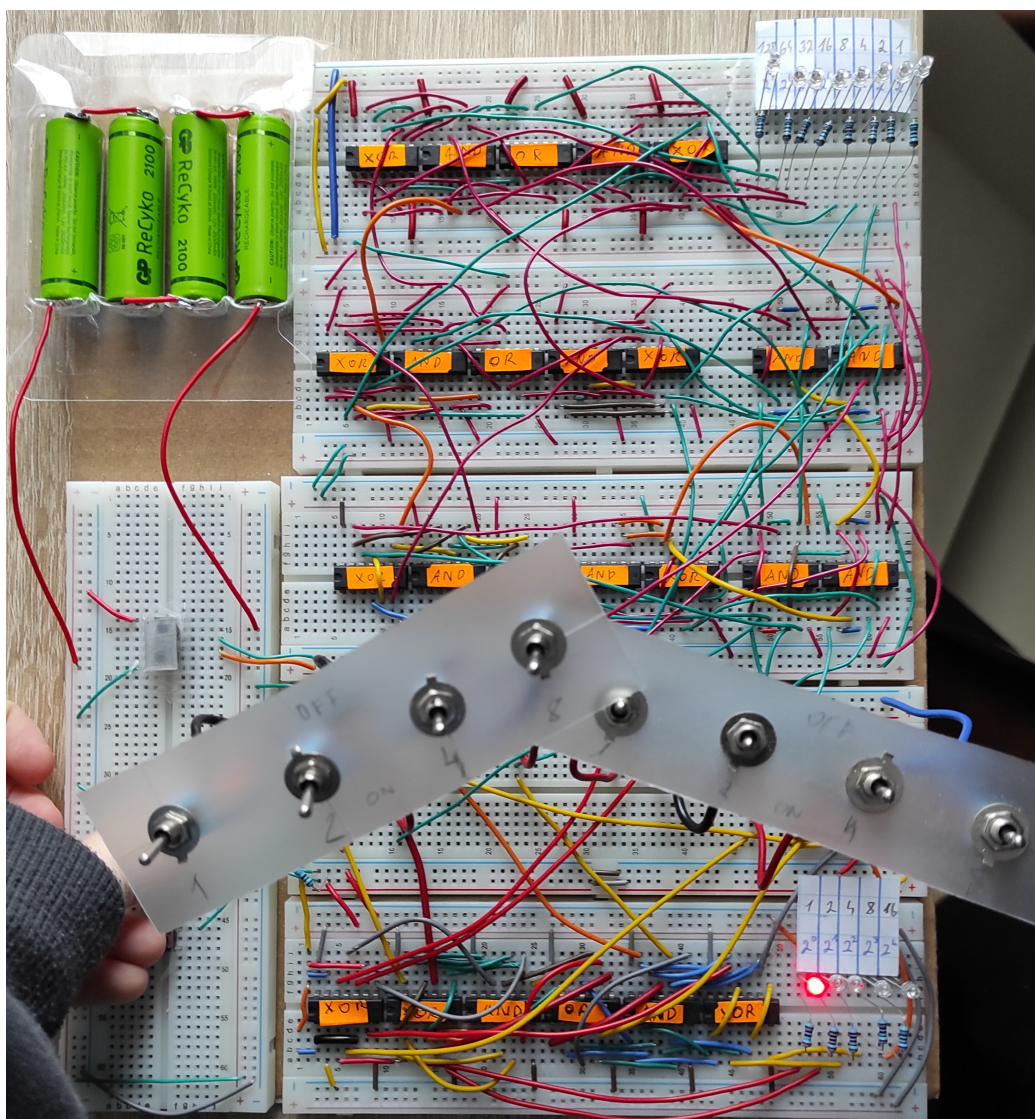
Pro ukázkou zde jsou tři příklady $15 \cdot 14 = 210$, v binární soustavě $1111 \cdot 1110 = 11010010$ nebo $(1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0) \cdot (1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0) = 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$ (viz obr. 2.56), $15 + 14 = 29$, v binární soustavě $1111 + 1110 = 11101$ nebo $(1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0) + (1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0) = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$ (viz obr. 2.57) a $15 - 14 = 1$, v binární soustavě $1111 - 1110 = 1$ nebo $(1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0) - (1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0) = 1 \cdot 2^0$ (viz obr. 2.58).



Obrázek 2.56: Spojená kalkulačka počítající $15 \times 14 = 210$



Obrázek 2.57: Spojená kalkulačka počítající $15+14=29$



Obrázek 2.58: Spojená kalkulačka počítající $15-14=1$

2.2.6 Použité součástky ke stavbě kalkulačky

Ke stavbě kalkulaček bylo použito 10 logických členů AND - 74LS08 DIP14, 10 logických členů EX-OR DIP 14 – SN74LS86AN a 4 logické členy OR – SN74LS32N.

Závěr

Cílem této seminární práce je seznámit čtenáře s logickými členy a jejich použitím v jednoduché kalkulačce. Následně také tyto logické členy sestavit a i sestavit kalkulačku z nich složenou.

V teoretické části jsou všechny základní logické členy vysvětleny spolu s jejich funkcí v kalkulačce. V praktické části jsou nejprve sestavené základní logické členy a poté i kalkulačky. Ve finále je i spojená kalkulačka schopná sčítání, odčítání a násobení.

Celá práce také může sloužit i jako takový návod na postavení jednoduché binární kalkulačky.

Literatura a zdroje

1. Wikimedia Foundation, 2023. Dostupné také z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Logick%C3%BD_%C4%8Dlen.
2. LAFATA, Pavel. 2019. Dostupné také z: <https://www.vovcr.cz/odz/tech/550/page06.html>.
3. STORR, Wayne. *Digital Logic Gate Tutorial - Basic Logic Gates*. 2022. Dostupné také z: https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_1.html.
4. MORAVEC, Jan. *Polovodiče: Základy Polovodičové techniky*. oEnergetice.cz, 2016. Dostupné také z: <https://oenergetice.cz/technologie/polovodice-zaklady-polovodicove-techniky>.
5. [B.r.]. Dostupné také z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1665-bipolarni-tranzistory>.
6. DIVI, Jozef. *Bipolrn tranzistory*. [B.r.]. Dostupné také z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zet/tranzistory-bip.htm>.
7. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.circuitlab.com/editor/#?id=7pq5wm&from=homepage>.
8. BRYTRO.CZ. *Co je a K čemu se používá rezistor?* [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.riacontrol.cz/slovnicek/rezistor/>.
9. ZEDNÍČEK, Tomáš. *Resistor symbols*. 2023. Dostupné také z: <https://passive-components.eu/resistor-symbols/>.
10. Wikimedia Foundation, 2021. Dostupné také z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Logick%C3%A1_funkce.

11. WATELECTRONICS. *And gate: Truth table, circuit diagram, working amp; its applications*. 2022. Dostupné také z: <https://www.watelectronics.com/and-gate/>.
12. STORR, Wayne. *Logic and gate tutorial with the logic and gate truth table*. 2022. Dostupné také z: https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_2.html.
13. Wikimedia Foundation, [b.r.]. Dostupné také z: https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:AND_ANSI.svg.
14. WATELECTRONICS. *Or gate: Truth table, circuit diagram, functionality amp; its applications*. 2022. Dostupné také z: <https://www.watelectronics.com/or-gate/>.
15. STORR, Wayne. *Logic or gate tutorial with logic or Gate Truth Table*. 2022. Dostupné také z: https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_3.html.
16. [B.r.]. Dostupné také z: <http://spmphysics.onlinetuition.com.my/2013/07/logic-gates-symbol-boolean-algebra-and.html>.
17. STORR, Wayne. *Exclusive-or gate tutorial with ex-OR gate truth table*. 2022. Dostupné také z: https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_7.html.
18. Wikimedia Foundation, [b.r.]. Dostupné také z: https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:XOR_ANSI.svg.
19. STORR, Wayne. *Logic not gate tutorial with Logic Not Gate Truth table*. 2023. Dostupné také z: https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_4.html.
20. WATELECTRONICS. *Not gate: Circuit, truth table, operation, uses and limitations*. 2022. Dostupné také z: <https://www.watelectronics.com/not-gate/>.
21. [B.r.]. Dostupné také z: <https://hyperelectronic.net/wiki/logic-gate/>.

22. STORR, Wayne. *Logic NAND gate tutorial with logic NAND gate truth table*. 2022. Dostupné také z: https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_5.html.
23. WATELECTRONICS. *Nand Gate: Truth Table, circuit, design, applications and advantages*. 2023. Dostupné také z: <https://www.watelectronics.com/nand-gate/>.
24. Wikimedia Foundation, [b.r.]. Dostupné také z: https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:NAND_ANSI_Labelled.svg.
25. STORR, Wayne. *Logic nor gate tutorial with Logic Nor Gate Truth table*. 2023. Dostupné také z: https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_6.html.
26. WATELECTRONICS. *Nor gate: Circuit, truth table, design, benefits and applications*. 2023. Dostupné také z: <https://www.watelectronics.com/nor-gate/>.
27. Wikimedia Foundation, 2023. Dostupné také z: https://en.wikipedia.org/wiki/NOR_logic.
28. ŠNÁBL, Ivo. *Aritmetické operace s binárními čísly*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=zaklady-informatiky-pro-biology--teoreticke-zaklady-informatiky--teorie-cisel--aritmeticke-operace-s-binarnimi-cisly>.
29. WATELECTRONICS. *Combinational logic circuits: Definition, examples, and applications*. 2021. Dostupné také z: <https://www.watelectronics.com/what-is-a-combinational-logic-circuit-types-and-applications/>.
30. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.techopedia.com/definition/7509/half-adder>.
31. Wikimedia Foundation, [b.r.]. Dostupné také z: <https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Full-adder.svg>.

32. Wikimedia Foundation, 2023. Dostupné také z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bin%C3%A1rn%C3%AD_s%C4%8D%C3%ADta%C4%8Dka.
33. TEJA, Ravi. *Binary adder and subtractor*. 2021. Dostupné také z: <https://www.electronicshub.org/binary-adder-and-subtractor/>.
34. WATELECTRONICS. *Half subtractor: Circuit, truth table with K-Map Its Applications*. 2021. Dostupné také z: <https://www.watelectronics.com/half-subtractor/>.
35. WATELECTRONICS. *Combinational logic circuits: Definition, examples, and applications*. 2021. Dostupné také z: <https://www.watelectronics.com/what-is-a-combinational-logic-circuit-types-and-applications/>.
36. [B.r.]. Dostupné také z: <https://de-iitr.vlabs.ac.in/exp/half-full-subtractor/theory.html>.
37. BADGES, ubuntu_noobubuntu_noob65611goldbadge88silverbadges2222bronze; 1, KillaKemKillaKem; BADGES, PyxzurePyxzure 33011 silver badge88 bronze. *Subtraction using adder circuit*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/98015/subtraction-using-adder-circuit>.
38. *Součin dvou čísel ve dvojkové soustavě:: MEF*. [B.r.]. Dostupné také z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1559-soucin-dvou-cisel-ve-dvojkove-soustave>.
39. [B.r.]. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/figure/Traditional-4-bit-array-multiplier_fig1_328841479.
40. BARNES, Russell. *Breadboard tutorial: Learn electronics with raspberry pi*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://magpi.raspberrypi.com/articles/breadboard-tutorial>.
41. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.cs.purdue.edu/homes/cs250/lab1-nand3/>.

Seznam obrázků

1.1	Polovodič typu P [4]	9
1.2	Polovodič typu N [4]	9
1.3	Zobrazení tranzistoru NPN [5]	10
1.4	Symbol tranzistoru PNP [7]	10
1.5	Symbol tranzistor NPN [7]	11
1.6	Symbol rezistoru IEC [7]	11
1.7	Symbol rezistoru US [7]	11
1.8	Symbol LED [7]	12
1.9	Symbol logického členu AND [13]	13
1.10	Pravdivostní tabulka logického členu AND	13
1.11	Symbol logického členu OR [16]	14
1.12	Pravdivostní tabulka logického členu OR	14
1.13	Symbol logického členu XOR [18]	15
1.14	Pravdivostní tabulka logického členu XOR	15
1.15	Symbol logického členu NOT [21]	16
1.16	Pravdivostní tabulka logického členu NOT	16
1.17	Symbol logického členu NAND [24]	17
1.18	Pravdivostní tabulka logického členu NAND	17
1.19	Symbol logického členu NOR [27]	18
1.20	Pravdivostní tabulka logického členu NOR	18
1.21	Příklad binárního sčítání	19
1.22	Neúplná sčítačka [30]	20
1.23	Úplná sčítačka [31]	20

1.24	Zapojení 4-bitové sčítačky [33]	21
1.25	Příklad binárního odčítání	21
1.26	Neúplná odčítačka [34]	22
1.27	Úplná odčítačka [36]	22
1.28	Sčítací-odčítací kalkulačka [37]	23
1.29	Příklad binárního násobení	24
1.30	4-bitová násobící kalkulačka [39]	24
2.1	Breadboard [40]	26
2.2	Schema zapojení logického členu AND [7]	27
2.3	Logický člen AND se vstupními hodnotami 1 a 1	27
2.4	Logický člen AND se vstupními hodnotami 1 a 0	28
2.5	Logický člen AND se vstupními hodnotami 0 a 1	28
2.6	Logický člen AND se vstupními hodnotami 0 a 0	29
2.7	Schema zapojení logického členu OR [7]	30
2.8	Logický člen OR se vstupními hodnotami 1 a 1	31
2.9	Logický člen OR se vstupními hodnotami 1 a 0	31
2.10	Logický člen OR se vstupními hodnotami 0 a 1	32
2.11	Logický člen OR se vstupními hodnotami 0 a 0	32
2.12	Schema zapojení logického členu XOR [7]	33
2.13	Logický člen XOR se vstupními hodnotami 1 a 1	34
2.14	Logický člen XOR se vstupními hodnotami 1 a 0	34
2.15	Logický člen XOR se vstupními hodnotami 0 a 1	35
2.16	Logický člen XOR se vstupními hodnotami 0 a 0	35
2.17	Schema zapojení logického členu NOT [7]	36
2.18	Logický člen NOT se vstupní hodnotou 1	37
2.19	Logický člen NOT se vstupní hodnotou 0	37
2.20	Schema zapojení logického členu NAND [7]	38
2.21	Logický člen NAND se vstupními hodnotami 1 a 1	39
2.22	Logický člen NAND se vstupními hodnotami 1 a 0	39
2.23	Logický člen NAND se vstupními hodnotami 0 a 1	40
2.24	Logický člen NAND se vstupními hodnotami 0 a 0	40

2.25	Schema zapojení logického členu NOR [7]	41
2.26	Zdroj	42
2.27	Uspořádání logických členů v čipu [41]	43
2.28	Zapojení 1bitové sčítací kalkulačky za použití tranzistorů a rezistorů [7]	44
2.29	1-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 1 a 1	45
2.30	1-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 1 a 0	45
2.31	1-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 0 a 1	46
2.32	1-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 0 a 0	46
2.33	1-bitová sčítací kalkulačka z čipů se vstupy 1 a 1	47
2.34	1-bitová sčítací kalkulačka z čipů se vstupy 1 a 0	47
2.35	1-bitová sčítací kalkulačka z čipů se vstupy 0 a 1	48
2.36	1-bitová sčítací kalkulačka z čipů se vstupy 0 a 0	48
2.37	2-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 1 a 10	49
2.38	2-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 11 a 11	50
2.39	Zapojení 4-bitové sčítací kalkulačky	51
2.40	4-bitová sčítací kalkulačka se vstupy 3 a 5	51
2.41	Zapojení 1-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 0 a 0	52
2.42	Zapojení 1-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 1 a 0	52
2.43	Zapojení 1-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 0 a 1	53
2.44	Zapojení 1-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 1 a 1	53
2.45	Zapojení 2-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 0 a 0	54
2.46	Zapojení 2-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 2 a 1	54
2.47	Zapojení 2-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 3 a 1	55
2.48	Zapojení 2-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 3 a 3	55
2.49	Zapojení 2-bitové odečítací kalkulačky se vstupy 2 a 3	56
2.50	Zapojení 4-bitové sčítací a odečítací kalkulačky	57
2.51	4-bitová sčítací a odečítací kalkulačka se vstupy 13 a 10	58
2.52	4-bitová sčítací a odečítací kalkulačka se vstupy 13 a 10 se zmáčknutým tlačítkem pro odečítání	58

2.53	Násobící kalkulačka s jedním 2-bitovým a jedním 4-bitovým vstupem počítající $3 \cdot 15 = 45$	59
2.54	Násobící kalkulačka s jedním 3-bitovým a jedním 4-bitovým vstupem znázorňující $7 \cdot 15 = 105$	60
2.55	Tlačítka pro spuštění sčítání odečítání nebo násobení	61
2.56	Spojená kalkulačka počítající $15 \cdot 14 = 210$	62
2.57	Spojená kalkulačka počítající $15 + 14 = 29$	63
2.58	Spojená kalkulačka počítající $15 - 14 = 1$	64