



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE LINEÁRNÍCH HODIN

DESIGN OF LINEAR CLOCK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Firla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Marek Firla**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce lineárních hodin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpravidla existují dvě široce využívaná rozhraní pro měření času. Na jedné straně analogové, které k zobrazení času využívají rotující ručičky s číselníkem. Na druhé straně digitální s přímým výstupem ukazatele času pomocí alfanumerických znaků na displeji. Za předpokladu, že čas plyne lineárně, je však výzvou konstrukce lineárních hodin, které dokážou unikátní cestou zobrazit aktuální čas.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je konstrukce a následná realizace funkčního vzorku lineárních hodin užitím technologie 3D tisku a řízené pomocí Arduino Uno s těmito parametry: stupnice s rozsahem 12 hodin a rozlišitelností 5 minut.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popsat současné konstrukce lineárních hodin,
- definovat vhodné parametry pro konstrukční řešení,
- navrhnout varianty konstrukčních uspořádání,
- zpracovat výkresovou dokumentaci vybrané varianty včetně řídicího softwaru,
- realizovat funkční vzorek pomocí 3D tisku.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske--studium--ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

BROWN, H. T. 507 Mechanical Movements: Mechanisms and Devices. 18th Edition. Wexford College Press, 2010. ISBN 978-1-60386-311-7.

MOLINE, D. J. WAGNER a E. VOLK. Model of a mechanical clock escapement. American Journal of Physics. 2012, 80(7), 599-606. DOI: 10.1119/1.4705517. ISSN 0002-9505.

MAJOR, F. G. Celestial and Mechanical Clocks. The Quantum Beat. New York, NY: Springer New York, 1998, 1-21. DOI: 10.1007/978-1-4757-2923-8_1. ISBN 978-1-4757-2925-2.

RAWLINGS, A. L. The Science of Clocks and Watches. 3rd. Upton, England: British Horological Society, 1993. ISBN 978-0-95096-213-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce je popsat návrh, konstrukci a výrobu lineárních hodin. V první části jsou popsány nynější řešení lineárních hodin. Druhá část popisuje návrh a výrobu prototypu lineárních hodin. Hodiny řídí mikrokontrolérová jednotka Arduino UNO, samotné měření času zprostředkovává modul reálného času a pohyb ukazatelů času zprostředkovává dvojice krokových motorů. Realizace je provedena pomocí 3D tisku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lineární hodiny, Arduino, 3D tisk

ABSTRACT

The main goal of this thesis is to describe the design, construction, and manufacture of linear clocks. The first part describes the current linear clocks design. The second part describes the design of a linear clock prototype. The linear clock is controlled by an Arduino UNO microcontroller unit, the time is measured by the real-time module, the movement of the time indicators is mediated by a pair of stepper motors. Manufacture is done using 3D printing.

EYWORDS

Linear clock, Arduino, 3D print

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FIRLA, Marek. *Konstrukce lineárních hodin*. Brno, 2018, 99 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Petra Svobody, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Čas	14
2.2	Lineární hodiny	14
2.2.1	CLOQ The linear clock.	16
2.2.2	Linear Clockworks	16
2.2.3	Linear clock by JanDerogee	17
2.2.4	Linear clock by Euphy	18
2.2.5	Linear clock by Audun Ask Blaker	18
2.3	Arduino	19
2.3.1	Arduino IDE	19
2.3.2	Arduino UNO	20
2.3.3	Arduino klony	20
2.3.4	Arduino Shieldy	20
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	21
3.1	Analýza problému	21
3.2	Cíl práce	21
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	22
4.1	Komponenty	22
4.1.1	Řízení Hodin	22
4.1.2	Motory	23
4.1.3	Řízení motorů	24
4.1.4	Měření času	24
4.1.5	Ovládací rozhraní	25
4.1.6	Polohování	25
4.2	Koncepční uspořádání č. 1	26
4.3	Koncepční uspořádání č. 2	27
4.4	Koncepční uspořádání č. 3	27
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	28
5.1	Zapojení	28
5.2	Konstrukční rozvržení	29

5.3	Návrh krytů	30
5.3.1	Upevnění modulů	30
5.4	Převodový mechanismus	32
5.4.1	Převod ozubeným hřebem	32
5.4.2	Vedení	34
5.5	Návrh ciferníků a indikátoru	36
5.6	Výroba	36
5.6.1	Materiál	37
5.6.2	Nastavení tisku	37
5.7	Sestavení programu	38
5.7.1	Načtení knihoven a deklarace proměnných	39
5.7.2	Nastavení zařízení	40
5.7.3	Hlavní struktura programu	41
5.7.4	Synchronizace	42
5.7.5	Nastavení výchozí polohy	42
5.7.6	Nastavení hodin	43
5.7.7	Alarm	44
5.7.8	Ošetření zákmitů tlačítek	45
5.7.9	Spotřeba energie	45
5.8	Sestavení lineárních hodin	45
5.9	Náklady	47
6	DISKUZE	49
7	ZÁVĚR	50
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	51
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	54
10	SEZNAM TABULEK	56
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	57
12	SEZNAM PŘÍLOH	58

1 ÚVOD

Čas je pro celé lidstvo klíčovým faktorem už od jeho počátku. Tento fakt přinesl vytvoření nejen časových systémů, ale také vývoj časomír. Vývoj probíhal nejen z hlediska stále přesnějšího měření času, ale také se měnily způsoby jeho zobrazení. Pokud se na současné časomíry podíváme v souvislosti s rozhraním pro zobrazování času tak narazíme na dvě nejvíce rozšířené varianty. První je analogové rozhraní zahrnující pevný ciferník a dvě nebo tři pohyblivé ručičky pro hodiny a minuty, popřípadě i sekundy. Druhou možností je zobrazení času skrze znaky na alfanumerickém displeji. Méně tradiční způsob zobrazení času nám poskytují lineární hodiny. Právě proto je poskytnutí řešerše dosavadních znalostí a návrh lineárních hodin cílem této bakalářské práce.

Jelikož trh s tímto řešením zobrazení času není příliš rozsáhlý, bylo nasnadě vytvořit nový konstrukčně jednoduchý funkční model levných lineárních hodin realizovaný pomocí 3D tisku a řízený skrze mikrokontrolérovou jednotku Arduino.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Čas

Čas je základní fyzikální veličina soustavy SI s označením t . Může být definována jako: Neprostorové kontinuum, ve kterém se události odehrávají ve zjevně nevratném pořadí od minulosti přes přítomnost až do budoucnosti. [1] Základní jednotkou je sekunda. Sekunda, značka „s“, je jednotka času v SI. Je definována fixací číselné hodnoty cesiové frekvence $\Delta\nu_{Cs}$, tedy frekvence přechodu mezi hladinami velmi jemného rozštěpení neporušeného základního stavu atomu cesia 133, aby byla rovna 9 192 631 770, je-li vyjádřena jednotkou Hz, rovnou s^{-1} . [2]

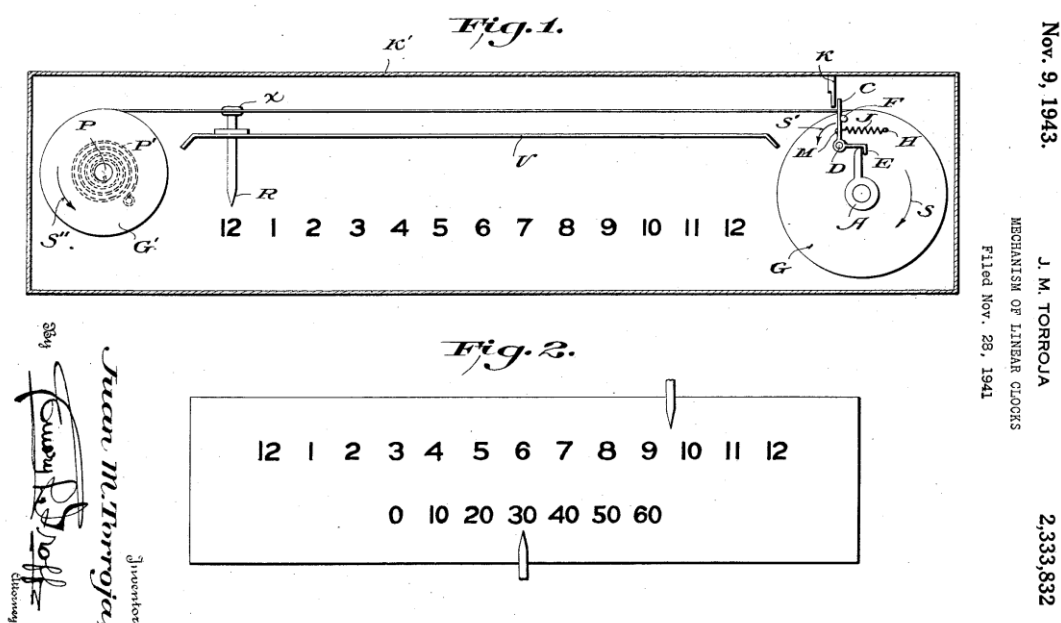
Hodiny (časoměry) jsou přístroje určené k přímému měření času. Měření času v nich probíhá z pravidla dvojím způsobem. Buď přímým sledováním rovnoměrného pohybu anebo počítáním pravidelných pohybů mechanických, elektrických nebo atomárních oscilací. [3] První způsob měření času je typický pro sluneční, přesýpací nebo vodní hodiny. Druhý způsob měření času je častější. Jedná o hodiny mechanické, kde se sleduje pohyb kyvadla, elektronické, využívající piezoelektrického jevu, nebo atomové kde se sleduje rezonanční frekvence atomu nejčastěji celsia.

2.2 Lineární hodiny

Lineární hodiny je časomíra s jedinečným způsobem zobrazení času, jejímž charakteristickým znakem je nahrazení tradičního kulatého ciferníku nebo alfanumerického displeje, ciferníkem přímým. Ručičky, ciferníky nebo jiné indikátory se pohybují po lineární, křivočaré, lomené nebo smíšené trajektorii a na následně se vracejí do výchozí polohy. [4] Jinými slovy indikátory se pohybují po neuzavřené křivce vratným pohybem.

Jeden z prvních konceptů lineárních hodin byl vytvořen kolem roku 1941. Nicméně původní zařízení sloužilo pouze pro zobrazování času jako dodatek ke standartnímu mechanickému hodinovému strojků. [4] Zařízení se připojovalo na příslušnou hodinovou minutovou nebo i sekundovou výstupní hřídel hodin.

Samotné zařízení se skládá z ciferníku ve tvaru lišty (viz Obr. 2-1 Konceptní náčrt řešení lineárních hodin) s čísly symbolizující hodiny. Na obou koncích ciferníku se nachází dvojice kladek (G, G') na kterých je navinuto lanko (X), na němž je pevně ukotven indikátor času (R). Indikátor času (R) je uložen v lineárním vedení (V). První z kladek (G) je spojena s výstupní hřídelí hodinového strojek pomocí spojky. Spojka se skládá ze čtyř součástí: páky (CDE), drápu (A), tažné pružiny (J) a dorazu (K). Chodem hodinového strojek se otáčí i kladka (G) na kterou se navíjí lanko (X) a pohybuje se i indikátor (R) po ciferníku. Druhá kladka (G') ze které se lanko (X) odvíjí, je spojena se spirálovou pružinou (P'). Otáčením kladky (G'), v důsledku odvíjení lana (X), se spirálová pružina (P') stlačuje a vytváří krouticí moment (S''), který působí proti pohybu. Jednou za celou otáčku kladky (G) se spojka (páka CDE a „dráp“ A) rozezne a rozpojí hodinový strojek od kladky (G), čímž se kladka (G) začne volně otáčet. Stlačená pružina (P') poté začne otáčet kladkou (G') a navíjet lanko (X), čímž se posune indikátor času (R) zpět do výchozí polohy. [4]



Obr. 2-1 Konceptní náčrt řešení lineárních hodin [4]

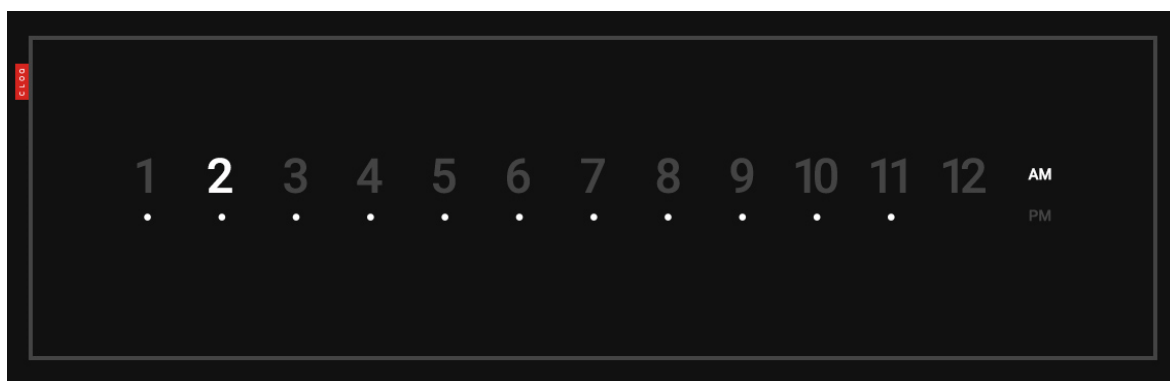
V současnosti se výrobou a prodejem tohoto netradičního způsobu zobrazování času zabývá jen velmi málo firem. Díky tomu mnoho návrhů na konstrukci pochází z dílny amatérů a hobby tvůrců. Projekty, z nichž jsem čerpal inspiraci pro vytvoření vlastního modelu, představím v následujících kapitolách.

2.2.1 CLOQ The linear clock.

Se zajímavým řešením lineárních hodin přišel britský designer Rob Lafratta v roce 2015. Jeho koncept lineárních hodin se inspiroval starými analogovými rádií a experimentuje s myšlenkou o zobrazení času v jedné linii. Jeho vize byla zjednodušit design standartních hodin s kruhovým ciferníkem a přinést zajímavé řešení zobrazení času. [5]

Samotné hodiny ovšem na rozdíl od původního konceptu neobsahují pohyblivé součásti a zobrazování hodin zde probíhá pomocí LED podsvícení. Každé z čísel na liště zde představuje příslušnou hodinu a podsvícením určitého čísla se určí aktuální hodina. Minuty jsou reprezentovány tečkami pod číslicemi hodin. Počet rozsvícených teček pak představuje pětiminutový časový interval.

Design hodiny si můžeme prohlédnout na přiloženém obrázku (viz Obr. 2-2)



Obr. 2-2 Design CLOQ lineárních hodin [5]

2.2.2 Linear Clockworks

Další řešení lineárních hodin přináší konstruktér Lindsay Morris a jeho firma Linear Clockworks (USA – Asheville), která vyrábí lineární hodiny na zakázku.

Samotné lineární hodiny se skládají z ciferníku, který je v podobě dlouhé lišty s čísly od 6 do 12 (viz obr. 2-3). Po tomto ciferníku se během dne směrem doprava pohybuje pouze jeden ukazatel, který určuje aktuální čas s rozlišitelností 15 minut. O půlnoci se pohyb reverzuje a ukazatel se začne pohybovat zpět doleva, přičemž návrat do výchozí polohy na 6:00 trvá šest hodin. Samotný ukazatel je pevně spojený s krytem pro elektroniku, která se pohybuje společně s ukazatelem. Řídící jednotka se skládá z řídicího obvodu, obvodu reálného času (RTC obvod), displeje pro pohodlnější nastavení času a dvou tlačítek. Samotný pohyb potom zajišťuje připojený krokový motor. Hodiny jsou napájeny baterií, která vydrží 9 až 12 měsíců a dobíjí se pomocí USB konektoru. Firma vyrobené lineární hodiny prodává od 250 do 925 dolarů v závislosti na zvoleném designu. [6]

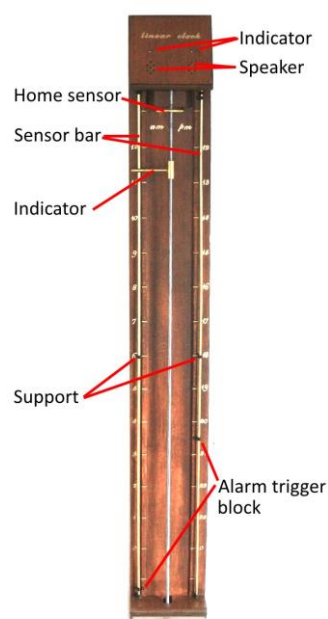


Obr. 2- 3 Jeden z designů nabízející firma Linear Clockworks [6]

2.2.3 Linear clock by JanDerogee

Tyto lineární hodiny se inspiřují designem starých mechanických hodin a uveřejnil je Jan Derogee na svých osobních webových stránkách.

Ciferník je rozdělen do dvou sloupců, ve kterých jsou napsány číslice symbolizující hodiny (viz obr. 2-4). Levý sloupec symbolizuje dopolední hodiny, pravý odpolední. Mezi sloupci se ve středu ciferníku nachází závitová tyč, na které se nachází jediná ručička. Samotná ručička je pak opřena o vodivou „senzorovou tyč“, umístěnou na vnějších stranách ciferníku, která slouží jako opora ručičky a taktéž se na ni nastavuje čas alarmu. V případě, že se závitová tyč otáčí, dochází k zvedání nebo spouštění ručičky, která určuje aktuální čas. Tato závitová tyč je pevně spojena s výstupní hřídelí krokového motoru. Motor se nachází ve spodní části hodin společně s řídicí elektronikou. Hodiny řídí mikročip ESP8266. Požitý krokový motor má označení 28BYJ-48. Na hodinách se taktéž nachází dvojice reproduktorů pro zvukovou signalizaci alarmu. [7]



Obr. 2-4 Design lineárních hodin [7]

2.2.4 Linear clock by Euphy

Tento projekt opět přinesl trochu odlišný přístup k řešení lineárních hodin, který více reflektuje původní koncept.

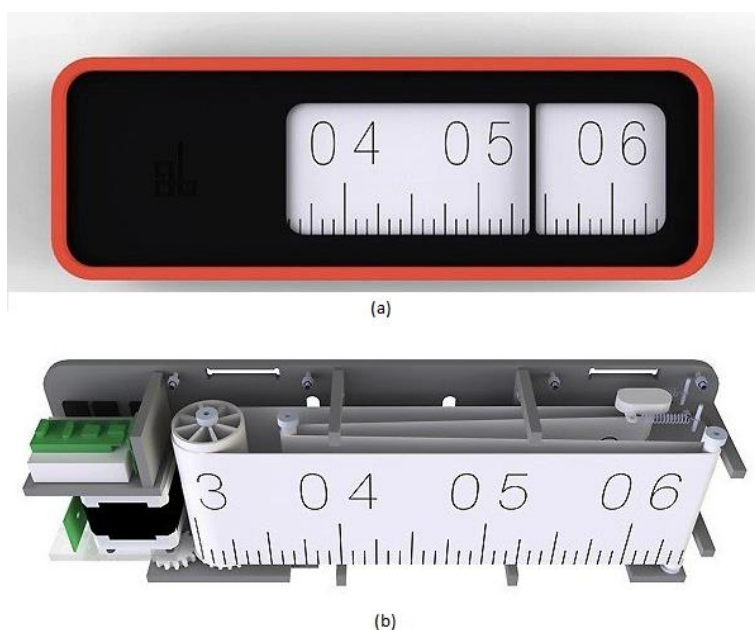
Základem je opět dlouhý ciferník ve tvaru lišty s čísly hodin a minut. Přímo na jednom z konců ciferníku jsou připevněny krokové motory a řídicí elektronika jejichž hlavním kontrolérem je deska Arduino UNO. Na každé z výstupních hřídelí krokových motorů se nachází dva páry kladek. Další samostatná pomocná kladka je umístěna na opačném konci ciferníku. Na jednu z kladek na hřídeli motoru je namotáno lanko, které je následně přetaženo přes pomocnou kladku a upevněno k druhé kladce na hřídeli motoru. [8] Otáčením se převíjí lanko z jedné kladky na hřídeli motoru přes pomocnou kladku na kladku druhou. Na lanku je poté umístěn indikátor, který se přesouvá společně s ním po ciferníku čímž se zobrazuje čas.

2.2.5 Linear clock by Audun Ask Blaker

Tyto lineární hodiny vytvořil průmyslový designér Audun Ask Blaker.

Čas je zde vytištěn na uzavřeném pásmě, které je navinuto mezi rotujícími válci (viz Obr. 2-5 b). Jeden z válců je poté pomocí ozubeného převodu řízen skrze elektromotor. Otáčením elektromotoru dojde k rotaci jednoho z válců a pásmo se začne převíjet mezi válci. Pohyb pásma vůči indikátoru, který je pevně spojen s konstrukcí hodin, poté způsobuje zobrazování času. [9]

Samotný design si můžete prohlédnout na přiloženém obrázku (viz Obr. 2-5 a)



Obr. 2-5 Design lineárních hodin by Audun Ask Blaker (a) design hodin (b) vnitřní mechanismus [9]

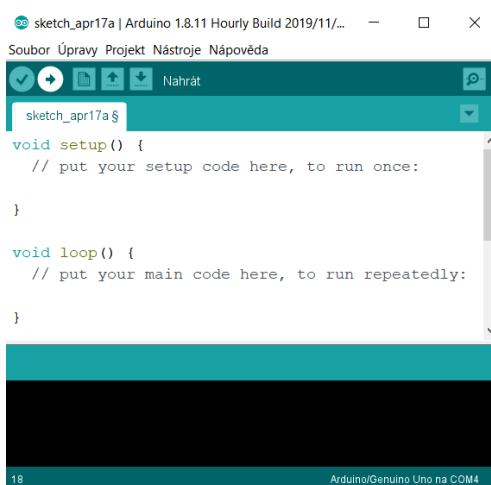
2.3 Arduino

Arduino je open source elektronická platforma založena na mikrokontrolerech ATmega od firmy Atmel. Jedná se o jednoduchý programovatelný jednodeskový počítač, který vytvořil Massimo Banzi v roce 2005. Původním cílem projektu Arduino bylo vytvoření levného intuitivního vývojového setu, který pomůže ve výuce studentů na školách, avšak projekt byl natolik úspěšný že se rozšířil i mezi veřejnost do celého světa. 51[10] Díky této skutečnosti vznikla kolem této platformy velká komunita, která sdílí mezi sebou poměrně velké množství návodů a projektů.

2.3.1 Arduino IDE

V rámci platformy Arduino vzniklo kromě samotných vývojových desek i vlastní vývojové prostředí s názvem Arduino IDE (integrated development environment = integrované vývojové prostředí). Vývojové prostředí Arduino IDE je napsáno v jazyce Java a vychází z jiného výukového prostředí s názvem Processing, které bylo upraveno přidáním mnoha funkcí a podpory knihovny Wiring. Samotné Arduino je možné programovat v programovacím jazyce C nebo C++, nejjednodušší programování je právě za pomoci knihovny Wiring. [10] Vzhledem k tomu je právě knihovna Wiring pro programování Arduino v současnosti velmi oblíbená a rozšířená.

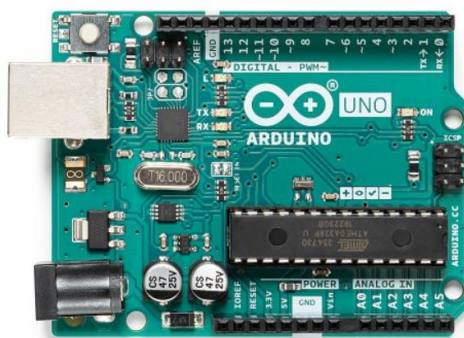
Samotnou strukturu programu lze rozdělit do několika bloků (viz Obr. 2-6). Prvním z nich je blok (funkce) void setup(). V tomto bloku se nachází kód, který se provede na začátku programu pouze jednou. To znamená, buď po nahrání kódu, připojení napájení nebo stisknutí tlačítka pro restart. Dalším z bloků je (funkce) void loop(). Jedná se o nekonečnou smyčku. Příkazy vepsané do této smyčky se neustále opakují až do vypnutí napájení. Dalším blokem jsou řádky ještě před funkcí void setup(). Zde se inicializují knihovny a mohou se zde deklarovat proměnné použité v programu. [10]



Obr. 2-6 Prostředí Arduino IDE [10]

2.3.2 Arduino UNO

Arduino Uno (viz Obr. 2-7) je jednou z nejpoužívanějších desek jakou platforma Arduino nabízí a je přímým pokračovatelem hlavní vývojové linie. Aktuálně je v prodeji třetí verze této desky. Na desce se nachází procesor ATmega328, USB port i s převodníkem pro snadné a pohodlné připojení k počítači pro nahrání programu a napájecí souosý konektor pro snadné napájení desky. Na desce se nachází 14 digitálních pinů nastavitelných jako vstupní i výstupní a 6 analogových vstupních pinů. [10]



Obr. 2-7 Arduino UNO REV3 51[11]

2.3.3 Arduino klony

Vzhledem k open source povaze platformy Arduino tak mimo oficiální řadu vzniklo i mnoho desek neoficiálních, takzvané klony. Setkat se můžeme s klony, které jsou tvarově a výbavou téměř totožné s oficiálními modely a liší se například jen cenou. Nicméně se můžeme setkat i s klony, které jsou přizpůsobené jen k jedné konkrétní činnosti. [10]

2.3.4 Arduino Shieldy

Výhodou platformy Arduino je možnost rozšířit jeho funkce pomocí tzv. shieldů. Jedná se o elektronickou desku připojitelnou na desku Arduino pomocí pinů, které se nasunou do příslušných zdířek. [10] Výhodou je jednoduchost propojení s deskou Arduino bez nutnosti použít propojovací vodiče. Obdobně jako je mnoho typů Arduino desek, tak také existuje i celá řada shieldů například Ethernet Shield, Wifi Shield, Motor Shield a další. Při výběru je však nutné dávat si pozor na kompatibilitu shieldu s deskou Arduino. [10]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Na základě analýzy současných řešení můžeme rozlišit dva typy lineárních hodin. Prvním typem jsou hodiny bez pohyblivých částí, kde se aktuální čas zobrazuje nejčastěji pomocí světelné signalizace. Druhý typ poté využívá pohyby indikátoru (ručička) vůči ciferníku nebo pohyb ciferníku vůči indikátoru. Pokud se podíváme na lineární hodiny z hlediska jejich zamýšleného umístění zjistíme, že většina projektů tvoří rozměrově větší časomíry určené k zavěšení na zeď. Nicméně rozměrově menší lineární hodiny, které by bylo možné umístit například na pracovní stůl, zcela chybí. V práci je tedy řešena právě problematika lineárních hodin s pohyblivými částmi, které by měly dostatečně malé rozměry pro umístění na polici či pracovní stůl.

V rámci práce pak musí být vyřešena problematika měření a vhodného zobrazování času. Parametry, které musíme v návrhu zohlednit jsou především cena jednotlivých komponentů a materiálů, spotřeba energie, tichý chod a nízká hmotnost a rozměry. Navíc mezi základní funkce musí patřit snadné a intuitivní odečítání času z lineárních hodin, automatické seřízení času po znovuoobnovení napájení, snadná a pohodlná možnost přenastavení času a v neposlední řadě funkce nastavitelného alarmu.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je navrhnout konstrukci a vyrobit funkčního modelu lineárních hodin za pomoci 3D tisku.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- Výběr řídicího hardwaru pro zajištění všech funkcí lineárních hodin.
- Výběr mechanismu a celkového konstrukčního uspořádání lineárních hodin
- Návrh krytů a upevnění elektroniky v modelu.
- Návrh mechanismu pro chod hodin.
- Návrh zobrazovacích prvků lineárních hodin.
- Výroba prototypu lineárních hodin pomocí 3D tisku.
- Vytvoření a optimalizace řídicího programu.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Hlavním cílem této kapitoly je vyřešit dva základní konstrukční uzly, a to rozhodnout o řídicích komponentách, které určí základní funkce a parametry lineárních hodin. Následně zvolit vhodné rozvržení hodin a mechanismus pohybu indikátoru.

4.1 Komponenty

V následné kapitole bude rozebráno a zdůvodněno zvolení komponent použitých v lineárních hodinách. Jedná se o elektronické obvody zajišťující funkce lineárních hodin jako jsou měření času, pohyby indikátorů a alarm.

4.1.1 Řízení Hodin

Základem řízení zde bude jednotka Arduina UNO, ke kterému se poté standartně připojí ostatní potřebné moduly k rozšíření funkcí Arduina.

Kromě originální desky Arduino UNO je možné vybírat i ve velkém množství jeho klonů. Pro tuto práci byl vybrán klon Arduino UNO od firmy Eses. Tento klon si zachovává všechny důležité funkce a základní parametry originální desky a jediným znatelným rozdílem je využití jiného USB převodníku s označením CH340. Důvodem vybrání tohoto klonu na rozdíl od originální desky byla především nižší cena. Základní parametry zvolené desky uvádím v následující tabulce (viz Tab. 4-1). [12]

Základní charakteristika Arduino UNO (klon)	
Hlavní čip	ATmega328
Frekvence procesoru	16 MHz
Velikost Flash paměti	32 KB
Převodník	USB CH340
Max. vstupní napětí	6 až 20 V
Počet digitálních I/O pinů	14
Počet analog. vstup. pinů	6
Max. proud I/O pinem	20 mA
Max. proud 3V3 pinem	50 mA
Rozměry	68,6 x 53,4 mm
Hmotnost	25 g

Tab. 4-1 Základní parametry Arduina UNO (klon) [12]

4.1.2 Motory

Pro správnou funkci lineárních hodin je nutné zvolit vhodný typ motoru, na něž je jako hlavní požadavek kladeno přesné polohování výstupní hřídele. Mezi další požadavky patří nízká cena, malé rozměry a také snadné řízení.

Možným řešením je použití polohového servopohonu. Servopohon je regulační pohon, jenž se sestává z jednoho nebo více elektrických motorů, napájecích výkonových měničů a řídicích a regulačních obvodů. Servopohon je zapojen vždy v uzavřené regulační smyčce, se zpětnou vazbou rychlostní a většinou i polohovou. [13]

Dalším uvažovaným řešením je využití krokového motoru. Krokové motory jsou synchronní stroje. Pohyb zde není spojitý, ale realizuje se pomocí kroků. Krok je přeskok mezi stabilními polohy motoru vždy o úhel daný konstrukcí motoru. [14]

Výhodou krokových motorů vůči servopohonům v této aplikaci je možnost nastavovat polohu krokového motoru bez nutnosti zpětné vazby, což velmi zjednodušuje řízení motoru. Další výhodou je nižší cena oproti servopohonu. Ovšem jejich velikou nevýhodou je znatelný pokles momentu při zvyšujících se otáčkách, kterým servopohony netrpí.

Po zvážení parametrů a kritérií byl nakonec vybrán krokový motor s označením 28BYJ-48. 52[15] Představuje jeden z nepoužívanějších a nejlevnějších miniaturních krokových motorů na trhu. Jedná se o unipolární krokový motor se jmenovitým napětím 5 V. Další základní charakteristiky jsou uvedeny v příložené tabulce (viz Tab. 4-2).

Základní charakteristiky krokového motoru 28BYJ-48	
Rated voltage (Jmenovité napětí)	5 VDC
Number of Phase (počet fází)	4
Speed Variation Ratio (převodový poměr)	1/64
Step Angle (Velikost kroku)	11,25°
Steps per revolution (Počet kroků na otáčku)	2 048
Idle In-traction Frequency (max. rozběhová frekvence)	> 600 Hz
Idle Out-traction Frequency (max. frekvence při chodu)	> 1 000 Hz
In-traction Torque (max. točivý moment)	>34.3 mN.m (120 Hz)
Friction torque (zbytkový moment)	600-1 200 gf.cm
Pull in torque (rozběhový točivý moment)	300 gf.cm
Rise in Temperature (Zvýšení teploty)	<40 K(120Hz)

Tab. 4-2 Charakteristiky krokového motoru 28BYJ-48 [15]

4.1.3 Řízení motorů

Krokový motor však není možné připojit k Arduino přímo, ale musí být připojen pomocí budiče (driveru). Driver krokového motoru je elektronický obvod, který na základě řídicích signálů generuje impulsy v určitém sledu a délce. Tyto impulsy spínají jednotlivá vinutí krokového motoru, což řídí počet kroků a smysl otáčení. [14]

Drivery existují v několika vyráběných konstrukčních variantách. Jednou z nich je použití Arduino shieldu, u kterého je výhoda snadného připojení na příslušnou Arduino desku (viz kapitola 2.3.4). Další možnost je použití samostatného modulu, u kterého je ovšem nutné k propojení s deskou Arduino použít propojovací vodiče. Výhodou tohoto řešení je ovšem zpravidla nižší cena a rozměry než u shieldů.

Vybraný modul Motor driver A3967 byl zvolen zejména na základě nízké ceny, vhodného rozmezí pracovních hodnot napětí a proudu pro zvolený krokový motor. [16] Mezi funkce tohoto driveru pak patří možnost změny pracovního kroku, uspání driveru za účelem snížení spotřeby energie a snadné řízení motorů pomocí dvou pinů. Další výhodou tohoto modulu jsou montážní otvory pro šrouby. Základní charakteristiky jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 4-3).

Základní charakteristiky pro Motor driver A3967	
Load Supply Voltage Range (rozsah napájecího napětí)	4,75 – 30 V
Output Current range (maximální výstupní proud)	150 – 750 mA
Logic Supply Voltage Range (rozsah ovládacího napětí)	3 – 5,5 V
Operation Temperature Range (operační teplota)	-20 – 85 °C
Rozměry	48 x 20 mm

Tab. 4-3 Charakteristiky Motor driveru A3967 [16]

4.1.4 Měření času

Modul reálného času (dále RTC modul) je elektronický obvod sloužící k přesnému měření času. Pro potřeby hodin je tento modul velice vhodný, jelikož vnitřní oscilátor Arduina vykazuje větší chybu v měření času. Dalšími výhodami modulu je vlastní zdroj energie řešený v podobě baterie vložené do modulu. Toto je výhodné zejména, pokud dojde k výpadku primárního zdroje napětí napájející Arduino, protože v tomto případě RTC modul bude dále čas měřit. Po znovuoobnovení primárního zdroje nebude nutné znovu nastavovat manuálně čas na hodinách. Samotná spotřeba energie modulu je poměrně malá a na baterii je schopen tento modul fungovat po dobu několika let.

Vybraný modul s označením RTC Hodiny reálného času DS323 (RTC modul) bude v projektu uchovávat informace o aktuálním čase. Samotný modul komunikuje přes rozhraní I2C. Podporované formáty času jsou: sekundy, minuty, hodiny, dny, měsíce a roky, včetně přestupných let. Modul je schopný čas uchovat díky záložní baterii typu LIR2032. 52[17] Základní charakteristiky jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 4-4).

Základní charakteristiky pro RTC modul	
Čip	DS3231
Přesnost	±2ppm (±0,432 sekund/den)
Paměť	AT24C32 IIC EEPROM paměť 32k
Rozměry	38 x 22 x 14 mm

Tab. 4-4 Charakteristiky RTC modulu [17]

4.1.5 Ovládací rozhraní

Pro nastavování času na lineárních hodinách je nutné navrhnout příslušné ovládací prvky. U většiny běžně prodávaných hodin se vyskytuje trojice tlačítek pro nastavování času, popřípadě data. V tomto případě byly vybrány trojice mikropínačů. Krajiní spínače (tlačítko UP a tlačítko DOWN) zde budou ke zvyšování nebo k snižování dané veličiny a prostřední spínač (tlačítko SET) k přepínání mezi módy pro nastavení hodin. Samotné mikropínače budou umístěny na plošném spoji s montážními otvory.

Pro snadné nastavování času je dále přidán i displej. Vyhovující je modul, který minimálně zobrazuje čtyři číslice pro zobrazování hodin a minut. Vybraný modul hodinového displeje je navíc opatřen radičem TM1637, který zjednodušuje připojení modulu na Arduino i jeho následné programování.

4.1.6 Polohování

Po zapojení napájení sestavených lineárních hodin je nutné, aby Arduino dokázalo určit aktuální polohu indikátoru, popřípadě dorazit do výchozí polohy a synchronizovat aktuální čas s časem zobrazeným.

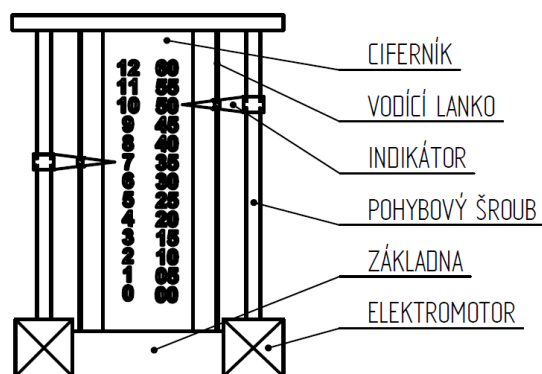
Jeden z možných řešení je zapisovat po každém pohybu indikátoru jeho aktuální polohu do paměti, na které tato informace zůstane zapsaná i po odpojení napájení. Výhodou tohoto řešení je vyhnutí se použití koncových spínačů nebo dalších senzorů. Nevýhodou však je, že toto řešení nepočítá s možným vnějším zásahem, který silou posune indikátor do jiné polohy. Arduino poté nemá žádný způsob, jak tuto chybu korigovat a musí se zadat aktuální hodnota polohy do programu ručně. Další problém nastává v oblasti samotného ukládání hodnoty. Arduino i RTC modul sice obsahují EEPROM paměti, které uchovávají hodnoty i po odpojení napájení, nicméně mají jen omezený počet zapsání, a to přibližně 100 000, což by zapříčinilo snížení životnosti hodin. [18]

Dalším řešením je použití hardwarových koncových spínačů. Po připojení napájení se indikátor začne pohybovat směrem k výchozí poloze. Až indikátor dorazí do zamýšlené výchozí polohy narazí na koncový spínač, který sepne. Po sepnutí se do programu nahrají hodnoty aktuální polohy indikátoru.

Po porovnání řešení bylo rozhodnuto o použití koncových spínačů i přes nutnost použití dalších elektrotechnických součástek u tohoto řešení.

4.2 Koncepční uspořádání č. 1

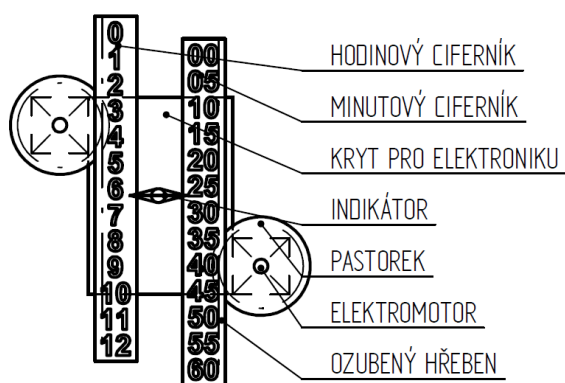
Toto řešení vychází z mechanismu pro převod rotačního na lineární pohyb, a to pomocí pohybového šroubu. Základem řešení je vertikální ciferník připojený k základně (viz Obr. 4-1), ve které se nachází veškerá potřebná řídicí elektronika pro měření času a ovládání lineárních hodin a dvojice elektromotorů. K výstupním hřídelím elektromotorů jsou připojeny pohybové šrouby, na kterých jsou umístěny indikátory. Otáčením řízených elektromotorů se zdvihají nebo spouští indikátory čímž se ukazují minuty a hodiny. Přetáčení indikátorů brání přidaná vodící lanka, které prochází otvorem v indikátoru.



Obr. 4-1 Schéma konceptu č. 1

4.3 Konceptní uspořádání č. 2

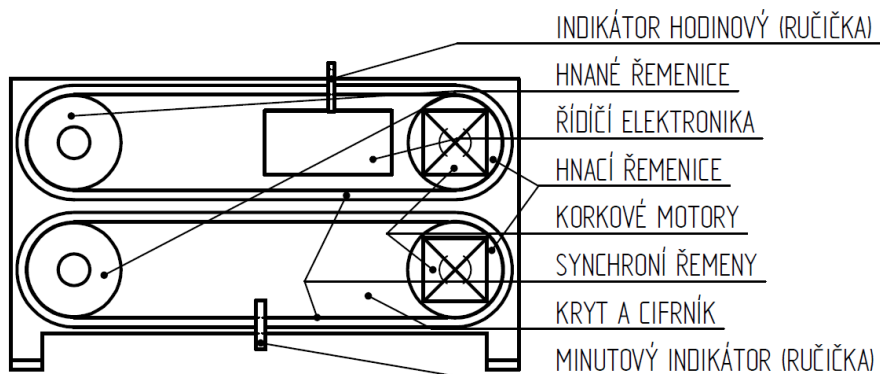
U tohoto řešení je použit jako převodový mechanismus ozubený hřeben. Ke krytu obsahující řídicí elektroniku je připevněna dvojice elektromotorů. Na výstupních hřídelích elektromotorů jsou připojeny ozubená kola, které zabírají s ozubeným hřebem. Samotný pár ozubených hřebů je uložen v lineárním vedení, které jej spojuje s krytem elektroniky. Hodinové a minutové ciferníky jsou poté pevně spojeny s ozubenými hřebeny. Indikátor je pevně spojen s krytem elektroniky. Chodem krokových motorů se otáčí ozubená kola, která spolu zabírají se zuby ozubených hřebů. Otáčení způsobuje pohyb ozubených hřebů a s ním spojených ciferníků vůči indikátoru (viz Obr. 4-2).



Obr. 4-2 Schéma konceptu č. 2

4.4 Konceptní uspořádání č. 3

Třetí možné řešení využívá jako převod synchronní řemenový převod, na kterém je umístěný indikátor. K samotnému ciferníku je přepojeny dva páry řemenic. Vždy jedna řemenice z páru je pak připojena na výstupní hřídel řízeného elektromotoru. Společně s otáčením motoru se otáčí i řemenice která pohybuje s řemenem a k němu připojený indikátor se pohybuje po ciferníku což zobrazuje čas (viz Obr. 4-3).



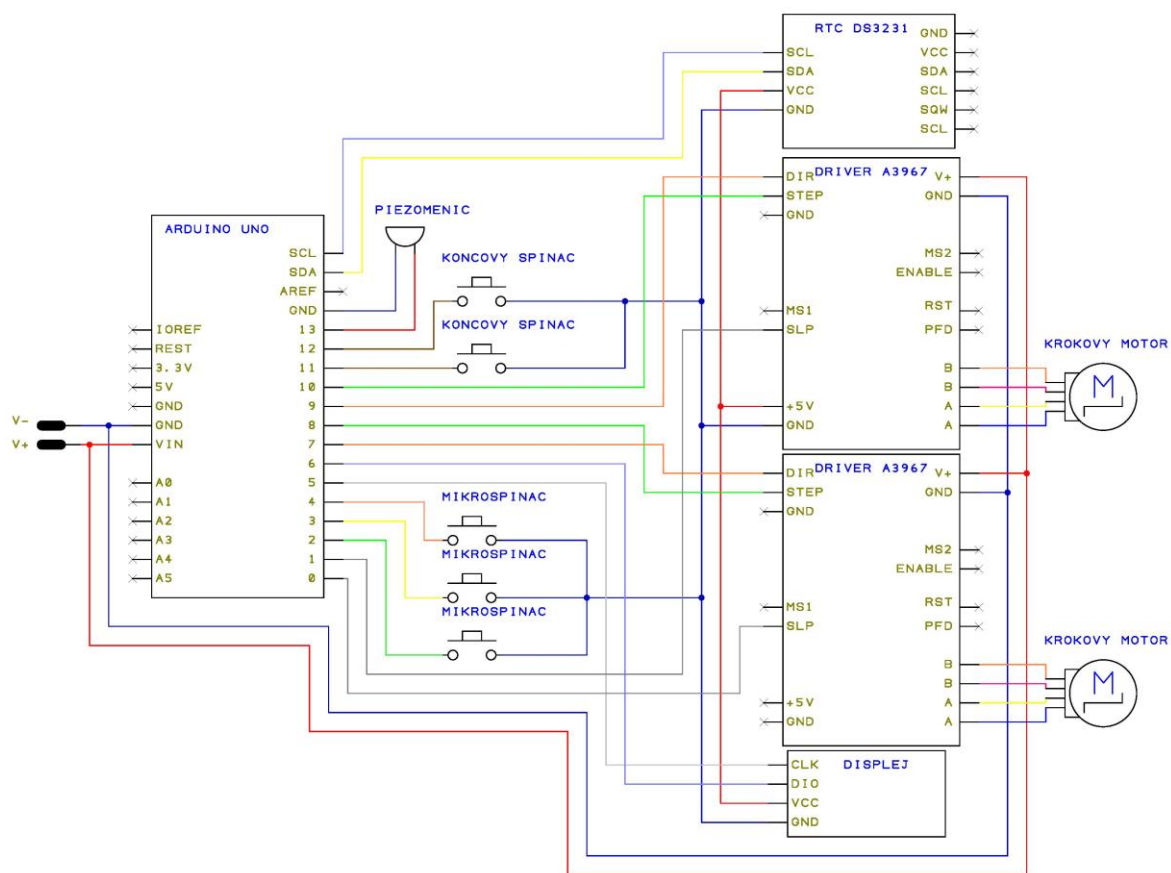
Obr. 4-3 Schéma konceptu č. 3

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Za finální zvolené konstrukční řešení bylo zvoleno koncepční řešení číslo 2 a to zejména z důvodů způsobu výroby modelu pomocí FDM 3D tisku.

5.1 Zapojení

Všechny jednotlivé komponenty byly zapojeny k řídicí desce Arduino UNO podle přiloženého elektrického schématu (viz Obr. 5-1).



Obr. 5-1 Schéma zapojení

Pro přehlednost doplňuji tabulku, která shrnuje připojení jednotlivých digitálních a analogových pinů Arduino UNO k modulům a dalším elektrotechnickým součástkám na základě schématu zapojení (viz Obr. 5-1). Taktéž je v tabulce stručně popsána jejich funkce (viz Tab. 5-1).

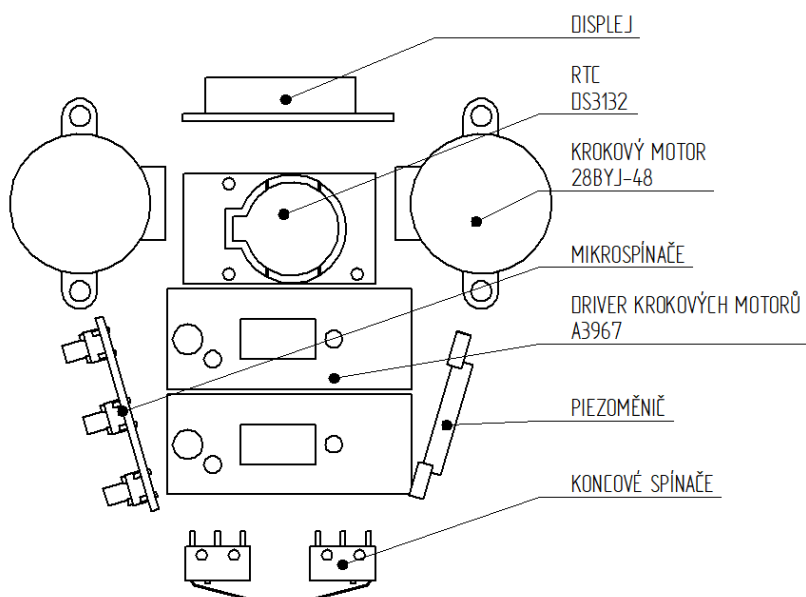
Označení pinu	Připojená komponenta	Funkce
0, 1	Driver krokových motorů	Vypnutí driverů krokových motorů
2,3,4	Mikrospínače	Tlačítka pro ovládání hodin
5,6	Display	Zobrazení hodnot na displeji
7,9	Driver krokových motorů	Řízení smyslu otáčení krokových motorů
8,10	Driver krokových motorů	Řízení natočení krokových motorů
11,12	Koncové spínače	Polohování hodin
13	Piezoměnič	Zvuková signalizace alarmu
SDA/A4, SCL/A5	RTC modul	Měření času

Tab. 5-1 Propojení analogových a digitálních pinů

5.2 Konstrukční rozvržení

Prostorové rozmístění jednotlivých elektrotechnických součástek v modelu bylo navrženo především s ohledem na celkové rozměry zařízení a snadnou montáž a demontáž zařízení. Na základě tohoto rozvržení poté budou vymodelované kryty, ve kterých se komponenty připevní pomocí samořezných šroubů.

Zvolil jsem variantu, v níž jsem rozdělil elektrotechnické součástky do dvou řad nad sebou, z důvodu snížení rozměrů. Jednu polovinu potom osadí pouze deska Arduino a ostatní součásti budou připojeny do poloviny druhé. Samotné rozložení druhé poloviny lze lépe vidět na přiloženém schématu (viz Obr. 5-1).



Obr. 5-2 Konstrukční rozložení elektronických součástí

5.3 Návrh krytů

Na základě zamýšleného rozložení elektrotechnických součástí byl vytvořen kryt pro jejich uchycení. Samotný kryt bude dělitelný na dvojici dílů, který se následně spojí samořezným šroubem. U samotného návrhu byl brán zřetel především na nízkou hmotnost a snadnou výrobu. Jelikož zamýšlený způsob výroby finálního prototypu je pomocí 3D tisku je vhodné designovat součást s ohledem na tento způsob výroby, především minimalizovat množství převisů na modelu pro minimalizaci podpůrného materiálu. Většina doporučených rozměrů byla převzata pro plastové součásti vyráběné vstřikováním plastů. [19]

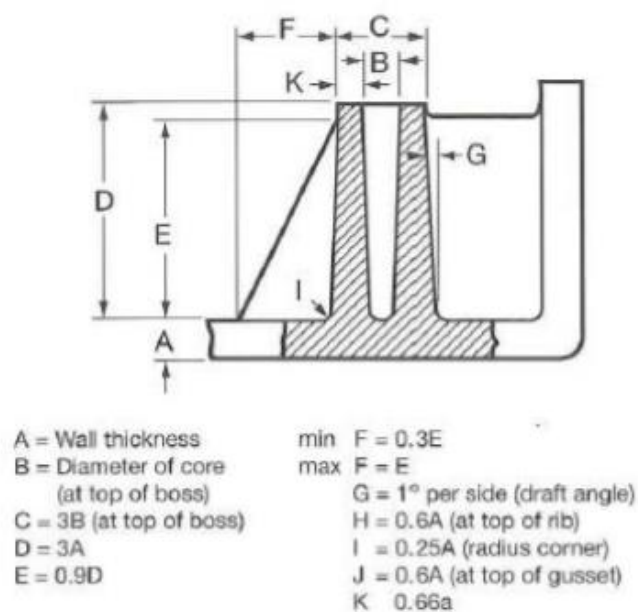
5.3.1 Upevnění modulů

Všechny moduly, které jsou použity mají předvrtané montážní otvory pro šrouby. Velikosti montážních otvorů uvádím v následující tabulce (viz Tab. 5-2).

Komponenta	Počet otvorů	Průměr montážního otvoru [mm]	Použitý samořezný šroub DIN 7981C
Arduino UNO	4	3,175	2,9 x 6,5
RTC modul	3	2,4	2,2 x 6,5
Driver krokových motorů	2	3,5	2,9 x 6,5
Krokové motory	2	4,2	2,9 x 12
Displej	4	2,2	2,2 x 6,5
Piezoměnič	2	2,5	2,2 x 6,5
Mikrospínače	2	2,5	2,2 x 6,5
Koncový spínač	2	2,2	2,2 x 8
Souosý konektor	2	2,5	2,2 x 6,5

Tab. 5-2 Montáž elektrotechnických součástek

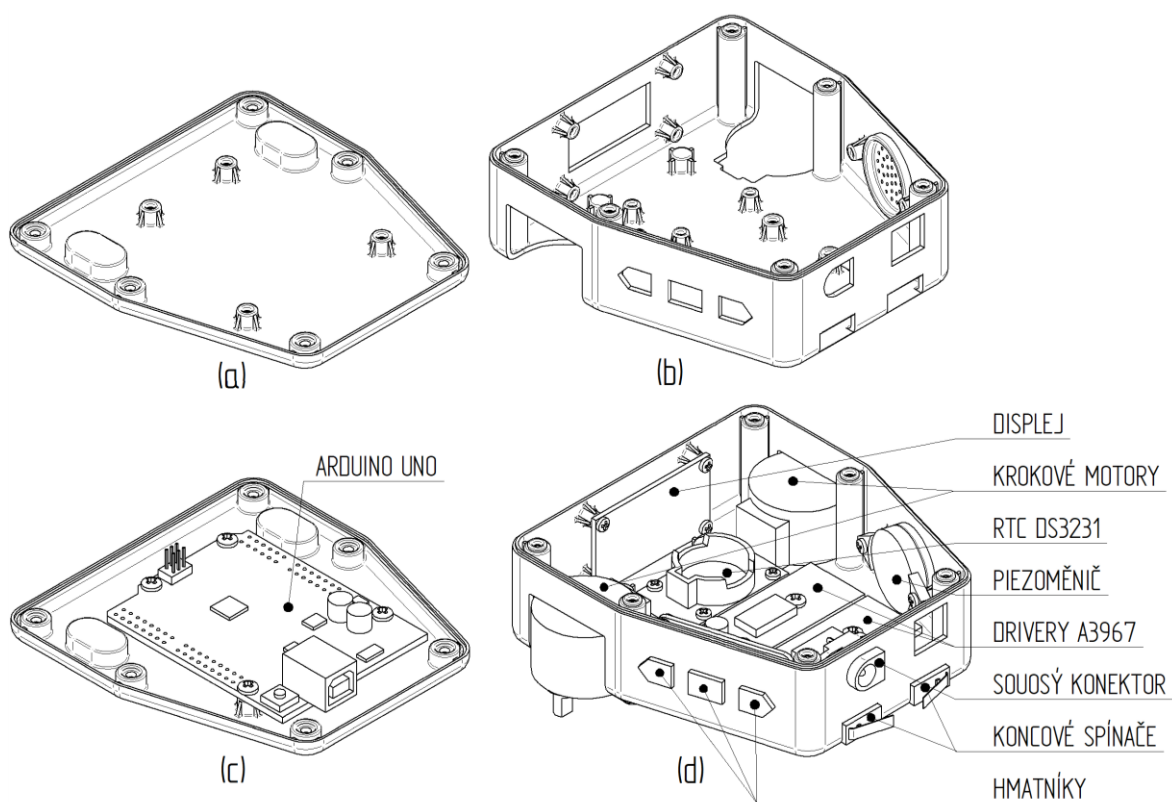
Pro upevnění modulů a dalších elektrotechnických součástek byly využity příslušné samořezné šrouby, které se zašroubovaly do vytvořených montážních nálitků v krytech. Rozměry montážních nálitků byly navrženy podle doporučených hodnot pro plastové součásti. [19] Průměr vnitřní díry (viz Obr. 5-3) u montážního nálitku byl pak určen na základě materiálu a použitého šroubu. [20]



Obr. 5-3 Doporučené rozměry montážního nálitku [19]

V rámci krytů byly vytvořeny i hmatníky pro ovládací mikropínače, které se nasunou do příslušných otvorů v čelním krytu. Hmatníky byly přidány především z estetických důvodů.

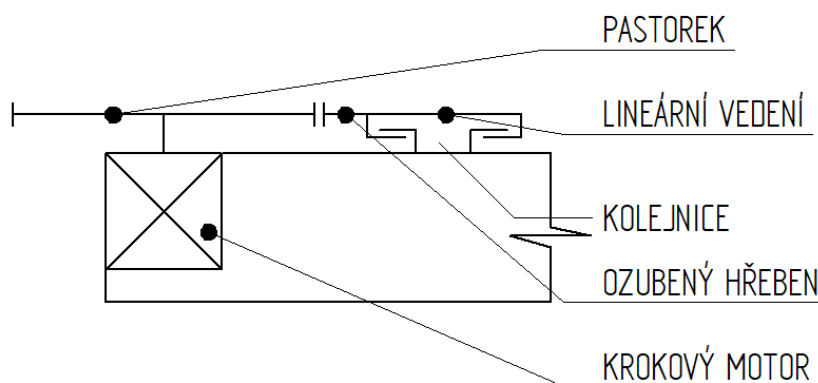
Finální návrh krytů je zobrazen na přiloženém nákresu (viz obr. 5-4)



Obr. 5-4 Kryty (a) neosazený zadní kryt (b) neosazený čelní kryt (c) osazený zadní kryt (d) osazený čelní kryt

5.4 Převodový mechanismus

Převod ozubeným hřebenem je mechanismus sloužící k transformaci pohybu z rotačního na lineární pohyb. V mém případě jde o transformaci otáčivého pohybu krokových motorů, na jejichž výstupních hřídelích budou umístěny pastorky, na lineární pohyb ozubených hřebenů uložených v lineárním kluzném vedení (viz Obr. 5-5).



Obr. 5-5 Schéma převodového mechanismu

5.4.1 Převod ozubeným hřebenem

Pro návrh čelních ozubených soukolí z oceli existuje řada norem a postupů například norma ČSN ISO 6336 nebo ČSN 01 4686. Výpočty, které se v normách uvádí, jsou detailní a zohledňují celou řadu vlivů, avšak příliš nekorespondují se skutečností v případě, kdy ocel nahradíme plastem. [21]

Důvodu proč tyto výpočty se odchylují od skutečnosti je hned několik. Při kontrole na ohyb považujeme zub za vetknutý nosník namáhaný prostým ohybem. Předpokladem výpočtu je, že zuby jsou ideálně tuhé a nedeformují se což pro ozubení z plastu neplatí. [21] Kontaktní namáhání je často určováno pomocí Hertzova tlaku. Pro výpočet je nutné znát materiálové charakteristiky jako modul pružnosti a Poissonovo číslo, které se u plastů výrazně liší při změně provozních podmínek jako je teplota, frekvence zatěžování nebo napětí. [21] Pro výpočet se však v zjednodušené formě i nadále používají a slouží pouze jako orientační výpočet.

Jelikož neexistují žádné normy pro pevnostní výpočet pastorku v záběru s ozubeným hřebenem tak je hřeben nahrazen ozubeným kolem s vysokým počtem zubů (1000 zubů). [22]

U pevnostního výpočtu ozubeného hřebenu proběhla pouze zjednodušená kontrola na ohyb v důsledku nedostatečných informací o mechanických vlastnostech vytisknutého materiálu.

Základní vstupní parametry hřebenového převodu nutné pro návrhový výpočet jsou modul $m_n = 1,5$ a počet zubů pastorku, $z_1 = 20$. Výpočtem rozměrových hodnotami ozubeného kola a hřebenu je součástí příloh (viz příloha výpočet převodu).

Pro výpočet obvodové síly se použije následující vztah (5.1):

$$F_T = \frac{2 \cdot M}{m_n \cdot z_1} = \frac{2 \cdot 34,3}{1,5 \cdot 20} = 2,287 \text{ N} \quad (5.1)$$

Kde F_T je obvodová síla udávaná v N, M je jmenovitý kroutící moment krokového motoru v Nmm, m_n je modul ozubení, z je počet zubů pastorku.

Výpočet ohybového napětí v patě zubu bude vypočten dle ČSN 01 4686. [23] Výpočet je zjednodušený a platí pro čelní ozubená kola s přímým a šikmým ozubením. Výpočet se omezuje na ohybového namáhání v patě zubu. [24] Ohybové napětí se vypočte dle vztahu (5.2):

$$\sigma_F = \frac{F_t}{m_n \cdot b_w} \cdot Y_F \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta \leq \sigma_{FP} \quad (5.2)$$

$$\sigma_F = \frac{2,287}{1,5 \cdot 2} \cdot 2,8 \cdot 0,568 \cdot 1 = 1,212 \text{ MPa} \leq 4,9 \text{ MPa}$$

kde σ_F je srovnávací ohybové napětí v patě zubu udávané v MPa, F_t je obvodová síla působící na roztečné kružnici v N, m_n je normální modul v mm, b_w je účinná šířka zubu v mm, Y_F je součinitel tvaru zubu, Y_ε je součinitel vlivu trvání záběru evolventy, Y_β je součinitel sklonu zubu, σ_{FP} je přípustné ohybové napětí v patě zubu v MPa.

Součinitel tvaru zubu $Y_F = 2,6$ se určí z diagramu (viz příloha výpočet převodu). Součinitel sklonu zubu $Y_\beta = 1$ pro přímé ozubení. Součinitel tvaru zubu se spočítá podle vzorce (5.3):

$$Y_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_\alpha} = \frac{1}{1,761} = 0,558 \quad (5.3)$$

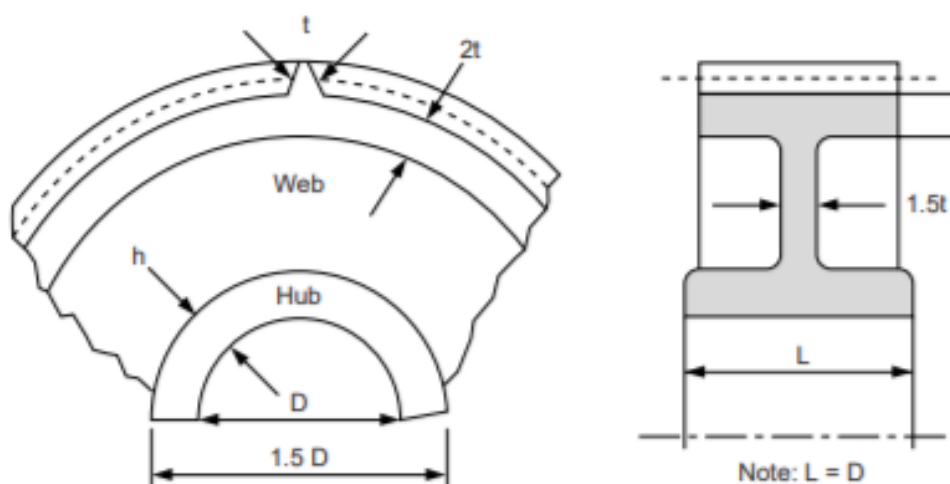
kde ε_α je součinitel záběru profilu v čelní rovině pro vnější ozubení (viz příloha výpočet převodu)

Přípustné ohybové napětí $\sigma_{FP} = 4,9 \text{ MPa}$. [25]

Pro výpočet bezpečnosti v ohybu S_F (5.4) se použijí následující rovnice:

$$S_F = \frac{\sigma_{FP}}{\sigma_F} = \frac{4,9}{1,212} = 4,043 \quad (5.4)$$

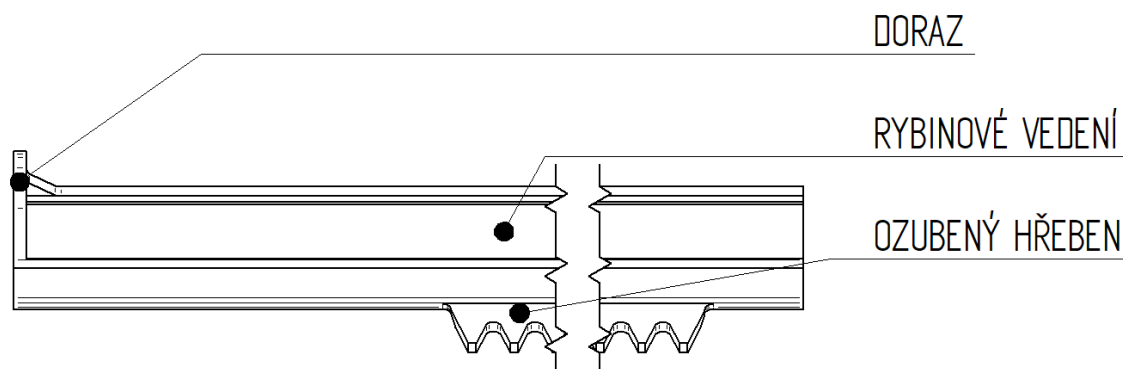
Ozubené kolo bylo poté i odlehčeno přidáním otvorů. Minimální tloušťka věnce pastorku je navržena podle doporučených hodnot [26] (viz Obr. 5-6) jako dvojnásobek tloušťky zubu na roztečné kružnici.



Obr. 5-6 Doporučené rozměry plastového ozubeného kola [26]

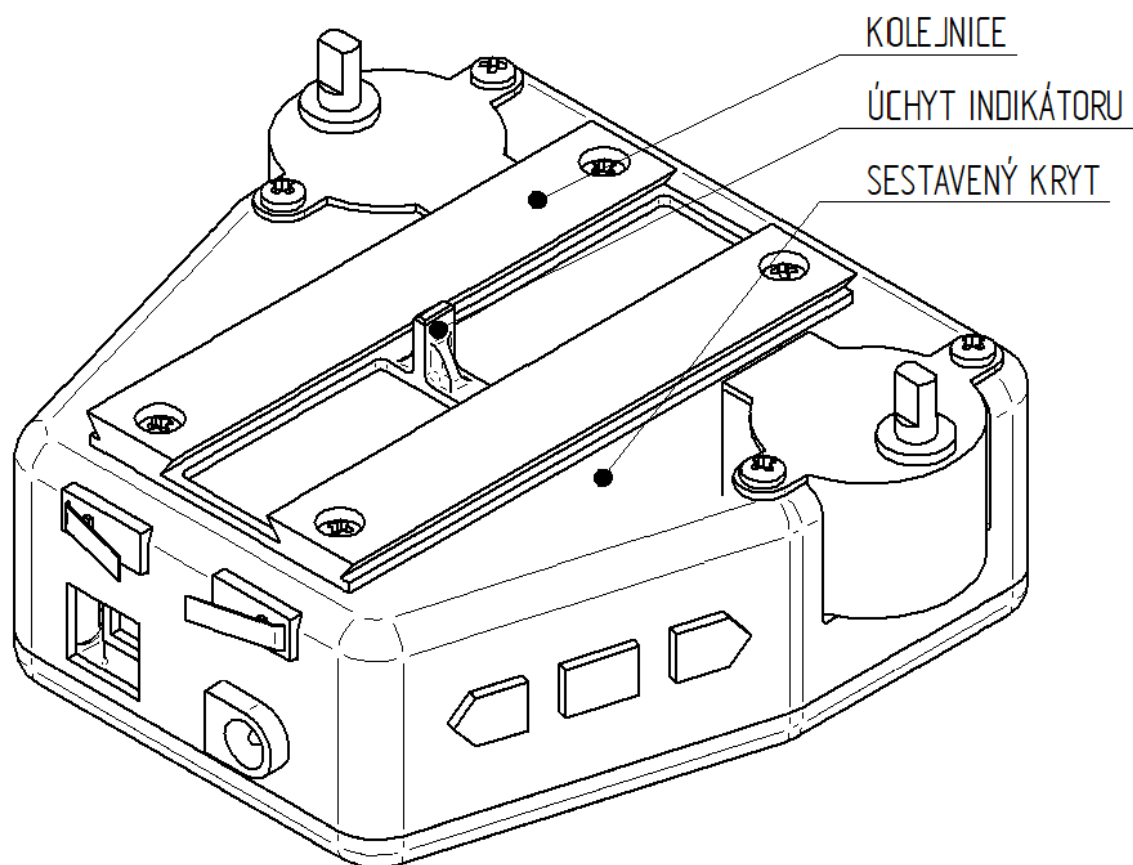
5.4.2 Vedení

Ozubený hřeben se pohybuje v kluzném lineárním vedení. Navržené vedení je rybinové a je vyrobeno jako jeden díl společně s ozubeným hřebenem. (viz Obr. 5-7).



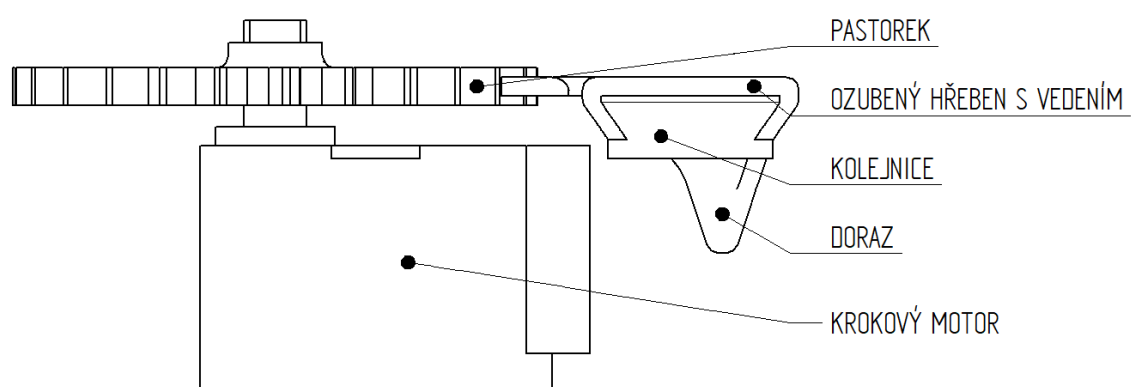
Obr. 5-7 Návrh ozubeného hřebenu s vedením

Tento díl se pohybuje v kolejničích, které jsou pevně spojeny s čelním krytem lineárních hodin pomocí samořezných šroubů. Obě kolejnice jsou vyrobeny jako jeden díl a je na něm vytvořen prvek pro uchycení indikátoru (ručičky) (viz Obr. 5-8)



Obr. 5-8 Sestavený kryt s připevněnou kolejnicí

Na jednom konci vedení je vytvořen doraz, který slouží k sepnutí koncového spínače po dosažení výchozí polohy hřebenu vůči krytům (viz Obr. 5-7 a Obr. 5-9).



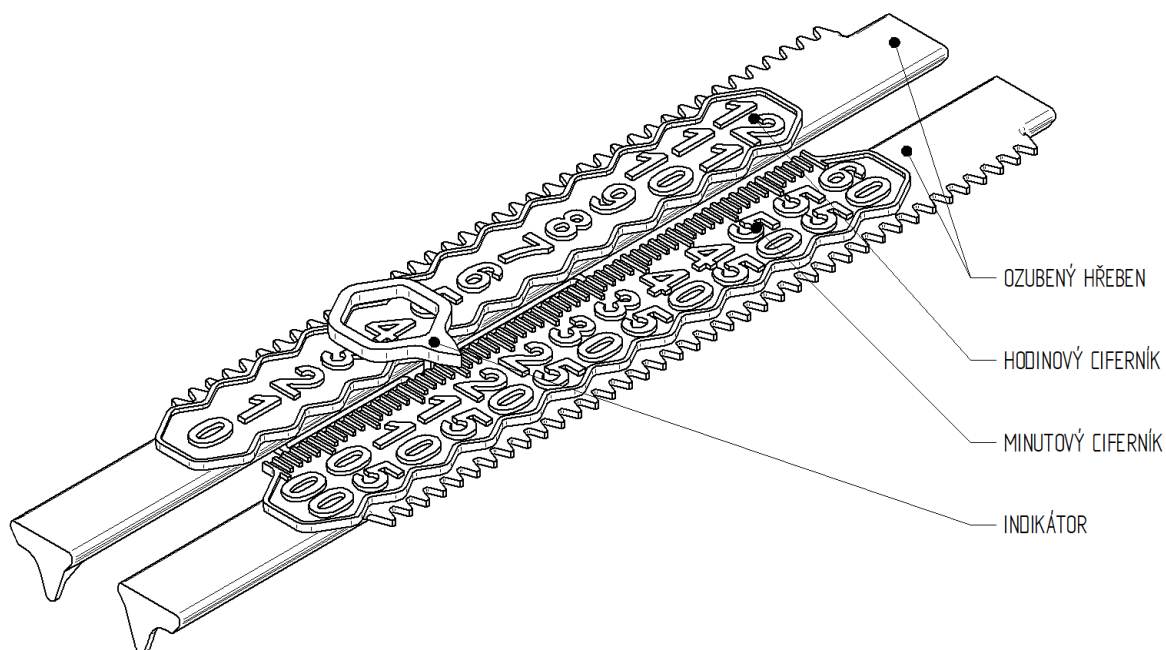
Obr. 5-9 Navržené vedení s hřebenovým převodem

5.5 Návrh ciferníků a indikátoru

Ciferníky slouží k zobrazování aktuálního času. Jedná se o dvojici tvarovaných lišt s čísly (viz Obr. 5-10). U hodinového ciferníku jsou to čísla od 0 do 12 a u minutového ciferníku od 0 do 60. Navíc u minutového ciferníku je přidána stupnice ze 60 dílků pro lepší rozlišitelnost lineárních hodin. Vzdálenosti mezi jednotlivými čísly hodin na hodinovém ciferníku jsou poté $l_{hod} = 12,5 \text{ mm}$ a vzdálenosti mezi jednotlivými dílky minut jsou $l_{min} = 2,5 \text{ mm}$.

Samotně ciferníky jsou pak pevně spojeny k ozubeným hřebenům lepením. Celkové umístění ciferníků vůči ozubeným hřebenům je lépe vidět na přiloženém obrázku (viz Obr. 5-10).

Indikátor je pevně ukotven ke kolejnicím a slouží k určování času. Jedná se o spojení jednoduché šipky pro ukazatel minut a smyčky která slouží pro indikaci minut.



Obr. 5-10 Ciferníky a indikátor

5.6 Výroba

Všechny díly kromě spojujících součástí a řídicí elektroniky jsou vyrobeny metodou FDM 3D tisku. Díly byly vyrobeny na 3D tiskárně ENDER 3 V2. Jedná se o levnou, open source 3D tiskárnu od společnosti Creality určenou spíše pro neprůmyslové použití. Maximální rozměry výtisku pak jsou: 220x220x250 mm. Maximální teplota trysky je 260 °C a maximální teplota podložky je 110°C. [27]

5.6.1 Materiál

Materiál pro kryty elektrotechnických součástí byl zvolen PETG (polyethylene terephthalate glycol) filament od firmy PM Filament. PETG je univerzální pevný a houževnatý materiál, který se vyznačuje dobrou tepelnou stálostí a malým smrštěním při tisku. PETG má výborné mechanické vlastnosti (lepší než ABS) a vyznačuje se snadným tiskem (obdobné jako PLA). [28] Základní vlastnosti filamentu (tiskové struny) jsou uvedeny v tabulce (viz Tab. 5-3).

Materiál pro hřebenový převod, ciferníky, indikátor a hmatníky bylo zvoleno PLA+ od firmy PM Filament. PLA (polylactic acid) je základní materiál pro tisk, který se vyznačuje především vlastnostmi umožňující snadný a rozměrově přesný tisk. [29] Základní charakteristiky filamentu (tiskové struny) jsou uvedeny v tabulce (viz Tab. 5-3).

Materiál	PETG	PLA+
Průměr filamentu (struny)	1.75 mm	1,75 mm
Doporučená teplota trysky	230–250 °C	190–210 °C
Doporučená teplota podložky	60–80 °C	20–60 °C
Pevnost v ohybu	1 880 MPa	3 000 MPa
Hustota	1,27 g/cm ³	1,25 g/cm ³

Tab. 5-3 Základní vlastnosti použitých plastů [28],[29]

5.6.2 Nastavení tisku

Samotně zpracování řídicího G-kódu probíhalo v softwaru CURA 4.8.0. Jedná se o bezplatný, open source 3D slicer primárně určený pro 3D tiskárny od firmy Creality. Základní funkcí programu je vygenerování G-kódu na základě vytvořeného 3D modelu. Výrobní časy a množství spotřebovaného materiálu včetně podpor uvádím v tabulce níže (viz Tab. 5-4).

Kompletní G kód všech součástí je pak uveden v přílohách (viz příloha G-kód pro výrobu součástí na 3D tiskárně).

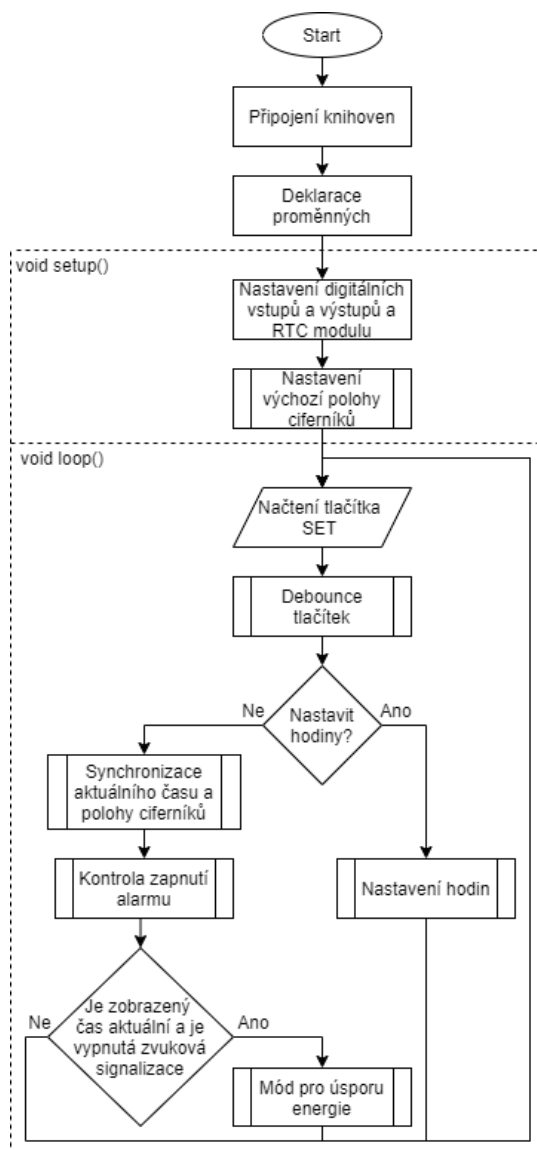
Součást	Spotřebovaný filament [m (g)]	Doba tisku [min]
Kryt – čelní díl	14,01 (43)	457
Kryt – zadní díl	6,24 (19)	163
Kolejnice	2,54 (8)	68
Ozubené hřebeny	8,28 (25)	198
Pastorky	1,53 (5)	59
Ciferníky, indikátor, hmatníky	4,65 (14)	138
Celkem	37,25 (114)	1 083

Tab. 5-4 Tisk součástí

5.7 Sestavení programu

Program byl vytvořen v programovacím prostředí Arduino IDE ve verzi 1.8.18. Prostředí je primárně určené pro programování platformy Arduino. (viz kapitola 2.3.1)

Základní strukturu programu si můžete pohlédnout na přiloženém vývojovém diagramu (viz Obr. 5-11). Po přivedení napájení se nejdříve provede připojení knihoven, které poskytují dodatečné funkce pro programování jednotlivých modulů jako jsou RTC modul nebo driver krokových motorů. V této části programu se také deklarují proměnné, které budou použity v programu. (viz kapitola 5.7.1) V bloku void setup() se poté provede základní nastavení a uvedení hodin do výchozí polohy. (viz kapitola 5.7.2) V bloku void loop() potom probíhá v nekonečné smyčce hlavní program (viz kapitola 5.7.3). Tento program se skládá ze dvou hlavních větví, a to část programu pro nastavení hodin (viz kapitola 5.7.6) a část pro samotný chod hodin (viz kapitola 5.7.4).



Obr. 5-11 Vývojový diagram řídicího programu

5.7.1 Načtení knihoven a deklarace proměnných

První část programu slouží k načtení dodatečných knihoven. Samotné knihovny poskytují dodatečné funkce, které slouží k zjednodušení programování. Knihovna DS3231.h přidává funkce pro práci s RTC modulem především načítání nebo ukládání aktuálního času. Knihovna TM1637Display.h umožňuje snadné a pohodlné formátování displeje. Knihovny avr/sleep.h a avr/wdt.h přidávají funkce pro snížení spotřeby energie.

Nastavení čísel digitálních pinů v programu musí být shodné se schématem zapojení (viz Obr. 5-1), respektive s tabulkou (viz Tab. 5-1).

V této části programu se taktéž deklarují proměnné použité v celém programu. Úplný seznam všech deklarovaných proměnných naleznete v přílohách (viz příloha řídicí program).

Důležité proměnné jejichž hodnoty se musí nastavit pro správnou funkci programu, slouží k nastavení rychlosti otáčení krokových motorů a k nastavení počtu kroků, které musí krokový motor vykonat, aby se posunul ciferník vůči indikátoru o vzdálenost jednoho dílku na hodinovém nebo minutovém ciferníku.

Pro zjištění počtu kroků, které jsou nutné, aby motor posunul ciferník, skrze převod ozubeným hřebem, o danou délku K je u hodinového ciferníku použit odvozený vzorec (5.5):

$$K = \frac{360^\circ}{\theta_m} \cdot i \cdot k_f \cdot \frac{l_{hod}}{\pi \cdot m_n \cdot z} = \frac{360^\circ}{11,25^\circ} \cdot 64 \cdot 8 \cdot \frac{12,5}{\pi \cdot 1,5 \cdot 28} \cong 1\,672 \quad (5.5)$$

U minutového ciferníku poté vzorec (5.6):

$$K = \frac{360^\circ}{\theta_m} \cdot i \cdot k_f \cdot \frac{l_{min}}{\pi \cdot m_n \cdot z} = \frac{360^\circ}{11,25^\circ} \cdot 64 \cdot 8 \cdot \frac{2,5}{\pi \cdot 1,5 \cdot 28} \cong 334 \quad (5.6)$$

kde θ_m je velikost kroku udávána je stupních, i je převodový poměr převodovky motoru, k_f koeficient udávající počet mikrokroků na jeden krok, m_n je modul ozubení, z je počet zubů pastorku a l_{hod} a l_{min} je lineární vzdálenost mezi jednotlivými dílky na hodinovém nebo minutovém ciferníku udávané v mm.

Velikost kroku θ_m můžeme nalézt ve specifikacích motoru [15] (viz Tab. 4-2).

Některé typy krokových motorů obsahují i převodovku pro zvětšení kroutícího momentu a redukci otáček. Převodovku obsahuje i použitý krokový motor s označením 28BYJ-48. Celkový převodový poměr $i = 64$ a můžeme jej zjistit ze specifikací motoru [15] (viz Tab. 4-2).

Použitý driver A3967, určen k řízení krokového motoru, je možné nastavit do čtyř typů řízení a to: čtyřtátní (full-step), osmitátní (half-step), 1/4 mikrokrokování (1/4-step) a 1/8 mikrokrokování (1/8-step). Přičemž základní nastavení je právě 1/8 mikrokrokování (1/8-step). [16] Při mikrokrokování se právě jednotlivé kroky dělí na další několik mikrokroků v tomto konkrétním případě na 8 menších kroků. Při výpočtu kroků K je nutné zohlednit množství mikrokroků na jeden krok koeficientem k_f .

Vzdálenost pohybu ozubeného hřebenu zjistíme z návrhu rozteče jednotlivých hodnot na ciferníku (viz kapitola 5.5). vzdálenost mezi čísly zobrazující hodiny je zde $l_{hod} = 12,5$ mm. vzdálenost mezi čísly zobrazující minuty je zde $l_{min} = 2,5$ mm.

Rychlost otáčení krokových motorů se řídí délkou prodlevy mezi jednotlivými impulzy (kroky motoru). Pro přibližné nastavení rychlosti otáčení se použije následující vzorec (5.7): [16]

$$t_d = \frac{1}{\frac{360^\circ}{\theta_m} \cdot i \cdot k_f \cdot \frac{n}{60} \cdot 2} = \frac{1}{\frac{360^\circ}{11,25} \cdot 64 \cdot 8 \cdot \frac{15}{60} \cdot 2} \approx 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 122 \mu\text{s} \quad (5.7)$$

Kde t_d čas prodlevy mezi impulzy, θ_m je velikost kroku udávána je stupních, i je převodový poměr převodovky motoru, k_f koeficient udávající počet mikrokroků na jeden krok, n je počet otáček v min^{-1} .

Počet otáček n je zvolen na 15 ot/min^{-1} .

Vzorec udává převrácenou hodnotu počtu kroků, kterou motor vykoná za jednu sekundu při zvolených otáčkách.

5.7.2 Nastavení zařízení

Po připojení napájení se v bloku void setup() provede základní nastavení programu. V tomto bloku probíhá zejména nastavení vstupů a výstupů pomocí funkce pinMode() [], RTC modulu, aby čas vypisoval ve 24hodinovém formátu, zavolání dvojice funkcí k posunutí ciferníku do výchozí polohy (viz kapitola 5.7.5) a nastavení hardwarového přerušení (viz Obr. 5-12).

Hardwarové přerušení je způsob, jak obsloužit důležité události. Pokud je nutné na událost okamžitě reagovat, procesor přeruší načítání instrukcí programu a začne načítat program určený pro zpracování přerušení. Jakmile obsluha přerušení skončí, procesor se opět vrátí k původní činnosti. K použití hardwarového přerušení je nutné, aby měl procesor přerušení hardwarově implementované. V případě Arduina UNO jsou to piny 2 a 3. [30]


```

void setup() {
    // nastavení pinů jako výstupních
    pinMode(DIR_MIN, OUTPUT);
    pinMode(STEP_MIN, OUTPUT);
    pinMode(DIR_HOD, OUTPUT);
    pinMode(STEP_HOD, OUTPUT);
    pinMode(SLP_HOD, OUTPUT);
    pinMode(SLP_MIN, OUTPUT);
    pinMode(BUZZER, OUTPUT);

    // připojení obou řídících pinů na zem
    digitalWrite(DIR_HOD, LOW);
    digitalWrite(STEP_HOD, LOW);
    digitalWrite(DIR_MIN, LOW);
    digitalWrite(STEP_MIN, LOW);

    digitalWrite(SLP_HOD, LOW);
    digitalWrite(SLP_MIN, LOW);

    // nastavení pinů jako vstupních
    pinMode(SET_TIME, INPUT_PULLUP);
    pinMode(UP_TIME, INPUT_PULLUP);
    pinMode(DOWN_TIME, INPUT_PULLUP);
    pinMode(KON_HOD, INPUT_PULLUP);
    pinMode(KON_MIN, INPUT_PULLUP);

    RTC.setClockMode(false); //nastavení 24 hodinového formátu času

    //funkce pro hardwarové přerušení právě probíhajícího programu
    //na základě stisknutí tlačítka SET
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SET_TIME), Vzbudit, RISING);

    //Nastavení výchozí polohy
    HomeHod();
    HomeMin();
}

```

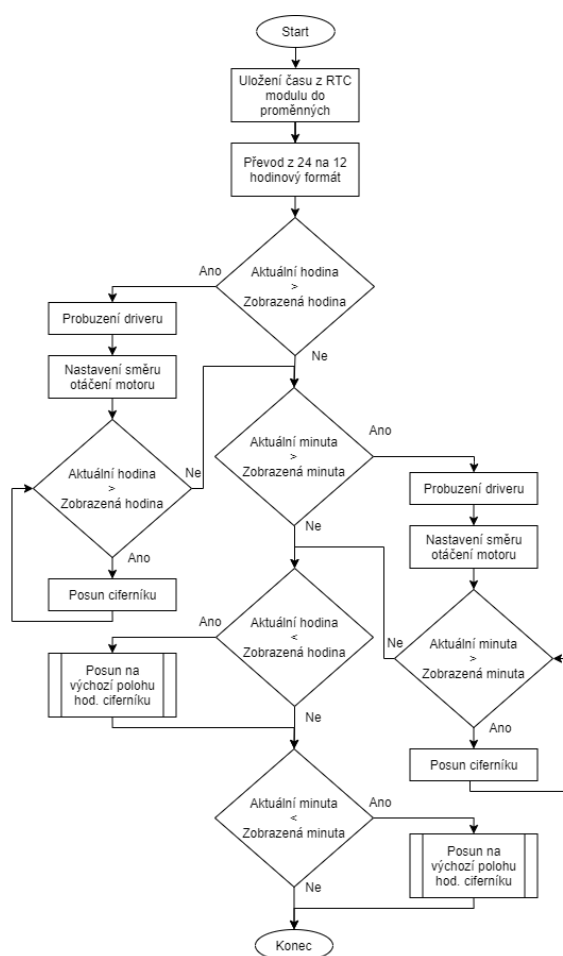
Obr. 5-12 Nastavení zařízení po zapnutí

5.7.3 Hlavní struktura programu

Hlavní činnosti nutné pro fungování hodin se nachází v nekonečné smyčce v bloku void loop(). Samotný program se dělí do dvou větví jedna část zajišťuje nastavení hodin a druhá jejich běžný chod. Tato část programu se skládá z podprogramu pro řízený pohyb ciferníků podprogramu pro funkci alarmu a podprogramu pro šetření energií. V hlavním programu se taktéž kontroluje stav prostředního tlačítka, které přepíná mezi jednotlivými nastaveními hodin a vypíná zvukovou signalizaci alarmu.

5.7.4 Synchronizace

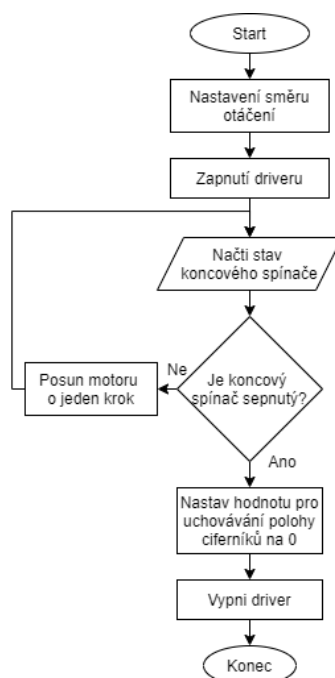
Tato část programu slouží pro řízený pohyb ciferníku tak aby aktuální čas byl shodný z časem zobrazeným. Strukturu programu si můžete prohlédnout na přiloženém vývojovém diagramu (viz Obr. 5-13). Program načte aktuální hodnotu minut a hodin z RTC modulu uloží ji do proměnných (Hodiny, Minuty) a převede ji na 12hodinový formát. Následně se provede porovnání aktuálního (Hodiny, Minuty) a zobrazeného času (HodinyPol, MinutyPol). Pokud aktuální hodnota času je větší, než hodnota zobrazená provádí se posun ciferníku tak dlouho dokud se rozdíl nevyrovná. Pokud je situace opačná tak nastane posun zpět do výchozí pozice.



Obr. 5-13 Program pro synchronizaci změřeného a zobrazovaného času

5.7.5 Nastavení výchozí polohy

Tento podprogram slouží k nastavení výchozí poloh ciferníků. Strukturu programu je možné vidět na přiloženém schématu (viz Obr. 5-14). Po zavolání podprogramu se spustí motory a posouvání ozubený hřeben směrem ke koncovým spínačům, dokud je nesepnou. Po jejich sepnutí se nastaví výchozí (nulová) hodnota polohy ciferníků a uloží se do proměnných (HodinyPol = 0, MinutyPol = 0).



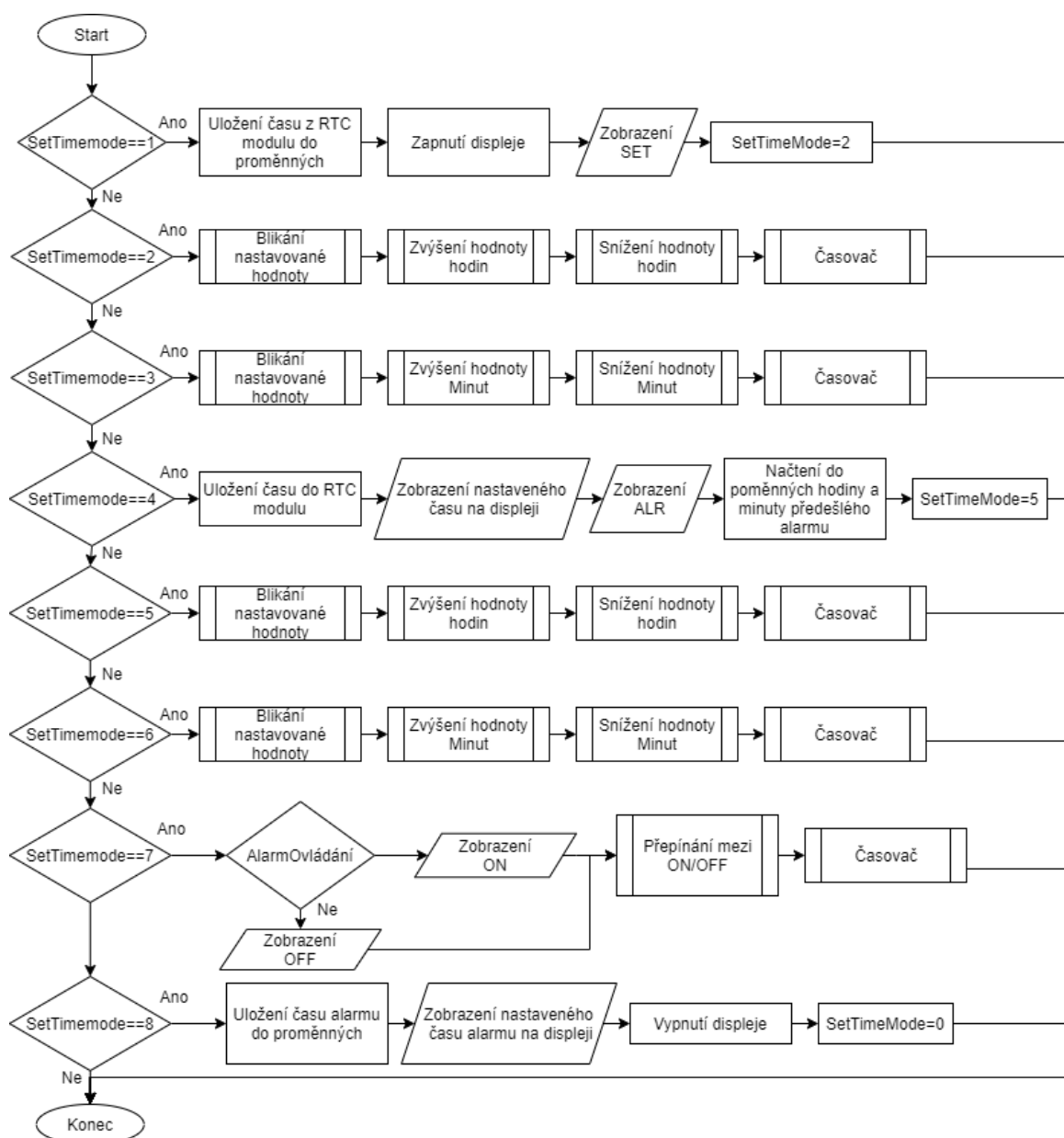
Obr. 5-14 Nastavení výchozí polohy ciferníků

5.7.6 Nastavení hodin

Podprogram slouží k přenastavení aktuálního času a nastavení času a zapnutí alarmu. Podprogram načte aktuální čas z RTC modulu a rozsvítí se displej s nápisem „SET“ pro indikaci možnosti nastavení času. Po vteřině se zobrazený nápis změní na čas, který je uložen v RTC modulu. Uživatel zde bude moci přenastavit čas. Samostatné nastavení je rozděleno času je rozděleno do dvou kroků, a to nastavení hodin a nastavení minut. Hodnota času, která se nastavuje pro zvýraznění problíkává. Zvyšování nebo snižování hodnoty potom probíhá krajními tlačítky. Přepínání mez dalšími nastaveními probíhá stisknutím prostředního tlačítka. Po dokončení nastavení času se hodnota zapíše do RTC modulu a podprogram pokračuje nastavením alarmu zobrazením nápisu ALR na displeji.

Nastavení času alarmu probíhá obdobným způsobem nastavením hodin a minut a potvrdí se opět prostředním tlačítkem. Po dokončení nastavení času zapnutí alarmu se objeví nastavení, zda alarm má být zapnut. Uživatel tuto hodnotu může nastavit pomocí krajních tlačítek. Na displeji se objeví nápis „OFF“ když je alarm neaktivní nebo nápis „ON“, když se alarm aktivuje. Po stisknutí prostředního tlačítka se nastavení alarmu uloží a displej zhasne.

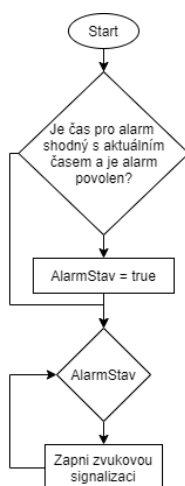
Pokud při nastavování času dojde k absenci jakéhokoliv vstupního signálu po dobu delší jak jednu minutu, tak se automaticky celé nastavení času ukončí a doposud nastavené hodnoty se uloží. Vývojové schéma je zobrazeno na přiloženém diagramu (viz Obr. 5-15)



Obr. 5-15 Nastavení času

5.7.7 Alarm

Tento program slouží k ověření, zda se má zapnout zvuková signalizace. Schématický můžete jeho funkci vidět na přiloženém vývojovém diagramu. (viz Obr. 5-16). Fungování tohoto podprogramu je velice jednoduché. Provede se kontrola, zda je povolena funkce alarmu a následně se srovná nastavený čas kdy se má alarm spustit s aktuálním časem. Pokud budou podmínky splněny zvuková signalizace se sepne až do doby, dokud se nestiskne tlačítko SET k vypnutí alarmu.



Obr. 5-16 Alarm

5.7.8 Ošetření zákmitů tlačítek

Pod pojmem ošetření zákmitů tlačítek (tzv. debounce tlačítek) se rozumí ošetřit vstupy proti nechtěným zákmitům při stisku mikrospínače. Jelikož při stisku a rozepnutí mechanického kontaktu membránových tlačítek, mikrospínačů, jazýčkových kontaktů atd., nedojde okamžitě k trvalému sepnutí či rozepnutí kontaktů, ale dochází k zákmitům, po dobu jednotek až desítek milisekund, kdy je obvod kontaktem opakovaně spínán a rozepínán. [31] Tento jev by mohlo vést k napočítání více sepnutí, než bylo tlačítko skutečně stisknuto. Proto je vhodné vstupy ošetřit. Ošetření je možno provádět hardwarově například použitím filtračního RC obvodu anebo softwarově. U softwarového ošetření, které je použito v mém případě, se provádí tak, že po zaznamenání prvního stisku tlačítka se zakáže opakované stisknutí po krátkou dobu například 100 ms, což zabrání nechtěným napočítání stisků.

5.7.9 Spotřeba energie

Tento podprogram má za úkol snížit spotřebu energie na minimum. Jeho úkolem je vypnout všechny nepotřebné prvky Arduina. [32] Vypnutí tohoto módu probíhá současně dvěma způsoby a to každých 8 sekund vnitřním časovačem anebo po stisku prostředního tlačítka díky nastavenému hardwarovému přerušení.

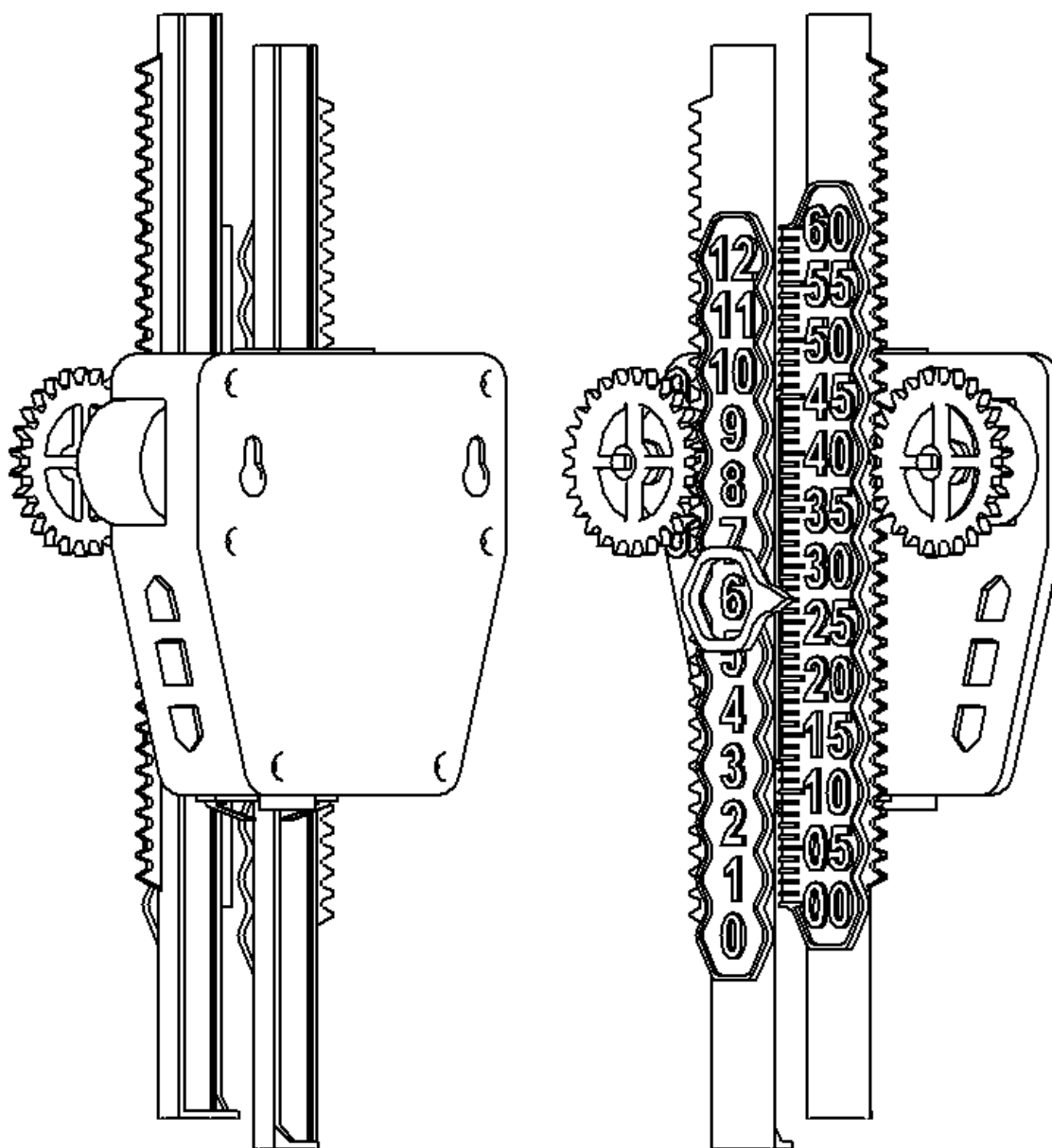
Výsledné snížení energie je patrné v příložené tabulce (viz Tab. 5-1).

Režim chodu	Spotřeba proudu [mA]
Chod hodin (motory jsou v chodu)	440
Pohotovostní režim (motory pod napětím)	400
Drivery vypnuty	76,5
Mód pro úsporu energie	37,50

Tab. 5- 5 Změřená spotřeba energie

5.8 Sestavení lineárních hodin

Sestavení probíhalo od osazení krytů elektrotechnickými součástmi (viz Obr. 5-4) a spojení jednotlivých součástí pomocí propojovacích vodičů podle schématu zapojení (viz Obr. 5-1). Po propojení elektrotechnických součástí a otestování funkčnosti sestaveného programu se obě poloviny krytů spojily samořeznými šrouby. Ke krytům se upevnily kolejnice pomocí samořezných šroubů (viz Obr. 5-8). Na tyto kolejnice se nasunuly ozubené hřebeny s ciferníky, které jsou na hřebeny připevněny pomocí lepení. (viz Obr. 5-10). Posledním krokem sestavení bylo nasunutí pastorků na výstupní hřídele krokových motorů. Finální konstrukci lineárních hodin poté můžeme vidět na přiloženém obrázku (viz Obr. 5-17).



Obr. 5-17 Sestavené lineární hodiny

5.9 Náklady

Všechny elektronické součásti jsou nakoupeny výhradně z české distribuce a jednotlivé ceny modulů a elektrotechnických součástí jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 5-6).

Elektrotechnická součástka	Cena za kus [Kč]
Arduino Uno (klon)	159
2 x Driver krokových motorů	71
2 x Krokový motor 28byj-48	59
RTC modul DS3231	65
Displej	39
2 x koncový spínač	10
3 x mikrospínač	2,70
Piezoměnič	19
Souosý konektor	7,30

Tab. 5-6 Cena elektrotechnických součástek

Spojovací součásti jsou výhradně samořezné šrouby a jejich náklady jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 5-7).

Počet kusů	Označení šroubu	Cena za kus [Kč]
13	2,2 x 6,5	1,10
4	2,2 x 8	1,20
12	2,9 x 6,5	1,20
10	2,9 x 12	0,30

Tab. 5-7 Cena samořezných šroubů

Náklady na všechny vyrobené součásti pomocí 3D tisku jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 5-8).

Součást	Cena Materiálu [Kč]
Kryt – čelní díl	25,80
Kryt – zadní díl	11,40
Kolejnice	7,10
Ozubené hřebeny	11,40
Pastorky	2,60
Ciferníky, indikátor, hmatníky	6,30

Tab. 5-8 Cena materiálu vyrobených dílců

Sečtení všech dílčích nákladů a celkové náklady jsou uvedeny v tabulce níže (viz Tab. 5-9).

Náklady	Cena [Kč]
Náklady za elektronické součásti	440,40
Náklady za spojovací součásti	36,50
Náklady za materiál	64,60
Celkové náklady	541,50

Tab. 5-9 Celkové náklady

6 DISKUZE

Při vytváření finálního řešení lineárních hodin jsem především vycházel ze současných řešení, které jsem modifikoval tak, aby došlo ke snížení rozměrů, hmotnosti a nákladů s přihlédnutím ke způsobu výroby pomocí 3D tisku. Většina navržených řešení vycházela ze společné posloupnosti konstrukčních uzlů: Výběr elektrotechnických součástí, návrh upevnění a zakrytování elektrosoučástí, návrh mechanismu převádějící rotační pohyb na lineární, návrh ciferníku a indikátoru a sestavení řídicího programu.

Vybrané koncepční řešení bylo zvoleno především na základě snadné výroby všech součástí mechanismu pomocí 3D tisku.

Pro následný konstrukční návrh bylo nutné zvolit potřebné funkce lineárních hodin a podle nich zvolit příslušnou řídicí elektroniku. Pro elektroniku bylo nutné navrhnout kryty, které jej budou chránit před okolními vlivy a upevní je ke konstrukci. U návrhu krytů nejdříve proběhla rozvaha o vhodném umístění jednotlivých komponent v prostoru, aby celkové rozměry krytů byly co nejmenší. Podle tohoto rozložení pak vznikly finální rozměry krytů. Převodový mechanismus byl navržen na základě značně zjednodušeného pevnostního výpočtu ozubeného kola a hřebenu. K tomuto mechanismu bylo pak vytvořeno uložení v lineárním kluzném vedení. Následné navržení ciferníků a indikátoru (ručičky) byla již ryze designérská práce limitovaná pouze délkou ozubeného hřebenu.

Výroba jednotlivých navržených součástí probíhala na 3D tiskárně. Celková doba tisku všech součástí byly 18,05 hodiny a spotřebovalo se 37,25 metrů filamentu.

Vytvoření řídicího programu probíhalo v Arduino IDE. Program musel zajišťovat všechny potřebné funkce hodin od měření a zobrazování času přes funkci alarmu až po nastavení hodin.

Hodiny je nutné napájet zdrojem o napětí v rozmezí 6,5-20 V.

Výkresová dokumentace vyrobených součástí, G-kódy pro výrobu navržených dílů pomocí 3D tisku a řídicí program je součástí příloh této práce.

7 ZÁVĚR

Hlavní cíl práce byl navrhnout a vyrobit za pomoci 3D tisku model lineárních hodin řízené mikrokontrolerem Arduino UNO.

Díličními cíli bylo analyzovat problém a provést rešerši současných konstrukčních řešení lineárních hodin, vypracovat možné koncepční návrhy a jeden z nich vybrat a dále návrh rozpracovat do podoby kompletního funkčního modelu.

V teoretické části práce jsou nastíněny některá současná konstrukční řešení, z těchto designů je poté v praktické části čerpáno, především v oblasti výběru elektrotechnických součástí. Obsahem rešerše je navíc i analýza platformy Arduino s popisem jeho vývojového prostředí a vývojové desky použité ve finálním modelu lineárních hodin.

Finální model hodin obsahuje dvojici ciferníků pro zobrazování hodin a minut odděleně. Rozlišitelnost hodin je 1 minuta. Model lineárních hodin plní základní funkce jako je měření a zobrazování času, funkce přenastavení času a funkce alarmu. Celkové rozměry hodin jsou 240 mm x 140 mm x 140 mm s hmotností přibližně 250 g. Hodiny jsou napájeny skrze souosý konektor a jejich spotřeba je 34 mA při vypnutých motorech.

Dalším možným vylepšením hodin by bylo přidání baterií, ale současná spotřeba u tohoto modelu je příliš velká na udržení hodin v chodu přijatelnou dobu skrze baterie. Řešením by bylo zaměnit Arduino UNO a ostatní moduly za jiný obvod, který by byl navrhnout s ohledem na co neméně spotřebu energie a snížení nákladů. Popřípadě zaměnit krokové motory za učenější a levnější systém pohonu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Time. The free dictionary [online]. Feasterville: Farlex, © 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: www.thefreedictionary.com/time
- [2] SI base unit: second (s). BIPM [online]. Paris: BIPM, 2019 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.bipm.org/en/si-base-units/second>
- [3] Hodiny. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-1-5]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hodiny>
- [4] TORROJA, Juan. *Mechanism of linear clocks*. Spojené státy americké. US2333832A. Přihlášeno 28.11.1941. Uděleno 9.11.1943. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US2333832>
- [5] CLOQ: *The linear clock* [online]. United Kingdom: Rob Lafratta, © 2021 [cit. 2021-2-30]. Dostupné z: <http://thelinearclock.co.uk/>
- [6] *Linear clockworks* [online]. Asheville, NC: Lindsay Morris, © 2021 [cit. 2021-2-31]. Dostupné z: <http://linearclockworks.com/>
- [7] Linear clock. [online]. Nizozemsko: Jan Derogee, [2018] [cit. 2021-1-7]. Dostupné z: http://home.kpn.nl/bderogee1980/projects/linear_clock/linear_clock.html
- [8] Linear Clock. *Instructables* [online]. San Francisco: Euphy, 2011 [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/Linear-Clock/>
- [9] The linear clock. *Gessato* [online]. New York: Audun Ask Blaker, © 2021 [cit. 2021-2-6]. Dostupné z: <https://www.gessato.com/the-linear-clock-by-audun-ask-blaker/>
- [10] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8.
- [11] ARDUINO UNO REV3. *Arduino store* [online]. Chiasso: Arduino, © 2021 [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [12] ESES. [online katalogový list]. *eses klon Arduino UNO R3 CH340*. ©2021 [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/0/761/eses1459967190.pdf>
- [13] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony*. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1978-4.

- [14] SEMRÁD, M. *Řízení krokových motorků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 47s. Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.
- [15] Kiatronics. [online katalogový list]. 28BYJ-48. ©2021 [cit. 17.2.2021]. Dostupné z: <https://datasheetspdf.com/pdf/1006817/Kiatronics/28BYJ-48/1>
- [16] Easy Driver Stepper Motor Driver. *Schmalz Haus LLC* [online]. Schmalz Haus, © 2021 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://bit.ly/3h67uR6>
- [17] ECLIPSERA MODULELS. [online katalogový list]. *RTC Hodiny reálného času DS3231*. ©2021 [cit. 17.2.2021]. Dostupné z: <https://bit.ly/3b65Uea>
- [18] EEPROM. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/EEPROM>
- [19] *Romeo RIM* [online]. Reaction Injection Molding Design Guide, © 2021 [cit. 2021-2-8]. Dostupné z: <https://bit.ly/3vGS36b>
- [20] Boss design. *Secam-fixing* [online]. MARNAZ: SECAM, © 2021 [cit. 2021-2-15]. Dostupné z: <http://secam-fixing.com/screws/boss-design/>
- [21] DYMÁČEK, M. *Plastová ozubená kola a jejich analýza pomocí MKP*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Vrbka, Ph.D.
- [22] Evolventní ozubení. *MITCalc* [online]. Děčín: Miroslav Petele, Ing., © 2003 - 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: https://mitcalc.com/doc//gear1/help/cz/gear_theory.htm
- [23] ČSN 01 4686. *Pevnostní výpočet čelních a kuželových ozubených kol*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1988.
- [24] KVĚTOUN, Jan. *Porovnání možností výroby ozubených kol kovových a plastových*. Brno, 2017. 40s, 6 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandas
- [25] EZEH, O.H. a L. SUSMEL. *On the fatigue strength of 3D-printed polylactide (PLA)*. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2018, 9, 29-36 [cit. 2021-5-5]. ISSN 24523216. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300076>
- [26] *DuPont* [online]. *General Design Principles for DuPont Engineering Polymers*, © 2021 [cit. 2021-3-5]. Dostupné z: <https://bit.ly/3tomZqi>

- [27] Creality ENDER 3. *CREALITY* [online]. Blansko: CREALITY STORE, © 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.crealitystore.cz/p/ender3/>
- [28] PETG. *Filament PM* [online]. Haňovice: Filament PM, © 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/petg>
- [29] PLA+. *Filament PM* [online]. Haňovice: Filament PM, © 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/PLA%2B>
- [30] AttachInterrupt(). *Arduino* [online]. © 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://bit.ly/3uqeHQ3>
- [31] Debounce. *Arduino* [online]. © 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/BuiltInExamples/Debounce>
- [32] Power saving techniques for microprocessors. *Gammon Software Solutions* [online]. Nick Gammon, 2012 [cit. 2021-3-5]. Dostupné z: <http://www.gammon.com.au/power>
- [33] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Použité symboly

a_w	osová vzdálenost
b_w	účinná šířka ozubení
c_n	hlavová vůle
d_1, d_2	průměr roztečná kružnice pastorku a kola
d_{a1}, d_{a2}	průměr hlavová kružnice pastorku a kola
d_{b1}, d_{b2}	průměr základní kružnice pastorku a kola
d_{f1}, d_{f2}	průměr patní kružnice pastorku a kola
d_{w1}, d_{w2}	průměr valivé kružnice pastorku a kola
E	Modul pružnosti v tahu
e_n	šířka zubové mezery
F_n	normální síla
F_r	radiální síla
F_T	tečná síla
h	výška zubu
h_a	výška hlavy zubu
h_f	výška paty zubu
i	převodový poměr vestavěné převodovky v motoru
K	počet kroků motoru
$k_{\ddot{r}}$	počet mikrokroků na krok
l_{hod}	rozteč mezi dílky na hodinovém ciferníku
l_{min}	rozteč mezi dílky na minutovém ciferníku
M	Krouticí moment krokového motoru
m_n	modul
m_t	tečný modul
n	počet otáček křivkového motoru
p_b	základní rozteč
p_f	poloměr zaoblení přechodové křivky
p_n	rozteč
S_F	faktor bezpečnosti pro pevnost v ohybu
s_n	tloušťka zubu na roztečné kružnici
t_d	délka prodlevy
u	převodový poměr

v_1	rychlost otáčení pastorku
x_1, x_2	jednotkové posunutí
Y_F	součinitel tvaru zubu
Y_β	součinitel sklonu zubu
Y_ε	součinitel vlivu trvání záběru evolventy
z_1, z_2	počet zubů pastorku a kola
α	úhel záběru
α_t	úhel záběru čelní
α_{tw}	valivý úhel záběru čelní
β	úhel sklonu zubů
ε_α	součinitel záběru v čelní rovině
ε_β	součinitel záběru v osové rovině
ε_γ	součinitel celkového záběru
θ_m	velikost kroku
μ	Poissonovo číslo
σ_F	napětí v patě zubu
σ_{FP}	dovolené napětí v patě zubu

9.2 Použitě zkratky

RTC	modul reálného času
-----	---------------------

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Základní parametry Arduina UNO (klon) [12].....	22
Tab. 4-2 Charakteristiky krokového motoru 28BYJ-48 [15].....	23
Tab. 4-3 Charakteristiky Motor driveru A3967 [16].....	24
Tab. 4-4 Charakteristiky RTC modulu [17]	25
Tab. 5-1 Propojení analogových a digitálních pinů.....	29
Tab. 5-2 Montáž elektrotechnických součástek.....	30
Tab. 5-3 Základní vlastnosti použitých plastů [28],[29]	37
Tab. 5-4 Tisk součástí.....	37
Tab. 5- 5 Změřená spotřeba energie	45
Tab. 5-6 Cena elektrotechnických součástek	47
Tab. 5-7 Cena samořezných šroubů.....	47
Tab. 5-8 Cena materiálu vyrobených dílců	47
Tab. 5-9 Celkové náklady	48

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Koncepční náčrt řešení lineárních hodin [4]	15
Obr. 2-2 Design CLOQ lineárních hodin [5]	16
Obr. 2- 3 Jeden z designů nabízející firma Linear Clockworks [6]	17
Obr. 2-4 Design lineárních hodin [7]	17
Obr. 2-5 Design lineárních hodin by Audun Ask Blaker (a) design hodin (b) vnitřní mechanismus [9]	18
Obr. 2-6 Prostředí Arduino IDE [10]	19
Obr. 2-7 Arduino UNO REV3 51[11]	20
Obr. 4-1 Schéma konceptu č. 1	26
Obr. 4-2 Schéma konceptu č. 2	27
Obr. 4-3 Schéma konceptu č. 3	27
Obr. 5-1 Schéma zapojení	28
Obr. 5-2 Konstrukční rozložení elektronických součástí	29
Obr. 5-3 Doporučené rozměry montážního nálitku [19]	31
Obr. 5-4 Kryty (a) neosazený zadní kryt (b) neosazený čelní kryt (c) osazený zadní kryt (d) osazený čelní kryt	31
Obr. 5-5 Schéma převodového mechanismu	32
Obr. 5-6 Doporučené rozměry plastového ozubeného kola [26]	34
Obr. 5-7 Návrh ozubeného hřebenu s vedením	34
Obr. 5-8 Sestavený kryt s připevněnou kolejnicí	35
Obr. 5-9 Navržené vedení s hřebenovým převodem	35
Obr. 5-10 Ciferníky a indikátor	36
Obr. 5-11 Vývojový diagram řídicího programu	38
Obr. 5-12 Nastavení zařízení po zapnutí	41
Obr. 5-13 Program pro synchronizaci změřeného a zobrazovaného času	42
Obr. 5-14 Nastavení výchozí polohy ciferníků	43
Obr. 5-15 Nastavení času	44
Obr. 5-16 Alarm	45
Obr. 5-17 Sestavené lineární hodiny	46

12 SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace

Řídící program

G-kód pro výrobu součástí na 3D tiskárně

Výpočet převodu