

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

**NÁVRH, KONSTRUKCE A PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ
AUTONOMNÍ BUŇKY "SHAKER" PRO TESTBED
PRŮMYSLU 4.0**

DESIGN OF MECHANICAL, ELECTRICAL CONSTRUCTION AND SOFTWARE EQUIPMENT OF
AUTONOMOUS CELL "SHAKER" FOR INDUSTRY 4.0 TESTBED

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Karniš

VEDOUCÍ PRÁCE

ADVISOR

Ing. Jan Pásek, CSc.

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Radim Karniš

ID: 195354

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Návrh, konstrukce a programové vybavení autonomní buňky "Shaker" pro testbed Průmyslu 4.0

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnut a realizovat buňku shakeru nápojů pro testbed Průmyslu 4.0, implementovat řízení v PLC a vizualizaci pro HMI a demonstrovat autonomní funkčnost výrobní buňky.

1. Seznamte se s koncepcí a aktuálním stavem testbedu a popište je
2. Nastudujte a popište existující rozhraní, prostřednictvím kterých dochází k výměně dat a výrobků mezi jednotlivými autonomními buňkami
3. Proveďte mechanický návrh jedné z autonomních buněk v kontextu možností budoucího automatického řízení
4. Vybavte mechanicky zkonstruovanou buňku snímači, akčními členy a řídicí logikou
5. Navrhněte, realizujte, zprovozněte a otestujte programové vybavení, dokumentujte průběžně všechny dílčí úkoly
6. Proveďte přizpůsobení programového vybavení tak, aby buňka mohla být připojena do systému demonstrátoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. An Industry 4.0 Testbed (Self-Acting Barman): Principles and Design (Kaczmarczyk, 2018)
2. Digital twin-driven product design framework. Dostupné z:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2018.1443229>

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 20.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Jan Pásek, CSc.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Cílem práce je návrh, konstrukce a implementace autonomní buňky „Shaker“, součásti testbedu Průmyslu 4.0. Buňka realizuje jeden úkon v životě produktu procházejícím výrobní linkou, konkrétně protřepání nápoje. Všechny kroky v procesu tvorby a zapojení buňky následují současné trendy čtvrté průmyslové revoluce, která je samotnou příčinou vzniku testbedu. Práce obsahuje kompletní popis návrhu, stavby a dokumentace tohoto zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Průmysl 4.0, Chytrá továrna, PLC, Siemens, NX, CAD software, PLCSim, TIA Portal v14, WinCC, Aditivní výroba, 3D tisk, Rozšířená realita

ABSTRACT

The aim of this Bachelor thesis is to design and build an autonomous cell called „Shaker“, which is a part of automatic bartender smart factory. The cell executes one action in the life of the product passing through a production line, namely the shaking of a beverage. All the steps in the process of design and implementation of the cell follow current trends of the fourth industrial revolution, which is the very cause of creation of the bartender. This thesis involves a complete description of the design, construction and documentation process of this device.

KEYWORDS

Industry 4.0, Smart factory, PLC, Siemens, NX, CAD software, PLCSim, TIA Portal v14, WinCC, Additive manufacturing, 3D printing, Augmented reality

KARNIŠ, Radim. *Návrh, konstrukce a programové vybavení autonomní buňky "Shaker" pro testbed Průmyslu 4.0*. Brno, 2019, 63 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Jan Pásek, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh, konstrukce a programové vybavení autonomní buňky "Shaker" pro testbed Průmyslu 4.0“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Páskovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	11
1 Cíl práce	12
2 Průmysl 4.0	13
2.1 Předchozí průmyslové revoluce	13
2.2 Důsledky Průmyslu 4.0	13
3 Testbed Průmyslu 4.0 - robotický barman	14
3.1 Formát robotického barmana	14
3.2 Komunikace jednotlivých částí	15
3.3 Autonomní buňky testbedu	16
3.4 Získávání dat v rozšířené realitě	17
4 Koncepte autonomní buňky Shaker	18
4.1 Požadavky na autonomní buňku	18
4.2 Funkce autonomní buňky Shaker	19
5 Mechanický návrh autonomní buňky Shaker	20
5.1 Siemens NX	21
5.2 Rapidní prototypování	22
5.3 Mechanické prvky	23
5.4 Funkční celek protřepání nápoje	23
5.5 Funkční celek omytí	25
6 Elektrické vybavení autonomní buňky Shaker	28
6.1 Akční členy	28
6.1.1 Hlavní motor	28
6.1.2 Motor mechanismu omytí	29
6.1.3 Čerpadlo	30
6.1.4 Elektromagnetické zámky	31
6.2 Snímače	31
6.2.1 Indukční snímač IFM IY5049	32
6.2.2 Koncový spínač	32
6.3 Řízení	33
6.3.1 PLC Siemens S7-1200	33
6.3.2 HMI panel KTP-400 Basic	34
6.3.3 Přepínač	35

6.4	Elektro dokumentace	36
6.4.1	WSCAD	36
6.5	Zapojení a vodiče v buňce	37
6.6	Zapojení akčních členů	37
6.6.1	Hlavní motor	38
6.6.2	Motor mechanismu omytí	38
6.6.3	Čerpadlo	39
6.6.4	Elektromagnetické zámky	39
6.7	Zapojení snímačů	39
6.7.1	Indukční snímač IFM IY5049	39
6.7.2	Koncový spínač	39
7	Programové vybavení autonomní buňky Shaker	40
7.1	TIA Portal	40
7.2	Struktura programu	41
7.2.1	Rozhraní reálných prvků buňky	41
7.2.2	Řízení funkčních celků buňky	42
7.3	Řídící logika v Shakeru	42
7.3.1	Rozhraní hlavního motoru (CM ShakingMotor)	42
7.3.2	Rozhraní motoru mechanismu omytí (CM WashingMotor)	44
7.3.3	Rozhraní „zapnuto/vypnuto“ zařízení (CM BinaryStateDevice)	45
7.4	Hlavní program	46
7.4.1	Zapouzdření hlavního programu (EM ShakingCycle)	47
7.4.2	Hlavní datová oblast	47
7.4.3	Algoritmická část	49
7.5	Vizualizace a uživatelské rozhraní	50
7.5.1	Hlavní obrazovka	51
7.5.2	Obrazovka ovládání funkčního celku protřepání nápoje	52
7.5.3	Obrazovka ovládání funkčního celku omytí	52
7.5.4	Obrazovka chybových hlášení	53
7.6	Přízpůsobení programového vybavení pro připojení do demonstrátoru	54
8	Realizace návrhu	55
8.1	Mechanická konstrukce	55
8.2	Elektrické zapojení	56
8.3	Rozvody vody pro omytí	57
8.4	Programové vybavení	57
9	Závěr	58

Literatura	59
Seznam příloh	61
A Stavový diagram hlavního programu	62
B Obsah přiloženého CD	63
B.1 Elektro dokumentace	63
B.2 Programové vybavení	63
B.3 Virtuální model	63

Seznam obrázků

3.1	Robotický barman - testbed Průmyslu 4.0	15
3.2	Dvě autonomní buňky testbedu	16
3.3	Identifikační prvky pro rozšířenou realitu	17
4.1	Základní rozměry autonomní buňky	18
4.2	Zjednodušený stavový diagram fungování Shakeru	19
5.1	Render moodelu autonomní buňky Shaker	20
5.2	Prostředí Siemens NX	21
5.3	Unikátní díl v průběhu 3D tisku	22
5.4	Funkční celek protřepání nápoje	23
5.5	Klikový mechanismus	24
5.6	Napínání řemene	24
5.7	Pohyblivý element uchycení sklenice před spojením	25
5.8	Pohyblivý element uchycení sklenice po spojení	25
5.9	Funkční celek omytí	26
5.10	Díl omytí v základní poloze	26
5.11	Díl omytí při odklonění	26
5.12	Pohled na omývací talířek a ostříkový člen	27
6.1	Nainstalovaný motor Papst BCI 6355	28
6.2	Převody energie hlavního motoru	29
6.3	Motor mechanismu omytí	30
6.4	Nainstalované čerpadlo	30
6.5	Elektromagnetické zámky TAU-0837DL	31
6.6	Detekce hliníkového vozíku	32
6.7	Nainstalované snímače IFM IY5049	32
6.8	Koncový spínač	33
6.9	PLC Siemens S7-1200	34
6.10	HMI Siemens KTP-400 Basic	35
6.11	Prostředí WSCAD	36
6.12	Schéma zapojení signálních a silových vodičů	38
7.1	Prostředí TIA Portal	40
7.2	UDT hlavního motoru	41
7.3	Funkční blok CM ShakingMotor	44
7.4	Funkční blok CM WashingMotor	45
7.5	Funkční blok CM BinaryStateDevice	46
7.6	Volání bloku hlavního programu (EM ShakingCycle)	47
7.7	Datová organizace programu Shakeru	49
7.8	Hlavní obrazovka	51

7.9	Obrazovka ovládání funkčního celku protřepání nápoje	52
7.10	Obrazovka ovládání funkčního celku omytí	53
7.11	Tabulka chybových hlášení	53
7.12	Definovaná datová struktura Shakeru	54
8.1	Zkonstruovaná autonomní buňka Shaker	55
8.2	Pohled na zadní stranu buňky	56
8.3	Pohled na ústrojí uchycení sklenice	56
8.4	Pohled na nádrž a rozvody vody	57
A.1	Stavový diagram hlavního programu	62

Úvod

Zrychlující pokrok s sebou nezastavitelně přináší ohromné množství nových invencí a objevů. Výdobytky doby, které ještě před pár lety byly hudbou budoucnosti, se s každým dnem stávají zastaralými, zatímco stoupající nároky technologického odvětví volají po neustávající reformě a inovaci. Průmysl se díky tomu s postupem času doslova mění před očima stejně tak, jako svět samotný.

Zvyšující se poptávka po produktech a jejich komplexita vyžadují konstantní evoluci výrobních procesů. O kompletní změně přístupu k výrobě se hovoří jako o průmyslové revoluci. V následující dekádě můžeme očekávat důsledky poslední takovéto revoluce, označované jako Průmysl 4.0. Je potřeba, ne-li dokonce povinnost, reagovat na tento vývoj implementací moderních výukových pomůcek.

Jednou z takových pomůcek je zařízení nazvané „robotický barman“, které vzniká na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně v laboratoři skupiny průmyslové automatizace. Jeho činnost bude obsahovat mnohé automatické funkce, které se nově zavádějí do průmyslové výroby v rámci iniciativy Průmysl 4.0. Je třeba zdůraznit, že základním cílem konstrukce „robotického barmana“ není vytvoření komerčního výrobku, ale implementování a tím i testování nových prvků čtvrté průmyslové revoluce. Z toho důvodu bylo zařízení pojmenováno zkráceně „testbed¹ Průmyslu 4.0“ a takto bude v celé předkládané práci označováno.

Předmětem této semestrální práce je návrh a konstrukce autonomní buňky Shaker pro robotického barmana. Mechanický návrh, konstrukce i programové vybavení jsou realizovány dle všech zásad a principů čtvrté industriální revoluce. Práce popisuje celý postup návrhu autonomní buňky pracující v kontextu definovaném koncepcí testbedu, a to od plánování projektu, vytvoření digitálního modelu a dokumentace, přes návrh programového vybavení až po samotnou konstrukci pro následné zapojení do většího celku „chytré továrny“.

¹Testovací platforma pro experimentální a výzkumné účely, skládající se z reálného hardwaru podléhajícímu fyzikálním vlivům okolí

1 Cíl práce

Finálním cílem této práce je návrh a následná realizace plně autonomní buňky Shaker do testbedu pro Průmysl 4.0 - robotického barmana. Bude navržena pro vykonání jedné fáze autonomní přípravy alkoholických a nealkoholických nápojů, konkrétně půjde o protřepání produktu a následné omytí povrchu Shakeru tak, aby nedocházelo k míšení různých nápojů.

Samotná práce je psána tak, jak Shaker vznikal. První etapou je seznámení se s koncepcí a stavem testbedu. Následuje zasazení buňky do celého zařízení pomocí vybraných rozhraní. Vlastní mechanická a elektrická realizace buňky včetně osazení snímači a akčními členy předchází finalizaci konstrukce, implementaci řídicího softwaru, oživení a zprovoznění buňky.

Buňka bude realizována tak, aby fungovala buď v kontextu robotického barmana, nebo samostatně. Proto se při návrhu hledí na požadavky definované testbedem, jako jsou použité materiály, rozměry buňky a definovaná komunikační rozhraní. Projekt se snaží maximálně využít některé z hlavních driverů současné éry Průmysl 4.0.

Důraz je kladen na celkovou robustnost buňky. Je důležité, aby konstrukce vydržela velké množství cyklů a aby byla lehce opravitelná v případě defektu nebo nehody.

2 Průmysl 4.0

Průmyslová revoluce jako zásadní proměna výroby, kdy nové vynálezy kompletně předefinují aktuální postupy a nástroje při nich používané, je zákonitě nevyhnutelný soubor událostí. Stejně nevyhnutelně se v odborných kruzích rozpoutala diskuse, zda jde o revoluci, či ne. Ručička pomyslných vah se spíše přiklání k názoru, že o revoluci nejde, že je to proces, který sebou přináší řadu změn s revolučním charakterem. Transformuje nejen průmysl samotný, ale i všechna další odvětví, která jsou jím ovlivněna. Současná snaha o digitalizaci a automatizaci není první takovou revolucí v historii.

2.1 Předchozí průmyslové revoluce

Jako první průmyslová revoluce je označován přechod od manuální ke strojní výrobě. Typické pojmy jsou zde mechanizace a industrializace. Využití alternativních zdrojů energie jako páry a vody umožnilo utilizaci těžké mašinerie.

Následný příchod elektrifikace dal vzniku montážních linek a tím i rapidnímu rozvoji masové produkce. Tyto události jsou druhou průmyslovou revolucí.

Automatizace, práce řízená za pomoci informačních technologií a implementace mechatronických zařízení do výrobního procesu jsou hlavními hybateli třetí průmyslové revoluce. Na těchto základech postupně staví a iterují principy Průmyslu 4.0.

2.2 Důsledky Průmyslu 4.0

Aktuální proměna světa průmyslu s sebou přináší mnoho nových konceptů a fundamentálních změn. Je vyvíjen tlak k transformaci širokého spektra odvětví od samotné výroby, bezpečnosti, výzkumu a legislativy, až po trh práce a sociální sféru.

V rámci průmyslu je zásadní přechod od individuálních výrobních jednotek k plně integrovaným, automatizovaným a průběžně optimalizovaným výrobním prostředím. Vznikají kyber-fyzické systémy schopné výměny informací, reakcí na změny výrobních podmínek a vzájemné kontroly. Jedním z cílů Průmyslu 4.0 je možnost vyrábět unikátní specializované výrobky stejně rychle a efektivně, jako při dávkové výrobě. Pro tento cíl se v Průmyslu 4.0 vžilo označení „Dávka 1“, nebo také „One Piece Flow“.

Jednotlivé charakteristiky a principy, na kterých Průmysl 4.0 staví, budou popsány v kontextu testbedu a buňky Shaker v následujících kapitolách. Tato kapitola čerpá z [1].

3 Testbed Průmyslu 4.0 - robotický barman

Důvodem vzniku robotického barmana jako testbed pro Průmysl 4.0 je potřeba nové studijní a popularizační pomůcky. Pro seznámení studenta s principy průmyslu budoucích let je nutná názorná ukázka a praktické cvičení na zařízení, které bylo na těchto principech vystavěno.

Autonomní příprava nápojů jako objekt zájmu byla zvolena z několika důvodů. V první řadě je atraktivita mezi širší veřejností. Pro studenta nebo laika je na všeobecně známém výrobním procesu jednodušší a přirozenější pochopit principy, které testbed demonstruje. Robotický barman je proto lepší volbou, než výrobní linka produkující nějaký neurčitý obrobek. Názornost života produktu, kdy je zřetelně vidět proces od prvotní ideje až po výsledný produkt, a absence odpadu, zplodin a vedlejších produktů během výroby jsou dalšími rozhodujícími faktory při volbě zaměření testbedu.

3.1 Formát robotického barmana

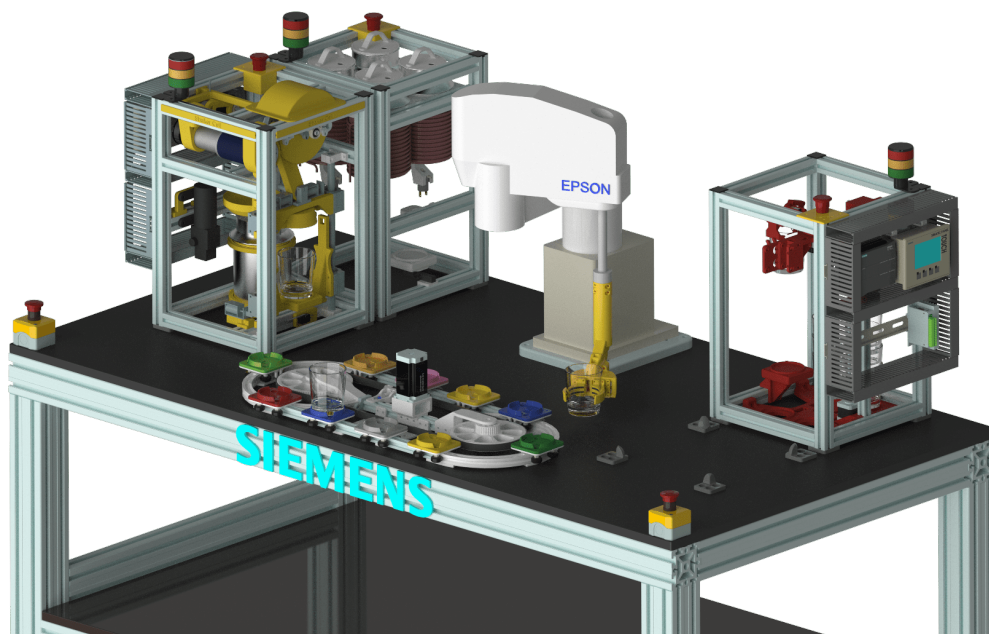
Základem robotického barmana je dva metry dlouhý a metr široký prostor na stole zkonstruovaném z hliníkových profilů a dřevěné desky. Na povrchu se nachází pozice pro umístění několika autonomních buněk, dopravník pro agregaci a distribuci až deseti skleniček a SCARA manipulátor zajišťující přesun výrobků po definovaných trajektoriích mezi jednotlivými buňkami a synchronní odložení hotových i nedokončených nápojů na dopravník.

Část dopravníku je přístupná pouze pro uživatele, umístěná mimo dosah manipulátoru. Sklenice v této oblasti jsou identifikovány na poblíž umístěné obrazovce. Zde jsou vidět informace jako o který nápoj se jedná a kdo je jeho objednavatelem. Zde probíhá výdej hotových nápojů produktů a návrat prázdných sklenic zpět do systému.

Pod stolem se nachází 550 milimetrů hluboký prostor ukrývající veškeré podpůrné řídicí, napájecí a komunikační technologie.

Celý testbed je dle trendů Průmyslu 4.0 navržen jako maximálně modulární. Propojení několika CPPS¹ vytváří tzv. kompozitní systém. Tento formát nabízí jednoduchou rozšířitelnost a snadnou výměnu jednotlivých autonomních buněk. Stačí pouze buňky vyměnit na svých pozicích, nebo jednu nahradit takovou, která vykonává jinou funkci. To v praxi znamená drastickou redukci časů a práce potřebných k přestavbě továrny při změně požadavků na výrobu.

¹Cyber-physical production system - kyberfyzický produkční systém



Obr. 3.1: Robotický barman - testbed Průmyslu 4.0

3.2 Komunikace jednotlivých částí

Dalším principem, který testbed využívá a prezentuje, je decentralizace řízení. Výroba se posouvá od konceptu řízení jedním nadřazeným členem spravujícím celou továrnu k nezávislým autonomním jednotkám.

Všechny části testbedu spolu komunikují a reagují na aktuální požadavky receptury, stavy ostatních částí výrobní linky a aktuální zásoby materiálu. Veškeré rozhodování probíhá autonomně v jednotlivých buňkách a zastávají i částečně funkce plánování výroby. Tato komunikace probíhá skrz průmyslový Ethernet (Profinet).

Centrem dění se stává samotný produkt, který nyní nese kompletní soubor informací potřebných k jeho realizaci. Tento soubor obsahuje recepturu výroby, aktuální stav produktu, historii provedených úkonů a instrukce k dalšímu postupu. Jinými slovy, produkt v každé části svého života „ví“, kterou fází již prošel a kterou musí podstoupit. Dokáže si vyžádat přesuny a inicializovat části svého výrobního procesu. Chytrý (smart) produkt v praxi znamená zvýšení efektivity továrny, která je nyní imunní vůči výpadku centrálního řízení. V případě nefunkční linky je produkt odeslán k jiné identické, nebo takové, která dokáže do jisté míry zastat její funkci.

V případě robotického barmana je nositelem receptury RFID² čip na spodní straně skleničky. Buňky jsou v místě vstupu výrobku vybaveny čtečkou schopnou číst

²Radio Frequency Identification. Slouží k bezkontaktní komunikaci na krátké vzdálenosti

a zapisovat na tyto čipy. Po stažení receptury buňka vykoná požadovanou činnost, zapíše informace o provedeném úkonu a odešle instrukci k přesunu sklenice s jejím obsahem dle následujícího kroku receptury do další buňky, nebo na dopravník.

3.3 Autonomní buňky testbedu

Každá vyměnitelná jednotka je navržena ke specifickému účelu v kontextu přípravy míchaných nápojů.

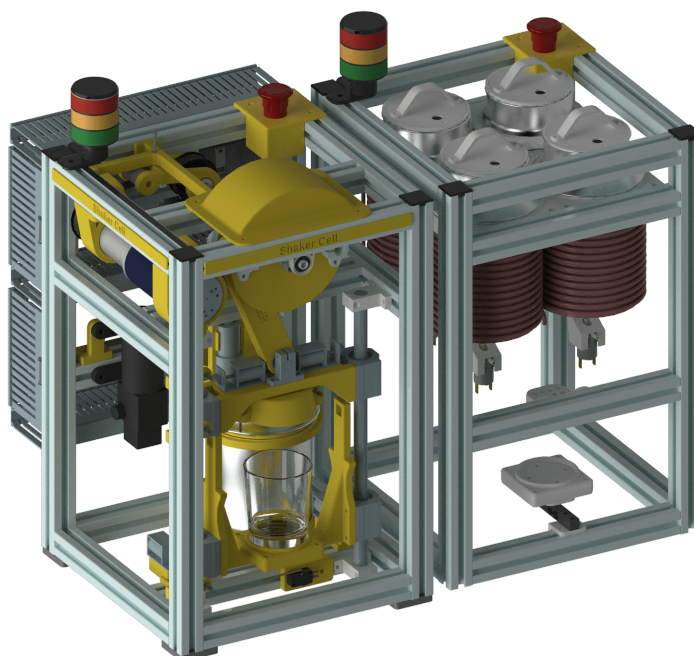
Sklad skleniček zajišťuje uskladnění a výdej prázdných sklenic do oběhu továrny. Jako speciální funkci navíc provádí prvotní zápis receptury na čip skleničky podle objednávky uživatele. Celý proces přípravy nápoje tedy začíná právě v této buňce.

Zásobník nealkoholických nápojů uchovává, chladí a nalévá tekutiny. V různých tancích obsahuje větší množství džusů, kolových a limonádových nápojů. Podle receptury může vydat různá množství svého inventáře.

K výrobě mineralizovaných nápojů slouží buňka Sodovač. Její funkcí je obohacovat nápoj určitým množstvím oxidu uhličitého.

Drtič ledu uchovává zmrzlé kostky ledu, na pokyn je pomocí dvojice nožů drtí a následně přidává požadované množství do nápoje.

Poslední fází přípravy nápoje je protřepání a zamíchání. Tento úkon zajišťuje buňka Shaker - předmět této bakalářské práce.



Obr. 3.2: Dvě autonomní buňky testbedu - Shaker a Sklad nealkoholických nápojů

Dosud zmíněné buňky jsou navrženy pro hlavní pracovní plochu testbedu. Mají stejné rozměry a pozici vstupu skleničky do jednotky tak, aby odpovídaly předem nadefinovaným trajektoriím pohybu SCARA manipulátoru. Tím je zajištěna možnost libovolně přeskládat pozice buněk hlavní pracovní plochy a má také z časově perspektivního pohledu demonstrovat sebe-organizaci prvků „chytré továrny“ funkcí „plug and play“.

Sklad alkoholických nápojů a jednotka chladicího systému jsou navrženy jako samostatné zařízení s jinými rozměry a umístěním. První zmíněná je postavena vedle stolu v dosahu SCARA robotu, druhá je v pracovní oblasti pod stolem.

3.4 Získávání dat v rozšířené realitě

Každá buňka má svou vlastní barvu plastových částí včetně identifikačních pásků stejné barvy. Navíc jsou ze tří stran opatřeny zřetelnými symboly VUT. Tyto prvky slouží jako zaměřovací body pro systém rozšířené reality, jde o další bod iniciativy Průmyslu 4.0.

Tyto systémy umožňují uživatelům, operátorům a technikům okamžitou interakci se zařízením, výpis dat nebo asistenci při obsluze a opravě. V praxi to znamená, že i nezkušený technik dokáže obsluhovat a opravit určité zařízení díky instrukcím získaným skrz rozšířenou realitu. Tím jsou zefektivněny všechny fáze průmyslových procesů, kde je důležitým faktorem lidská práce. Rozšířená realita nachází uplatnění v každém bodě v životě produktu, od plánování a výrobu přes servis až po jeho likvidaci.

V případě robotického barmana tato aplikace nabídne uživateli možnost získávání dat z každé části testbedu v reálném čase. Je maximalizován datový tok ze systému k uživateli. Umožní tak kontrolu, správu a údržbu barmana skrze AR³ rozhraní například na obrazovce chytrého telefonu nebo tabletu.



Obr. 3.3: Identifikační prvky pro rozšířenou realitu

Tato kapitola čerpá z [2].

³Augmented Reality - rozšířená realita

4 Koncepce autonomní buňky Shaker

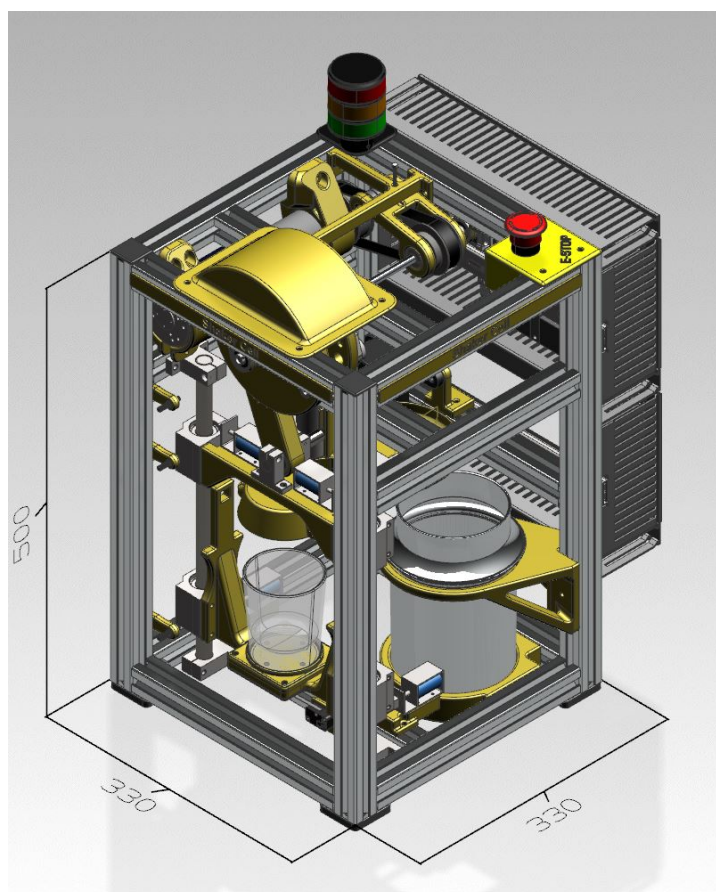
Následující text popisuje základní rozměrové, materiálové a funkční požadavky na Shaker.

4.1 Požadavky na autonomní buňku

Modulární podstata testbedu definuje požadavky na buňky, které jsou určeny pro hlavní pracovní plochu. Shaker musí mít čtvercovou základnu o straně 330 milimetrů, výška je stanovena na 500 milimetrů. Rám musí být realizován z hliníkových profilů rozměrů 30 x 30 milimetrů.

Vstupní pozice skleničky musí být u všech buněk totožná tak, aby při přestavbě testbedu nemusely být přeprogramovány trajektorie, po kterých SCARA manipulátor přesouvá nápoje.

Při splnění těchto podmínek je také zaručena prostorová kompatibilita autonomní jednotky v rámci testbedu.

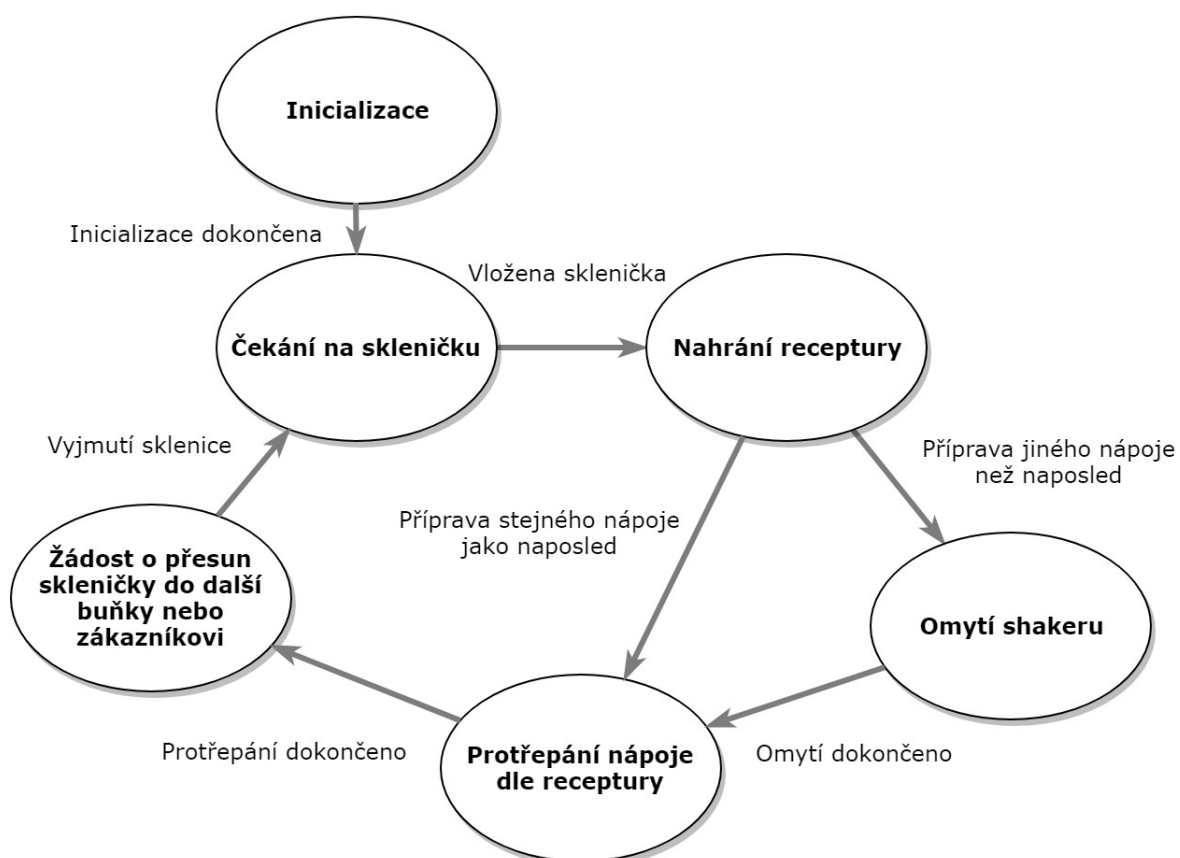


Obr. 4.1: Základní rozměry autonomní buňky

4.2 Funkce autonomní buňky Shaker

Důvod vzniku Shakeru je potřeba důkladného protřepání a zamíchání všech ingrediencí nápoje přidávaných v předchozích fázích výroby. Žádná buňka v testbedu nedokáže ani přibližně zastávat tuto funkci, proto byl při plánování vznesen požadavek na rozšíření robotického barmana o novou jednotku.

Kromě protřepání nápoje musí být Shaker schopný údržby ve formě omytí elementu přiklopení skleničky (dále jen „víčko“) tak, aby nedocházelo při přípravě rozdílných nápojů k jejich vzájemné kontaminaci.



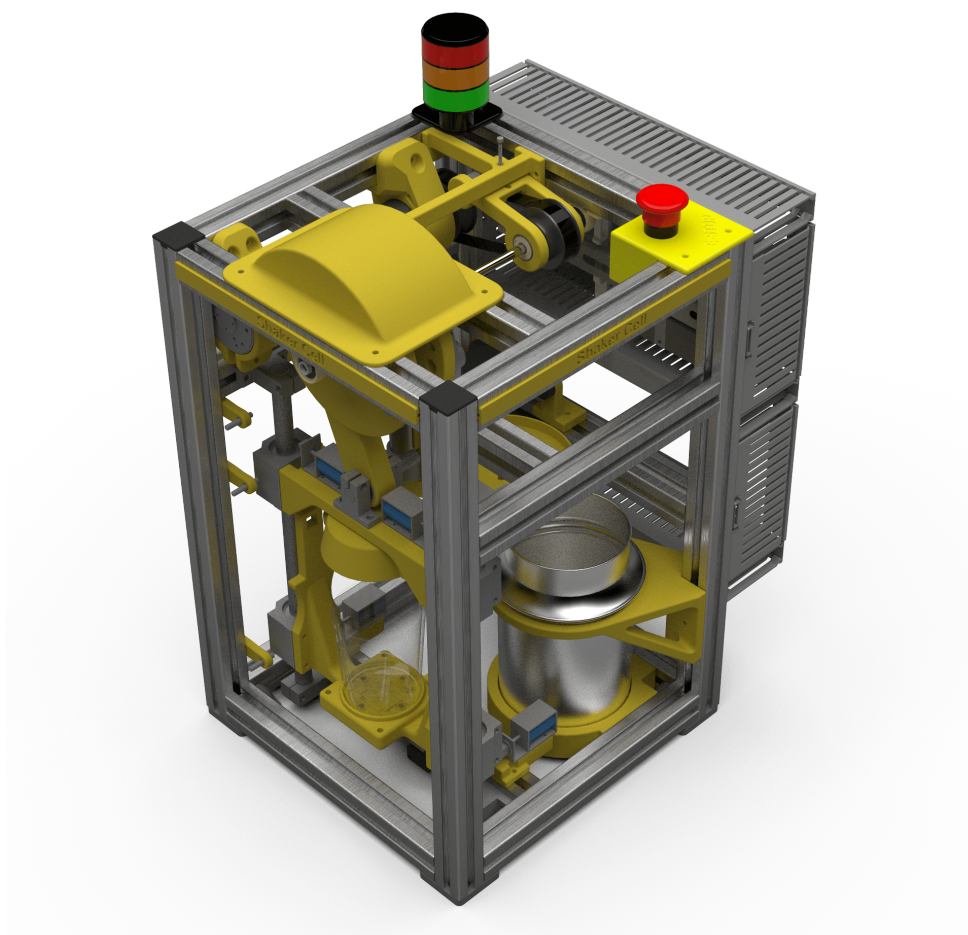
Obr. 4.2: Zjednodušený stavový diagram fungování Shakeru

Po inicializaci Shakeru se čeká na produkt, v momentě nahrání receptury je vyhodnocen požadavek na úkon a dle něho je nejprve provedeno omytí nebo rovnou protřepán nápoj. Záleží, jestli byl v předchozím cyklu připravován stejný nebo jiný nápoj. Po dokončení protřepání je sklenička uvolněna k odebrání, je omyto víčko a může začít další cyklus výroby.

5 Mechanický návrh autonomní buňky Shaker

Pro návrh Shakeru jsou využity nejnovější informační technologie umožňující jednoduchou iteraci, tím pádem i rychlejší a efektivnější tvorbu nových zařízení (virtuální prototypování). Před samotnou fyzickou konstrukcí byl nejdříve vytvořen virtuální model obsahující všechny informace o jednotlivých součástech buňky. Jedná se o digitální odraz výsledné mechanické konstrukce dovolující precizní návrh nových součástí, simulace a odzkoušení pohybů v buňce.

Vzniklo tak „kybernetické dvojče“ finálního zařízení. Nejedná se však o digitální dvojče v pravém slova smyslu z kontextu Průmyslu 4.0, to by vyžadovalo i kompletní zrcadlové propojení se svým obrazem v reálném světě.



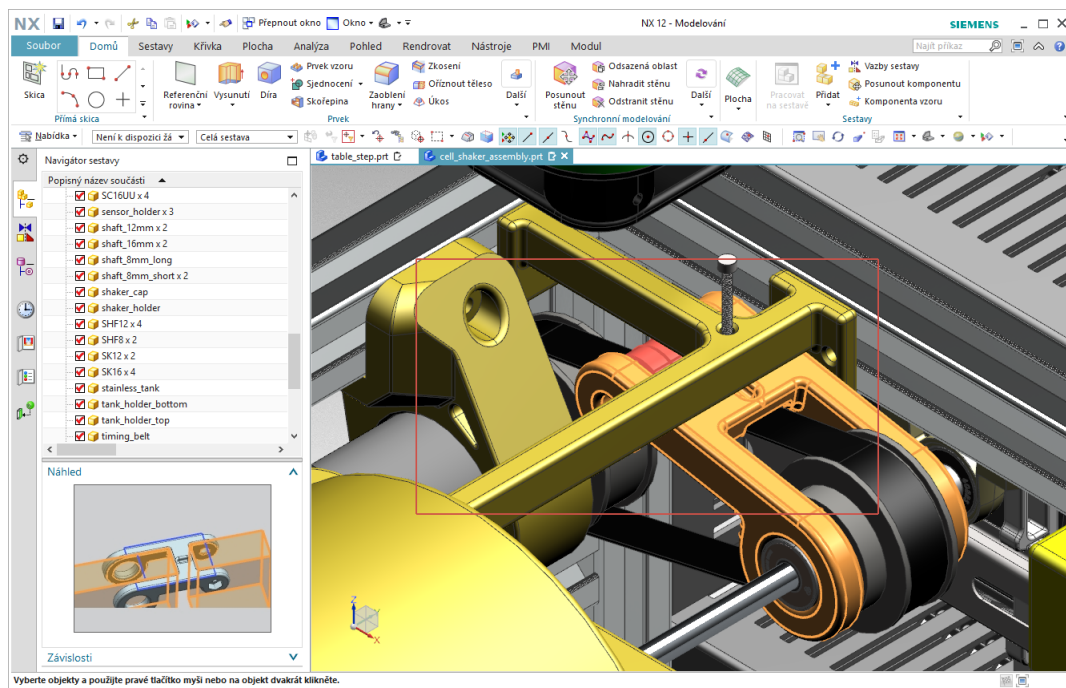
Obr. 5.1: Render modelu autonomní buňky Shaker

Model je klíčovou součástí procesu mechanického návrhu buňky. Dalo by se tvrdit, že díky předchozím testům a simulacím v rámci modelu je následná realizace

konstrukce buňky bezproblémovým procesem vyžadujícím minimální úpravy komponent.

5.1 Siemens NX

Pro tvorbu tohoto modelu je využito prostředí Siemens NX 12. Jedná se o CAD¹ software umožňující počítačem podporované projektování. Byl zvolen pro svou plnou integraci v platformě Teamcenter. Ta zajišťuje správu projektu, spojení členů týmu a koordinované plánování. Veškerá data vytvořená v NX jsou tedy díky tomuto propojení dostupná pro další zpracování.



Obr. 5.2: Prostředí Siemens NX

Třídímní model je tvořený z jednotlivých dílů, ty jsou v sestavě umístěny na svá místa v rámci konstrukce. Každému dílu je také nadefinován soubor vztahů a vazeb k ostatním dílům, poté je možné realizovat pohybové studie a simulace funkčních celků Shakeru.

Modely sériově vyráběných dílů jsou převzaty buď ze společné databáze týmu robotického barmana, nebo ze serveru <http://grabcad.com/>, který nabízí více než tři miliony CAD souborů k volnému využití. Unikátní pasivní díly jsou modelovány přímo v prostředí NX na základě rozměrových a funkčních požadavků stanovených analýzou sestavy.

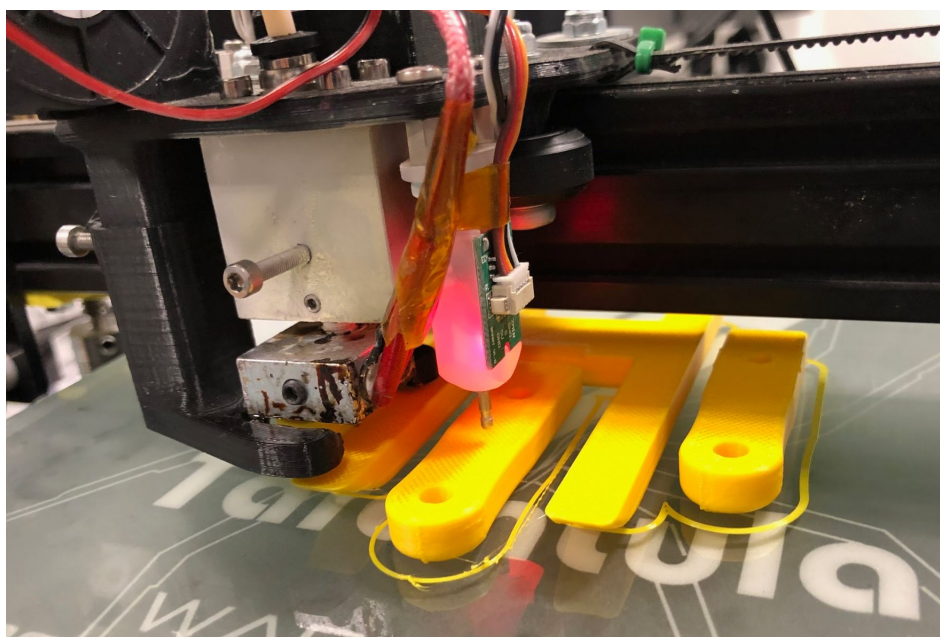
¹Computer-aided design

5.2 Rápidní prototypování

Konstrukce zařízení jako je robotický barman vyžaduje kromě dávkově vyráběných komponent i velké množství unikátních dílů. Zde se uplatňuje další z principů Průmyslu 4.0 - rapidní prototypování. Tvorbě těchto specializovaných komponent je často velmi specifická a jednorázová záležitost, klasické výrobní metody tak nejsou pro tento účel vhodné.

Možnost rychle materializovat tyto často iterované díly nabízí aditivní výroba, vedoucí ke snížení nákladů vynaložených na vývoj a zrychlení vývojového cyklu. Tyto technologie umožňují vyrábět specializované díly bez změny konfigurace výrobního stroje přímo dle specifických požadavků zákazníka.

V případě robotického barmana je využito 3D tisku. Model požadovaného objektu je „nařezán“ na horizontální vrstvy, které jsou potom postupně ve formě taveného plastu jedna po druhé nanášeny tiskárnou na podložku. Aditivní výroba nabízí oproti klasickému obrábění výhodu ve formě možnosti přesně odhadnout spotřebu materiálu potřebného k výrobě dílu.



Obr. 5.3: Unikátní díl v průběhu 3D tisku

Jako materiály tištěných dílů jsou zvoleny PLA a PET-G filamenty. Tyto termoplasty se vyznačují svou jednoduchou zpracovatelností, menší náchylností vůči deformacím a zdravotní nezávadností pro použití v potravinářství. Barva materiálu dílů použitých v Shakeru je jasně žlutá, zároveň je identifikační barvou celé buňky.

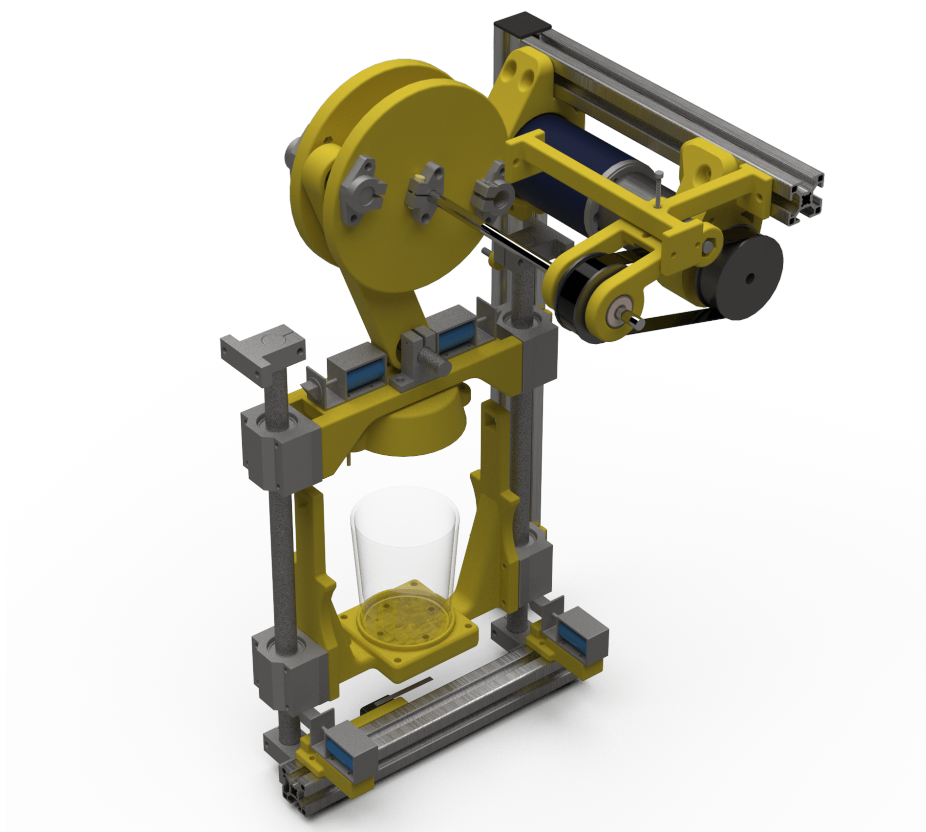
5.3 Mechanické prvky

Celá vnitřní konstrukce je tak kombinací speciálně navržených komponent materializovaných 3D tiskem a běžně vyráběných mechanických dílů použitých tam, kde plast není vhodným materiálem. Díly jako kuličková a lineární ložiska, osy, úchyty, řemenice a řemen jsou využity v místech s velkým mechanickým namáháním a ve funkčních celcích vyžadujících pevnost, přesnost a odolnost.

Jednotlivé mechanické prvky tvoří společně s aktuátory a senzory dva funkční celky Shakeru. První byl navržen pro samotné protřepání a zamíchání nápoje, druhý pro omytí víčka.

5.4 Funkční celek protřepání nápoje

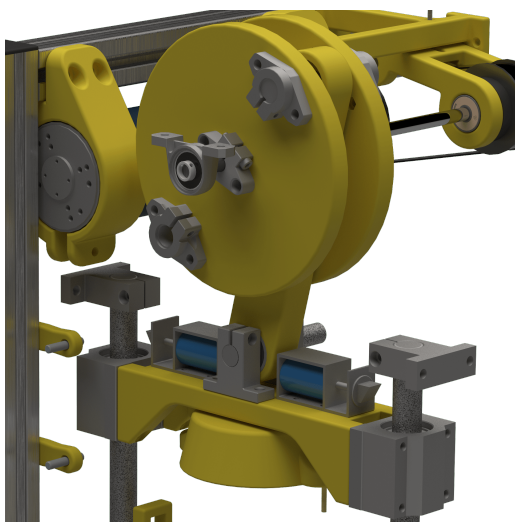
K vyvinutí dostatečné opakující se síly potřebné k důkladnému protřepání nápoje je vhodných mnoho přístupů. V úvahu přichází užití vibračního členu, ponorného míchání či rotace celé skleničky. V případě Shakeru je míchací silou setrvačná síla tekutiny ve skleničce po její opakované akceleraci a deceleraci v ose Z.



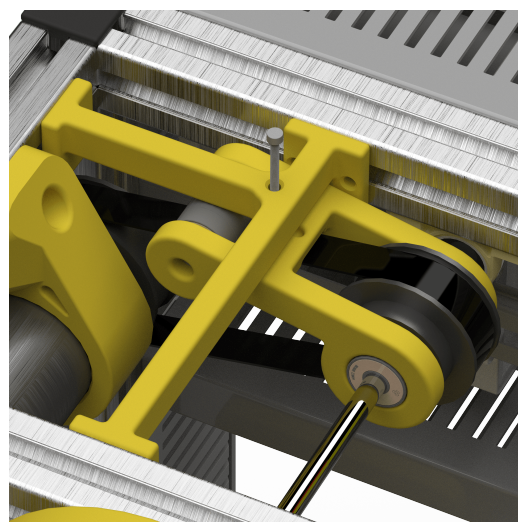
Obr. 5.4: Funkční celek protřepání nápoje

Pro převod rotačního pohybu hřídele hlavního motoru na výsledný translační pohyb sklenice slouží klikový mechanismus. Klikou je dvojitý kruhový element, upevněný ve své ose z obou stran. Kruhový tvar je zvolen z důvodu rovnoměrného rozložení váhy, větší pevnosti a redukci rizika zachycení cizích objektů při jeho rotaci.

Jako osa slouží broušená kulatina o průměru 8 mm. Ta je s hřídelí motoru, který je upevněný dvěma držáky k hliníkovému rámu, spojena přes řemen a dvě řemenice. Mechanismus pro regulaci napětí řemene je tvořen dvojicí komponent. První, schopna rotace kolem hnané osy, volně dosedá na řemen kuličkovými ložisky. Druhá, upevněná k rámu buňky, má uprostřed díru a na spodní straně drží vklíněnou matku. Po vložení šroubu do matky lze utahováním měnit tlak vyvíjený na první komponentu a tím i na řemen.



Obr. 5.5: Klikový mechanismus



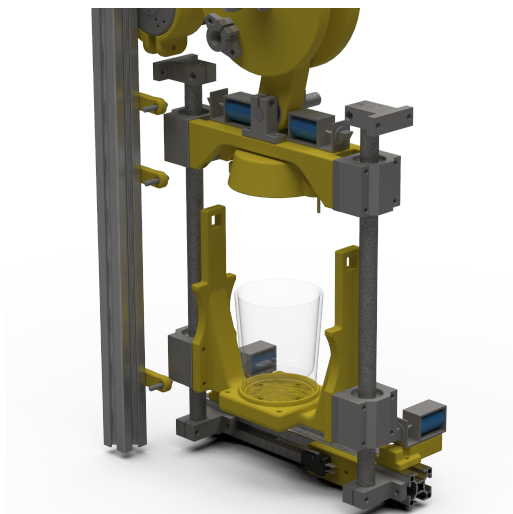
Obr. 5.6: Napínání řemene

Sklenice s nápojem je pokládána na pohyblivý podstavec. Ten je upevněn vozíky s lineárními ložisky ke dvěma kolejnicím. Podstavec obsahuje elektroniku potřebnou ke čtení RFID čipu, vážení hmotnosti výrobku a osvětlení sklenice. Ve stavu nečinnosti stojí podstavec v definované výšce na dvou elektromagneticky ovládaných zámčích tak, aby mohl SCARA manipulátor vložit či odebrat produkt po přesně definované trajektorii.

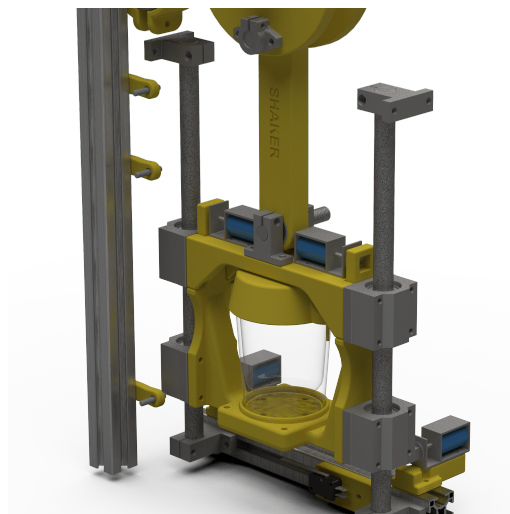
Po vložení produktu a načtení receptury dochází k přiklopení sklenice víčkem, které je připevněno k dalšímu pohyblivému dílu nastavitelnými šrouby a pružinami. Tento horní díl je spojen ojnicí s klikovým mechanismem. Podstavec a horní díl jsou navrženy tak, aby je bylo možné k sobě spojit pomocí další dvojice elektromagnetických zámek a vytvořit tak jeden pohyblivý element svírající konstantním tlakem pružin sklenici.

Po uchycení sklenice jsou otevřeny zámky, na kterých stojí podstavec, tím je uvolněn celý rozsah kolejnic pro pohyb vozíků. Roztočení hlavního motoru způsobuje

přes řemen, osu a klikový mechanismus opakovaný lineární pohyb sklenice a tím i protřepání nápoje.



Obr. 5.7: Pohyblivý element uchycení sklenice před spojením



Obr. 5.8: Pohyblivý element uchycení sklenice po spojení

Součástí funkčního celku je i množství senzorů sloužících k určení přesných pozic a stavů komponent. Tři indukční snímače na hliníkovém rámu určují, kde se nachází jednotlivé části a zda-li jsou spojeny či rozpojeny. Pozice snímačů jsou v úvratích a v místě, kde je víčko zasunuto do ostříkového talířku. Detekci případného spadnutí podstavce mimo dosah horního dílu zajišťuje koncový spínač.

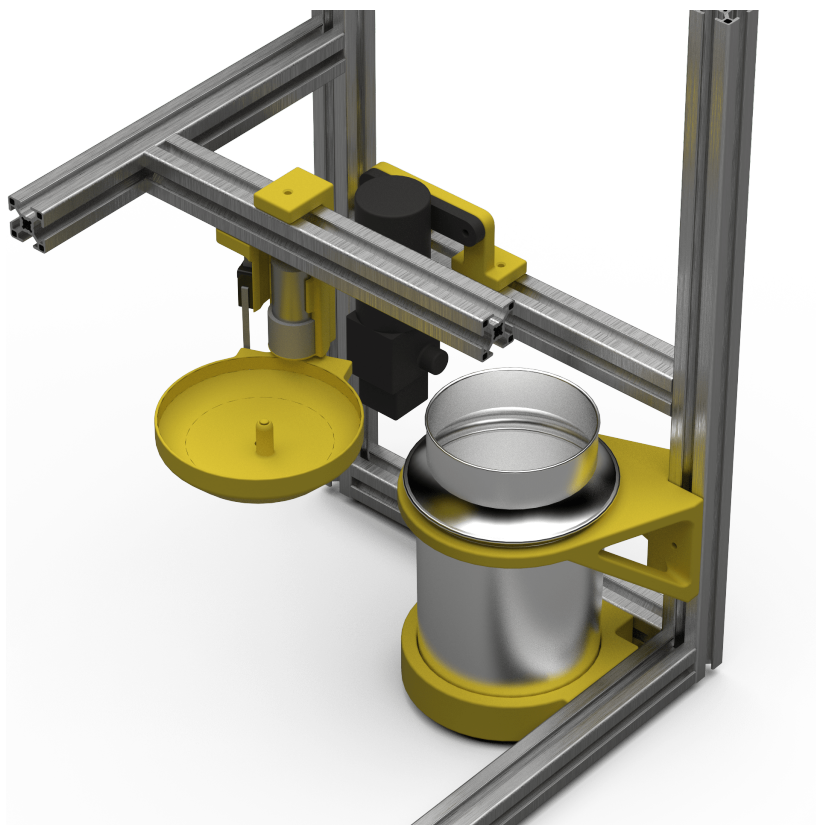
5.5 Funkční celek omytí

Inventář robotického barmana nabízí spektrum různých příchutí. Je důležité, aby byla buňka schopná očistit víčko sklenice mezi přípravou rozdílných nápojů. Funkční celek omytí je navržen právě pro tento účel, využívá proud čistě vody k důkladnému omytí vnitřku víčka.

Zásoba vody je uchovávána v nerezové nádrži o objemu dvou litrů, z ní je hnána ven membránovým čerpadlem pro účely čištění. Kryta je víkem s dírami pro průchod hadiček. Nádrž i čerpadlo jsou připevněny k hliníkovému rámu buňky plastovými držáky.

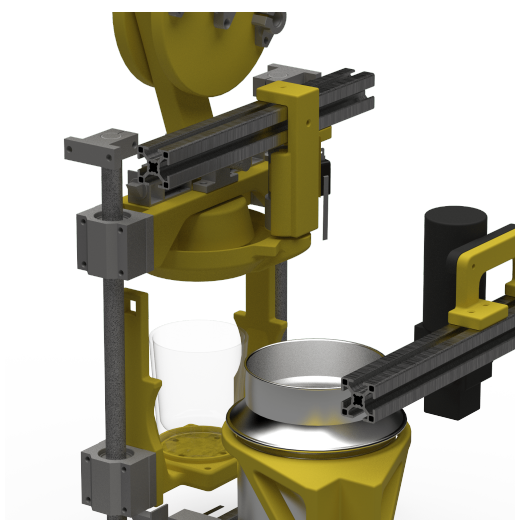
Víčko Shakeru nasedá na díl ve tvaru konkávního talířku, který má ve svém středu ostříkový element směřující proud vody z čerpadla všemi směry. Použitá voda může odkapávat pouze do talířku, který ji poté odvádí zpět do nádrže. Jednotlivé díly celku jsou spojeny hadicemi (nejsou znázorněny v modelu).

Talířek je upevněný na hřídeli stejnosměrného motoru, je tak možné měnit jeho polohu. Při protřepávání nápoje je odkloněný mimo dráhu pohybu dílů držících

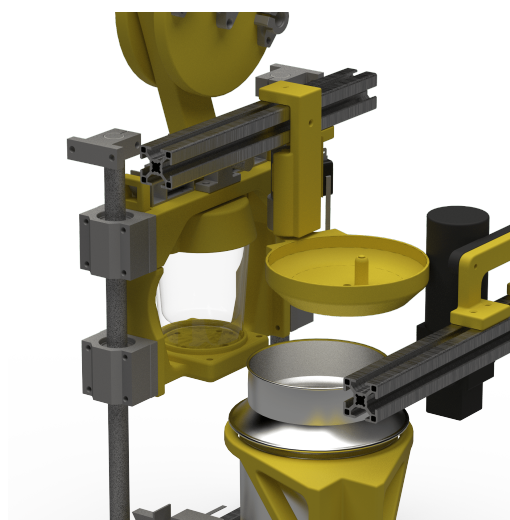


Obr. 5.9: Funkční celek omytí

skleničku. Ve všech dalších okamžicích fungování Shakeru je v pozici pod víčkem tak, aby byly zachyceny všechny kapající tekutiny. Rotace motoru je omezena dvojicí koncových spínačů, aby bylo možné talířkem pohybovat pouze v definovaném rozsahu.



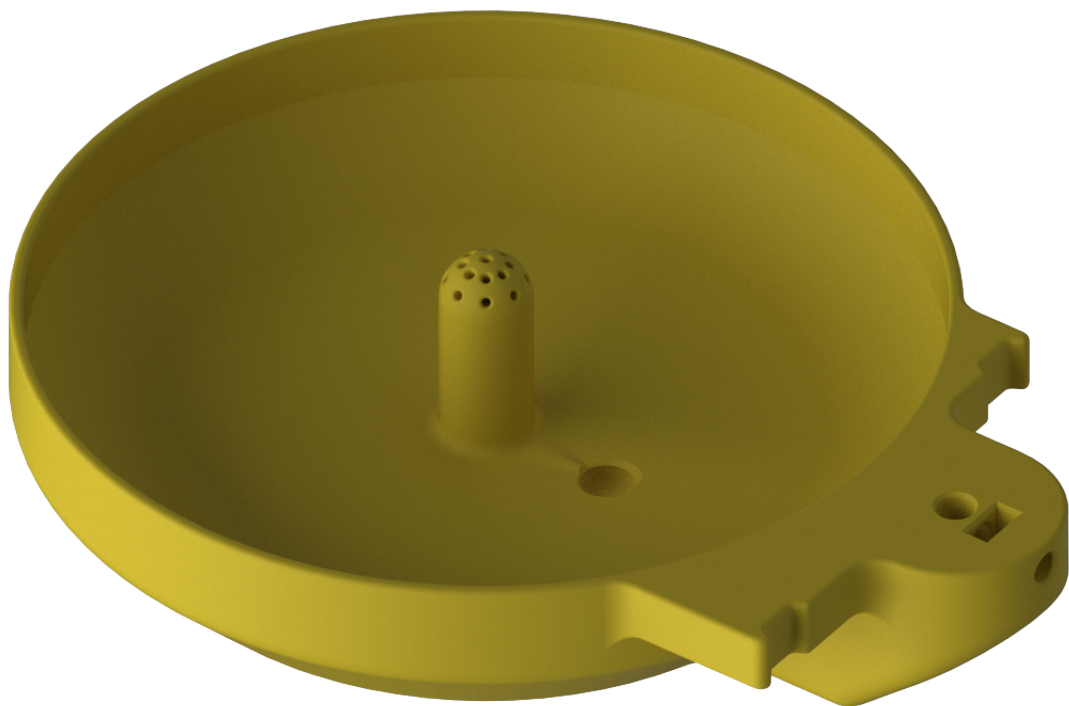
Obr. 5.10: Díl omytí v základní poloze



Obr. 5.11: Díl omytí při odklonění

Pokud dojde k znečištění zásoby vody nad přijatelnou úroveň, je možné v servisním režimu směřovat vodu z nádrže mimo Shaker. Opětovné napuštění probíhá skrz trychtýř umístěný na horní straně buňky vedle stop tlačítka. Takto může proběhnout její výměna bez demontáže a vyjmutí tanku ze svých úchytnů.

Při vložení skleničky je nejdříve proudem vody omyto víčko (v případě, že je připravován jiný nápoj než naposled), odkloněn odkapávací talířek a aktivován funkční celek protřepání nápoje. Po dokončení míchání je talířek umístěn zpět pod víčko k odkapávání. Tento cyklus je několikrát opakován, následuje vypuštění použité vody z nádrže a napuštění čisté.



Obr. 5.12: Pohled na omývací talířek a ostříkový člen

6 Elektrické vybavení autonomní buňky Shaker

V minulých kapitolách byly stanoveny funkční, prostorové a komunikačních požadavky a vypracováno rozvržení mechanických celků protřepání nápoje a omytí víčka. Následující text popisuje další etapu praktické části řešení této bakalářské práce, a to vybavení buňky snímači, akčními členy a řídicí logikou.

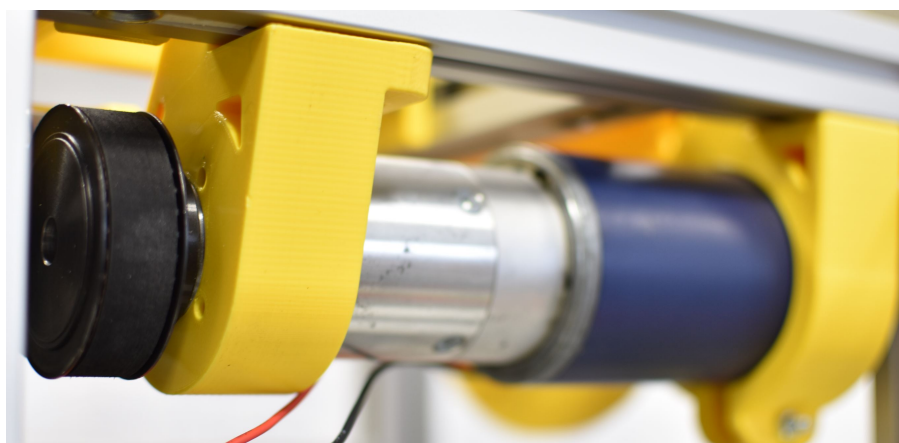
Tato kapitola se tak věnuje výběru a instalaci aktuátorů a senzorů, zapojení programovatelného logického automatu s operátorským panelem a popisu vzniku elektro dokumentace.

6.1 Akční členy

V předchozím textu jsou obecně popsány funkční celky se svými akčními členy (aktuátory), prostřednictvím kterých je zasahováno řídicí logikou do soustavy. Z podstaty vykonávané činnosti vyplývá množství požadavků, které musí aktuátory splnit, aby byly použitelné a vhodné pro tuto aplikaci. Následuje popis zvolených akčních členů pro použití v Shakeru.

6.1.1 Hlavní motor

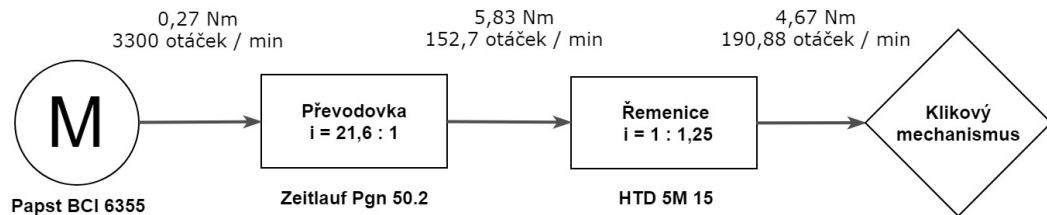
Pro vyvinutí energie potřebné k uvedení celého funkčního celku protřepání nápoje do pohybu je potřeba motor, který má dostatečný točivý moment a rychlost otáčení. Dalšími požadavky jsou jeho rozměry (musí se vejít do buňky) a nominální napájecí napětí do 24 V.



Obr. 6.1: Nainstalovaný motor Papst BCI 6355

V autonomní buňce Shaker je použit stejnosměrný motor Papst BCI 6355. Vyznačuje se napájecím napětím 24 V, nominálním proudem 4,9 A, točivým momentem 0,27 Nm a rychlostí 3300 otáček / min.

Motor je kombinovaný s převodovkou Zeitlauf Pgn 50.2 s převodovým poměrem 21,6 : 1, na výstupu je tedy moment 5,83 Nm a 152,7 otáček za minutu. Dalším převodem jsou dvě řemenice. Jejich převodový poměr 1 : 1,125 transformuje vstup na výsledný moment 4,67 Nm a 190,88 otáček / min.



Obr. 6.2: Převody energie hlavního motoru, $U = 24 \text{ V}$

Hmotnost všech elementů za klikovým mechanismem, které jsou uváděny do pohybu hlavním motorem, je odhadována při plné sklenici přibližně na jeden kilogram. Při zanedbání třecích sil je výsledný moment síly těchto částí stanoven při délce kliky 60 mm jako $M = mgr = 1 * 9,81 * 0,06 = 0,589 \text{ Nm}$, Papst BCI 6355 je tedy v konfiguraci s převody více než schopný překonat otáčivé účinky gravitačních sil mechanismu uchycení sklenice.

K motoru je připojený optický inkrementální enkodér Broadcom HEDS5500. Slouží k velmi přesnému určení úhlu natočení hřídele. Výstupem tohoto kvadraturního enkodéru jsou dva navzájem fázově posunuté signály. Z počtu pulsů lze stanovit relativní natočení, z fázového posunu zase směr rotace. Poskytované rozlišení 1024 pulsů na jednu otočku umožňuje měřit úhel natočení přibližně na třetinu stupně. Tento enkodér není v této práci použit, avšak z důvodu možnosti nasazení v budoucích iteracích či laboratorních úlohách, které budou studenti na buňce vykonávat, zůstává na motoru nainstalován.

Tento text čerpá z [4].

6.1.2 Motor mechanismu omytí

Pro pohyb talířku k omytí víčka Shakeru je použit běžný stejnosměrný motor s převodovkou neznámého výrobce. Nejsou na něj kladeny žádné požadavky kromě kompaktních rozměrů. Napájecí napětí motoru je 24 V. Přímo na výstupní hřídel je připojen řečený díl.

V této aplikaci se vzhledem k požadované rotaci na definované pozici nabízí i použití krokového motoru či servomotoru. V kombinaci se dvěma koncovými spínači je ale stejnosměrný motor nejjednodušší a nejlevnější variantou.



Obr. 6.3: Motor mechanismu omytí

6.1.3 Čerpadlo

Pro dosažení dostatečného tlaku potřebného k vytvoření proudu vody skrz ostříkovací element je zapotřebí užití výkonného čerpadla. V Shakeru je použito membránové čerpadlo neznámého výrobce o výkonu 60 W. Je schopné při napájení stejnosměrným napětím 12 V DC generovat tlak až 0,8 MPa při průtoku 5 L / min. Bylo experimentálně ověřeno, že tyto parametry postačují pro danou aplikaci. Čerpadlo tak zajišťuje proud vody pro omytí víčka i případné vypuštění nádrže.



Obr. 6.4: Nainstalované čerpadlo

Čerpadlo dokáže odsát vzduch z hadiček, je tak schopno se samo zavodnit. Po vypnutí zařízení tak zůstává, dokud není voda v oběhu odčerpána.

Funguje na principu pohybu kapaliny pomocí pohyblivé pryžové membrány. Ta je prohýbána nahoru a dolů motorem. Při jejím zvedání je kapalina nasávána a při klesání zase vytlačována k výstupnímu hrdlu.

6.1.4 Elektromagnetické zámky

Dva body mechanického návrhu buňky vyžadují použití aktuátorů schopných lineárního pohybu pevného členu mezi dvěma pozicemi. Tuto funkci vykonávají elektromagnetické solenoidové zámky TAU-0837DL. Jsou zvoleny pro svou robustní kovovou konstrukci a napájecí napětí 24 V DC. Při přivedení daného napětí na cívku zámku dojde ke vtažení mosazného jazýčku generovaným elektromagnetickým polem.

V Shakeru je použita verze s jazýčkem dlouhým 8,6 mm při spojení horního a dolního dílu uchycení sklenice. Jako zarážky pro položení podstavce v přesně definované výšce slouží verze s délkou jazýčku 24 mm.



Obr. 6.5: Elektromagnetické zámky TAU-0837DL

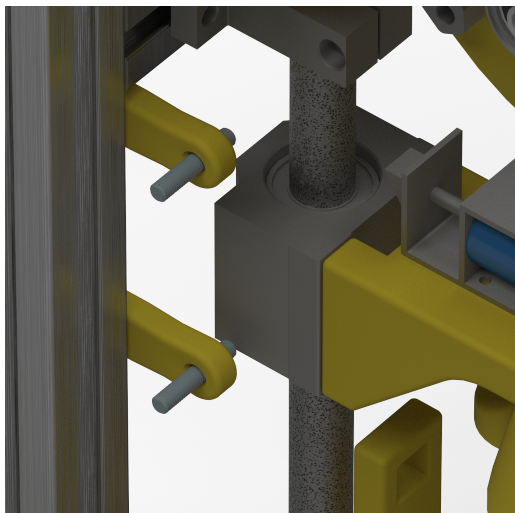
Elektromagnetické zámky se velmi rychle a intenzivně zahřívají, mohly by tak tavit termoplasty, na kterých jsou uchyceny. V programu Shakeru jsou ale aktivovány vždy pouze na krátký okamžik, není je tak potřeba nijak aktivně chladit.

6.2 Snímače

K získávání dat o stavech jednotlivých komponent je buňka vybavena sadou snímačů (senzorů). Snímány jsou polohy všech pohyblivých částí tak, aby měla řídicí logika Shakeru vždy přesné informace potřebné k efektivnímu a bezpečnému řízení výrobního procesu.

6.2.1 Indukční snímač IFM IY5049

Mechanismus uchycení sklenice se skládá ze dvou částí, které se pohybují po stejných kolejnicích. Tyto části mohou být buď rozdělené, kdy poloha horního dílu závisí na natočení klikového mechanismu a spodní díl (podstavec) sedí na elektromagnetických zarážkách, nebo spojené v jeden celek.



Obr. 6.6: Detekce spodní hrany hliníkového vozíku



Obr. 6.7: Nainstalované snímače IFM IY5049

Snímání pozic těchto částí zajišťuje trojice indukčních snímačů IFM IY5049 s diskretním výstupem. Ty jsou zvoleny pro své malé rozměry (jsou uchyceny v místech s omezeným prostorem) a robustní ocelové pouzdro se stupněm ochrany IP67. Napájecí napětí 24 V DC a spínací vzdálenost 1,5 mm s hysterezí menší než 15 % jsou parametry vhodné pro použití v Shakeru. Pro signalizaci sepnutí je na těle snímače červená LED dioda.

Snímače jsou připevněny k rámu buňky a namířeny na dráhy hliníkových vozíků držících díly pro uchycení sklenice. Jeden detekuje polohu vozíku při dosažení horní úvrati, další při dolní úvrati a poslední slouží k detekci zasunutí víčka do talířku pro omytí. Výstup je sepnut v momentě, kdy do aktivní zóny senzoru vstoupí elektricky vodivý materiál.

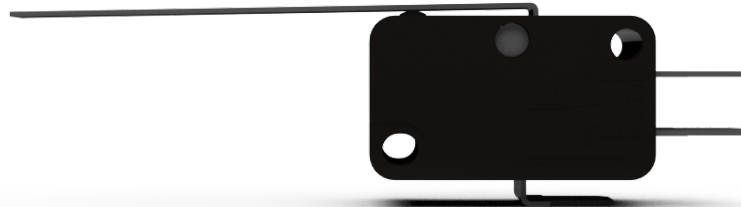
Tento text čerpá z [5].

6.2.2 Koncový spínač

Krajní polohy a chybové stavy buňky jsou ošetřeny pomocí běžných koncových spínačů. Při sepnutí je buď spojen obvod (konfigurace „v klidu rozpojeno“) nebo rozpojen (konfigurace „v klidu sepnuto“). Dva jsou využity pro omezení rotace motoru s omývacím talířkem. Další pro zjištění chybového stavu, kdy podstavec skleničky

spadne kvůli chybě pod elektromagnetické zářky, kde již není možné spojení s horním dílem.

Pro obě tyto ošetření lze využít jakýchkoliv jiných snímačů polohy, koncové spínače jsou ale nejlevnějším dostačujícím řešením.



Obr. 6.8: Koncový spínač

6.3 Řízení

Hlavní součástí elektrického vybavení buňky je beze sporu řídicí člen automatizující proces výroby v reálném čase. Po výběru vhodné technologie pro rozhýbání funkčních celků a získávání zpětné vazby ze systému Shakeru je tak buňka osazena vhodnou řídicí logikou, operátorským panelem a rozhraním zajišťujícím komunikaci s ostatními částmi kyber-fyzického systému testbedu.

6.3.1 PLC Siemens S7-1200

Hlavním členem, který zpracovává signály z řízené technologie, je programovatelný logický automat (PLC¹). Jedná se o průmyslový počítač navržený pro použití v technologických procesech. Jeho vstupy a výstupy jsou uzpůsobeny pro připojení externích periférií jako jsou akční členy, snímače, relé a další specializované zařízení.

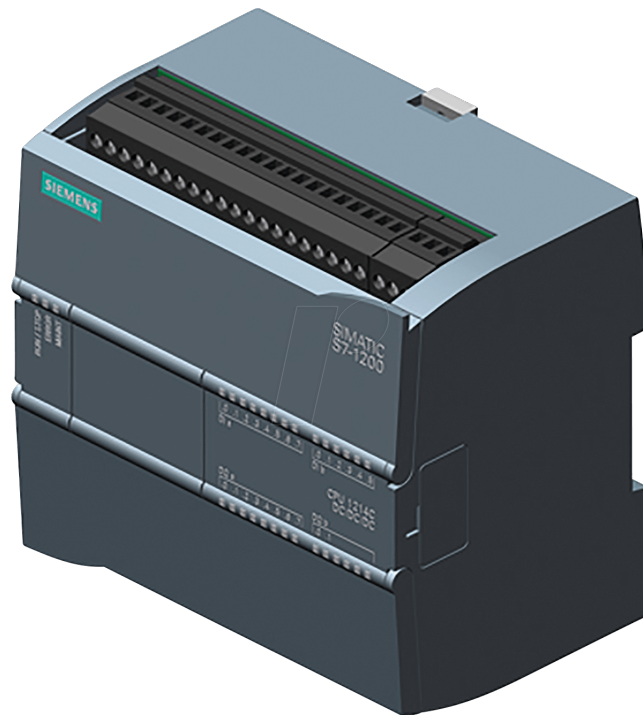
Na výstupy zapisuje na základě logiky (programu), která je vykonávána cyklicky. V praxi tak na začátku cyklu PLC načte stavy vstupů, na základě nich vyhodnotí dle vloženého programu výsledné stavy výstupů, na které na konci cyklu také zapíše.

V projektu robotického barmana je využíváno technologií poskytnutých firmou Siemens, proto je jako mozek Shakeru použit procesor Siemens řady S7-1200, konkrétně verze 1214C DC/DC/DC. Vyznačuje se možností modulárního rozšíření až o tři komunikační a osm signálních modulů. Nabízí čtrnáct integrovaných digitálních

¹Programmable logic controller

vstupů a deset výstupů. Toto množství je dostačující pro pokrytí všech aktuátorů a senzorů v buňce, není tak nutno procesor rozšiřovat o další moduly. Navíc 4 výstupy podporují pulsně šířkovou modulaci, čehož bude využito při řízení otáček hlavního motoru. Procesor je uzpůsoben pro připevnění na DIN lištu, jeho napájecí napětí je 24 V.

Tento text čerpá z [6].



Obr. 6.9: PLC Siemens S7-1200

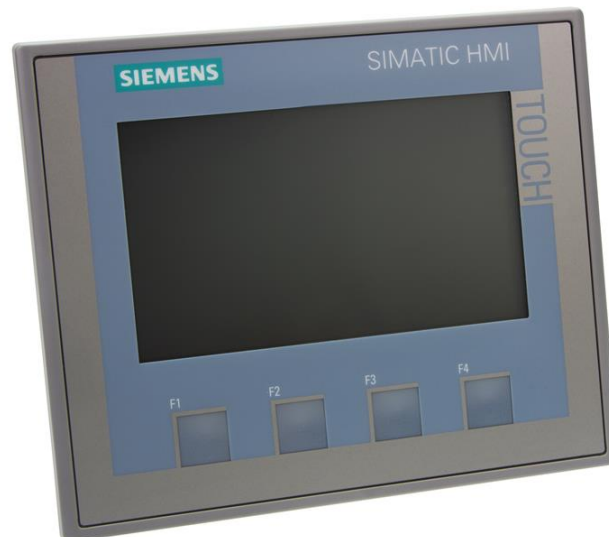
6.3.2 HMI panel KTP-400 Basic

Buňka Shaker, jako součást většího celku chytré továrny, je navržena pro autonomní fungování v rámci výrobního procesu. Důležitým bodem zadání práce je ale také požadavek na funkčnost buňky v případě, kdy je vyjmuta ze systému demonstrátoru.

Pro tento případ je vybavena operátorským HMI² panelem. Jedná se o rozhraní mezi člověkem a strojem, díky kterému je možno manuálně řídit a přistupovat k zařízení Shakeru. Umožňuje ovládání stroje a zadávání hodnot, ale také zobrazení a doručení informací o aktuálním stavu zařízení obsluze nebo operátorovi. Je tak umožněn například servisní zásah bez nutnosti připojení programovací stanice.

²Human machine interface

Nainstalován je programovatelný operátorský panel Siemens KTP-400 Basic, nabízející rozšiřující dotykový display o velikosti 4,2 palců s rozlišením 480x272 obrazových bodů a 4 funkční tlačítka. Napájí ho 24 V a s PLC komunikuje skrz Profinet.



Obr. 6.10: HMI Siemens KTP-400 Basic

Po instalaci HMI do buňky bylo vyprojektováno uživatelské rozhraní, které umožňuje jednoduchou obsluhu. Postup tvorby této vizualizace bude rozebrán v následujícím textu.

Informace o parametrech HMI panelu pochází z [7].

6.3.3 Přepínač

Zařízení komunikující přes průmyslový Ethernet (v našem případě Profinet firmy Siemens) tvoří síť, jejímž centrem se stává přepínač (switch). Programovatelný automat a operátorský panel jsou připojeny do přepínače Linksys SD205, skrz který probíhá také připojení buňky do celku robotického barmana.

Přepínač nabízí pět portů s plně duplexní propustností až 200 Mbps. Napájecí napětí je 12 V. Umístěný je společně s HMI panelem na DIN liště pomocí vytisknutých úchytek.

Propojení jednotlivých částí testbedu v síti Ethernet je interní komunikací barmana jako chytré továrny, která zatím v této verzi nemá připojení na internet. Tím

není splněna jedna ze základních vlastností CPS, je však interní komunikací dostatečně suplována a na funkci buňky, ani celého barmana to nemá vliv.

Více o přepínači je k dispozici v [8].

6.4 Elektro dokumentace

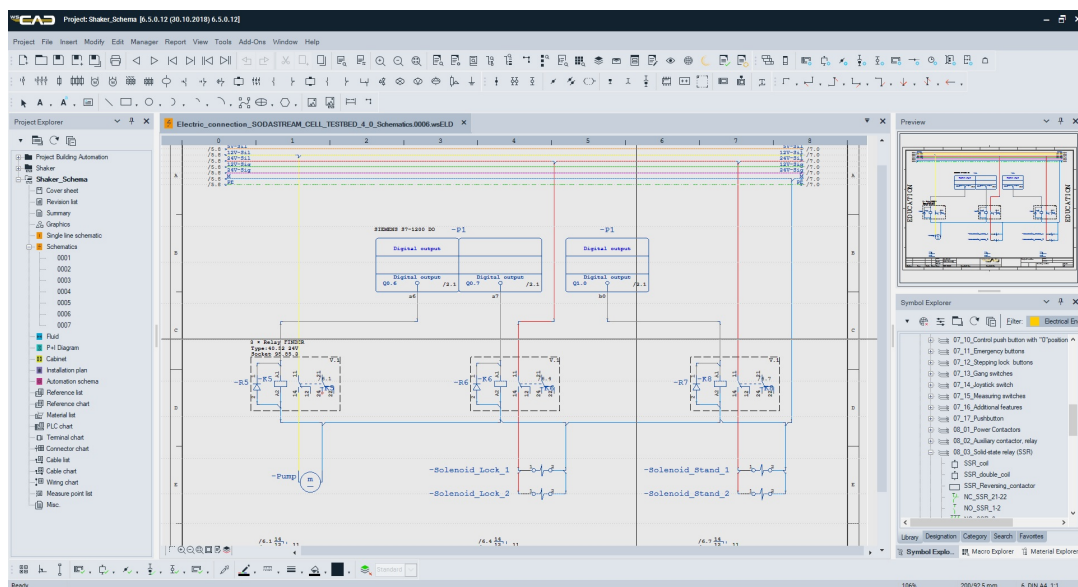
Součástí tvorby zařízení je i vypracování rozsáhlé projektové dokumentace. Mechanické prvky a konstrukce buňky jsou zaneseny v 3D modelu, ten ale neobsahuje popis elektrických prvků, zapojení a signálových cest.

Z tohoto důvodu vznikla virtuální elektro dokumentace, soubor výkresů popisující zapojení všech aktuátorů, senzorů, řídicí logiky a dalších zařízení společně se všemi silovými, signálními a komunikačními vedeními fungujícími v celku Shakeru. K tvorbě bylo využito moderních informačních technologií.

6.4.1 WSCAD

Na trhu figuruje množství CAD programů zaměřených na tvorbu elektrických schémat (EPLAN, COMOS, a další), pro účely projektu robotického barmana je využit WSCAD.

Jedná se o výkonný nástroj umožňující plánování a dokumentaci elektrických zařízení a zapojení. Nabízí všechny potřebné schematické symboly pro naše účely a podporuje jednoduchý export do různých formátů, stává se tak vhodnou volbou pro vypracování schémat elektrických zapojení Shakeru.



Obr. 6.11: Prostředí WSCAD

6.5 Zapojení a vodiče v buňce

Autonomní buňka je po zapojení do systému demonstrátoru napájena skrze průmyslový konektor. Z něho jsou všechny žíly poté přivedeny na svorkovnice na DIN liště. Tato skutečnost je jediný člen zobrazený na všech stránkách elektro dokumentace v horní části, odkud jsou vodiče taženy k jednotlivým prvkům.

V celém projektu robotického barmana je využíváno stejných konektorů, rozdělení žil a barevného označení, tak je zajištěna kompatibilita jednotlivých autonomních buněk celého systému testbedu.

Po připojení jsou k dispozici následující vodiče:

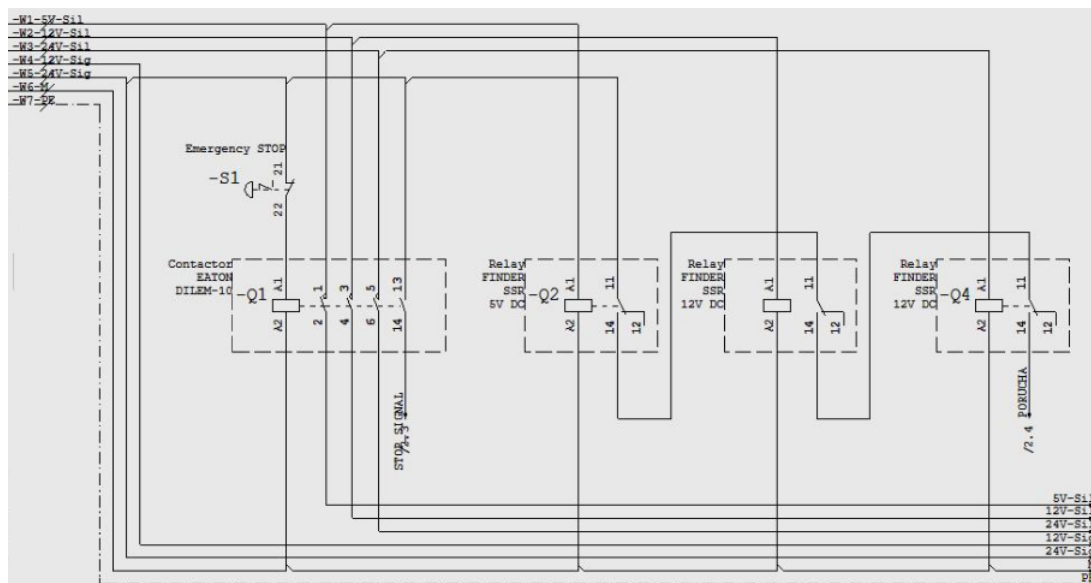
- Silový 5 V - oranžový
- Silový 12 V - žlutý
- Silový 24 V - červený
- Signální 12 V - zelený
- Signální 24 V - fialový
- Zemnicí - modrý
- Ochranný - zelenožlutý

Silové vodiče jsou určeny pro napájení akčních členů, vedeny jsou přes stykač, který rozepíná jejich obvody v případě stisknutí bezpečnostního stop tlačítka. V případě nouze či poruchy je tak možné rychle odpojit aktuátory od napájení. Po rozepnutí stykače je také přerušen stop signál, který slouží jako nositel informace o aktivaci stop tlačítka do PLC. Kontrola poruchy napájení probíhá pomocí trojice polovodičových relé, které zůstávají sepnuty, dokud je 5 V, 12 V i 24 V aktivní. Když dojde z jakéhokoliv důvodu k přerušení napájení, je rozepnut signál poruchy do PLC.

Signální vodiče slouží k napájení snímačů, PLC, HMI panelu a přepínače. Nejsou vedeny přes stykač, v případě bezpečnostního rizika a sepnutí stop tlačítka tak nedochází k jejich odpojení.

6.6 Zapojení akčních členů

Většina aktuátorů použitých v buňce je sice napájeno 24 V, odebírají ale velké proudy, tudíž nemohou být připojeny přímo na výstupy PLC. Využita jsou tedy relé se dvěma přepínacími kontakty, která spínají napájení přímo ze zdroje napětí. Umístěny jsou v patičkách na DIN liště. Následující text se tak věnuje způsobu zapojení jednotlivých akčních členů.



Obr. 6.12: Schéma zapojení signálních a silových vodičů

6.6.1 Hlavní motor

Pro správné fungování cyklu protřepání a omytí je nutné, aby bylo možné regulovat rychlost a směr otáčení motoru.

Shaker se musí pohybovat pomalu ve fázích zachycení a uvolnění sklenice, naopak při samotném protřepávání je žádoucí vyšší rychlost. Změna velikosti napětí (a tím i rychlosti otáčení) na hlavním motoru je realizována pomocí PWM MOSFET modulu. Jeho spínání je řízeno jedním ze čtyř výstupů PLC, který podporuje pulsně šířkovou modulaci. Je tak možno upravovat efektivní hodnotu napětí na přívodech motoru. Pro tento účel bylo původně využito SSR polovodičové relé, které ale kvůli pomalejšímu času sepnutí nemohlo pracovat na vyšších frekvencích a vinutí motoru tak bylo buzeno cukavě.

Pro umytí je potřeba nejdříve víčko umístit do omývacího talířku, poté zase vyjmout, toho je dosaženo změnou směru rotace motoru. PWM modulu tak předchází relé, které sepnutím přepólovává přívoody ze zdroje napětí.

6.6.2 Motor mechanismu omytí

Nominální napětí stejnosměrného motoru, který pohybuje omývacím talířkem, je 24 V. Pro využití v Shakeru je to ale zbytečně vysoká hodnota, motor se pak točí moc rychle a kvůli setrvačnosti ho nelze zastavit na přesné požadované pozici. Proto je napájen pouze z 12 V.

Jako aparát k jeho řízení je použita dvojice relé. Jedno funguje jako spouštěč,

který uzavírá obvod motoru, a druhé dokáže obrátit směr rotace motoru přepólováním jeho přívodů.

Motor tak dokáže konstantní rychlostí otáčet na obě strany, v kombinaci se dvěma koncovými spínači realizuje posun omývacího talířku mezi pozicí pro mytí a pozicí pro fázi protřepání nápoje.

6.6.3 Čerpadlo

Jedno relé je použito k ovládní připojení čerpadla na 12 V napájení.

6.6.4 Elektromagnetické zámky

V buňce jsou instalovány dva páry elektromagnetických zámků, jeden pro uzamčení sklenice při protřepání a druhý jako pohyblivý podstavec. Každý z těchto párů je zapojený paralelně na relé, které ho připojuje na zdroj 24 V.

Při průtoku proudu solenoidy zámků se tvoří magnetické pole. Po odpojení se na cívce na malou chvíli indukují napětí s opačnou polaritou. Proto byly na vývody co nejbliž zátěži napájeny ochranné diody, které zabraňují vzniku jiskření relé.

6.7 Zapojení snímačů

Snímání poloh jednotlivých pohyblivých členů v buňce zajišťuje šest senzorů. Tento text popisuje jejich zapojení.

6.7.1 Indukční snímač IFM IY5049

Trojice indukčních snímačů pro zpětnou vazbu poloh pohyblivých částí mechanismu protřepání nápoje funguje jako spínací kontakt v konfiguraci v klidu rozpojeno.

Ke snímači tak vedou tři vodiče, jeden napájecí 24 V, druhý zemnicí a třetí je výstupem, na kterém se objeví napětí při sepnutí, připojeným do PLC.

6.7.2 Koncový spínač

Tři koncové spínače, které slouží k registraci krajních poloh pohyblivého talířku a podstavce, lze zapojit buď jako v klidu rozpojeno nebo v klidu sepnuto. V autonomní buňce Shaker je využita první varianta, jeden přívod spínače je tak zapojen na 24 V a druhý přímo do PLC.

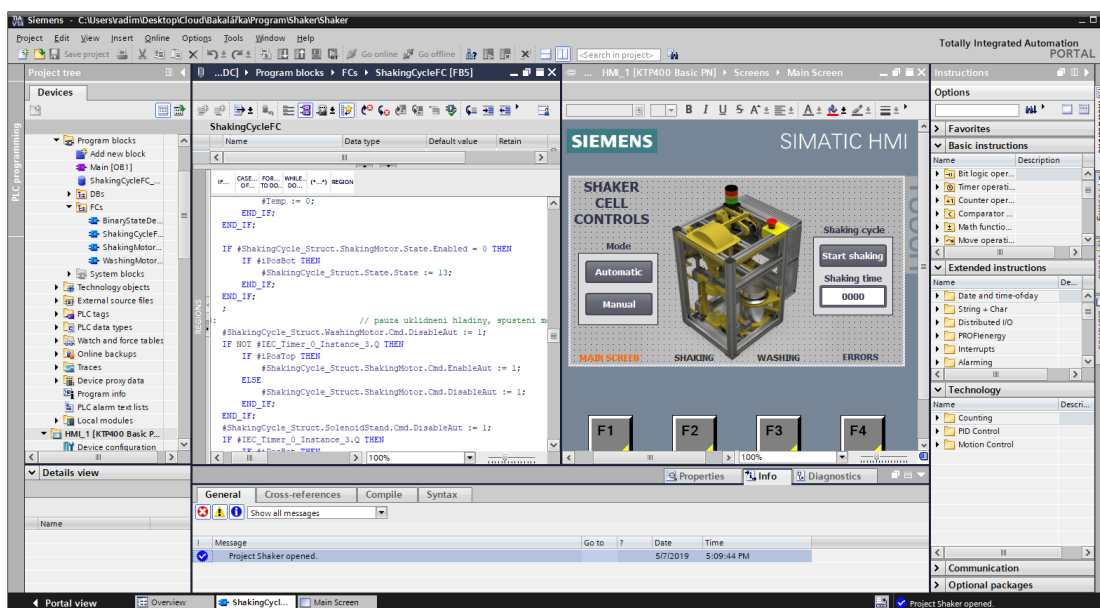
7 Programové vybavení autonomní buňky Shaker

V předchozím textu byly definovány mechanické a elektrické prvky v buňce včetně jejich konstrukčních náležitostí a zapojení. Je tak ukončena etapa návrhu konstrukce a vybavení Shakeru. V tento okamžik může být dle vypracované dokumentace buňka fyzicky sestrojena, chybí ale implementace programového vybavení.

Tato kapitola popisuje návrh hlavního programu, vizualizace a uživatelského rozhraní řídicí logiky autonomní buňky Shaker.

7.1 TIA Portal

V celém projektu robotického barmana je využíváno řídicí logiky od společnosti Siemens. Všechny PLC a operátorské panely jsou tak programovány skrz software TIA Portal¹. Jedná se o plně integrované prostředí pro vývoj uživatelských aplikací pro PLC, rozsáhlých SCADA vizualizací, projektování HMI panelů a konfiguraci podporovaných zařízení. Veškerý návrh programového vybavení je tak realizován v podobě jednoho projektu, což značně usnadňuje implementaci, testování a odladění programu.



Obr. 7.1: Prostředí TIA Portal

Z pohledu týmového projektu je využití stejné platformy pro návrh programového vybavení nutností. Je tak zajištěna kompatibilita jednotlivých částí systému, snadné sdílení částí kódu a jednoduché zpětné refaktorování.

¹Totally Integrated Automation Portal

7.2 Struktura programu

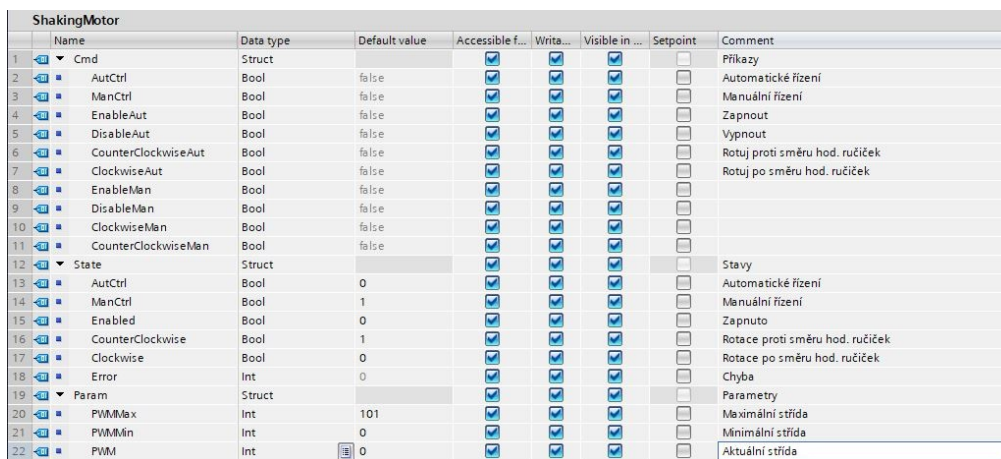
Jednou cestou, jak buňku naprogramovat a oživit, by byla tvorba prostého stavového automatu s jednoduchým zápisem na výstupy. Tento přístup by se ale z postupem času ukázal jako nevhodný. V případě jakékoliv změny nebo další iterace buňky by bylo nutno přepsat velké části kódu na různých místech. Proto je struktura programu koncipována jako modulární záležitost rozdělená na části kódu vztahující se k určitým funkčním blokům.

7.2.1 Rozhraní reálných prvků buňky

Pro programování buňky byly zvoleny některé postupy a pojmy ze standardu ISA 88 vytvořeného pro programování typu Batch. Není to zcela od věci, protože celý testbed barman je z hlediska typu výroby kombinací dávkové a diskretní výroby. Základním stavebním blokem programu se tak stává „control module“ (dále jen „CM“). Každý CM plní dvě základní funkce: poskytuje rozhraní pro připojení fyzických zařízení (jako jsou aktuátory a senzory) a obsahuje základní řídicí algoritmy. Jedná se tak o zapouzdření nejnižší úrovně ovládání určitého celku.

Například pokud je v určitém zařízení využito vícero stejnosměrných motorů s možností reverzace otáček, není potřeba každý z nich definovat a programovat zvlášť. Stačí vytvořit jeden CM definující rozhraní pro ovládání takového motoru. V programu je pak vícero instancí tohoto CM, pro každý motor jedna.

Realizovaný je jako datová část a algoritmy. TIA Portal umožňuje tvorbu uživatelských datových typů UDT². Nejdřív je tedy vytvořeno UDT zapouzdřující strukturu pro příkazy, stavy a parametry.



	Name	Data type	Default value	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Cmd	Struct		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Příkazy
2	AutCtrl	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Automatické řízení
3	ManCtrl	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Manuální řízení
4	EnableAut	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zapnout
5	DisableAut	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Vypnout
6	CounterClockwiseAut	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Rotuj proti směru hod. ručiček
7	ClockwiseAut	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Rotuj po směru hod. ručiček
8	EnableMan	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	DisableMan	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	ClockwiseMan	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	CounterClockwiseMan	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	State	Struct		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Stavy
13	AutCtrl	Bool	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Automatické řízení
14	ManCtrl	Bool	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Manuální řízení
15	Enabled	Bool	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zapnuto
16	CounterClockwise	Bool	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Rotace proti směru hod. ručiček
17	Clockwise	Bool	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Rotace po směru hod. ručiček
18	Error	Int	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Chyba
19	Param	Struct		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Parametry
20	PWMMax	Int	101	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Maximální střída
21	PWMMin	Int	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Minimální střída
22	PWM	Int	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Aktuální střída

Obr. 7.2: UDT hlavního motoru

²User Data Type

Za pomoci příkazů je CM následně ovládán, základem je přepínání mezi automatickým a manuálním ovládáním. Další příkazy už jsou specifické pro danou soustavu. Stav je přepínán na základě logiky v algoritmické části, podle níž je poté zapisováno na výstupy a ovládány reálné prvky. Parametry jsou proměnné, které ovlivňují vykonávanou logiku.

Algoritmická část je prostou funkcí zapsanou v jazyce SCL, která obsahuje definice vztahů a logiku řízení. Podle ní je upravována datová část a tím i reálné výstupy. Na vstup této funkce je připojeno vytvořené UDT pro konkrétní prvek a snímače reálné soustavy. Výstupem jsou ovlivňovány aktuátory soustavy.

Pro každou soustavu aktuátorů a senzorů které pracují v buňce společně je tak vytvořen CM. Jeden pro řízení hlavního motoru, další pro motor omytí s dvojicí koncových spínačů a poslední pro prostá zapnuto/vypnuto zařízení, jako je čerpadlo a elektromagnetické zámky.

7.2.2 Řízení funkčních celků buňky

Schránkou sdružující více řídicích modulů CM podílejících se na realizaci jedné funkce (např. protřepání nápoje) je „equipment module“ (dále jen „EM“). Smyslem EM je koordinace a vykonání logiky potřebné k provedení určité procedurální fáze výrobního cyklu.

Obsahem EM je logika a funkce pro řízení většího celku buňky (například funkční celek protřepání nápoje). Zajišťuje řízení dílčích CM (které může, ale nemusí obsahovat), detekci chybových stavů, vyhodnocení dat a manuální rozhraní pro ovládání buňky.

Přímo nezapisuje na výstupy ani nečte ze vstupů PLC, využívá jednotlivé CM pro řízení fyzických prvků Shakeru.

7.3 Řídící logika v Shakeru

Následuje popis všech bloků vytvořených pro potřeby autonomní buňky Shaker. Dohromady tvoří pyramidu, kde vespuďu hierarchie se nachází reálné členy buňky řízené svými CM a na vrcholku je jeden EM zapouzdřující hlavní program pro řízení části výrobního cyklu přípravy nápoje - protřepání a omytí.

7.3.1 Rozhraní hlavního motoru (CM ShakingMotor)

Tento blok zajišťuje rozhraní pro připojení a řízení stejnosměrného motoru s možností reverzace a regulace rychlosti otáček. V případě Shakeru se tak jedná o hlavní motor, který pohání celý mechanismus protřepání nápoje.

V TIA Portal projektu je blok nazván „ShakingMotor“. Tvořen je UDT, který obsahuje struktury příkazů (CMD), stavů (State) a parametrů (Param).

Vzhledem k požadavkům na fungování motoru jsou definovány příkazy:

- AutCtrl - automatický režim ovládání
- ManCtrl - manuální režim ovládání
- Enable - zapnout motor
- Disable - vypnout motor
- CounterClockwise - rotace hřídele proti směru hodinových ručiček
- Clockwise - rotace hřídele po směru hodinových ručiček

Pro přehlednost této práce uvádím příkazy pouze jednou, ve skutečnosti je ale každý příkaz ve variantě pro automatické a pro manuální řízení. Například Enable je tak rozdělen na EnableAut a EnableMan. Podle toho, který režim ovládání je zvolen, lze použít určitý příkaz. To je proto, aby například manuální operátorské příkazy z HMI panelu neměly efekt, dokud je buňka v automatickém režimu.

Stavy, které tato datová oblast definuje, jsou následující:

- AutCtrl - aktivován automatický režim ovládání
- ManCtrl - aktivován manuální režim ovládání
- Enabled - motor je zapnut
- CounterClockwise - hřídel rotuje proti směru hodinových ručiček
- Clockwise - hřídel rotuje po směru hodinových ručiček
- Error - chybový stav

Celočíselné parametry, které UDT definuje, jsou:

- PWMMax - maximální povolená střída
- PWMMin - minimální povolená střída
- PWM - aktuální střída

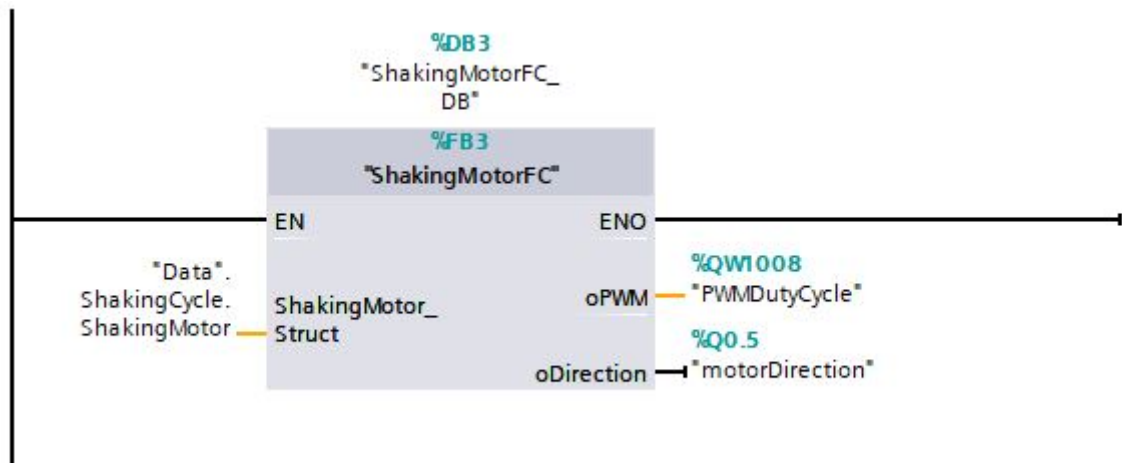
Algoritmická část potom zajišťuje přepínání jednotlivých stavů na základě logických úrovní příkazů a jiných stavů, detekci a ošetření chybových stavů a zápis na výstupy.

První část kódu tedy řeší příkazy. Jakmile je odněkud z programového prostoru Shakeru zapsána logická úroveň TRUE na příkaz, je odpovídajícím způsobem upraven příslušný stav a příkaz je opět přepnut na FALSE. Například v případě, že je motor vypnutý a je aktivován příkaz Enable, proběhne přepnutí stavu Enabled na logickou úroveň TRUE a příkaz je opět navrácen do klidové úrovně.

Další sekce kódu se stará o detekci chybových stavů. V tomto případě se jedná o překročení maximální nebo minimální povolené střídy definované v parametrech. Pokud k tomu dojde, je aktivován chybový stav Error a motor vypnut.

Poslední zbytek kódu řeší zápis na výstupy. Podle úrovní jednotlivých stavů a parametrů je tak zapisováno na výstupy funkce, které jsou později napojeny přímo na

výstupy PLC. Je tak ovlivňován výstup aktivující motor a výstup reverzace otáček motoru. Například při aktivních stavech Enabled a Clockwise a hodnotě parametru PWM 60 je motor zapnutý a otáčí se po směru hodinových ručiček šedesátiprocentní rychlostí. V této části je také volána instrukce „CTRL_PWM“, která je vybavením TIA Portalu pro aktivaci generátoru pulsně šířkově modulovaného signálu.



Obr. 7.3: Funkční blok CM ShakingMotor

7.3.2 Rozhraní motoru mechanismu omytí (CM WashingMotor)

Rozhraní pro připojení a řízení funkčního celku pro pohyb omývacího talířku definuje blok „WashingMotor“. Sdružuje logiku použitou k ovládání stejnosměrného motoru s možností reverzace otáček, který pohybuje omývacím talířkem mezi dvěma pozicemi definovanými koncovými spínači.

Příkazy, které definuje datová část bloku, jsou následující:

- AutCtrl - automatický režim ovládání
- ManCtrl - manuální režim ovládání
- Enable - zapnout motor
- Disable - vypnout motor
- GoToPosS - přesunout talířek na pozici fáze protřepání
- GoToPosW - přesunout talířek na pozici fáze omytí

Stavy, které tato datová oblast definuje, jsou:

- AutCtrl - aktivován automatický režim ovládání
- ManCtrl - aktivován manuální režim ovládání
- Enabled - motor je zapnut
- PosS - vyžádána pozice fáze protřepání

- PosW - vyžádána pozice fáze omytí
- InPosS - talířek je v pozici fáze protřepání
- InPosW - talířek je v pozici fáze omytí
- Done - talířek se nachází ve vyžádané pozici
- Error - chybový stav

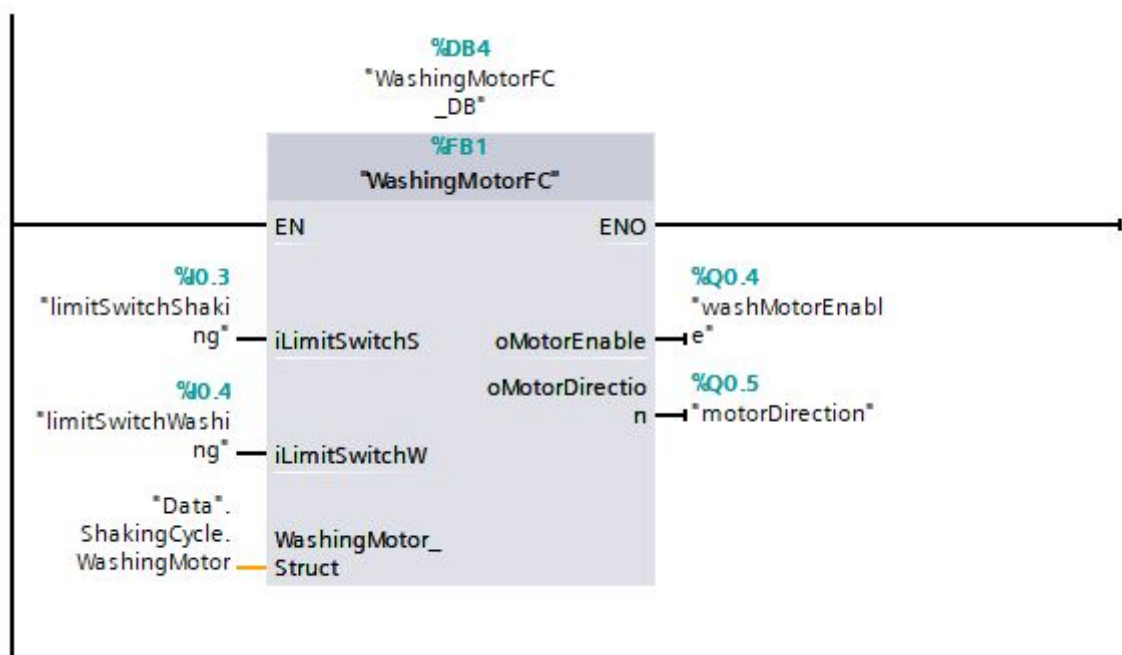
Parametr je pouze jeden:

- MaxMoveTime - maximální povolená doba pohybu talířku mezi pozicemi

Pokud trvá přesun talířku z jedné pozice do druhé déle, než definuje tento parametr, je nastaven chybový stav. Je využit při detekci neočekávaného zastavení motoru nebo zaseknutí o překážku.

Funkce, která tvoří algoritmickou část tohoto CM, poté řeší logické úrovně jednotlivých stavů na základě příkazů, detekci chybových stavů a zápis na výstupy.

Výstupem funkce je tak rozhraní pro připojení dvou relé, jednoho jako spouštěč, druhého pro změnu směru otáčení motoru.



Obr. 7.4: Funkční blok CM WashingMotor

7.3.3 Rozhraní „zapnuto/vypnuto“ zařízení (CM BinaryStateDevice)

V autonomní buňce Shaker pracuje několik akčních členů, které nejsou součástí většího celku a vyžadují pouhou aktivaci či deaktivaci. Konkrétně se jedná o čerpadlo a dva páry elektromagnetických zámků. I jejich řízení zajišťuje samostatný CM, v

hlavním programu je pak pouze využito vícero instancí. Je tomu tak proto, aby byl skrze celý program sjednocený styl programování a jasná struktura. Tento blok je navíc připravený pro případné budoucí připojení dalších takovýchto akčních členů.

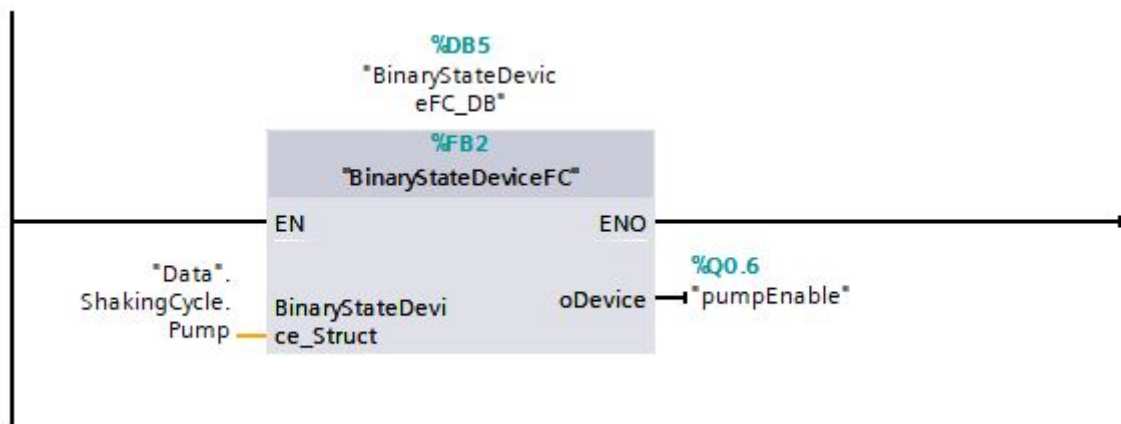
Vlastní datový typ tohoto bloku obsahuje příkazy (ve variantě pro manuální i automatické řízení):

- AutCtrl - automatický režim ovládání
- ManCtrl - manuální režim ovládání
- Enable - zapnout zařízení
- Disable - vypnout zařízení

Stavy, které tato datová oblast definuje, jsou:

- AutCtrl - aktivován automatický režim ovládání
- ManCtrl - aktivován manuální režim ovládání
- Enabled - zařízení je zapnuto

Parametry neobsahuje žádné, jedná se přeci jen o pouhé zapnutí či vypnutí zařízení. Příslušná funkce řeší přepínání mezi manuálním a automatickým řízením, logické úrovně stavu „Enabled“ a jeho následné přepsání na výstup.



Obr. 7.5: Funkční blok CM BinaryStateDevice

7.4 Hlavní program

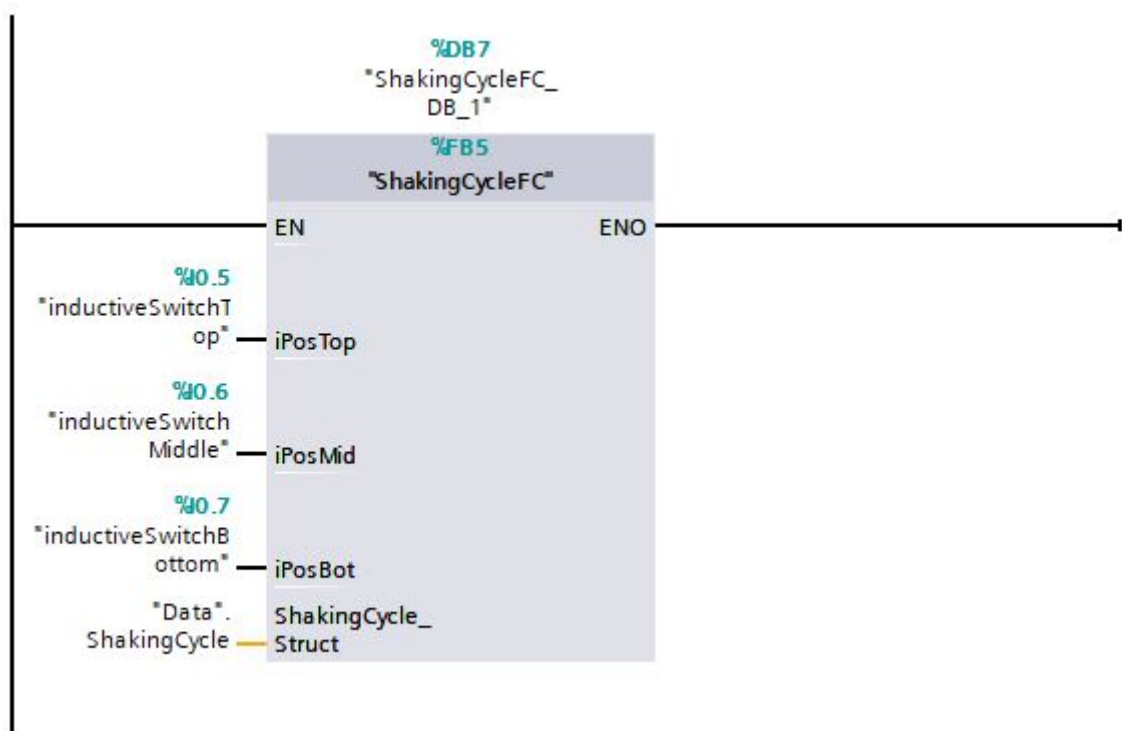
Vytvoření bloků zapouzdřujících rozhraní jednotlivých nízkoúrovňových komponent buňky bylo zdlouhavým, ale nutným procesem. Odměnou jsou kvalitní základy a definovaná kultura programování, které ve výsledku velmi usnadní fázi tvorby hlavního programu.

Následuje popis tvorby programu, správy dat, supersmyčky a vysvětlení volání jednotlivých CM.

7.4.1 Zapouzdření hlavního programu (EM ShakingCycle)

Dosavadní postup návrhu programového vybavení buňky byl zaměřen na modularitu, jinak tomu není ani při řešení řízení celého technologického celku Shakeru. Byl vytvořen EM obsahující datovou a algoritmickou oblast, stejně jako při návrhu jednotlivých CM.

Jedná se o jediný celek, který je cyklicky volán v hlavním organizačním bloku, ostatní jsou jeho součástí. Jeho funkcí je řízení celé autonomní buňky Shaker, obsahuje tak mimo jiné algoritmus procesu protřepání nápoje a omytí víčka v podobě stavového automatu.



Obr. 7.6: Volání bloku hlavního programu (EM ShakingCycle)

7.4.2 Hlavní datová oblast

Pro potřeby tohoto EM byl opět vytvořen nový UDT (uživatelé definovaný datový typ). Kromě standardních struktur příkazů, stavů a parametrů navíc obsahuje i jednu instanci UDT, které byly vytvořeny pro CM, pro každý řízený celek nebo akční člen v buňce. Například po připojení čerpadla a dvou párů elektromagnetických zámků tak nyní hlavní datová oblast obsahuje tři prvky pro „zapnuto/vypnuto“ zařízení typu BinaryStateDevice.

Prvky obsažené v UDT ShakingCycle jsou:

- Cmd - struktura příkazů
- State - struktura stavů
- Param - struktura parametrů
- ShakingMotor - data hlavního motoru (typu ShakingMotor)
- WashingMotor - data omývacího motoru (typu WashingMotor)
- SolenoidStand - data první instance páru elektromagnetických zámek, konkrétně podstavce (typu BinaryStateDevice)
- SolenoidGlassLock - data druhé instance páru elektromagnetických zámek, konkrétně zámek sklenice (typu BinaryStateDevice)
- Pump - data čerpadla (typu BinaryStateDevice)

Hlavní program lze ovládat pomocí příkazů, definovány jsou:

- AutCtrl - automatický režim ovládání buňky
- ManCtrl - manuální režim ovládání buňky
- StartShaking - spustit jeden cyklus protřepání nápoje a omytí víčka

Příkaz StartShaking je aktivován buď při vložení sklenice na podstavec v automatickém režimu nebo při manuálním vyžádání jednoho cyklu protřepání skrz operátorský HMI panel.

Struktura stavů obsahuje:

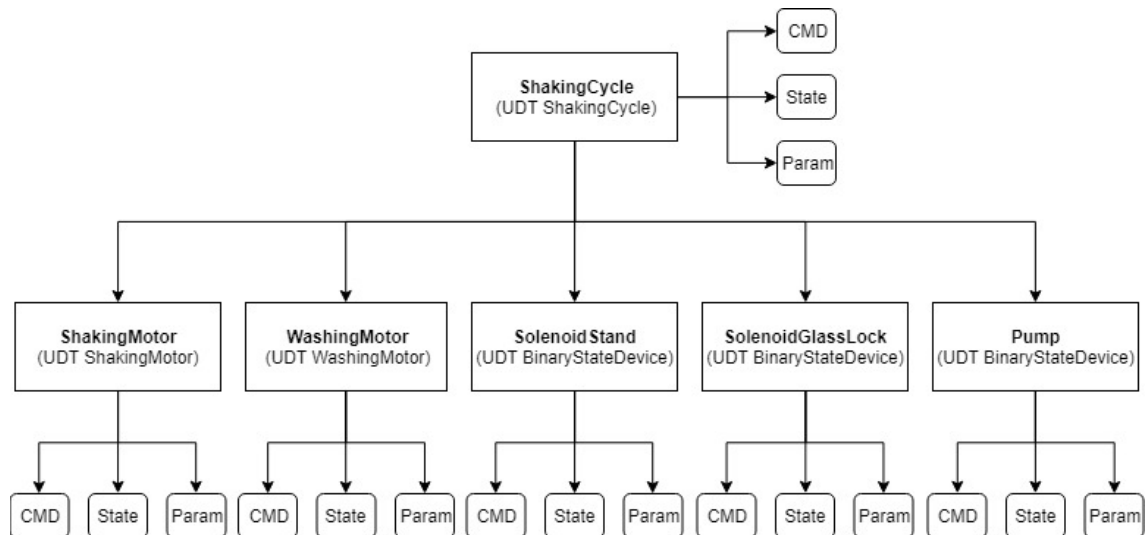
- AutCtrl - aktivován automatický režim ovládání buňky
- ManCtrl - aktivován manuální režim ovládání buňky
- State - aktuální číslo stavu stavového automatu
- Done - cyklus protřepání a omytí byl dokončen
- Error - chybový stav

Parametry definující charakter protřepání nápoje:

- ShakingTime - doba protřepání nápoje
- ShakingIntenzity - síla, kterou je nápoj protřepáván

Tyto dva parametry jsou nastavovány na základě dat z receptury stažené z NFC čipu sklenice. Díky tomu je možno upravit fázi protřepání dle požadavků jednotlivých připravovaných nápojů.

Hlavní datová oblast je v projektu v TIA Portalu realizována jako globální datový blok Data [DB1], který obsahuje jednu statickou proměnnou typu ShakingCycle. Tato proměnná zase obsahuje proměnné jednotlivých CM. Je tak vytvořena komplexní datová struktura, ze které si poté jednotlivé funkce řízení čtou a zapisují svá data.



Obr. 7.7: Datová organizace programu Shakeru

7.4.3 Algoritmická část

Vytvoření jedné všeobsáhlé datové struktury, kde jednotlivé části jsou napojeny na funkce řídicí reálné zařízení v buňce, extrémně zjednodušuje zápis logiky cyklu protřepání a omytí. Přínos veškeré přípravy programového vybavení až do tohoto bodu spočívá v tom, že nyní je možné celou buňku ovládat pouhým zapisováním do struktur příkazů jednotlivých CM a nadřazeného EM. To v praxi znamená, že hlavní program, který je realizovaný jako stavový automat, je pouze jednoduchý sekvenční zápis příkazů v jednotlivých stavech. Tento kód je velmi dobře čitelný, opravitelný a rozšiřitelný. Programátor se tak stará pouze o zápis toho, co se má kdy stát, o zbytek už se „pod pokličkou“ postarají připravené moduly.

Následující úryvek ukazuje výhody výsledného kódu:

```

14:          // presun omyvaciho talirku na pozici pro omyti
          #ShakingCycle_Struct.ShakingMotor.Cmd.ClockwiseAut := 1;
          #ShakingCycle_Struct.WashingMotor.Cmd.EnableAut := 1;
          #ShakingCycle_Struct.WashingMotor.Cmd.GoToPosWAut := 1;
          IF #ShakingCycle_Struct.WashingMotor.State.InPosW THEN
              #ShakingCycle_Struct.State.State := 15;
          END_IF;
          ;
  
```

Po pouhém přečtení každého řádku je jasné, s jakým elementem se pracuje, jestli probíhá zapsání příkazu či čtení stavu a jaký příkaz je vykonáván. V tomto

ukázkovém stavu je tak nastaven směr rotace hlavního motoru po směru hodinových ručiček, zapnut omývací motor, omývací talířek pohnut na pozici pro omývání a v momentě, kdy na požadovanou pozici dorazí, je aktivován následující stav.

První část kódu je přepínání mezi automatickým a manuálním ovládním buňky. Po přijetí příkazu jsou přepnuty všechny dílčí prvky Shakeru do požadovaného režimu a vypnuty tak, aby při nechtěném přepnutí uprostřed určité operace nedošlo k havárii.

Následuje samotný stavový automat. Nultým stavem je manuální ovládním, aktivován je operátorem nebo servisním technikem. Zde jsou převáděny příkazy z HMI panelu na jednotlivé prvky.

Zbýlých 16 stavů popisuje proces protřepání nápoje a omytí víčka. Nejprve je provedeno umístění všech částí do výchozích pozic tak, aby byla buňka připravena přijmout sklenici. Po vložení následuje přesunutí omývacího talířku, uzamknutí sklenice, a uvolnění podstavce. Samotné protřepání probíhá tak dlouho a intenzivně, jak je určeno v parametrech. Po protřepání je aktivován podstavec, uvolněna sklenice a následuje fáze mytí. Je opět přesunut omývací talířek, do něj vloženo víčko a aktivováno čerpadlo na tři vteřiny. Po vyjetí víčka z talířku je cyklus dokončen a buňka je připravena přijmout další sklenici. Stavový diagram je přiložen v první příloze.

Poslední část kódu je samotné volání dílčích CM a jejich připojení na reálné výstupy PLC. Každý blok má připojenou svou UDT strukturu z hlavního datového prostoru.

Z důvodu ušetření jednoho výstupu PLC jsou obě relé pro reverzaci otáček hlavního a omývacího motoru spínána jedním výstupem. Není tak možné měnit směr motorů zvlášť, to ale nevadí, protože nikdy nepracují oba ve stejnou chvíli. Problém nastává, když jsou výstupy dvou CM (ShakingMotor a WashingMotor) napojeny na jeden reálný PLC výstup. Pro tento případ je zde ošetření, kde je na výstup zapisováno podle toho, zda je zapnutý hlavní motor, který má přednost.

7.5 Vizualizace a uživatelské rozhraní

Po nahrání popsaného programového vybavení do řídicího PLC se stává Shaker funkční z hlediska požadavku na protřepání a omytí nápoje. Není ale možná manuální operace a kontrola částí buňky. Následující text se tak zabývá tvorbou ovládacího prostředí pro operátorský HMI panel.

Návrh probíhá ve WinCC skrz TIA Portal a důraz je kladen na jednoduché intuitivní ovládním s vizuálními prvky tak, aby nebylo nutné podstoupit rozsáhlé školení pro obsluhu buňky.

Jelikož použitý panel KTP-400 Basic disponuje pouze čtyřmi funkčními tlačítky, byly vytvořeny právě čtyři obrazovky tak, aby navigace mezi nimi nebyla omezena

na dotykovou plochu. Ke každému tlačítku je přiřazena jedna obrazovka pro obsluhu určitého funkčního celku.

Všechny ovládací prvky v reálném čase reflektují stavy celků, které ovládají. Pokud je tedy například aktivovaný pár elektromagnetických zámek, jeho tlačítko pro zapnutí má zelené pozadí, v případě vypnutí zase šedé. Všechna tlačítka jsou realizována jako přepínací (toggle), to znamená, že při každém stisknutí invertují bit, se kterým jsou svázaná.

7.5.1 Hlavní obrazovka

Výchozí obrazovka, která je nahrána hned při spuštění uživatelského rozhraní, nabízí informace a ovládací prvky buňky jako celku. Z jiných obrazovek ji lze aktivovat prvním funkčním tlačítkem.

Zde probíhá přepínání mezi automatickým a manuálním režimem ovládání Shakeru. Lze zde spustit jeden cyklus hlavního programu s ručně nastaveným parametrem délky protřepání.



Obr. 7.8: Hlavní obrazovka

Indikační prvky zahrnují přerušení 5 V, 12 V a 24 V signálu a sepnutí bezpečnostního tlačítka.

7.5.2 Obrazovka ovládání funkčního celku protřepání nápoje

Při přepnutí na manuální ovládání buňky jsou aktivovány prvky na další obrazovce, která umožňuje operátorovi manipulovat s funkčním celkem protřepání nápoje.

Na obrazovce se tak nachází prvky pro zapnutí a vypnutí obou párů elektromagnetických zámků a ovládací panel hlavního motoru. Ten umožňuje jeho zapnutí, výběr směru a nastavení rychlosti otáčení hřídele.



Obr. 7.9: Obrazovka ovládání funkčního celku protřepání nápoje

Přepnout na tuto obrazovku lze odkudkoliv ze systému uživatelského rozhraní pomocí funkčního tlačítka číslo dvě.

7.5.3 Obrazovka ovládání funkčního celku omytí

V manuálním režimu je aktivována i další obrazovka, ta zajišťuje ovládání funkčního celku omytí. Náleží jí funkční tlačítko číslo tři.

Jeden blok ovládacích prvků umožňuje aktivovat či deaktivovat omývací motor a pohybovat s talířkem mezi definovanými pozicemi pro protřepání a omytí. Dalším prvkem lze spustit čerpadlo.



Obr. 7.10: Obrazovka ovládání funkčního celku omytí

7.5.4 Obrazovka chybových hlášení

Poslední obrazovkou na čtvrtém funkčním tlačítku je tabulka registrující chybové stavy částí systému. Zde jsou vypisovány a obsluhovány chybové hlášky odeslané kterýmkoliv CM nebo EM.



Obr. 7.11: Tabulka chybových hlášení

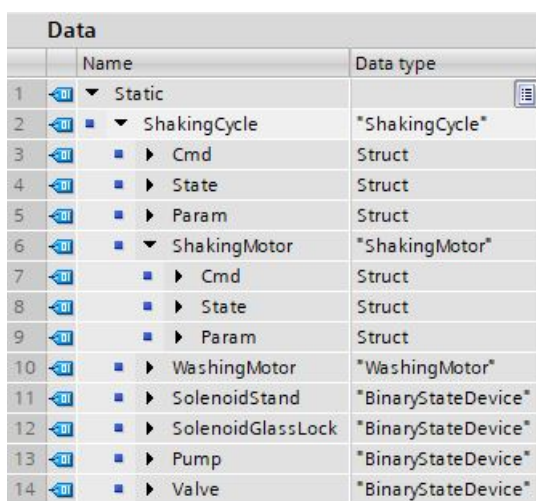
7.6 Přizpůsobení programového vybavení pro připojení do demonstrátoru

Definice struktur a rozdělení součástí Shakeru do jednotlivých bloků nemá za důsledek pouze zjednodušení a zefektivnění programu, je také základem pro komunikaci buňky s ostatními částmi systému robotického barmana.

V momentě, kdy je buňka součástí kyber-fyzického systému chytré továrny, probíhá její komunikace s nadřazeným MES³ systémem. Jádro tohoto systému komunikuje s dílčími PLC jednotlivých částí testbedu.

Základem je periodická výměna definovaných datových struktur. Příhodné je, že tato struktura je tvořena právě z dříve definovaných entit jako EM, CM a jejich struktur příkazů, stavů a parametrů. MES systém musí obsahovat stejné struktury jako Shaker, tak je vytvořena abstrakce fyzického modelu buňky.

Následná výměna dat a aktualizace struktur probíhá přes OPC-UA. Datový blok v PLC programu sloužící k synchronizaci dat se předpokládá známý a neměnný.



Data		
	Name	Data type
1	Static	
2	ShakingCycle	"ShakingCycle"
3	Cmd	Struct
4	State	Struct
5	Param	Struct
6	ShakingMotor	"ShakingMotor"
7	Cmd	Struct
8	State	Struct
9	Param	Struct
10	WashingMotor	"WashingMotor"
11	SolenoidStand	"BinaryStateDevice"
12	SolenoidGlassLock	"BinaryStateDevice"
13	Pump	"BinaryStateDevice"
14	Valve	"BinaryStateDevice"

Obr. 7.12: Definovaná datová struktura Shakeru

Rozdělením programu Shakeru na jednotlivé hierarchicky spojené bloky proběhlo přizpůsobení programového vybavení pro připojení do demonstrátoru. Při implementaci nadřazeného MES systému bude stačit duplikovat tyto struktury pro jejich následnou opakovanou výměnu.

Základní myšlenky tohoto textu pochází z [10].

³Výrobní informační systém (Manufacturing execution system)

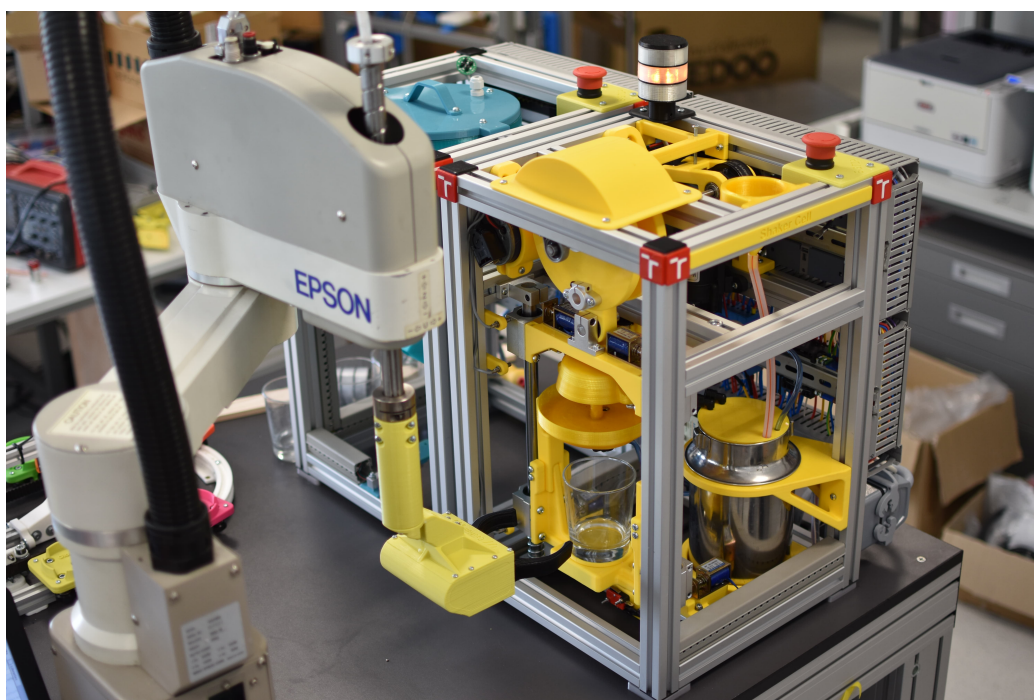
8 Realizace návrhu

Po stanovení požadavků testbedu na buňku a nadefinování její funkcí, vytvoření kompletního digitální modelu včetně elektro dokumentace a výběru aktuátorů a senzorů vhodných pro danou aplikaci je postupně sestrojeno reálné zařízení - autonomní buňka Shaker.

8.1 Mechanická konstrukce

Výsledná konstrukce se skládá ze 158 pasivních samostatných dílů (počítáno bez spojovacích materiálů a vedení). Z toho 54 je vyrobeno metodami aditivní výroby, konkrétně 3D tiskem.

Rám buňky tvoří čtrnáct krátkých a čtyři dlouhé hliníkové profily. Na ně jsou následně upevněny všechny další konstrukční prvky pomocí T-matek s M4 závitem. Dvě nosné DIN lišty na zadní straně jednotky slouží k upevnění logického automatu, HMI operátorské jednotky, průmyslového přepínače a jednotlivých elektrických přístrojů jako jsou relé, svorkovnice a stykač. Sedm žlabů okolo zajišťuje organizaci kabelů. Unifikovaný průmyslový konektor pro připojení buňky do systému testbedu je upevněn zezadu v dolním levém rohu.



Obr. 8.1: Zkonstruovaná autonomní buňka Shaker v systému demonstrátoru

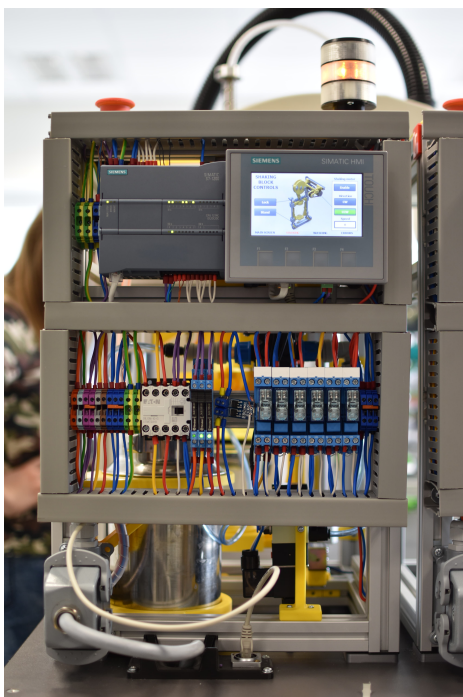
Na profily tvořící horní stranu buňky jsou nainstalovány identifikační pásky a symboly VUT sloužící k rozpoznání Shakeru v rozšířené realitě.

Buňka je opatřena bezpečnostními prvky - signalizačním majákem a tlačítkem pro nouzové vypnutí stroje na horní straně. Všechny ostré hrany jsou zaslepeny plastovými krytkami. Část klikového mechanismu je opatřena krytem, protože přesahuje mimo oblast buňky,

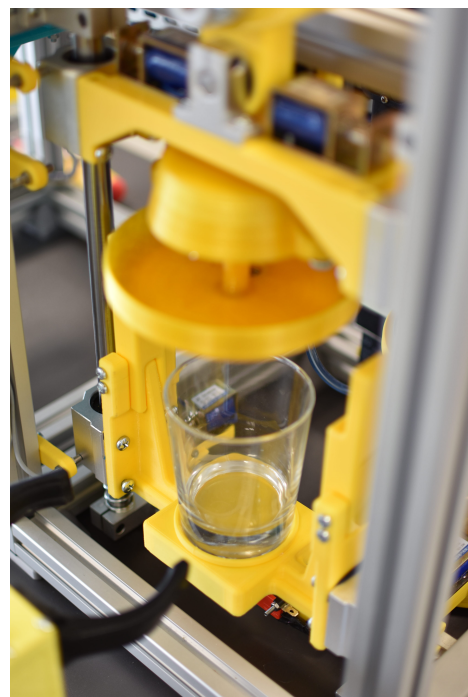
Díky předloze v podobě digitálního modelu je realizace konstrukce přímočará. Všechny specializované díly materializované pomocí 3D tisku fungují a zapadají přesně podle modelu. Jednotlivé funkční celky jsou sestaveny od nosných částí až po pohyblivé komponenty.

8.2 Elektrické zapojení

Po dokončení mechanické konstrukce je buňka zapojena dle elektro dokumentace. Akční členy a senzory jsou připojeny podle schémat k řídicí logice. Důraz je kladen na správu kabelů a vedení. Ty jsou umístěny ve žlabech, opatřeny ochrannými prvky jako řetězy u pohyblivých částí a v místech pájení chráněny smršťovacím materiálem. Elektromagnetické zámky a PWM modul jsou opatřeny diodami proti zpětným proudům.



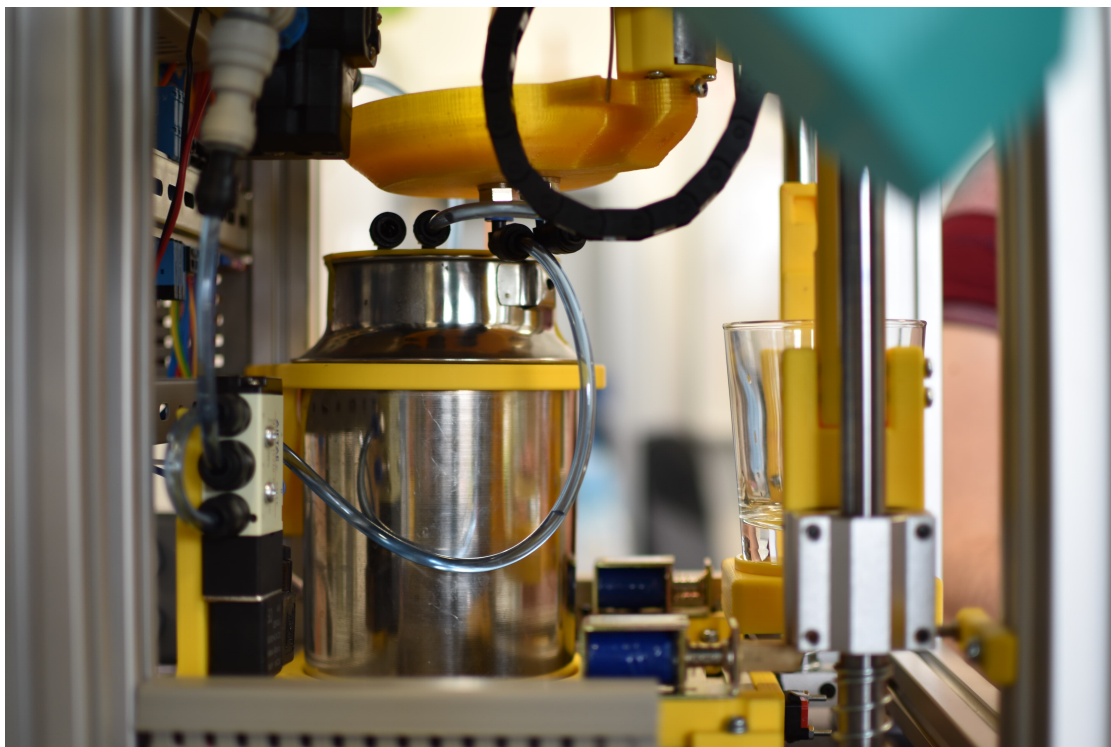
Obr. 8.2: Pohled na zadní stranu buňky



Obr. 8.3: Pohled na ústrojí uchycení sklenice

8.3 Rozvody vody pro omytí

Systém rozvodů vody pro omytí je realizován pomocí pružných hadiček a spojovacích průchodek. Je nainstalován trychtýř pro doplnění vody v tanku. Středobodem je instalované čerpadlo, které žene tlakem vodu z tanku skrz ostříkový člen omývacího talířku. Po omytí víčka je voda odváděna zpět do nádrže.



Obr. 8.4: Pohled na nádrž a rozvody vody

8.4 Programové vybavení

Do řídicí logiky je nahráno popsané programové vybavení. Buňka je schopna autonomního i manuálního řízení a je v rámci možností připravena pro plnou integraci do systému robotického barmana (MES systém barmana není dokončen).

Hlavní smyčka je otestována pro vykonání protřepání sklenice s různými nápoji. Cyklus je univerzální, nezáleží tak, jestli je sklenice prázdná, nebo plná nápoje s ledem. Programové vybavení bylo nejdříve testováno pomocí PLCSim na virtuálním PLC, po ověření správné funkčnosti bylo testování přesunuto na reálný hardware a odladěno pro fungování v reálné soustavě.

9 Závěr

V první kapitole je stanoven cíl této práce - návrh mechanického, elektrického a programového vybavení a realizace buňky Shakeru nápojů pro testbed Průmyslu 4.0. Buňka tvoří část většího celku chytré továrny. Její funkcí je jeden úkon v postupu přípravy míchaných nápojů, konkrétně jejich důkladné protřepání.

Robotický barman slouží k demonstraci a uchopení principů a myšlenek Průmyslu 4.0. Popis a důsledky této iniciativy jsou rozebrány v kapitole druhé. Jednotlivé principy a změny, které čtvrtá průmyslová revoluce přináší, jsou popsány v kontextu samotného testbedu a návrhu buňky v dalších částech práce.

Koncepci a popisu testbedu se věnuje třetí kapitola. Testbed je modulární chytrou továrnou. Všechny jeho části spolu komunikují a zároveň činí svá rozhodnutí při řízení výrobního procesu. Hlavním nositelem informace je produkt, v tomto případě sklenička s RFID čipem obsahujícím recepturu. Jsou popsány jednotlivé autonomní celky testbedu a možnosti komunikace se zákazníkem a operátorem.

Hlavní praktickou částí této práce je samotný návrh a realizace Shakeru. Nejdříve jsou ve čtvrté kapitole definovány požadavky na tuto buňku a stanovena její očekávaná funkce v rámci celku robotického barmana. Samotnému mechanickému návrhu se věnuje kapitola pátá. Zde jsou popsány postupy a nástroje použité při tvorbě digitálního modelu buňky. Pro realizaci buňky jsou kritické specializované díly materializované postupy aditivní výroby. Konstrukce Shakeru se skládá ze dvou funkčních celků pro protřepání nápoje a následné omytí víčka. Návrh a realizace buňky se ubírá cestou, která je typická pro iniciativu Průmysl 4.0. Především důsledně ctí požadavek a nutný předpoklad digitalizace výroby.

Po dokončení mechanického návrhu je v šesté kapitole vypracován návrh elektrického vybavení od výběru aktuátorů, senzorů a řídicí logiky až po tvorbu kompletní elektro dokumentace zachycující jednotlivá zapojení.

Sedmá kapitola se věnuje tvorbě programového vybavení pro navržený hardware. Je zde popsána hierarchie projektu od nízkoúrovňových řídicích bloků až po hlavní supersmyčku. Druhá část této kapitoly popisuje návrh uživatelského rozhraní a vizualizace pro operátorský panel.

Jak probíhal návrh, byla buňka zároveň konstruována. Výsledkem práce je tak reálné zařízení splňující podmínky zadání, které je plnohodnotnou součástí kyberfyzického systému robotického barmana. V projektu byly použity některé z hlavních driverů současné éry Průmysl 4.0, zejména virtuální prototypování, aditivní výroba, chytrý produkt a modulární uspořádání výrobního zařízení.

Literatura

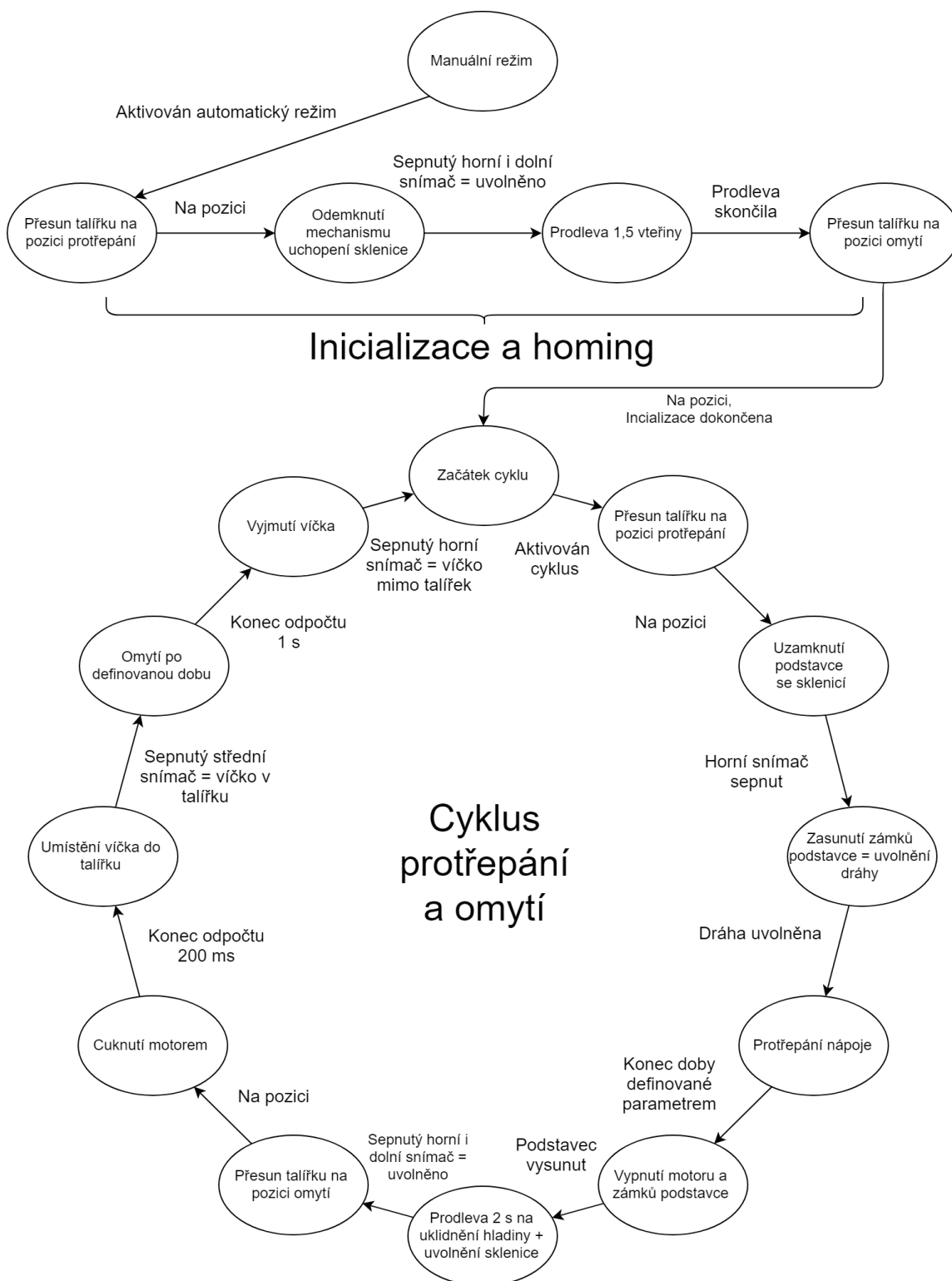
- [1] MAŘÍK V.: *Národní iniciativa Průmysl 4.0* [online]. Praha, 2016 [cit. 12.03.2019]. Dostupné z URL: <<http://kzps.cz/wp-content/uploads/2016/02/kzps-cr.pdf>>
- [2] KACZMARCZYK V.: *An Industry 4.0 Testbed (Self-Acting Barman): Principles and Design*. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018 [cit. 23.11.2018]. Dostupné z URL: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318309108>>
- [3] KOLEKTIV AUTORŮ: *Digital twin-driven product design framework* [online]. 2018 [cit. 12.03.2019]. Dostupné z URL: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2018.1443229>>
- [4] PAPST. *BCI-Motors* [online]. 2012 [cit. 23.11.2018]. Dostupné z URL: <https://www.ebmpapst.com/media/content/products_1/downloads_9/bci_kampagne/BCI_motors_GB.pdf>
- [5] IFM ELECTRONIC. *IY5049 Inductive sensor* [online]. 2003 [cit. 25.11.2018]. Dostupné z URL: <<https://www.ifm.com/cz/en/product/IY5049?tab=documents>>
- [6] SIEMENS. *SIMATIC S7-1200 Programmable controller* [online]. 2012 [cit. 06.05.2019]. Dostupné z URL: <https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att_106119/v1/s71200_system_manual_en-US_en-US.pdf>
- [7] SIEMENS. *HMI device KTP400 Basic, KTP600Basic, KTP1000 Basic, TP1500 Basic* [online]. 2008 [cit. 06.05.2019]. Dostupné z URL: <https://www.automatyka.siemens.pl/docs/docs_ia/HMI_KTP400_KTP600_KTP1000_TP1500.pdf>
- [8] LINKSYS. *5-Port 10/100 Switch* [online]. 2003 [cit. 06.05.2019]. Dostupné z URL: <<https://images10.newegg.com/UploadFilesForNewegg/itemintelligence/Linksys/33-124-016/SD205.pdf>>
- [9] SIEMENS. *TIA Portal - iPDF* [online]. 2018 [cit. 06.05.2019]. Dostupné z URL: <<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public.1541488850.0c66eeeb-b67d-4c98-aa0d-290f82d5c0d2.7801-09-tia-p-ipdf-en-181029-1.pdf>>

- [10] KACZMARCZYK V., BENEŠL T., PÁSEK J.: *Automatizace procesů - Návody do laboratorních cvičení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2019 [cit. 13.05.2019].
- [11] PÁSEK J.: *Automatizace procesů III - Průmysl 4.0*. Učební text VUT, FEKT, Brno 2019 [cit. 13.05.2019].

Seznam příloh

A Stavový diagram hlavního programu	62
B Obsah přiloženého CD	63
B.1 Elektro dokumentace	63
B.2 Programové vybavení	63
B.3 Virtuální model	63

A Stavový diagram hlavního programu



Obr. A.1: Stavový diagram hlavního programu

B Obsah přiloženého CD

Přiložené CD obsahuje veškerou dokumentaci, která byla k projektu vytvořena. Je zde uložen návrh mechanické konstrukce ve formě 3D modelu, kompletní elektro dokumentace a programové vybavení buňky. Nosič také obsahuje tento text bakalářské práce.

Důležité soubory uložené na nosiči jsou:

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── elektro_dokumentace ..... WSCAD projekt elektro dokumentaci buňky
│   ├── PrjData.wsPRJ ..... Soubor pro spuštění projektu elektro dokumentace
│   └── Export
│       └── shaker_elektro_dokumentace.pdf Elektro dokumentace ve formátu PDF
├── programove_vybaveni ..... TIA Portal projekt programového vybavení buňky
│   └── Shaker.ap14 ..... Soubor pro spuštění projektu programového vybavení
├── virtualni_model ..... NX 12 projekt virtuálního model buňky
│   └── cell_shaker_assembly.prt... Soubor pro spuštění 3D modelu sestavy buňky
├── bakalarska_prace.pdf ..... Soubor této bakalářské práce
└── readme.txt ..... soubor s popisem obsahu CD
```

B.1 Elektro dokumentace

Pro otevření projektu elektro dokumentace je nutný nainstalovaný WSCAD SUITE ve verzi 2018 nebo vyšší. Ve složce Export je uložena vypracovaná dokumentace ve formátu PDF.

B.2 Programové vybavení

Projekt programového vybavení byl vypracován v TIA Portal v14 Service Pack 1 Update 7. Pro otevření projektu je nutná instalace kompatibilní verze tohoto prostředí.

B.3 Virtuální model

Návrh mechanického vybavení a výsledný virtuální model jsou uloženy v projektu pro prostředí Siemens NX ve verzi 12.0.

Pro načtení všech součástí sestavy je nejprve potřeba přidat adresář `virtualni_model` do vyhledávaných složek v nabídce „Možnosti načtení sestavy“ na úvodní obrazovce po spuštění NX.