



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Možnosti snížení spotřeby elektrické energie průmyslových robotů

Possibilities to reduce the power consumption of industrial robots

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Králík, Ph.D.
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Specializace: Elektrotechnika a management

Klára Zinková
Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zinková** Jméno: **Klára** Osobní číslo: **492034**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Možnosti snížení spotřeby elektrické energie průmyslových robotů

Název bakalářské práce anglicky:

Possibilities to reduce the power consumption of industrial robots

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište a charakterizujte průmyslově využívané roboty
- 2) Popište a analyzujte možnosti snížení (optimalizace) spotřeby elektrické energie průmyslových robotů
- 3) Na konkrétním robotu ověřte identifikovaný způsob snížení spotřeby elektrické energie
- 4) Proveďte technicko-ekonomické vyhodnocení identifikované varianty

Seznam doporučené literatury:

- 1) ROSS, Larry T., Stephen W. FARDO a Michael F. WALACH. Industrial robotics fundamentals: theory and applications. Third edition. Tinley Park, IL: The Goodheart-Willcox Company, Inc, 2018
- 2) KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Králík, Ph.D. katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **02.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Tomáš Králík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne

.....

Klára Zinková

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu své bakalářské práce Ing. Tomáši Králíkovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad, komentářů a doporučení.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá analýzou snížení spotřeby elektrické energie průmyslových robotů. V první části je popsána spotřeba elektrické energie v průmyslových segmentech a dále provedena rešerše o počtech průmyslových robotů v jednotlivých odvětvích. V dalších částech jsou charakterizovány průmyslové roboty a nastíněny možná řešení pro snížení jejich spotřeby. Vybrané řešení v podobě přepínání robotů do úsporných módů je ověřeno na reálných robotech. V závěru práce je vyhodnocena možná úspora elektrické energie a dále provedeno ekonomické vyhodnocení investice do softwaru pro aktivaci úsporných módů na výrobní lince s průmyslovými roboty.

Klíčová slova

Průmyslový robot, průmysl, spotřeba, elektrická energie, úspory energie, úsporné módy

Abstract

The bachelor thesis is focused on the analysis of reducing the electric power consumption of industrial robots. The first part describes the electric power consumption in industrial sectors and research on the number of industrial robots in various industries is conducted. Subsequent sections characterize industrial robots and describe solutions for reducing their electric power consumption. The selected solution, switching robots to energy-saving modes, is validated on the real robots. In the conclusion of the thesis, the energy saving potential is evaluated, followed by an economic assessment of investing in software to activate energy saving modes on a production line with industrial robots.

Key words

Industrial robot, industry, consumption, electric power, energy saving, energy-saving modes.

Obsah

1.	Úvod.....	14
2.	Průmysl ČR a spotřeba elektrické energie	15
	2.1 Současný stav spotřeby elektrické energie průmyslu	16
	2.2 Motivace úspor elektrické energie.....	18
	2.3 Průmyslová odvětví s průmyslovými roboty	19
	2.4 Vývoj spotřeby elektrické energie v odvětvích využívajících průmyslové roboty.....	21
3.	Průmyslové roboty	23
	3.1.1 Definice průmyslových robotů	23
	3.1.2 Části průmyslového robota.....	23
	3.1.3 Typy průmyslových robotů.....	24
	3.1.3.1 Počet pohyblivých kloubů	24
	3.1.3.2 Druh kinematické struktury	24
	3.1.4 Využití průmyslových robotů	25
4.	Snížení spotřeby el. energie robotů.....	26
	4.1 Hardwarová řešení	26
	4.2 Softwarová řešení	27
	4.2.1 Úspory během pauz výroby	27
6.	Úsporné módy průmyslových robotů.....	29
	6.1 Technologie úsporných módů.....	29
	6.1.1 Základní komponenty a funkce	29
	6.1.2 Doba trvání úsporného módů.....	29
	6.2 Energetické stavy průmyslových robotů.....	30
	6.3 Úsporné módy na měřených robotech	30
7.	Snížení spotřeby průmyslových robotů.....	33
	7.1 Měřené průmyslové roboty.....	33
	7.2 Měření výkonu během úsporných módů	34
	7.2.1 Měření energetických stavů robota.....	35
	7.2.2 Měření využitelných úsporných módů	37
8.	Úspory elektrické energie	41
	8.1 Velmi krátké pauzy.....	42
	8.1.1 Sekundové pauzy	42
	8.1.2 Minutové pauzy	43
	8.2 Krátké pauzy.....	44
	8.3 Dlouhé pauzy.....	45
	8.4 Potenciál maximálních úspor.....	46

8.5 Úspory na výrobní lince.....	49
8.6 Úspory v průmyslu ČR.....	50
9. Ekonomické vyhodnocení.....	52
9.1 Popis investice.....	52
9.2 Metody zhodnocení investice.....	52
9.2.1 NPV.....	52
9.2.2 IRR.....	53
9.2.3 Reálná doba návratnosti.....	53
9.3 Vstupní parametry.....	53
9.3.1 Výdaje.....	53
9.3.1.1 Investiční výdaje.....	53
9.3.1.2 Výdaje na provoz.....	54
9.3.2 Úspory za elektrickou energii.....	55
9.3.3 Životnost projektu.....	56
9.3.4 Diskont.....	56
9.3.5 Shrnutí vstupních parametrů.....	56
9.4 Vyhodnocení ekonomické analýzy.....	57
9.5 Citlivostní analýza a možné scénáře projektu.....	57
9.5.1 Citlivostní analýza.....	57
9.5.1.1 Meziroční změna ceny elektřiny.....	57
9.5.1.2 Změna diskontu.....	58
9.5.1.3 Změna ceny softwaru.....	58
9.5.2 Scénář projektu s investicí do PLC.....	59
9.5.3 Scénář projektu s prací servisního technika.....	59
9.6 Ekonomická analýza obecné výrobní linky.....	60
9.6.1 Shrnutí ekonomické analýzy pro obecnou výrobní linku.....	61
10. Závěr.....	63
Seznam použitých zkratk.....	65
Seznam použité literatury.....	66
Seznam grafů.....	70
Seznam tabulek.....	71
Seznam obrázků.....	72
Seznam příloh.....	73

1. Úvod

Průmyslové roboty jsou nedílnou součástí průmyslové výroby. Kromě manipulace jsou dnes díky pokročilým technologiím schopny provádět i složitější úkony, jako je montáž dílů, svařování nebo obsluha CNC strojů. Díky takto všestrannému využití se předpokládá, že jejich význam v budoucnosti ještě poroste.

S nárůstem cen elektrické energie v posledním letech se všechna odvětví začala intenzivněji zabývat otázkou úspor energie. Úsporná opatření se rychle stala důležitým tématem i v průmyslovém prostředí. A právě v tomto kontextu nabízí průmyslové roboty velký potenciál, Jelikož jsou roboty sami o sobě spotřebiče elektrické energie, snížení jejich energetické náročnosti by mohlo přinést úspory energie do všech oblastí od jednotlivých výrobních linek až po celý průmyslový sektor. Právě snížení spotřeby elektrické energie průmyslových robotů bude náplní této bakalářské práce.

Úvodní část práce se podrobněji zaměří na opodstatnění významu úspor průmyslových robotů. Začneme rozborem průmyslu České republiky a spotřeby elektrické energie. Dále provedeme analýzu nasazených robotů v různých odvětvích průmyslu, což nám umožní identifikovat oblasti, ve kterých jsou průmyslové roboty nejčastěji nasazovány a která odvětví představují potenciál pro energetické úspory. V další kapitole se budeme detailně zabývat samotnými průmyslovými roboty včetně jejich konstrukce a využití.

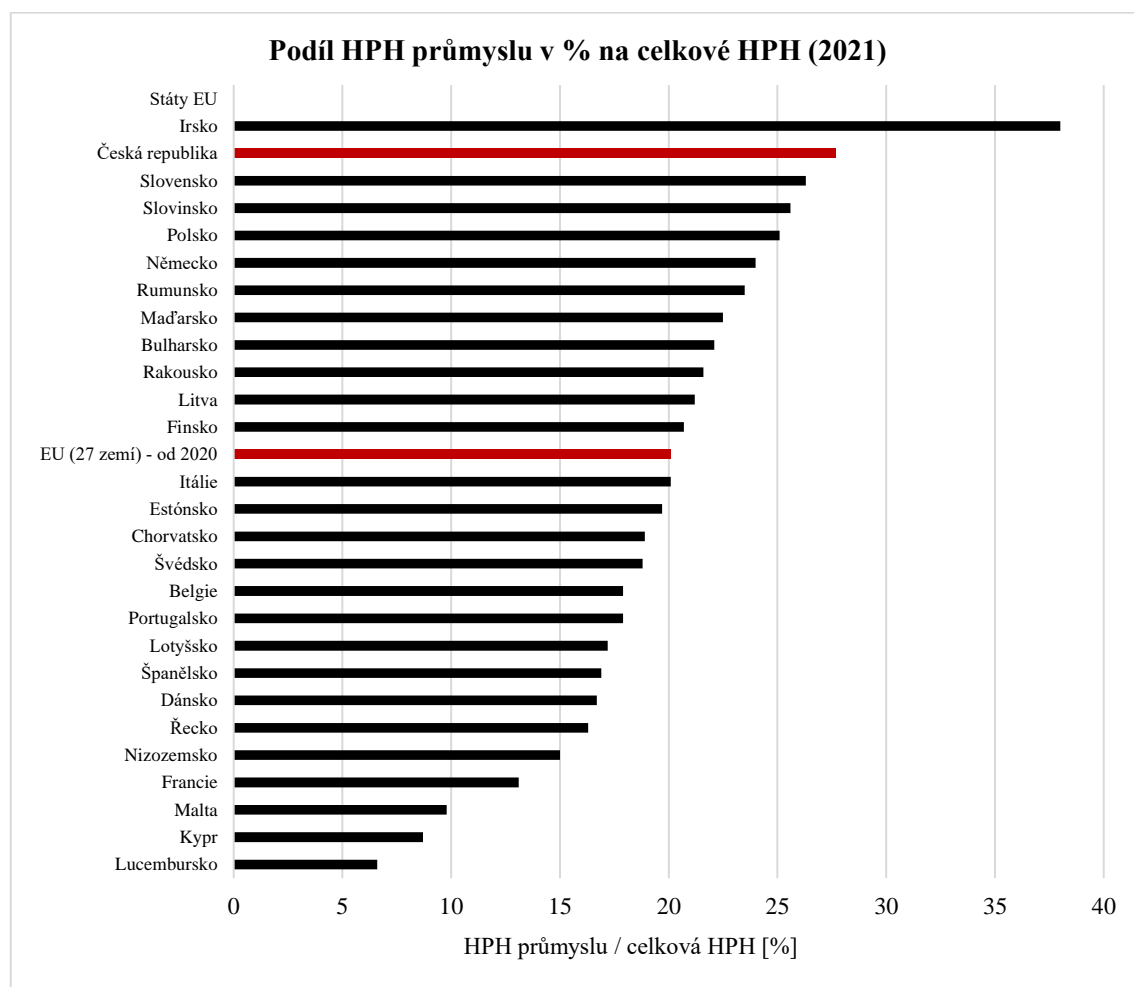
Následující části práce budou již zaměřeny na možnosti úspor průmyslových robotů. Vybraný způsob úspory energie bude ověřen na dvou konkrétních průmyslových robotech. V neposlední řadě také vypočteme, kolik energie by bylo implementací daného řešení možno uspořit. Na samotném konci práce se budeme věnovat ekonomickému vyhodnocení investice do vybraného řešení na konkrétní výrobní lince.

Hlavním cílem této bakalářské práce je tedy nalezení vhodného řešení pro snížení spotřeby elektrické energie průmyslových robotů a praktické zhodnocení tohoto řešení.

2. Průmysl ČR a spotřeba elektrické energie

Česká republika (ČR) je dlouhodobě jedna z neprůmyslovojších zemí Evropské unie (EU) a průmysl je důležitou částí národní ekonomiky. Samotný segment průmyslu je nutné nejdříve řádně definovat, aby bylo jasné, co do něj řadíme a bylo možné vyhodnocovat průmyslová data a statistiky. V EU je pro členské státy povinné používat Klasifikaci ekonomických činností (NACE), která dělí všechny ekonomické činnosti do skupin. Díky tomu lze porovnávat statistiky týkající se průmyslu České republiky se statistikami ostatních zemí EU. Průmyslem či průmyslovou výrobou tedy dle CZ-NACE rozumíme následující oblasti: těžba a dobývání, zpracovatelský průmysl, výroba a rozvod elektřiny, plynu, tepla a klimatizovaného vzduchu a zásobování vodou; činnosti související s odpady a sanacemi. [1, 2]

Sektor průmyslu patří mezi energeticky náročné sekce hospodářství. V zemích orientovaných na průmysl je třeba hledat cesty, jak jeho energetickou náročnost snížit. Optimalizace spotřeby energií v průmyslu může vést jednak k ekonomickým úsporám, dále k větší energetické soběstačnosti země a v neposlední řadě k zmírnění negativních dopadů na životní prostředí. Jak je velké zastoupení průmyslu v ekonomice jednotlivých zemí EU zobrazuje graf 2.1, na kterém lze vidět procentuální podíl hrubé přidané hodnoty (HPH) průmyslu na celkové HPH daného státu v roce 2021.



Graf 2.1 - Podíl HPH průmyslu v % na celkové HPH (2021), vlastní zpracování dle [3].

Hrubá přidaná hodnota vyjadřuje hodnotu nově vytvořenou ekonomickým subjektem, tedy hodnotu, kterou ekonomický subjekt vytvořil nad rámec vstupních nákladů. HPH vypočítáme jako rozdíl mezi produkcí a mezipotřebou [4]. Pokud sečteme hrubou přidanou hodnotu všech ekonomických jednotek v daném sektoru hospodářství (například v průmyslu) dostaneme celkovou HPH tohoto sektoru. Porovnáním HPH daného sektoru s HPH celé země zjistíme, jak je daný sektor v zemi významný. Do HPH nejsou zahrnuty daně ani dotace na produkty, což nám umožňuje porovnat důležitost vybraného sektoru napříč státy bez ohledu na různá zdanění [5]. Graf 2.1 porovnává země podle zastoupení průmyslu v celkové HPH země a řadí tedy země od nejprůmyslovějších k méně průmyslovým. ČR byla v roce 2021 druhou neprůmyslovější zemí EU, v letech 1995 až 2020 se vždy umístila nejhůře na třetím místě, což dokazuje klíčový význam tohoto odvětví.

Úspory energie ve všech sektorech národního hospodářství jsou v ČR dle Státní energetické koncepce jedna ze strategických priorit do roku 2040 [6]. Vzhledem k zastoupení průmyslu v české ekonomice je třeba hledat možnosti, jak právě zde spotřebu energie snížit.

V průmyslu se spotřebovávají různé zdroje energie, zemní plyn, kapalná paliva, tuhá paliva, obnovitelné zdroje a biopaliva, nakoupené teplo a dále elektrická energie. My se nadále zaměříme na spotřebu elektrické energie a možnosti, jak elektrickou energii uspořit.

2.1 Současný stav spotřeby elektrické energie průmyslu

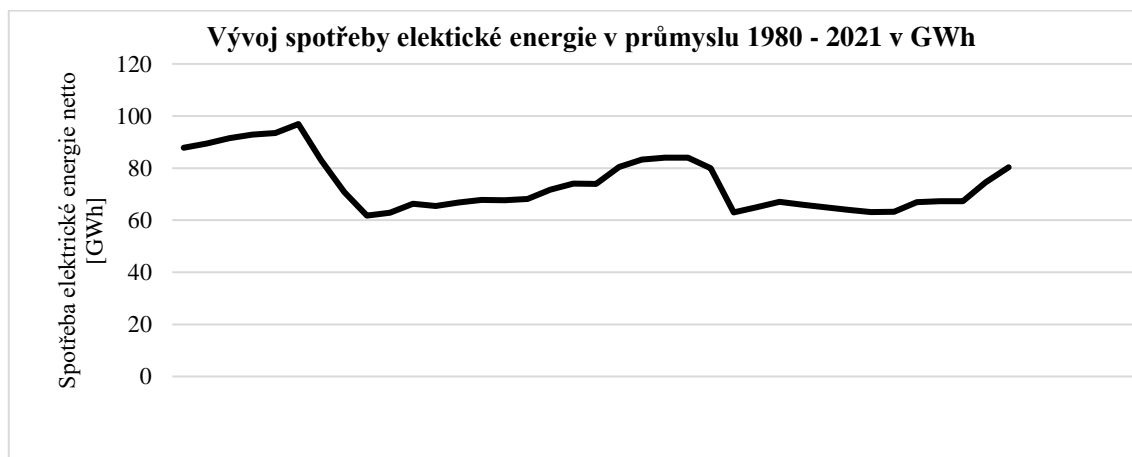
V úvodu této kapitoly byla uvedena definice průmyslu, podle které je do něj kromě zpracovatelského průmyslu zařazena těžba a dobývání surovin, činnosti týkající se energetiky a činností souvisejících s odpady. Při analyzování spotřeby elektrické energie průmyslu budeme vycházet především z dat a statistik od Energetického regulačního úřadu (ERÚ). V těchto datech a statistikách je průmysl pojat v užším smyslu. Jsou do něj zařazené pouze následující činnosti:

- zpracovatelský průmysl s výjimkou: výroby koksu a rafinovaných ropných produktů, opravy a instalací strojů a zařízení,
- těžba a dobývání železných rud,
- podpůrné služby při těžbě a dobývání všech surovin kromě ropy a zemního plynu.

Abychom mohli informace o spotřebě elektrické energie využít, budeme nadále do průmyslu řadit pouze výše uvedené činnosti. [7]

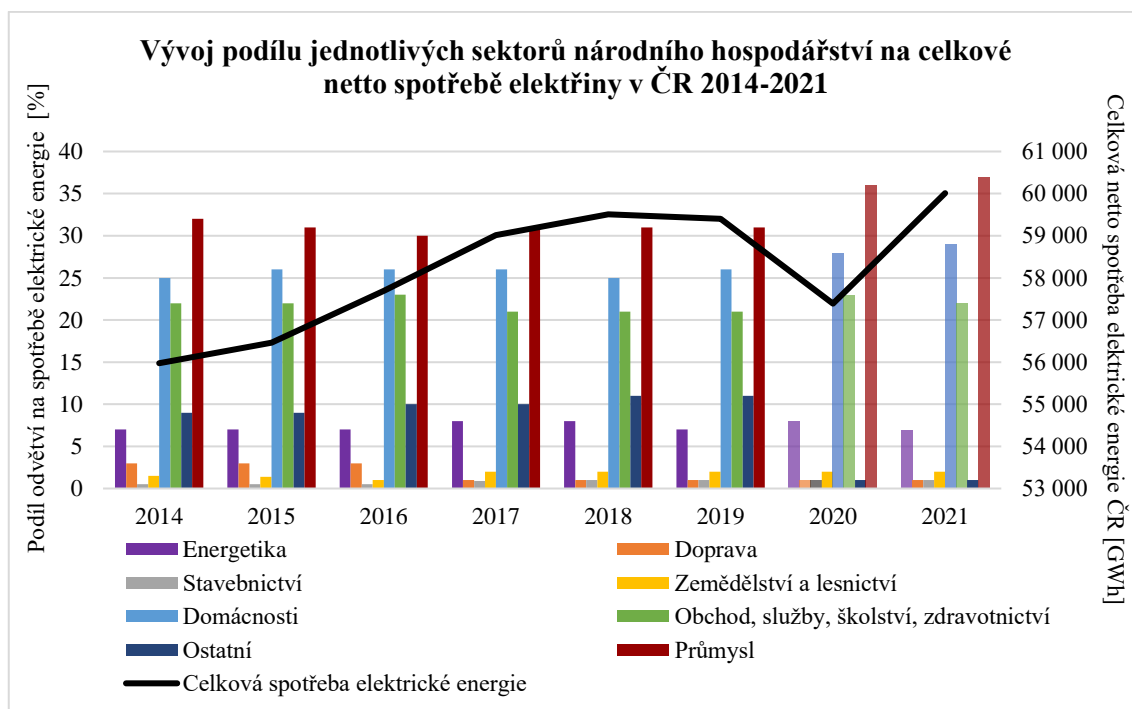
Spotřeba elektrické energie průmyslu ČR se během let mění v závislosti na ekonomických a politických faktorech. Jak ukazuje graf 2.2, od roku 1980 do roku 1990 netto spotřeba elektrické energie průmyslu téměř stále rostla. Po změně politického uspořádání v roce 1989 spotřeba prudce klesala, jelikož došlo k odklonu od těžkého průmyslu a přechodu z centrálně plánované ekonomiky na tržní hospodářství. Po roce 1993 rostla spotřeba elektrické energie až k roku 2007. V roce 2008 dopadla na průmysl ekonomická krize, snížila se produkce průmyslu a tím i spotřeba elektrické energie [8]. V posledních dvou letech (2020-2021) došlo v údajích o spotřebě elektrické energie od ERÚ k přerozdělení aktivit patřících do jednotlivých sektorů hospodářství. Do průmyslu od roku 2020 nejsou zařazeny stejné ekonomické činnosti jako v roce 2019 a předchozích letech, proto nelze spotřebu mezi roky 2019 a 2020 porovnat [9]. Tuto skutečnost zobrazuje i graf 2.2, kde je spotřeba od roku 1980 do roku 2019 vyznačena plnou čarou a spotřeba mezi roky 2020 a 2021 přerušovanou čarou. Srovnat mezi sebou lze spotřebu v roce 2021 a 2020, kdy má spotřeba jasně rostoucí tendenci. Tento růst je způsoben navýšením průmyslové výroby po koronavirové krizi, během které musely některé podniky částečně pozastavit provoz [10]. Vyšší výroba vedla i k vyšší spotřebě elektrické energie. V roce 2020 dosáhla spotřeba

v průmyslu 20.7 TWh a tvořila tak 36 % celkové netto spotřeby elektrické energie v České republice [9]. V roce 2021 stoupla na 22,3 TWh, což je 37 % celkové netto spotřeby v tomto roce [11].



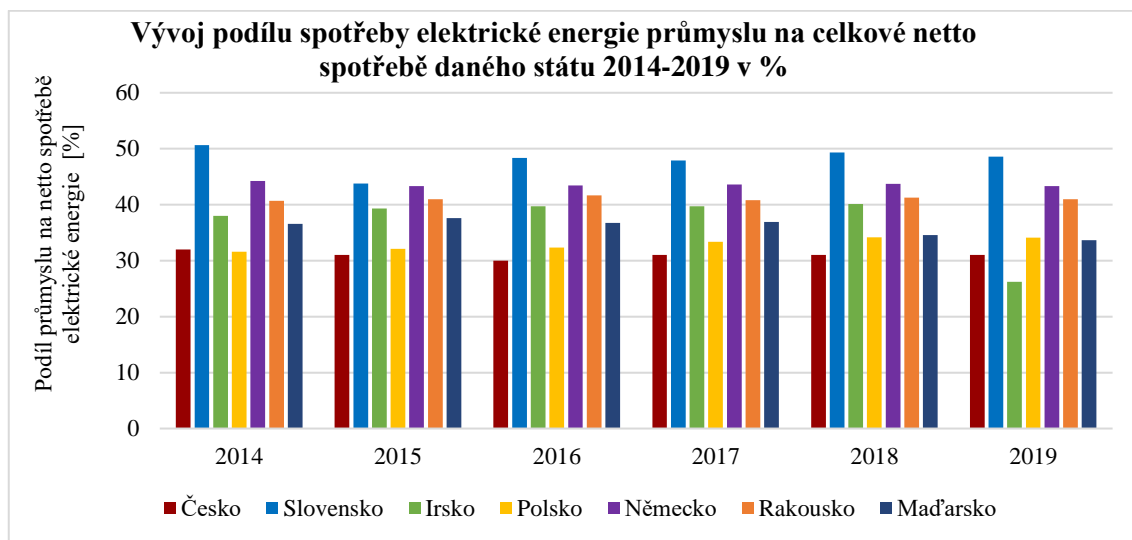
Graf 2.2 - Vývoj spotřeby elektrické energie v průmyslu 1971-2021 v GWh, vlastní zprac. dle [12, 13].

Kromě absolutních hodnot spotřeby elektrické energie průmyslu se podíváme i na srovnání spotřeby průmyslu s ostatními sektory hospodářství. Jak velkou část netto spotřeby elektrické energie tvořil průmysl během posledních let uvádí graf 2.3, kde jsou uvedeny podíly jednotlivých sektorů na celkové netto spotřebě elektrické energie ČR. Ze stejného důvodu jako u grafu 2.2 není možné porovnat údaje před a po roce 2019. Z grafu vidíme, že od roku 2014 do roku 2019 je průmysl největším spotřebitelem elektrické energie, dále následují domácnosti a sektor obchodu, služeb, školství a zdravotnictví. Podobné je to i v letech 2020 až 2021. V tomto období podíl průmyslu na spotřebě jen mírně stoupl. Celkově můžeme usoudit, že průmysl spotřebuje každoročně přibližně třetinu elektrické energie v České republice.



Graf 2.3 - Vývoj podílu sektorů hospodářství na celkové netto spotřebě elektřiny ČR 2014-2021, vlastní zprac. dle dat z [13].

Pro doplnění informací o spotřebě průmyslu je níže na grafu 2.4 prezentováno srovnání průmyslu ČR v evropském kontextu. Porovnávány země, Slovensko, Irsko, Polsko, Německo, Rakousko a Maďarsko, se vyznačují významnou rolí průmyslu v rámci jejich ekonomiky. Z grafu vidíme, že ve většině zemí tvoří spotřeba elektrické energie průmyslu během období od roku 2014 do 2019 větší část národní spotřeby než v České republice. Pouze v roce 2019 tvořil průmysl v Irsku menší část spotřeby. To může být způsobeno rozdílnou strukturou průmyslu a s ní související energetickou náročností, či možnou vyšší efektivitou využívání energie.



Graf 2.4 - Vývoj podílu spotřeby elektrické energie průmyslu na celkové spotřebě v zemích EU 2014-2019, vlastní zprac. dle dat z [13–19].

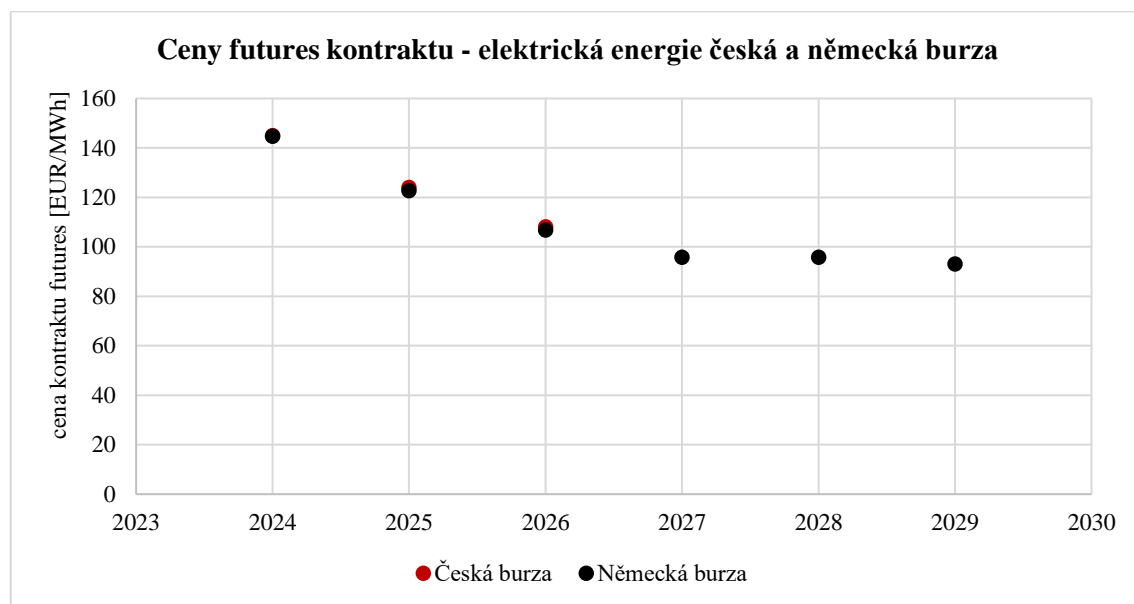
2.2 Motivace úspor elektrické energie

Na otázku, proč hledat možnosti úspor elektrické energie v průmyslu, najdeme více odpovědí. Motivací k úsporám elektrické energie mohou být nižší náklady za spotřebu elektrické energie. Tato motivace je důležitá pro průmyslové podniky. Úspory za energie jsou pro ně často klíčové, jelikož se v posledních dvou letech ceny energií výrazně zvýšily. Velkoobchodní cena za dodávku elektrické energie pro základní zatížení (base load) na německé burze European Energy Exchange (EEX) pro roční kontrakty futures byla před a na počátku roku 2021 přibližně 50 euro (EUR)/MWh, do konce roku se zvýšila až na 400 EUR/MWh. V roce 2022 rostla cena vzhůru k nejvyšší ceně 670 EUR/MWh, poté klesala s několika výkyvy v září a prosinci roku 2022. Nyní (květen 2023) se cena stabilizovala na 100 EUR/MWh [20]. Zvyšování cen na energetických burzách vede i k vyšším cenám za elektrickou energii pro průmyslové podniky. Již před energetickou krizí existovala snaha o efektivnější využívání energie, nicméně růst cen ještě více urychlil hledání a aplikování úsporných opatření.

K zmíněnému růstu ceny elektrické energie začalo docházet v druhé polovině roku 2021 z několika důvodů. Nejdříve se zvýšila poptávka po elektrické energii v důsledku znovuotevření pracovišť, škol a průmyslových provozů po pandemii nemoci COVID-19. Dále vzrostla cena zemního plynu, který jakožto závěrný zdroj pro výrobu elektrické energie, určuje její cenu na burze. Cena ročního futures kontraktu na dodávku zemního plynu vzrostla během roku 2021 na burze z 17 EUR/MWh až na 141 EUR/MWh [21]. Růst ceny zemního plynu byl způsoben růstem poptávky po zimě roku 2020. Tato zima byla velmi chladná a zásobníky zemního plynu v ČR v dalších státech EU byly vyprázdněny. Bylo třeba je naplnit, nicméně došlo k zpomalení dodávek zemního plynu do Evropy z Ruska. Zemního plynu tedy nebylo dostatek, což zvyšovalo

jeho cenu na burze. Na počátku roku 2022 cena plynu sice klesla, ale následné napadení Ukrajiny Ruskem vyhnalo ceny znovu vzhůru. EU se rozhodla pozastavit dodávky zemního plynu z Ruska do členských států, což ještě zvýšilo cenu. Nejvyšší cena zemního plynu se během roku 2022 dostala na 318 EUR/MWh a v roce 2023 klesala až k aktuální ceně okolo 60 EUR/MWh [21].

Jak se bude cena elektrické energie vyvíjet můžeme odhadnout pomocí cen aktuálně obchodovaných futures kontraktů na burze. Graf 2.5 zobrazuje ceny ročních futures kontraktů na elektrickou energii s dodáním v letech 2024 až 2029. Vidíme, že odhadovaná cena elektrické energie bude klesat od roku 2024 na české i německé burze z 144 EUR/MWh na přibližně 100 EUR/MWh [20].



Graf 2.5 – Ceny ročního futures kontraktu pro base load- elektrická energie česká a německá burza, vlastní zprac. dle [20].

I přes odhadovaný pokles cen elektrické energie podle grafu 2.5, bude cena v následujících letech vyšší než před rokem 2021. Úspory elektrické energie mají tedy pro průmyslové podniky význam nyní a budou významné i do dalších let.

Důvody k úsporám elektrické energie jsou i na straně ČR a dále EU. Pro ČR jsou motivací k úsporám nejen ceny elektrické energie, ale i cíle EU týkající se snížení spotřeby fosilních paliv a následně snížení emisí skleníkových plynů. Ať už jsou motivace k úsporám elektrické energie podniků a států jakékoliv, celá problematika je provázaná a komplexní. Podniky se snaží co nejvíce snížit náklady a najít ekonomicky nevýhodnější řešení, do toho může stát zasáhnout daněmi či regulacemi nebo naopak dotací aktivit, které chce podpořit.

2.3 Průmyslová odvětví s průmyslovými roboty

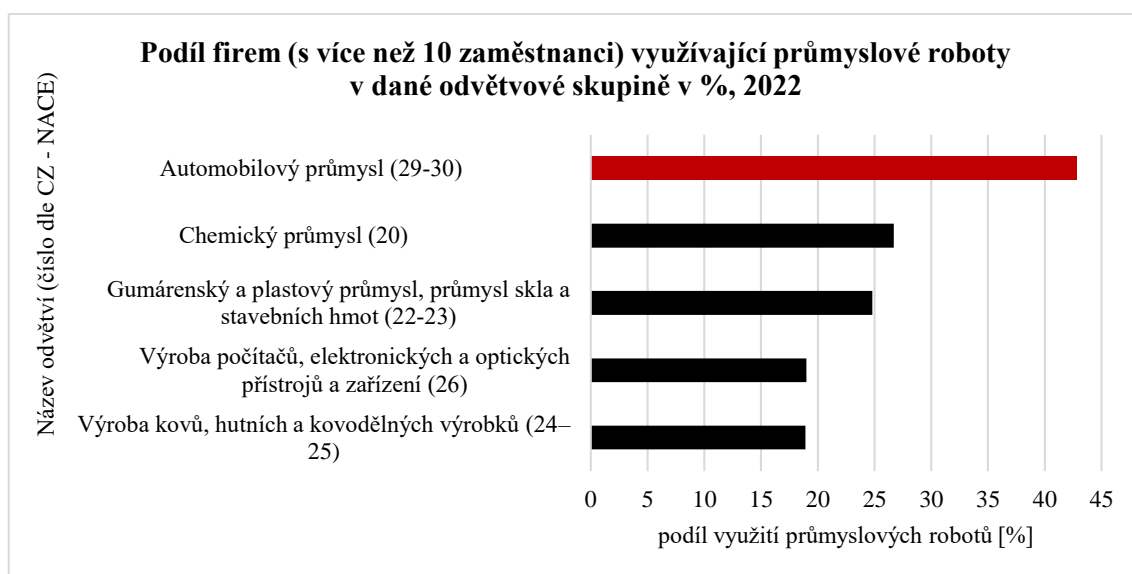
V průmyslových odvětvích se k zvýšení produktivity a flexibility výroby používají průmyslové roboty. Jejich definice a použití je uvedeno v kapitole 3. Průmyslové roboty jsou spotřebiče elektrické energie a optimalizací jejich spotřeby lze část energie ušetřit a snížit tak cenu za jejich provoz. Nyní se zaměříme na celkovou spotřebu elektrické energie v odvětvích průmyslu ČR, kde je použití průmyslových robotů nejvýznamnější a firmy je do své výroby pořízují nejčastěji. V těchto odvětvích je největší potenciál úspor elektrické energie

prostřednictvím optimalizace spotřeby robotů. Jak velkou část spotřeby energie lze uspořit bude ověřeno dále v práci.

Celosvětově jsou roboty nejčastěji využívány ve zpracovatelském průmyslu. Nejnovější data o celkovém počtu průmyslových robotů ve zpracovatelském průmyslu jsou z roku 2021, zde má ČR 168 robotů na 10 000 zaměstnanců [22]. Více robotů má 8 zemí EU, například Německo, Švédsko, Slovinsko a Dánsko. Státy, které mají více robotů na 10 000 zaměstnanců, mají ve většině případů vyšší ekonomickou úroveň z hlediska hrubého domácího produktu (HDP) na obyvatele z roku 2021 [23]. Pouze Španělsko a Slovinsko mají HDP na obyvatele nižší než ČR. Zajímavá situace je u Slovinska, které vzhledem k ekonomické úrovni využívá velký počet průmyslových robotů ve zpracovatelském průmyslu, konkrétně 249 robotů na 10 000 zaměstnanců [22]. To je nejvíce hned po Německu a Švédsku s 397 a 321 roboty.

V ČR se celkový rozsah nasazení průmyslových robotů do výroby v roce 2021 zvýšil trojnásobně oproti roku 2010 [24]. V roce 2022 průmyslové roboty používalo v ČR 5.7 % firem ve všech odvětvích krom zemědělství, lesnictví, rybářství a těžby a dobývání. Konkrétní informace o firmách v ČR využívající průmyslové roboty jsou dostupná z roku 2020 od Českého statistického úřadu (ČSÚ) a z roku 2022 od Evropského statistického úřadu (Eurostat). V datech od Eurostatu jsou dostupné informace o počtu robotů, které dané podniky využívají, v datech od ČSÚ tato informace není. Proto využijeme dat od Eurostatu a podíváme se, ve kterém odvětví je nejvíce podniků s průmyslovými roboty a ve kterém odvětví je nejvíce podniků, které průmyslové roboty využívají ve větším měřítku.

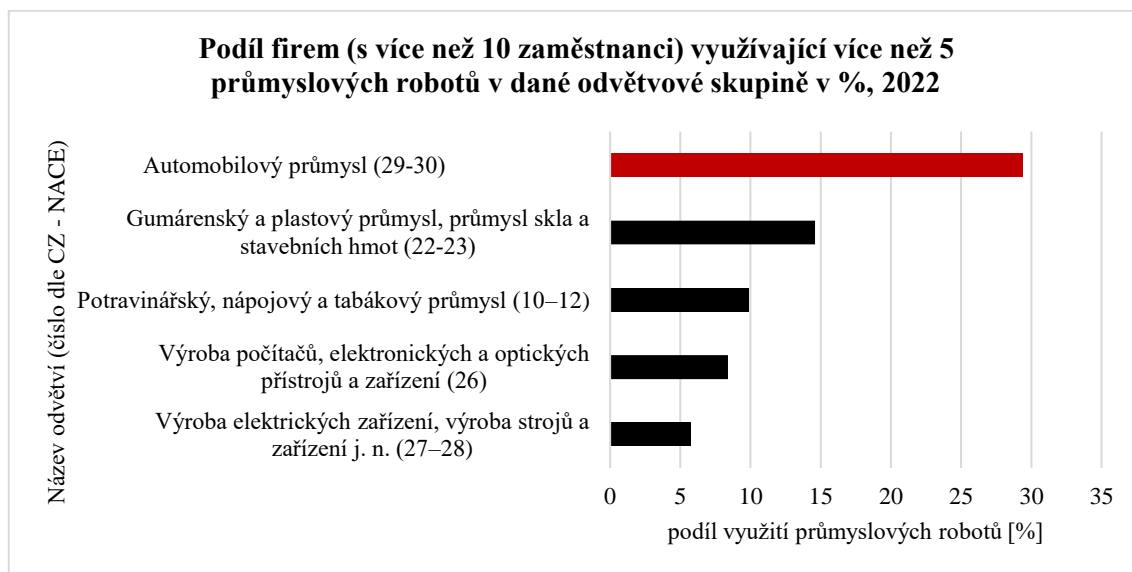
Z hlediska odvětví se průmyslové roboty v roce 2022 (údaj k prosinci 2022) naprosto nejčastěji vyskytují v automobilovém průmyslu dohromady s průmyslem výroby ostatních dopravních prostředků. Průmyslové roboty zde používá 42.8 % podniků. Dále následuje průmysl chemický, gumárenský a plastový, výroba skla a stavebních hmot, kde má průmyslové roboty necelá třetina podniků. Automobilový průmysl má tedy v robotizaci velkou převahu. Procentuální zastoupení firem s průmyslovými roboty zobrazuje graf 2.6. V datech k tomuto grafu jsou do firem zahrnuty všechny, které používají průmyslové roboty bez ohledu na jejich počet.



Graf 2.6 - Podíl firem využívajících průmyslové roboty - 2022, vlastní zprac. dle [25].

Abychom získali lepší představu o využití průmyslových robotů, podíváme se, ve kterém odvětví se vyskytuje nejvíce podniků, které používají průmyslových robotů pět a více. Graf 2.7

ukazuje podíl firem v daném odvětví s více než pěti průmyslovými roboty. Na prvním místě je opět automobilový průmysl, pět a více průmyslových robotů má zde 29.4 % podniků [25].



Graf 2.7 - Podíl firem využívající více než pět průmyslových robotů 2022, vlastní zpracování dle [25].

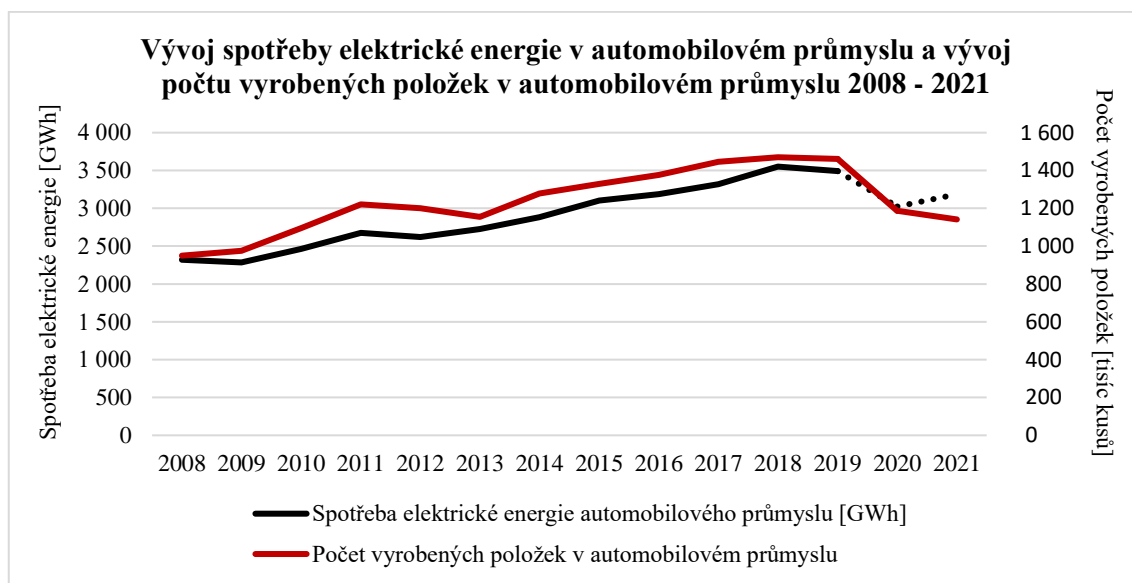
Z grafu 2.6 a 2.7 můžeme usoudit, že jsou v ČR průmyslové roboty nejvýznamnější v automobilovém průmyslu. Přesný počet průmyslových robotů v automobilovém průmyslu nelze dohledat. Výrobci a prodejci robotů nezveřejňují podrobné informace o prodejkách do jednotlivých odvětví. Z dostupných zdrojů lze pouze zjistit, že přibližně 75 % všech průmyslových robotů v ČR pracuje pro automobilový průmysl [26]. Pro odhad přesného počtu robotů lze vycházet z faktu uvedeného výše o počtu průmyslových robotů na 10 000 zaměstnanců ve zpracovatelském průmyslu. Podle předběžných údajů od ČSÚ bylo v roce 2021 ve zpracovatelském průmyslu zaměstnáno 1 092 000 pracovníků [27]. Na základě tohoto údaje lze odhadnout, že k roku 2021 bylo v ČR přibližně 18 300 průmyslových robotů. Z toho by se tedy 13 725 robotů vyskytovalo v automobilovém průmyslu. Uvedená čísla jsou odhady přibližných hodnot a skutečný počet robotů může být mírně odlišný. Tyto odhady nám ovšem poskytují obecný přehled o rozsahu a významu průmyslových robotů v ČR a v automobilovém průmyslu.

Ze všech výše uvedených informací lze usoudit, že snížení spotřeby elektrické energie průmyslových robotů by mělo největší dopad právě na automobilový průmysl. V tomto odvětví je robotů nejvíce a největší podíl firem je zde využívá.

2.4 Vývoj spotřeby elektrické energie v odvětvích využívajících průmyslové roboty

Při zkoumání vývoje spotřeby elektrické energie automobilového průmyslu je vhodné zohlednit i velikost výroby. Takovým přístupem můžeme zjistit, zda se mění množství energie potřebné k vytvoření jednotky výroby. Graf 2.8 ukazuje vývoj spotřeby elektrické energie automobilového průmyslu od roku 2008 do roku 2021, ovšem data za roky 2020 a 2021 jsou předběžná (v grafu označeno přerušovanou čarou). Dále je na grafu křivka zobrazující počet vyrobených produktů ve stejných letech. Do produktů jsou zahrnuty všechna motorová vozidla a dále přípojná vozidla, tedy přívěsy a návěsy. Vidíme, že křivka spotřeby elektrické energie téměř kopíruje průběh počtu vyrobených produktů. Výjimka je mezi roky 2008 a 2009, kdy počet vyrobených položek mírně vzrostl, a přesto spotřeba klesla. Dále mezi roky 2012 a 2013 se

naopak zvedla spotřeba a snížil se počet vyrobených produktů. Obě křivky rostly od roku 2013 až do roku 2018. Nejvyšší spotřebu elektrické energie měl automobilový průmysl v roce 2018, spotřeba byla 3.3 TWh, což bylo 17.6 % spotřeby celého průmyslu. V roce 2020 došlo k výraznému poklesu počtu vyrobených položek a podle předběžných dat i k poklesu spotřeby elektrické energie. Tento pokles byl způsoben komplikacemi spojené s koronavirovou pandemií, objem výroby se během roku propadl téměř na úroveň v roce 2013 [28]. V roce 2021 byl na trhu nedostatek polovodičů, což vedlo ještě ke snížení počet vyrobených produktů oproti minulému roku [29]. Spotřeba elektrické energie v tomto roce vzrostla, ale údaj je pro tento rok předběžný a není jisté, zda spotřeba stoupla tak výrazně jak je zobrazeno na grafu 2.8. V roce 2022 objem výroby s největší pravděpodobností vzroste, k listopadu 2022 se meziročně počet vyrobených osobních automobilů zvedl o 9.3 % [30]. S růstem objemu výroby se dá předpokládat i růst spotřeby elektrické energie.



Graf 2.8 - Vývoj spotřeby el. energie v automobilovém průmyslu a vývoj počtu vyrobených produktů v automobilovém průmyslu 2008 - 2021, vlastní zprac. dle [30, 31].

Z grafu 2.8 je z podobného průběhu obou křivek zřejmé, že se spotřeba elektrické energie na jednotku výroby během let výrazně nemění. Vývoj jednotkové spotřeby elektrické energie bude v následujících letech ovlivněn transformací automobilového průmyslu. Evropský parlament se chystá schválit regulaci v rámci balíčku Fit for 55 a od roku 2035 zakázat prodej nových automobilů a lehkých užitkových vozů (LUV), které vypouštějí emise oxidu uhličitého CO₂ [32]. Výroba elektromobilů bude postupně růst na úkor výroby vozidel se spalovacími motory a náročnost výroby na elektrickou energii bude záviset právě na energetické náročnosti výroby elektromobilů. Bez ohledu na náročnost výroby lze předpokládat, že průmyslové roboty budou využívány při výrobě elektromobilů minimálně ve stejné míře jako v současnosti v automobilovém průmyslu. Vzhledem k tomu bude i do budoucna důležité snižovat spotřebu robotů.

3. Průmyslové roboty

V předchozích kapitolách byly mnohokrát zmíněny průmyslové roboty. Nyní si tyto zařízení definujeme, popíšeme jejich funkci, využití a technologické možnosti.

Průmyslové roboty přinášejí mnoho výhod při nasazení ve výrobním procesu. Pořízení robotů do výroby je v první řadě motivováno ekonomickými faktory. Díky své rychlosti umožňují zvýšení výrobní kapacity, což znamená, že za jednotku času lze vyrobit větší množství výrobků. Dále je možné zlepšit kvalitu výrobků nebo snížit zmetkovitost a tím uspořit materiál, což vede k menším materiálovým ztrátám a tím i nákladům. Roboty mohou také nahradit lidskou pracovní sílu při namáhavé práci a snižují nutnost pracovníků působit v nebezpečném prostředí nebo prostředí, které přináší zdravotní rizika.

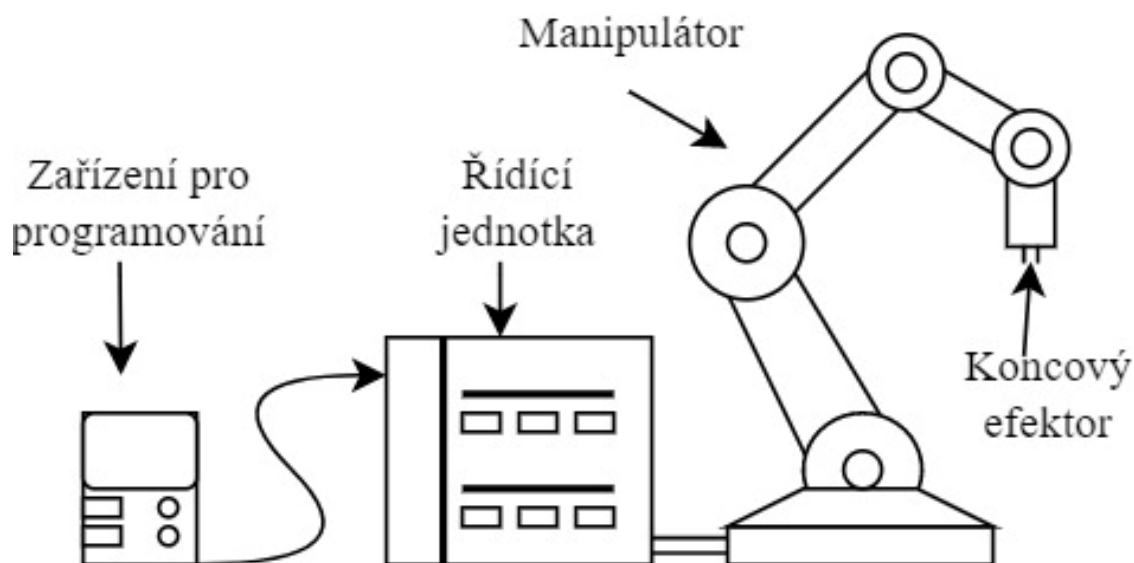
3.1.1 Definice průmyslových robotů

Průmyslové roboty řadíme obecně do manipulačních zařízení s univerzálním použitím. Pro pojem průmyslový robot můžeme ve zdrojích nalézt více definic. Jednu z nich uvádí International Organisation for Standardisation (ISO), podle které je průmyslový robot „*automaticky řízený reprogramovatelný víceúčelový manipulátor programovatelný ve více osách, který může být buď pevně umístěný nebo mobilní pro použití v průmyslových aplikacích s použitím automatů*“ [33]. Pod touto definicí si můžeme představit průmyslový robot jako zařízení, které je možno libovolně a opakovaně naprogramovat tak, aby vykonávalo definovaný pohyb a bylo schopno pracovat samostatně v automatickém režimu. Slovo průmyslový nám říká, že je to zařízení využívané při výrobě různých produktů [34].

3.1.2 Části průmyslového robota

Průmyslový robot se skládá z více částí, které dohromady můžeme nazvat „**robotickým systémem**“. Jednotlivé části robotického systému jsou popsány níže a zobrazeny na obrázku 3.1

- **Manipulátor (manipulator)** – manipulátor je mechanické rameno robota, které dokáže pohybovat s materiálem nebo nástrojem. Skládá se z několika jednotlivých segmentů oddělených pohyblivými klouby. Manipulátor obsahuje motory zajišťující lineární nebo rotační pohyb.
- **Koncový efektor (end effector)** – jedná se o nástroj, který se připojuje na zakončení manipulátoru. Jak koncový efektor vypadá záleží na účelu použití a aplikaci průmyslového robota. Může se jednat například o uchopovací, zvedací, svařovací nebo řezací nástroj.
- **Řídící jednotka (controller)** – řídí pohyby manipulátoru díky programu, který je nahraný v paměti řídicí jednotky. Také přijímá informace z okolí prostřednictvím monitorovacích zařízení.
- **Zařízení pro programování robota (means for programming)** – Toto zařízení se nazývá také **teach pendant** a je spojeno s řídicí jednotkou robota. Slouží k řízení pohybu robota nebo k editování programů pro pohyb robota. [35]



Obrázek 3.1 - Části průmyslového robota, zpracování dle [35].

3.1.3 Typy průmyslových robotů

Existuje mnoho kritérií pro rozdělení průmyslových robotů. Zde si uvedeme jen ty základní, které budou mít význam v dalších kapitolách a budeme si pomocí nich popsat robota použitého pro měření spotřeby elektrické energie.

3.1.3.1 Počet pohyblivých kloubů

První kritérium je počet pohyblivých kloubů neboli os. Toto kritérium dělí průmyslové roboty na 3 níže uvedené typy. U těchto typů nelze určit, který z nich se vyznačuje největší spotřebou elektrické energie. Spotřeba závisí na konkrétní aplikaci každého robota, v kapitole 4.1 je uveden konkrétní příklad, kdy má univerzální robot větší spotřebu než deficitní robot.

- **Univerzální roboty** – mají 6 pohyblivých kloubů, pomocí kterých mohou v prostoru jasně vymezit polohu i orientaci koncového efektoru nebo manipulovaného objektu. Univerzální roboty jsou nejrozšířenějším typem robotů.
- **Deficitní roboty** – mají méně než 6 pohyblivých kloubů, nejčastěji 3 až 4. Používají se pro jednoduché přemísťování objektů mezi dvěma místy, kdy není nutné objektem rotovat.
- **Redundantní roboty** – mají více než 6 pohyblivých kloubů, díky kterým se mohou lépe vyhnout překážkám v prostoru nebo se pohybovat se ve stísněných prostorech. [34]

3.1.3.2 Druh kinematické struktury

Dalším kritériem pro rozdělení je kinematická struktura. Kinematická struktura popisuje uspořádání pevných částí robota vzhledem k pohyblivým kloubům a určuje, zda jsou tyto části řazeny za sebou nebo paralelně. Na základě tohoto kritéria dělíme roboty na sériové a paralelní. Podle [36] by paralelní roboty měly být energeticky výhodnější při horizontálních pohybech a sériové při vertikálních pohybech. Nicméně takový závěr nelze aplikovat obecně. Každé pracoviště vyžaduje individuální zhodnocení.

- **Sériové roboty** – u těchto robotů jsou pohyblivé klouby řazeny za sebou.
- **Paralelní roboty** – pohyblivé klouby jsou umístěny paralelně, nejsou přímo spojeny. [34]

3.1.4 Využití průmyslových robotů

Nejčastější aplikací průmyslových robotů zůstává i nadále manipulace s materiálem. Roboty jsou podle své konstrukce schopny přenášet objekty s širokým rozmezím hmotností od jednotek kilogramů po jednu tunu.

Kromě manipulace mohou průmyslové roboty vykonávat různé úkony, například:

- zpracovávat materiály jako jsou dřevo a plast,
- svařovat,
- montovat k sobě části konstrukcí,
- aplikovat lepidla a těsnění na jednotlivé díly,
- provádět leštění, lakování nebo svařování materiálu,
- s pomocí kamerového systému kontrolovat kvalitu vykonaného úkolu,
- obsluhovat CNC stroje.

K těmto složitějším aplikacím je třeba k průmyslový robot vybavit i speciálními čidly či senzory a dále zajistit dokonalé řízení celého procesu pomocí softwaru.

4. Snížení spotřeby el. energie robotů

Z předchozích kapitol již víme, že má hledání úspor elektrické energie u průmyslových robotů smysl. Snížení spotřeby by přispělo k snížení energetické náročnosti nejen průmyslových robotů samotných, ale i odvětví automobilového průmyslu, kde se roboty nejvíce používají. V této kapitole si popíšeme konkrétní způsoby a myšlenky, kterými je možno úspory realizovat. Obecně můžeme na možnosti úspor elektrické energie u průmyslových robotů nahlížet z pohledu hardwaru a softwaru.

4.1 Hardwarová řešení

Hardwarová řešení se týkají především konstrukce průmyslového robota v závislosti na jeho použití. Pokud chceme na konkrétní aplikaci použít průmyslového robota a spotřebovat co nejméně elektrické energie, měli bychom vzít v potaz následující základní skutečnosti.

- **Typ průmyslového robota**
 - Konstrukce průmyslového robota – pro každou aplikaci je vhodný jiný průmyslový robot. Chceme-li například použít průmyslového robota na paletizační pracoviště, kde se zboží ukládá na přepravní palety, stačí nám deficitní průmyslový robot se 4 otočnými klouby. Tento robot má oproti robotu se 6 otočnými klouby mechanická omezení, ale při práci na paletizačním pracovišti spotřebuje méně energie a 4 otočné klouby jsou dostačující pro přemístění zboží na palety. Pro konkrétní porovnání můžeme uvést dva roboty od výrobce ABB IRB 6700 a IRB 660. Tyto roboty mají podobnou nosnost i dosah, nicméně první z nich má 6 os, druhý pouze 4 [37, 38]. Šestiosý robot má definovanou spotřebu elektrické energie při maximální rychlosti a maximálním zatížení 3,2 kW, zatímco čtyřosý jen 2,36 kW [37, 38]. Kromě počtu os je třeba zvážit použití paralelního nebo sériového robota.
 - Nosnost průmyslového robota – pro danou aplikaci je třeba vybrat průmyslového robota s vhodnou nosností. Pokud bude průmyslový robot manipulovat s objekty s malou hmotností, není z hlediska spotřeby elektrické energie vhodné vybrat robota, jehož nosnost je mnohem větší než hmotnost manipulovaných objektů. Takový robot by nevyužil potenciál velké nosnosti a spotřeboval by více elektrické energie než robot s malou nosností při stejném zatížení.
 - Použití průmyslových robotů s možností rekuperace energie – novější průmyslové roboty mají možnost rekuperace energie při brzdění a nemusí ji zmařit ve formě tepelné energie v brzdových odporech. Při rekuperaci roboty vracejí energii získanou během brzděného pohybu zpět do sítě. Tuto energii může dále využít jiné elektrické zařízení na téže síti, aniž by spotřebovalo další energii. To může vést k celkovému snížení spotřeby elektrické energie na výrobní lince.
- **Pravidelnou údržbu** – u každého průmyslového robota je třeba pravidelná údržba nejen z důvodu životnosti robota. Do převodovek je nutné pravidelně aplikovat mazivo, které snižuje tření a zlepšuje účinnost robota, jelikož právě tření v převodovkách je významným spotřebitelem energie.

4.2 Softwarová řešení

Softwarové postupy vedoucí k snížení spotřeby elektrické energie se týkají programu robota, podle kterého robotické rameno vykonává pohyby. Níže jsou uvedeny některé možné úpravy programu, které mohou k optimalizaci spotřeby přispět.

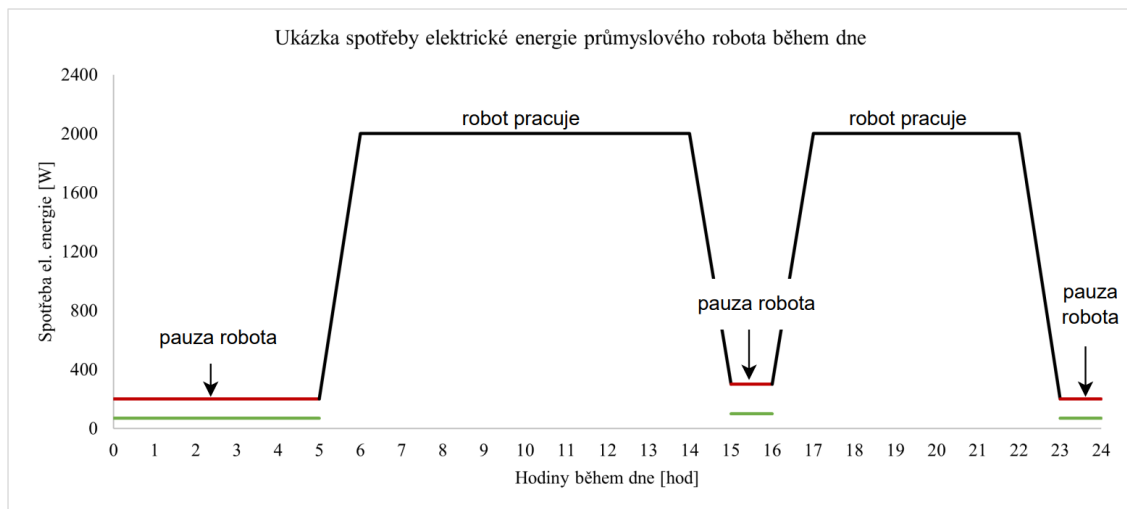
- **Optimalizace dráhy pohybu** – existují programovací nástroje či softwary, které umí najít energeticky nejméně náročnou dráhu a pomohou tak programátorovi nastavit program pro robota s ohledem na spotřebu elektrické energie. Zkušený programátor může optimalizovat trajektorii i bez použití speciálního softwaru.
- **Optimalizace akcelerace robota** – během prudkého zrychlování či zpomalování pohybu robotického ramene dochází k větší spotřebě energie v důsledku většího výkonu, který robot pro změnu rychlosti potřebuje. Pokud chceme co nejmenší spotřebu elektrické energie, je například efektivnější, aby se robot pohyboval z jednoho místa na druhé pomalou rychlostí, než aby se pohyboval rychle a následně v koncovém bodě čekal. Průmyslový robot by měl zrychlovat a zpomalovat pouze pokud je to nezbytné pro jeho úkon.

Výše uvedené způsoby mohou zajistit úsporu elektrické energie průmyslových robotů během jejich činnosti, kdy průmyslová linka vyrábí. Potenciál dalších úspor můžeme ovšem hledat i mimo dobu výroby, tedy během doby nečinnosti výrobní linky.

4.2.1 Úspory během pauz výroby

Doba nečinnosti linky, a tedy i doba nečinnosti průmyslových robotů, nastává při krátkých pauzách jako je přestávka na oběd nebo na výměnu směny, při dlouhých pauzách mezi pracovními dny či o víkendech nebo během odstávek a údržby. Pokud by v těchto pauzách docházelo k úplnému vypnutí průmyslových robotů, byla by jejich spotřeba elektrické energie nulová, a tedy by zde nebylo možno hledat další potenciál k úsporám energie. Nicméně podle informací z průmyslu nedochází v mnoha případech ke kompletnímu vypnutí výrobní linky a průmyslových robotů během nevýrobní doby, a to z několika důvodů. Uvést linku s průmyslovými roboty do provozu je po vypnutí často obtížné. Stává se, že pokud je průmyslový robot vypnut neřízeně bez vypínacího programu, dojde ke ztrátě některých dat jako je například počítadlo otáčení jednotlivých os. K obnovení činnosti robota je potřeba zásah pracovníka, což může být časově náročné. Další nevýhodou je doba potřebná pro zapnutí průmyslového robota ze stavu úplného vypnutí. Na krátké pauzy do 10 minut (min) nemá smysl průmyslového robota vypnout, jelikož doba vypnutí a zapnutí by často trvala déle, než je samotná pauza. Průmyslové roboty tedy bývají zapnuté, ale neprovádí žádný pohyb. Tím dochází ke spotřebě elektrické energie během nevýrobních pauz, což můžeme označit za zbytečné. Tato spotřeba je menší v porovnání se spotřebou během výroby a může se zdát nevýznamná. Nicméně především pokud jsou pauzy delší než několik desítek minut, jako například víkendové pauzy, spotřeba se v těchto pauzách během roku nasčítá a v konečném důsledku není zanedbatelná.

Pro představu je na obrázku 4.1 zobrazena křivka ukazující spotřebu elektrické energie průmyslového robota během dne. Robot pracuje pouze část dne, ve které můžeme jeho spotřebu ovlivnit některým ze způsobů uvedených v podkapitolách 4.1 a 4.2. Celková denní spotřeba ovšem zahrnuje i spotřebu během pauz, která je na obrázku zobrazena červenou křivkou. Snížení této spotřeby na nižší hodnotu, jak je znázorněno zelenou křivkou, by vedlo ke snížení celkové spotřeby robota během dne.



Obrázek 4.1 - Ukázka spotřeby el. energie průmyslového robota během dne.

Je tedy třeba najít způsoby, jak minimalizovat spotřebu elektrické energie průmyslových robotů během nevýrobních pauz. Jedním z možných řešení je automatické přepínání robotů do úsporných módů. Myšlenkou je přepnout robota do úspory během nevýrobní pauzy a opět ho automaticky zapnout, jakmile začne nový výrobní cyklus. Průmyslový robot není v úsporném módu zcela vypnut, čímž jsou odstraněny problémy související s jeho zapnutím a robot se může rychle vrátit do plného provozu.

Celkově lze říci, že přepínání průmyslových robotů do úsporných módů během pauzy může velmi přispět ke snížení spotřeby elektrické energie robota, což dále vede ke snížení nákladů za energii. V následujících kapitolách se budeme podrobněji zabývat konkrétním řešením pro přepínání robotů do úsporných stavů.

6. Úsporné módy průmyslových robotů

Úsporným módem, rozumíme stav, kdy má průmyslový robot odpojené určité části od napájení v době jeho nečinnosti. Tím dochází k menší spotřebě energie oproti stavu, kdy zařízení nepracuje, ale je stále připojeno k napájení. Tento stav můžeme pro představu přirovnat k režimu spánku v počítači. Aby bylo možné úsporné módy na robotu zapnout, je třeba v jeho řídicí jednotce aktivovat určitou technologii či softwarovou funkci.

6.1 Technologie úsporných módů

V oblasti průmyslové automatizace je často pro výměnu dat mezi řídicími jednotkami a ovládanými zařízeními používán síťový standart PROFINET. Je to komunikační protokol založený na průmyslovém Ethernetu a umožňuje velmi rychlou komunikaci mezi různými průmyslovými zařízeními, například mezi programovatelnými logickými automaty (PLC) a průmyslovými roboty. [39]

Přídavnou vrstvou či nástavbou protokolu PROFINET jsou aplikační profily. Aplikační profily standardizují příkazy, kterými komunikují řídicí jednotky s ovládanými zařízeními. Díky aplikačním profilům je možné použít stejné příkazy pro ovládání zařízení od různých výrobců.

Jedním z aplikačních profilů PROFINETu a zároveň software, který bude použit k zapínání úsporných módů robotů v této bakalářské práci, je profil PROFInergy.

6.1.1 Základní komponenty a funkce

Software pro zapínání úsporných módů je založen na kolaboraci tří základních elementů, které jsou nutné k jeho správnému fungování. První je řídicí systém podporující práci na síti s protokolem PROFINET, většinou je tímto systémem PLC. Úkolem řídicího systému je posílat příkazy k přechodu do úsporného režimu do zařízení a také zpracovávat zpětnou vazbu od zařízení, která do úsporného režimu přešla. Dalším elementem je přítomnost komunikačního rozhraní PROFINET, jehož funkcí je přenášet příkazy od řídicího systému ke koncovému zařízení a zpětnou vazbu od zařízení k řídicímu systému. Posledním nutným prvkem je samotné zařízení, u kterého chceme přepínáním do úsporných režimu ušetřit elektrickou energii. Toto zařízení, například průmyslový robot, musí podporovat aktivaci softwarové funkce (zde PROFInergy). Pokud zařízení funkci podporuje má vytvořeno jeden nebo více energetických stavů, kde se může nacházet. Zda dané zařízení funkci podporuje, je nutné zjistit od výrobce daného zařízení. Jakmile máme na výrobní lince všechny tři uvedené elementy, funguje přepínání do úsporných režimů tak, že řídicí PLC komunikuje skrz PROFINET se zařízeními pomocí programových bloků a zasílá do zařízení definované příkazy k přechodu do úsporného módu. O přechodu do módu úspory tedy rozhoduje řídicí PLC. [40, 41]

6.1.2 Doba trvání úsporného módu

Kdy a na jak dlouho se zařízení dostane do módu úspory je možné naprogramovat. Úsporný mód zapínáme během doby, kdy má zařízení pauzu, ale není zcela vypnuto. Taková doba může nastávat pravidelně podle předem daného rozvrhu. V takovém případě naprogramujeme řídicí PLC tak, aby vždy v určitý čas a na určitou dobu vyslalo do zařízení příkaz o přechodu do módu úspory. Stejně tak můžeme příkaz vyslat na základě sepnutí libovolného signálu, který informuje

o aktuálním stavu linky. Uvedme si jednoduchý příklad: máme svařovací linku s průmyslovým robotem, jehož úkolem je umístit díl určený ke svaření do svařovacího pracoviště a následně ho svařený vyndat. Chybou svářečky se díl svaří nesprávně, což je ihned zjištěno kontrolou. Průmyslový robot se zastaví a čeká, než bude problém odstraněn. V tuto chvíli je řídicí PLC pomocí signálu informováno o nečinnosti svářecího pracoviště a vyšle do průmyslového robota příkaz k přechodu do úsporného režimu. Robot by měl v úsporném režimu spotřebovávat méně elektrické energie, než kdyby byl pouze zabrzděn a nekonal žádný pohyb.

6.2 Energetické stavy průmyslových robotů

Průmyslový robot se může přirozeně vyskytovat ve třech základních stavech z pohledu spotřeby elektrické energie. Jsou to stavy:

- VYPNUTO (OFF),
- CHOD (OPERATE – ON),
- ZABRZDĚN.

Ve stavu VYPNUTO – OFF, kdy je robot zcela odpojen od napájení hlavním vypínačem a spotřeba elektrické energie je nulová. Naopak maximální spotřeba elektrické energie nastává během práce robota, tento stav nazýváme CHOD nebo anglickým slovem OPERATE – ON. Ve chvíli, kdy je průmyslový robot připojen ke zdroji elektrické energie, ale jeho pohyb se zastaví, nastává nejdříve stav, při kterém robot stojí na motorech. V tomto stavu jsou motory robotického manipulátoru stále napájeny, ale robot nevykonává pohyb. Po určité době, kterou je možné nadefinovat, přejde robot do stavu ZABRZDĚN. Definice této doby zajistí, že robot do tohoto stavu přejde vždy po této stejné době, dokud nedojde k jejímu předefinování na jinou hodnotu. Při zabrzdění je odpojeno napájení motorů a jsou aktivovány mechanické brzdy motorů. Stav robota ZABRZDĚN spotřebovává méně elektrické energie než CHOD a více než stav VYPNUTO. V tomto stavu se nachází průmyslové roboty během pauz ve výrobě (za předpokladu, že nejsou zcela vypnuty). Robot s aktivovanými úspornými módy se může během pauzy dostat do dalších stavů, ve kterých má spotřebu v intervalu mezi minimální a maximální spotřebou, tedy mezi stavy OFF a ON. Tyto stavy se mezi sebou liší různou spotřebou elektrické energie. Pokud je tato spotřeba nižší oproti stavu ZABRZDĚN dochází k úspoře elektrické energie během výrobní pauzy.

6.3 Úsporné módy na měřených robotech

V této práci je aktivace úsporných módů testována na průmyslových robotech od výrobce ABB, které používají pro řízení pohybu manipulátoru řídicí systém s názvem Industrial Robot Controller 5 (IRC5). K použití úsporných módů na průmyslovém robotu ABB nepotřebujeme přídatný hardware, nutností je pouze komunikace mezi řídicím PLC a řídicí jednotkou se systémem IRC5 skrz síť s protokolem PROFINET [42].

Na robotech ABB jsou dostupné celkem čtyři módy úspory elektrické energie, tedy čtyři další stavy, ve který se robot může vyskytovat. Než se zaměříme na definici těchto stavů, je třeba popsat postup, jak do nich průmyslového robota přivést. Pro aktivaci úsporných režimů je nezbytné dodržet následující posloupnost událostí.

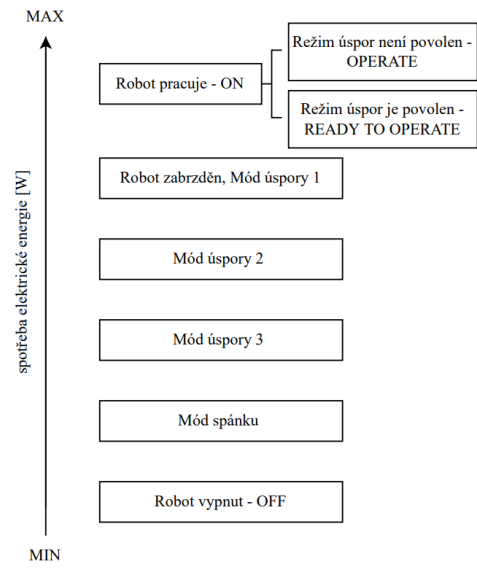
- Nejdříve aktivovat možnost přechodu do úsporných módů (profil PROFIenergy) na řídicí jednotce průmyslového robota.

- Poté v řídicí jednotce povolit přechod do úsporných. K tomu je nutné sepnout vstupní signál nazvaný Enable Energy Saving (EES) do hodnoty jedna (do stavu aktivní).
- Dále je nutné mít průmyslový robot v automatickém režimu. To je režim, ve kterém robot vykonává pohyb podle programu a není ručně ovládán operátorem.

Po splnění těchto úkonů je průmyslový robot připraven k použití úsporných módů, je v tzv. stavu READY TO OPERATE. Nyní může řídicí PLC vyslat příkaz do řídicí jednotky robota a podle daného příkazu přejde průmyslový robot do jednoho módu úspory [42].

Dostupné úsporné módy jsou pro lepší orientaci graficky znázorněny na obrázku 6.1. Módy se liší spotřebou elektrické energie a také použitím. Módy s vyšší spotřebou elektrické energie (například Múd úspory 1) jsou vhodnější pro krátké pauzy. Naopak módy s malou spotřebou energie (například Múd spánku) jsou vhodné na delší pauzy, jelikož z nich přechod do normálního pracovního stavu trvá déle. Níže jsou jednotlivé módy popsány z hlediska toho, co se při nich děje s průmyslovým robotem. Je zde uveden i oficiální název módu podle manuálu profilu PROFlenergy k ABB robotům [42].

- **Múd úspory 1** – nazván BRAKES ON – Jde o úsporný mód, kdy jsou použity mechanické brzdy [42]. Dále je odpojeno napájení motorů. V tomto módu je průmyslový robot ve stejném stavu jako při základním stavu ZABRZDĚN. Dá se předpokládat, že spotřeba elektrické energie v Múdu úspory 1 a ve stavu ZABRZDĚN bude stejná a mód tak nebude mít významné využití při snižování spotřeby.
- **Múd úspory 2** – nazván MOTORS OFF – V tomto úsporném módu dojde opět k použití mechanických brzd, odpojení motorů od napájení a dále dojde k odpojení dalších obvodů v řídicí jednotce robota. Spotřeba elektrické energie by tedy měla být nižší než při Múdu úspory 1.
- **Múd úspory 3** – nazván IO OFF – Tento mód provede veškerá omezení jako Múd úspory 1 a 2 a navíc dojde k pozastavení vstupů a výstupů, které jsou připojeny k řídicí jednotce robota [42]. Takovými vstupy a výstupy mohou být různé senzory tepla a tlaku nebo kamery. Tyto zařízení budou také převedena do úsporného režimu. Z toho vyplývá, že by spotřeba elektrické energie samotného robota během Múdu úspory 3 měla být stejná jako při použití Múdu úspory 2. Větší úspora energie oproti Múdu úspory 2 zde nastane v důsledku pauzy jiných zařízení připojených k robotu.
- **Múd spánku** – nazván SLEEP WOL – Tento mód poskytuje nejmenší spotřebu elektrické energie. Řídicí jednotka průmyslového robota zde běží na minimální výkon, jelikož má aktivní pouze části nezbytné pro síťovou komunikaci robota. Průmyslového robota je v tomto případě nutno probudit pomocí tzv. magického balení dat, který se pošle na síťovou kartu robota [42]. V tomto módu je sice nejmenší spotřeba energie, nicméně bude s největší pravděpodobností také trval déle uvést robota zpět do chodu oproti ostatním módům.



Obrázek 6.1 - Módy úspory a ostatní stavy robota ABB.

7. Snížení spotřeby průmyslových robotů

V předchozí kapitole jsme se podrobněji zabývali úspornými režimy robotů. Nyní si popíšeme průběh měření spotřeby elektrické energie průmyslových robotů během úsporných módů i všech ostatních energetických stavů. Pro zjištění spotřeby elektrické energie je nejprve třeba změřit výkon průmyslového robota. Následně se spotřeba elektrické energie v daném stavu zjistí ze změřeného výkonu a doby, po kterou tento stav trval. V této kapitole jsou nejdříve popsány konkrétní průmyslové roboty, které byly objektem měření. Dále je podrobně vysvětlen průběh měření výkonu průmyslových robotů a provedena analýza dat z měření.

7.1 Měření průmyslové roboty

Jednotlivé úsporné módy byly vyzkoušeny na dvou průmyslových robotech. Pro prozkoumání uspávání robotů bylo vhodné vybrat roboty, které se často používají a mají všestranné využití. Roboty s všestranným využitím jsou nasazeny v různých odvětvích a výsledky měření tak mohou mít přínos pro různé oblasti průmyslu. Zvolené průmyslové roboty jsou univerzální sériové roboty, které se liší velikostí a nosností, tudíž můžeme vidět, zda mají tyto parametry vliv na použití úsporných módů.

Prvním zvoleným průmyslovým robotem je IRB 120 od společnosti ABB. Jedná se o šestiosého robota s nosností jen 3 kg a dosahem 0.58 m [43]. Robot je vhodný na aplikace, kde se manipuluje s lehkými díly jako jsou elektronické komponenty nebo plastové součástky. Dále může být využit například při montování menších dílů do elektronických zařízení. Řídící jednotka IRC5 Compact je na jednofázové napájení. Příkon celého robotického systému při maximálním zatížení a rychlosti je podle manuálu 240 W a příkon při stavu ZABRZDĚN 95 W [43].



Obrázek 7.1 - Průmyslový robot IRB 120, zdroj [43].

Druhým průmyslovým robotem je IRB 6700 od společnosti ABB. Tento robot má také 6 otočných os. Oproti prvnímu má větší nosnost a dosah, 200 kg a 2.6 m [44]. Robot má časté využití při bodovém svařování, kdy nese svařovací elektrody. Dále může být nasazen při manipulaci s těžkým materiálem například do automobilového průmyslu nebo při nakládání a vykládání součástek z CNC strojů. Robotický systém je napájen z trojfázové sítě, spotřeba při maximálním zatížení a rychlosti je 2.6 kW a při stavu ZABRZDĚN 150 W [44].



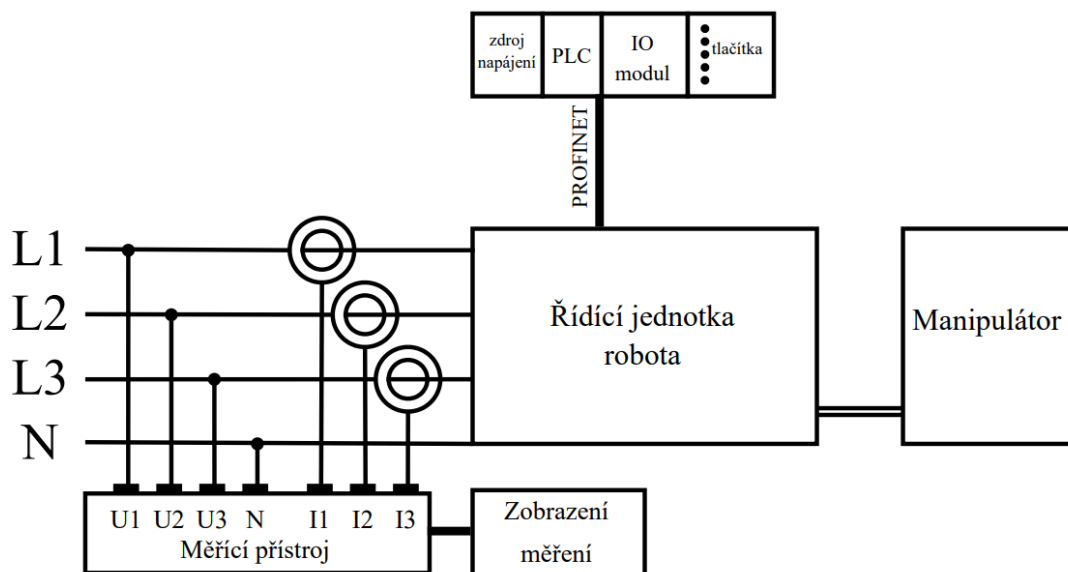
Obrázek 7.2 -Průmyslový robot IRB 6700, zdroj [44].

7.2 Měření výkonu během úsporných módů

Průmyslové roboty spotřebovávají po připojení na síť elektrickou energii nezbytnou k jejich provozu. Spotřebu průmyslového robota lze získat součinem výkonu a času po který byl tento výkon dodáván ze zdroje do robota.

Měření výkonu bylo pro tuto bakalářskou práci provedeno měřícím přístrojem pomocí metody jednoho nebo tří wattmetrů, podle počtu fází, ze kterých je robot napájen. Měřící přístroj má vstupní kanály pro měření napětí a proudu v jednotlivých fázích, díky nimž měří činný výkon.

Pro měření robota během úsporných módů je třeba provést několik následujících úkonů. V první řadě je nutno aktivovat software na přepínání úsporných módů na řídicí jednotce robota. To bylo v této bakalářské práci provedeno pomocí programu RobotStudio, který byl spuštěn na počítači připojeném k průmyslovému robotu. Dále je nutno připojit průmyslový robot k řídicímu PLC pomocí kabelu PROFINET a následně naprogramovat PLC tak, aby mohly být aplikovány úsporné módy. Samotné přepínání mezi úspornými módy bylo provedeno pomocí digitálních vstupů na IO modulu u PLC. Vstupy byly připojeny na tlačítka a jejich ručním spínáním byl z PLC do řídicí jednotky robota vyslán příkaz k přechodu do úsporného módu. Schéma zapojení pro měření výkonu během úsporných módů je na obrázku 7.3.



Obrázek 7.3 - Schéma měření výkonu robota.

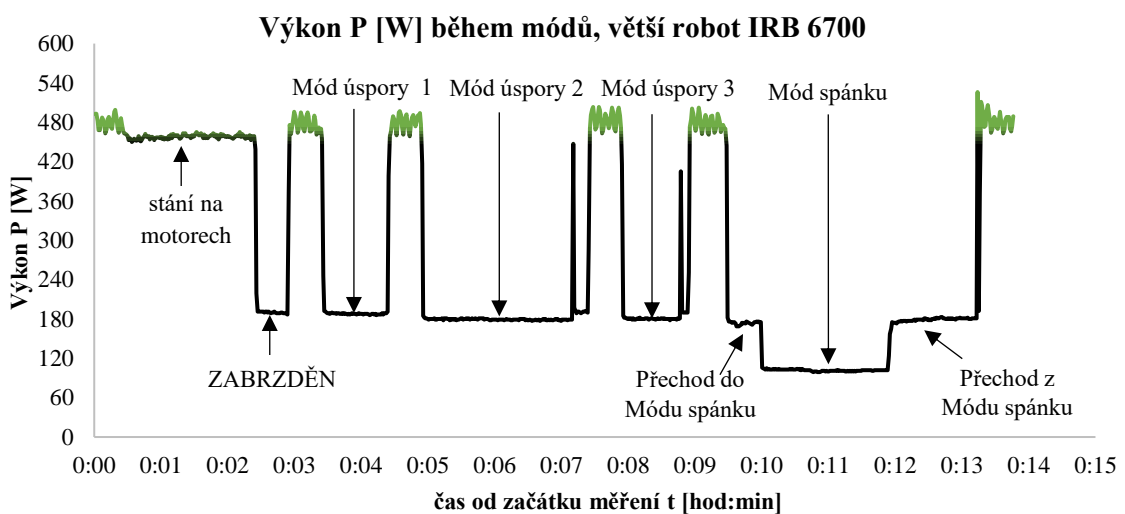
Záznam změřeného výkonu byl proveden aplikací dostupnou k měřicímu přístroji. Tento program bylo třeba nainstalovat do počítače, počítač připojit k měřicímu přístroji a před měřením spustit zaznamenání hodnot. Data z aplikace je po ukončení měření možné exportovat do tabulky v Excelu, což bylo v této práci využito. Data se v tabulce zaznamenávají po jedné sekundě (s).

Samotné měření bylo provedeno následovně. Nejdříve byl vytvořen program pro pohyb robotického manipulátoru v programovacím jazyku RAPID. Pohyby byly vytvořeny tak, aby se podobaly pohybům robotů na reálných výrobních linkách. Oba průmyslové roboty vykonávaly pohyby typické pro pick and place aplikace, tedy zvednutí objektu a jeho přesunutí na jiné místo. Poté byly aktivovány úsporné módy a během nich měřen výkon robotů.

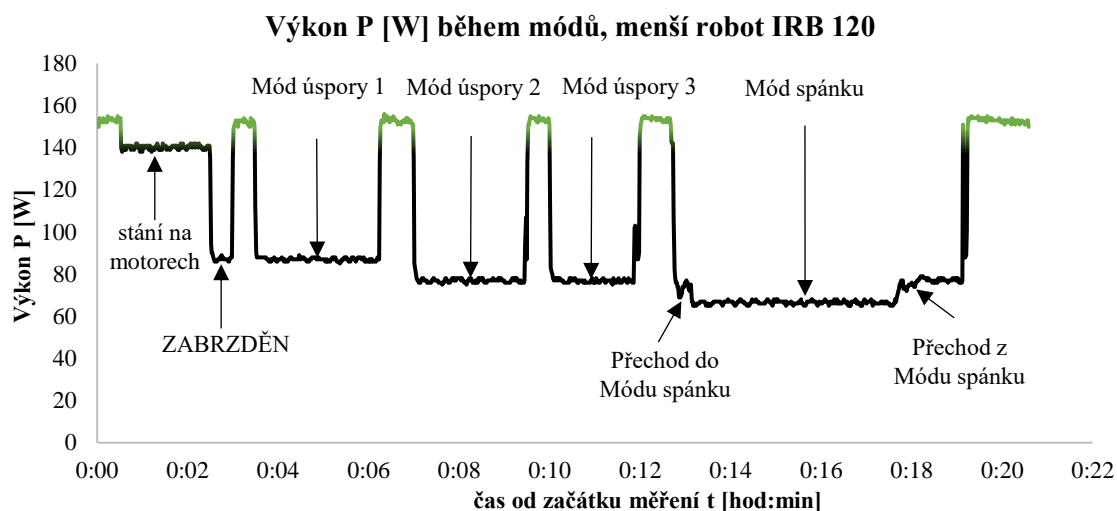
7.2.1 Měření energetických stavů robota

Roboty byly nejdříve změřeny ve všech energetických stavech. Cílem prvního měření bylo zjistit, zda se jednotlivé stavy liší ve spotřebě energie a zda dochází k poklesu spotřeby při postupném přechodu z Módu úspory 1 až po Mód spánku, jak je znázorněno na obrázku 6.1. Roboty přecházely po stupně mezi stavy: stání na motorech, stav ZABRZDĚN, Múd úspory 1-3 a Múd spánku. U obou robotů byla nastavena doba samovolného přechodu ze stavu, kdy robot stojí na motorech do stavu ZABRZDĚN na 2 minuty. Po zastavení pohybu robot tedy 2 minuty na motorech a poté přejde automaticky do stavu ZABRZDĚN. Jak již bylo zmíněno v přechozích kapitolách, stav ZABRZDĚN představuje stav, ve kterém se průmyslové roboty nachází během výrobních pauz, pokud nejsou zcela vypnuty. Úspory energie dosáhneme, pokud místo stavu ZABRZDĚN použijeme jeden z módů úspory.

Spotřebovaný výkon při všech energetických stavech je uveden na grafech 7.1 a 7.2. Zašumění grafů a oscilace hodnot mohou být způsobeny různými faktory, například nepřesností měření, výkyvy napětí v síti nebo elektromagnetickým rušením. Aby bylo možné vyjádřit hodnotu výkonu z oscilujících dat v určitém úseku, budeme brát vždy střední hodnotu výkonu za tento úsek. Zelené části grafů zobrazují výkon během stavu OPERATE – ON, kdy robot vykonává pohyb podle programu v automatickém režimu. Černé části grafů pak zobrazují všechny ostatní stavy robotů.



Graf 7.1 - Výkon P během úsporných módů, větší robot IRB 6700.



Graf 7.2 - Výkon P během úsporných módů, menší robot IRB 120.

Na obou grafech vidíme nejdříve přechod ze stavu OPERATE-ON do stavu stání na motorech a následně do stavu ZABRZDĚN. Poté robot znovu pracuje až do aktivace Módu úspory 1. Přechod do stavu ZABRZDĚN a do Módu úspory 1 se projevuje s výrazným poklesem výkonu. Nicméně, na první pohled lze z grafů vyčíst, že spotřebovaný výkon během stavu ZABRZDĚN a Módu úspory 1 je u obou robotů srovnatelný. U většího robota IRB 6700 je výkon P ve stavu ZABRZDĚN 190 W a při Módu úspory 1 je 188 W. U menšího robota IRB 120 je výkon P ve stavu ZABRZDĚN 88 W, v první Módu úspory je 87 W. Z hlediska úspory elektrické energie není tedy Mód úspory 1 nezbytný a lze ho nahradit stavem ZABRZDĚN, který je součástí robotického systému.

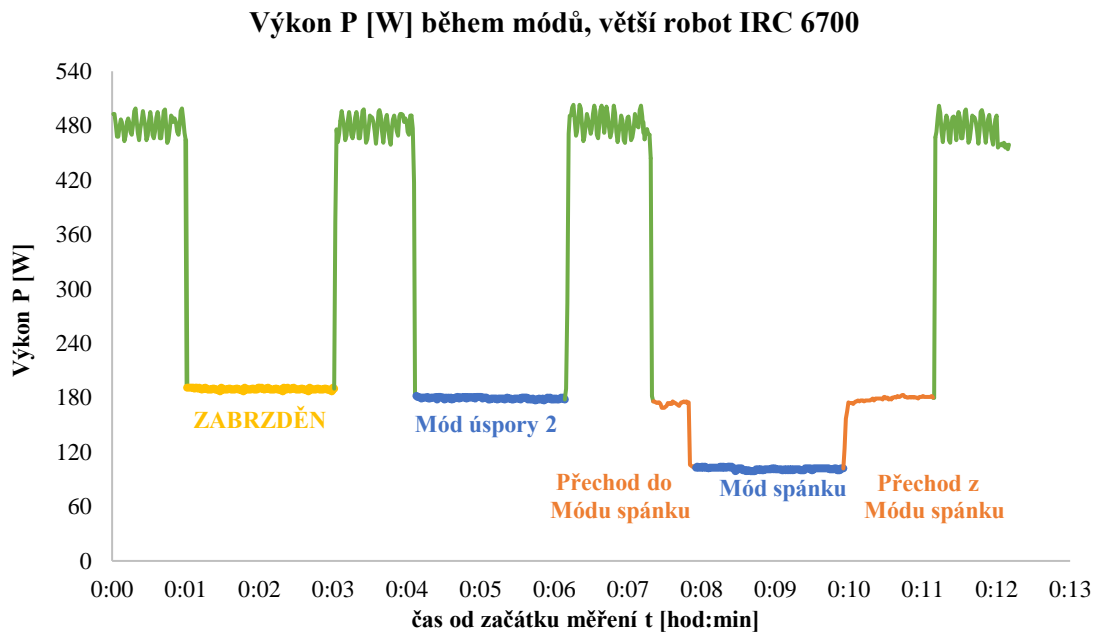
V dalších aktivovaných módech Módu úspory 2 a 3 dochází u obou robotů ke snížení spotřeby výkonu oproti stavu ZABRZDĚN. Při porovnání módů mezi sebou zjistíme, že je výkon téměř identický. U většího robota je v Módu úspory 2 výkon 182 W a v Módu úspory 3 je výkon 185 W. U menšího robota jsou hodnoty výkonů v obou módech na stejné hodnotě 77 W. Rozdíly mezi spotřebovaným výkonem jsou v těchto módech minimální, jelikož jsme k řídicí jednotce robota neměli připojeno další přídavné zařízení (například senzory či kamery) a Mód úspory 3 se týká uspaní těchto zařízení, jak bylo popsáno v kapitole 6.3. Aby bylo možné zaznamenat výrazné snížení spotřeby energie v Módu úspory, musel by mód být aktivován na konkrétní aplikaci průmyslového robota doplněného přídavnými zařízeními. Pro samotného průmyslového robota nemá Mód úspory 3 z hlediska úspory energie význam.

Posledním aktivovaným módem je Mód spánku. Z obou grafů lze vidět, že přechod do tohoto módu začíná nejprve snížením výkonu na nižší hodnotu a až poté následuje samotné uspaní robota. Tento proces je důsledkem postupného odpojování jednotlivých částí řídicí jednotky od napájení.

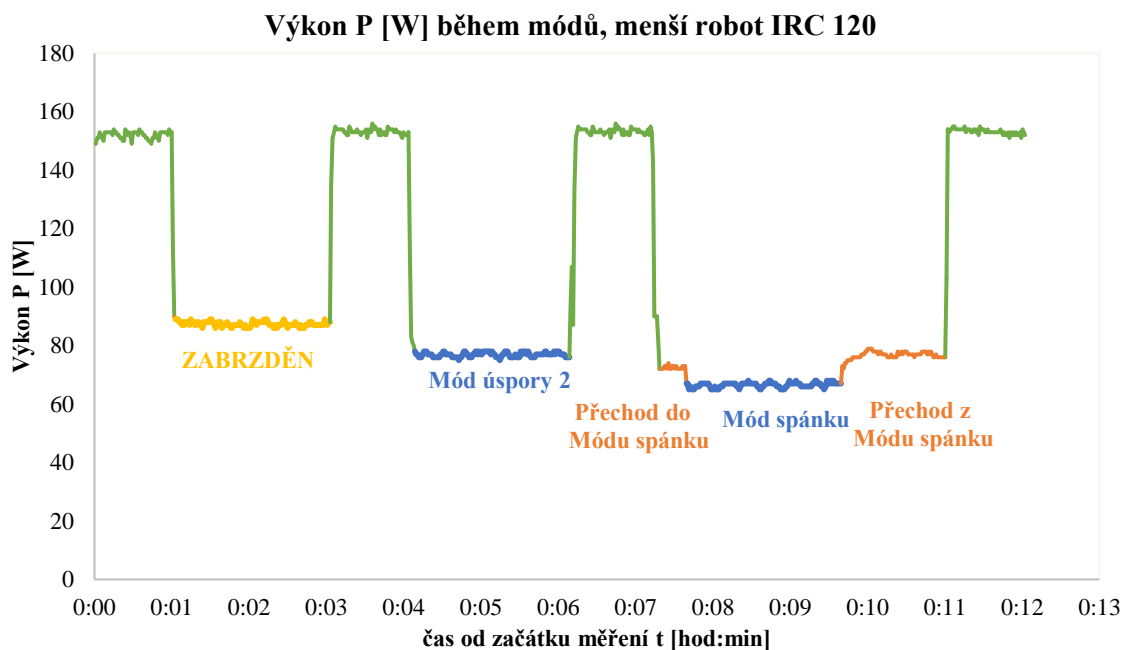
Z prvního měření robotů ve všech energetických stavech vyplývá, že pro snížení spotřeby elektrické energie samotného průmyslového robota jsou významné pouze **Mód úspory 2 a Mód spánku**. Robot během Módu úspory 1 spotřebovává stejně energie jako při stavu ZABRZDĚN, který je jedním z jeho základních stavů. Mód úspory 3 je relevantní pro aplikace, kde je k robotu připojeno další zařízení. Proto bylo provedeno druhé měření na obou robotech, při kterém byly porovnány pouze stavy ZABRZDĚN, Mód úspory 2 a Mód spánku.

7.2.2 Měření využitelných úsporných módů

Na grafech 7.3 a 7.4 jsou prezentovány tři výše uvedené stavy. Zeleně jsou zvýrazněny úseky, kde roboty pracují. Žlutá barva označuje úsek, v němž jsou roboty zabrzděny. Modrá barva ukazuje úseky, kde jsou aktivovány Módy úspory a oranžová barva ukazuje úseky přechodu do a z Módu spánku. Při měření těchto průběhů vykonávaly roboty pohyb vždy po dobu 1 minuty, poté byl vydán příkaz pro přechod do úsporného módu nebo do stavu ZABRZDĚN. V úsporném módu nebo stavu ZABRZDĚN roboty setrvaly 2 minuty a následně se začaly opět pohybovat podle programu.



Graf 7.3 - Výkon během významných energetických stavů velkého robota.



Graf 7.4 - Výkon během významných energetických stavů malého robota.

Na základě naměřených průběhů výkonu bylo možné zjistit úsporu spotřeby výkonu při použití úsporných módů. Hodnoty výkonu a vypočtených úspor v absolutní i procentuální hodnotě jsou uvedeny v tabulce níže. Úspora je dána jako rozdíl výkonu ve stavu ZABRZDĚN a jednoho z úsporných módů.

Velký robot IRB 6700			
Stav	Výkon spotřebovaný [W]	Úspora [W]	Procentuální úspora [%]
ZABRZDĚN	189.52	/	/
Mód úspory 2	179.38	10.14	5.35
Mód spánku	101.5	88.02	46.44
Malý robot IRB 120			
Stav	Výkon odebíraný [W]	Úspora [W]	Procentuální úspora [%]
ZABRZDĚN	87.55	/	/
Mód úspory 2	76.91	10.64	12.15
Mód spánku	66.51	21.04	24.03

Tabulka 7.1 - Úspora výkonu absolutní, procentuální.

Z tabulky lze vyvodit, že úspora výkonu je v případě většího robota během Módu spánku významně větší jak v absolutním, tak v relativním měřítku než u menšího robota. Tuto skutečnost můžeme vysvětlit tím, že větší robot IRB 6700 disponuje výkonnější řídicí jednotkou a při jejím uspání dojde k větší úspoře. Je zřejmé, že použití spaciho módu má oproti Módu úspory 2 výraznější dopad na úsporu elektrické energie. Konkrétně v Módu úspory 2 dosahuje úspora výkonu u velkého robota hodnoty 10,14 W a u malého 10,64 W, zatímco u spaciho módu je úspora velkého robota 88,02 W a malého 21,4 W. Nicméně je třeba zohlednit, že přechod do Módu spánku vyžaduje delší dobu než do Módu úspory 2. Respektive přechod do Módu úspory 2 probíhá na rozdíl od přechodu do spaciho režimu téměř okamžitě, což je na grafech zobrazeno strmými přechody mezi stavy OPERATE – ON a Módem úspory 2. Přechod do spaciho režimu probíhá ze začátku také strmým poklesem výkonu, ovšem poté se na krátký čas ustálí na vyšší hodnotě než při samotném spaci módu. Proto je důležité správně zvolit režim úspory v závislosti na plánované délce pauzy robota.

Na základně změřených dat je třeba definovat minimální délku pauzy robota, kdy je možné zapnout Mód spánku. Nutná doba pauzy pro zapnutí Módu spánku je odvozena z naměřených grafů 7.3 a 7.4 a uvedena v tabulce 7.2. Pro velký robot je potřeba pauza dlouhá alespoň 1.93 min a pro malého alespoň 1.8 min, při kratší době nestihne robot do spánku přejít.

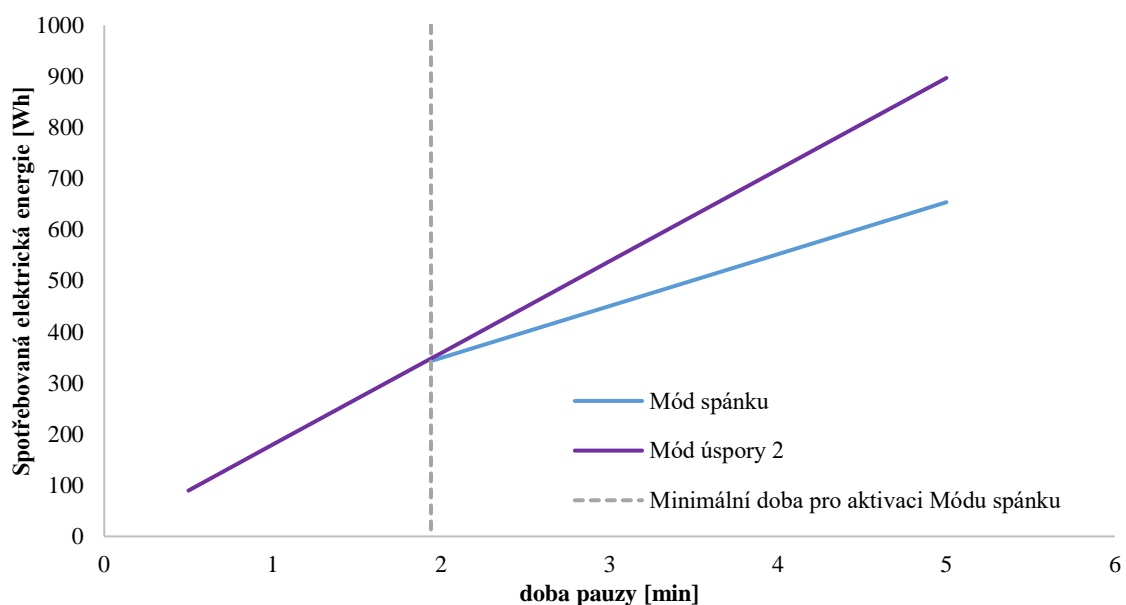
Velký robot IRB 6700			
Přechod do Módu spánku [s]	Přechod z Módu spánku [s]	Minimální doba nutná pro aktivaci Módu spánku [s]	[min]
42	74	116	1.93
Malý robot IRB 120			
Přechod do Módu spánku [s]	Přechod z Módu spánku [s]	Minimální doba nutná pro aktivaci Módu spánku [s]	[min]
26	82	108	1.8

Tabulka 7.2 - Minimální doba pauzy pro aktivaci spánku.

Jaký mód úspory aktivovat nelze stanovit pouze na základě minimální nutné doby pro aktivaci Módu spánku. Je nezbytné zohlednit i spotřebovanou energii obou úsporných módů při

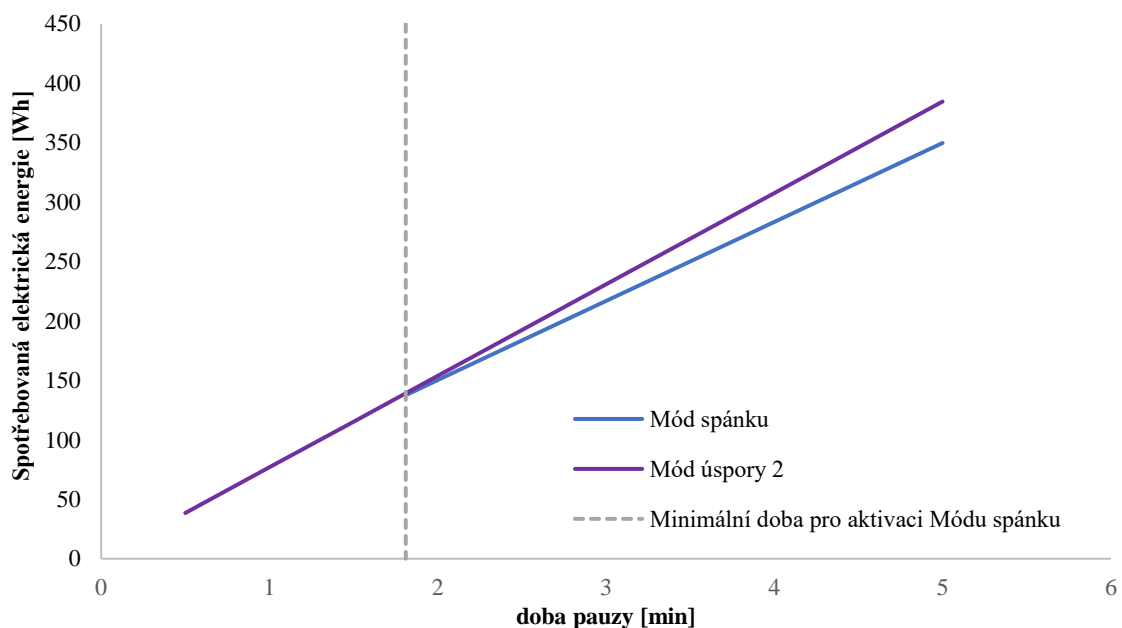
různých délkách pauzy. Pokud by přechod do a z Módu spánku spotřeboval více výkonu než Mód úspory 2, mohla by nastat situace, kdy i při pauze delší než 1.93 min by byl energeticky výhodnější Mód úspory 2. Pro toto zjištění je třeba výpočet spotřeby elektrické energie během Módu úspory 2 a během Módu spánku včetně přechodů v závislosti na době trvání pauzy. K výpočtu byly opět použity průměrné hodnoty výkonu během každého úseku. Výsledky jsou zobrazeny na grafech 7.5 a 7.6.

Závislost spotřeby el. energie [Wh] na době pauzy [min], IRB 6700



Graf 7.5 - Spotřeba elektrické energie v závislosti na délce pauzy velký robot.

Závislost spotřeby el. energie [Wh] na době pauzy [min], IRB 120



Graf 7.6 - Spotřeba elektrické energie v závislosti na délce pauzy malý robot.

Vidíme, že pro pauzy delší, než je minimální doba pro aktivaci spánku, má menší spotřebu elektrické energie Múd spánku. Při kratší době nelze spánek aktivovat a v takových případech má smysl zapnout Múd úpory 2. Konkrétně při každé pauze delší než 1.93 min u velkého robota a 1.8 min u malého se energeticky vyplatí aktivovat Múd spánku místo Múdu úspory 2.

Po zohlednění vhodného výběru úsporného režimu pro danou délku pauzy je zásadním faktorem pro úspory elektrické energie délka a frekvence jednotlivých pauz v průběhu provozu průmyslového robota. V další kapitole budou charakterizovány základní typy provozů a jejich pauzy. Následně bude vypočtena úspora energie, která by v nich mohla být dosažena díky přepnutí robotů do úsporných módů.

8. Úspory elektrické energie

Úsporné módy robota lze aktivovat při výrobní pauze, kdy robot nepracuje. Čím více delších pauz mají roboty během pracovního dne, tím jsou úsporné módy více využitelné a dochází k větší úspoře elektrické energie. V každé průmyslovém závodě pracují roboty v jiných časových intervalech a s jinými pauzami. Nicméně můžeme definovat základní časové rozvrhy robotů, podle který se v závodech často vyrábí.

K výpočtu úspor elektrické energie je nejdříve nutné vymezit typy pauz robotů, které mohou během výroby nastat. Tyto pauzy jsou rozděleny podle doby trvání na velmi krátké, krátké a dlouhé, jak uvádí tabulka 8.1. U každého typu pauzy je uveden orientační interval délky trvání.

Typ pauzy během provozu (interval trvání)	Detailní popis pauzy
Velmi krátké pauzy (0-15 min)	Čekání robota v během výrobního procesu
Krátké pravidelné pauzy <15;60 min>	Pauza na oběd
	Pauza na výměnu směny
	Změna nastavení / komponent robota
Krátké nepravidelné pauzy <15;60 min>	Pauza na schůzku
	Údržba
	Pauza mezi pracovními dny
Dlouhé pauzy > 1 hod	Pauza o nepracovních dnech (víkend)
	Odstávka

Tabulka 8.1 - Pauzy během provozu robota.

Základním měřítkem, podle kterého můžeme celkově rozdělit pracovní rozvrhy robotů, je počet výrobních směn. Existují tři základní typy provozů: **jednosměnné, dvousměnné a třisměnné**. V jednosměnném provozu pracuje průmyslový robot po dobu 8 hodin, zbylých 16 hodin nepracuje a je zastaven. U dvousměnného provozu robot nepracuje 8 hodin, kromě nepracovní doby může být zastaven i v pauze, během které dochází k výměně směny. U třisměnného provozu pracují roboty nepřetržitě a přestávky se vyskytují pouze při výměně směn nebo při jiných krátkých pauzách, nicméně se v rozvrhu robota nevyskytují dlouhé pauzy mezi pracovními dny jako je to u jednosměnného a dvousměnného provozu.

Jak velký vliv mají jednotlivé pauzy na úspory elektrické energie, pokud jsou během nich aktivovány úsporné módy je ukázáno v následujících podkapitolách. Výpočty úspor jsou vždy provedeny pro velkého i malého průmyslového robota (IRB 6700 a IRB 120) na základně naměřených dat uvedených v kapitole 7.2. Každý typ výrobní pauzy je analyzován pro jednosměnný, dvousměnný i třisměnný provoz. Pracovní týden je ve výpočtech definován jako 5 pracovních dní, jelikož jde o pracovní týden většiny výrobních linek, které byly pro bakalářkou práci zkoumány. Nicméně v průmyslovém prostředí existuje i mnoho linek pracujících nepřetržitě po celý týden.

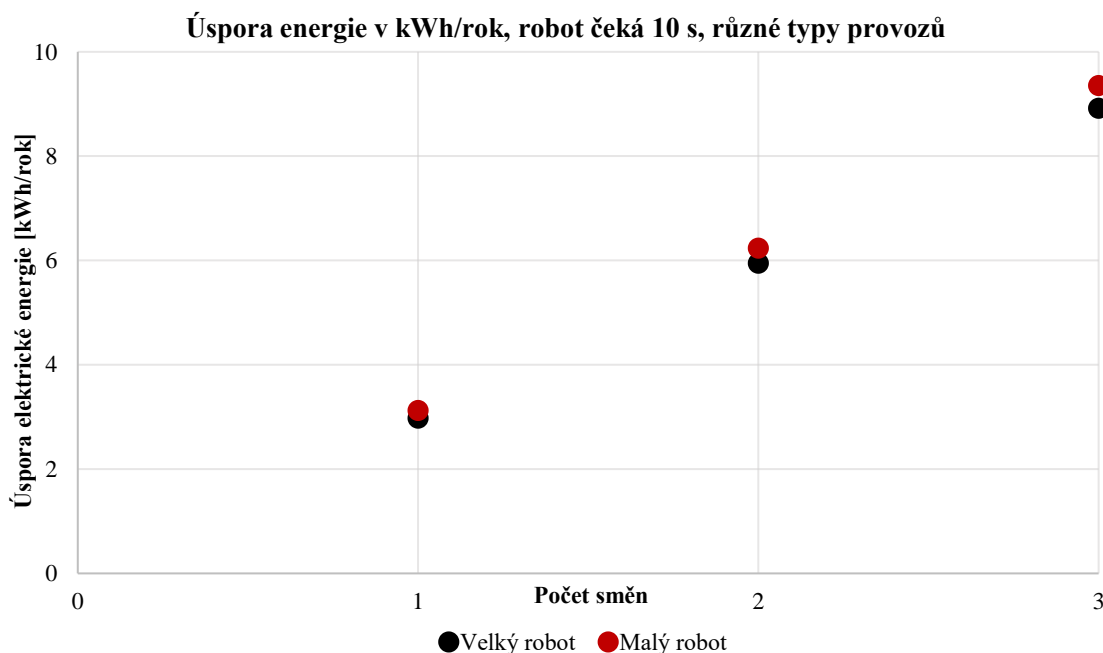
8.1 Velmi krátké pauzy

Nejkratší pauzy v pracovním cyklu robota označujeme jako velmi krátké pauzy. Jejich příkladem je čekání robota na dokončení určitého procesu během pracovního cyklu. V průmyslových aplikacích trvá čekání robota orientačně 10 s až 15 min. V závislosti na délce čekání je vhodné zvolit buď Mód úspory 2 nebo Mód spánku, jak bylo uvedeno v přechozí kapitole. Mód spánku se aktivuje až na pauzy delší než 1.93 min u velkého robota a 1.8 min u malého.

Pro výpočet úspor elektrické energie během velmi krátkých pauz použijeme nejdříve dva konkrétní příklady aplikace průmyslového robota, kdy v prvním případě je použit Mód úspory 2 a ve druhém Mód spánku. Oba příklady byly inspirovány reálnými průmyslovými linkami a díky nim získáme představu o tom, jak velký vliv mají velmi krátké pauzy na úspory elektrické energie. V procesu se samozřejmě nemusí čekání robota vůbec vyskytovat a v takovém případě je potenciál úspor nulový.

8.1.1 Sekundové pauzy

Prvním příkladem je aplikace, kdy robot umisťuje spojky na určitý díl do automobilu. Poté, co robot dokončí umístění všech spojek, zastaví se a čeká 10 s, než obsluha vyzvedne hotový díl. Během této čekací doby je robot ve stavu ZABRZDĚN a úsporu energie je možno provést přepnutím robota do úsporného módu. Celý cyklus včetně čekání robota trvá 71 s. Robot tedy aktivně pracuje 61 s a poté čeká po dobu 10 s. Robot takto vykonává pohyb celou směnu po celý pracovní týden. Pro pauzu trvající 10 s je vhodné využít Mód úspory 2. Na grafu 8.1 je zobrazena vypočtená úspora elektrické energie za rok, která by nastala, pokud se na 10 s v každém cyklu robota aktivuje Mód úspory 2. Úspora je zobrazena v závislosti na počtu pracovních směn.



Graf 8.1 - Úspora energie v kWh/rok, čekání robotů 10 s.

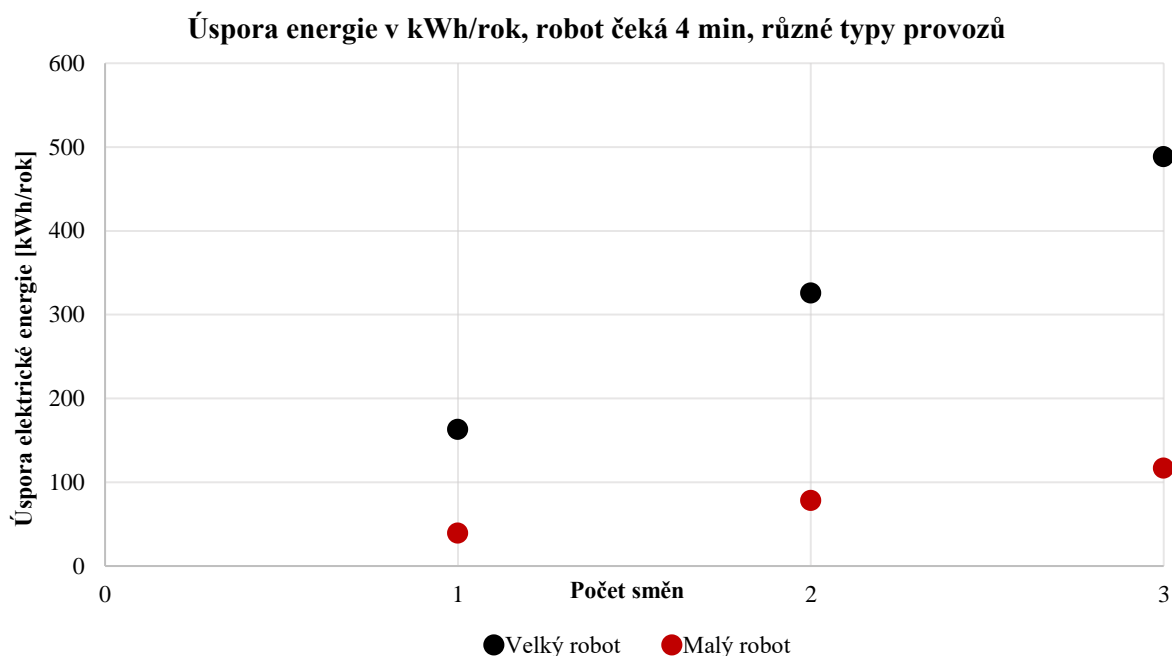
Z grafu lze vyčíst, že potenciál úspor elektrické energie je v jednosměnném provozu pro velkého robota 2.97 kWh za rok a s vyšším počtem směn roste úspora přímo úměrně. V případě

malého robota by se v jednosměnném provozu uspořilo 3.12 kWh za rok. Úspory jsou téměř srovnatelné pro oba zkoumané roboty, jelikož v Módu úspory 2 dosahují oba podobného výkonu.

8.1.2 Minutové pauzy

Druhým příkladem aplikace je průmyslový robot obsluhující CNC obráběcí stroj. Robot umístí určený díl do stroje, uzavře dveře a následně čeká po dobu 4 min, během které dochází k obrobení dílu. Poté robot vyjme hotový díl. Celý cyklus trvá 4.5 min, 4 min robot čeká a 0.5 min pracuje. V případě čekání trvajících 4 min je možné aktivovat Mód spánku, který přináší vyšší úsporu elektrické energie ve srovnání s Módem úspory 2.

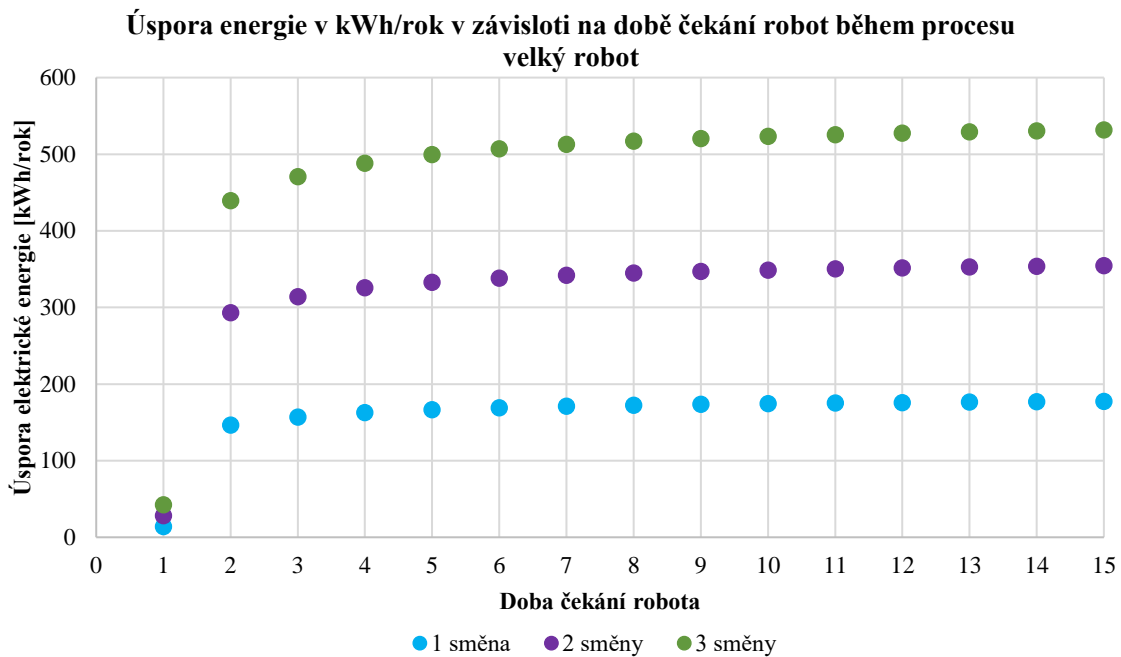
Vypočtené hodnoty úspory energie jsou zobrazeny na grafu 8.2. V jednosměnném provozu je potenciál úspory velkého robota za rok 162.74 kWh a malého robota 38.90 kWh. S nárůstem počtu směn se úspora energie zvyšuje až na 488.22 kWh u velkého robota a 116.70 kWh u malého. Rozdíl úspory je zde mezi roboty výraznější než u sekundového čekání.



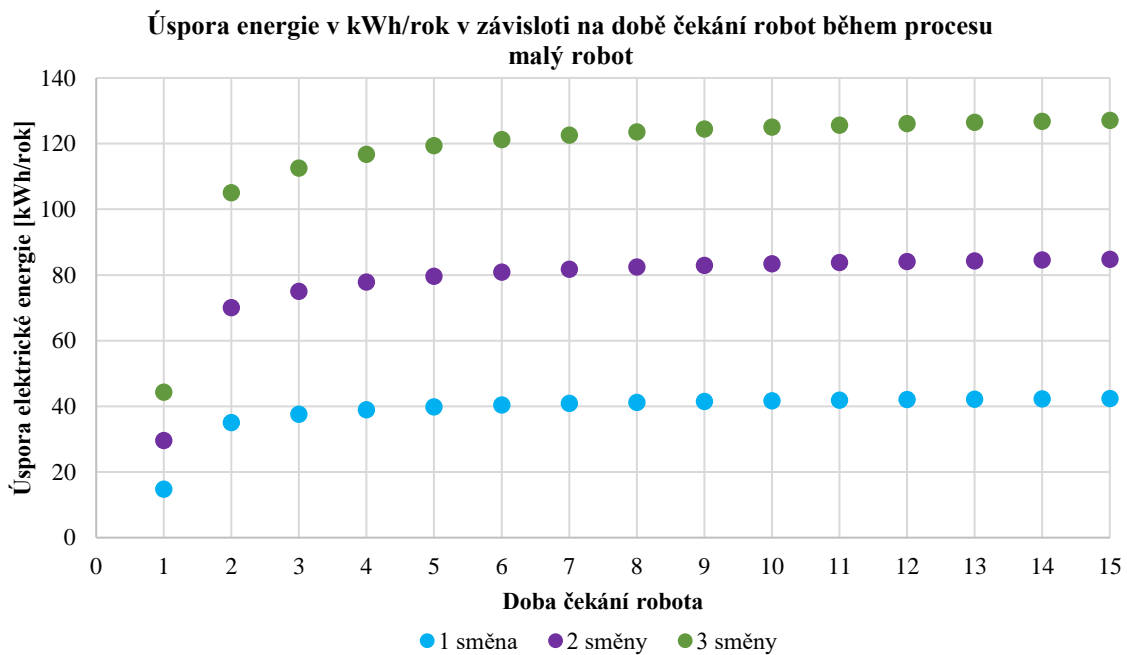
Graf 8.2 - Úspora energie v kWh/rok, čekání robotů 4 min.

Z analýzy sekundového a minutového čekání vidíme, že zapnutí úsporného módu při velmi krátkých čekacích dobách trvajících pouze několik sekund nemá významný dopad na úsporu elektrické energie. V těchto případech je úspora energie velmi nízká ve srovnání s úsporami dosahovanými při minutovém čekání. Při sekundovém čekání se úspory pohybují do 10 kWh/rok, zatímco u minutového čekání dosahují až 500 kWh/rok. Úspory v minutových pauzách mohou tedy být významné, a proto je vhodné se na ně zaměřit detailněji.

Na grafech 8.3 a 8.4 je zobrazena vypočtená úspora při různých minutových pauzách od 1-15 min. Přičemž uvažujeme, že po skončení každé pauzy roboty pracují po dobu 30 s. Z grafu je patrné, že velký nárůst úspory energie je v rozmezí mezi 1 a 2 min, což je způsobeno přepínáním robotů mezi Módem úspory 2 a Módem spánku.



Graf 8.3 - Úspora energie v kWh/rok závislá na době čekání velkého robota.



Graf 8.4 - Úspora energie v kWh/rok závislá na době čekání malého robota.

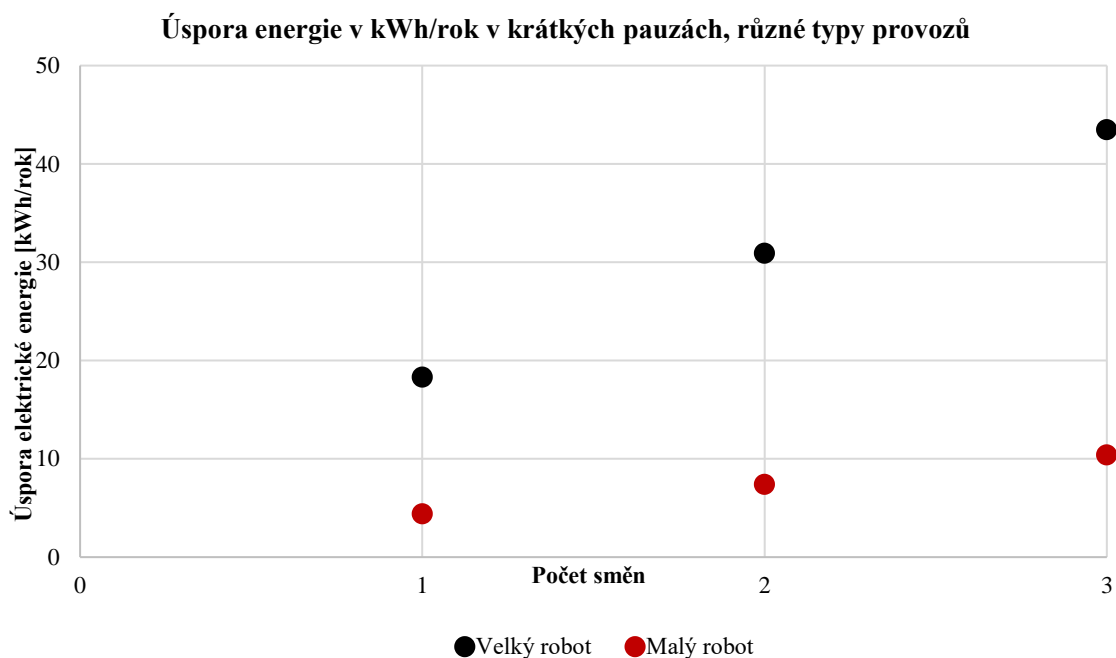
8.2 Krátké pauzy

Do kategorie krátkých pauz řadíme pauzy trvající od 15 min do 60 min. Příkladem krátké pauzy je pauza na oběd, přenastavení robota, schůzku nebo na údržbu robota. Pro výpočet potenciálu úspor elektrické energie během krátkých pauz uvažujeme délky trvání uvedené v tabulce 8.2. Některé pauzy probíhají nepravidelně, jejich délka a frekvence opakování jsou pro výpočet odvozeny z reálných aplikací.

Pauza	Doba trvání
Pauza na oběd	30 [min/den/směnu]
Změna nastavení robota	1 [hod/týden]
Pauza na schůzku	1 [hod/měsíc/směnu]
Údržba	1 [hod/měsíc]

Tabulka 8.2 - Přehled krátkých pauz.

Vypočtené úspory elektrické energie ukazuje graf 8.5. Vidíme, že největší úspora je v případě třísměnného provozu pro oba typy robotů, u většího robota 43.48 kWh ročně a u malého 10.39 kWh. Je tedy zřejmé, že přepínat roboty do spánku během krátkých pauz nepřináší příliš velkou úsporu energie, jelikož tyto pauzy jsou relativně krátké a frekvence jejich opakování malá. Nicméně i tato malá úspora přispívá k celkovému snížení množství využívané elektrické energie a v kombinaci s použitím úsporných módů i během jiných pauz může vést k významnějšímu snížení spotřeby elektrické energie.



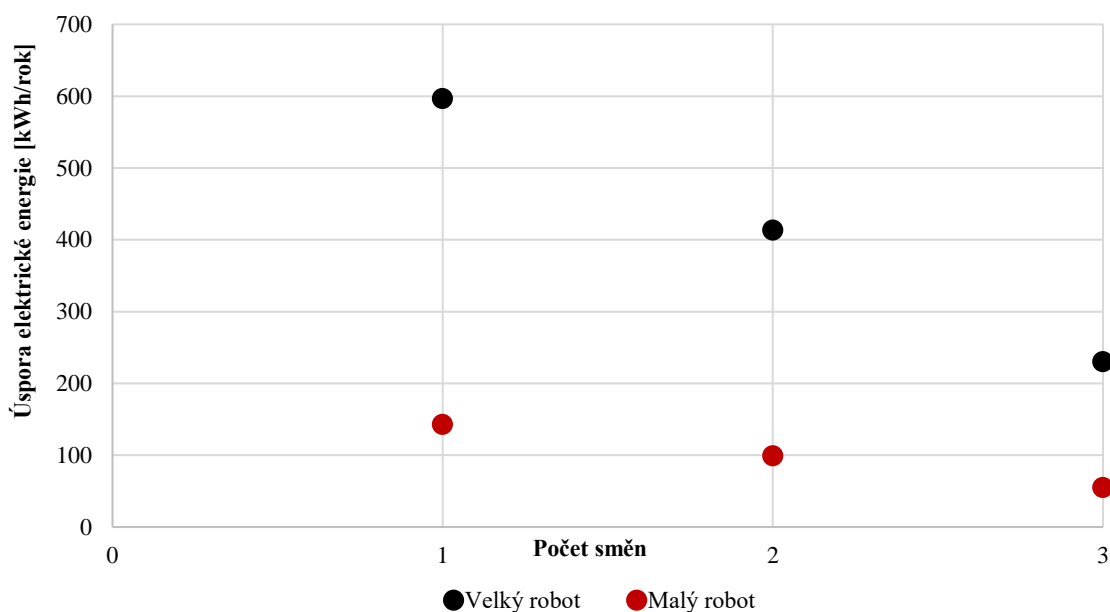
Graf 8.5 - Úspora energie v kWh/rok v krátkých pauzách.

8.3 Dlouhé pauzy

Poslední kategorií jsou dlouhé pauzy trvající déle než 1 hod. Za dlouhé pauzy považujeme pauzy, které přímo souvisí s počtem směn v provozu, tedy pauzy mezi pracovními směnami. Dále sem patří pauzy o nepracovních dnech a během odstávek provozu. U všech dlouhých pauz je možno aktivovat Mód spánku.

Pro výpočet úspor elektrické energie v důsledku usnutí robota uvažujeme 5 pracovních dní, tedy 2 nepracovní dny, 5 dní odstávky a dále pauzy mezi směnami v závislosti na typu provozu. V jednosměnném provozu uvažujeme pauzu mezi směnami trvající 16 hod, u dvousměnného 8 hod a u třísměnného provozu pauza mezi směnami není.

Úspora energie v kWh/rok v dlouhých pauzách, různé typy provozů

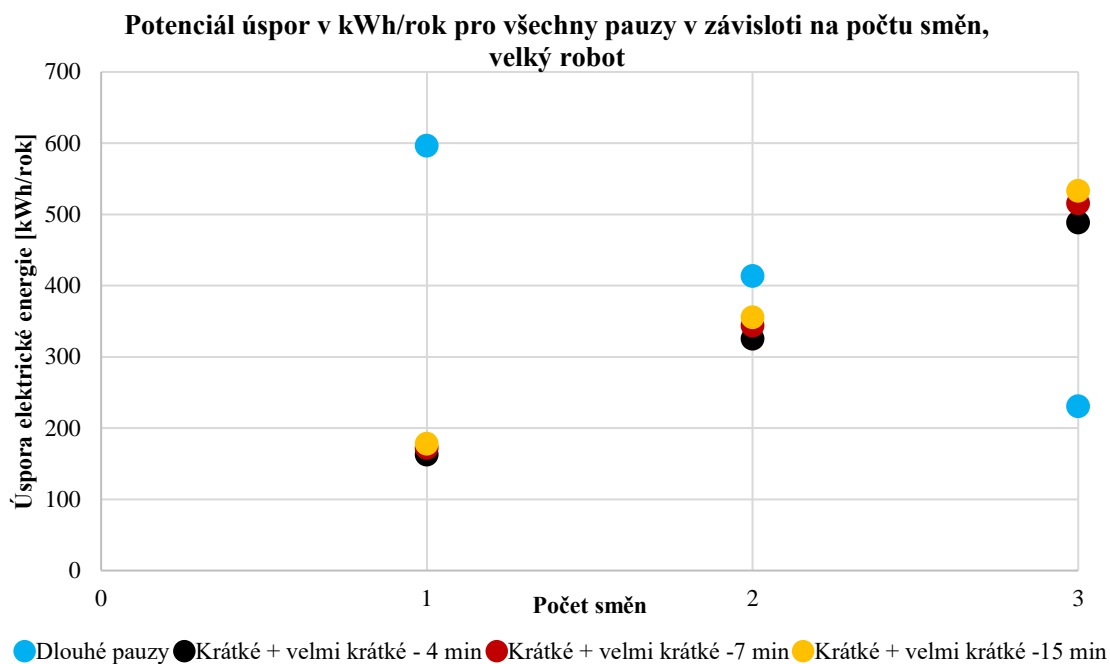


Graf 8.6 - Úspora energie v kWh/rok v dlouhých pauzách.

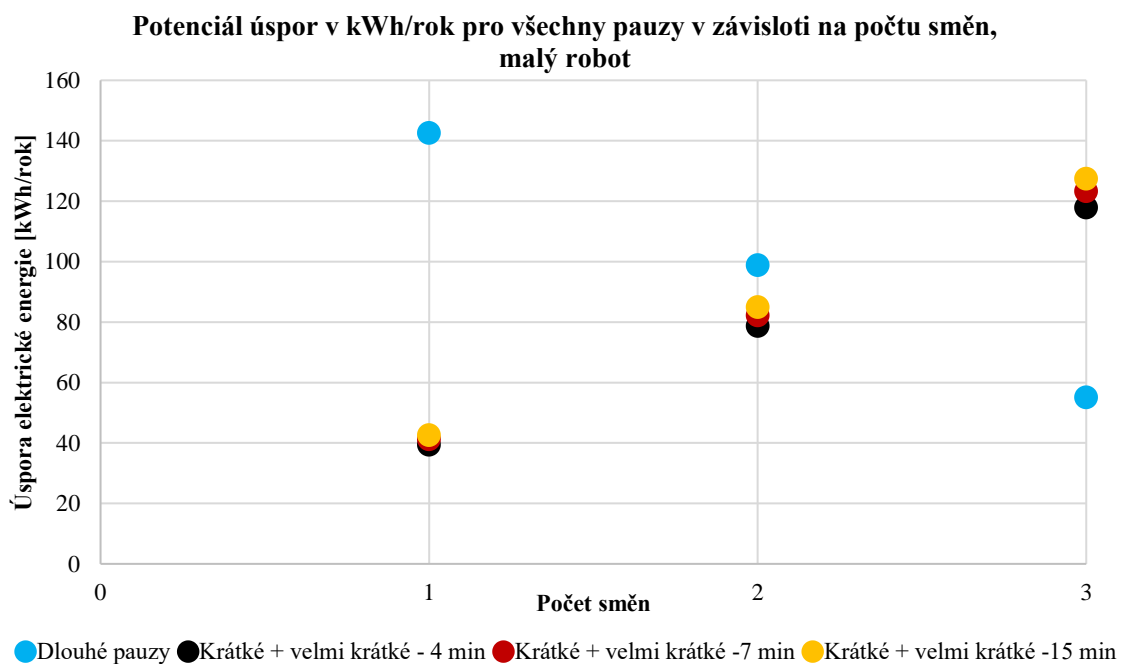
Jak je vidět na grafu 8.6, nejvíce elektrické energie je uspořeno při jednosměnném provozu při použití velkého průmyslového robota. To je dáno délkou pauzy mezi směnami, která trvá 16 hod a Mód spánku je tedy u robota aktivován na významnou dobu během roku. Úspora robota dosahuje na velkém robotu 596,42 kWh za rok, na malém 142,57 kWh.

8.4 Potenciál maximálních úspor

V rámci pracovního cyklu průmyslového robota se v průběhu roku mohou vyskytovat všechny výše uvedené typy pauz. Pro získání celkového potenciálu úspor elektrické energie je nezbytné zkombinovat vliv velmi krátkých, krátkých i dlouhých pauz. Je třeba vzít v úvahu, že velmi krátké a krátké pauzy se vyskytují v pracovní směně robota. Není tedy možné jen sečíst potenciál úspor během velmi krátkých pauz s potenciálem z krátkých pauz, jelikož například během pauzy na údržbu robot nepracuje, a tedy v této době nenastává velmi krátká pauza v podobě čekání robota v procesu. Je nutné znovu provést výpočet úspor energie dohromady pro velmi krátké a krátké pauzy. Výsledky jsou zobrazeny na grafech 8.7 a 8.8, kde jsou krátké + velmi krátké pauzy zobrazeny pro každý počet směn ve třech případech, pro velmi krátké pauzy trvající 4, 7 nebo 15 min. Ve stejných grafech je zobrazen také potenciál úspory elektrické energie během dlouhých pauz.

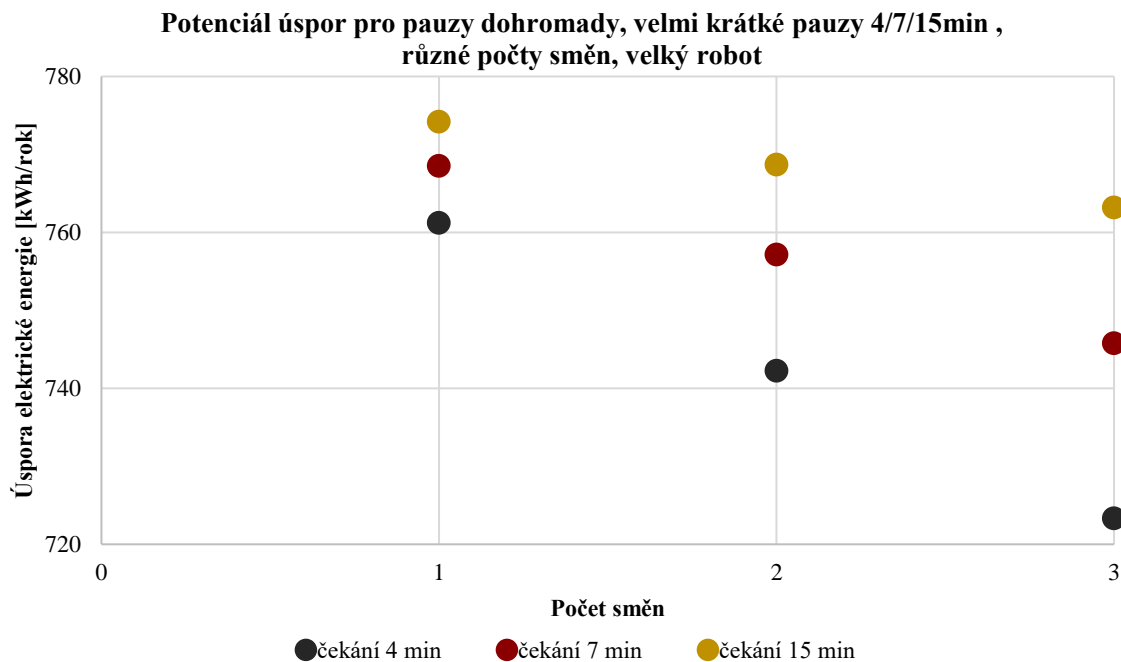


Graf 8.7 - Potenciál úspor energie ve všech pauzách, velký robot.

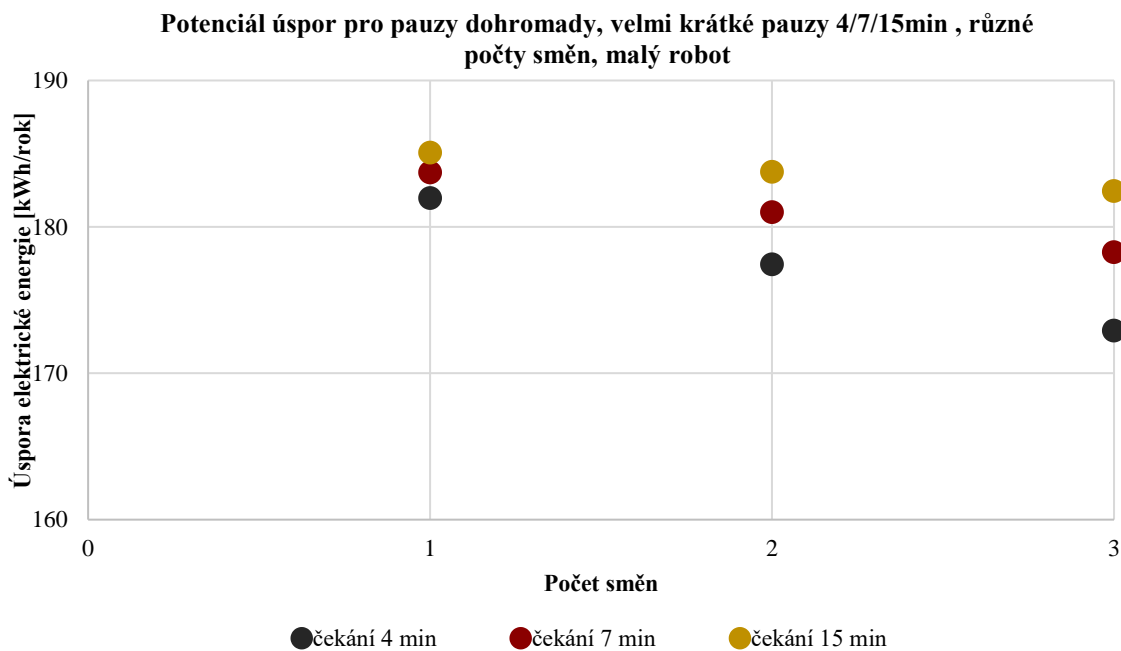


Graf 8.8 - Potenciál úspor energie ve všech pauzách, malý robot.

Pro zjištění celkového potenciálu úspor energie za rok je třeba sečíst úspory energie z různých typů pauz. Pro každou směnu tedy provedeme součet úspory z dlouhé pauzy a úspory z krátké + velmi krátké pauzy pro všechny tři doby čekání robota (4,7 nebo 15 min). Pro každou směnu dostaneme tři součty, které jsou zobrazeny na grafech 8.9 a 8.10.



Graf 8.9 - Celkový potenciál úspor energie v kWh/rok, velký robot.



Graf 8.10 - Celkový potenciál úspor energie v kWh/rok, malý robot.

Z grafu můžeme identifikovat, že k největší úspoře energie dochází při jednosměnném provozu pro všechny doby čekání robota. To je způsobeno převládajícím vlivem dlouhých pauz, které mají největší dopad na celkovou úsporu. I když velmi krátké a velmi krátké pauly přináší největší úsporu v třisměnném provozu (je vidět na grafech 8.2 a 8.5), po sečtení s dlouhými pauzami je neúspornější jednosměnný provoz.

Lze tedy říci, že použití úsporných módů na průmyslových robotech je nejvýhodnější v jednosměnném provozu. Pro lepší ilustraci tohoto zjištění je v následující kapitole představen

příklad konkrétní výrobní linky, která je inspirována reálnými linkami a na které lze dosáhnout významných úspor energie.

8.5 Úspory na výrobní lince

Výrobní linka, kde bude proveden výpočet úspor elektrické energie s použitím uspání robotů má 3 pracoviště. Uvažujeme situace, kdy linka pracuje v jednosměnném, dvousměnném i třisměnném provozu. Při všech směnách pracují roboty ve stejných výrobních cyklech.

- 1. pracoviště – 4 velké průmyslové roboty obsluhují svařovací CNC stroj. Roboty manipulují s objekty určenými na svaření 30 s a poté čekají 6 min na svaření.
- 2. pracoviště – 4 velké průmyslové roboty manipulují s objekty. Roboty během procesu nečekají.
- 3. pracoviště – 2 malé průmyslové roboty a 2 velké průmyslové roboty obsluhují obráběcí CNC stroj. Roboty manipulují s objekty 30 s a poté čekají 3 min.

Pauzy	Doba trvání
Počet pracovních dní [dny/týden]	5
Počet směn / den	1
Odstávka [dny/rok]	5
Změna nastavení / komponent robotu [min/týden]	60
Pauza na schůzku /směnu [min/měsíc]	60
Údržba robota [min/měsíc]	60
Pauza na oběd / směnu [min/den]	30

Tabulka 8.3 - Pauzy na pracovišti.

Na každém pracovišti máme 4 průmyslové roboty a vždy jednu hlavní robotickou řídicí jednotkou s aktivovaným softwarem na přepínání úsporných módů. Ostatní 3 robotické systémy jsou ovládány touto řídicí jednotkou. Úspora hlavní řídicí jednotky je dána hodnotami v tabulce 7.1, nicméně úspora ostatních 3 robotů je při každé pauze dána úsporou v Módu úspory 2. Všechny 3 pracoviště mají stejný časový rozvrh obsahující pauzy uvedené v tabulce 8.5. Kromě pauz v tabulce má pracoviště 1. a 2. čekací minutové pauzy během provozu.

Pro každé pracoviště provedeme výpočet úspor s využitím naměřených dat z kapitoly 7.2. Sečtením úspor na všech pracovištích dostaneme výslednou úsporu na celé výrobní lince (na 12 průmyslových robotech). Výsledné úspory jsou uvedeny v tabulkách 8.4 a 8.5 uvedených níže. V první tabulce jsou uvedeny vypočtené hodnoty úspory na každém pracovišti při jednosměnném provozu. V druhé tabulce jsou pro porovnání s jednosměnným provozem zobrazeny vypočtené hodnoty úspory na stejné výrobní lince při dvousměnném a třisměnném provozu. Z vypočtených dat vidíme, že je úspora podle předpokladu největší při jednosměnném provozu, dále následuje dvousměnný provoz a nejmenší úspora byla vypočtena při třisměnném provozu. Úspora dosažená při jednosměnném provozu činí 3 575 kWh/rok. Taková úspora již není zanedbatelná a může mít vliv na snížení energetické náročnosti linky.

Pracoviště 1			
	Krátké pauzy + čekání robota	Dlouhé pauzy	Celkem
Potenciál úspor el. energie [kWh/rok] 1. robot	172	618	790
Potenciál úspor el. energie [kWh/rok] 2-4. robota	61	163	670
Celkem za 2 velké roboty [kWh/rok]			1 460
Pracoviště 2			
	Krátké pauzy	Dlouhé pauzy	Celkem
Potenciál úspor el. energie [kWh/rok] 1. robot	18	618	636
Potenciál úspor el. energie [kWh/rok] 2-4. robota	4	163	501
Celkem za 4 velké roboty [kWh/rok]			1 137
Pracoviště 3			
	Krátké pauzy + čekání robota	Dlouhé pauzy	Celkem
Potenciál úspor el. energie [kWh/rok] 1. robot	160	596	756
Potenciál úspor el. energie [kWh/rok] 2. robota	19	163	182
Potenciál úspor el. energie [kWh/rok] 2-4. robota	19	92	223
Celkem za 2 malé roboty a 2 velké roboty [kWh/rok]			1 161
Celkem [kWh/rok]			3 757

Tabulka 8.4 - Vypočtené úspory na výrobní lince jednosměnný provoz.

	Jednosměnný	Dvousměnný	Třisměnný
Úspora celkem [kWh/rok]	3 757	3 427	3 003

Tabulka 8.5 - Vypočtené úspory na výrobní lince, porovnání provozů.

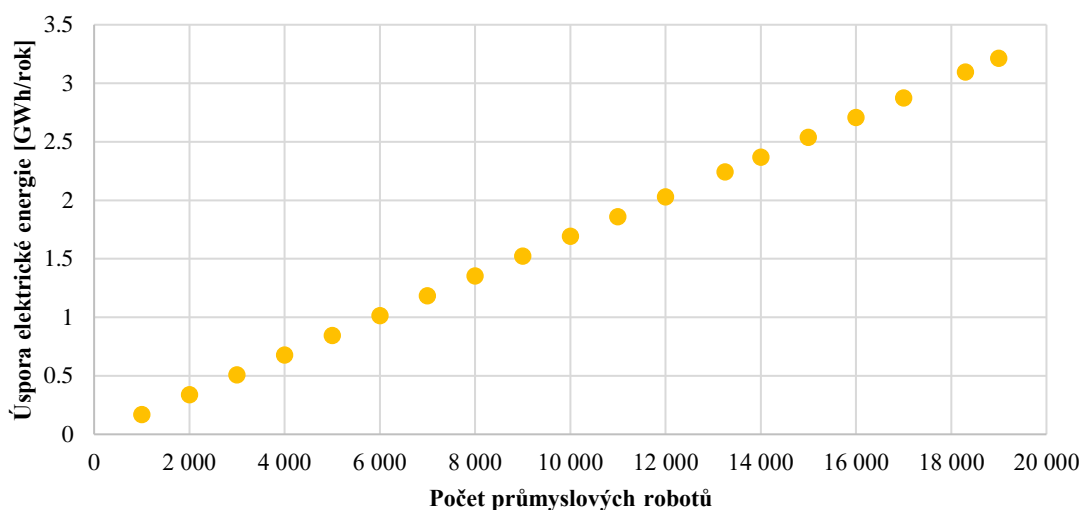
8.6 Úspory v průmyslu ČR

Motivací k hledání úspor elektrické energie průmyslových robotů byla především snaha o snížení energetické náročnosti průmyslu v ČR. Jak bylo uvedeno v kapitole 2, průmyslové roboty se nejvíce využívají v automobilovém průmyslu, a proto snížení jejich spotřeby má největší vliv právě na toto odvětví. V této kapitole byly provedeny výpočty úspor, které mohou nastat při uspaní robotů na výrobní lince. Nyní se zaměříme na potenciál úspor v průmyslu ČR a v automobilovém odvětví.

Pokud bychom aplikovali úsporné módy na všechny průmyslové roboty, mohlo by k významnému snížení spotřeby elektrické energie průmyslu. Jelikož každá výrobní linka disponuje jiným výrobním procesem a pracovním rozvrhem robota, není možné přesně říci, kolik energie by bylo možno úspornými módy ušetřit. Nicméně je možné udělat přibližný výpočet za určitých zjednodušení. V předchozích příkladech jsme uvažovali pracovní týden trvající 5 dní a jednosměnný, dvousměnný i třisměnný provoz. Ovšem mnoho výrobních linek pracuje 7 dní v týdnu a počet směn je různý na každé lince. Proto budeme předpokládat, že polovina všech instalovaných robotů je v provozu 5 dní v týdnu, polovina 7 dní. Dále předpokládáme, že polovina robotů pracuje v jedné směně a polovina ve třech. Časový rozvrh robotů bude mít krátké pauzy

uvedené v tabulce 8.2 a roboty nebudou čekat během procesu a budou pracovat nepřetržitě celou výrobní směnu. Posledním zjednodušením, které budeme brát v úvahu je, že polovina robotických jednotek bude mít aktivovanou možnost přechodu do úsporných módů a bude ovládat druhou polovinu robotů. S těmito zjednodušeními lze stanovit přibližnou hodnotu úspory všech robotů. Stanovené úspory elektrické energie zobrazuje graf 8.11. Je zde uvedena možná úspora elektrické energie pro různé počty průmyslových robotů. Jak je uvedeno v kapitole 2, v roce 2021 bylo v ČR přibližně 18 300 průmyslových robotů. Z grafu vyčteme, že pro tento počet robotů by úspora činila 3 GWh. Pro zhodnocení významu těchto úspor je možné zjistit, jaký podíl představují na celkové spotřebě průmyslu v daném roce. Uspáváním robotů by se uspořilo 0.01 % spotřeby elektrické energie celého průmyslu.

Potenciál úspor robotů v ČR v GWh/rok



Graf 8.11 - Potenciál úspor robotů v ČR.

Pokud bychom chtěli vypočítat možné úspory v automobilovém průmyslu, vyjdeme z předpokladu uvedeného v kapitole 2.3, a to že 75 % průmyslových robotů v ČR je právě v tomto odvětví. V automobilovém průmyslu je tedy odhadem přibližně 13 250 robotů a při použití úsporných módů by se na těchto robotech uspořilo přibližně 2 GWh za rok. To představuje přibližně 0.06 % spotřeby elektrické energie automobilového průmyslu. Přestože je tato úspora z procentuálního hlediska nízká, stále má význam v rámci celkové snahy o snížení energetické náročnosti průmyslu.

9. Ekonomické vyhodnocení

V této kapitole je provedeno ekonomické vyhodnocení pořízení softwaru pro aktivaci úsporných módů na výrobní linku popsanou kapitole 8.5 a její různé alternativy. Cílem ekonomického vyhodnocení je posoudit, zda je investice do softwaru výhodná či nikoliv.

Úvodní část kapitoly popisuje plánovanou investici a definuje metody zhodnocení investic. Následně jsou zde stanoveny vstupní parametry pro vyhodnocení různých scénářů projektu. V závěru je provedena citlivostní analýza, která slouží k určení změn ekonomických výsledků v závislosti na změně vstupních parametrů.

9.1 Popis investice

Vyhodnocovanou investicí je nákup softwaru PROFIenergy pro výrobní linku se 3 pracovišti a celkem 12 roboty. Konkrétní aplikace jednotlivých robotů byla popsána v kapitole 8.5. V této kapitole byly rovněž provedeny výpočty úspor elektrické energie za rok pro různé alternativy provozu linky, a to v pro jednosměnný, dvousměnný a třisměnný provoz, a také jednosměnný provoz za předpokladu, že roboty nečekají během výrobního procesu a úsporné módy jsou aktivovány pouze mezi pracovními dny a během nepracovních dní. Ekonomické vyhodnocení provedeme pro všechny 4 alternativy linky.

9.2 Metody zhodnocení investice

Pro ekonomické vyhodnocení jsou vybrány metody založené na hotovostních tocích (cash flows), které zohledňují faktor času. Tyto metody berou v úvahu skutečnost, že peníze mají různou hodnotu v závislosti na čase a přináší tak velmi dobré zhodnocení výnosnosti plánovaných investic. K zhodnocení investice do softwaru využijeme kritérium čisté současné hodnoty (NPV), vnitřního výnosového procenta (IRR) a doby návratnosti.

9.2.1 NPV

Čistá současná hodnota (NPV) je kritérium, jehož výsledkem je hodnota, kterou investice přinese za celou dobu trvání projektu. Pro výpočet NPV je nutné znát dobu životnosti investice a odhadnout budoucí finanční toky během doby životnosti. Pokud vyjde NPV kladné číslo, je investice ekonomicky výdělečná. NPV je dáno jako suma diskontovaných cash flows a vypočte se následujícím vzorcem:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^T DCF_t$$

Kde:

NPV je čistá současná hodnota [Kč]

CF_t jsou finanční toky (cash flows) v jednotlivých letech od t do T [Kč]

t je index jednotlivých let

T je doba životnosti projektu [roky]

r je diskont, diskontní úroková míra [%]

DCF_t je diskontovaný cash flow v jednotlivých letech [Kč] [45]

9.2.2 IRR

Vnitřní výnosové procento (IRR) je další kritérium hodnocení investic a jeho hodnota je rovna diskontu, pro který by výsledné NPV projektu bylo rovné nule. Projekt realizujeme, je-li hodnota IRR větší než stanovený diskont r . IRR je dáno vztahem:

$$\sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} = 0$$

Kde:

IRR je vnitřní výnosové procento [%]

CF_t jsou finanční toky (cash flows) v jednotlivých letech od t do T [Kč]

T je doba životnosti projektu [roky]

t je index jednotlivých let [45]

9.2.3 Reálná doba návratnosti

Posledním sledovaným kritériem je doba návratnosti (Payback Period), která udává, za kolik let mají kumulované příjmy stejnou hodnotu jako investiční výdaje. Reálná doba návratnosti zohledňuje i diskontní sazbu a vypočteme ji postupným načítáním ročních diskontovaných cash flows, dokud se kumulovaný diskontovaný cash flow nerovná investičním výdajům. Aby investice dávala smysl, musí být doba návratnosti kratší, než je životnost investice. [45]

$$\sum_{t=0}^{PP} DCF_t = I$$

Kde:

PP je reálná doba návratnosti [roky]

DCF_t je diskontovaný cash flow v jednotlivých letech [Kč]

t je index jednotlivých let

I jsou investiční výdaje [Kč] [45]

9.3 Vstupní parametry

Vstupní parametry projektu představují jasně definované podmínky, za kterých provedené ekonomické vyhodnocení platí. Mezi vstupní parametry řadíme výdaje a příjmy nutné k určení cash flows v jednotlivých letech a dále životnost projektu a diskont.

9.3.1 Výdaje

Výdaje projektu souvisí s pořízením softwaru a jeho následným používáním. Výdaje spojené s pořízením softwaru jsou nutné pro zahájení projektu. Dále se během doby životnosti v projektu každoročně vyskytují výdaje na provoz.

9.3.1.1 Investiční výdaje

Do investiční výdajů zařadíme pořizovací cenu softwaru a výdaje na jeho správnou instalaci a naprogramování. Software je nutno aktivovat na řídicí jednotce robota, která ovládá dané pracoviště. Na výrobní lince máme 3 pracoviště a budeme tedy potřebovat 3 aktivační klíče

k softwaru, přičemž cena jednoho klíče je 10 000 Kč. Po koupit softwaru je nutné naprogramovat řídicí PLC tak, aby docházelo k přechodu robotů do úsporných módů ve správný okamžik. Programování vyžaduje komplexní znalost jednotlivých výrobních procesů a všech komponent na výrobní lince, proto je pro tuto práci nutný zkušený programátor. Z odhadu založeného na konzultaci s programátorem robotických aplikací by zprovoznění softwaru trvalo přibližně 5 pracovních dní. Mzdu zkušeného programátora odhadneme na 12 000 Kč. Shrnutí všech investiční výdajů je uvedeno v tabulce níže.

Investice			Investiční výdaje [Kč]
Zprovoznění a programování softwaru			12 000
Cena softwaru	počet aktivačních klíčů	cena jednoho klíče [Kč]	30 000
	3	10 000	
Celkem			42 000

Tabulka 9.1 - Investiční výdaje.

V případě, že výrobní linka nedisponuje PLC systémem s podporou uspávání robotů, je nezbytné zahrnout další investiční výdaje na jeho zařízení. Ceny PLC systému a jeho komponent jsou převzaty z ceníku od společnosti SIDAT. Ekonomické vyhodnocení bude provedeno jak pro případ, kdy již linka PLC má, tak pro případ, kdy je třeba ho zakoupit.

Zařízení	Cena [Kč]
PLC	14 600
IO modul	6 300
Zdroj napájení	17000
Celkem	37 900

Tabulka 9.2 - Cena PLC a jeho komponent.

9.3.1.2 Výdaje na provoz

Pro zajištění spolehlivého uspávání robotů na výrobní lince je nezbytné pravidelně aktualizovat programový kód s ohledem na případné úpravy výrobního procesu. Také je nutné provádět pravidelnou kontrolu programu a jeho případné opravy. Tento proces vyžaduje zkušeného pracovníka, který má znalosti jak v oblasti programování PLC, tak v oblasti robotických aplikací. Uvažujeme, že tato práce musí být provedena vždy jednou ročně. První možností je svěřit tuto práci zkušenému zaměstnanci v rámci jeho pracovního úvazku, tudíž nevzniknou na provoz žádné výdaje za mzdy. Druhou možností je najmout externího servisního technika. V takovém případě počítáme s výdaji za jeho služby. Uvažujeme, že cena za tuto práci je 2 000 Kč/hod a celý proces trvá přibližně 2 hod. Celkové výdaje za servisního technika činí tedy 4 000 Kč ročně. Při výpočtech budeme uvažovat meziroční růst výdajů za servisního technika o 6.5 %, což vychází z meziroční změny mezd v roce 2022 [46].

Výdaje na provoz za stávajícího zaměstnance [Kč/rok]	0
Výdaje na provoz za externího servisního technika [Kč/rok]	4 000

Tabulka 9.3 - Výdaje na provoz..

9.3.2 Úspory za elektrickou energii

Kromě výdajů jsou důležitým vstupem do ekonomické analýzy také příjmy. Za příjmy považujeme finanční úspory vzniklé nižší spotřebou elektrické energie robotů díky úsporným módům. Finanční úspory jsou dány cenou elektrické energie za kWh a množstvím uspořené elektrické energie v kWh. V našem případě byla v kapitole 8.5 vypočtena úspora elektrické energie na zkoumané výrobní lince (pro všechny 4 alternativy) na hodnoty uvedené v první řádce tabulky níže. Pro základní scénář budeme uvažovat, že výrobní procesy zůstávají stejné a úspora energie zůstává konstantní po celou dobu životnosti projektu v každé alternativě.

Dále je nezbytné stanovit cenu elektrické energie. Budeme vycházet z ceníku od ČEZ ESCO pro velkoodběratele s ročním odběrem nad 50 MWh. Přesnou hodnotu ročního odběru výrobní linky neznáme, nicméně předpokládáme, že převyšuje tuto hodnotu. Dále předpokládáme, že je výrobní linka napojena na síť nízkého napětí (nn). V rámci cenového tarifu vhodného pro zkoumanou výrobní linku, konkrétně tarifu C03d určeného pro podnikatele s vyšší spotřebou elektřiny, se zaměříme pouze na variabilní část ceny elektřiny za odebranou kWh.

Variabilní neregulovaná část ceny elektřiny je podle ceníku na rok 2023 s trváním dodávek na 12 měsíců stanovena na 5.296 Kč/kWh [47]. Regulovaná distribuční část ceny pro odběr z hladiny nn je na území ČEZ Distribuce stanovena na 1.135 Kč/kWh. K této ceně je třeba připočítat další variabilní složky ceny elektřiny, kterými je cena za systémové služby ve výši 0.137 Kč/kWh a ekologická daň z elektřiny ve výši 0.034 Kč/kWh. Celková cena za odebranou kWh je tedy ve výši **6.603 Kč/kWh**. Finanční úspory za elektrickou energii v prvním roce po instalaci softwaru jsou uvedeny v následující tabulce.

	Jednosm.	Dvousm.	Třism.
Úspora elektrické energie [kWh/rok]	3 756	3 427	3 003
Cena elektrické energie [Kč/kWh]	6.603	6.603	6.603
Ušetřené finance za elektřinu první rok po instalaci [Kč]	24 800	22 630	19 830

Tabulka 9.4 - Ušetřené finance za elektrickou energii.

Jak se budou úspory vyvíjet v dalších letech je dáno měnící se cenou za elektrickou energii. Vývoj ceny elektřiny do budoucích let byl v kapitole 2.2 odhadnut z cen ročních futures kontraktů s dodáním v následujících letech. Pro ekonomické vyhodnocení budeme na základě uvedeného odhadu ceny elektřiny předpokládat následující vývoj variabilní neregulované složky ceny elektřiny.

- V roce 2024 předpokládáme pokles ceny na 144 EUR/MWh, což odpovídá 3.37 Kč/kWh při aktuálním kurzu EUR/CZK 23.4 [20, 48].
- Do roku 2027 očekáváme pokles ceny na přibližně 99 EUR/MWh, což je 2.34 Kč/kWh [20].
- Po roce 2027 předpokládáme stabilizaci ceny na hodnotě 100 EUR/MWh neboli 2.34 Kč/kWh [20]
- Cenu regulované variabilní složky elektřiny předpokládáme konstantní po celou dobu projektu.

9.3.3 Životnost projektu

Životnost softwaru je teoreticky nekonečná, nicméně prakticky je omezena životností průmyslových robotů, na kterých je software používán. Jednotlivé aktivační klíče k softwaru lze použít jen jednou, a jakmile skončí doba životnosti robota, končí i životnost softwaru. Je proto nutné stanovit předpokládanou životnost průmyslových robotů na výrobní lince.

Pro roboty se obvykle uvádí doba životnosti mezi 10 až 20 lety. Uspávání robotů by nemělo mít na jejich životnost vliv. Vzhledem k tomu, že roboty na zkoumané výrobní lince pracují při různém počtu směn 5 dní v týdnu, což je spíše podprůměrné využití, a předpokládáme jejich pravidelnou údržbu, můžeme stanovit dobu životnosti robotů a zároveň celého projektu na **20 let**.

Pokud zahrneme do investice i nákup PLC a jeho komponent je třeba vzít v potaz jejich omezenou životnost, kterou odhadneme na 15 let. Poté je třeba investovat znovu do nových zařízení, což se při výpočtu cash flow projeví v 16. roce vyššími výdaji. Cenu komponent za 15 let budeme uvažovat stejnou jako dnes (cena uvedená v tabulce 9.2).

9.3.4 Diskont

Pokud předpokládáme, že průmyslový podnik bude investici financovat vlastním kapitálem, stanovuje diskont požadovanou výnosnost vlastního kapitálu. V této práci je diskont stanoven odhadem na základě průměrné hodnoty výnosnosti (rentability vlastního kapitálu) v odvětví zpracovatelského průmyslu v posledních letech dostupné na stránkách ČSÚ [49]. Diskont projektu stanovíme na 12 %.

9.3.5 Shrnutí vstupních parametrů

Ekonomická analýza má mnoho proměnných a v předchozích kapitolách byly definovány jejich hodnoty pro základní scénář. Pro upřesnění je zde uvedeno shrnutí vstupních parametrů, pro které platí následné ekonomické vyhodnocení.

- Software je aplikován na všechna pracoviště na výrobní lince popsané v kapitole 8.5.
- Cena aktivačního klíče na jedno pracoviště je 10 000 Kč. Pro všechna tři pracoviště jsou tedy investiční výdaje 30 000 Kč.
- Uvažujeme, že výrobní linka disponuje řídicím PLC, které podporuje uspávání robotů.
- Pro instalaci softwaru a jeho prvotní naprogramování si najmeme zkušeného programátora a výdaje za jeho práci jsou 12 000 Kč.
- Výdaje na provoz jsou nulové, jelikož seřizování softwaru bude v rámci náplně práce stávajícího zaměstnance a ten za tuto práci nebude ohodnocen navíc.
- Předpokládáme, že výrobní linka má roční spotřebu vyšší než 50 MWh a odebírá elektřinu z napěťové hladiny nn. Pro tento případ je cena regulované i neregulované složky elektřiny určena z ceníku od ČEZ ESCO dostupného na [47, 50]. Cena je fixována na 12 měsíců. Po prvním roce je cena neregulované složky elektřiny odhadnuta z obchodovaných kontraktů futures na burze EEX, jak je uvedeno v kapitole 2.2.
- Cenu regulované složky elektřiny předpokládáme konstantní po celou dobu projektu na hodnotě 1.27 Kč/kWh.
- Diskont je stanoven na 12 %.
- Životnost projektu je 20 let.

- Průmyslové roboty na všech pracovištích pracují během let stále stejně a úspora elektrické energie je konstantní během všech let životnosti projektu, její hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.4.

9.4 Vyhodnocení ekonomické analýzy

Na základě uvedených předpokladů jsou v tabulce 9.5 uvedeny výsledné hodnoty NPV, IRR a doby návratnosti. Výpočty jednotlivých kritérií jsou uvedeny v excelové tabulce v příloze číslo 5.

	Jednosm.	Dvousm.	Třism.
NPV [Kč]	74 000	64 000	51 000
IRR [%]	43	39	33
Reálná doba návratnosti [roky]	3	3	4

Tabulka 9.5- Výsledky ekonomické analýzy.

Z tabulky vyplývá, že investice je ekonomicky výhodná pro všechny uvedené alternativy projektu, nicméně nejlépe je vyhodnocena alternativa při **jednosměnném provozu**. NPV je zde kladné a jeho hodnota 74 000 Kč je přibližně 2.5krát vyšší než hodnota investice. Tento výsledek značí vysoký přínos investice. Další ukazatel IRR potvrzuje, že je projekt ekonomicky přijatelný. IRR je 43 %, což je hodnota mnohem vyšší než požadovaná výnosnost 12 %. Reálná doba návratnosti je 3 roky. Porovnání této doby s celkovou životností projektu stanovené na 20 let ukazuje, že je návratnosti velmi krátká. Tento fakt je významný v případě, že by se cena elektřiny dlouhodobě vyvíjela méně příznivě, než bylo předpokládáno ve vstupních parametrech. Krátká doba návratnosti znamená, že se investiční výdaje vrátí rychleji, než by mohlo dojít k výrazné změně ceny elektřiny. Tím se snižuje riziko vlivu neočekávaných změn na výhodnost investice.

Celkově lze konstatovat, že investice je ekonomicky atraktivní a s ohledem na výsledky analýzy se doporučuje do projektu investovat. Z ekonomického hlediska je nejvýhodnější investovat do softwaru, pokud je linka provozována v jednosměnném režimu, což se předpokládalo, jelikož úspora energie na této lince dosahovala díky úsporným módům nejvyšších hodnot.

9.5 Citlivostní analýza a možné scénáře projektu

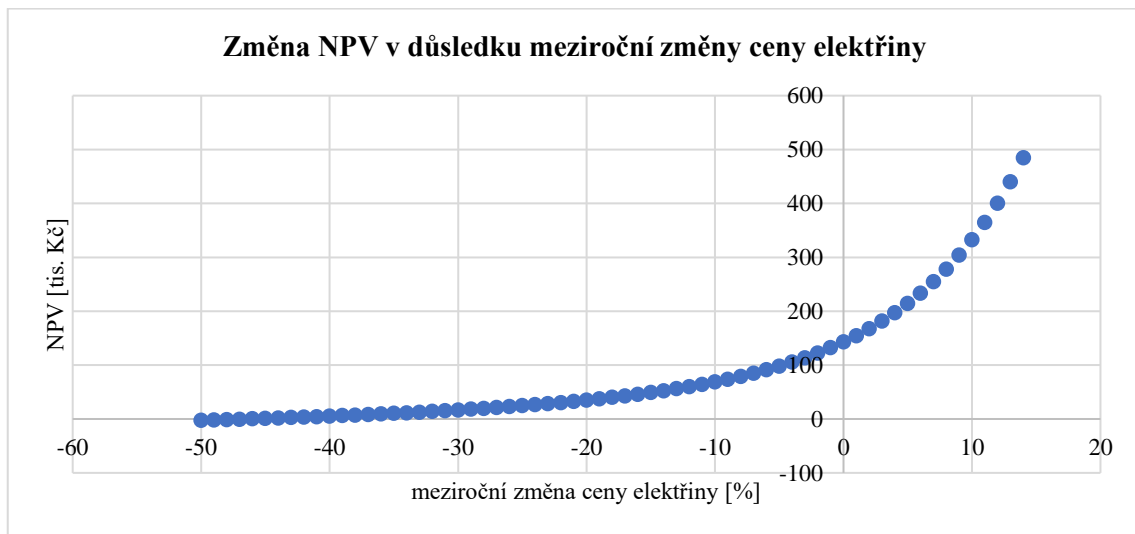
Alternativní scénáře projektu lze prozkoumat pomocí citlivostní analýzy, kdy se mění vždy jeden vstupní parametr, zatímco ostatní parametry zůstávají stejné jako v základním scénáři. Citlivostní analýzu provedeme pro nejvýhodnější možnost výrobní linky, tedy pro **jednosměnný provoz**. Hodnota NPV při základním scénáři je v grafech reprezentována červeným čtvercem. Tato hodnota slouží jako referenční bod pro porovnání s hodnotami NPV při jiných vstupech. Dále je v kapitole proveden výpočet ekonomického vyhodnocení pro scénář projektu, kdy je nutné zakoupit PLC a scénář, kdy je třeba najmout externího servisního technika.

9.5.1 Citlivostní analýza

9.5.1.1 Meziroční změna ceny elektřiny

V grafu níže je zobrazeno, jak se mění NPV v závislosti na meziroční změně ceny elektřiny. Počáteční hodnota ceny elektřiny je stanovena na 6.603 Kč/kWh stejně jako v základním scénáři. Hodnota NPV je kladná až do meziročního poklesu ceny elektřiny o 50 %.

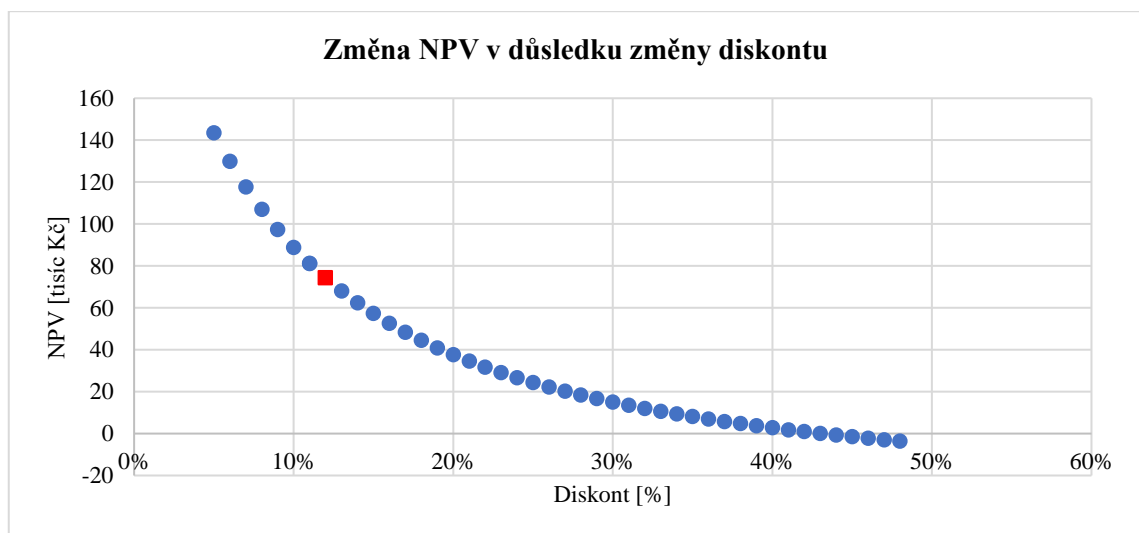
Takto významný pokles ceny elektřiny v průběhu životnosti projektu je velmi nepravděpodobný. Proto můžeme předpokládat, že cena elektřiny nebude mít vliv na rozhodnutí, zda do projektu investovat či nikoliv.



Graf 9.1 - NPV v závislosti na meziroční změně ceny elektřiny.

9.5.1.2 Změna diskontu

Významným faktorem ovlivňující NPV je také diskont. Na grafu graf 9.2 je zobrazena závislost NPV na diskontu. Vidíme, že s rostoucím diskontem se NPV snižuje. V případě, kdy je diskont nad hranicí 43 %, je NPV záporné a projekt se stává nevýhodným. Tato hodnota diskontu současně odpovídá vypočtenému IRR v základním scénáři.

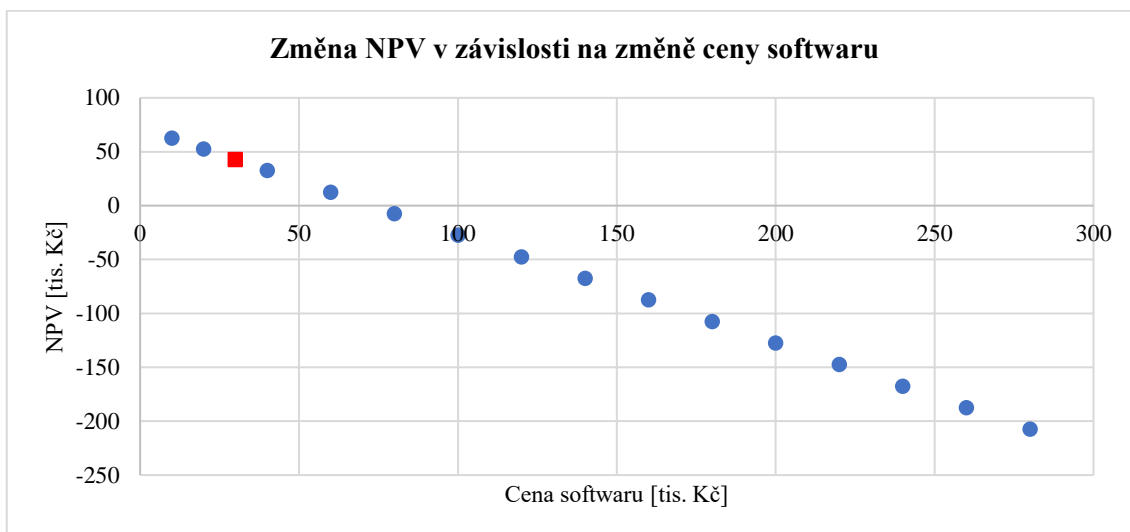


Graf 9.2 - NPV v závislosti na změně diskontu.

9.5.1.3 Změna ceny softwaru

V grafu je zobrazeno, jak se mění NPV v závislosti na změně ceny softwaru. Vidíme, že investice zůstává výhodná i při výrazném zvýšení ceny. Hodnota NPV je kladná až do ceny přibližně 104 000 Kč. Pokud by cena softwaru překročila tuto hranici, NPV by se dostalo do

záporných hodnot, což signalizuje ztrátovou investici, nicméně tak velké zvýšení ceny softwaru je velmi nepravděpodobné.



Graf 9.3 - NPV v závislosti na ceně softwaru.

9.5.2 Scénář projektu s investicí do PLC

Další proměnnou, která může ovlivnit výhodnost investice, je potřeba pořízení PLC a jeho komponent, které jsou uvedeny i s cenami v tabulce 9.2.

Pořízení těchto zařízení znamená dodatečné investiční výdaje ve výši 37 900 Kč a celkové výdaje na investici jsou tedy 79 900 Kč. Dále do výpočtu NPV zahrneme i opěťované pořízení zařízení v 16. roce životnosti projektu. NPV pro tento scénář je stále kladné a má hodnotu 30 286,2 Kč. IRR vychází na 19 %, což je stále více než požadovaných 12 %. Reálná doba návratnosti se ovšem prodlužuje na 8.

	Scénář s PLC	Základní scénář
NPV [Kč]	30 000	74 000
IRR [%]	19	43
Reálná doba návratnosti [roky]	8	3

Tabulka 9.6 - Výsledky ekonomické analýzy se zahrnutím pořízení PLC.

9.5.3 Scénář projektu s prací servisního technika

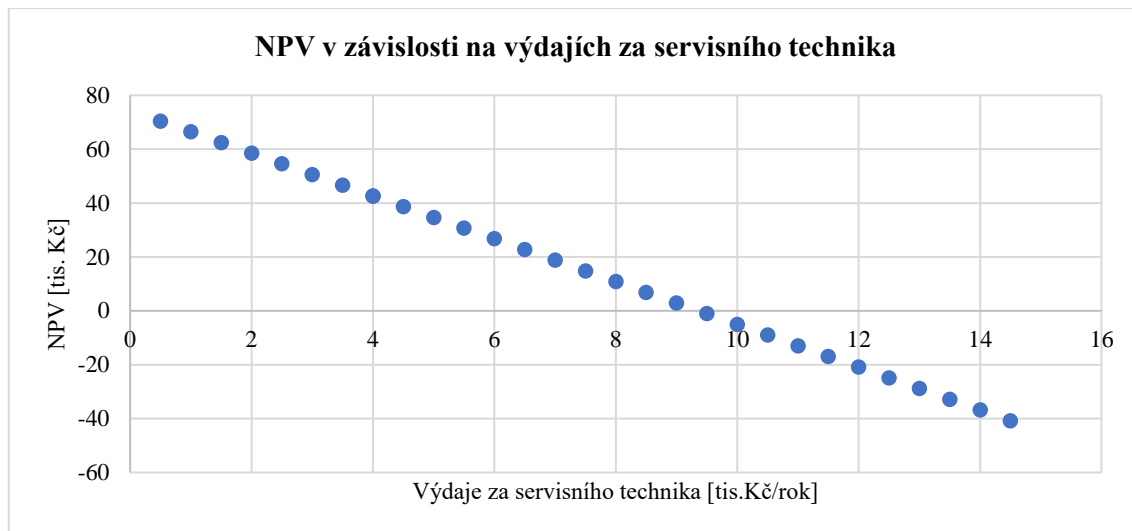
Poslední možný scénář projektu zahrnuje nutnost najímat pravidelně servisního technika, který bude zajišťovat kontrolu a aktualizaci softwaru. Tato situace může nastat v případě, kdy není k dispozici zaměstnanec se specializovanými dovednostmi pro tyto úkoly. Mzda servisního technika je uvedena v tabulce 8.3.

	Scénář s externím servis. technikem	Základní scénář
NPV [Kč]	28 000	74 000
IRR [%]	28	43
Reálná doba návratnosti [roky]	4	3

Tabulka 9.7 - Výsledky ekonomické analýzy s prací servisního technika.

I přes tyto každoroční dodatečné výdaje zůstává hodnota NPV kladná a IRR vyšší než stanovený diskont. Reálná doba návratnosti se prodlouží na 4 roky.

Pokud v grafu znázorníme závislost NPV na výdajích za servisního technika, zjistíme, že maximální částka, kterou můžeme zaplatit technikovi, aby bylo NPV stále kladné je 9 365 Kč ročně.



Graf 9.4 - NPV v závislosti na výdajích za servisního technika.

9.6 Ekonomická analýza obecné výrobní linky

V předchozím případě jsme zkoumali investiční výhodnost aktivace softwaru do konkrétního příkladu linky. Pro rozšíření analýzy provedeme i ekonomické vyhodnocení pořízení softwaru do obecné linky. Za takovou linku budeme považovat pracoviště, kde roboty nečekají během výrobního procesu a pracují 5 dní v týdnu v 1 až 3 směnách. V předchozí analýze jsme zkoumali linku s 12 roboty. Nyní se budeme zabývat situací, kdy máme linku s 50 roboty, což je častý příklad v praxi, a také linku s jedním robotem, abychom měli komplexní obraz vyhodnocení investice pro všechny případy. Životnost uvažujeme opět 20 let, diskont 12 % a cenu elektřiny stejnou jako v kapitole 9.3.2.

Výpočet ukazatelů finanční výnosnosti provedeme pro následující 4 scénáře.

- **Máme 1 velkého robota.** Doba nutná pro implementaci softwaru je 1 den, od toho se odvíjí výdaje investiční výdaje. Cena softwaru pro jednu řídicí jednotku činí 10 000 Kč.
- Linka má **50 velkých robotů** a uvažujeme tyto situace:
 - **Situace 1** - Software je aktivovaný na každém robotu a každá řídicí jednotka ovládá právě jedno robotické rameno. Potřebujeme tedy pro 50 robotů 50 aktivačních klíčů. Investice do softwaru vyjde na 500 000 Kč. Doba počátečního nastavení je 10 dní, jelikož je třeba konfigurovat větší linku.
 - **Situace 2** - Software je aktivovaný na každém druhém robotu, a tedy vždy jedna řídicí jednotka ovládá 2 robotická ramena. Potřebujeme tedy pro 50 robotů celkem 25 aktivačních klíčů na software, což dává cenu softwaru 250 000 Kč. Doba počátečního nastavení je zde také 10 dní.
 - **Situace 3** - Software je aktivovaný na každé 4. řídicí jednotce, což znamená, že každá řídicí jednotka ovládá celkem 4 robotická ramena (maximum, které je možné). Doba počátečního nastavení softwaru je opět 10 dní a cena softwaru celkem 130 000 Kč.

Výsledky jsou uvedeny v tabulkách níže. Vidíme, že dle všech ukazatelů vychází investice nejvýhodněji opět pro jednosměnný provoz. Jsou zde ve všech scénářích nejvyšší hodnoty NPV i IRR a zároveň nejmenší reálná doba návratnosti. Ve třisměnném provozu je investice pro scénář s jedním robotem a s 50 roboty v situaci 1 nevýhodná, jelikož NPV je záporné, IRR menší než zvolený diskont a doba návratnosti je větší než doba životnosti projektu.

U jednotlivých typů provozu dávají ukazatele NPV a IRR protichůdné výsledky. Například u jednosměnného provozu je NPV situace jedna vyšší než NPV situace 3, ale IRR situace 1 je nižší než IRR situace 3. Zároveň reálná doba návratnosti je kratší u situace 3. V takové situaci nelze jednoznačně rozhodnout, do které možnosti se vyplatí investovat více.

Jednosměnný	1 robot	50 robotů situace 1	50 robotů situace 2	50 robotů situace 3
NPV [Kč]	7 000	460 000	350 000	290 000
IRR [%]	22	27	34	46
Reálná doba návratnosti [roky]	7	5	4	3

Dvousměnný	1 robot	50 robotů situace 1	50 robotů situace 2	50 robotů situace 3
NPV [Kč]	2 000	200 000	180 000	180 000
IRR [%]	15	19	24	32
Reálná doba návratnosti [roky]	13	9	6	4

Třisměnný	1 robot	50 robotů situace 1	50 robotů situace 3	50 robotů situace 3
NPV [Kč]	- 3 000	-70 000	21 000	63 000
IRR [%]	7	10	13	19
Reálná doba návratnosti [roky]	> 20	> 20	16	9

Tabulka 9.8 Výsledky ekonomické analýzy obecné linky.

9.6.1 Shrnutí ekonomické analýzy pro obecnou výrobní linku

Představené výpočty jsou pouze obecné a pro konkrétní výrobní linku je třeba situaci vždy posoudit individuálně, jelikož výhodnost investice vždy závisí na určitých vstupních parametrech. Přesto je na základě výsledků z této i předchozí kapitoly 9.4 zřejmé, že aktivace úsporných módů na průmyslových robotech je nejvíce využitelná pro výrobní linky pracující v jednosměnném provozu. V jednosměnném režimu jsou roboty dlouhou dobu zastaveny mezi směnami a Mód spánku může být tedy aktivován po tuto dlouhou dobu. V kapitole 9.5.1 ukázala citlivostní analýza, že dokonce i při 50% meziročním poklesu ceny elektřiny byla investice z hlediska NPV stále výhodná. Z těchto faktů lze usoudit, že pořízení softwaru pro aktivaci úsporných módů na libovolnou jednosměnnou linku bude s velkou pravděpodobností ekonomicky výhodné. Jak je vidět v tabulce výše, aktivace softwaru je výhodná na jednoho robota i větší počet robotů, například 50. Nicméně pro větší počet robotů je investice výhodnější díky úsporám z rozsahu při implementaci a provozu softwaru.

Jednosměnný provoz je tedy nejvýhodnější z pohledu využití úsporných módů robotů. Je však důležitá brát v úvahu, že linky s vyšším počtem průmyslových robotů často fungují ve třisměnném provozu. V případě těchto linek nemusí být investice do softwaru vždy výhodná, a

proto je třeba pečlivě analyzovat všechny výrobní procesy na dané lince. V průběhu roku mohou některé výrobní linky přecházet z intenzivního třisměnného režimu na dvousměnný. V takových situacích se může stát, že i přestože by se investice nevyplatila pro celoroční třisměnný provoz, zde se vyplatí.

10. Závěr

Předmětem této bakalářské práce byla analýza možností redukce spotřeby elektrické energie průmyslových robotů. Úvodní část práce se zabývala průzkumem spotřeby elektrické energie průmyslových odvětví, které disponují největším počtem průmyslových robotů. Dále zde byla provedena prognóza vývoje budoucích cen elektřiny v České republice. Zjištěné skutečnosti ukázaly, že průmyslová odvětví značně přispívají k celkové spotřebě elektrické energie celé země a ceny elektřiny budou během následujících let klesat, ovšem stále budou výrazně vyšší než před rokem 2021. Hlavním cílem této práce bylo tedy nalézt možnosti optimalizace spotřeby robotů, jejichž následkem bude snížení energetické náročnosti průmyslu a současně nižší náklady za energii pro jednotlivé subjekty využívající průmyslové roboty.

Prvním krokem k dosažení cíle byla definice průmyslových robotů a jejich rozdělení z hlediska základních vlastností a využití v průmyslovém prostředí. V úvahu byly brány především vlastnosti konkrétních průmyslových robotů, které byly v této práci objektem praktického měření.

V další části práce byly nastíněny možnosti snížení spotřeby elektrické energie robotů. Na možnosti bylo pohlíženo z hlediska hardwarové i softwarové stránky a oba pohledy se zabývaly redukcí spotřeby během doby, kdy robot vykonává pohyb. Další potenciál úspory elektrické energie robotů byl nalezen pauzách robota mimo jeho hlavní pracovní činnost. Bylo zjištěno, že v těchto pauzách nejsou průmyslové roboty vždy zcela vypnuty, jelikož se s jejich zapnutím pojí vícero problémů, a spotřebovávají tedy energii zbytečně. Jako možné řešení tohoto problému bylo stanoveno přepínání robotů do úsporných módů v době nečinnosti.

Technologie přechodu průmyslových robotů do módů úspory byla v následujících kapitolách detailně popsána společně s jejími komponenty a postupy, které je nutné k její správné funkci dodržet. U průmyslových robotů byly definovány celkem 4 úsporné módy, z nichž každý měl přinést jinou úsporu elektrické energie.

Funkčnost úsporných módů bylo třeba ověřit praktickým měřením na konkrétních průmyslových robotech, což bylo popsáno v další části práce. K měření byly vybrány 2 průmyslové roboty. Na každém robotu bylo provedeno měření výkonu během stavu, kdy robot nepracuje, ale není zcela vypnut, a během všech úsporných módů. Z naměřených dat byla dále stanovena úspora výkonu pro každý mód úspory. Pouze dva z módů se ukázaly využitelné z hlediska snížení spotřeby robotů. Při úspornějším z nich byla úspora výkonu změřena na 88 W u většího robota a 21 W u menšího. Vzhledem k faktu, že přechod do módu s největší úsporou trvá určitou dobu, byla v závěru této kapitoly vyhodnocena minimální doba pauzy robota, kdy je výhodné tento mód aktivovat.

Data z předchozí části byla následně použita pro výpočet úspor elektrické energie. Výrobní linky s průmyslovými roboty byly rozděleny na jednosměnné, dvousměnné a třisměnné, jelikož právě délka pauzy mezi směnami měla největší vliv na úsporu. Pro stanovení úspor elektrické energie byla definována výrobní linka s 12 průmyslovými roboty a různými výrobními cykly. Následně byl pro tuto linku proveden výpočet úspor dosažených úspornými módy v pauzách robotů. Největší úspora byla dosažena v jednosměnném provozu linky a dosahovala hodnoty 3 757 kWh/rok.

Poslední sekci práce bylo ekonomické vyhodnocení pořízení softwaru pro aktivaci úsporných módů na výrobní linku definovanou v předchozí části. Z výsledků tohoto vyhodnocení vyplývá, že je investice do softwaru výhodná pro všechny uvažované scénáře linky, tedy pro jednosměnný, dvousměnný i třisměnný provoz. Nejvýhodněji vyšla investice podle předpokladu v případě, kdy je linka provozována v jednosměnném provozu. Hodnota NPV pro tento provoz

dosahuje pro základní scénář projektu 74 000 Kč. NPV je kladné, a navíc zhruba 2krát větší než počáteční investice, což svědčí o výhodnosti tohoto projektu. Nejdůležitějším vstupním parametrem do celé investice je cena elektrické energie, neboť ovlivňuje výši finančních úspor v jednotlivých letech a tím i příjmovou stránku hotovostních toků. Pro posouzení vlivu ceny elektrické energie na NPV byla provedena citlivostní analýza. Z ní vyplynulo, že NPV zůstává kladné až do meziročního poklesu ceny elektřiny o 50 %, což je situace, kterou v nejbližší době nepředpokládáme. Na závěr bylo provedeno ekonomické vyhodnocení teoretické výrobní linky s 50 průmyslovými roboty pro různé situace. Bylo zjištěno, že i při takovém počtu robotů je projekt podle vybraných kritérií výhodný téměř ve všech uvažovaných situacích.

Závěrem lze konstatovat, že snaha o snížení spotřeby průmyslových robotů má vzhledem k jejich širokému využití perspektivu i do budoucna. Tato bakalářská práce se podrobněji zaměřila jen na jedno z možných řešení, které bylo úspěšně vyhodnoceno jako výhodné. Přesto je důležité si uvědomit, že redukce spotřeby robotů na každé výrobní lince vyžaduje individuální přístup. Pro konkrétní linky je nezbytné rozšířit poznatky z této práce o hlubší analýzu výrobních procesů na dané výrobní lince.

Seznam použitých zkratek

ČR	Česká republika
CZ – NACE	Klasifikace ekonomických činností prováděných v České republice NACE Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne – Klasifikace ekonomických činností
EU	Evropská unie
HPH	hrubá přidaná hodnota
ERÚ	Energetický regulační úřad
ČSÚ	Český statistický úřad
Eurostat	Evropský statistický úřad
EEX	European Energy Exchange, Evropská energetická burza
ISO	International Organisation for Standardisation
EUR	Euro – společná evropská měna
PLC	programovatelný logický automat, programmable logic controller
IRC5	Industrial Robot Controller, 5 označuje pátou generaci řídicího systému
CNC	computer numerical control, stroje řízené počítačem
nn	nízké napětí
NPV	Nett Present Value, čistá současná hodnota
IRR	Internal rate of return, vnitřní výnosové procento
PP	Payback Period, doba návratnosti

Seznam použité literatury

- [1] ČSÚ. *Roční strukturální statistika průmyslu - Metodika* [online]. [vid. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/rocní-strukturalni-statistika-prumyslu-metodika>
- [2] ČSÚ. *Klasifikace ekonomických činností (CZ-NACE), Metodická příručka* [online]. [vid. 2022-12-07]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/klasifikace_ekonomicky_ch_cinnosti_cz_nace
- [3] EUROSTAT DATA BROWSER. *Gross value added and income by A*10 industry breakdowns* [online]. [vid. 2022-10-10]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NAMA_10_A10__custom_3597441/default/table?lang=en
- [4] KOŠŤÁKOVÁ, Tereza. Makroekonomická dvojčata. *STATISTIKA A MY* [online]. [vid. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.statistikaamy.cz/o-slozitem-jednoduse/makroekonomicka-dvojcata/>
- [5] KENTON, Will. Gross Value Added (GVA): Explanation, Formula, Example. *Investopedia* [online]. [vid. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/g/gross-value-added.asp>
- [6] MPO. *Státní energetická koncepce* [online]. [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument158059.html>
- [7] ERÚ. *Výkladové stanovisko energetického regulačního úřadu č. 8/2018* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/vykazy-vykladove-stanovisko-pro-vykazovani-statistiky-eru>
- [8] SKUPINA ČEZ. *Století české energetiky* [online]. [vid. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vzdelavani-a-vyzkum/pro-verejnost/energeti-ahistorie-a-soucasnost/stoleti-ceske-energetiky>
- [9] ERÚ. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR pro rok 2020* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/rocní-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2020>
- [10] ČSÚ. *Průmysl i stavebnictví se postupně zotavují* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/prumysl-i-stavebnictvi-se-postupne-zotavuji>
- [11] ERÚ. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR pro rok 2021* [online]. [vid. 2021-10-15]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/rocní-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2021>
- [12] IEA. *World energy balances 2022, Czech republic* [online]. [vid. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://www.iea.org/countries/czech-republic>
- [13] ERÚ. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR pro rok 2014-2021* [online]. [vid. 2021-10-15]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/zpravy-o-provozu>
- [14] ŠŤATISTICKÝ ÚRAD SK. *Energetika 2014 -2020* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: https://slovak.statistics.sk/wps/portal/ext/products/publikacie/katalog%20publikacii!/ut/p/z1/rZNdc6IwFIb_yu6F15BDgnx4R1ml7qArKqjcdMKnVCAUo9R_39hxdmZnKu3Obq4SeN_knHeeg0K0RWFNz0VOecFqWorzLtSeLM_zVm4QgBPgCUyJ4sDc9wGWotq8C

wJ3YTw8KBY4-lqB6Xy-8gPDI-
PJEIX3f_u2evPbjvWo6i6A4TpDmFqP_tL0CAGLfM0Pd5YFX_P3CML-
_gMUojCuecP3aMei91Lx8MAjLwkGExsq3la8wE0LUtOB34Ru1NUFgcaF-
kADpTTkuXffn8rrrc1cZGgHcWmgpVUk7AeZ5KK1UyiekqkLNJSzUiGNFLxVb2mr6x
m1QXturgaFekopjzNWSueSjQzMilkEgZTldRUXGFQokiQkagJxkIMTPMWQE-HYX--
m2sRnyDQK5jDTTBZLbBlqo79Y_IL1LC2sbFyNQyg3AR9IHxW5k8UFIEli4xkkIUHE0
0xQdPMoaKCeuxcqiNi5Chs0yxt01Y-tQL_PefNcTSAAXRdJ-
eM5WUqx6wawEeWPTtytP1TiXYiYP1uwHOB4LIIO-TXrK3ExK3-
HoGNPXvy_PFSvPSvNDy-
J9UPhGgctzN7JhpvKN9LRZ0xtP2AZSEsnl9eQktMyHUQXkU4_2FEmsoXqzJIJW2hm
D4Py7ObzacWnQXUubf3wDha0rf/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/?Taxonomy=wcm
%3Aid%3Acategory%2Fd69b9a0f-2094-4e4f-8a31-48d4d22dc399#self

- [15] SEAI. *Energy in Ireland report 2014-2021* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.seai.ie/publications/>
- [16] STATISTICS POLAND. *Energy statistics in 2014 - 2019* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://stat.gov.pl/en/topics/environment-energy/energy/>
- [17] AGEB. *Energy Balance for the Federal Republic of Germany 2000 - 2020* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://ag-energiebilanzen.de/en/data-and-facts/energy-balance-2000-to-2020/>
- [18] STATISTICS AUSTRIA. *Energy balances Austria 1970-2021* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.statistik.at/en/statistics/energy-and-environment/energy/energy-balances>
- [19] MEKH. *Data of the Hungarian electricity system* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: http://www.mekh.hu/download/4/82/31000/MEKH_statisztikai_kiadvany_villamos_energia_A4_web_V%C3%89GLEGES.pdf
- [20] EEX. *Futures, EEX German Power Futures, EEX-PXE Czech Power Futures, Base* [online]. [vid. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.eex.com/en/market-data/power/futures#%7B%22snippetpicker%22%3A%2228%22%7D>
- [21] KURZY.CZ. *PXE zemní plyn* [online]. [vid. 2022-05-17]. Dostupné z: https://www.kurzy.cz/komodity/pxe-zemni-plyn-graf-vyvoje-ceny/?dat_field=21.02.2020&dat_field2=21.02.2023
- [22] IRF. *Robot density in the manufacturing industry 2021* [online]. [vid. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/china-overtakes-usa-in-robot-density>
- [23] EUROSTAT DATA BROWSER. *Volume indices of GDP per capita, 2021, EU =100* [online]. [vid. 2022-02-15]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Volume_indices_of_GDP_and_AIC_per_capita,_2021,\(EU%3D100\)_update_dec2022_v2.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Volume_indices_of_GDP_and_AIC_per_capita,_2021,(EU%3D100)_update_dec2022_v2.png)
- [24] TECHNICKYDENIK.CZ. *Robotických zaměstnanců v Česku přibývá* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: https://www.technickydenik.cz/rubriky/automatizace-robotizace/roboticky-zamestnancu-v-cesku-nadprumerne-pribyva_55809.html
- [25] EUROSTAT DATA BROWSER. *3D printing and robotics by NACE Rev.2 activity 2018-2022* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ISOC_EB_P3DN2__custom_4152442/default/table?lang=en

- [26] FOCUSON.CZ. *Až 75 procent robotů v Česku pracuje pro automobilový průmysl* [online]. [vid. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.focuson.cz/prumyslove-roboty-v-cesku-nejcasteji-vyuziva-automobilovy-prumysl/>
- [27] ČSÚ. *Časové řady základních ukazatelů statistiky práce - červenec 2022. Tab. 6 - Průměrný počet zaměstnanců v národním hospodářství podle ekonomické činnosti (sekce CZ-NACE) a sfěr – kumulace ze čtvrtletních zjišťování (přepočtené počty)* [online]. [vid. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/casove-rady-zakladnich-ukazatelu-statistiky-prace-cervenec-2022>
- [28] AUTOSAP. *V roce 2020 bylo v Česku vyrobeno více než 1,18 milionu silničních vozidel. Sdružení automobilového průmyslu* [online]. [vid. 2022-12-20]. Dostupné z: <https://autosap.cz/aktualita/v-roce-2020-bylo-v-cesku-vyrobeno-vice-nez-118-milionu-silnicnich-vozidel/>
- [29] AUTOSAP. *Výrobu vozidel v Česku výrazně ovlivňuje nedostatek polovodičů* [online]. [vid. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://autosap.cz/aktualita/vyrobu-vozidel-v-cesku-vyrazne-ovlivnuje-nedostatek-polovodicu/>
- [30] AUTOSAP. *Roční přehled výroby a odbytu vozidel* [online]. [vid. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://autosap.cz/zakladni-prehledy-automotive/rocní-prehledy-vyroby-a-odbytu-vozidel/>
- [31] ČSÚ. *Spotřeba paliv a energie 2008 - 2021* [online]. [vid. 2022-10-15]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/spotreba-paliv-a-energie-2021>
- [32] EVROPSKÝ PARLAMENT- ZPRAVODAJSTVÍ. *Balíček „Fit for 55“: nové automobily a dodávky od roku 2035 bez emisí* [online]. [vid. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/press-room/20230210IPR74715/balicek-fit-for-55-nove-automobily-a-dodavky-od-roku-2035-bez-emisi>
- [33] ČSN ISO 8373. *Roboty a robotická zařízení - slovník. Průmyslový robot* [online]. nedatováno [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.nlnorm.cz/terminologicky-slovník/53346>
- [34] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [35] ROSS, Larry T., Stephen W. FARDO a Michael F. WALACH. *Industrial robotics fundamentals: theory and applications*. Third edition. Tinley Park, IL: The Goodheart-Willcox Company, Inc, 2018. Robotics theory and industrial applications. ISBN 978-1-63126-941-7.
- [36] WEHRLE ERICH CARABIN GIOVANNI. *A Review on Energy-Saving Optimization Methods for Robotic and Automatic Systems* [online]. nedatováno [vid. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/robotics6040039>
- [37] ABB. *Product specification IRB 660* [online]. [vid. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/0459fa7676cb44a18efaedd87e44d4d1/3HAC023932%20PS%20IRB%20660-en.pdf>
- [38] ABB. *Product specification IRB 6700* [online]. [vid. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/8be809a993e94b64a94893788611fff4/3HAC044265%20PS%20IRB%206700%20on%20IRC5-en.pdf>

- [39] BOWNE MICHAEL. What is PROFINET? - PROFINET explained. *PI, PROFIBUS, PROFINET* [online]. [vid. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://us.profinet.com/profinet-explained/>
- [40] PROFIBUS AND PROFINET INTERNATIONAL. *The PROFIenergy PROFILE* [online]. 18. duben 2023. Dostupné z: https://www.profibus-profinet.cz/images/Dokumenty/PROFINET/22831_PI_PROFIenergy.pdf
- [41] SIEMENS. *Application Guideline for Implementing Switch-off Concepts with PROFIenergy* [online]. [vid. 2023-04-18]. Dostupné z: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/96837137/96837137_Anwenderleitfaden_PROFIenergy_V1_en.pdf
- [42] ABB. *Application manual PROFIenergy Device, RobotWare 6.06* [online]. [vid. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/8dfcf36913734f90a148b0df3010f885/3HAC050967-en.pdf?x-sign=vNM8mcj7P/fvvk9N3HN6K/XjGjgPVA9hwc6i7PDWo3ZWN99OMsRXy6+kZ3CYBDR3>
- [43] ABB. *IRB 120, Product Specification* [online]. [vid. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/prumyslove-roboty/irb-120>
- [44] ABB. *IRB 6700 200/2.60, Product Specification* [online]. [vid. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/prumyslove-roboty/irb-6700>
- [45] STARÝ OLDŘICH a MAKEŠOVÁ MICHAELA. *Přednášky a cvičení předmětu Základy finančního managementu B1B16ZFM1 a Základy podnikání B1B16ZPU na FEL ČVUT*
- [46] ČSÚ. *Průměrné mzdy* [online]. [vid. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/cri/prumerne-mzdy-4-ctvrtleti-2022>
- [47] ČEZ ESCO. *Ceník elektřina ČEZ, Elektřina 12* [online]. [vid. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.cezesco.cz/webpublic/file/edee/komodity/ceniky-esco/cenik-elektrina-nadobu-urcitou-12-36-20230301-151428.pdf>
- [48] KURZY.CZ. *Graf EUR / Kč, ČNB, grafy kurzů měn* [online]. [vid. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/grafy/CZK-EUR/>
- [49] ČSÚ. *Ekonomické výsledky průmyslu ČR* [online]. [vid. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/ekonomicke-vysledky-prumyslu-cr-2020>
- [50] ČEZ. *Cena elektřiny pro podnikatele* [online]. [vid. 2023-05-15]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/produkty-a-sluzby/obcane-a-domacnosti/elektrina-2023/mop/mop_ee_na_1_rok_v_akci_01.04.2023_cez.pdf

Seznam grafů

Graf 2.1 - Podíl HPH průmyslu v % na celkové HPH (2021), vlastní zpracování dle [3] ...	15
Graf 2.2 - Vývoj spotřeby elektrické energie v průmyslu 1971-2021 v GWh, vlastní zprac. dle [12, 13].....	17
Graf 2.3 - Vývoj podílu sektorů hospodářství na celkové netto spotřebě elektřiny ČR 2014-2021, vlastní zprac. dle dat z [13].....	17
Graf 2.4 - Vývoj podílu spotřeby elektrické energie průmyslu na celkové spotřebě v zemích EU 2014-2019, vlastní zprac. dle dat z [13–19].....	18
<i>Graf 2.5 – Ceny ročního futures kontraktu pro base load- elektrická energie česká a německá burza, vlastní zprac. dle [20].....</i>	<i>19</i>
Graf 2.6 - Podíl firem využívajících průmyslové roboty - 2022, vlastní zprac. dle [25].....	20
Graf 2.7 - Podíl firem využívající více než pět průmyslových robotů 2022, vlastní zpracování dle [25].....	21
Graf 2.8 - Vývoj spotřeby el. energie v automobilovém průmyslu a vývoj počtu vyrobených produktů v automobilovém průmyslu 2008 - 2021, vlastní zprac. dle [30, 31].....	22
Graf 7.1 - Výkon P během úsporných módů, větší robot IRB 6700.....	35
Graf 7.2 - Výkon P během úsporných módů, menší robot IRB 120.....	36
Graf 7.3 - Výkon během významných energetických stavů velkého robota.....	37
Graf 7.4 - Výkon během významných energetických stavů malého robota.....	37
Graf 7.5 - Spotřeba elektrické energie v závislosti na délce pauzy velký robot.....	39
Graf 7.6 - Spotřeba elektrické energie v závislosti na délce pauzy malý robot.....	39
Graf 8.1 - Úspora energie v kWh/rok, čekání robotů 10 s.....	42
Graf 8.2 - Úspora energie v kWh/rok, čekání robotů 4 min.....	43
Graf 8.3 - Úspora energie v kWh/rok závislá na době čekání velkého robota.....	44
Graf 8.4 - Úspora energie v kWh/rok závislá na době čekání malého robota.....	44
Graf 8.5 - Úspora energie v kWh/rok v krátkých pauzách.....	45
Graf 8.6 - Úspora energie v kWh/rok v dlouhých pauzách.....	46
Graf 8.7 - Potenciál úspor energie ve všech pauzách, velký robot.....	47
Graf 8.8 - Potenciál úspor energie ve všech pauzách, malý robot.....	47
Graf 8.9 - Celkový potenciál úspor energie v kWh/rok, velký robot.....	48
Graf 8.10 - Celkový potenciál úspor energie v kWh/rok, malý robot.....	48
Graf 8.11 - Potenciál úspor robotů v ČR.....	51
Graf 9.1 - NPV v závislosti na meziroční změně ceny elektřiny.....	58
Graf 9.2 - NPV v závislosti na změně diskontu.....	58
Graf 9.3 - NPV v závislosti na ceně softwaru.....	59
Graf 9.4 - NPV v závislosti na výdajích za servisního technika.....	60

Seznam tabulek

Tabulka 7.1 - Úspora výkonu absolutní, procentuální.....	38
Tabulka 7.2 - Minimální doba pauzy pro aktivaci spánku	38
Tabulka 8.1 - Pauzy během provozu robota	41
Tabulka 8.2 - Přehled krátkých pauz	45
Tabulka 8.3 - Pauzy na pracovišti.....	49
Tabulka 8.4 - Vypočtené úspory na výrobní lince jednosměnný provoz	50
Tabulka 8.5 - Vypočtené úspory na výrobní lince, porovnání provozů	50
Tabulka 9.1 - Investiční výdaje	54
Tabulka 9.2 - Cena PLC a jeho komponent.....	54
Tabulka 9.3 - Výdaje na provoz	55
Tabulka 9.4 - Ušetřené finance za elektrickou energii	55
Tabulka 9.5- Výsledky ekonomické analýzy.....	57
Tabulka 9.6 - Výsledky ekonomické analýzy se zahrnutím pořízení PLC.....	59
Tabulka 9.7 - Výsledky ekonomické analýzy s prací servisního technika	59
Tabulka 9.8 Výsledky ekonomické analýzy obecné linky	61

Seznam obrázků

Obrázek 3.1 - Části průmyslového robota, zpracování dle [35]	24
Obrázek 4.1 - Ukázka spotřeby el. energie průmyslového robota během dne	28
Obrázek 6.1 - Módy úspory a ostatní stavy robota ABB.....	32
Obrázek 7.1 - Průmyslový robot IRB 120, zdroj [43]	33
Obrázek 7.2 - průmyslový robot IRB 6700, zdroj [44]	34
Obrázek 7.3 - Schéma měření výkonu robota	34

Seznam příloh

Příloha 1: Data k spotřebě elektrické energie průmyslových odvětví a počtu robotů.

Příloha 2: Naměřená data výkonu – malý robot IRB 120.

Příloha 3: Naměřená data výkonu – velký robot IRB 6700.

Příloha 4: Matematický model technické části práce – úspory elektrické energie, zhodnocení úspory v pauzách.

Příloha 5: Ekonomický model práce