



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

ZVYŠOVÁNÍ ENERGETICKÉ ÚČINNOSTI V PRŮMYSLU

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Kovář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Touš, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Bc. Štěpán Kovář
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Michal Touš, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

Zvyšování energetické účinnosti v průmyslu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nabízené téma bakalářské práce je rešeršního charakteru. Práce je vhodná pro studenty, kteří se chtějí seznámit s problematikou zvyšování energetické účinnosti a metod pro jejich určování v průmyslových provozech.

Zvyšování energetické účinnosti je intenzivně řešeným tématem, v případě průmyslových provozů obzvláště. Otázkou zůstává vhodný výběr a zavádění opatření do provozů. Z tohoto důvodu je důležitá analýza vstupních dat týkajících se spotřeby energií, které jsou v podniku využívány. Bakalářská práce poskytne přehled o možných přístupech, jak provádět analýzy spotřeb ve sledovaných provozech.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše o stávajících přístupech ke zvyšování energetické účinnosti v průmyslu.
2. Rozbor existujícího energetického auditu
3. Zhodnocení možnosti využití přístupů vyplývajících z bodu 1

Seznam doporučené literatury:

MÁŠA, V. Komplexní přístup k řešení energetické efektivity objektů a procesů v průmyslové a komunální sféře. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017. s. 1-95.

THUMANN, A., W. J. YOUNGER a T. NIEHUS. Handbook of energy audits. 8th ed. Boca Raton, FL: Distributed by CRC Press/Taylor & Francis, c2010. ISBN 978-1-4398-2145-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o zvyšování energetické účinnosti v průmyslu. Spotřeba energie je globálně jedním z hlavních témat. Velká část energie je spotřebována průmyslem a je tedy nutné hledat opatření ke zvyšování energetické účinnosti průmyslových procesů. Současný přístup v této oblasti se zaměřuje především na instalaci účinnějších strojů a zařízení či využití odpadního tepla. Tento přístup může vést k velkým investičním požadavkům energetických auditů, tudíž je snížena motivace podniků k realizaci těchto auditů. Zejména vědecká komunita se však zabývá možnostmi optimalizace procesů z hlediska nastavení procesu, plánování výroby s použitím softwarových řešení. Oba přístupy jsou rozebrány v této práci na základě potenciálu jejich využití.

Klíčová slova:

energetická účinnost, úspory energie, energetický audit

Abstract

This Bachelor Thesis deals with the increase in energy efficiency in industry. The energy consumption is globally one of the cardinal topics. A significant part of the energy is consumed by industry, and therefore it is necessary to search for such measures to increase the energy efficiency of industrial processes. Current attitude aims at the installation of more effective machines, devices or the waste heat recovery. This approach can lead to massive investment requirements of energy audits which means that the motivation of the enterprises to implement such audits is lowered. Especially the scientific community is concerned with the possibilities of process optimization from the point of settings and process integration, production planning, using software solutions. Both approaches are analysed from the potential of their use in this thesis.

Keywords:

energy efficiency, energy savings, energy audit

Bibliografická citace

Citace tištěné práce:

KOVÁŘ, Štěpán. *Zvyšování energetické účinnosti v průmyslu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124259>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Michal Touš.

Citace elektronického zdroje:

KOVÁŘ, Štěpán. *Zvyšování energetické účinnosti v průmyslu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124259>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Michal Touš.

Prohlášení o původnosti

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Zvyšování energetické účinnosti v průmyslu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

V Brně dne 26.6.2020

.....
Štěpán Kovář

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Michalu Toušovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, vysvětlení spousty témat, a především shovívavost a ochotu ke konzultacím. Dále děkuji Mgr. Janě Opálkové za odbornou pomoc s překladem abstraktu do anglického jazyka a Ing. Martě Pavlíkové za pomoc s gramatickou a stylistickou oblastí textu. Zároveň děkuji členům rodiny za podporu při vypracovávání této práce.

Obsah

1. Úvod	1
2. Stávající přístupy zvyšování energetické účinnosti	3
2.1 Hardwarová řešení	3
2.1.1 Snížení energetické náročnosti budov	3
2.1.2 Zvyšování účinnosti výrobních a technologických procesů	3
2.1.3 Zvyšování účinnosti energetických zdrojů	6
2.2 Softwarová řešení	12
2.2.1 Modelování, simulace a optimalizace	12
2.2.2 Průmysl 4.0	15
3. Energetický audit	20
3.1 Definice energetického auditu	20
3.2 Rozbor energetického auditu	21
3.3 Zaměření auditů	26
4. Zhodnocení možností přístupů	27
4.1 Současná praxe	27
4.2 Překážky pro posun	28
4.3 Souhrn poznatků	29
5. Závěr	31
6. Seznam použité literatury	32

1. Úvod

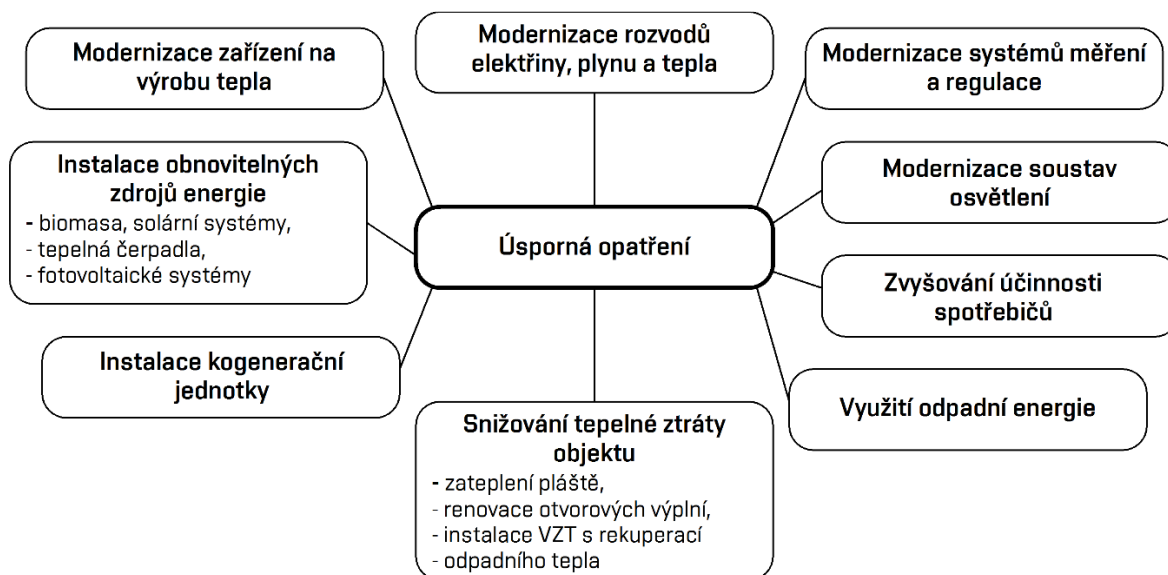
Za rok 2017 se dle Statistického úřadu Evropské unie průmysl podílí 24,6 % z celkové spotřeby energie všech odvětví, přičemž v České republice je toto číslo 32,1 % [1]. Zvyšování energetické účinnosti v průmyslu je tedy aktuálně řešeným tématem. Jak je napsáno například v práci o energetických auditech, kde je srovnána stará technologie s novými: „S dnešními technologiemi je možné snížit spotřebu energie v budovách min. o 50 %.“ [2] Otázkou zůstávají možnosti tohoto zvyšování. Po mnoha letech zvyšování energetické účinnosti již bude obtížnější těchto změn dosáhnout.

Přestože se v České republice daří zvyšovat energetickou efektivitu v průmyslu, je energetická náročnost na hrubou přidanou hodnotu vyšší než průměr všech států Evropské unie. Tento fakt má řešit Národní akční plán, který se snaží o podporu zvyšování energetické účinnosti v průmyslovém odvětví [3].

Na identifikaci úsporných opatření podniků jsou dnes běžně využívaným nástrojem energetické audity. Bohužel praktické aplikování všech doporučení již není pravidlem a často se tak stává, že podniky nejsou ochotny investovat prostředky do zvýšení své energetické účinnosti. Důvody jsou hledány v metodologii, kde progresivnější studie z minulosti zahrnovaly velmi detailní modely procesů, proto je jejich aplikace v jiných případech obtížná [4].

Proto jsou vytvářeny univerzální postupy, které se dají využít pro širší výběr procesů a strojů. Ať už v oblasti celých výrobních budov či v oblasti jednotlivých strojních celků, nebo dále pro menší či větší podniky. Je však potřeba zvážit komplexní provázanost jednotlivých veličin v různých provozech a vypracovat konkrétní aplikaci použité metodiky. Poté se však může u konkrétního procesu snížit spotřeba vody o 60 % [5].

Stručné a výstižné znázornění konkrétních cest úspor, kterými je možnost se vydat, lze nalézt například v habilitační [1] práci od doc. Ing. Vítězslava Máši, Ph.D. znázorněné na Obrázku 1.



Obrázek 1: Přehled úsporných opatření [1]

Na přehledu opatření si lze všimnout devíti různých cest úspor. Je samozřejmě nutno podotknout, že výše zmíněná opatření jsou využívána v energetických auditech s různou intenzitou a některé nejsou využívány vůbec; v dnešní době se běžně používá šest, tedy: modernizace soustav osvětlení; zvyšování účinnosti spotřebičů; využití odpadní energie; snižování tepelné ztráty objektů; modernizace zařízení na výrobu tepla; modernizace rozvodů elektřiny, plynu a tepla. Zbývající tři (modernizace systémů měření a regulace, instalace obnovitelných zdrojů energie, instalace kogenerační jednotky) jsou aplikovatelná méně, protože se mohou pro koncové zákazníky zdát finančně nerentabilní. Dalším důvodem může být jejich nepřítomnost v energetických příručkách, tudíž chybí povědomí o jejich možnostech. V této bakalářské práci jsou v následujících kapitolách zahrnuty nejen tato opatření. Opatření „Modernizace systémů měření a regulace“ je jako jediné uvedeno v kapitole 2.2; opatření „Instalace kogenerační jednotky“ lze nalézt v podkapitole 2.1.3; zbylá opatření jsou zmiňována v podkapitole 2.1.2 .

Předmětem následujících kapitol tedy nebude porovnávání různých metodologických cest ani rozlišení intenzity praktického využívání úsporných opatření, ale spíše informování o konkrétních cestách energetických úspor, jimž vědecká komunita dává přednost, a které dále rozvíjí.

Náplní této práce je rešerše nastupujících přístupů skrze nejnovějších vědeckých publikací. První část práce je rozdělena na kapitoly Hardware a Software. Zvolení tohoto pojmenování vychází z jejich rozdílných aplikací a bude dále vysvětleno. V textu je využíváno poznámek pod čarou, kde jsou kromě vysvětlivek uvedeny i zdroje, na jejichž základě jsou shrnuty závěry. V další části této práce je proveden rozbor současných energetických auditů spolu s analýzou konkrétního energetického auditu nejmenovaného průmyslového podniku. A nakonec je předloženo zhodnocení současných auditů a možnosti aplikace nejnovějších vědeckých studií do příruček a překážky toto znemožňující.

2. Stávající přístupy zvyšování energetické účinnosti

Jak již bylo zmíněno v úvodu, jsou pro účely této práce zavedeny pojmy Hardware a Software. Pojem hardware je používán za účelem snadnější rozlišitelnosti. Hardwarovými přístupy se myslí řešení spojená s fyzickým stavem stroje či možností přímého řízení procesu. Dokonce i jednorázové použití softwarových nástrojů k zpracování dat je možno zahrnout do hardwarových přístupů. Softwarovými přístupy se myslí řešení modelování a predikce spotřeby strojů, supervizní řízení procesů či managementová řešení spojující různé spotřební celky podniku, přičemž ke všem těmto přístupům je potřeba výpočetní techniky s vhodným programovým vybavením.

2.1 Hardwarová řešení

V této kapitole se práce zaměřuje na snižování spotřeby energie pomocí hardwarových řešení, které v současnosti převažují. Přirozenou cestou zefektivnění výrobního či energetického procesu je navrhnout výměnu starší technologie za novější. Tato cesta však nemusí být neekonomičtější, kvůli časté potřebě vysokých investic do nových technologií. Proto se hledají cesty optimalizace stávajících zařízení tak, aby se i s nižšími náklady dosáhlo dostatečné snížení spotřeby energií.

2.1.1 Snížení energetické náročnosti budov

V současných energetických auditech existuje kapitola o tepelně technických vlastnostech konstrukcí budov, která se zabývá jak geometrickými parametry, tak samotnými konstrukčními materiály použitými při stavbě. Tyto audity navrhuje zateplení stěn a výměnu oken. V oblasti zateplení probíhá minoritní vývoj například směrem k nanomateriálům na bázi keramiky [2], které mohou být aplikovány formou nátěru, a dojde tedy ke snížení tepelných ztrát. V oblasti oken jde pokrok směrem k vakuově zaskleným oknům [3], která mohou být vyráběna například „in-vacuum“ metodou, která výrazně snižuje čas a náročnost výrobního procesu. Další oblastí ve snižování náročnosti budov je Celkový systém topení, klimatizace a ventilace (HVAC). Tato oblast se především zabývá optimálním nastavením například ve více zónách [4] nebo systém, který vyhodnocuje dopady různé obsazenosti budov podle parametrů budov a rozmístění HVAC [5]. Tento systém může být vylepšen o možnost sledování počtu lidí v zájmovém prostoru [6]. Tyto i ostatní možnosti zefektivnění tepelných systémů či zamezení úniku tepla z budovy se netýkají průmyslových procesů, proto nemá smysl je zde dále rozvádět. Pozornost následujících podkapitol se tedy bude zaměřovat na strojní vybavení podniků.

2.1.2 Zvyšování účinnosti výrobních a technologických procesů

Výrobní vybavení každého podniku závisí na jeho zaměření. Tato podkapitol se zabývá nejzastoupenějšími používanými zařízeními a technologiemi ve strojírenských provozech.

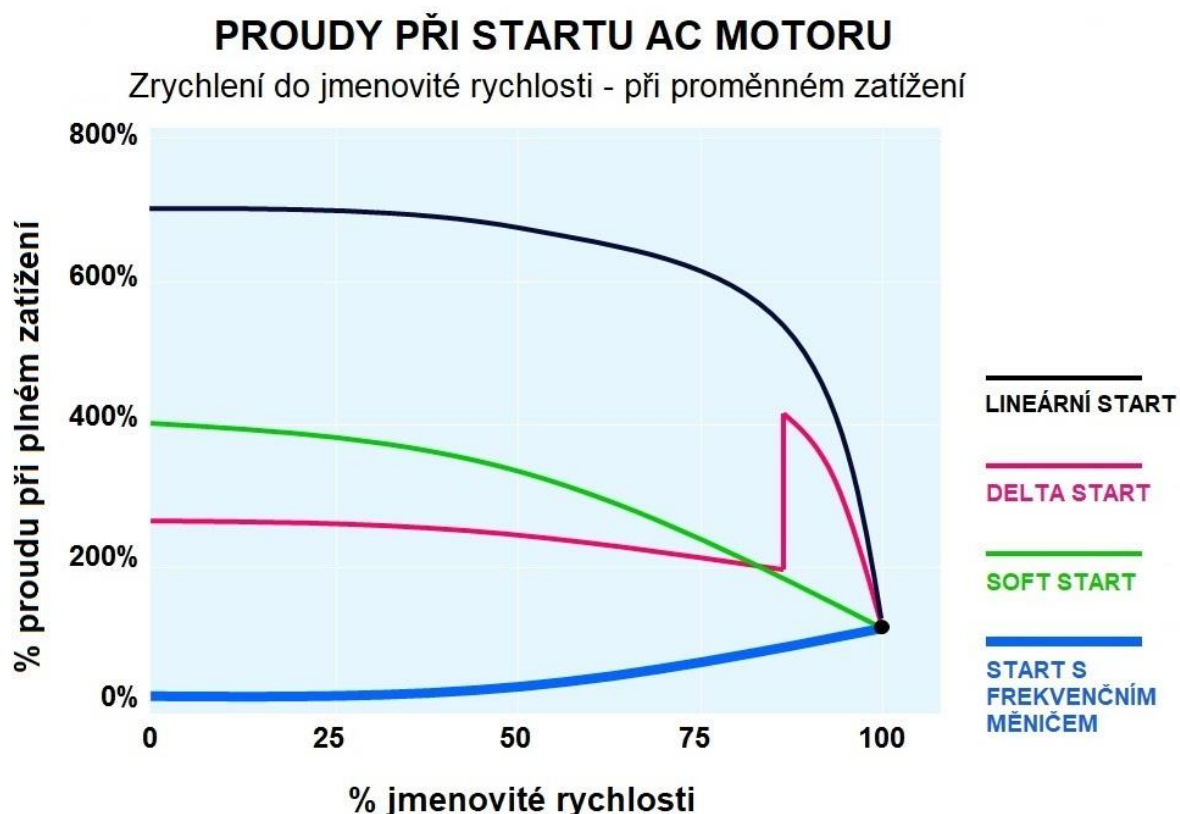
Elektromotory

Nejpoužívanějšími zařízeními, které jsou zastoupeny v široké škále různých procesů jsou elektrické motory. Významnou měrou přispívají na spotřebě elektrické energie. Doporučení k snižování jejich spotřeby se však omezují často na výměnu motorů či

minimalizování výkyvů napětí. Přestože existují mnohé novější možnosti k jejímu snížení, míra jejich implementace je poměrně nízká [7]. Z těchto novějších přístupů se v praxi začaly používat řízené motory s tzv. frekvenčními měniči, které ovládají výkon stroje tak, aby se snížila jeho spotřeba, ale výkonnost zůstala zachována [8]. Navíc se dají frekvenční měniče použít k pozvolnému startu motorů, jak je možno vidět na Obrázku 2.

Faktory ovlivňující přijetí budoucích sofistikovanějších opatření v oblasti motorů by měly být kategorizovány následovně: kompatibilita, ekonomika, energetické přínosy, přínosy a ztráty související s výrobou, synergie, složitost, personál a další technické prvky [9]. Samotná opatření energetické účinnosti lze rozdělit do skupin: hardware, pohon, management a vstup energie [10]. V následujícím odstavci budou tyto skupiny popsány detailněji.

Pod hardwarová opatření si lze dosadit optimalizaci převodů či opatření z hlediska chodu stroje [11].¹ Pohon elektrických motorů lze zefektivnit vybráním správného zatížení, (konstantní výkon, konstantní/proměnný točivý moment) nebo instalací již zmiňovaného frekvenčního měniče. Dalšími opatřeními jsou například: plán chodu motoru, program preventivní údržby či program prediktivní údržby. A jako poslední možností jsou opatření z hlediska energetického vstupu: minimalizace volnoběhu, vyvarování se provozu nad jmenovitým napětím či snížení výpadků proudu [12].



Obrázek 2: Start motoru různými způsoby [13]

Z hlediska transportu vody a využití její energie, je často diskutována technologie čerpadel. Pro zvyšování efektivity čerpadel je běžně doporučováno zpřesnění

¹ Což může být pouhé manuální vypínání, ale i sofistikovanější ovladače: zámkové, bang-bang, časové snímání zatížení; a pro snížení počátečního napětí: pozvolný rozběh, VSD, autotransformátor

správného dimenzování potrubí či snížení drsnosti povrchu v čerpadle [7]. Dlouho je již používáno vakuové čerpadlo s kapalným prstencem, jehož efektivitu lze zvýšit například vhodným výběrem pracovní tekutiny – xanthanové gumy, která snižuje tření a turbulentní ztráty [14]. Tato technologie je již vyzkoušena a dosáhla úspor nákladů o 19 %.

Stlačený vzduch

V Evropě široce používaná technologie, která konzumuje 10 % celkové spotřeby energie je technologie stlačeného vzduchu [15]. Používána je například při tryskání nebo čištění, kde jsou výhodou jednoduchost použití, praktičnost a čistota této technologie. Efektivita je ale často nízká. Pro její zvýšení existují například tyto návrhy:

1. Redukce ztrát v distribuci
2. Instalace průtokoměrů
3. Optimalizace návrhu designu potrubí
4. Minimalizace tlakových výkyvů a kontrola toku
5. Ostatní opatření související se snížením neefektivního využívání sítě

Některá z těchto opatření však existují pouze v teoretické rovině jako kontrola toku či monitorování celého systému, což indikuje další možnosti pro budoucí vývoj v oblasti zvyšování efektivity této technologie [16].

Obráběcí stroje

Další velkou skupinou spotřebičů jsou obráběcí stroje, jež mají široké využití v aplikaci strojního inženýrství, ale zároveň mají velmi vysokou spotřebu energie a nízkou efektivitu.² Spousta organizací a univerzit zaměřila svoji pozornost na problematiku modelování a zhodnocování efektivity obráběcích strojů a hledá cesty, jimiž by bylo snížení energetické náročnosti těchto strojů lépe dosažitelné [17].

Důležitým nástrojem pro zjišťování energetické efektivity strojů jsou energetické referenční hodnoty, které však mohou v současném stavu vyznívat v určitých případech nedostatečně kvůli široké diverzitě spotřebních procesů v různých strojích. V roce 2017 vyšla studie [18], která navrhuje nový způsob referenčních hodnot na základě studia předchozích modelů. Nová analýza je postavena na konceptech srovnávání: statickém, dynamickém, produktově založeném, procesně založeném, jednocílovým a mnohocílovým, přičemž vysvětluje jejich rozdílné výhody. K samotnému získávání informací je využíváno jednoduché modelování spotřeby a metody statické analýzy. Autoři této studie navrhují další vývoj této problematiky a možného budoucího zařazení v energetických standardech [19]. Navíc představují dynamický koncept srovnávací analýzy pro masovou produkci [20], který může následně pomoci například ve výběru procesních parametrů díky analýze a hodnocení spotřeby energie.

Přesnost modelování obráběcích strojů ještě není na dostatečně vysoké úrovni, a tudíž by měla být rozvíjena. V jedné ze studií je představen například SCE model (charakteristické rezné energie) jako funkce rezných parametrů u vířivého frézování [21]. Přístup jeho vytváření však spadá do kategorie softwarových řešení a je tedy popsán v kapitole 2.2.1

U strojů na tváření kovů má však optimalizace parametrů relativně malý potenciál, protože by například při změně těchto parametrů docházelo k snížení kvality výrobků.

² Okolo 75% veškeré spotřebované elektřiny ve strojírenství. [18]

Naopak velký potenciál je spatřován v plánování managementu a způsobech jeho použití v různých dílnách a sekcích podniku, kde však flexibilita opatření velmi klesá [22]. Každé pracoviště totiž obsahuje specifické prostředí a konkrétní propojení jednotlivých strojů a infrastruktury, což má za následek nutnost aplikování specifické metodiky a postupu.

Průmyslová robotika

Zajímavý přístup k řešení snížení energie potřebné pro pohon dalších zařízení, totiž průmyslových robotů, zaujali výzkumníci ze studie pro optimalizaci pohybových profilů robotů [23]. Cíl snížení energetické náročnosti podmínili zákazem změny času pohybů, času výrobních cyklů nebo potřeby nového vybavení. Proběhla analýza pohybů jak horizontálních, vertikálních, tak i tříosých, při které se zjistilo, kde hledat významné úspory energie, přičemž byly navrženy úpravy pohybových profilů. Dodržování principů jako vyhýbání se velkým momentům a vyvarování vlastních frekvencí,³ je důležité při vytváření upravených pohybových profilů, které mohou dosáhnout 30 % až 70 % energetických úspor v porovnání s tradičními neupravenými profily. Studie poté navrhuje zvýšení propracovanosti pohybových profilů, kde se však bude narážet na problémy s komplexnějším programováním, které již potřebuje softwarové investice, což může odradit manažery firem k jejich přijetí. Přesto je komplexnější programování pohybových profilů zahrnuto v rámci jiné studie v kapitole 2.2.1

Samozřejmě je spousta dalších technologií, kde by bylo možno zanalyzovat snahy o zefektivnění jejich energetické náročnosti. To by však přesahovalo rámec této práce, proto bude práce dále pokračovat energetickými vstupy a celkově problematikou hospodaření s energií v podnicích.

2.1.3 Zvyšování účinnosti energetických zdrojů

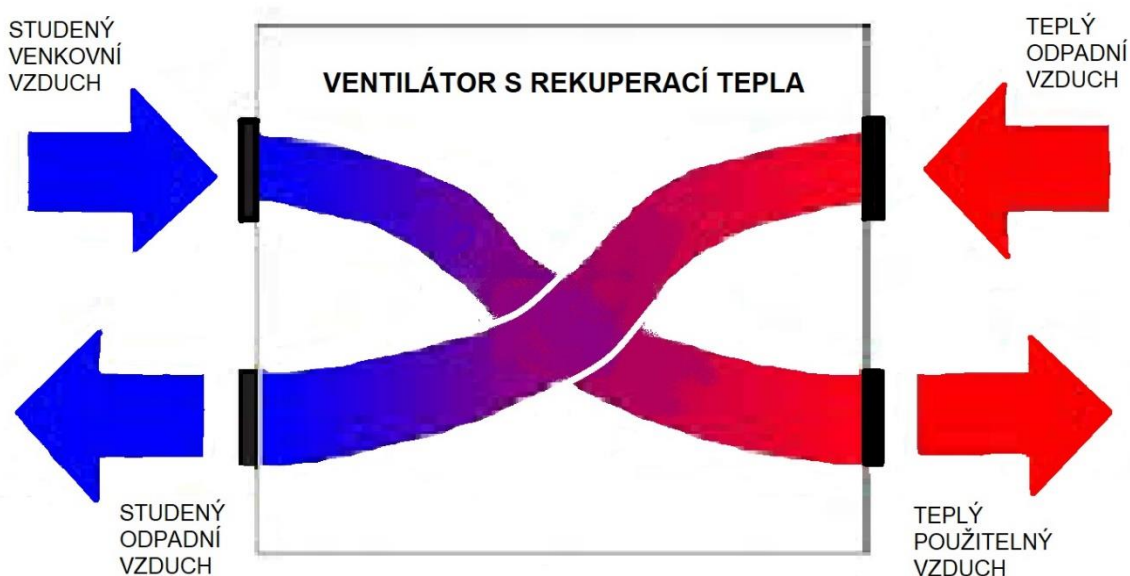
Kromě výrobních zařízení obsahují podniky i infrastrukturu a stroje zajišťující dodávku energií či její zpětnou využitelnost. V této podkapitole budou prozkoumány možnosti těchto systémů.

Výroba a akumulace vodní páry v průmyslových podnicích je nedílnou součástí transportu energie. Technologie parních kotlů v sobě zahrnují jak parní generátory, tak následnou síť parního vedení. V průvodcích je doporučováno zamezení ztrát do vývodů instalací uzavíracích tlumičů či tlumičů na vstup ventilátoru nebo omezení přívodu přebytečného vzduchu do kotle [7]. To ale zbytečně zvyšuje nutnost spotřeby energie na zahřátí tohoto vzduchu. Jedna z cest, jak dosáhnout vyšší energetické účinnosti parních kotlů je skrz již existující standard hospodaření s energií ISO 50001 [24], který zasahuje jak do hardwarových, tak i softwarových řešení. Navíc samotná technologie parních kotlů doznává dalšího vývoje a například v Jižní Koreji se očekává 7,9% snížení spotřeby energie díky bojlerům s nepřímým ohřevem [25]. Bojlery s nepřímým ohřevem se myslí boilery se spalováním zemního plynu.

Z hlediska technologie čerpadel, který mohou sloužit jako zdroj energie existuje např. odstředivé tepelné čerpadlo s rekuperací tepla, u kterého byly navrženy různé variace zapojení. Nejefektivnějším typem byl určen dvou-cyklový paralelně zapojený čerpadlový systém, který vykazoval až o 15 % vyšší koeficient výkonu než ostatní typy [26].

³ Které mohou způsobovat nestabilitu při pohybu.

V každé výrobní hale je potřeba zajistit zdravotní nezávadnost prostředí [27], k čemuž se využívá systém ventilace, který je součástí HVAC systému jež byl diskutován již v předchozí podkapitole. Existují ale i další typy ventilačních systémů, které vyměňují energii mezi přiváděným a odváděným vzduchem, jak lze pozorovat na Obrázku 3, což dává u ventilátorů možnosti pro využití energie. Jednou z možností je zapojit ventilátory v kaskádovém uspořádání [28] pro lepší využití energie ze vzduchu. Pomocí simulace této nové konfigurace byla vypočtena možnost snížení spotřeby energie samotných ventilátorů až o 44 %. Jiná možnost zvýšení efektivity těchto systémů byla zjišťována pomocí exergické analýzy a nerovnovážné termodynamiky [29]. To umožňuje posoudit výkonnost systému a lokalizovat ztráty v systému, což může být využito při optimalizacích pomocných systémů.



Obrázek 3: Ventilátor s rekuperací tepla [30]

Současné přístupy snižování energetické účinnosti se však neomezují pouze na zvyšování energetické účinnosti výrobních strojů či rekuperaci v rámci jednoho zařízení, ale také na využití energetických vazeb mezi různými zařízeními. Především se jedná o využití odpadní energie ve formě tepla z výrobních procesů nebo tam, kde dochází ke ztrátám energie. Toto teplo je však stále ceněno a je proto transportováno a použito v jiných zařízeních. Vzniká tedy technologie využití odpadního tepla, jež je také součástí normy ISO 50001 – tedy Systému managementu hospodaření s energií. Jistě je možno tuto normu využít, avšak její formulace je příliš obecná a provozovateli nenabízí možnosti, jak v praxi postupovat [1].

Vedlejší produkty průmyslových procesů ve formě odpadního materiálu jsou jednodušeji identifikovatelné oproti odpadnímu teple, které je nejenom obtížně určit místně, ale i kvantitativně. Metodické postupy jsou tedy vítaným přínosem při řešení těchto problémů [31]. Fenoménu využívání odpadního tepla se v posledních letech věnuje větší pozornost i v českém prostředí⁴ a je používán i v příručkách energetických auditů.⁵

⁴ Srovnej [104] [1]

⁵ Srovnej [97] [93]

Metodika z roku 2018 [32] navrhuje rámec čtyř po sobě jdoucích etap:

1. Analýza odpadního tepla
2. Vyhodnocení odpadního tepla
3. Výběr vhodné technologie
4. Podpora při rozhodování

V první etapě se monitoruje především průtok, zdroje energie, místa ztrát a data teplot. Vyhodnocování je rozděleno na kvalitativní a kvantitativní část, kde se posuzuje například druh média přenášející energii, infrastruktura potrubí, kyselost či cizí částice v přenášejícím médiu, změny teplot a další. Při výběru vhodných technologií se berou v úvahu náklady implementace změn, nutnost dovybavení a provozní rozsah. V poslední fázi je pozornost zaměřena na výpočty finanční návratnosti, redukce CO₂ emisí a životní cyklus nových zařízení. Protože k využití odpadního tepla není potřeba high-tech řešení je návratnost těchto energetických úspor rychlá – v řádu několika let. Ve vědecké komunitě byly vytvořeny i další metodiky na zjišťování potenciálu odpadního tepla. Jedna z nich [33] je založena na odhadu a hodnocení výrobních procesů a následného přerozdělování odpadního tepla v čase. Toto stanovisko podporuje i práce zaměřená na modelování pomocí simulace nekontinuálních procesů, kde jako cíl bylo zajistit nejenom dostatečnou komplexnost, ale i replikovatelnost⁶ modelu zařízení na tlakové lití hliníku. Snížení spotřeby zemního plynu o 55% a další energetické úspory podtrhl fakt návratnosti investice za 3 roky [34].

Další metodikou v oblasti využití odpadního tepla je pinch analýza, která pochází ze snah o rekuperaci tepla prostřednictvím integrace procesů během předchozích 40 let.⁷ Pinch analýza je klíčovou metodou pro optimalizaci rekuperace odpadního tepla [35], ale i dalších oblastí jako například tepelné integrace celého závodu [36], vodního hospodářství nebo plánování investic. Z hlediska integrace celého závodu byla použita ve švédském ocelářském průmyslu [37], a to i u netepelných subsystémů. Pinch analýza je často používána s dalšími optimalizačními nástroji. Například ve spojení s „driving force method“ byla použita pro integrovanou sekvenci destilace (integrated distillation column sequence), kdy byla použita na určení nejlepší ze 14 možných kombinací zapojení v závislosti na celkovém, topném a chladícím zatížení [38]. V souvislosti s „exergy analysis“ byla využita již před dvaceti lety u turbín s kombinovaným cyklem [39] a v posledních letech ve vývoji nové metody pro zefektivnění sítě výměníku tepla (HEN) [40], kde zvýšila exergickou účinnost o 78 %. Možností aplikací je celá řada, jako například u kombinovaných tepelně-energetických systémů či organických Rankinových cyklů (dále jen ORC), u kterých se pinch analýza používá jako podpůrný nástroj při jejich správné integraci do průmyslových procesů [35]. Systémy ORC převádějí odpadní teplo o nízké teplotě na elektřinu, jak je ukázáno v Obrázku 4.

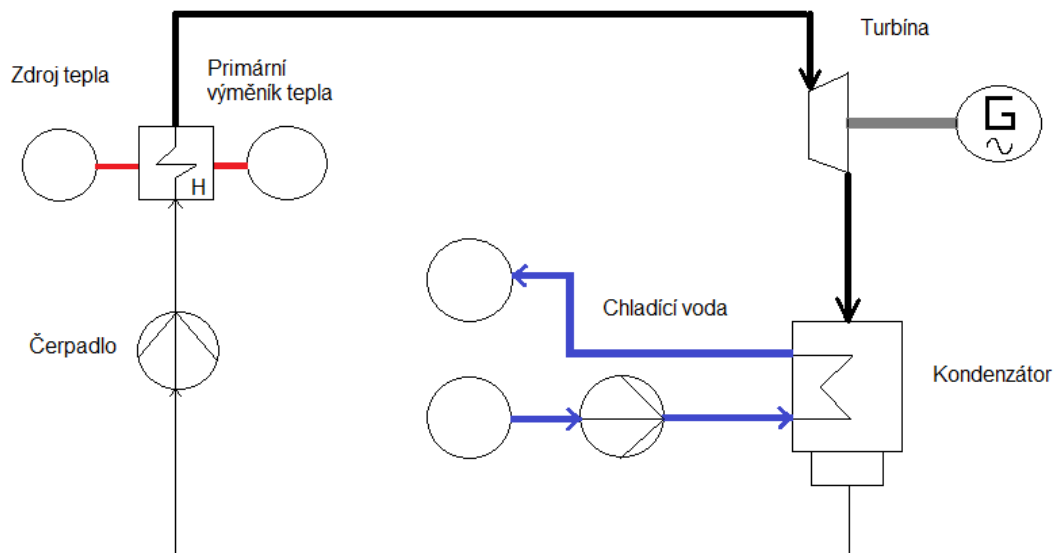
A právě využití tepla o nízké teplotě je dalším významně diskutovaným odvětvím. Pro ocelářský průmysl byla vytvořena studie [41] ukazující, že použití odpadního tepla přímo v procesních jednotkách je energeticky účinnější.⁸ Je tedy výhodnější použít horkou vodu v procesu či pro vytápění jiného zařízení než vyrábět elektrickou energii kvůli nízké účinnosti přeměny energie. Pomocí optimalizační metody pro integraci destilace se zpětným získáváním tepla v ropném průmyslu [42] byla snížena spotřeba

⁶ Srovnej [59]

⁷ Srovnej [109] [110]

⁸ Například pro předeřívání či sušení

energie o 8 %. Ukazuje se, že správně identifikovaná technologie a postup významně spoří energii. V jedné ze studií byla modelována možnost integrace odpadů ze zplyňování černého louhu v paroplynové elektrárně [43], kde bylo využito odpadní teplo k předehřátí páry proudící do paroplynové turbíny. V jiné studii je diskutována integrace zachytávání CO₂ po spalování (karbonátor)⁹ z cementářské pece, [44] čímž se dosáhne nejenom snížení emisí CO₂ o 90 %, ale i možnost zpracování odpadního tepla z karbonátoru.



Obrázek 4: Schéma organických Rankinových cyklů [126]

V problematice zpracování odpadního tepla je potřeba řešit i problém časového nesouladu mezi poptávkou po odpadním teple a jeho produkcí, což se dá vyřešit instalací tepelných akumulátorů energie. Ve studii z roku 2019 [45] byly zhodnocovány možnosti nastavení optimální teploty těchto skladovacích systémů. Vytvořili metodiku zjištění optimálního nastavení teploty v akumulátorových systémech kaskádovitě či jednotlivě zapojení. Hlavními faktory ovlivňující teplotu byly shledány: zdroj tepla a odvod tepla. Pro dostatečně velké akumulátory a teploty zdroje přesahující 373K (100°C) výsledky dosahovaly přesnosti do 10 %.

Při využití odpadního tepla je snaha teplo využít na předehřev nebo případně vyrobit elektrickou energii, která je snadněji konvertovatelná v jiné formy energie, přestože má nízkou účinnost přeměny.¹⁰ Převod tepelné energie v elektrickou se provádí Termoelektrickými generátory, které však nemají příliš velkou účinnost, proto se v dnešní době snaží výzkumníci o její zvýšení. V tomto odvětví již existuje velké množství různých optimalizací např.: numerický algoritmus [46], variační metoda [47], numerický model vypočítaný ANSYSem [48] či studie analýzy Taguchi metody [49]. A právě v oblasti analýz Taguchi metody lze nalézt studii [50], která si dala za cíl zjistit klíčové faktory ovlivňující efektivitu Termoelektrických generátorů s využitím Taguchi metody sérií 27 experimentů. Použité generátory pracují při nízkých teplotách (25°C až 50°C), proto je jejich použití vhodné i například pro využití v systémech odpadního tepla, které často nepracují při vyšších teplotách. Nejzásadnějším faktorem se ukázal

⁹ Stroj pro karbonizaci

¹⁰ Rozebráno výše v textu

materiál desek, který ovlivňoval výsledný výkon a účinnost z 89 %, přičemž ostatní faktory neměly téměř žádný vliv (otáčky motoru a tlak vody ukázaly vliv pod 5 %).

Poslední z možností využití odpadního tepla je tzv. kogenerace. Kogenerací se myslí postupná nebo současná produkce konečných forem energií přeměněných z primární formy [51]. Nejčastějšími formami jsou elektrická a tepelná energie. Výhody této technologie spočívají v možnostech umístění výroby blízko místa využití, výroby elektrické energie a využití odpadního tepla, avšak nevýhodami jsou poměrně vysoké investiční náklady a nízká návratnost, které zapříčiňují vzácnost jejího využití pro průmyslové podniky. Studií zpracovávající tuto technologii není mnoho. Jedna z mála je například z roku 2015 [52], kde je kogenerační technologie použita s termodynamickou simulací a statistickým modelováním. Kogenerační jednotka spaluje zemní plyn a vyrábí elektřinu a páru rozdělenou do několika tlakových stupňů. Díky novému optimalizačnímu přístupu byly zvýšeny finanční zisky o 43 %.

Z hlediska autonomní výroby elektrické energie se jeví jako nejschůdnější cesta fotovoltaických článků. V dnešní době je myšlenka jejich zavádění do průmyslových podniků výhodná a problematická zároveň. Jejich použití v kooperaci se zařízením budov je možné díky faktorům vyplívajícím z charakteristik fotovoltaických článků, a tedy jejich pořizování v této části průmyslových podniků roste [53]. Tyto stejné charakteristiky jsou ovšem vnímány v čistě výrobní sféře negativně. Důvody lze identifikovat napříč literaturou jednoduše:

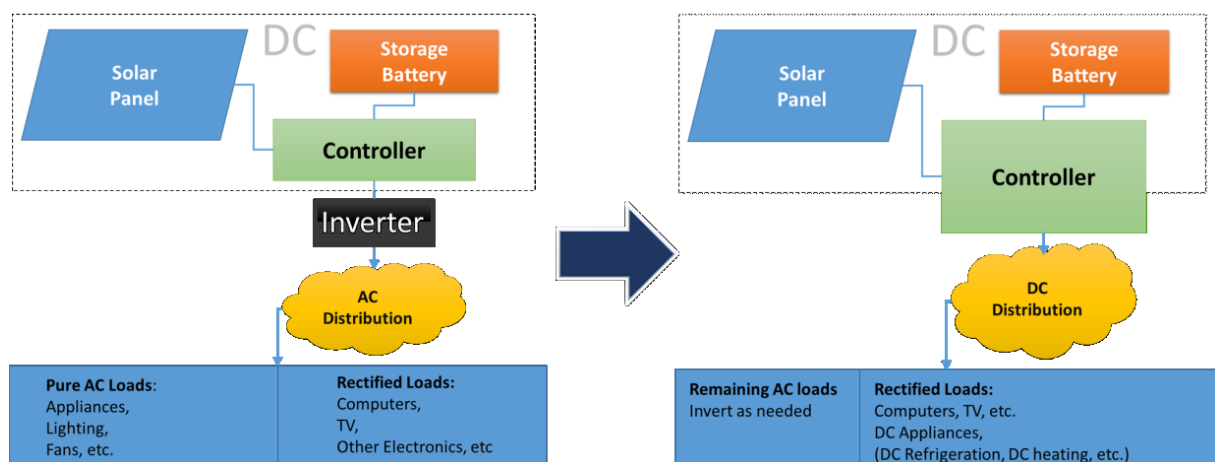
1. Fotovoltaické články nedodávají dostatečný výkon k pokrytí spotřeby celého průmyslového podniku, proto mohou být používány pouze jako doplňkový zdroj elektrické energie.
2. Jejich pořízení je nákladné. Porovnání pořizovacích nákladů (zakoupení panelů a potřebné infrastruktury v dostatečném množství) a generované elektrické energie zapříčiňuje důsledek nižší rentability.
3. Zapojení do infrastruktury závodu je komplikované z důvodu nestabilní výroby energie, a tudíž jejího kolísavého dodávání do oběhu.
4. Nutnost převodu stejnosměrného proudu generovaného fotovoltaickými články na střídavý, a tedy nutnost pořízení převodní stanice.

Přesto v posledních letech lze vidět snahu v hledání různých způsobů využití fotovoltaických článků k výrobě elektrické energie v průmyslových podnicích. Tento pozitivní přístup je též výsledkem snahy dále vylepšovat samotnou technologii fotovoltaických článků, kdy jsou zkoušeny například nejenom nové systémy zapojení, ale i využívání nových médií například na bázi nanofluidního grafenu v kombinaci s vodou, kdy je potvrzena vyšší efektivita výroby elektrické energie o 5,5 % [54].

Dále jsou zkoušeny i systémy zahrnující zvyšování dopadu sluneční energie na panely. Na VUT se již v roce 2011 testovalo polohové řízení panelů: „*Při srovnání fixního usazení panelu a panelu, který sledoval slunce v obou osách, nastal nárůst zisku energie za slunečný den zhruba o 34 %, a to po odečtení ztrát způsobených provozem systému pro polohování.*“ [55] Samozřejmě, že při případném využití polohovací technologie je potřeba vykalkulovat rentabilitu takového systému pro konkrétní podnik, ale faktem zůstává, že technologie je již vytvořena. Další z možností je například aplikace automatického čistícího vybavení [56]. Toto zařízení má za cíl odstraňovat částice blokující sluneční záření z povrchu panelu. Samozřejmě tato technologie s sebou přináší otázku, zda je fotovoltaický panel schopen takovému zařízení dodávat dostatečné množství energie, a navíc, zda je tato technologie

rentabilní z hlediska efektivity výroby elektrické energie. Obě tyto otázky byly zodpovězeny ve studii z roku 2019, kde autoři navrhnou takovýto systém. Prohlašují, že zvládli tuto technologii navrhnout s dobrými jak konstrukčními, tak energetickými výsledky.

Nejpokročilejší studií v oboru fotovoltaických článků je však práce, zabývající se řešením tří ze čtyř problémů popsaných výše [57]. Hlavní myšlenkou je vytvoření tzv.: „Direct Current Based Nano-grid,“ tedy elektrické sítě se stejnosměrným proudem v rámci jedné budovy/jednoho podniku, která paralelně spolupracuje s okruhem střídavého proudu. K tomuto systému je vybrána právě technologie fotovoltaických panelů jako zdroje energie. Nevýhoda nestabilní dodávky energie je vyřešena pomocí bateriového uložení. Nutnost převodu ze střídavého proudu na stejnosměrný odpadá, protože je vytvořena síť, do které je dodáván stejnosměrný proud rovnou z baterie. Při převodu mezi stejnosměrným a střídavým proudem vznikají ztráty. Ty jsou zřetelně viditelné například při výrobě hliníku, kdy pro představu v průměru činí v Evropě tyto ztráty 7,01 % [58]. Samozřejmě jedna z možností je instalace převodu ze stejnosměrného proudu „nano-grid“ do okruhu střídavého proudu závodu, ale tento převod by byl použit spíše pro výjimečné případy. Ukázka navrhovaného přechodu zapojení na elektrickou síť se stejnosměrným proudem je na Obrázku 5. Samozřejmě i sami autoři si uvědomují nutnost nezanedbatelné výměny elektrické infrastruktury v podniku, a dalších výzev spojených s touto technologií. Pokud by však byla tato studie aplikována, průmyslový podnik by tímto řešením mohl pokrýt elektrickou spotřebu osvětlení, větrání, sociálního a kancelářského vybavení, počítačového a senzorového vybavení, chlazení a ohřevu, přesunu vody či materiálu a dalších.



Obrázek 5: Změna infrastruktury z běžného zapojení fotovoltaiky na navrhované

Dalšími možnostmi je využití jiných obnovitelných zdrojů energie jako například větrného či z biomasy, ty však nejsou zmíněny v žádných publikovaných studiích. Pravděpodobným důvodem bude fakt, že jsou v malém měřítku pro průmyslové podniky obecně nerentabilní.¹¹

¹¹ Záleží ale na druhu průmyslu. Podnik produkující biologický odpad může teoreticky tyto technologie využít.

2.2 Softwarová řešení

V současné době je patrný nedostatek postupů poskytujících optimální řešení úspor energie [59]. Pro úspěšnou realizaci projektů byly určeny čtyři důležité faktory:

1. Technická odbornost
2. Získávání provozních dat
3. Modelování, simulace a optimalizace
4. Metodika zahrnující předchozí body

V této kapitole se bude pozornost zaměřovat na body 2 a 3, tedy na modelovací nástroje, simulace, a další softwarové přístupy cílící na zvýšení efektivity průmyslových procesů a celků. Ke konci jsou zmíněny i nově nastupující studie představující Průmysl 4.0. Díky empirickým analýzám v průmyslu [60] bylo potvrzeno, že čím vyšší je úroveň informačních technologií ve firmách, tím vyšší je i samotná produkce, finanční výkonnost a spokojenost zákazníků.

2.2.1 Modelování, simulace a optimalizace

V oblastech modelování jsou již k dispozici studie rešeršního charakteru. Jedna z nich [61] hodnotila metodiky analýz spotřeby energie na úrovni jednotlivých procesů a dále také metodiky holistických analýz spojující stroje, procesní řetězce a prostředí s diskretním i kontinuálním časovým rámcem. Zpracovány byly pouze metodiky s úplným výpočtním modelem a vysokou přesností.

K nástrojům pro modelování patří sensorové vybavení různých druhů. Jedna ze studií zkoumala možnosti chování a přesnosti indikátorů stavu procesu, které zpracovávaly pouze jediný výrobní proces u systému se stlačeným vzduchem [62]. Tyto indikátory se dělí na časově diskretní a časově spojitě. Indikátory časově diskretní se ukázaly jako neschopné při výpočtu účinnosti za volnoběhu strojů, kdežto indikátory časově spojitě uměly zpracovat účinnost procesu kdykoli. Proto pro procesy přeměňující energii byly již doporučeny pouze indikátory časově spojitě.

Nejvíce studií v oblasti modelování se zaměřuje na simulace procesů. V oblasti obráběcích nástrojů se vědecká komunita shoduje o nutnosti nejenom zlepšit konstrukční a technologické zpracování jednotlivých strojů, ale i optimalizovat procesní parametry, nastavení plánování práce a optimalizace. Použití nových technologií totiž vyžaduje vyšší investice, proto by pro firmy měla být schůdnější cesta optimalizace, která má zjevný potenciál úspory energie.

Modely spotřeby energie lze rozdělit do tří kategorií. Jako první jsou lineární typy modelů, dále modely korelace parametrů, a nakonec procesně orientované modely. Slibné možnosti dalšího vývoje jsou spatřovány zavedením korelačních analýz procesních parametrů a nástrojů, a dále měření dat v reálném čase [63]. Jedna ze studií prezentuje SCE model, pro technologii vířivého frézování [21]. Tato technologie se efektivně používá především při obrábění závitů a sestává z rotace obrobku, rotace řezného nástroje a axiálního posuvu řezného nástroje. Po zpracování geometrických, kinematických a silových veličin byl vytvořen geometrický model, následně model řezné síly, a nakonec model konkrétní řezné energie. Při experimentu se prokázala jejich vysoká přesnost. Pro vířivé frézování byl tedy vytvořen postup úpravy řezných parametrů: řezné rychlosti, počtu řezných nástrojů, rychlost obrobku a průměr rotace nástroje k snížení potřebné řezné energie. Pro odvětví obráběcího

průmyslu s vysokou produktivitou byla vytvořena práce, jež si dala za cíl maximalizovat odběr materiálu a minimalizovat spotřebu energie při určité drsnosti povrchu obrobku [64]. Model byl vytvořen na základě metodologie povrchu odezvy a zkontrolován pomocí analýzy rozptylu. Byly zjištěny vztahy faktorů¹² ovlivňujících jednotlivé požadavky a míra jejich dopadu. V dalších studiích lze optimalizaci rozšířit o další faktory.¹³

Aktivity strojů nesouvisející se samotným obráběním mohou mít také vliv na rychlost a spotřebu energie obráběcích strojů. Proto byl vyvinuta metoda mapování toků na základě Therblig¹⁴ pohybů, která redukuje pohyby nesouvisející s obráběním [65]. Elementární prvky pohybů jsou znázorněny na Obrázku 6. Samotná teoretická základna Therbligových pohybů umožňuje efektivně vybrat pohyby a jejich dráhy tak, aby byly nejefektivnější, díky čemuž se sníží spotřeba energie. Ve konkrétní studii bylo zjištěno, že se při použití upraveného modelu snížila spotřeba energie o 7,65 % a využití času zvýšilo o 8,12 %. Touto metodou se tedy zajistí snížení spotřeby energie, aniž by byly změněny řezné parametry, a tudíž byla ovlivněna kvalita samotného procesu.

	Hledání		Použití
	Nalezení		Demontáž
	Výběr		Kontrola
	Uchopení		Pozicování
	Držení		Uvolnění nákladu
	Přesun s nákladem		Neodvratitelné prodlení
	Prázdný přesun		Odvratitelné prodlení
	Pozice		Plánování
	Montáž		Odpočinek

Obrázek 6: Výčet elementárních prvků pracovního pohybu - Therbligů [66]

Nejenom výrobní, ale i pomocné, montážní či další procesy jsou podrobovány modelovacím nástrojům. Jedna z metod [67] návrhu montážního systému sestává z 5 fází a odpovídajících podúkolů vycházejících z 3D modelu. Na základě strukturální analýzy jsou zařízení spotřeby energie (elektrické motory, roboty atd.) modelovány v prostředí fyzické simulace, na jejímž základě jsou poté implementovány a ověřeny. Nakonec jsou zohledněny i otázky životního cyklu celého montážního systému, výška investice a spotřeba energie. Počítá se s dalším vývojem například v oblasti knihoven,

¹² Posuv, řezná rychlost a hloubka řezu

¹³ Zrychlení vřetena, energie osy nástroje a další

¹⁴ Rozdělení základních pohybů používaných Frankem Glibreghem v teorii pohybů na pracovišti.

zařízeních spotřeby energií či katalogů různých opatření ke zvýšení energetické účinnosti a následných algoritmů schopných vybírat z těchto seznamů.

Kromě výrobních procesů je nutno modelovat i energetické ztráty v sítích továren. Za tímto účelem byla vytvořena zdrojová knihovna [68] zahrnující paletu různého vybavení a procesů s tím souvisejících pro typické vodní okruhy.¹⁵ Data mohou být poté využita k modelování a simulacím v přidružených programech, kde se vyhodnocuje dimenzování, údržba, zvýšení účinnosti a návrh obvodů. Program také umožňuje vytvářet indikátory stavu procesu, což usnadňuje výpočty modelů pro každý okruh. Samotná tato „Modelica library“ přejala některé prvky z již existujících knihoven.¹⁶

Modelovací nástroje se tedy neomezují pouze na jednotlivé procesy, ale v různých studiích lze vidět snahu o modelování větších technických celků či celých podniků. Jeden z takovýchto modelů je založen na zjednodušeném mapování toku hodnot se zaměřením na energii [69]. Cílem je rozšířit možnosti snížení energetické náročnosti, zvýšit samotnou účinnost systémů a zapojení lidského faktoru. Lidský faktor je zahrnut ve výsledcích jako: manažerské postupy, vedení a sdílení zkušeností v rámci konkrétního modelu, čímž se podporuje celková energetická účinnost podniku či širšího rámce místo pouhé instalace konkrétních energeticky účinnějších technologií.

Sběr dat vyžaduje pokročilejší programové systémy zvláště u high-tech podniků, což se podařilo ve studii, která si dala za cíl vyvinout program pro měření továrny na polovodiče [70]. Zde naměřená data zjistila tři hlavní spotřebitele energie v daném závodě – procesní nástroj, chladič vody a suché čističe vzduchu. Namodelovaná spotřeba elektrické energie všech těchto spotřebičů se lišila pouze o 0,73 % od změřených hodnot. Pomocí dalších podpůrných systémů se podařilo snížit spotřebu energie například u chladiče o 43,7 % pouze pomocí změny výkonu. Celkově se podařilo snížit spotřebu továrny o 10 %. V navazující studii byla pozornost zaměřena na suché čističe vzduchu [71], kde byl navržen nový dvoutlakový systém používající vyhřívaný sušič, což mělo za následek úspory 1,8 % celé továrny. Výsledky také ukázaly, že snížení provozní teploty vzduchu způsobilo úspory pro chladicí systém, což v součtu snížilo odběr elektrické energie o 2,1% celé továrny. Kromě toho by také mohl systém chlazení procesní vody snížit spotřebu energie o další 0,9 %.

Snížení energetické náročnosti nemusí být nutně důvodem k úpravám zařízení či nákupu nových technologií. Studie z roku 2015 [72] ukazuje možnost vymodelování výrobní linky a určení vztahu mezi operačními strategiemi, produkčními rozvrhy a spotřebou energie. Pomocí Analýzy odchylky byly vypočteny účinky každé operační strategie na míru spotřeby energie a výsledky potvrdily, že rozdíly v různých strategiích dosahují nezanedbatelných hodnot, čímž tedy lze dosáhnout bez větších investic úspory energie bez nutnosti úprav zařízení.

Co se však týče komplexnějších modelovacích programů, které lze spojit s přístupem Průmyslu 4.0, jež bude rozebrán v následující podkapitole, je vidět jejich pokrok na příkladu „Energy Efficiency Analysis Modelling System (Systém modelování analýzy energetické účinnosti) [73]. Tento systém byl vytvořen na základě snahy průmyslových podniků snižovat energetické výdaje. Další motivací byla také nedostatečná informovanost o energetickém managementu, zdrojích a implantování nástrojů pro monitorování energetických ztrát. Vytvořený systém kalkuluje energetické výdaje a

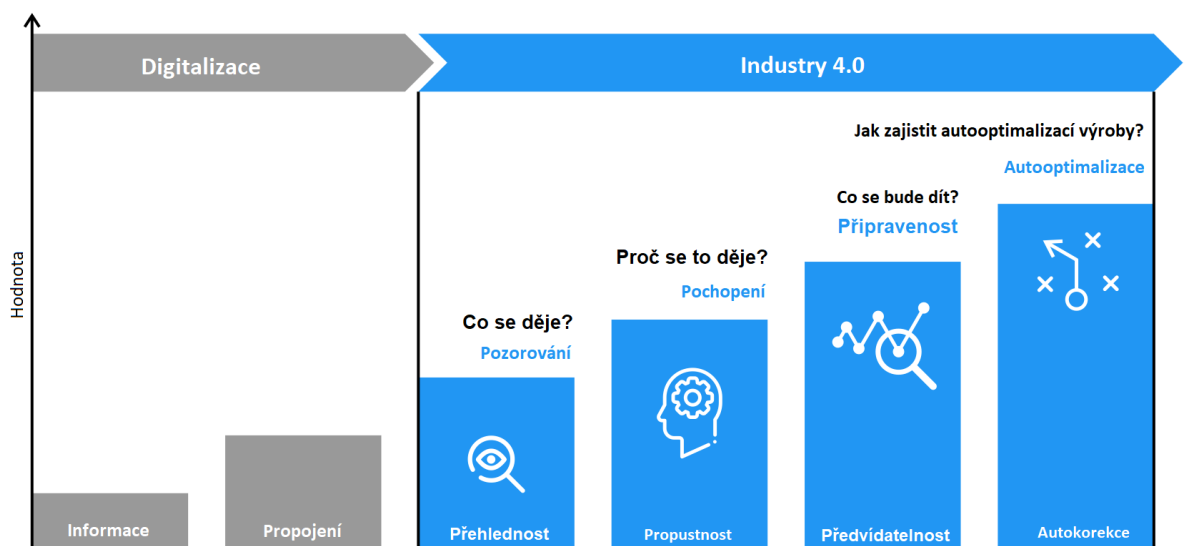
¹⁵ Jako například: chladičí a čistící zařízení, úprava vody, čerpadla, infrastruktura

¹⁶ Srovnej [111] a opensource knihovny např. Fluid Dissipation nebo TILMedia

pomocí nich je omezeno množství spotřebované energie při plnění určitého strojního úkonu. Zároveň určuje dopad jednotlivých faktorů na úspory. Dále zahrnuje myšlenku vylepšení v rámci integrace tzv. „big data“ se softwarem pro zvyšování energetické účinnosti.

2.2.2 Průmysl 4.0

Průmysl 4.0 je: „Název současného trendu automatizace a výměny dat ve výrobních technologiích zahrnujících kybernetické systémy, Internet věcí, cloudové ukládání, kognitivní učení a vytváření inteligentních továren.“ Jakým způsobem Průmysl 4.0 navazuje na digitální technologie lze vidět na Obrázku 7. Česká republika si je vědoma potřeby integrace Průmyslu 4.0 do průmyslové základny i ekonomiky celoplošně, proto vydala v roce 2019 dokument „Iniciativa Průmysl 4.0“ [74]. Nejenom strojní inženýrství je zahrnuto v této iniciativě. Lze se například dočíst, že: „Cílem Průmyslu 4.0 je přinést úplné digitální propojení všech úrovní tvorby přidané hodnoty.“ [75]



Obrázek 7: Zaměření Průmyslu 4.0 [76]

Průmysl 4.0 by měl pomoci s komplikovaností výrobních systémů, kde lze rozdělit problematiku energetických úspor do jednotlivých úrovní. U všech úrovní bude ale potřeba instalace kvalitních monitorovacích a kontrolních systémů, které dokážou reagovat v reálném čase dle požadavků Průmyslu 4.0. Úroveň stroje je samozřejmě řešena z hlediska materiálů a optimalizace parametrů při výkonu práce, ale vysoká nepřesnost modelů ukázala potřebu propojení strojů s dalšími faktory. Procesní úroveň je složena z více strojů, které se navzájem ovlivňují, ale ani jejich interakce nedokáže plně vysvětlit jevy související s energetickou účinností, proto je potřeba pozornosti i na úrovni továrny, kde je nutné zahrnout interakce různých výrobních systémů s technickými službami budov, zvážení managementových zlepšení či zefektivnění zdrojů energie a jejich infrastruktury [77]. Propojení všech těchto úrovní by mělo být možné s použitím správných softwarových přístupů.

V současné době je přes 120 (data z roku 2017) softwarových systémů, které mají za cíl podporu energetických systémů podniků. Výkonný ředitel IMBC GmbH Horst Junker a profesor Carsten Domann se však domnívají, že tyto současné systémy

nemohou být nápomocny v rozvoji Průmyslu 4.0 [78], protože postrádají základní charakteristiky:

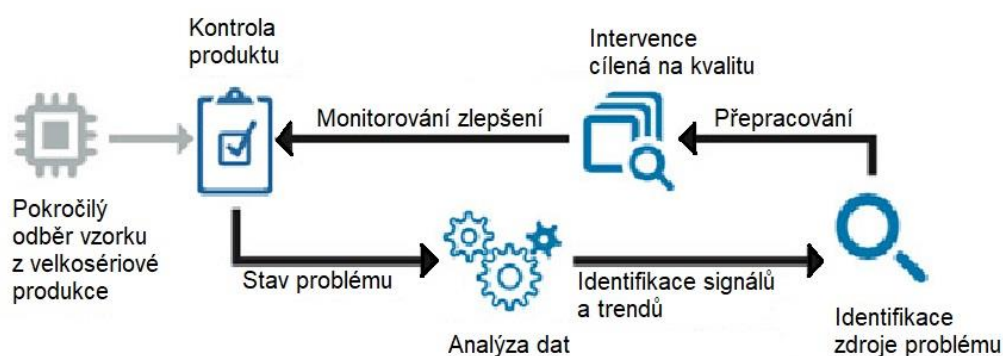
1. Nejsou schopny přenášet data v reálném čase
2. Neobsahují plánovací a kontrolní mechanismy (založené na Big data a Business intelligence)

Podle nich současné informační technologie potřebují další funkce:

1. Použití standartního hardwaru (běžně dostupného)
2. Nízká cena komunikačních modulů
3. Podpora různých komunikačních systémů mezi stroji a moduly
4. Obecné rozhraní měřících přístrojů kvůli možnosti volného výběru vyhodnocovacího softwaru
5. Formát pro přenos a skladování dat
6. Schopnost samo-organizace systému
7. Technický standart pro celý podnik

Podle autorů bude až po aplikacích těchto funkcí dostáno požadavkům Průmyslu 4.0. Protože Průmysl 4.0 je založen na informačním zpracování dat sensorů, starší stroje, které postrádají tyto senzory, tak logicky nemohou být zapojeny do výpočtů těchto programů. Tento problém byl však vyřešen pomocí „Embedded Smart Box“ (Vestavěný smart box), který využívá externích sensorů ke sběru dat a následnému výpočtu účinnosti zařízení a spotřeby energie [79]. Navíc schopnost připojení k intranetu (případně internetu) dává možnost sledovat data v reálném čase, a tudíž schopnost zlepšit plánování a energetickou účinnost i u staršího stroje, jak ukazuje Obrázek 8.

Monitorování v reálném čase s použitím analýzy dat



Obrázek 8: Monitorování v reálném čase [80]

Do Průmyslu 4.0 lze zařadit i oblast pokročilých simulací. Jedním ze zástupců jsou sémantické informační modely, které lze využívat ke spojování znalostí do logických systémů [81]. V současné době jsou základní strukturální vrstvou pro vývoj programů, které budou moci stahovat a zpracovávat data pro analýzy a komplexní výpočty. Nejnovějším vývojovým stádiem jazyků informačních modelů je tzv. „Web

Ontology Language“, který umožňuje přidávat nová schémata a moduly spolu s geometrickými prvky, procesními operacemi a energetickými analýzami. Díky těmto prvkům se mohou integrovat data z různých aplikací, a navíc se může usnadnit integrace dat v celém podniku. Přínos lze také spatřovat v shromažďování znalostí fyziky a modelových technik.

Jako konkrétní aplikace simulací je Hybridní simulační optimalizace, která bere v úvahu tok materiálu, termální a fyzické chování výrobních systémů a zahrnuje dvoufázovou optimalizační metodu navrženou na základě „Genetic Algorithm“ [82]. Na základě úprav byla ušetřena energie o velikosti 20 % z celkové spotřeby. V budoucnu se plánuje dále rozvíjet systém tak, aby dokázal komplexně zlepšit optimalizaci a snížit spotřebu energie celých továren. Další konkrétními zástupci jsou surrogátní modely plynulých procesů [83]. Pomocí ukazatelů výkonnosti lze rozlišovat mezi neovlivnitelnými a ovlivnitelnými faktory plynulých procesů. Těmito rozumíme například: okolní teplotu, provozní výkonnost a další. Software tedy vytvoří surrogátní model na základě procesních dat pomocí klastrovacích a zjednodušovacích algoritmů. Dále je možnost použít tento model pro monitorování výkonnosti procesů v reálném čase. Tato metoda ale nezahrnuje znalosti dalších typů procesů, proto není univerzálně použitelná. V této oblasti výzkumu se bude dále směřovat do dílčích procesů a jejich modelování a následného systematického interagování.

V jedné z dalších studií byla představena hybridní optimalizační metoda pro čerpadla [84], která navrhuje optimalizaci rozvrhu čerpání během dne pomocí genetického algoritmu. Díky tomuto přístupu lze zvýšit energetickou účinnost v průměru o 15 %. Předpokládá se možnost propojení s dalšími programy, které by s minimálními investicemi mohly účinnost dále zvýšit. U technologie parních kotlů se setkáváme s přístupem zvyšování účinnosti skrze managementový systém [24]. Nejprve je nutné zjistit, zda sledovaný kotel pracuje v optimálním režimu. Toto se dá zjistit aplikováním iEMS¹⁷ - integrovaného energetického managementového systému, který využívá výpočetní techniky k monitorování zapojených zařízení. Tento systém identifikuje místa energeticky neefektivní. Na jejich základě lze tedy vypracovat možnosti zlepšení v monitorování a úpravě provozu. Další z cest vede k zvýšení energetické účinnosti přes implementaci senzorového vybavení a řídicího systému se sběrem dat [85], který ale navíc rovnou upravuje veličiny v kotli: například snížení tlaku v kotli. Úspora byla v jedné ze studií spočtena na 20 % úspory paliva, při použití parního kotle na zemní plyn.

Jak již bylo zpracováno v kapitole 2.1.2, obráběcí stroje spotřebovávají velké množství energie s malou efektivitou. Průzkumy dokládají, že účinnost obráběcích dílen je pouze okolo 30 % procent.¹⁸ Kvůli komplikovaným energetickým vztahům je přítomno nedostatek metod, které by tento problém řešily. Díky možnostem technologie „Internet věcí“ je však možno monitorovat obráběcí stroje, případně snížit energetickou náročnost strojů díky identifikaci možných míst úspor [86]. Díky monitorování obráběcích dílen bude možnost vytvořit vztahy mezi reznými parametry, trajektoriemi pohybů a úkoly strojů tak, aby po sběru dat bylo možné vyhodnotit nejlepší možná nastavení v průběhu jednotlivých operací jedním počítačem, který by dokázal obstarat výpočty pro více strojů. Vývoj technologie strojového učení zaujala výzkumníky v oboru obrábění, kteří využili této technologie a vytvořili programy založené na vytvoření statistických funkcí a rozhodovacích stromů [87]. Na základě již získaných

¹⁷ Srovnej [112]

¹⁸ Srovnej [113] a [114]

dat byly predikovány možnosti chyb a nastavení řezného nástroje, čímž se nejenom snižuje spotřeba energie, ale šetří se prostředky pro opravy a údržbu. Tento přístup je vhodný i pro diagnostiku v reálném čase, čímž se dále snižuje spotřeba energie.

V technologii stlačeného vzduchu byla nalezena možnost aplikace metodiky spojené s monitorováním vzduchového systému v reálném čase [88], kde se nejprve synchronizují a nahrávají data, poté probíhá počítačová analýza – rozbořením korelace jednotlivých vstupních údajů a jejich regresní analýzy. Na základě těchto dat se vypracuje model, díky kterému může probíhat přesnější řízení celého systému.

Protože energetická opatření mohou mít mnohočetné účinky na různé entity v továrnách, schopnost posoudit tyto účinky může mít velmi přínosný vliv pro celkovou účinnost továren. Studie z roku 2018 navrhuje sloučit „Energy building simulation“ (energetická simulace budovy) a výpočty tepelných toků ze strojních operací. Měření tepelných úniků a toků umožňuje redukovat nadměrné dimenzování různých zařízení. Pokud se totiž pozornost nezaměřuje pouze na zvýšení energetické účinnosti strojů, ale i tovární budovy jako celku, lze si všimnout, že zvýšení energetické účinnosti v infrastruktuře továrny představuje až 35 % celkových energetických úspor. Díky energetickým simulacím budov je tedy možné zjistit dopad optimalizace jednotlivých strojů, procesů, technického vybavení budov i infrastruktury. V budoucnu se chtějí výzkumníci zaměřit na sběr dat, modelování, propojení řídicích systémů a autonomní datově řízené optimalizace [89].

Pokročilým krokem v rámci Průmyslu 4.0 se jeví přístup tzv. „smart factories“ (chytré továrny), kde je navrhována například integrace více podniků. Dříve se používal termín „smart grid“ (chytrá síť), který se zaměřoval především na energetickou část průmyslu, avšak nový termín „smart energy“ (chytrá energie) je použit v širším významu. Tato problematika se tedy netýká jenom energetiky, ale i dopravy, stavebnictví a v neposlední řadě i strojírenského inženýrství, kde umožní přechod k efektivnějším a automatizovanějším řešením spojeným se zvyšováním energetické efektivity průmyslových podniků. V roce 2015 byl v Dánsku proveden pokus odhadnout možnosti integrace průmyslového sektoru do „smart energy system“ [90]. Tento systém chytré energie by měl v budoucnu fungovat na principu společného zapojení elektrických a tepelných sítí v rámci různých druhů průmyslu na určitém území, čímž by se mělo dosáhnout jejich energetické koordinace. Bohužel v současnosti nelze tento fenomén vidět v praxi, a tudíž se prozatím jedná o teoretickou koncepci [91].

Aby bylo docíleno tzv. „smart factories“ je potřeba učinit potřebný výzkum [92]. Posílení udržitelnosti a energetické účinnosti zahrnuje nejvýznamnější pokrok a zároveň mezery ve současném výzkumu, které vyžadují další vývoj:

1. Deep learning, data mining a další počítačové technologie jsou důležité v rozvoji nových výrobních řízení, ale jejich spojení s energetickou účinností či udržitelností není zatím dostatečně rozvíjeno i díky komplikovanosti těchto oblastí.
2. Výkonné výpočetní systémy a sdílená data jsou velice přínosnými technologiemi, naneštěstí je jejich vývoj v počátečním stadiu a vývojáři jsou si vědomi těžkého začlenění těchto technik do výrobních systémů a postupů a jejich významné spotřeby energie.
3. Aditivní výroba umožňuje výrobu složitých geometrických součástí, přesto je zde možnost monitorování v reálném čase a zlepšení výroby samotných aditiv.

4. Obnovitelné energie jsou sice využívány, ale v malé míře, a proto je zde nutnost dalšího výzkumu.
5. Dalším odvětvím, kde je spatřován možný vývoj jsou zařízení pro ukládání elektrické energie, což implikuje pokrok ve výrobě baterií a lepších systémů chlazení.

Autory je odhadováno, že při vývoji moderních technologií bude kladen velký důraz na udržitelnost, do čehož lze zařadit výše zmíněné obnovitelné zdroje energie nebo recyklace materiálů a další.

V kapitole 2. Stávající přístupy zvyšování energetické účinnosti byly systematicky prezentovány výsledky literární rešerše vědeckých publikací, ale i současně používaných energetických příruček. V následující kapitole 3. Energetický audit bude popsán přístup energetických auditů, přičemž bude zpracován konkrétní energetický audit, aby bylo možné porovnat podobnosti či případné rozdíly v přístupech použitých v praxi a těch z odborných publikací.

3. Energetický audit

V této části bakalářské práce je rozebrán energetický audit, aby bylo možné zjistit podobnosti a rozdíly mezi již používanými přístupy k zvyšování energetické účinnosti a navrhovanými přístupy.

3.1 Definice energetického auditu

Energetický audit je dokument zpracovaný energetickým specialistou mající za cíl vyhodnotit aktuální spotřebu a užívání energií v určitém podniku a navrhnout možnosti energetických úspor. Energetický audit je zaveden zákonem č. 406/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů.¹⁹

Na zákon č. 406/2000 Sb. je odkazováno i v průvodcích pro energetické specialisty, který zdůrazňuje nutnost podrobné znalosti těch paragrafů, které přímo souvisejí se specializací konkrétního specialisty, přičemž je odkazováno i na normy a technicko-normalizační informace tykající se energetických auditů [93]. Energetický audit je definován takto: „*Energetický audit je písemná zpráva obsahující informace o stávající nebo předpokládané úrovni využívání energie v budovách, v energetickém hospodářství, v průmyslovém postupu a energetických službách s popisem a stanovením technicky, ekologicky a ekonomicky efektivních návrhů na zvýšení úspor energie nebo zvýšení energetické účinnosti včetně doporučení k realizaci.*“ [94]

Podle § 3 vyhlášky č. 480/2012 Sb.:

Energetický audit obsahuje:

- 1) *titulní list,*
- 2) *identifikační údaje,*
- 3) *popis stávajícího stavu předmětu energetického auditu,*
- 4) *vyhodnocení stávajícího stavu předmětu energetického auditu,*
- 5) *návrhy opatření ke zvýšení účinnosti užití energie,*
- 6) *varianty z návrhu jednotlivých opatření,*
- 7) *výběr optimální varianty,*
- 8) *doporučení energetického specialisty oprávněného zpracovat energetický audit*
- 9) *evidenční list energetického auditu, jehož vzor je uveden v příloze č. 1 k této vyhlášce,*
- 10) *kopii dokladu o vydání oprávnění podle § 10b zákona nebo kopii oprávnění osoby pro vykonávání této činnosti podle právního předpisu jiného členského státu Evropské unie.*“ [95]

Zákon č. 406/2000 Sb. dále upřesňuje náležitosti jako:

1. Pro koho je energetický audit povinný²⁰

¹⁹ Srovnej [115]

²⁰ Jsou vyjmenovány přesné hodnoty, kdy je audit povinný, přičemž tyto se nevztahují na podnikatele, jehož energetické hospodářství spotřebuje méně než 200MW ročně [116]

2. Kdo může být pověřen zpracováním auditu – pouze energetický specialista disponující osvědčením Ministerstva průmyslu a obchodu, a který je zapsán v Seznamu energetických specialistů
3. Jednotlivé požadavky na přístroje – především jejich minimální energetickou účinnost
4. Označování energetickými štítky – pro elektrospotřebiče

Energetické audity však nejsou pouze povinností, ale také reálnou možností snížení energetické náročnosti podniku a snížení provozních nákladů, protože identifikují toky energií a navrhují jejich zefektivnění [7]. Dále například zpracovávají i energetické bilance, kde se porovnává vyčíslení spotřeby s reálnými náklady u konkrétních spotřebičů. Samozřejmě specifika zpracování záleží na konkrétním průmyslovém odvětví a požadavcích auditu.

3.2 Rozbor energetického auditu

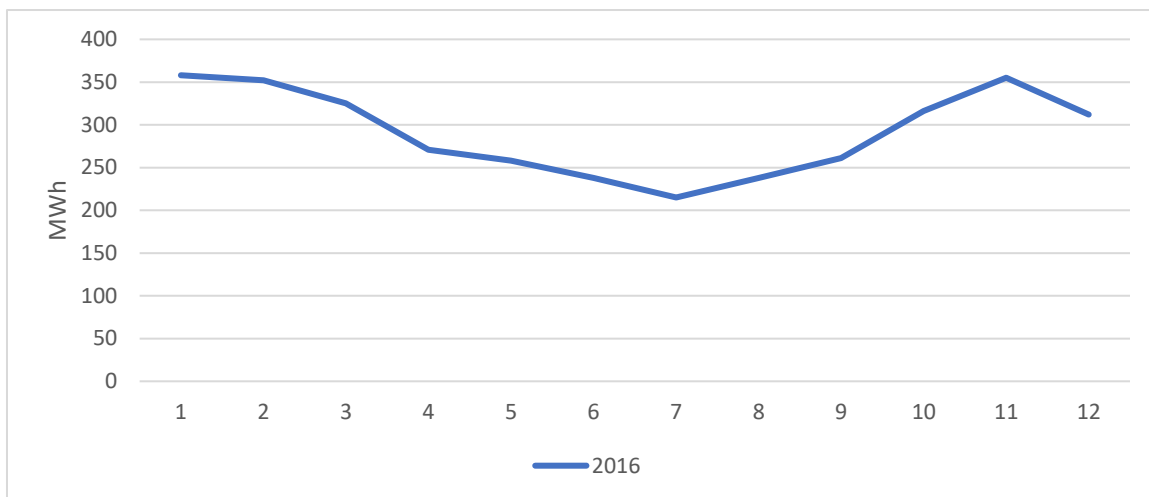
Pro potřeby identifikace jednotlivých částí energetického auditu a dále posouzení přístupů návrhů ke zvýšení účinnosti energie, byl vybrán audit zpracovávající informace o blíže nespecifikovaném výrobním podniku firmou CEVRE Consultants, s.r.o. pro Ústav procesního inženýrství, FSI VUT v Brně [96].

Celý energetický audit je členěn na 5 hlavních částí, které naplňují § 3 vyhlášky č. 480/2012 Sb. uvedený v předchozí kapitole:

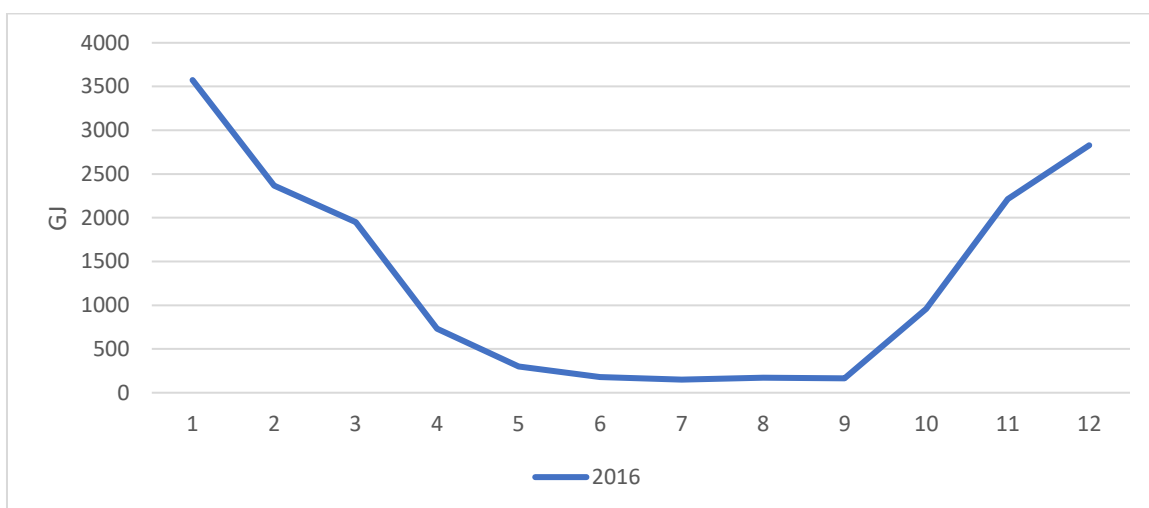
1. Úvod
2. Základní údaje o předmětu studie
3. Návrhy opatření
4. Porovnávání opatření a jejich kombinací
5. Závěr a doporučení

V Úvodní části jsou vypsány: Cíl studie, Identifikační údaje a Aplikace DPH na uživatele předmětu studie. Nejobsáhlejší částí jsou „Podklady pro zpracování“, kde jsou identifikovány jednotlivé projektové podklady, fotodokumentace, cenové nabídky, ale i zároveň vypsány Související technické normy a Související legislativa v platném znění. Z těchto zdrojů se poté postupovalo při „Návrzích opatření“ na snížení energetické náročnosti vybraného průmyslového podniku.

V části „Základní údaje o předmětu studie“ je přítomen náčrt půdorysu areálu s hlavními rozměry budov a jejich určením; následně energetické vstupy elektrické energie (jak lze vidět na Obrázku 9), zemního plynu, pitné vody a tepla (jak lze vidět na Obrázku 10), přičemž v následující kapitole „Energetická bilance“ jsou tyto vstupy porovnány dle finančních nákladů a energetických jednotek. V této kapitole jsou také vyobrazeny roční spotřeby jednotlivých výstupů podniku (vytápění, chlazení, větrání, osvětlení, úprava vlhkosti, a další) opět dle finančních nákladů a energetických jednotek. Pro potřeby rozšířených znalostí o spotřebě energií byly též k dispozici odběrové diagramy elektrické energie a tepla, načež byly hrubě vyčísleny potenciální možnosti v úspoře tepla a identifikovány významné spotřebiče z hlediska spotřeby elektrické energie. Jako poslední informace o podniku lze najít informaci o jednosměnném provozu podniku v určitém časovém horizontu pracovního dne.



Obrázek 9: Spotřeba elektřiny v hodnoceném roce [101]



Obrázek 10: Spotřeba tepla v hodnoceném roce [101]

Následuje část „Návrhy opatření,“ která je rozčleněna na tři části:

1. Organizační a nízkonákladová opatření, kde je zdůrazňována správná údržba zařízení či minimalizace plýtvání elektrickou či tepelnou energií i vodou, přičemž u poslední zmiňované jsou doporučeny nízkonákladová opatření (návratnost zpravidla v řádu měsíců)
2. Přehled navrhovaných opatření, které se týkají již vysokonákladových opatření a technicky složitějších zařízení
3. Přehled navrhovaných kombinací opatření, které umožní varianty navrhovaných opatření jsou uvedeny z důvodu podmínek pro dotace, přičemž z hlediska energetických úspor nepřinášejí přidanou hodnotu

Kapitolám o navrhovaných opatření či kombinacích navrhovaných opatření bude podrobně věnována samostatná pozornost.

V předposlední části jsou znázorněny porovnání opatření a jejich kombinace z hlediska úspor energie, úspor nákladů, investičních nákladů a prosté doby návratnosti.

V „Závěru“ je navrhováno opatření pro uživatele průmyslového podniku, přičemž informuje o případných úsporách a možných investičních dotacích.

Přehled navrhovaných opatření:

1. Renovace střešních světlíků výměnou zasklení za kvalitní polykarbonát (haly energetika)
2. Snížení energetické náročnosti odsávání z tryskače pro ruční tryskání
3. Modernizace osvětlení expedičních hal pomocí zdrojů LED (typové opatření)
- 3.1 Modernizace osvětlení vybraných hal pomocí zdrojů LED (rozšířené opatření)
4. Snížení energetické náročnosti vytápění doplněním destratifikátorů pod střechem hal st. strojů
5. Využití odpadního tepla z kompresoru stlačeného vzduchu
6. Snížení energetické náročnosti procesu řezání výměnou laseru L 3030 za nový typu Fiber
7. Fotovoltaická elektrárna pro vlastní spotřebu podniku 100 kWp

Každé z navrhovaných opatření je strukturováno do kapitol: Energetická bilance a Emisní bilance CO₂, Přípravenost, Technická kritéria, Regionální hledisko, Ekonomická kritéria, Celkové hodnocení, Kritéria přijatelnosti, Ekonomické hodnocení a Okrajové podmínky výpočtu, případně grafy a schémata, přičemž závěrem jsou zapsány podmínky pro možnost zpřesnění výpočtů, pokud by bylo rozhodnuto o realizaci navrhovaného opatření. Procentuální vyjádření snížení spotřeby energie jsem vypočítal z Energetické bilance, reálná návratnost je uvedena v Ekonomickém hodnocení.

1. Renovace střešních světlíků výměnou zasklení za kvalitní polykarbonát (haly energetika)

Se záměrem snížení energetické náročnosti budov díky zlepšení obálky je renovace střešních světlíků klasickým zástupcem snižování tepelných ztrát. Navržená výměna stávajícího drátoskla za vícekomorový polykarbonát má snížit prostup tepla se snížením spotřeby energie o 25% s reálnou návratností 12 let.

2. Snížení energetické náročnosti odsávání z tryskače pro ruční tryskání

Druhé opatření se týká zvyšování účinnosti výrobních a technologických procesů, kdy je navrhováno doplnění frekvenčního měniče k motoru odtahového ventilátoru a čidla. Cílem je snížení příkonu motoru v době manipulačního prostoje, ale nebude docházet k vypínání kvůli rázům. Spotřeba energie by se měla snížit o 14% s reálnou návratností 15 let.

3. Modernizace osvětlení expedičních hal pomocí zdrojů LED (typové opatření)

Protože výrobní haly jsou osvětleny výbojkovými zdroji, je navrhována technologie LED, která má za cíl snížit instalovaný příkon o 34% s reálnou návratností 9 let.

- 3.1 Modernizace osvětlení vybraných hal pomocí zdrojů LED (rozšířené opatření)

Viz. předchozí opatření po technické stránce, ale snížení příkonu o 40% a reálná návratnost 14 let.

- Snížení energetické náročnosti vytápění doplněním destratifikátorů pod střechu hal st. strojů

Opět druh snížení energetické náročnosti budov se zavedením destratifikátorů²¹ do podstřešního prostoru, čímž dojde k úspoře tepla – snížení spotřeby energie o 12% s reálnou návratností 9 let.

- Využití odpadního tepla z kompresoru stlačeného vzduchu

Odpadní teplo z chladícího oleje kompresoru bude odváděno do výměňkové stanice a napojeno do otopného systému pro vytápění a ohřev vody. Snížení spotřeby energie o 56% s reálnou návratností 4 roky.

- Snížení energetické náročnosti procesu řezání výměnou laseru L 3030 za nový typu Fiber

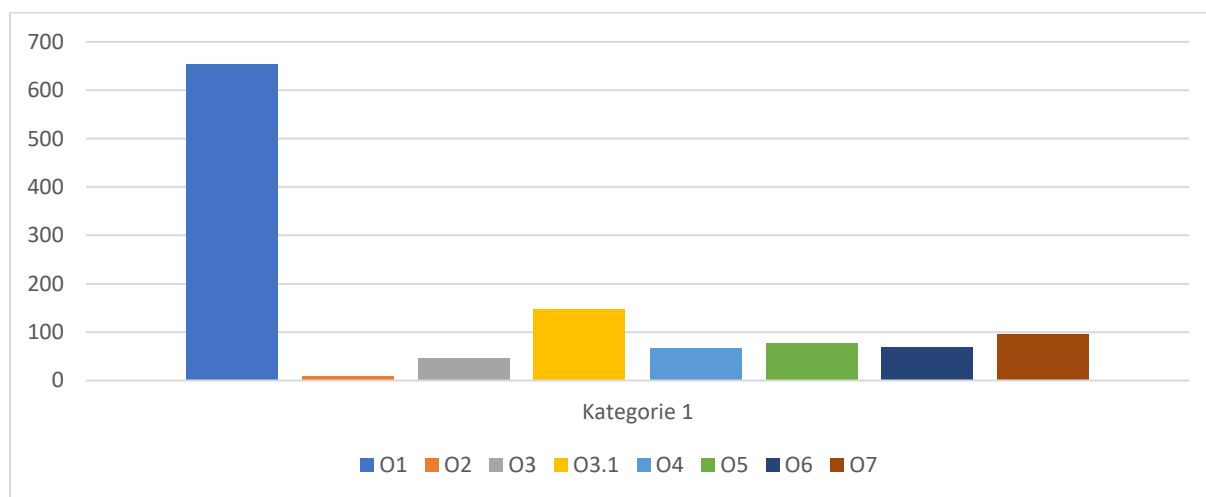
Stávající laser je založený na technologii CO₂ a bude na hrazen. Navrhovaná pevnolátková technologie disponuje účinnějším zdrojem paprsku čímž dojde ke snížení příkonu i roční spotřeby energie o 57% s prostou návratností 51,6 let, tudíž reálnou ještě vyšší.

- Fotovoltaická elektrárna pro vlastní spotřebu podniku 100 kWp

Jako poslední opatření je navrhována instalace obnovitelného zdroje energie ve formě fotovoltaické elektrárny o výkonu 100 kWp²² ve sklonu cca 10°. Vyrobená elektrická energie slouží pro vlastní spotřebu. Doba reálné návratnosti je vyčíslena na 16 let.

Při porovnání opatření vychází nejvýhodněji:

- podle úspor energie renovace střešních světlíků s úsporou 655,5 MWh/rok dle Obrázku 11

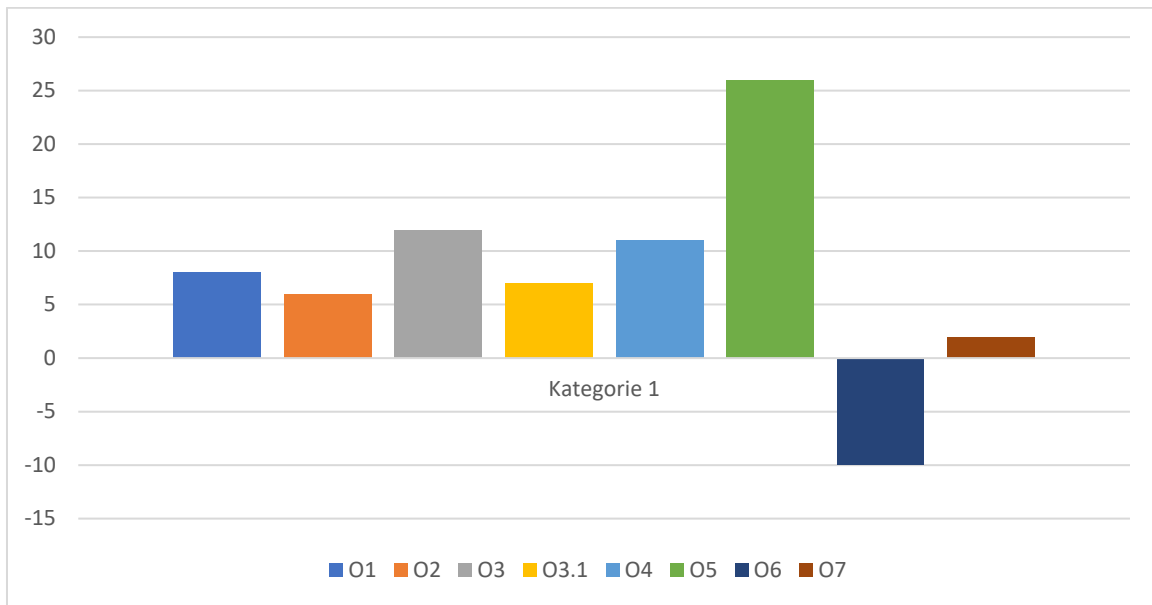


Obrázek 11: Porovnání opatření z hlediska úspor energie [101]

²¹ Destratifikátor je stroj sloužící k cirkulaci velkého množství vzduchu o malé rychlosti proudění z horních vrstev do spodních částí objektu

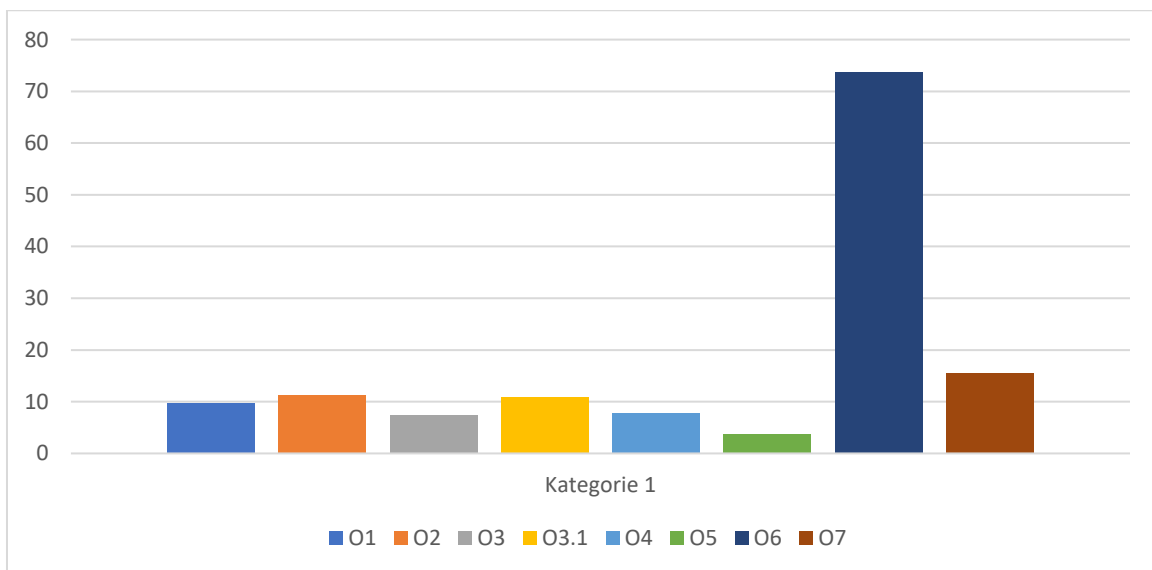
²² kWp = kilowatt-peak, což znamená jednotka špičkového výkonu fotovoltaické elektrárny (ideální umístění za plného slunce)

2. podle vnitřního výnosového procenta samotné využití odpadního tepla z kompresoru dle Obrázku 12



Obrázek 12: Porovnání opatření z hlediska vnitřního výnosového procenta [101]

3. podle prosté doby návratnosti samotné doplnění destratifikátorů s prostou dobou návratnosti 3,8 roku dle Obrázku 13



Obrázek 13: Porovnání opatření z hlediska prosté doby návratnosti [101]

4. podle investičních nákladů vychází nejlevněji též doplnění destratifikátorů

3.3 Zaměření auditů

Během uplynulých dvaceti let je možno sledovat posun v zaměření pozornosti energetických auditů. Tyto změny jsou patrné i v energetických příručkách. Například v příručce z roku 1999 [97] od tehdejší České energetické agentury²³ se lze dočíst o instalaci solárních systémů pouze v souvislosti s vytápěním, nikoli s výrobou elektrické energie, protože využití a aplikování obnovitelných zdrojů energie bylo tehdy ve fázi vývoje [98]. V současnosti lze například nalézt nový trend zapojování manažerů a pracovníků do vyhodnocování energetických auditů,²⁴ což dává větší možnosti v získávání informací o procesech či rovnou nalézání například nízkonákladových řešení.

Lze konstatovat, že audity se v současné době zaměřují na snížení energetické náročnosti budov, případně oblast výrobních a technologických procesů z hlediska výměny jednotlivých strojů. Především oblast energetiky (budov) spadá do kategorie investic s nízkým rizikem, protože zřídka zahrnují aplikaci špičkových technologií [99]. Dále se sleduje tok tepelné energie a možnosti snižování jejího úniku. Z hlediska konkrétních zařízení jsou zefektivňovány systémy jako: elektrické motory, svítidla, parní systémy, ohřev, čerpadla, tlakovzdušné systémy, ventilátory a další. V nízkonákladovém sektoru se pozornost zaměřuje na odstraňování plýtvání nebo plánování výroby podle účinnosti strojů tak, aby nevznikaly vysoké energetické nároky kvůli práci stroje v neúčinné části křivky výkonu [7].

²³ Byla zrušena a převedena na Ministerstvo průmyslu a obchodu a Statní energetickou inspekci

²⁴ Srovnej [99] a [7]

4. Zhodnocení možností přístupů

V této části práce jsou vyvozeny závěry jak z kapitoly 2., tak kapitoly 3., přičemž jsou porovnány i z hlediska jejich vzájemného ovlivnění. Jsou zhodnoceny i možnosti aplikace nejnovějších vědeckých studií.

4.1 Současná praxe

Při porovnání první a druhé části této bakalářské práce jsou patrné rozdílné přístupy k řešení problematiky zvýšení efektivity průmyslových podniků. „*Standardní postupy energetického managementu nepřinášejí uspokojivé výsledky, což otevírá cestu k využití sofistikovanějších, vědeckých metod.*“ [1] Na základě porovnání kapitoly 2. s podkapitolami 3.2 a 3.3 lze pozorovat rozdílná zaměření mezi novými přístupy zvyšování energetické účinnosti v průmyslu, současnými energetickými audity a reálným přijetím jednotlivých opatření. Logicky navazuje otázka, proč tomu tak je? Nabízí se možnost tyto jevy od sebe oddělit a nejprve zhodnotit důvody rozdílu mezi novými přístupy a energetickými audity a až následně rozdíly mezi energetickými audity a přijetím jejich opatření. Důvody obou případů se však zdají být totožné: nejistota uspokojivé finanční návratnosti²⁵ a absence dostatečné informovanosti.²⁶

Z hlediska sofistikovanějších možností výpočtu finanční návratnosti lze najít studii navrhnoucí rozhodovací model [100] pro zhodnocování vhodnějších investičních variant při zohlednění nejistoty.²⁷ Tento model je počítán pomocí NPV²⁸ funkce a zahrnuje pouze spotřebu výrobních procesů. Model je však doporučován pro energeticky náročnější odvětví a nezahrnuje pomocné procesy, pouze ty související přímo s výrobou. Bude tedy nutné vytvořit takové rozhodovací modely, které postihnou co největší počet odvětví průmyslu, především v oblasti softwarových opatření, aby byla vyřešena problematika uspokojivé finanční návratnosti.

Hledisko absence dostatečné informovanosti se však jeví jako komplexnější problém. Nové studie jsou, jak je možno pozorovat v přístupech první kapitoly této práce, nepropojené s ostatními studiemi, a tedy nepřilíš univerzální. Jelikož v praxi existuje: „*Nedůvěra provozovatelů v nepodložená řešení.*“ [1] nemají energetické příručky ani energetičtí specialisté motivaci implementovat nové přístupy, kvůli nepřítomnosti univerzálních metodik.

Energetické příručky, které přímo informují energetické specialisty, obsahují metody výpočtů ekonomické návratnosti, navrhnou metody pro využití zbytkového tepla či integrace firmy z hlediska toků energií, ale neposkytují přehled možných komplexnějších metod v rámci výrobních procesů.²⁹ Jediná zmínka byla nalezena v příručce Evropské unie z roku 2016 [101], kde lze nalézt krátký odstavec o automatizaci. Jsou zde vyjmenovány různé nové přístupy k zvyšování energetické účinnosti v průmyslu jako: kontrola procesu, monitorování pomocí senzorů, fuzzy logické systémy, statistické analýzy. Žádnou z těchto oblastí však dále nerozvíjí, nespécifikuje, a už vůbec neposkytuje možné konkrétní metodické přístupy.

²⁵ Viz studie: [69], [72], [74]

²⁶ Viz studie: [104], [72], [69]

²⁷ Na základě stochastické poptávky

²⁸ Metoda Čisté současné hodnoty je finanční ukazatel ukazující návratnost projektu. Zahrnuje životnost projektu, hotovostní toky a náklady kapitálu [117]

²⁹ Srovnej [118], [7]

Energetické příručky totiž nemohou navrhovat metodologie zabývající se konkrétním typem podniku či procesu, protože potřebují univerzální přístupy aplikovatelné na co nejširší paletu oblastí průmyslu.

V současnosti energetické audity navrhují u výrobních procesů výměnu strojů z hlediska aplikace možností novějších technologií. Na základě rešerše z kapitoly 3.3 může být tedy důvodem proč nedochází k implementaci modernějších optimalizačních přístupů v reálných případech fakt, že ani výše zmíněné energetické příručky neinformují o možnostech těchto přístupů, tudíž energetičtí specialisté přichází o přímé možnosti informovanosti o těchto tématech. Nadto studie zpracovávající 280 energetických auditů tvrdí, že velké množství nákladově efektivních opatření zůstává z finančních důvodů, nedostatku informací a omezených interních dovedností neimplementováno [102].

4.2 Překážky pro posun

V průmyslu lze vidět problémy s praktickým plněním standardů co se týče účinnosti spotřeby energie a kontroly jejího úniku ze stavebních celků [103]. Ačkoli se tato práce tématu energetické náročnosti budov podrobněji nevěnuje, nezanedbatelná část úspor je právě i v této oblasti, proto jsou překážky pro posun zpracovány i pro tuto oblast. Podle diplomové práce Vladimíra Malého z roku 2014 [104] se na celkové spotřebě energie průmyslu podílejí budovy s 40%, přičemž s dnešními technologiemi je možné snížit toto číslo o 50% minimálně. Autor vyjmenovává technologie, díky kterým toho lze dosáhnout. Tyto technologie jsou již v některých energetických auditech průmyslových podniků prakticky používány. Potenciály ke zvýšení energetické efektivnosti jsou: zavedení energetického managementu, zlepšení energetické efektivnosti výroby a distribuce energie, snížení ztrát v pohonech, implementace moderních svítidel a využití odpadního tepla [104]. Určitý potenciál lze v těchto přístupech nalézt, avšak jak je patrné ze studie předchozí kapitoly – jediná managementová opatření v praxi souvisely pouze se vstupy energií, případně s technologiemi budov, (osvětlení, pitná voda, větrání, vytápění prostorů)³⁰ nikoli se samotnými procesy výroby. Tento fakt je například dán stávající mezerou v povědomí o integrovaných přístupech, jak je popsáno v předchozí podkapitole. Jedna ze studií na toto téma vytvořila model integrovaného energetického managementu, kde lze vidět i softwarová managementová řešení, přičemž v případové studii bylo zaznamenáno snížení spotřeby energie podniku o 18,5 % [105]. Další z možností je kombinovat řešení výrobních procesů s řešením automatizace vybavení budov. Ve studii zabývající se tímto přístupem jsou brány v úvahu tepelné toky ve výrobních procesech, zařízeních budov a prostředí. Vícecílový rozhodovací mechanismus vybere ze čtyř možných strategií řízení a následně se vybraná strategie implementuje [106]. Přestože tedy již existují studie navrhující simulace celého energetického stavu budov, je zde zřejmá potřeba navazujících studií ohledně snížení investičních prostředků při aplikaci těchto simulací [89].

Ve výrobních procesech se již mnoho let usiluje o snižování energetické náročnosti. Na základě rešerše z kapitoly 2. se výzkum zaměřuje na komplexnější chápání spotřeby energie výrobních i energetických procesů. Hardwarová řešení jsou již aplikována, díky snadněji vypočítaným úsporám, a tedy lze prokázat ekonomickou rentabilitu. Tato situace však zatím neplatí u softwarových řešení. Navíc další

³⁰ Obdobná opatření lze nalézt například i u stavebních energetických auditů – srovnej [119]

problémy aplikace softwarových řešení tkví například v nutnosti vybudování datové infrastruktury, prozatímní neexistence dat z měření,³¹ nutnost kvalifikovaných pracovníků a vysokých investičních nákladů [107]. Kdyby však byly tyto problémy vyřešeny, jsou zde další překážky. Existují metodiky kvantifikující spotřebu jednotlivých procesů, ale inteligentním sensorům, které podporují tyto postupy, se dostalo velmi malé pozornosti [108]. Proto nastává potřeba většího úsilí o dokonalejší technologie ze strany vývojových týmů. Tyto technologie se navíc budou stále potkávat s požadavkem nízkého času návratnosti projektů, který je hlavním faktorem ovlivňujícím implementace technologií ve výrobních společnostech. V současnosti je kladen důraz na posuzování mnohočetných účinků opatření, čímž se zefektivní snižování energetické náročnosti. Některé studie sice řeší modelování toků energií i strojů s předpovídáním jejich energetické náročnosti,³² což samozřejmě pomáhá ve snížení spotřeby energie, ale nezahrnují komplexní analýzu výrobních procesů [61]. V jiných přístupech však lze nalézt řadu studií zaměřujících se na modelování činnosti strojů, optimalizace jejich nastavení³³ nebo nově tzv. „digitální dvojče“, kdy v reálném čase probíhá sběr a posílání dat ze stroje či procesu do jeho digitálního modelu a pomocí softwaru je možnost tyto data sledovat v reálném čase na tomto modelu.³⁴ Na základě těchto dat je poté možné nastavovat procesy daného stroje.

4.3 Souhrn poznatků

Na základě poznatků z rešerše lze tedy vyvodit mnoho zajímavých přístupů ke zefektivňování průmyslových procesů. Lze se domnívat, že hardwarové přístupy jako technologie výroby oken in-vacuum metodou, optimalizace pohybových profilů robotů, zapojení ventilátorů v kaskádovém uspořádání či polohové řízení fotovoltaických panelů jsou těmi technologiemi, které umožňují s přijatelnými investičními náklady dosáhnout významných úspor energie.

V případě softwarových přístupů to pak jsou kombinace sensorového vybavení a řídicích systémů, mapování Therbligových pohybů, knihovna Modelica library pro simulace, monitorování v reálném čase s analýzou dat, určení vztahů mezi operačními strategiemi modelu výrobní linky a další.

U dalších přístupů (například „nano-grid“ či aplikace Průmyslu 4.0) lze usuzovat, že budou mít v budoucnu větší potenciál, vzhledem k rozvoji jim příbuzných technologií. Například u technologie „nano-grid“ s pravděpodobným rozvojem a častější adaptací fotovoltaických panelů.

³¹ Srovnej [120], [92]

³² Srovnej [121], [122], [123], [124]

³³ Srovnej [21], [87]

³⁴ Srovnej [125]

Tabulka 1 shrnuje poznatky z rešerše.

	Hardware	Software
Příklady opatření:	<p>Nahrazení starších strojů</p> <p>Frekvenční měniče</p> <p>Změna pracovní tekutiny</p> <p>Kaskádové řazení ventilátorů</p> <p>Polohovací a čistící technologie pro fotovoltaické elektrárny</p> <p>Kogenerační jednotky</p> <p>Průmyslové roboty</p>	<p>Modelování</p> <p>Predikce chování</p> <p>Pokročilé simulace procesů</p> <p>Supervizní řízení strojů</p> <p>Managementová řešení na úrovni podniku</p>
Výhody:	<p>Možnosti predikce finanční návratnosti</p> <p>Nízká odbornost</p>	<p>Propojování větších spotřebních celků</p> <p>Kvalitní managementová řešení</p> <p>Detailnější porozumění faktorů ovlivňujících spotřebu strojů</p>
Nevýhody:	<p>Omezené možnosti zvyšování efektivity</p> <p>Nemožnost propojení více úrovní podniku</p> <p>(Aktuální nepropojenost jednotlivých přístupů)</p>	<p>Finanční investice</p> <p>Nejistota/Nemožnost ve výpočtech finanční návratnosti</p> <p>Vybudování datové infrastruktury</p> <p>Nutnost kvalifikovaných pracovníků v IT</p> <p>(Aktuální nepropojenost jednotlivých přístupů)</p>

Tabulka 1: Shrnutí přístupů v rešerši

5. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou zvyšování energetické účinnosti v průmyslu. V rešeršní části práce jsou představeny konkrétní metody doporučené příručkami pro energetické audity a možnostmi, které navrhuje vědecká obec. Navrhovaných přístupů vědecké komunity je velké množství. Řeší problematiku jednotlivých strojů do hloubky s cílem porozumět procesům tak, aby bylo možno optimalizovat stroje s vyšší přesností skrze zjištěné faktory ovlivňující účinnost stroje. Velký důraz je kladen na kvalitní monitorování a hledání optimálního řešení. Rozbor energetického auditu byl proveden s cílem získat porovnání reálně využívaných řešení a přístupů navrhovaných vědeckými studii.

Průmyslové podniky musejí zpracovávat energetické audity, ale již je do důsledku nemusí plnit. Možnosti implementace současně využívaných přístupů jsou omezeny dvěma faktory: informovaností a finanční návratností. Nové přístupy jsou publikovány nezávisle na sobě a často s úzkým zaměřením, nejsou aplikovatelné v širším kontextu průmyslu. Energetickým specialistům je tak dána malá motivace k jejich implementaci do energetických auditů, protože nemají k dispozici univerzální a ověřené metodiky, kterých by se mohli držet. Z hlediska finanční návratnosti lze očekávat pomalý nástup softwarových přístupů. Podniky, které nemají datovou infrastrukturu, musí do jejího vytvoření vložit nemalé investiční zdroje, což je od tohoto kroku odrazuje. Zavádění softwarových opatření proto pomůže zlevnění technologií pro sběr a zpracování dat. Současně větší snaha o jejich praktické aplikace by díky opatření získala na kredibilitě. Zavádění pokročilejších hardwarových opatření pomůže zlevnění technologií kogenerace či fotovoltaických panelů.

Další vývoj je spatřován ve vývoji na poli metodologie s cílem sdružovat metodiky jednotlivých odvětví průmyslu tak, aby bylo možno výstup zavést do energetických příruček. Metodiky by tak získaly širší povědomí a mohly být využity v energetických auditech.

6. Seznam použité literatury

- [1] MÁŠA, Vítězslav. *Komplexní přístup k řešení energetické efektivity objektů a procesů v průmyslové a komunální sféře*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2016
- [2] BOZSAKY, D. Special Thermal Insulation Methods of Building Constructions with Nanomaterials. *Acta Technica Jaurinensis* [online]. 2016, **9**(1), 29. ISSN 1789-6932. Dostupné z: doi:10.14513/actatechjaur.v9.n1.391
- [3] PARK, Jaesung, Myunghwan OH a Chul sung LEE. Thermal performance optimization and experimental evaluation of vacuum-glazed windows manufactured via the in-vacuum method. *Energies* [online]. 2019, **12**(19). ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en12193634
- [4] SONG, Kwonsik, Youjin JANG, Moonseo PARK, Hyun-Soo LEE a Joseph AHN. Energy efficiency of end-user groups for personalized HVAC control in multi-zone buildings. *Energy* [online]. 2020 [vid. 2020-06-18]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2020.118116
- [5] YANG, Zheng, Ali GHAHRAMANI a Burcin BECERIK-GERBER. Building occupancy diversity and HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) system energy efficiency. *Energy* [online]. 2016, **109**, 641–649. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2016.04.099
- [6] BIPAT, Chelsey. *Improving Ventilation Efficiency in NYC Buildings* [online]. 6. září 2018 [vid. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.ny-engineers.com/blog/improving-ventilation-efficiency-in-nyc-buildings>
- [7] HASANBEIGI, Ali a Lynn PRICE. Industrial Energy Audit Guidebook: Guidelines for Conducting an Energy Audit in Industrial Facilities [online]. 2010, (October), 85. Dostupné z: doi:10.2172/992484
- [8] SAXENA, Jitendra, Binoy K. CHOUDHURY a Krishna M. AGRAWAL. Innovations in Variable Frequency Drives and its Implication in Reducing Carbon Footprint. In: *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* [online]. B.m.: Elsevier, 2020. Dostupné z: doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.11010-0
- [9] CAGNO, Enrico, Davide ACCORDINI a Andrea TRIANNI. A framework to characterize factors affecting the adoption of energy efficiency measures within electric motors systems. In: *Energy Procedia* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2019, s. 3352. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2019.01.962
- [10] TRIANNI, Andrea, Enrico CAGNO a Davide ACCORDINI. Energy efficiency measures in electric motors systems: A novel classification highlighting specific implications in their adoption. *Applied Energy* [online]. 2019, **252**. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2019.113481
- [11] *Turn Motors Off When Not in Use Energy Tips*. nedatováno.
- [12] TRIANNI, Andrea, Enrico CAGNO a Davide ACCORDINI. A review of energy efficiency measures within electric motors systems. In: *Energy Procedia* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2019. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2019.01.964
- [13] Variable Frequency Drives Benefit Constant Speed Applications.

- Electromechanical Team* [online]. 6. březen 2019 [vid. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://blog.parker.com/variable-frequency-drives-benefit-constant-speed-applications>
- [14] ZHANG, Yifan, Fubao ZHOU, Jinshi LI, Jianhong KANG a Qiangqiang ZHANG. Application and research of new energy-efficiency technology for liquid ring vacuum pump based on turbulent drag reduction theory. *Vacuum* [online]. 2020, **172**. ISSN 0042207X. Dostupné z: doi:10.1016/j.vacuum.2019.109076
- [15] SHECKLER, Mark S. Assessment of a compressed air system. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering* [online]. 2007, **104**(1), 13–22. ISSN 15460118. Dostupné z: doi:10.1080/01998590709509484
- [16] NEHLER, Therese. Linking energy efficiency measures in industrial compressed air systems with non-energy benefits – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **89**(February), 72–87. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.02.018
- [17] XIE, Jun, Fei LIU a Wei CAI. Research on the Characteristics and Methodology for Predicting Energy Efficiency during the Service Process of Machine Tools. *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2019, **55**(17), 172–184. ISSN 05776686. Dostupné z: doi:10.3901/JME.2019.17.172
- [18] CAI, Wei, Fei LIU, Jun XIE, Peiji LIU a Junbo TUO. A tool for assessing the energy demand and efficiency of machining systems: Energy benchmarking. *Energy* [online]. 2017, **138**, 332–347. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.07.039
- [19] CAI, Wei, Fei LIU, Ognyan DINOLOV, Jun XIE, Peiji LIU a Junbo TUO. Energy benchmarking rules in machining systems. *Energy* [online]. 2018, **142**, 258–263. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.10.030
- [20] CAI, Wei, Fei LIU, Hua ZHANG, Peiji LIU a Junbo TUO. Development of dynamic energy benchmark for mass production in machining systems for energy management and energy-efficiency improvement. *Applied Energy* [online]. 2017, **202**, 715–725. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2017.05.180
- [21] WANG, Lexiang, Yan HE, Yufeng LI, Yulin WANG, Chao LIU, Xuehui LIU a Yan WANG. Modeling and analysis of specific cutting energy of whirling milling process based on cutting parameters. *Procedia CIRP* [online]. 2019, **80**, 56–61. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.01.028
- [22] GAO, Mengdi, Kang HE, Lei LI, Qingyang WANG a Conghu LIU. A review on energy consumption, energy efficiency and energy saving of metal forming processes from different hierarchies. *Processes* [online]. 2019, **7**(6). ISSN 22279717. Dostupné z: doi:10.3390/pr7060357
- [23] PASTRAS, Georgios, Apostolos FYSIKOPOULOS a George CHRYSSOLOURIS. A theoretical investigation on the potential energy savings by optimization of the robotic motion profiles. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2019, **58**(February), 55–68. ISSN 07365845. Dostupné z: doi:10.1016/j.rcim.2019.02.001
- [24] MORALES, A., G. E. VALENCIA a Y. D. CARDENAS. Identification of energy saving potential in steam boiler through an ISO 50001 standard. *Journal of*

- Physics: Conference Series* [online]. 2018, **1126**(1). ISSN 17426596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1126/1/012038
- [25] PARK, Nyun Bae, Sang Yong PARK, Jong Jin KIM, Dong Gu CHOI, Bo Yeong YUN a Jong Chul HONG. Technical and economic potential of highly efficient boiler technologies in the Korean industrial sector. *Energy* [online]. 2017, **121**, 884–891. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.01.022
- [26] HU, Bin, Shengzhi XU, R. Z. WANG, Hua LIU, Luyao HAN, Zhiping ZHANG a Hongbo LI. Investigation on advanced heat pump systems with improved energy efficiency. *Energy Conversion and Management* [online]. 2019, **192**, 161–170. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2019.04.031
- [27] MATHAUSEROVÁ, Zuzana. Hygienické požadavky na vnitřní prostředí staveb. *TZB - info* [online]. 25. únor 2013 [vid. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/9595-hygienicke-pozadavky-na-vnitri-prostredi-staveb>
- [28] BERMEJO-BUSTO, Javier, César MARTÍN-GÓMEZ, Amaia ZUAZUA-ROS, Enrique BAQUERO a Rafael MIRANDA. Performance simulation of heat recovery ventilator cores in cascade connection. *Energy and Buildings* [online]. 2017, **134**, 25–36. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2016.11.014
- [29] GJENNESTAD, Magnus Aa, Eskil AURSAND, Elisa MAGNANELLI a Jon PHAROAH. Performance analysis of heat and energy recovery ventilators using exergy analysis and nonequilibrium thermodynamics. *Energy and Buildings* [online]. 2018, **170**, 195–205. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2018.04.013
- [30] KARIMIPANAH, Taghi, Roland FORSBERG, Yao LI a Liao XINYAN. *Energy Audit of HiG Examination Building*. 2014.
- [31] SCHULZE, Mike, Henrik NEHLER, Mikael OTTOSSON a Patrik THOLLANDER. *Energy management in industry - A systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 20. leden 2016. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.06.060
- [32] WOOLLEY, Elliot, Yang LUO a Alessandro SIMEONE. Industrial waste heat recovery: A systematic approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* [online]. 2018, **29**(March), 50–59. ISSN 22131388. Dostupné z: doi:10.1016/j.seta.2018.07.001
- [33] KURLE, Denis, Christine SCHULZE, Christoph HERRMANN a Sebastian THIEDE. Unlocking Waste Heat Potentials in Manufacturing. In: *Procedia CIRP* [online]. B.m.: Elsevier B.V., 2016. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.03.107
- [34] BONILLA-CAMPOS, Iñigo, Nerea NIETO, Luis DEL PORTILLO-VALDES, Bakartxo EGILEGOR, Jaio MANZANEDO a Haizea GAZTAÑAGA. Energy efficiency assessment: Process modelling and waste heat recovery analysis. *Energy Conversion and Management* [online]. 2019, **196**(June 2019), 1180–1192. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2019.06.074
- [35] OLSEN, Donald, Yasmina ABDELOUADOUD, Peter LIEM a Beat WELLIG.

- The Role of Pinch Analysis for Industrial ORC Integration. In: *Energy Procedia* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2017, s. 74–81. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.09.193
- [36] DHOLE, Vikas R. a Bodo LINNHOF. Total site targets for fuel, co-generation, emissions, and cooling. *Computers and Chemical Engineering* [online]. 1993, **17**. ISSN 00981354. Dostupné z: doi:10.1016/0098-1354(93)80214-8
- [37] ISAKSSON, Johan, Simon HARVEY, Carl-Erik GRIP a Jonny KARLSSON. Possibilities to Implement Pinch Analysis in the Steel Industry - A Case Study at SSAB EMEA in Luleå. In: *Proceedings of the World Renewable Energy Congress – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden* [online]. B.m.: Linköping University Electronic Press, 2011, s. 1660–1667. Dostupné z: doi:10.3384/ecp110571660
- [38] SHAHRUDDIN, Munawar Zaman, Ahmad Nafais RAHIMI, Muhammad Afiq ZUBIR, Muhammad Fakhru ISLAM ZAHRAN, Kamarul Asri IBRAHIM a Mohd Kamaruddin ABD HAMID. Energy Integrated Distillation Column Sequence by Driving Force Method and Pinch Analysis for Five Components Distillation. In: *Energy Procedia* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2017, s. 4085–4091. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.12.329
- [39] FENG, X. a X. X. ZHU. Combining pinch and exergy analysis for process modifications. *Applied Thermal Engineering* [online]. 1997, **17**(3). ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/s1359-4311(96)00035-x
- [40] MEHDIZADEH-FARD, Mohsen, Fathollah POURFAYAZ, Mehdi MEHRPOOYA a Alibakhsh KASAEIAN. Improving energy efficiency in a complex natural gas refinery using combined pinch and advanced exergy analyses. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2018, **137**. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.03.054
- [41] WANG, Chuan, David BELLQVIST, Leif NILSSON, Pavel IVASHECHKIN, Veronika REIMER, Ricardo RATO, Christelle GUILLON, Valentine WEBER a Juan Jose ARRIBAS. Techno-economic assessment of recovery and reuse of low temperature heat ($T < 350^{\circ}\text{C}$) in the steel industry by means of process integration. In: *Energy Procedia* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2014. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2014.12.106
- [42] ZHANG, Nan, Robin SMITH, Igor BULATOV a Jiří Jaromír KLEMĚŠ. Sustaining high energy efficiency in existing processes with advanced process integration technology. *Applied Energy* [online]. 2013, **101**. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.02.037
- [43] DARMAWAN, Arif, Flabianus HARDI, Kunio YOSHIKAWA, Muhammad AZIZ a Koji TOKIMATSU. Enhanced Process Integration of Entrained Flow Gasification and Combined Cycle: Modeling and Simulation Using Aspen Plus. In: *Energy Procedia* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2017. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.03.318
- [44] DE LENA, E., M. SPINELLI, I. MARTÍNEZ, M. GATTI, R. SCACCABAROZZI, G. CINTI a M. C. ROMANO. Process integration study of tail-end Ca-Looping process for CO₂ capture in cement plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2017, **67**. ISSN 17505836. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijggc.2017.10.005

- [45] WHITE, Martin T. a Abdalnaser I. SAYMA. A new method to identify the optimal temperature of latent-heat thermal-energy storage systems for power generation from waste heat. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2020, **149**. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119111
- [46] FAVAREL, Camille, Jean Pierre BÉDÉCARRATS, Tarik KOUSKSOU a Daniel CHAMPIER. Numerical optimization of the occupancy rate of thermoelectric generators to produce the highest electrical power. *Energy* [online]. 2014, **68**, 104–116. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2014.02.030
- [47] STEVENS, Robert J., Steven J. WEINSTEIN a Karuna S. KOPPULA. Theoretical limits of thermoelectric power generation from exhaust gases. *Applied Energy* [online]. 2014, **133**, 80–88. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2014.07.075
- [48] CHEN, Wei Hsin, Chien Chang WANG, Chen I. HUNG, Chang Chung YANG a Rei Cheng JUANG. Modeling and simulation for the design of thermal-concentrated solar thermoelectric generator. *Energy* [online]. 2014, **64**, 287–297. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2013.10.073
- [49] CHEN, Wei Hsin, Shih Rong HUANG a Yu Li LIN. Performance analysis and optimum operation of a thermoelectric generator by Taguchi method. *Applied Energy* [online]. 2015, **158**, 44–54. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.08.025
- [50] TERZIOĞLU, Hakan. Analysis of effect factors on thermoelectric generator using Taguchi method. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* [online]. 2020, **149**. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2019.106992
- [51] PAWLITKO, David. *KOGENERACE*. 2013.
- [52] ROSSI, Francesco a David VELÁZQUEZ. A methodology for energy savings verification in industry with application for a CHP (combined heat and power) plant. *Energy* [online]. 2015, **89**, 528–544. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2015.06.016
- [53] DAS, Utpal Kumar, Kok Soon TEY, Mehdi SEYEDMAHMOUDIAN, Saad MEKHILEF, Moh Yamani Idna IDRIS, Willem VAN DEVENTER, Bend HORAN a Alex STOJCEVSKI. *Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 1. leden 2018. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.08.017
- [54] HASSAN, Ali, Abdul WAHAB, Muhammad Arslan QASIM, Muhammad Mansoor JANJUA, Muhammad Aon ALI, Hafiz Muhammad ALI, Tufail Rehman JADOON, Ejaz ALI, Ahsan RAZA a Noshairwan JAVAID. Thermal management and uniform temperature regulation of photovoltaic modules using hybrid phase change materials-nanofluids system. *Renewable Energy* [online]. 2020, **145**, 282–293. ISSN 18790682. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2019.05.130
- [55] KREYSA, Karel. *Polohové řízení solárního panelu s optimalizací energetické účinnosti* [online]. Brno, 2011 [vid. 2020-04-21]. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=381

- [56] MARIPRASATH, T. a K. RAMAMOCHAN REDDY. Energy efficiency enhancement of solar PV panel by automatic cleaning technique. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* [online]. 2019, **8**(12), 3591–3595. ISSN 22783075. Dostupné z: doi:10.35940/ijitee.L3796.1081219
- [57] ASIF, Amir A. a Md Atiqur Rahman SARKER. Improvement in energy efficiency by implementing direct current based nano-grid and its impact on manufacturing industry. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* [online]. 2019, **9**(1), 5231–5233. ISSN 22783075. Dostupné z: doi:10.35940/ijitee.A9237.119119
- [58] *World Aluminium — Primary Aluminium Smelting Energy Intensity* [online]. [vid. 2020-04-21]. Dostupné z: <http://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-energy-intensity/#data>
- [59] MÁŠA, Vítězslav, Petr STEHLÍK, Michal TOUŠ a Marek VONDRA. Key pillars of successful energy saving projects in small and medium industrial enterprises. *Energy* [online]. 2018, **158**, 293–304. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2018.06.018
- [60] KIM, Dae Geon a Sang Ok CHOI. Impact of construction IT technology convergence innovation on business performance. *Sustainability (Switzerland)* [online]. 2018, **10**(11), 1–16. ISSN 20711050. Dostupné z: doi:10.3390/su10113972
- [61] MAWSON, Victoria Jayne a Ben Richard HUGHES. The development of modelling tools to improve energy efficiency in manufacturing processes and systems. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 2019, **51**(April), 95–105. ISSN 02786125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmsy.2019.04.008
- [62] MEISSNER, Matthias, Lynn MASSALSKI, Andreas WIRTZ, Petra WIEDERKEHR a Johanna MYRZIK. Representation of energy efficiency of energy converting production processes by process status indicators. *Procedia CIRP* [online]. 2019, **79**, 221–226. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.02.052
- [63] ZHOU, Lirong, Jianfeng LI, Fangyi LI, Qiang MENG, Jing LI a Xingshuo XU. *Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: A comprehensive literature review* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 20. leden 2016. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.093
- [64] SANGWAN, Kuldip Singh a Nitesh SIHAG. Multi-objective optimization for energy efficient machining with high productivity and quality for a turning process. *Procedia CIRP* [online]. 2019, **80**, 67–72. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.01.022
- [65] JIA, Shun, Qinghe YUAN, Jingxiang LV, Ying LIU, Dawei REN a Zhongwei ZHANG. Therblig-embedded value stream mapping method for lean energy machining. *Energy* [online]. 2017, **138**, 1081–1098. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.07.120
- [66] Therblig. *Wikipedia* [online]. 1. duben 2020 [vid. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Therblig>

- [67] DAMRATH, Felix, Anton STRAHILOV, Thomas BÄR a Michael VIELHABER. Method for Energy-efficient Assembly System Design within Physics-based Virtual Engineering in the Automotive Industry. *Procedia CIRP* [online]. 2016, **41**, 307–312. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.10.004
- [68] GOTTELT, Friedrich, Timm HOPPE a Lasse NIELSEN. Applying the Power Plant Library ClaRa for Control Optimisation. In: *Proceedings of the 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic, May 15-17, 2017* [online]. B.m.: Linköping University Electronic Press, 2017, s. 867–877. Dostupné z: doi:10.3384/ecp17132867
- [69] SVENSSON, Anders a Svetlana PARAMONOVA. An analytical model for identifying and addressing energy efficiency improvement opportunities in industrial production systems – Model development and testing experiences from Sweden. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, **142**(June 2014), 2407–2422. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.034
- [70] HU, Shih Cheng, Tee LIN, Ben Ran FU, Cheng Kung CHANG a I. Yun CHENG. Analysis of energy efficiency improvement of high-tech fabrication plants. *International Journal of Low-Carbon Technologies* [online]. 2019, **14**(4), 508–515. ISSN 17481325. Dostupné z: doi:10.1093/ijlct/ctz041
- [71] HU, Shih Cheng, Tee LIN, Shao Huan HUANG, Ben Ran FU a Ming Hsuan HU. Energy savings approaches for high-tech manufacturing factories. *Case Studies in Thermal Engineering* [online]. 2020, **17**(November 2019), 100569. ISSN 2214157X. Dostupné z: doi:10.1016/j.csite.2019.100569
- [72] MARZOUK, Ahmed M., Hoda A. ELMARAGHY a Waguih H. ELMARAGHY. Effect of Changing Operating Policies on Energy Use Consumption. *Procedia CIRP* [online]. 2016, **41**, 301–306. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.10.002
- [73] ADENUGA, Olukorede Tijani, Khumbulani MPOFU a Ramatsetse Innocent BOITUMELO. Energy efficiency analysis modelling system for manufacturing in the context of industry 4.0. *Procedia CIRP* [online]. 2019, **80**, 735–740. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.01.002
- [74] *INICIATIVA PRŮMYSL 4.0* [online]. 2016 [vid. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/prumysl-4-0-ma-v-cesku-sve-misto--176055/>
- [75] Průmysl 4.0 má v Česku své místo. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2. září 2016 [vid. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/prumysl-4-0-ma-v-cesku-sve-misto--176055/>
- [76] Industry 4.0. *IBA Group a.s. CZ* [online]. [vid. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://ibacz.eu/trendy/industry-4-0/>
- [77] DIAZ C., Jenny L. a Carlos OCAMPO-MARTINEZ. Energy efficiency in discrete-manufacturing systems: Insights, trends, and control strategies. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 2019, **52**(July), 131–145. ISSN 02786125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmsy.2019.05.002
- [78] JUNKER, Horst a Carsten DOMANN. Towards industry 4.0 in corporate energy management. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* [online].

- 2017, **214**, 49–56. ISSN 17433541. Dostupné z: doi:10.2495/ECO170051
- [79] FAN, Yi Chih a Jen Yuan James CHANG. Embedded smart box for legacy machines to approach to i 4.0 in smart manufacturing. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018, **185**. ISSN 2261236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201818500027
- [80] Using Big Data in Manufacturing at Intel's Smart Factories. *Connected Social Media* [online]. 13. duben 2016 [vid. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://connectedsocialmedia.com/14304/using-big-data-in-manufacturing-at-intels-smart-factories/>
- [81] BORSATO, Milton. An energy efficiency focused semantic information model for manufactured assemblies. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, **140**, 1626–1643. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.185
- [82] SOBOTTKA, Thomas, Felix KAMHUBER, Matthias RÖSSLER a Wilfried SIHN. Hybrid simulation-based optimization of discrete parts manufacturing to increase energy efficiency and productivity. *Procedia Manufacturing* [online]. 2018, **21**, 413–420. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2018.02.139
- [83] BEISHEIM, Benedikt, Keivan RAHIMI-ADLI, Stefan KRÄMER a Sebastian ENGELL. Energy performance analysis of continuous processes using surrogate models. *Energy* [online]. 2019, **183**, 776–787. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2019.05.176
- [84] LUNA, Tiago, João RIBAU, David FIGUEIREDO a Rita ALVES. Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **213**, 342–356. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2018.12.190
- [85] OCHOA, Guillermo Valencia, Jhan Piero ROJAS a Juan Campos AVELLA. Energy optimization of industrial steam boiler using energy performance indicator. *International Journal of Energy Economics and Policy* [online]. 2019, **9**(6), 109–117. ISSN 21464553. Dostupné z: doi:10.32479/ijeeep.8188
- [86] CHEN, Xingzheng, Congbo LI, Ying TANG, Li LI a Qinge XIAO. A framework for energy monitoring of machining workshops based on IoT. *Procedia CIRP* [online]. 2018, **72**, 1386–1391. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2018.03.085
- [87] PATANGE, A. D., R. JEGADEESHWARAN a N. C. DHOBAL. Milling cutter condition monitoring using machine learning approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2019, **624**(1). ISSN 1757899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/624/1/012030
- [88] BENEDETTI, Miriam, Francesca BONFÀ, Vito INTRONA, Annalisa SANTOLAMAZZA a Stefano UBERTINI. Real time energy performance control for industrial compressed air systems: Methodology and applications †. *Energies* [online]. 2019, **12**(20). ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en12203935
- [89] WEEBER, Max, Enedir GHISI a Alexander SAUER. Applying Energy Building Simulation in the Assessment of Energy Efficiency Measures in Factories.

- Procedia CIRP* [online]. 2018, **69**(May), 336–341. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2017.11.148
- [90] MATHIESEN, Brian Vad, Henrik LUND, Kenneth HANSEN, Iva RIDJAN, Søren DJØRUP, Steffen NIELSEN, Peter SORKNÆS, Jakob Zinck THELLUFSEN, Lars GRUNDAHL, Rasmus LUND, David DRYSDALE, David CONNOLLY a Poul Alberg ØSTERGAARD. *IDA' s Energy Vision 2050 - Executive Summary*. Aalborg: Department of Development and Planning, Aalborg University. 2015.
- [91] LUND, Henrik, Poul Alberg ØSTERGAARD, David CONNOLLY a Brian Vad MATHIESEN. Smart energy and smart energy systems. *Energy* [online]. 2017, **137**, 556–565. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.05.123
- [92] MENG, Yuquan, Yuhang YANG, Haseung CHUNG, Pil Ho LEE a Chenhui SHAO. Enhancing sustainability and energy efficiency in smart factories: A review. *Sustainability (Switzerland)* [online]. 2018, **10**(12), 1–28. ISSN 20711050. Dostupné z: doi:10.3390/su10124779
- [93] ŠUBRT, Roman. Energetický audit, energetický posudek. 2015, 124.
- [94] ASOCIACE ENERGETICKÝCH AUDITORŮ - ENERGETICKÝCH SPECIALISTŮ, z.s. *Energetický audit* [online]. [vid. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.aea.cz/energeticky-audit>
- [95] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Vyhláška č. 480/2012 Sb., o energetickém auditu a energetickém posudku* [online]. 18. březen 2016 [vid. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/ministerstvo/aplikace-zakona-c-106-1999-sb/vyhlaska-c--480-2012-sb---o-energetickem-auditu-a-energetickem-posudku-171126/>
- [96] STANĚK, Lukáš. *Specializovaná odborná studie: Technicko-ekonomický model potenciálního prům. spotřebitele energie*. 2017.
- [97] RAEN, ČESKÁ ENERGETICKÁ AGENTURA. ENERGETICKÝ AUDIT KOMPLEXU S KLASICKÝM ENERGETICKÝM ZDROJEM. nedatováno, 60.
- [98] VUPEK-ECONOMY, spol. s. r. o. *Výzkum a vývoj úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie*. nedatováno.
- [99] SINCLAIR KNIGHT MERZ. Guidebook for energy auditing in industry [online]. nedatováno, 77. Dostupné z: <http://eemo.govmu.org/English/Documents/Final-Audit-Guidebook-Industry.pdf>
- [100] MARCHI, Beatrice, Simone ZANONI a Ivan FERRETTI. Energy efficiency investments in industry with uncertain demand rate: Effects on the specific energy consumption. *Energies* [online]. 2019, **13**(1). ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en13010161
- [101] BREMS, Anke, Elizabeth STEELE a Agapi PAPADAMOU. *European Commission Library of typical energy audit recommendations, costs and savings Prepared by* [online]. 2016 [vid. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://europa.eu>
- [102] FRESNER, Johannes, Fabio MOREA, Christina KRENN, Juan ARANDA USON a Fabio TOMASI. Energy efficiency in small and medium enterprises: Lessons learned from 280 energy audits across Europe. *Journal of Cleaner*

- Production* [online]. 2017, **142**, 1650–1660. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.126
- [103] LU, Mengxue a Joseph H.K. LAI. Building energy: A review on consumptions, policies, rating schemes and standards. *Energy Procedia* [online]. 2019, **158**, 3633–3638. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2019.01.899
- [104] MALÝ, Vladimír. *ENERGETICKÝ AUDIT V PRŮMYSLU*. B.m., 2014. České vysoké učení technické v Praze.
- [105] MAJERNÍK, Milan, Martin BOSÁK, Lenka ŠTOFOVÁ a Petra SZARYSZOVÁ. Innovative model of integrated energy management in companies. *Quality Innovation Prosperity* [online]. 2015, **19**(1), 22–32. ISSN 1338984X. Dostupné z: doi:10.12776/QIP.V19I1.384
- [106] HEUTMANN, T., B. ZHOU, C. SCHOMMER a R. H. SCHMITT. Integrated energy efficiency in production. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2019, **52**(13), 135–140. ISSN 24058963. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.165
- [107] CARVALHO, José Pedro, Luís BRAGANÇA a Ricardo MATEUS. Optimising building sustainability assessment using BIM. *Automation in Construction* [online]. 2019, **102**(March), 170–182. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2019.02.021
- [108] O'DRISCOLL, Eoin, Kevin KELLY a Garret E. O'DONNELL. Intelligent energy based status identification as a platform for improvement of machine tool efficiency and effectiveness. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2015, **105**, 184–195. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.01.058
- [109] LINNHOFF, Bodo a John R. FLOWER. Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks. *AIChE Journal* [online]. 1978, **24**(4) [vid. 2020-06-20]. ISSN 15475905. Dostupné z: doi:10.1002/aic.690240411
- [110] KLEMEŠ, Jiří Jaromír a Zdravko KRAVANJA. *Forty years of Heat Integration: Pinch Analysis (PA) and Mathematical Programming (MP)* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 1. listopad 2013. ISSN 22113398. Dostupné z: doi:10.1016/j.coche.2013.10.003
- [111] THE MODELICA ASSOCIATION. *Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling Version 3.4* [online]. 2017 [vid. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.modelica.org>
- [112] *The Integrated Energy Management System from Enerpro* [online]. [vid. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.enerprosystems.com/energymgmtsystems.html>
- [113] CAI, Wei, Fei LIU, Xiao Na ZHOU a Jun XIE. Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufacturing industry. *Energy* [online]. 2016, **114**, 623–633. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2016.08.028
- [114] GUTOWSKI, Timothy, Timothy GUTOWSKI, Jeffrey DAHMUS a Alex THIRIEZ. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. *IN: PROCEEDINGS OF 13TH CIRP INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING* [online]. 2006 [vid. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.533.8293>

- [115] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Přehled vyhlášek k zákonu č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií* [online]. 2015 [vid. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument151391.html>
- [116] *Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií* [online]. [vid. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-406#f4367267>
- [117] Co je čistá současná hodnota. *MONETA Money Bank* [online]. [vid. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.moneta.cz/slovník-pojmu/detail/cista-soucasna-hodnota>
- [118] AL BALUSHI, Suleiman a Shylesh KUMAR VAKUNDAKAR. *ENERGY EFFICIENCY GUIDEBOOK A GOIC publicatin for GCC industries*. 2013.
- [119] ENVIROS, s.r.o. Masarykova univerzita brno správa kolejí a menz lomená 48, komárov i i. 2017.
- [120] KHATTAK, Sanober Hassan, Michael OATES a Rick GREENOUGH. Towards improved energy and resource management in manufacturing. *Energies* [online]. 2018, **11**(4), 1–15. ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en11041006
- [121] THIEDE, Sebastian, Malte SCHÖNEMANN, Denis KURLE a Christoph HERRMANN. Multi-level simulation in manufacturing companies: The water-energy nexus case. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **139**, 1118–1127. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.08.144
- [122] BLEICHER, Friedrich, Fabian DUER, Ines LEOBNER, Iva KOVACIC, Bernhard HEINZL a Wolfgang KASTNER. Co-simulation environment for optimizing energy efficiency in production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2014, **63**(1), 441–444. ISSN 17260604. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2014.03.122
- [123] THIEDE, Sebastian, Denis KURLE a Christoph HERRMANN. The water-energy nexus in manufacturing systems: Framework and systematic improvement approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2017, **66**(1), 49–52. ISSN 17260604. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2017.04.108
- [124] SCHÖNEMANN, Malte, Christopher SCHMIDT, Christoph HERRMANN a Sebastian THIEDE. Multi-level Modeling and Simulation of Manufacturing Systems for Lightweight Automotive Components. In: *Procedia CIRP* [online]. B.m.: Elsevier B.V., 2016, s. 1049–1054. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.12.063
- [125] SCHROEDER, Greyce N., Charles STEINMETZ, Carlos E. PEREIRA a Danubia B. ESPINDOLA. Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2016, **49**(30), 12–17. ISSN 24058963. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2016.11.115
- [126] What is an ORC power system? *KCORC* [online]. [vid. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.kcorc.org/en/science-technology/what-orc-power-system/>