



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

Štěpán Kovář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Touš, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Štěpán Kovář
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Michal Touš, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

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 2020/21

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. Naproti tomu se vědecká komunita zabývá možnostmi optimalizace procesů z hlediska nastavení procesu nebo plánování výroby s použitím softwarových řešení. Oba přístupy jsou rozebrány v této práci a na základě toho je zhodnocen současný stav a potenciál energetických úspor do budoucna.

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. 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 in this work and based on that current state as well as the potential of the energy savings are evaluated.

Keywords:

energy efficiency, energy savings, energy audit

Bibliografická citace

Citace tištěné práce:

KOVÁŘ, Štěpán. *Zvyšování energetické účinnosti v průmyslu*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129753>. 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, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129753>. 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 21.5.2021

.....

Štěpán Kovář

Poděkování

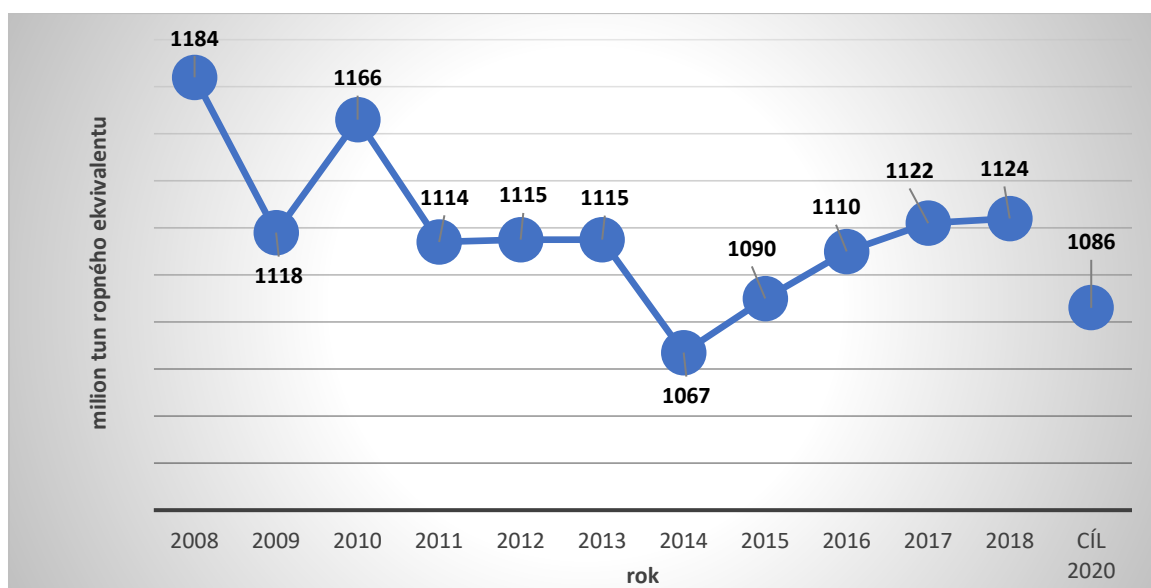
Děkuji tímto vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Michalu Toušovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, vysvětlení spousty témat, a především shovívavost a ochotu ke konzultacím. Dále děkuji Mgr. Janě Opálkové za odbornou pomoc s překladem abstraktu do anglického jazyka a Ing. Martě Pavlíkové, Pavlu Hadrabovi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

Obsah

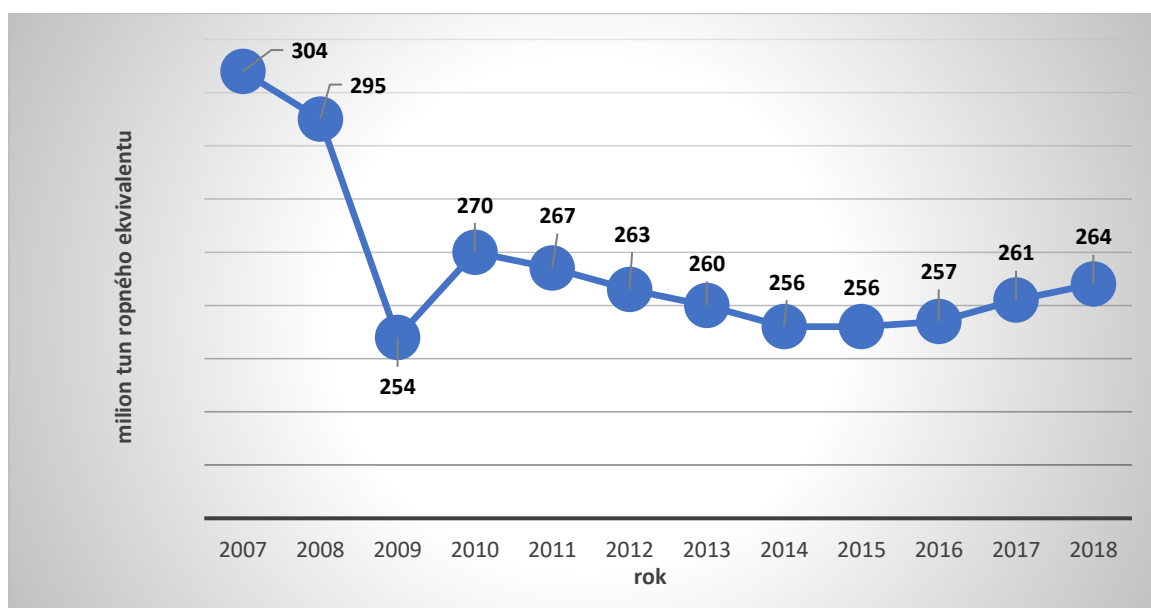
1. Úvod	1
2. Přístupy pro zvyšování energetické účinnosti.....	3
2.1 Budovy	5
2.2 Průmyslové procesy.....	7
2.2.1 Zdroje tepla a elektrické energie.....	7
2.2.2 Spotřebiče tepla a elektrické energie.....	10
2.2.3 Integrace procesů a využití odpadního tepla	16
2.2.4 Supervizní řízení a Průmysl 4.0.....	20
3. Energetický audit.....	25
3.1 Definice energetického auditu	25
3.2 Rozbor energetického auditu	26
3.3 Zaměření energetických auditů.....	31
4. Diskuse.....	32
4.1 Souhrn řešerše	32
4.2 Zhodnocení	34
4.3 Výstupy.....	35
5. Závěr	36
6. Seznam použité literatury	37

1. Úvod

Podle směrnice Evropského parlamentu z roku 2018 [1] je zvyšování energetické účinnosti významnou prioritou, protože se tím sníží náklady pro podniky,lepší se kvalita ovzduší, zvýší se konkurenceschopnost a hospodářská aktivita. V roce 2014 byl vytvořen cíl zlepšení energetické účinnosti do roku 2030 a to tak, že se sníží spotřeba energie o 32,5 % oproti prognózám z roku 2007 [2]. Na obrázku 1 [3] je znázorněn graf konečné spotřeby energie ve všech odvětví mezi roky 2008 a 2018 včetně cíle pro rok 2020. Z grafu je patrné snížení v tomto období (zhruba o 5 %), nicméně průběh po roce 2010 již nedosahuje výraznějších poklesů. V průmyslu, který je znázorněn na obrázku 2 [4] je pokles výraznější (zhruba o 13 %), ale i zde je vidět po roce 2010 stagnace. Lze se domnívat, že hledání dalších možností zvyšování energetické účinnosti je již obtížnější.

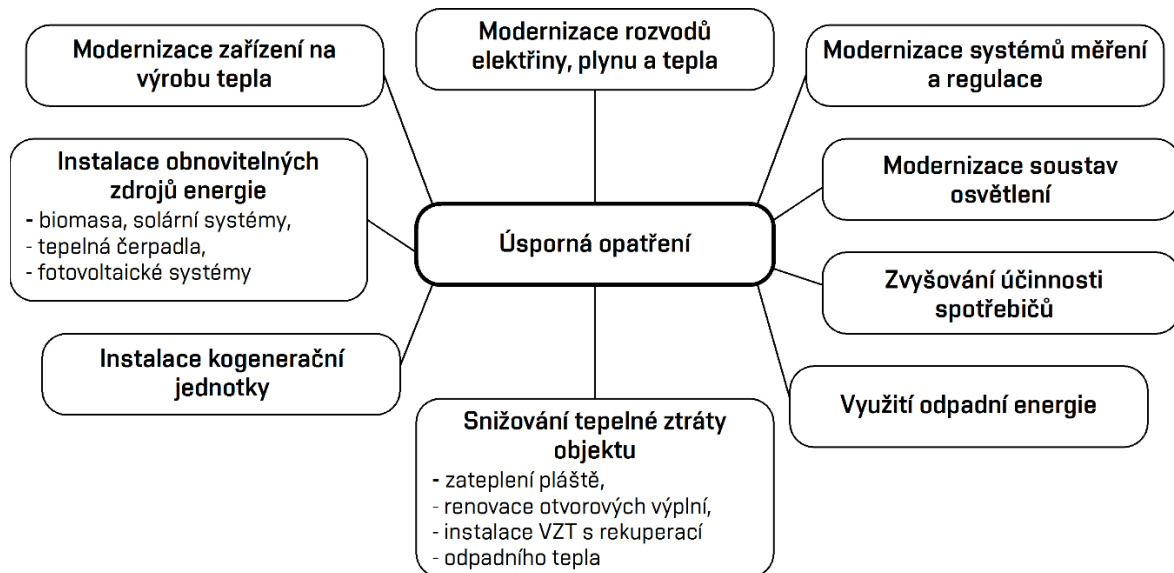


Obrázek 1: Konečná spotřeba energie všech odvětví [3]



Obrázek 2: Vývoj spotřeby energie v průmyslu v EU [4]

V jedné z prací zpracovávající data o energetických auditech v průmyslu [5] jsou představeny potenciální úspory v oblasti technického zařízení budov, která mohou dosáhnout hodnot až 50 % oproti původnímu stavu používající starší technologie. Po mnoha letech zvyšování energetické účinnosti, a to nejen průmyslových podniků, bude touto cestou obtížnější podobně vysokých úspor dosáhnout a je třeba hledat a aplikovat jiné způsoby. Stručné a výstižné znázornění konkrétních cest úspor je možné nalézt například v habilitační práci [6] viz obrázek 3 [6].



Obrázek 3: Přehled úsporných opatření [6]

Při porovnání dat obrázku 1 a obrázku 2 se za rok 2018 dle Statistického úřadu Evropské unie podílí průmysl z 24,8 % na celkové spotřebě energie všech odvětví. V České republice je tento poměr 27,7 % [7]. Přestože se daří zvyšovat energetickou efektivitu v tuzemském průmyslu, je energetická náročnost na hrubou přidanou hodnotu vyšší než průměr států Evropské unie [8]. Touto skutečností se zabývá Národní akční plán [8], který navazuje na evropskou směrnici o energetické účinnosti. Národní akční plány jsou vytvářeny každé 3 roky a snaží se o podporu zvyšování energetické účinnosti v průmyslovém odvětví formou dotací. Zvyšování energetické účinnosti v průmyslu je tedy aktuálně řešeným tématem. Je proto nutné posuzovat výhodnost nových zjištění v oblastech zvyšování energetické účinnosti a nadějně směry podpořit.

Cílem této práce je zhodnocení současného stavu aplikace energetických úspor a jejich potenciálu do budoucna. Práce obsahuje pojednání o běžně používaných energeticky úsporných opatřeních v praxi. Zde je pozornost zaměřena na energetické audity, které se využívají pro identifikaci úsporných opatření. Dále je část práce věnována rešerši progresivních metod zejména z vědeckých publikací. Ty běžně využívány nejsou, ale jejich význam může mít potenciál do budoucna. Závěrečná pasáž je následně věnována diskusi nad získanými poznatky. Je důležité zmínit, že práce nemá za cíl komplexní rešerši z oblasti energeticky úsporných opatření. Cílem je nastínit toho, jak se k energeticky úsporným opatření staví praxe a jak akademická sféra a pokusit se o vyvození závěrů zejména z pohledu přenosu výstupů z akademické sféry do praxe. Pro podložení výše zmíněných závěrů byly využity podklady z prověřených zdrojů a odborných publikací.

2. Přístupy pro zvyšování energetické účinnosti

Cílem této části bakalářské práce je provedení rešerše stávajících přístupů zvyšování energetické účinnosti, či jinak řečeno snižování energetické náročnosti (snižování spotřeby energie). K tomu byly použity informace jednak z příruček pro energetické specialisty, které obsahují v praxi více, či méně používané postupy, jednak z vědecké literatury, kde jsou uváděna řešení, která v praxi rozšířena nejsou. Cílem není provést kompletní rešerši, protože se jedná o velmi obsáhlou problematiku, která je nad rámec této práce. Z tohoto důvodu zde nejsou zdaleka všechna řešení, která se v dnešní době využívají nebo jsou předmětem výzkumu. Tomu byla přizpůsobena i metodika rešerše.

Pomocí internetových vyhledávacích nástrojů byly nalezeny příručky pro energetické specialisty zabývající se strojírenským odvětvím průmyslu. Hledání probíhalo pomocí těchto klíčových slov a logických spojek:

(Energy efficiency OR Energy savings) AND (Industrial process OR Manufacturing) AND (Guideline OR Methodology OR Handbook)

Pokud jsou tedy v textu zmíněny „příručky pro energetické specialisty“, jedná se o následující zdroje: [9], [10], [11], [12], [13].

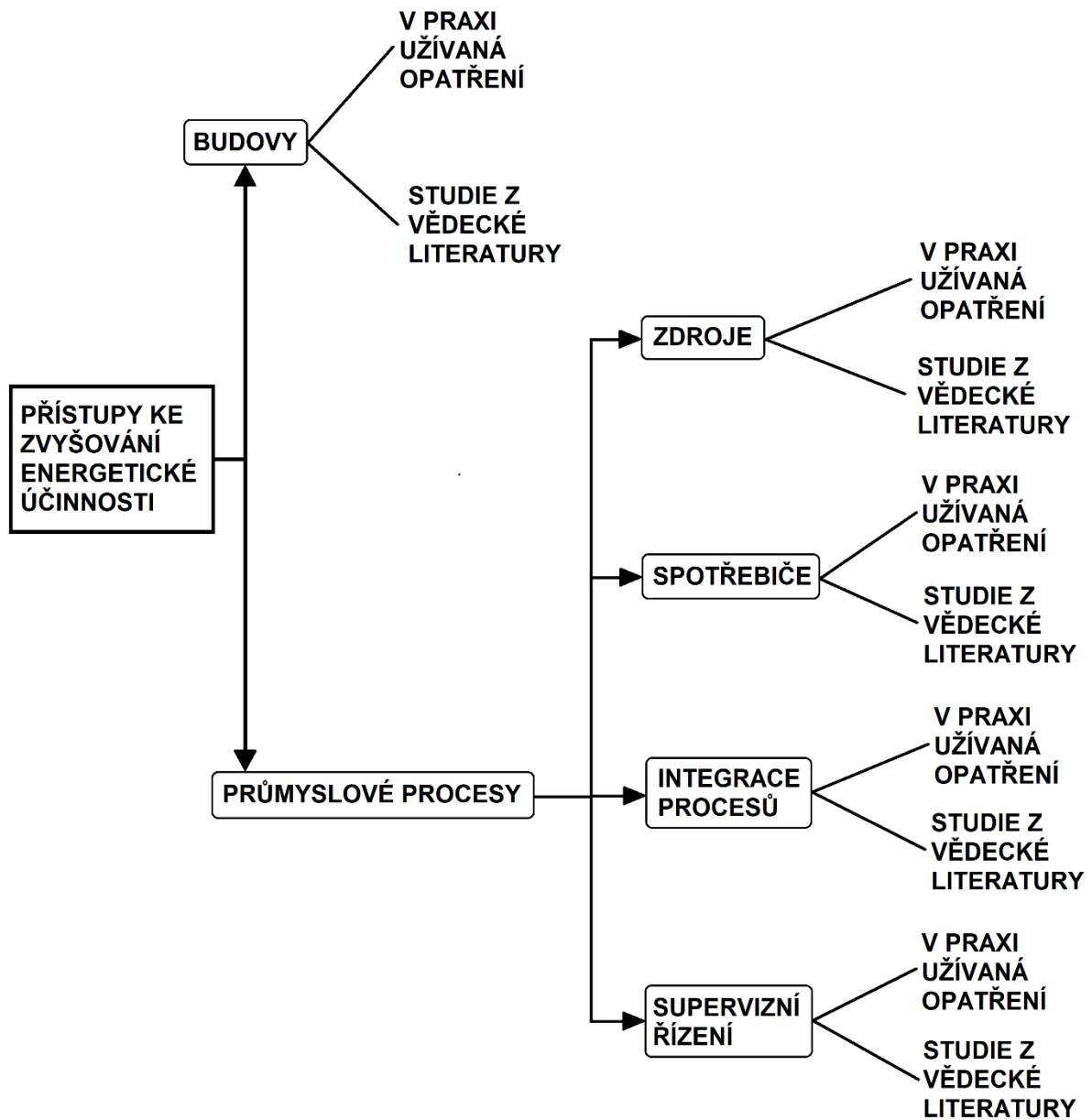
Následně bylo nalezeno 178 článků týkajících se tématu zvyšování energetické účinnosti podle následujících klíčových slov a logických spojek:

(Energy efficiency OR Energy savings) AND (Industrial process OR Manufacturing) AND (Improvement OR Increasing)

Po prostudování těchto článků bylo 50 studií vyřazeno, protože se přímo nezabývaly průmyslovým provozem. Články spadaly pod oblast budov, které nejsou předmětem této práce. Další studie byly vyřazeny, protože jednak neobsahovaly žádnou praktickou aplikaci (případovou studii), ale ani kvantifikaci dopadů na zvýšení energetické účinnosti. Některé dokonce nedostatečně popsaly vytvořenou metodu. Poté zůstalo 92 článků vhodných ke zpracování v rámci bakalářské práce.

Ve vybraných člancích lze najít jednak metodické studie, odkud byly brány obecnější doporučení a postupy, jednak studie zaměřující se na konkrétní procesy, odkud byly získány výsledky z případových studií, které lze využít v praxi. Následně bylo přistoupeno k systematizaci a zpracování.

V následujícím textu jsou opatření vždy rozdělena na běžně používaná v praxi a na progresivní. Je-li tedy část textu uvedena jako opatření z příruček pro energetické specialisty, jsou to opatření používaná v praxi. Naopak, je-li část textu uvedena jako studie vědecké literatury, jedná se o zástupce progresivních a v praxi nezavedených metod. Opatření jsou z důvodu přehlednosti a systematičnosti rozdělena do několika oblastí dle obrázku 4. Pasáže věnované jednotlivým oblastem zvyšování energetické účinnosti, jsou zpravidla strukturovány tak, že se vždy nejprve pojednává o metodách z příruček pro energetické specialisty (tedy praktikované metody) a poté o metodách z vědecké literatury.



Obrázek 4: Struktura oblastí úspor energie

2.1 Budovy

V této kapitole je zaměřena pozornost na prostředí uvnitř budov, které musí být zajišťováno v takové úrovni, aby budova mohla sloužit svému účelu [14]. Je zřejmé, že je tato oblast propojena se stavebními obory, tudíž rozvádí chápání budovy jako multioborové problematiky. Hlavní pozornost této bakalářské práce je věnována především průmyslovým procesům, proto nemá smysl podrobně rozvádět technické zařízení budov, které se týká z velké části stavebních oborů. Proto jsou uvedeny jen demonstrativní příklady některých progresivních technologií a materiálů z tohoto odvětví.

Základem posuzování energetické náročnosti (množství spotřeby energie) jsou geometrické parametry a konstrukční materiály budovy. V příručkách pro energetické specialisty se lze dočíst, že energetické nároky na vlastnosti budovy určuje ČSN 73 0540 a vyhláška energetické náročnosti budov. Energetické audity se tedy řídí těmito vyhláškami a navrhují výměnu starších materiálů, či technologií za novější, jak je možno se dočíst v druhé části této práce věnované energetickému auditu.

V příručkách pro energetické specialisty se vyjmenovávají možná opatření: výměna oken, zateplení stěn, instalace energeticky efektivnějšího osvětlení, ventilace, či vytápění a další [11], [12], [13].

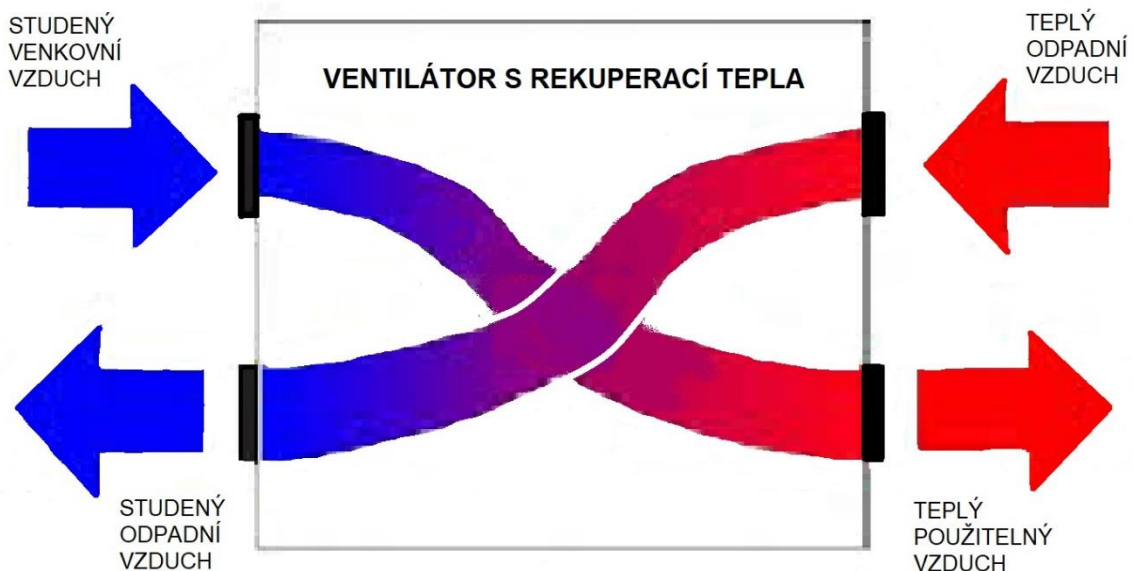
Vědecká komunita se však zajímá nejen o možnosti výměn, ale i doplnění stávajících technologií technologiemi novými. Například v oblasti izolačních materiálů se pozornost zaměřuje na nanomateriály na bázi keramiky, které mohou být nanášeny na již stávající konstrukce [15]. Nano-keramický povlak může být použit nejenom na izolaci stěn budov, ale například i na potrubí, kde může plnit ochranou funkci vůči poškození ohněm a korozi. Aplikace tohoto povlaku je snadná díky možnosti nanosení sprejem. Hlavními komponenty jsou styren (z 20 %) zajišťující pevnost a akrylový latex (z 80 %), díky kterému je možno dosáhnout význačných izolačních vlastností; ostatní složky zlepšují trvanlivost výsledného materiálu. Součinitel tepelné vodivosti tohoto povlaku se pohybuje okolo 0,069 W/mK, což není příliš nízká hodnota vzhledem k 0,038 W/mK u tradičního expandovaného polystyrenu. Výjimečných izolačních vlastností je však dosaženo nikoli nízkým součinitelem tepelné vodivosti, ale nízkým součinitelem přestupu tepla mezi okolním prostředím a povlakem.

V odvětví zabývajícím se izolací oken byla sepsána studie [16] o možnosti vyrábění vakuově zasklených oken metodou „in-vacuum“, která díky speciální technologii výroby umožnila snížení součinitele přestupu tepla na průměrnou hodnotu 0,428 W/m²K. Klasické metody dekomprese dosahují tlaků až 0,13 Pa, přičemž „in-vacuum“ metoda až 0,00013 Pa. Časová náročnost výrobního procesu je navíc o 4 až 6 hodin nižší než u okenních profilů vyráběných v současné době. V praxi byly na obytné budově porovnány trojitě zasklené okenní profily a profily vyrobené „in-vacuum“ metodou. Průměrný součinitel přestupu tepla u oken vyrobených „in-vacuum“ metodou činil 0,372 W/m²K, kdežto u běžně vyrobených oken s trojitým zasklením 1,273 W/m²K. Zlepšit izolační vlastnosti okenních profilů se tedy povedlo, avšak výpočet ekonomické rentability nebyl proveden, což je zmíněno i v samotné práci. Je tedy diskutabilní nakolik je možné uvedení této technologie do praxe.

Kromě izolačního odvětví jsou druhou velkou kapitolou i systémy topení, klimatizace, či ventilace. Souhrnně se označují zkratkou HVAC z anglického „heating, ventilating, air-conditioning“. První možností zvýšení efektivity těchto systémů je výměna starších zařízení za novější. Příručky pro energetické specialisty [11], [12] též zmiňují i

organizační opatření zamezující zbytečnou práci těchto systémů v době, kdy není potřeba jejich práce v takové míře, kterou právě vykonávají. Snížení spotřeby elektrické energie je možno dosáhnout například vytvořením tepelných pásem, kterým je přizpůsobena činnost HVAC systémů [17]. V každém tepelném pásmu je možno nastavit individuální chování všech zařízení tak, aby byly využity co nejefektivněji. Jedna ze studií [18] postoupila ještě dále a vytvořila metodiku vyhodnocení energetických dopadů při různém počtu lidí v určeném prostoru. V této metodice jsou zahrnuty i informace o geometrii budovy a uspořádání HVAC systému. K tomu je vytvořen algoritmus, který následně upravuje činnost všech zařízení HVAC systému.

Součástí HVAC systému jsou i ventilační zařízení, která zajišťují nezávadnost ovzduší ve výrobních prostorech. Existují však i typy ventilačních systémů, které vyměňují energii mezi přiváděným a odváděným vzduchem, jak lze pozorovat na obrázku 5 [19]. Přirozené ohřátí vzduchu (na obrázku – teplý odpadní vzduch) ve výrobních halách lze využít k ohřevu studeného venkovního vzduchu, který do hal vstupuje čímž se sníží náklady na jejich vytápění.



Obrázek 5: Ventilátor s rekuperací tepla [19]

Opatření týkající se budov lze shrnout tak, že pozornost je věnována novým materiálům a vlastnostem stavebních prvků, případně HVAC systémům.

2.2 Průmyslové procesy

Pod průmyslovými procesy se rozumí nejen činnost výrobních zařízení, ale i strojních celků zajišťujících zdroje a transport energií. Zvyšování efektivity průmyslových procesů je klíčem ke snížení spotřeby energií a zvýšení produkce, jejichž důsledkem je zvyšování generovaného zisku. Kromě samotných podniků mají na zvyšování efektivity průmyslových procesů zájem i politické instituce, které sledují celosvětový trend udržitelnosti průmyslu [20], [21]. S rozvojem informačních technologií posledních dekád se navíc otevírají nové možnosti zefektivnění nejenom jednotlivých procesů, ale i celých závodů. Průmyslové procesy jsou rozděleny podle účelu do jednotlivých kapitol.

2.2.1 Zdroje tepla a elektrické energie

Nejenom spotřebiče energií, ale také jejich zdroje je potřeba uvažovat při zvyšování efektivity průmyslových podniků. Tato kapitola je rozdělena do dvou částí, protože se v současné době k transportu energie v průmyslu využívá dvojí energie: elektrické a tepelné [21]. Cílem této kapitoly je nastínit současné přístupy a možný vývoj v oblasti zajišťování dodávek energií.

Zdroje tepelné energie

Co se týče výroby tepla, je často využívaným aparátem parní, či horkovodní kotel. V něm je teplo vzniklé spalováním paliva předáno vodě, čímž vzniká pára, potažmo horká voda, která je dále využívána v procesech.

V příručkách pro energetické specialisty [12], [9] je uvedeno několik opatření, která by měla být vždy zhodnocena. Prvním z nich je sladění poptávky s dostupností, čímž se rozumí zamezení neefektivnosti samotného použití kotlů. Časté problémy totiž nastávají v případech, kdy příliš výkonný kotel pracuje v krátkých intervalech a tím snižuje efektivitu, či pracuje při příliš nízkých teplotách. Těmto problémům se dá v prvním případě zabránit optimalizací výkonu kotle, v druhém případě instalací menších kotlů do systému. Menší kotel totiž na dorovnávání výkyvů tepla v systému spotřebuje menší množství energie. Pokud je v soustavě více současně pracujících kotlů, může se hledat úspora v plánování jejich zapínání. V neposlední řadě je doporučováno snižovat vliv zanášení na efektivitu kotle jeho čištěním, ať už mechanicky, či chemicky. Často je zmiňována též pravidelná údržba, výměna technologicky starší tepelné izolace za novější, či redukce přebytečného vzduchu, na jehož zahřátí je zbytečně spotřebovávána energie.

Důležité je však i zamezení ztrátám v následné síti vedení. V příručkách pro energetické specialisty [12] je doporučováno snížení těchto ztrát zjištěním možností výměny izolačních materiálů, v případě páry například uzavřením odvaděčů kondenzátu na nepoužívané části potrubí a samozřejmě pravidelnou kontrolou a údržbou.

Ve vědecké literatuře lze nalézt několik studií zabývajících se zvýšením energetické účinnosti parních kotlů. Studie [22] hodnotí zavádění pokročilejších kotlů s nepřímým ohřevem a je odhadováno, že díky tomu dojde do roku 2035 ke snížení spotřeby paliva o 7,9 % a snížení vypouštění CO₂ o 20,7 %. Lze však nalézt i opatření zajišťující vyšší efektivitu stávajícího zařízení. Jednu z cest je možno nalézt skrz již existující standard hospodaření s energií ISO 50001, což zpracovala jedna ze studií [23]. V jejím rámci

vytvořená metodika počítá s dvěma hlavními vstupními veličinami: množství vyrobené páry a spotřeba paliva. Po dobu půl roku byla sbírána provozní data a sledoval se celý systém parního kotle. Díky těmto novým datům bylo následně možné odhalit důvody nízké efektivity kotle a nalézt vhodnější nastavení jednotlivých proměnných. Na základě těchto poznatků lze nalézt možnosti úspor, jak z hlediska plánování a řízení systému, tak z hlediska následné údržby.

Další ze zdrojů [24] pojednává o možnostech monitorování účinnosti kotlů na základě termodynamických modelů kotlů vypracovaných v EBSILON® Professional software. Díky těmto modelům je možné analyzovat podmínky provozu – aktuální výkon, typ paliva a další. Z podmínek provozu se následně vypočítají změny v účinnosti a na základě nich se upraví provoz na optimální hodnoty s nejvyšší účinností. Ve studii bylo zjištěno, že modelový kotel měl nejvyšší účinnost (91,9 %) při zatížení pouze 80 %.

Jako zdroj tepla se často využívá kogenerační jednotka. Ta slouží pro současnou výrobu tepla a elektřiny [25]. Jedná se o velmi efektivní způsob využití energie z paliva. Jedna z existujících je například z roku 2015 [26], kde se přistupuje k zefektivnění kogenerační technologie metodou „Energy conservation measures“. Tato kogenerační jednotka spaluje zemní plyn a vyrábí elektřinu a páru rozdělenou do několika tlakových stupňů. Je použito umělých neuronových sítí¹ k imitaci produkce a spotřeby v různých nastaveních kogenerační jednotky, přičemž jsou pozorovány faktory ovlivňující její efektivitu. V případové studii byla po tomto přenastavení zvýšena energetická účinnost zhruba o 12 %.²

Kromě kotlů lze pro výrobu tepla využít i další stroje – například tepelná čerpadla. Jedna ze studií [27] zkoumala možnosti efektivnějšího zapojení odstředivých tepelných čerpadel. Do zapojení byly uvažovány čerpadlové systémy: jedno-cyklické dvou-kompresorové, dvou-kompresorové paralelně zapojené a dvou-cyklické paralelně zapojené. Pomocí simulací byly vyhodnocovány různé variace zapojení, přičemž nejvyšších teplot i efektivity dosáhl dvou-cyklický paralelně zapojený systém tepelných čerpadel.

Zdroje elektrické energie

Dále úspory souvisí s elektrickou energií, která je kromě výrobních účelů používána i na chod HVAC systémů, osvětlení, či výpočetní techniky. V příručkách pro energetické specialisty [11], [12] je doporučováno kontrolovat odběr samotné elektrické energie v rámci celého podniku se zaměřením na největší spotřebiče. Spotřeba elektřiny může být celkově pokryta ze sítě, ale v čím dál větší míře je pro podniky schůdnější její částečné pokrytí pomocí autonomní výroby. Nejčastější cestou je použití technologie fotovoltaických článků pracujících na principu výroby elektřiny pomocí fotodiód uspořádaných do fotovoltaických panelů [28], což zmiňují i příručky pro energetické specialisty [11]. Polovodičové fotodiody zachycují energii slunečního záření, kterou transformují na energii elektrickou. Kvantitativně však tento zdroj nedokáže zcela uspokojit spotřebu průmyslových podniků, je proto používán jako doplňkový. Přesto však je tento typ zdroje elektrické energie využíván stále častěji [28].

To se odráží také v zaměření studií ve vědecké literatuře, které mají za cíl zvyšovat efektivitu tohoto typu zdroje. Studie [29] se zaměřuje na efektivitu chlazení médiiem v samotných panelech. Zvýšení teploty fotovoltaických panelů má totiž za následek

¹ Neuronové sítě jsou jedním z výpočetních modelů určených pro zpracovávání a třídění dat.

² Zvýšení finančních zisků konkrétní jednotky bylo vypočteno až na 43 %.

pokles produkce elektrické energie. Kvalitní chladicí médium tedy pomáhá zvyšovat výkon panelů. V této studii byla vyzkoušena voda v kombinaci s nanočásticemi grafenu. Grafenový prášek o velikosti částic 60 nm byl doplněn detergentem³ pro zvýšení stability výsledné nanokapaliny. Studie srovnávala více variant koncentrace grafenu. Bylo zjištěno, že příliš vysoká koncentrace nanočástic (0,15 %) vede k poklesu stability v důsledku jejich neefektivního nahromadění, čímž se snižuje výsledná efektivita chlazení. V optimálním systému zapojení a koncentraci grafenu 0,1 % bylo potvrzeno zvýšení výkonu o 17,2 % oproti čisté vodě.

Další opatření ke zvýšení energetické účinnosti fotovoltaických panelů jsou založena na zvyšování dopadu slunečního záření na panely samotné. V prvním případě [30] bylo využito faktu, že výkon panelů závisí na úhlu dopadu slunečních paprsků. Pokud není úhel paprsků kolmý k desce panelu, ztrácí se tím energie záření. Proto bylo testováno polohovací zařízení fotovoltaických panelů s cílem zjistit jeho vliv na výkonnost. Bylo přikročeno k vytvoření dvouosého natáčení pomocí komutátorového stejnosměrného elektromotoru. Při následném srovnání tohoto systému panelů a panelů fixně usazených, bylo zjištěno zvýšení zisku elektrické energie o 34 % po odečtení ztrát způsobených provozem polohovacího systému.

V dalším případě [31] bylo využito faktu, že výkon panelů závisí na čistotě jejich povrchu. Na jejich povrchu se totiž mohou usazovat různé prachové částice, které zamezují pronikání slunečních paprsků k fotodiodám, což vede ke snížení výkonu. Míra usazování prachových částic se však liší v závislosti na oblasti, ve které jsou tyto fotovoltaické panely vystavěny. Panely se přirozeně čistí při poryvech větru nebo při dešti, ale vyčištění není často úplné. V oblastech, kde se však větru nebo deště nedostává, zůstávají panely špinavé. Je tedy možno využít účelových zařízení na čištění. Jednou z možností je čištění manuální, což je však v porovnání s ostatními přístupy ekonomicky nejméně vhodné. První automatizovaný přístup je čištění vodou, smíchanou dle potřeby s čistící látkou, aby bylo dosaženo lepšího účinku. Voda při vhodné teplotě může také pomoci se zchlazením panelů – účinek byl zmíněn výše v textu. Tato metoda však s sebou přináší i nemálo problémů: nutnost použití a skladování velkého množství vody, možnost teplotního šoku pro panely při jejich kontaktu s příliš studenou vodou a vysoké investiční náklady při velkých plochách panelů. Další možností je cesta mechanická s použitím kartáčů, díky kterým je možno čistit s velkou efektivitou. Daní jsou však vysoké investiční náklady, kvůli komplexním konstrukcím a strojům a vysoká spotřeba energie těchto zařízení. Existuje ještě mnoho dalších možností, jako například ultrazvukové, či vysokotlaké čištění. Tyto varianty však také mohou vyžadovat vyšší investiční náklady. Vybrání vhodné metody tedy ovlivňuje mnoho parametrů a okolností použití. Její volba musí být tedy zhodnocena v závislosti na konkrétním použití.

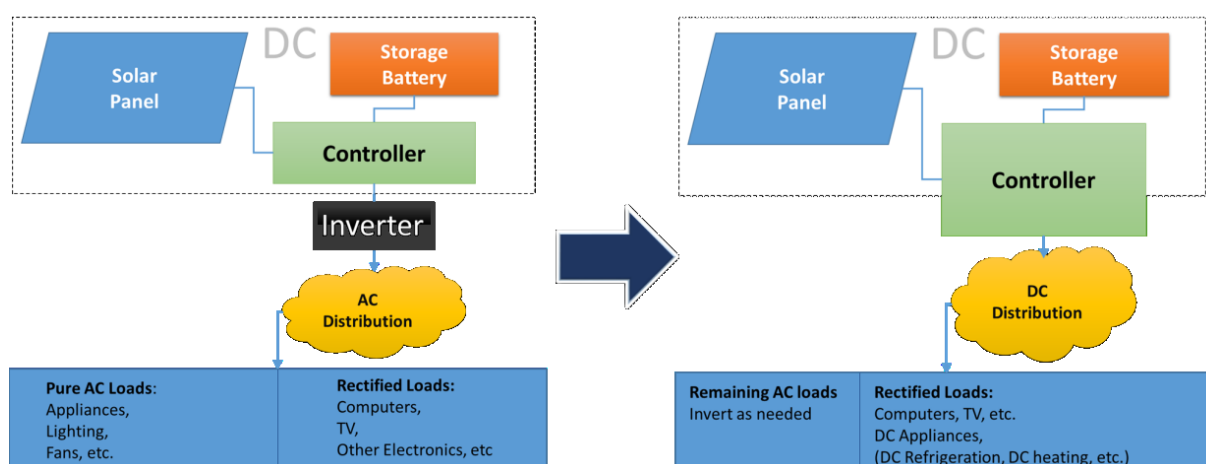
Stejně jako u distribuce tepla je možné zamezit ztrátám i v distribuci elektřiny. Práce [32] se zabývá právě touto problematikou. Hlavní myšlenkou je vytvoření tzv. „Direct Current Based Nano-grid,“ tedy elektrické sítě se stejnosměrným proudem v rámci jedné budovy / jednoho podniku, která funguje paralelně s okruhem střídavého proudu. Zdrojem energie pro stejnosměrný okruh jsou fotovoltaické panely. Nevýhoda možné nestabilní dodávky energie je vyřešena pomocí bateriového uložení. Stejnosměrný proud využívá například výpočetní technika, senzory, čidla, osvětlení a další. V případě těchto spotřebičů tedy odpadá nutnost převodu ze střídavého proudu na

³ Konkrétně se jedná o tzv. Dodecylsulfát sodný, jež je používán v mnoha čistících a hygienických výrobcích, protože na sebe váže tuky a vodu a přitom je šetrný ke kůži [116].

stejnosemřný, což je právě zdrojem ztrát. To lze demonstrovat na případu výroby hliníku, u které v průměru činí ztráty při převodu střídavého proudu na stejnosemřný 7 % v případě Evropy [33]. Do nového stejnosemřného obvodu je připojeno:

- osvětlení,
- sociální vybavení,
- kancelářské vybavení,
- počítačové a senzorové vybavení,
- HVAC systémy,
- přesuny vody, či materiálu,
- a další.

Samozřejmě je zde možnost instalace převodu ze stejnosemřného proudu do okruhu střídavého proudu závodu, ale tento převod by byl použit pouze při přebytečné energii v okruhu stejnosemřného proudu. Ukázka navrhovaného přechodu zapojení na elektrickou síť se stejnosemřným proudem je na obrázku 6 [32], kde je vidět způsob zapojení zdroje elektrické energie rovnou na obvod stejnosemřného elektrického proudu. I sami autoři si uvědomují nutnost nezanedbatelné výměny elektrické infrastruktury v podniku a dalších výzev spojených s touto technologií.



Obrázek 6: Změna infrastruktury z běžného zapojení fotovoltaiky na navrhované [32]

Dalším způsobem výroby zejména tepelné energie je také využití odpadního tepla podniku. Protože je ale tato oblast úzce spojena s problematikou integrace procesů, je zařazena do kapitoly 2.2.3.

2.2.2 Spotřebiče tepla a elektrické energie

Výrobní vybavení každého podniku závisí na jeho zaměření. Tato kapitola předkládá některá opatření ke zvýšení energetické efektivity nejzastoupenějších zařízení a technologií spotřebovávajících energii v průmyslových provozech.

Přidružená zařízení

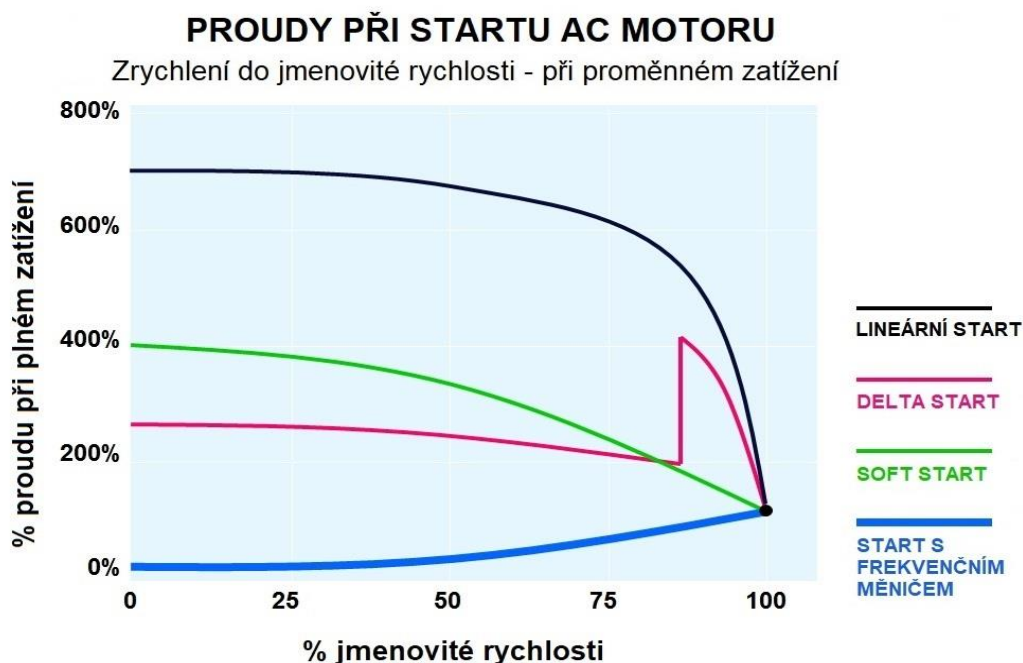
Přidruženými zařízeními, která jsou zastoupena v široké škále různých procesů, jsou myšlena zařízení využívající elektrické motory. Jedná se o samotné motory určené k pohonu například pohyblivých částí strojů, ale také o kompresory nebo čerpadla. Tato zařízení přispívají významnou měrou ke spotřebě elektrické energie.

Co se týče samotných motorů, tak doporučení ke snižování jejich spotřeby se v příručkách pro energetické specialisty [9], [12] zaměřují na minimalizování výkyvů napětí, převinutí, či výměnu méně účinných motorů za účinnější.

Dále lze jmenovat například správné nastavení převodu rotačního pohybu motoru na pohyb hnaného stroje či používání pouze aktuálně potřebných motorů startovaných manuálně nebo s použitím sofistikovanějších ovladačů. Těchto ovladačů je celá řada. Zmínit lze například využití blokování. Motory jsou sdruženy v rámci jednoho ovládacího okruhu a pokud není v chodu první motor, nemůže nastartovat druhý, ani další v pořadí. Stejně tak, pokud není v chodu druhý motor, nemůže nastartovat třetí atd. Tím jsou vytvořeny vazby mezi nimi a je dosaženo jejich systematického zapínání/vypínání, což snižuje spotřebu energie. Dále je doporučováno redukovat počáteční zatížení motorů použitím například soft startérů, jež snižují nárazový proud i točivý moment při startu stroje [34], [35].

Důležitým prvkem z hlediska úspor je řízení. Pro tyto účely bývají vhodné frekvenční měniče. Tato zařízení ovládají frekvenci a elektrické napětí elektromotoru tak, aby se dosáhlo plynulé regulace otáček. Díky tomu nevykonávají elektromotory zbytečnou práci navíc. Tím se snižuje spotřeba elektrické energie, ale výkonnost zůstává zachována [36].

Plynulá regulace otáček může být použita také k pozvolnému startu elektromotorů, jak je možné vidět na obrázku 7. V porovnání s ostatními variantami probíhá start elektromotoru s frekvenčním měničem pozvolna a za celou dobu nepřesáhne jmenovitý proud elektromotoru.



Obrázek 7: Start motoru různými způsoby [37]

I ve vědecké literatuře se objevují metodiky pro hodnocení a implementaci opatření vedoucích k efektivnějšímu provozu elektromotorů. Studie [38] navrhuje systematizaci opatření vedoucích k efektivnějšímu provozu elektromotorů rozdělením do čtyř kategorií:

- konfigurace,
- pohon,
- management,
- vstup energie.

První dvě kategorie byly zmíněny již výše v textu. Pod managementová opatření pak spadá například vypracování plánu chodu motoru, program preventivní údržby a program prediktivní údržby. Do kategorie *vstup energie* spadají opatření jako korekce účinníku, vyvarování se provozu nad jmenovitým napětím nebo snížení výpadků proudu.

Dle studie [39] která navazuje na studii [38] je míra implementace opatření zvyšujících energetickou účinnost elektromotorů stále nízká. Pomocí vypracované metodiky lze však stanovit faktory ovlivňující jejich budoucí přijetí. Těmito faktory by měly být: energetické přínosy, kompatibilita, ekonomika, přínosy a ztráty související s výrobou, synergie, složitost, personál a ostatní technické prvky. Studie předkládá tyto faktory jako klíčové při zvažování přijetí budoucích sofistikovanějších opatření. Tyto faktory by měly pomoci při rozhodování o přijetí opatření zvyšujících energetickou efektivitu elektromotorů.

Co se týče dalších přidružených zařízení, lze při studiu příruček pro energetické specialisty [11], [12] běžně najít například doporučení snížení drsnosti povrchu uvnitř čerpadel, aplikace převodovek při předimenzování, či instalace paralelně zapojených čerpadel pro proměnné zatížení. U kompresorů [13] se jedná například o správné nastavení teploty a vlhkosti vstupujícího vzduchu, správné dimenzování v závislosti na poptávce nebo ultrazvuková detekce tlakových netěsností.

V oblasti čerpadel je k dispozici studie [40] zabývající se zvýšením efektivity vodokružných vývěv nikoli snížením drsnosti povrchu, ale vhodným výběrem pracovní tekutiny. V tomto druhu čerpadla se totiž nachází pracovní tekutina vytvářející podtlak, na jehož základě k čerpání dochází. Zvýšení energetické efektivity celého procesu je možno docílit snížením tření této kapaliny přidáním xanthanové gumy do vody v koncentraci 0,45 %. Toto složení přispívá i ke snížení turbulentních ztrát. Technologie byla použita v případové studii a vykazuje snížení spotřeby elektrické energie o 19 % oproti čisté vodě.

Stlačený vzduch

V Evropě široce používaná technologie [41], která konzumuje 10 % celkové spotřeby energie, je technologie stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch je používán například při tryskání, čištění, vyfukování, formování, míchání nebo také jako pracovní energie v pneumaticky poháněných strojích. Efektivita stroje je však velice nízká. Je odhadováno, že pouze 10–15 % energie je využito na práci. Takto nízká efektivita je způsobena tepelnými ztrátami a úniky v systému vedení stlačeného vzduchu. Opatření navrhovaná příručkami pro energetické specialisty [11], [12] jsou:

- snížení poptávky,
- údržba,
- minimalizace úniků v potrubí,
- instalace zařízení na odvádění zkondenzovaných par,
- snížení teploty nasávaného vzduchu do kompresoru,
- přesné nastavení kompresorů, což bylo zmiňováno v předchozí kapitole.

Protože je používání stlačeného vzduchu nákladné, doporučuje se zvažovat alternativní technologie. Špatná údržba má za následek snižování efektivity systému, zvýšení tlakových úniků a horší udržování vlhkosti v patřičných mezích. Platí, že čím nižší je teplota nasávaného vzduchu do kompresoru, tím je potřeba méně energie na jeho stlačení. Proto je snižování teploty tohoto vzduchu přivedením například venkovního vzduchu další možností snížení spotřeby energie.

Ve vědecké literatuře zdroj [42] vyjmenovává kromě již zmíněných ještě tyto návrhy opatření:

- instalace průtokoměrů,
- minimalizace tlakových výkyvů,
- efektivní návrh potrubí,
- monitorování celého systému,
- řízení toku.

Instalace průtokoměrů zajišťuje informace o systému, čímž se otevírají možnosti jeho optimalizace [43]. Minimalizace tlakových výkyvů má za následek snížení spotřeby energie nutné na jejich vyrovnání [44]. Správně navržený distribuční systém přispívá ke snížení tlakových poklesů a úniků. Zavedení monitorovacího systému vede k efektivnější koordinaci provozu a zajištění stabilní dodávky stlačeného vzduchu [42]. Řízením toku se myslí instalace zařízení, které snižuje tlak v systému na nejnižší nutný. Tímto se ušetří náklady výroby, což již bylo potvrzeno v případové studii [45].

Ve studii [42] je také vyzýváno k plnému pochopení účinků jmenovaných opatření. To indikuje další možnost pro budoucí vývoj v oblasti zvyšování efektivity této technologie. S tímto konstatováním souhlasí i studie [46]. Pro plné pochopení provozu systému je třeba získání provozních dat. Celý systém stlačeného vzduchu totiž sestává z mnoha zařízení – elektromotoru, kompresoru, odvlhčovače, chladiče, a dalších zařízení zajišťujících distribuci. Teprve po komplexní analýze všech dat je možné najít místa nejvyšší neefektivity a přijmout opatření k jejich zlepšení.

Obráběcí stroje

Další velkou skupinou spotřebičů jsou obráběcí stroje, jež mají široké využití ve strojírenství. Zároveň však mají nízkou efektivitu a velmi vysokou spotřebu energie – až 74,7 % spotřebované elektrické energie ve strojírenství [47]. Přesto nejsou obráběcí stroje zmiňovány v žádné ze zpracovaných příruček pro energetické specialisty. V posledních letech však spousta organizací a univerzit [48] zaměřila svoji pozornost na problematiku zhodnocování efektivity obráběcích strojů, a hledá cesty jimiž by bylo snížení energetické náročnosti těchto strojů lépe dosažitelné. V oblasti obráběcích strojů je nutné optimalizovat procesní parametry a zlepšit plánování práce. Nahrazení starých strojů za nové totiž vyžaduje vysoké investice, a proto by pro firmy bylo lepší jít cestou optimalizace, která má zjevný potenciál úspor energie i financí [49].

Ve vědecké literatuře je tedy možné najít dostatečné množství studií zabývajících se stroji na obrábění či tváření kovů.

Užitečným nástrojem pro hodnocení energetické účinnosti strojů by mohl být energetický benchmarking. Avšak, jak vyplývá z literatury [47], efektivní a prakticky použitelné řešení pro obráběcí stroje zatím chybí, a to z důvodu jejich široké škály a použití ve velkém množství různých procesů. Z literatury dále plyne [50], [51], že vývoj takového řešení je zatím ve fázi návrhu konceptů, a tudíž nejsou prozatím k dispozici konkrétnější výsledky.

Kromě přístupů benchmarkingu lze aplikovat i jiné, například využívající modelování. Díky modelům lze predikovat energetickou účinnost a hledat tak opatření (např. změnu nastavení), která povedou k jejímu zvýšení [49]. Jako příklad aplikace modelů lze uvést studii [52], která prezentuje využití modelu měrné řezné energie pro technologii vířivého frézování. Tato technologie se používá především při obrábění závitů a sestává z rotace obrobku, rotace řezného nástroje a axiálního posuvu řezného nástroje. Model predikuje měrnou řeznou energii v závislosti na nastavení řezných parametrů. V porovnání s reálnými měřeními prokázal model vysokou přesnost predikce – přes 90 %. S využitím modelu je tedy možné zvýšit efektivitu práce, a to úpravou těchto řezných parametrů: řezné rychlosti, počtu řezných nástrojů, rychlosti rotace obrobku a poloměru rotace nástroje.

Na rychlost a spotřebu energie obráběcích strojů mohou mít také vliv aktivity strojů nesouvisející se samotným obráběním. Proto byla vyvinuta metoda na základě tzv. Therblig pohybů, která redukuje pohyby nesouvisející s obráběním [53]. Therblig pohyby jsou základní pohyby používané Frankem Gilbrethem v teorii pohybů na pracovišti. Pro lepší představu o Therblig pohybech jsou na obrázku 8 [54] znázorněny jejich elementární prvky. Samotná teoretická základna Therblig pohybů umožňuje vybrat pohyby a jejich dráhy tak, aby byly co nejefektivnější, díky čemuž se sníží spotřeba energie stroje. V případové studii bylo zjištěno, že se při použití upraveného modelu snížila spotřeba energie o 7,6 % a využití času se zvýšilo o 8,1 %. Touto metodou lze tedy zajistit snížení spotřeby energie, aniž by byly změněny řezné parametry.



Obrázek 8: Výčet elementárních prvků pracovního pohybu – Therbligů [54]

Při vytváření strojních obrobků jsou kromě strojů obráběcích využívány i stroje na tváření kovů. U nich má však optimalizace parametrů relativně malý potenciál, protože by při ní mohlo docházet ke snížení kvality výrobků [55]. Naopak velký potenciál je dle zdroje [55] spatřován v plánování managementu a způsobech jeho použití v různých pracovištích. Problémem je však, podobně jako u energetického benchmarkingu, dostupnost univerzální metodiky. Každé pracoviště obsahuje konkrétní propojení jednotlivých strojů a infrastruktury, což má za následek nutnost individuálního přístupu ke každému pracovišti.

Průmyslová robotika

Průmyslové roboty zefektivňují výrobu. Disponují totiž možnostmi upevnit na sebe různé druhy úchopových či jiných nástrojů nazývaných souhrnně koncové efektoři. Nejrozšířenějšími jsou v současnosti ty používané pro manipulaci [56]. Průmyslová robotika je odvětví, které však není zmiňováno v žádné příručce pro energetické specialisty.

Zajímavé přístupy zefektivnění těchto zařízení je tak možné nalézt spíše ve vědecké literatuře. Už mnoho let se tak děje například cestou nalezení správných rychlostí a zrychlení. V rámci studie [57] je dosaženo snížení spotřeby energie, aniž by byly změněny časy pohybů, časy výrobních cyklů nebo aniž by bylo potřeba instalovat nové vybavení. Proběhla analýza pohybů jak horizontálních a vertikálních, tak i tříosých. Bylo zjištěno, že u horizontálních pohybů je nižší spotřeba energie při pomalejších rychlostech, zatímco u vertikálních je tomu naopak, protože zde působí gravitace. K menší spotřebě energie vede například i rozložení zrychlení na celou dobu pohybu. Navíc je důležité dodržování principů jako vyhýbání se velkým momentům a vyvarování se vlastních frekvencí, které mohou způsobovat nechtěné vibrace. Díky těmto přístupům je možno dosáhnout 30 až 70 % energetických úspor v porovnání s tradičními neupravenými pohybovými profily. Studie poté navrhuje zvýšení propracovanosti pohybových profilů, kde je však počítáno s nutností vyšších investic. Ve studii [58] byl vybrán rychlostní profil s parabolickou křivkou jako tou nejvíce vyhovující. Tento profil při experimentech snížil spotřebu energie až o 33 %. V další studii [59] bylo cílem například určit efektivnější tvary pohybových profilů. Bylo zjištěno, že při menších plochách pohybu jsou výhodnější přímé dráhy. Při těchto plochách je také vidět nejvyšší rozdíl v efektivitě, a to až o 50 %, při porovnání různých profilů. Při zvětšování pracovních ploch se však výhodnějším stává spirálovitý tvar pohybu, protože nedochází k zastavení a opětovnému zrychlování robotu.

Existují samozřejmě další specializované typy spotřebičů, ale ty by již přesahovaly rámec této práce. Na přístupech ke snižování energetické efektivity ve vědecké literatuře lze spatřit tendenci častého využívání softwarových nástrojů k různým analýzám, výpočtům, či modelům. Většina těchto studií se shoduje na nutnosti získávání dat a analýze vlivu faktorů, jejichž optimalizace snižuje spotřebu energie. Oblastí, kde se softwarových řešení využívá zejména, je supervizní řízení. Tato oblast je zpracována v kapitole 2.2.4.

2.2.3 Integrace procesů a využití odpadního tepla

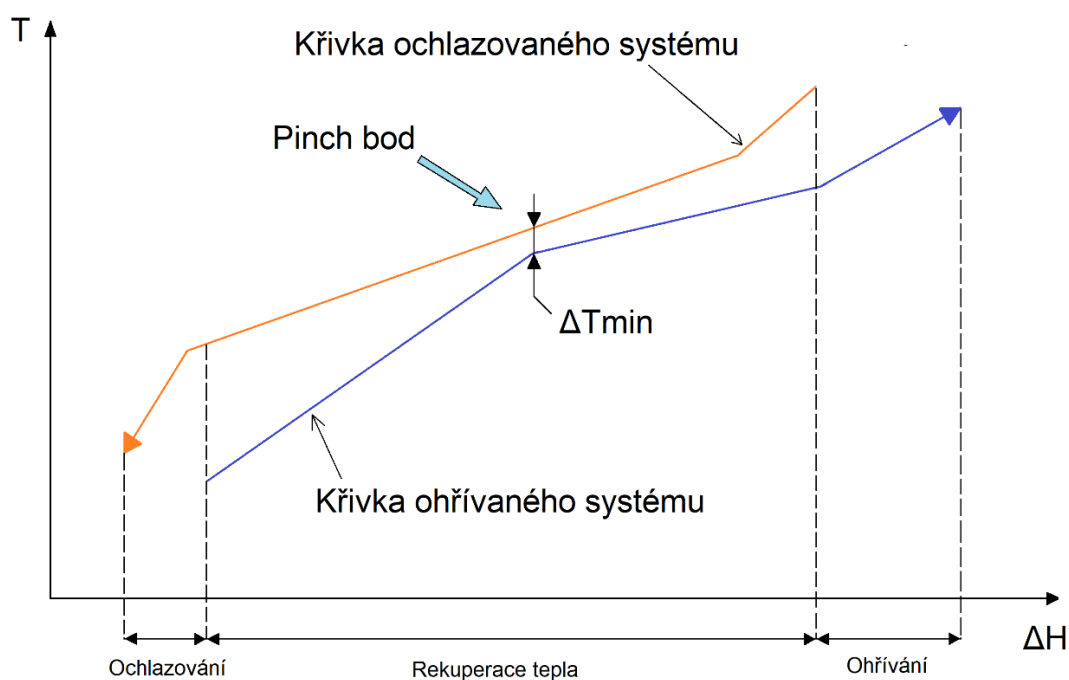
Současné přístupy snižování energetické účinnosti se neomezují pouze na zvyšování energetické účinnosti v rámci jednoho zařízení, ale zabývají se také využitím energetických vazeb mezi více zařízeními. Integrace procesů je termín používaný pro metody kombinující části, či přímo celé procesy, za účelem snížení celkové spotřeby energie, případně snížení emise látek poškozujících životní prostředí [60]. Přestože se tento termín začal používat v souvislosti s již etablovaným termínem „využívání odpadního tepla“, je termínem nadřazeným, protože pokrývá nejenom procesy využívající odpadní teplo, ale i jiné (např. vodní hospodářství) [61]. Metody integrace procesů se pak zakládají na třech konceptech: termodynamických výpočtech, inženýrské zkušenosti a využití softwarových nástrojů [61].

Využití odpadního tepla v tepelných procesech

Nejčastější formou integrace procesů je zejména využívání odpadní energie ve formě tepla z výrobních procesů nebo tam, kde dochází ke ztrátám energie. Toto teplo je stále ceněno, a je proto transportováno a použito v jiných zařízeních – například na přehřev/předchlazení, či doplňkový ohřev/chlazení. Technologie využití odpadního tepla je také součástí normy ISO 50001 – tedy Systému managementu hospodaření s energií [62]. Jistě je možno tuto normu využít, avšak její formulace je příliš obecná a nenabízí konkrétní možnosti, jak v praxi postupovat [6]. Vedlejší produkty průmyslových procesů ve formě například odpadního materiálu jsou identifikovatelné jednodušeji než odpadní teplo. To je obtížné stanovit v konkrétním místě, a také určit jeho vyčíslení. Konkrétní metodické postupy jsou tedy vítaným přínosem při řešení těchto problémů [63].

Příručky pro energetické specialisty [11], [12] v současné době informují o příležitostech využití odpadního tepla pro přehřívání, generaci páry, absorpční chlazení nebo pro kaskádovité řazení tepelných zařízení.

Nejstarší z metod je však tzv. „pinch analýza“ [64], která vyšla ze snah o rekuperaci tepla během předchozích 40 let. Pinch analýza je metoda snižující spotřebu energie pomocí optimalizace systémů regenerace tepla díky použití termodynamických výpočtů [61]. Jedná se o grafickou metodu založenou na vytvoření kompozitních křivek, jež znázorňují termodynamické křivky jak systémů, které mají být ohřívány, tak těch, které mají být chlazeny, jak lze vidět na obrázku 9 [61]. Nejvýhodnější místo (tzv. „Pinch“ bod) T-H diagramu se pak nachází tam, kde jsou obě křivky sobě nejbližší. K tomuto diagramu lze následně vytvořit ekonomický diagram, kde je možno nalézt kompromis mezi investičními náklady a úsporami energie. Přestože byla tato analýza použita především u systémů rekuperace odpadního tepla [65], s postupem času začala být využívána i v dalších oblastech: tepelné integrace celých závodů [66], vodního hospodářství [67], recyklace materiálů [68], vodíkového hospodářství [69] a dalších.



Obrázek 9: T-H diagram s kompozitními křivkami [61]

Přestože jsou využívání odpadního tepla a aplikace Pinch analýzy známé již po dlouhá desetiletí, stále lze ve vědecké literatuře najít velký počet prací zabývajících se touto problematikou. Studie [70] navrhuje metodiku sestávající ze čtyř po sobě jdoucích etap:

1. analýza stávajícího stavu,
2. vyhodnocení možností pro využití odpadního tepla,
3. výběr vhodné technologie,
4. podpora při rozhodování.

V první etapě jsou navrhovány kroky monitorování zdroje energie, průtoku, místa ztrát a dat o teplotách v různých částech celého systému. Vyhodnocování je rozděleno na kvalitativní a kvantitativní část, kde se postupně posuzuje například druh média přenášející energii, infrastruktura potrubí, kyselost prostředí, změny teplot a další. Při výběru vhodných technologií je nutné vzít v úvahu náklady, implementaci a rozsah změn. V poslední fázi je pozornost zaměřena na výpočty finanční návratnosti, redukce emisí CO₂ a životní cyklus nových zařízení. Tuto metodiku lze především použít pro rychlé zjištění vhodnosti využití technologie odpadního tepla a pro případnou ekonomickou rentabilitu různých technických řešení.

Využitím Pinch analýzy se zabývá studie integrace celého závodu na výrobu oceli ve Švédsku [71]. Díky Pinch analýze bylo zjištěno, že je zde možnost instalace parní turbíny na výrobu elektřiny, a dále vybudování sítě výměníků pro využití odpadního tepla u sekce čištění plynu koksovy, což umožní 14 % úspory tepla z rekuperace přebytečné páry.

Pinch analýza je často využita jako standardní výpočetní model, se kterým jsou nové metody porovnávány nebo i slučovány. Studie [72] uvádí využití Pinch analýzy společně s další, ve studii navrženou metodou pro energetickou integraci destilační kolony. Ze srovnání metod vychází, že Pinch analýza vybrala nejefektivnější řešení, které dosáhlo tepelných úspor 33 až 35 %.

V kombinaci s exergetickou⁴ analýzou, která snadno identifikuje možné ztráty energie procesů, byla Pinch analýza využita k optimalizaci systému turbín [73]. Kombinace metod umožnila identifikovat ztráty energie a ukázat možnosti lepšího nastavení celého systému.

V souvislosti s pokročilejší exergetickou analýzou byl koncept Pinch analýzy použit při zvýšení energetické efektivity sítě výměníků tepla v rafinérii na zpracování zemního plynu [74]. Nový přístup zahrnoval detailně zpracovaný tzv. „entalpický diagram Carnotova cyklu“ s vyváženými kompozitními křivkami. Díky tomu mohla být navržena opatření snížení spotřeby stávajících zařízení a vytvoření systému využití odpadního tepla, čímž se zvýšila exergetická účinnost celé sítě výměníků tepla o 78 %.

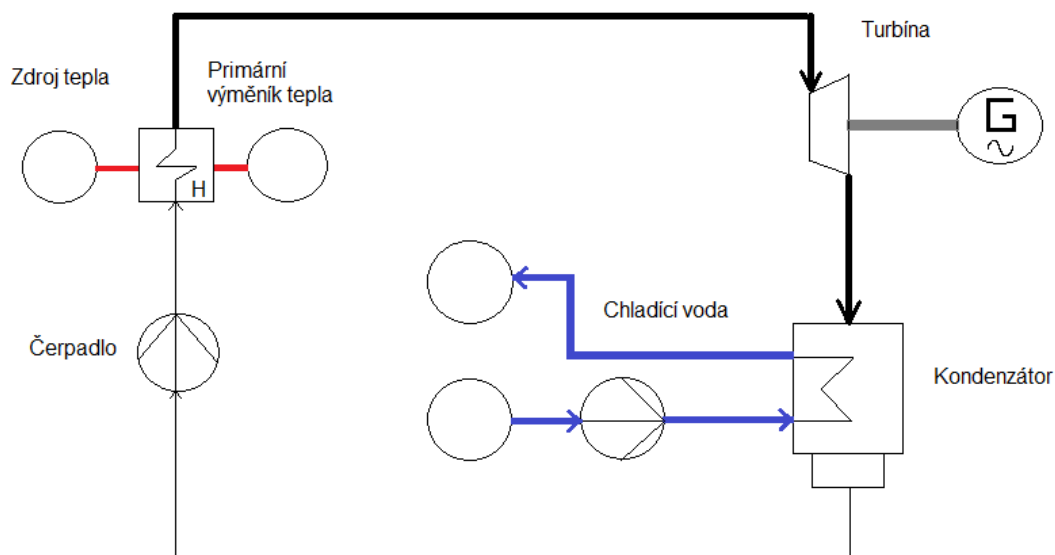
V problematice zpracovávání odpadního tepla je potřeba řešit i problém časového nesouladu mezi poptávkou po odpadním teple a jeho produkcí, což je možné řešit instalací tepelných akumulátorů energie. Ze studie z roku 2019 [75] vyplývá, že při návrhu akumulátorů hraje významnou roli optimální nastavení teplot. Nakonec byla provedena ekonomická rentabilita tepelných akumulátorů energie, přičemž bylo zjištěno, že pokud investice do tepelného akumulátoru energie nepřesahuje 50 %

⁴ Exergetická energie popisuje, jakou část energie lze přeměnit na práci.

pořizovací ceny zdroje tepla (např. kotle), lze dosáhnout obdobné doby návratnosti jako na zdroji.

Využití odpadního tepla na výrobu elektrické energie

Využití odpadního tepla však není pouze záležitostí integrace tepelných soustav různých procesů, ale i jeho využití pro výrobu elektrické energie. Při konverzi nízkoteplotního odpadního tepla jsou například používány generátory pracující na principu organického Rankinova cyklu (zkráceně ORC), protože nepracují s vodou, ale s organickou tekutinou, která má nižší teplotu varu. Tyto generátory jsou jedinými zástupci využití odpadního tepla na výrobu elektrické energie v příručkách pro energetické specialisty [9]. Princip fungování organického Rankinova cyklu je znázorněn na obrázku 10 [76], kde je zdrojem tepla teplo odpadní, jež následně pohání turbínu vyrábějící elektrickou energii. Díky vytvoření kompozitních křivek je možné identifikovat a kvantifikovat odpadní teplo potřebné pro výrobu elektrické energie pomocí ORC generátoru [65].



Obrázek 10: Schéma organického Rankinova cyklu [76]

Dalšími zařízeními schopnými převést tepelnou energii na elektrickou jsou termoelektrické generátory, které však zatím nemají příliš velkou účinnost. Proto lze ve vědecké literatuře najít mnoho studií zabývajících se jejím zvýšením. Protože nemá význam rozvádět všechny tyto studie zabývající se stejnou problematikou, následuje jejich stručný výčet. První zdroj [77] směřuje na co možná největší zvýšení výkonu termoelektrických generátorů jejich správným umístěním. To bylo zjištěno pomocí počítačového numerického modelu simulujícího výkon soustavy generátorů. Další zdroj [78] modeluje teoretické limity termoelektrických generátorů generujících elektřinu z odpadních výfukových plynů a definuje obecné vztahy pro výpočet optimálního počtu generátorů pro jakýkoli systém. Studii [79] využívá tzv. Taguchi metody, kdy porovnává 6 faktorů ovlivňujících efektivitu termoelektrického generátoru, z nichž největší vliv na výkon a účinnost má teplota teplejší strany generátoru, přičemž následně je navržena optimalizace založená na Taguchi metodě a výkonové křivce. Další studie [80] využívá Taguchi metodu na sérii 27 experimentů s cílem porovnat

faktory ovlivňující množství vyrobené elektřiny. Sledovanými faktory v tomto případě byly: rychlost toku vody, tlak vody a materiál desek přenášejících teplo. Použité generátory pracovaly při nízkých teplotách (24 až 50 °C), proto je jejich použití vhodné například i pro nízkopotenciální systémy odpadního tepla. S použitím tzv. analýzy rozptylu bylo zjištěno, že nejzásadnějším faktorem ovlivňujícím efektivitu celého generátoru se ukázal být materiál desek. Materiál ovlivňoval výsledný výkon a účinnost z 89 %, přičemž ostatní faktory neměly téměř žádný vliv – pod 5 %.

2.2.4 Supervizní řízení a Průmysl 4.0

V dnešní době postupuje zvyšování energetické efektivity díky informačním technologiím až na úroveň celého závodu. Supervizním řízením je myšlena schopnost analyzovat provozní data a využívat je pro efektivnější řízení provozu, nastavení provozních režimů a plánování provozu.

Pro úspěšnou realizaci projektů v této oblasti je nutno se zaměřit na čtyři nejdůležitější oblasti [81]:

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

Díky empirickým analýzám v průmyslu bylo potvrzeno, že čím vyšší je úroveň informačních technologií ve firmách, tím vyšší je i samotná výrobní produkce, finanční výkonnost a spokojenost zákazníků [82].

Jádro zvyšování účinnosti leží právě v oblasti technik uvedených pod bodem 3. Ty lze používat na různých úrovních. Studie [83] zavádí dělení do čtyřech hlavních úrovní: metody pro jednotlivé procesy, metody spojující více strojů a procesní řetězce, metody pro celé výrobní závody, metody Průmyslu 4.0.

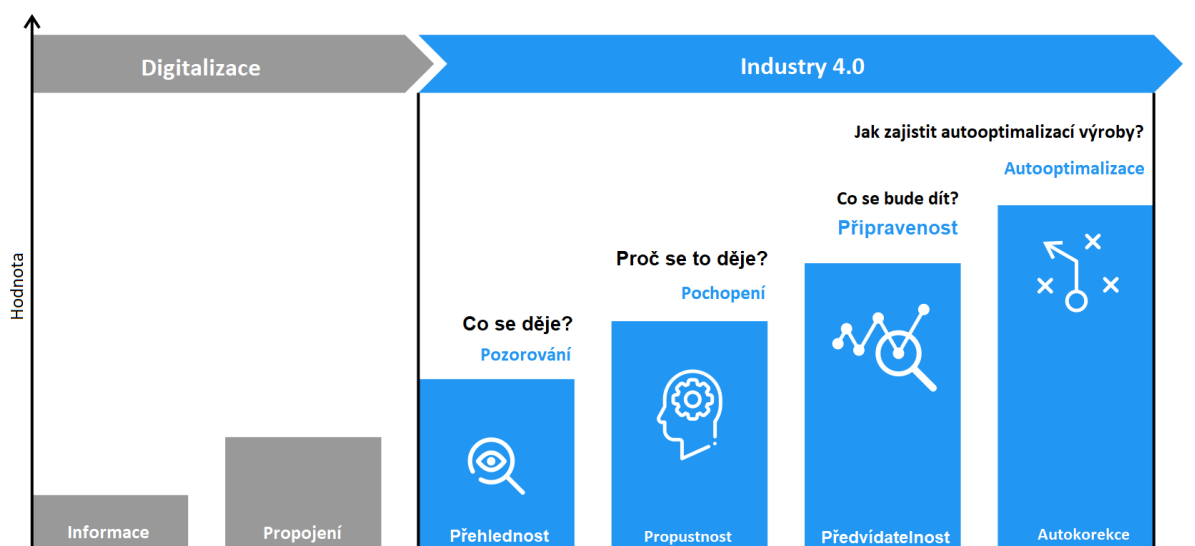
Modelování je základním kamenem, jelikož modely používají jak simulace, tak optimalizace. Studie [84] představuje model provozu založený na zjednodušeném mapování toku energie. Cílem je snížit spotřebu energie, nikoli jen s využitím nových technologií, ale také s přihlédnutím k lidskému faktoru, který je zahrnut v následujících doporučeních: vytvoření manažerských postupů, vedení a sdílení zkušeností mezi odborníky v rámci podniku, vytvoření kolektivní odbornosti pro pracovní skupiny. Tím se podporuje celková energetická účinnost podniku místo pouhé instalace konkrétních energeticky účinnějších technologií.

Pokročilejší využití modelů uvádí například studie [85], která představuje aplikaci modelu využívajícího knihovnu pro fyzikální modelování procesů Modelica k optimálnímu řízení elektrárenského provozu.

Studie [86] si dala za cíl vyvinout model spotřeb elektrické energie procesních nástrojů, chladičů vody a suchého čištění vzduchu v továrně na výrobu polovodičů. Výstupy z modelu se v průměru lišily pouze o 0,73 % od změřených hodnot, což ověřilo přesnost modelu. Při optimalizaci s využitím modelu se podařilo snížit spotřebu energie například u chladiče o 43,7 % a to pouze pomocí změn ve výkonu. Celkově se podařilo snížit energetickou spotřebu továrny o 10 %.

Studie z roku 2018 [87] navrhuje sloučit energetické simulace budov a simulace tepelných toků ze strojních operací. Měření tepelných toků umožňuje redukovat nadměrné dimenzování různých zařízení. Pokud se totiž pozornost nezaměřuje pouze na zvýšení energetické účinnosti jednoho stroje, ale i tovární budovy jako celku, lze dosáhnout toho, že zvýšení energetické účinnosti v infrastruktuře továrny představuje až 35 % možných energetických úspor.

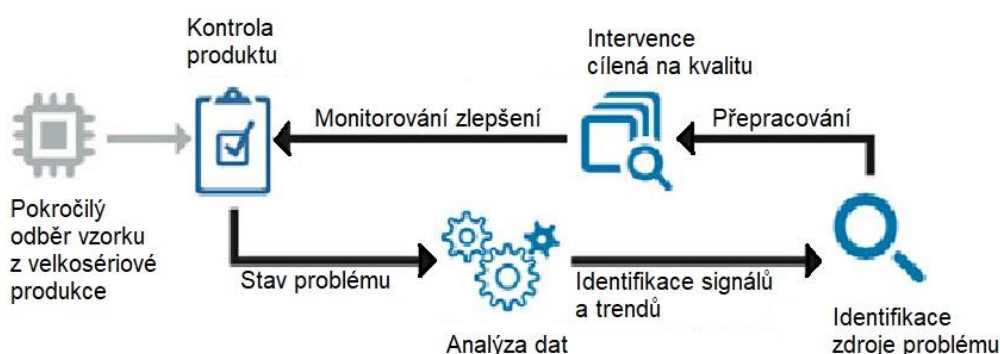
V současnosti se stále častěji skloňuje pojem Průmysl 4.0, který souvisí zejména s nástupem digitalizace. Pod tímto pojmem se skrývá: „Automatizace a výměna dat ve výrobních technologiích zahrnujících kybernetické systémy, Internet věcí, cloudové ukládání, kognitivní učení a vytváření inteligentních továren.“ [88] Jakým způsobem Průmysl 4.0 navazuje na předchozí digitální technologie lze vidět na obrázku 11 [89], kde jsou znázorněny i jeho principy. Vládní instituce České republiky si jsou vědomy potřeby integrace Průmyslu 4.0 do průmyslové základny i ekonomiky celoplošně. Proto vydaly v roce 2019 dokument „Iniciativa Průmysl 4.0“. V této iniciativě je zahrnuto strojní inženýrství, protože: „Cílem Průmyslu 4.0 je přinést úplné digitální propojení všech úrovní tvorby přidané hodnoty.“ [90]



Obrázek 11: Zaměření Průmyslu 4.0 [89]

Průmysl 4.0 by měl pomoci s komplikovaností výrobních systémů, protože dělí problematiku energetických úspor do jednotlivých úrovní, tj. úroveň stroje, procesu a továrny [91]. U všech úrovní bude potřeba instalace kvalitních monitorovacích a kontrolních systémů, které dokážou reagovat v reálném čase dle požadavků Průmyslu 4.0. Reakce v reálném čase zahrnuje možnost automatické kontroly, analýzy a optimalizace, jak je znázorněno na obrázku 12 [92]. Úroveň stroje je řešena z hlediska materiálů a optimalizace parametrů při výkonu práce. Dále je potřeba procesní úroveň, která otevírá možnost optimalizace na základě vzájemného ovlivňování jednotlivých strojů. Ani jejich interakce však nedokáže plně pojmout všechny jevy související s energetickou účinností. Proto je potřeba pozornosti i na úrovni továrny, kde je nutné zahrnout interakce různých výrobních systémů s technickými zařízeními budov, zvážení managementových zlepšení, či zefektivnění zdrojů energie a jejich infrastruktury. Propojení všech těchto úrovní by mělo být možné právě s použitím softwarových nástrojů disponujících potřebnými funkcemi.

Monitorování v reálném čase s použitím analýzy dat



Obrázek 12: Monitorování v reálném čase

V současné době existuje 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 z univerzity ve Freiburgu se však domnívají, že tyto současné systémy nemohou být nápomocny v rozvoji Průmyslu 4.0 [93], 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).

Dle jejich názoru je potřeba zajistit následující:

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 je tento nový přístup založen na informačním zpracování dat senzorů, starší stroje, které tyto senzory postrádají, nemohou být zapojeny do výpočtů. Tento problém je však možné vyřešit například pomocí zařízení „Embedded Smart Box“, který využívá externích senzorů ke sběru dat ze stroje, a následnému výpočtu účinnosti zařízení a spotřeby energie [94].

Do Průmyslu 4.0 lze zařadit i oblast pokročilých programů jako jsou například sémantické informační modely, které lze využít ke spojování dat podniku do logických systémů [95] a v současné době jsou základní strukturální vrstvou pro vývoj programů, které budou moci stahovat a zpracovávat data pro výpočty a analýzy. Nejnovějším

vývojovým stádiem jazyků těchto informačních systémů je tzv. „Web Ontology Language“, který umožňuje přidávat jednak nová schémata a moduly, ale i geometrické prvky a procesní operace do modelů závodu. Díky těmto prvkům lze integrovat data z různých procesů a částí podniku.

Na téma Průmysl 4.0 se ve vědecké literatuře objevuje v současné době veliký počet studií. Zabývají se nejen již zmíněnými celopodnikovými managementovými opatřeními, ale i různými oblastmi jednotlivých průmyslových procesů. Všechny z nich řeší otázku zvýšení energetické efektivity využitím nových programů, jež jsou schopny zpracovávat ze senzorů data v reálném čase. Následuje tedy stručná ukázka využití přístupů Průmyslu 4.0.

Do oblasti zdrojů tepla a elektrické energie zasahují například studie [23], [96] zabývající se parními kotli. Obě navrhují implementaci sensorového vybavení do kotlů a vytvoření řídicího systému se sběrem dat, který následně upravuje nastavení procesních veličin kotle.

V oblasti spotřebičů energie existují studie zabývající se například obráběcími stroji. Průzkumy [97], [98] dokládají, že účinnost obráběcích dílen je pouze okolo 30 %, přičemž je ale přítomen nedostatek metod, které by tento problém v současnosti řešily. Jedna ze studií [99] zabývající se touto problematikou aplikovala technologii tzv. Internetu věcí, který propojuje senzory a další elektronická zařízení a umožňuje výměnu dat mezi nimi. Díky tomuto propojení lze monitorovat celé obráběcí dílny a zapínat jednotlivé stroje podle práce ostatních tak, aby bylo dosaženo nejvyšší efektivity. V další ze studií [100] byla využita metoda tzv. strojového učení. Tento přístup byl použit k predikci opotřebení a nepřesné práce řezného nástroje, čímž se ušetřily prostředky na údržbu a opravy.

Pokročilým krokem v rámci průmyslu 4.0 se jeví přístup tzv. „smart factories“ (chytrých továren), kde je navrhována například integrace více výrobních podniků [101]. V souvislosti s tím je potřeba učinit potřebný výzkum [102]:

1. Deep learning, data mining a další počítačové metody mohou být velmi užitečné. Jejich spojení s energetickou účinností není zatím dostatečně rozvíjeno.
2. Výkonné výpočetní systémy a sdílená data jsou zatím v počátečním stadiu vývoje, protože spotřebovávají významné množství energie a jsou obtížně začlenitelné do výrobních systémů.
3. U aditivní výroby neboli 3D tisku je třeba zavést možnost monitorování v reálném čase a vhodné způsoby kontroly výrobků.
4. Obnovitelné zdroje energie, které sice využívány jsou, ale jen v malé míře kvůli vyšším investicím.
5. Ukládání elektrické energie je spojené s nutností výroby baterií s vyšší kapacitou a lepších systémů chlazení.

Autory je odhadováno, že při vývoji moderních technologií bude kladen velký důraz na udržitelnost, což podporují výše zmíněné obnovitelné zdroje energie nebo recyklace materiálů a další [102].

Obecně se dříve v této oblasti používal termín „smart grid“ (chytrá síť), který byl aplikován především v energetice. Nově se však tento koncept rozšířil do dopravy, stavebnictví a v neposlední řadě i strojního inženýrství. Toto rozšíření popisuje termín „smart energy“ (chytrá energie). V roce 2015 byl v Dánsku proveden pokus odhadnout

možnosti integrace průmyslového sektoru do „smart energy system“ – [103]. 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. V současnosti však bohužel nelze tento fenomén vidět v praxi – jedná se prozatím pouze o teoretickou koncepci.

V této části bakalářské práce byly prezentovány výsledky literární rešerše příruček pro energetické specialisty a vědeckých publikací. Je zřejmé, že mezi praxí a výzkumem je velmi výrazný rozdíl. Detailní rozvaha k tomuto je sepsána v kapitole Diskuse.

3. Energetický audit

V této části bakalářské práce je rozebrán energetický audit, který reprezentuje současnou praxi při hledání opatření zvyšujících energetickou efektivitu. Kapitola byla zpracována za účelem zjištění podobností a rozdílů mezi již používanými a navrhovanými přístupy zvyšování energetické účinnosti v průmyslu.

3.1 Definice energetického auditu

Energetický audit je dokument, který je zpracovaný energetickým specialistou, mající za cíl vyhodnotit aktuální spotřebu a užívání energií v určitém podniku a následně navrhnout možnosti energetických úspor. Energetický audit je zaveden zákonem č. 406/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů [104].

Na zákon č. 406/2000 Sb. je odkazováno i v příručkách/průvodcích pro energetické specialisty. Zdůrazňuje nutnost podrobné znalosti těch paragrafů, které přímo souvisejí se odborností konkrétního specialisty, přičemž je odkazováno i na normy a technicko-normalizační informace týkající se energetických auditů [11]. 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.*“ [105]

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.*“ [106]

Zákon č.406/2000 Sb. dále upřesňuje náležitosti jako [107]:

1. Pro koho je energetický audit povinný.⁵
2. Kdo může být pověřen zpracováním auditu – pouze energetický specialista disponující osvědčením Ministerstva průmyslu a obchodu, a který je zapsán v Seznamu energetických specialistů.

⁵ Jsou vyjmenovány přesné hodnoty, kdy je audit povinný, přičemž se nevztahují na podnikatele, jehož energetické hospodářství spotřebuje méně než 200MW ročně.

3. Jednotlivé požadavky na přístroje – především jejich minimální energetickou účinnost.
4. Označování energetickými štítky – pro elektrospotřebiče.

Energetické audity nejsou pouze povinností, ale reálnou možností snížení energetické náročnosti (spotřeby energie) podniku a snížení provozních nákladů, protože identifikují toky energií a navrhnou jejich zefektivnění [12]. Dále zpracovávají i energetické bilance, kde se porovnává spotřeba s reálnými náklady u konkrétních spotřebičů. Samotné zpracování záleží na konkrétním průmyslovém odvětví a požadavcích auditu.

3.2 Rozbor energetického auditu

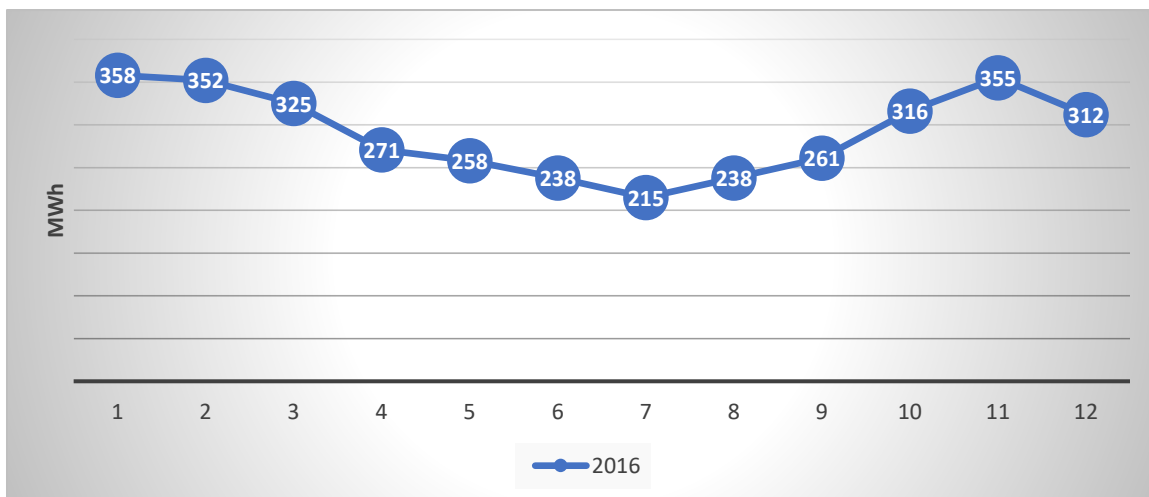
Pro potřeby identifikace jednotlivých částí energetického auditu, i pro posouzení přístupů návrhů ke zvýšení účinnosti energie, byl vybrán audit zpracovávající informace o blíže nespecifikovaném výrobním podniku firmou CEVRE Consultants, s.r.o. pro Ústav procesního inženýrství, FSI VUT v Brně [108].

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

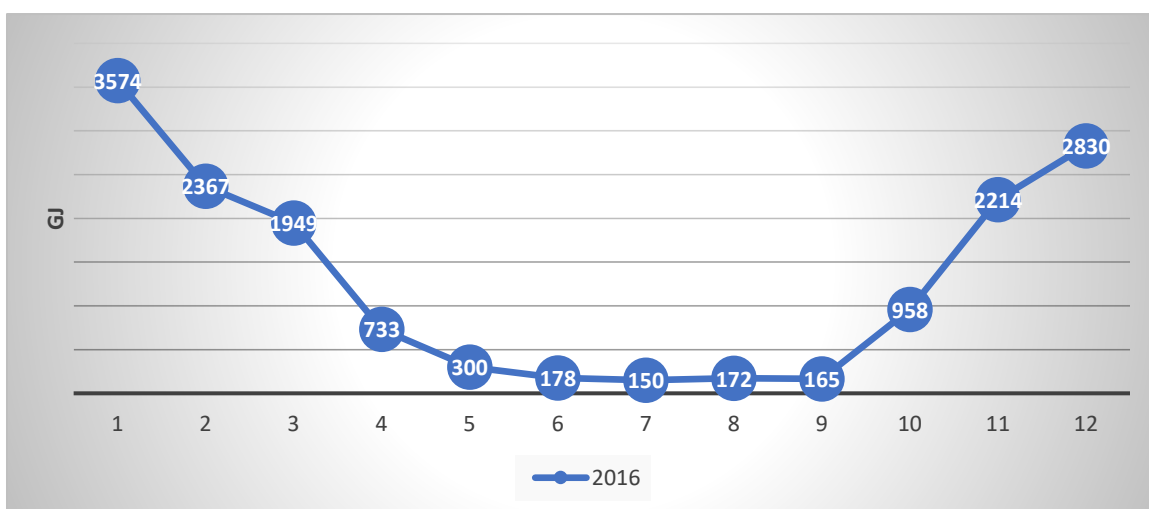
1. Úvod
2. Základní údaje o předmětu studie
3. Návrhy opatření
4. Porovnávání opatření a jejich kombinací
5. Závěr a doporučení

V Úvodní části jsou vypsány: *Cíle 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 a zároveň související technické normy a související legislativa v platném znění.

V části „Základní údaje o předmětu studie“ je přítomen půdorys areálu s hlavními rozměry budov a jejich funkcemi. Následují energetické vstupy. Odběr elektrické energie je znázorněn na obrázku 14 [108], kde jsou na horizontální časové ose vyznačeny měsíce roku 2016 a na vertikální ose spotřeba elektrické energie v MWh. Odběr tepelné energie je znázorněn na obrázku 15 [108], kde jsou, podobně jako u elektrické energie, na horizontální časové ose znázorněny měsíce roku 2016 a na vertikální ose spotřeba tepelné energie v GJ. Dále jsou zmíněny i energetické vstupy zemního plynu a pitné vody. V následující kapitole „Energetické bilance“ jsou všechny tyto vstupy porovnány dle finančních nákladů a energetických jednotek. V textu jsou 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. Následuje hrubé vyčíslení potenciálu úspory tepla a identifikace významných spotřebičů z hlediska spotřeby elektrické energie. Poslední odstavec informuje o jednosměnném provozu podniku v určitém časovém horizontu pracovního dne.



Obrázek 13: Spotřeba elektřiny v hodnoceném roce



Obrázek 14: Spotřeba tepla v hodnoceném roce

Následuje část „Návrhy opatření“, která je členěna do třech skupin:

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 doporučena nízkonákladová opatření (návratnost zpravidla v řádu měsíců).
2. Přehled vysokonákladových opatření a technicky složitějších zařízení.
3. Přehled kombinací opatření, které jsou uvedeny kvůli podmínkám pro dotace. Z hlediska energetických úspor nepřinášejí přidanou hodnotu, protože pracují s již existujícími opatřeními.

Kapitole o navrhovaných opatření bude v textu dále podrobně věnována větší pozornost.

V „Závěru“ bakalářské práce je projektováno nejschůdnější opatření pro uživatele průmyslového podniku, které informuje o případných úsporách a možných investičních dotacích.

Přehled navrhovaných opatření:

1. Renovace střešních světlíků výměnou zasklení za kvalitní polykarbonát.
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 střechu hal.
5. Využití odpadního tepla z kompresoru stlačeného vzduchu.
6. Snížení energetické náročnosti procesu řezání výměnou laseru L 3030 za nový typ „Fiber“.
7. Fotovoltaická elektrárna pro vlastní spotřebu podniku – 100kWp.

Každé z navrhovaných opatření je strukturováno do kapitol: *Energetická bilance a Emisní bilance CO₂, Připravenost, Technická kritéria, Regionální hledisko, Ekonomická kritéria, Celkové hodnocení, Kritéria přijatelnosti, Ekonomické hodnocení a Okrajové podmínky výpočtu*. V závěru jsou vypsány podmínky pro možnost zpřesnění výpočtů, pokud by bylo rozhodnuto o realizaci navrhovaného opatření. Procentuální vyjádření snížení spotřeby energie bylo vypočítáno autorem bakalářské práce z dat kapitoly *Energetické bilance*, reálná návratnost je uvedena v *Ekonomickém hodnocení*.

Popis navrhovaných opatření:

1. Renovace střešních světlíků výměnou zasklení za kvalitní polykarbonát.

Se záměrem snížení spotřeby energie budov je renovace střešních světlíků klasickým zástupcem snižování tepelných ztrát. Navržená výměna stávajícího drátoskla za vícekomorový polykarbonát má snížit prostup tepla, a tedy snížit spotřebu energie o 25 %. Reálná návratnost činí 12 let. Tento typ opatření zmiňují i příručky pro energetické specialisty, jak se lze dočíst v kapitole 2.1.

2. Snížení energetické náročnosti odsávání z tryskače pro ruční tryskání.

Druhé opatření se týká zvyšování účinnosti výrobních a technologických procesů. Je navrhováno doplnění frekvenčního měniče k motoru odtahového ventilátoru a čidla. Cílem je snížit příkon motoru v době manipulačního prostoje, čímž se zamezí rázům, které by vznikaly při úplném vypnutí. Spotřeba energie by se měla snížit o 14 % s reálnou návratností 15 let. Aplikace frekvenčních měničů je navrhována i v příručkách pro energetické specialisty, jak je zmíněno v kapitole 2.2.1.

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

Protože jsou výrobní haly osvětleny výbojkovými zdroji, je navrhována technologie LED, která má za cíl snížit instalovaný příkon o 34 % s reálnou návratností 9 let. Instalace energeticky efektivnějších osvětlení je zmíněno i v příručkách pro energetické specialisty (viz kapitola 2.1).

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

Opatření je po technické stránce obdobné jako předchozí. Rozdíl však tkví v rozšíření použití LED diod na další místa, což sníží instalovaný příkon o celkových 40 % a zvýší reálnou návratnost na 14 let.

4. Snížení energetické náročnosti vytápění doplněním destratifikátorů pod střechu hal.

Jedná se o další druh opatření snižující spotřebu budov zavedením destratifikátorů do podstřešního prostoru, čímž dojde k úspoře tepla (snížení spotřeby energie) o 12 % s reálnou návratností 9 let. Destratifikátor je stroj sloužící k cirkulaci velkého množství vzduchu o malé rychlosti proudění. V horních vrstvách objektu se kumuluje teplejší vzduch, proto je odváděn do spodních částí.

5. Využití odpadního tepla z kompresoru stlačeného vzduchu.

Odpadní teplo z chladicího 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. Opatření využívající odpadní teplo ze zařízení se objevují i v příručkách pro energetické specialisty, zmíněných v kapitole 2.2.3.

6. Snížení energetické náročnosti procesu řezání výměnou laseru L 3030 za nový typ Fiber.

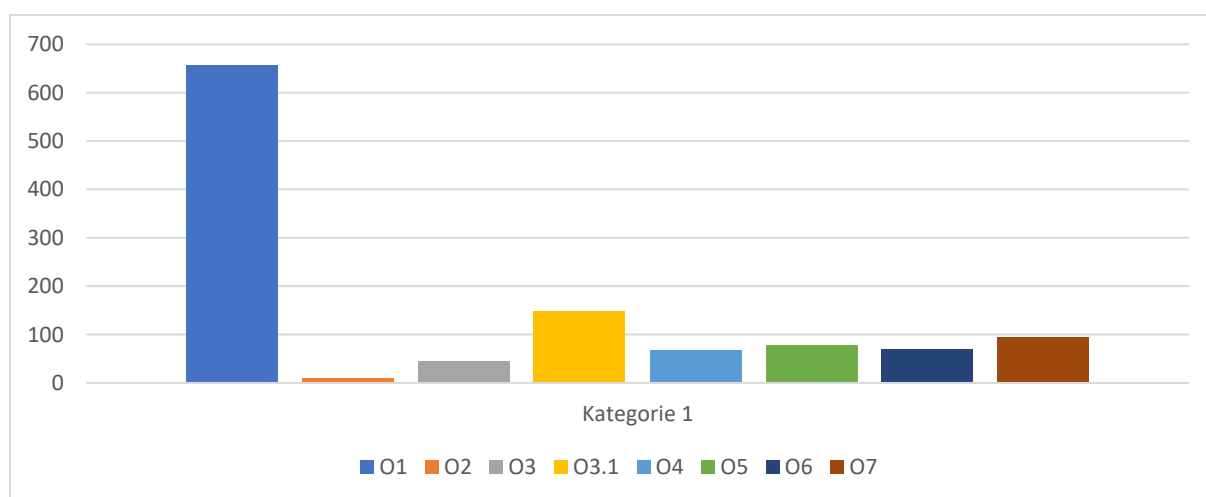
Stávající laser je založený na technologii CO₂ a bude nahrazen. Navrhovaná pevnolátková technologie disponuje účinnějším zdrojem paprsku. Tím dojde ke snížení příkonu, a tedy ke snížení roční spotřeby energie o 57 % s prostou návratností 51,6 let. Reálná návratnost je ještě vyšší.

7. Fotovoltaická elektrárna pro vlastní spotřebu podniku 100kWp.

Jako poslední opatření je navrhována instalace obnovitelného zdroje energie ve formě fotovoltaické elektrárny o výkonu 100 kWp⁶ ve sklonu cca 10°. Vyrobená elektrická energie slouží pro vlastní spotřebu. Doba reálné návratnosti je vyčíslena na 16 let. Instalace fotovoltaických elektráren je zmíněna i v příručkách pro energetické specialisty, jak je zmíněno v kapitole 2.2.1.

Při porovnání opatření vychází nejvýhodněji:

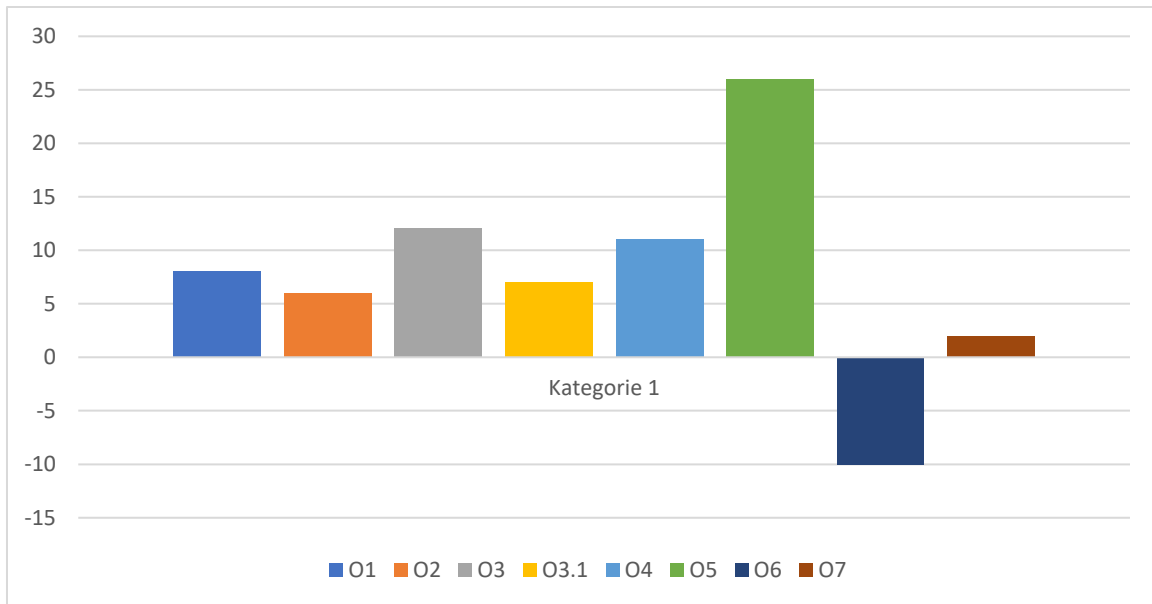
1. Podle úspor energie: renovace střešních světlíků s úsporou 655,5 MWh/rok dle obrázku 15.



Obrázek 15: Porovnání opatření z hlediska úspor energie

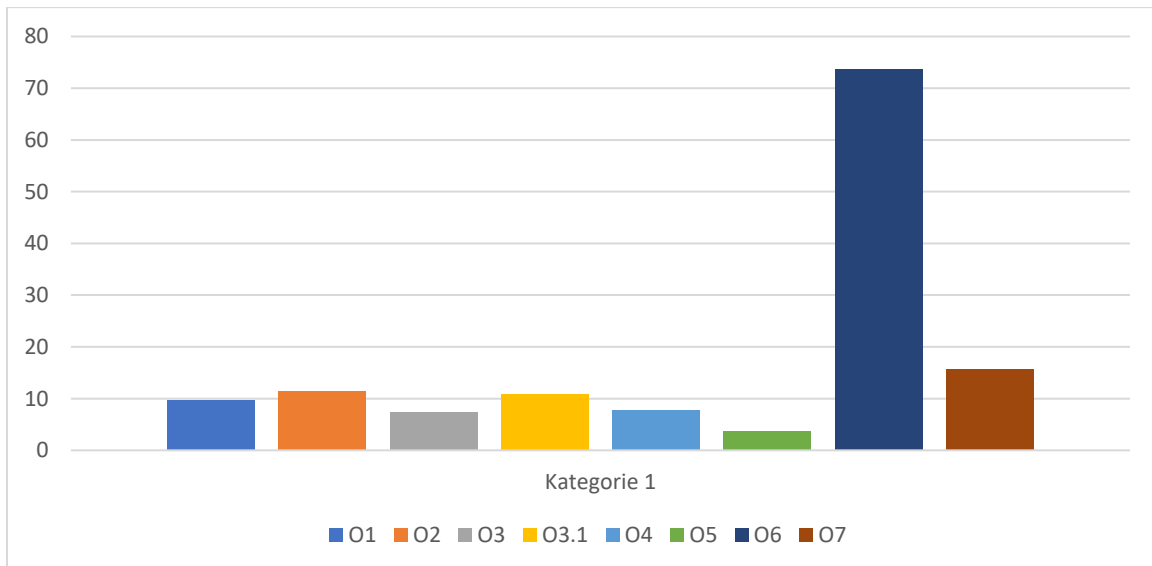
⁶ kWp = kilowatt-peak, tedy „jednotka špičkového výkonu“ fotovoltaické elektrárny, což znamená nejvyšší možný výkon při ideálním umístění za plného slunce

2. Podle vnitřního výnosového procenta: využití odpadního tepla z kompresoru dle obrázku 16.



Obrázek 16: Porovnání opatření z hlediska vnitřního výnosového procenta

3. Podle prosté doby návratnosti: samotné doplnění destratifikátorů s prostou dobou návratnosti 3,8 roku dle obrázku 17.



Obrázek 17: Porovnání opatření z hlediska prosté doby návratnosti

4. Podle investičních nákladů vychází nejlevněji též doplnění destratifikátorů.

3.3 Zaměření energetických auditů

Během uplynulých dvaceti let je možné sledovat posun v zaměření energetických auditů. Tyto změny jsou patrné i v příručkách pro energetické specialisty. Například v příručce z roku 1999 [9] od tehdejší České energetické agentury⁷ se lze dočíst o instalaci solárních systémů pouze v souvislosti s vytápěním, nikoli však s výrobou elektrické energie jako je tomu dnes. Využití a aplikování obnovitelných zdrojů energie bylo totiž tehdy teprve ve fázi vývoje [10]. V současnosti lze vidět nové trendy nejenom v aplikaci nových technologií, ale i například v zapojování manažerů a pracovníků do vyhodnocování energetických auditů, což jim dává větší možnosti v získávání informací o procesech, či rovnou nalézání například nízkonákladových řešení [13].

Lze konstatovat, že audity se v současné době zaměřují na snížení úniků energií budov a v oblasti výrobních procesů je u nich preferována výměna jednotlivých strojů [13]. Dále se sleduje tok tepelné energie a možnosti snižování jeho úniku. Z hlediska konkrétních zařízení jsou instalovány nové technologie v odvětvích jako: elektrické motory, svítidla, parní systémy, čerpadla, tlakovzdušné systémy, ventilátory a další. V nízkonákladovém sektoru se pozornost zaměřuje na odstraňování plýtvání nebo plánování výroby. A to tak, aby nevznikala vysoká spotřeba energie při práci stroje v neúčinné části křivky výkonu [12].

Na druhé straně však energetické audity téměř nezahrnují zvyšování efektivity stávajících výrobních systémů. Přestože v představeném energetickém auditu bylo navrženo doplnění frekvenčního měniče k motoru ventilátoru, dle studie [39] je míra implementace takovýchto opatření u elektromotorů nízká. Hledisko zefektivňování stávajících zařízení navíc není v příručkách pro energetické specialisty vůbec zmíněno například u obráběcích strojů, či průmyslových robotů. Stávající zařízení, která jsou zefektivňována, jsou často pouze součástí technického zařízení budov, jako například HVAC systémy.

Dále lze pozorovat absenci pokročilejších softwarových opatření z oblasti supervizního řízení, využití analýz provozních dat apod.

⁷ Česká energetická agentury byla zrušena a převedena pod Ministerstvo průmyslu a obchodu a Státní energetickou inspekci

4. Diskuse

V této části práce jsou zhodnoceny dosavadní poznatky z kapitol 2 a 3 a pozornost je věnována také rozvaze nad možnostmi rychlejšího zavedení poznatků z oblasti výzkumu do praxe.

4.1 Souhrn řešerše

Informace o v praxi užívaných opatření pro zvýšení energetické účinnosti byly čerpány zejména z příruček pro energetické specialisty a jednoho energetického auditu nejmenované společnosti. Informace o aktuálním zaměření výzkumu byly čerpány zejména z vědeckých časopisů.

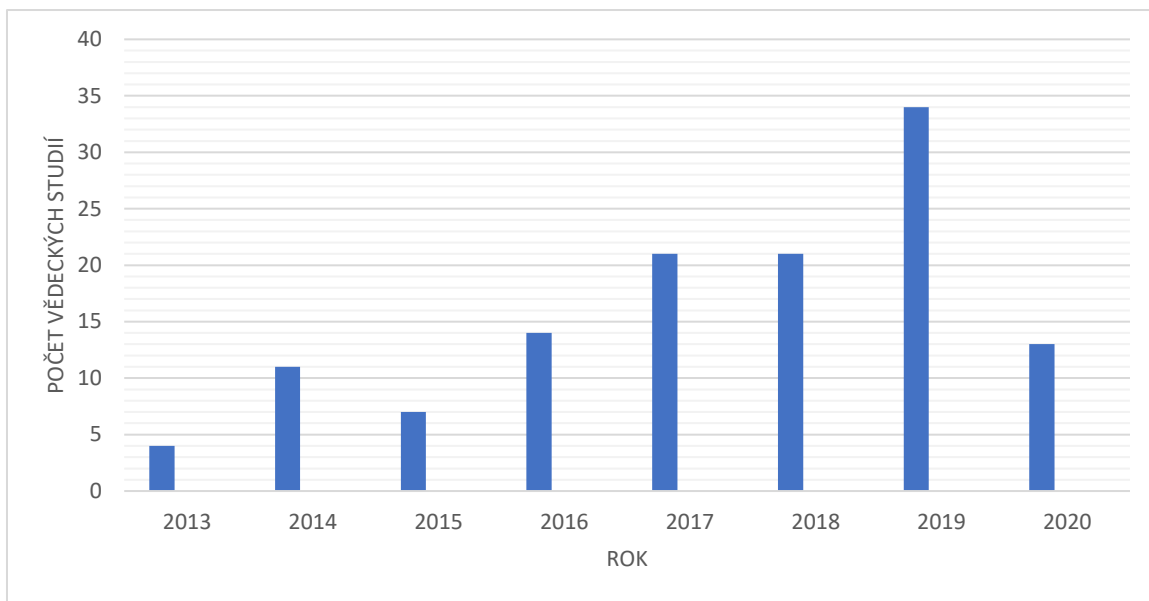
Na základě rozboru energetického auditu se lze domnívat, že energetičtí specialisté čerpají informace z příruček pro energetické specialisty, což je ověřeno na základě srovnání opatření použitých v kapitole 3.2. a těch z příruček pro energetické specialisty. V příručkách pro energetické specialisty se v současné době používají opatření z oblasti stavebních částí budov a jejich technického zařízení. Taktéž i v energetickém auditu většina opatření s tímto souvisela. V této oblasti energetické auditu vynikají, protože jsou tato opatření vhodně a efektivně navržena i s přesnými výpočty návratnosti a výpočty zvýšení efektivity.

V oblasti průmyslových procesů pak zkoumaný energetický audit navrhl výměnu starší technologie za novější, doplnění frekvenčního měniče k elektromotoru, či využití odpadního tepla v otopném systému. V příručkách pro energetické specialisty, jsou ještě v této oblasti obsaženy metody integrace procesů z hlediska toků energie. V auditu toto chybí, nicméně nelze z toho vyvozovat závěr, jelikož chybí informace potenciálu pro integraci.

V příručkách se neobjevují možná opatření v rámci zvyšování efektivity samotných zařízení, či celých průmyslových procesů díky lepšímu řízení, či analýze provozních dat [12], [109]. Jediný záznam byl nalezen v příručce Evropské unie z roku 2016 [110], kde lze nalézt krátký odstavec o automatizaci. Jsou zde vyjmenovány různé nové přístupy ke zvyšování energetické účinnosti v průmyslu jako: kontrola procesů, monitorování pomocí senzorů, fuzzy logické systémy a statistické analýzy. Žádnou z těchto oblastí však dále nerozvíjí, nespecifikuje ani neposkytuje možné konkrétní metodické přístupy. Také v energetickém auditu není oblast supervizního řízení zmíněna.

Pro potřeby této práce bylo kromě energetického auditu a příruček pro energetické specialisty zpracováno i 92 studií z vědecké literatury. Na obrázku 18 lze vidět trend růstu počtu publikací na téma energetická účinnost. Materiály pro tuto práci byly vybírány v průběhu roku 2020, proto je počet publikací pro tento rok mimo trend.

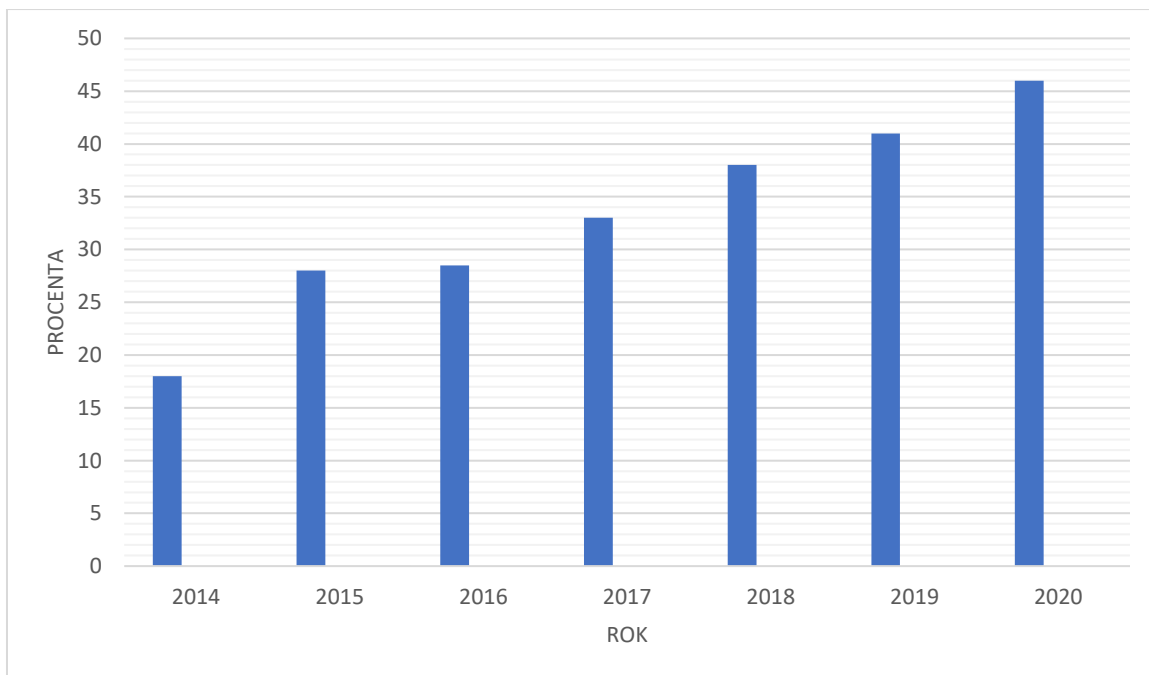
Ve vědeckých studiích lze vidět různé přístupy při řešení problémů zvyšování efektivity procesů. Ať už je to využíváním například nových materiálů [40], využití modelů provozu strojů a zařízení [49], monitorování výrobních jednotek [42] nebo integrace procesů [87] a [102].



Obrázek 18: Početní zastoupení studií dle roků

Většinou se jedná o progresivní řešení, která nejsou v praxi běžně využívána. Mezi vědeckými studiemi lze také najít takové, které se zabývají zvyšováním energetické efektivity v oblastech, které příručky pro energetické specialisty vůbec nezmiňují. Zejména se jedná o specifické oblasti vyžadující určitou specializaci, např. průmyslové roboty. Některé studie navíc počítají s komplexnějším chápáním spotřeby energie v rámci celé továrny [91] a [93].

Mezi všemi progresivními řešeními lze sledovat trend používání softwarových nástrojů v čím dál větší míře, jak je doloženo na jejich zvyšujícím se procentuálním zastoupení na obrázku 19.



Obrázek 19: Procentuální zastoupení studií využívajících softwarové nástroje

Problémy aplikace opatření využívajících softwarové nástroje tkví například v nutnosti vybudování datové infrastruktury [88] [101], prozatímní absenci dat z měření [102], [111], nutnost kvalifikovaných pracovníků a vysoké investiční náklady s obtížně vypočitatelnými úsporami [112].

Dále si lze povšimnout, že většina studií se zaměřuje na vyřešení velmi konkrétních případů, což může znesnadnit jejich aplikaci i v podmínkách mírně odlišných. Některé navíc buďto neobsahují vůbec žádnou nebo obsahují jednu případovou studii, často úzce zaměřenou [57], [40] a [53].

4.2 Zhodnocení

Na základě poznatků uvedených v této práci lze pozorovat rozdílná zaměření mezi přístupy navrhovanými vědeckou komunitou na jedné straně a energetickými audity a příručkami pro energetické specialisty na straně druhé. Hlavní důvody se zdají být tyto: nejistota uspokojivé finanční návratnosti [84], [113], [88], absence dostatečné informovanosti [5], [84], [113] a neprověřenost metod [57], [26], [6]. S tímto souhlasí i studie zpracovávající 280 energetických auditů, dle které velké množství opatření zůstává z finančních důvodů, nedostatku informací a z důvodu omezených interních dovedností neimplementováno [114].

Z hlediska uspokojivé finanční návratnosti lze pozorovat, že například v energetických auditech je ve výrobní oblasti aplikována výměna starších technologií za novější právě díky možnosti snadně vypočítat úspory, a tedy i ekonomickou rentabilitu. Tato situace však neplatí u progresivních přístupů vědecké literatury, které využívají počítačové modely a simulace (viz studie [87] a [94]). V tomto případě jde téměř vždy o činnost výzkumně-vývojového charakteru s nejistým výsledkem a náročností s vlivem mnoha faktorů (dostupnost dat, kvalita dat apod.). Je tedy problém stanovit předem výhodnost opatření, jelikož je obtížné dopředu odhadnout přínos (finanční úspora) a náročnost řešení (investiční náklady).

Hledisko absence dostatečné informovanosti se však jeví jako komplexnější problém. Jedním z důvodů, proč nedochází k implementaci modernějších optimalizačních přístupů v energetických auditech, může být například fakt, že ani výše zmíněné příručky pro energetické specialisty neinformují o možnostech těchto přístupů. A to i přesto, že jsou tyto již delší dobu diskutovány ve vědecké komunitě. Energetičtí specialisté tudíž přichází o přímé možnosti informovat se o těchto opatřeních.

S neprověřeností studií pak může souviset nízký počet případových studií a ověřování na skutečných datech. Jelikož v praxi existuje: „*Nedůvěra provozovatelů v nepodložená řešení*“ [6], nemají energetické příručky ani energetičtí specialisté následně motivaci tyto přístupy implementovat.

Kromě těchto tří hlavních důvodů je možné najít ještě další. V kapitole 4.1 bylo například zmíněno, že jsou vědecké studie často konkrétně zaměřené. Jejich univerzální aplikovatelnost je proto přinejmenším diskutabilní. Příručky pro energetické specialisty nemohou navrhovat metodologie zabývající se konkrétním typem podniku, či procesem, protože potřebují univerzální přístupy aplikovatelné na celé oblasti průmyslu. Progresivní metody navíc ve stále větší míře používají softwarové nástroje, které však ke své aplikaci vyžadují vysoké investiční náklady, spojené s vybudováním datové infrastruktury, jak je zmíněno v kapitole 4.1, což ještě více snižuje motivaci tyto přístupy implementovat do příruček pro energetické specialisty.

4.3 Výstupy

Ve vědeckou komunitou navrhovaných metodách lze spatřit potenciál do budoucna, protože současné přístupy budou již vyčerpány a tyto metody budou skýtat možnosti jak dále zvyšovat energetickou efektivitu průmyslových podniků [6]. Pokud však nedojde k výrazným změnám v přístupu jak praktiků, tak výzkumníků, pravděpodobně nelze očekávat implementaci těchto progresivních opatření do příruček pro energetické specialisty v brzké době.

Nové vědecké studie by se měly zabývat především praktickou aplikací svých opatření pro co nejuniverzálnější použití. Dále by měly obsahovat nejlépe několik případových studií, aby byla jejich metodika ověřena na větším množství reálných aplikací. Potom bude zvýšena šance, aby tyto studie byly použity ve větší míře nebo ještě lépe – byly uvedeny do příruček pro energetické specialisty.

Další možností je nalezení způsobu, jak předem odhadnout úspěšnost aplikace konkrétního opatření, u kterého je jinak obtížné vyhodnotit dopředu přínos. To se týká zejména softwarových opatření (supervizní řízení, optimální plánování s využitím modelů a simulací apod.). Tento odhad by mohl být například založen na zhodnocení jednotlivých zařízení ve sledovaném procesu z hlediska toku energie. U těch zařízení, identifikovaných jako nejvýznamnější, by se zhodnotila dostupnost dat a jejich použitelnost pro modelování a následnou optimalizaci nastavení nebo pro pokročilejší řízení. Na základě těchto a dalších faktorů by se dalo lépe odhadnout jaký přínos by opatření mělo a jak finančně náročné by bylo. Tyto odhady by bylo jistě možné dále upřesňovat pomocí empirických dat z narůstajícího počtu aplikovaných opatření.

U progresivních přístupů využívajících různé softwarové nástroje či monitorovací zařízení je také důležité snížit investiční náklady na hardwarové vybavení. Naštěstí se ceny hardwarového vybavení výpočetní techniky neustále snižují [115]. Až tedy poskytovatelé těchto technologií sníží investiční náklady na dostatečně nízkou úroveň, bude snadnější přesvědčit zákazníky k implementaci těchto nových opatření.

Nakonec by mělo tedy dojít buďto k vytvoření nové příručky pro energetické specialisty zaměřené na moderní přístupy nebo k aktualizaci příruček stávajících, které budou o těchto moderních opatřeních informovat, tudíž se zvýší šance, že budou aplikovány v energetických auditech, a tedy i v praxi. Je třeba poznamenat, že progresivní metody vyžadují vyšší úroveň specializace na dané téma. Nepředpokládá se tedy, že by toto měl na starosti auditor. Ale pokud by auditor identifikoval nějaké možnosti, postoupil by řešení specialistovi.

Státní instituce navíc mohou zrychlit přijímání progresivních opatření vytvořením legislativy, která by zvýhodnila podniky aplikující tato opatření například vytvořením dotačních programů.

5. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou zvyšování energetické účinnosti v průmyslu. V rešeršní části práce jsou představeny konkrétní metody doporučené příručkami pro energetické specialisty a možnosti, které navrhuje vědecká obec. Cílem práce bylo porovnat zaměření energetických auditorů se zaměřením vědeckých prací a zároveň zhodnotit možnosti širší aplikovatelnosti vědeckých prací.

Příručky pro energetické specialisty a energetické audity obsahují mnoho opatření, která mají svá opodstatnění a napomáhají zvyšování energetické účinnosti. Do budoucna však budou tato opatření vyčerpána. Už v současné době si vědecká obec uvědomuje tento problém, což dosvědčuje velké množství studií zabývajících se touto oblastí. Řeší problematiku do hloubky s cílem porozumět procesům tak, aby bylo možno optimalizovat energetickou účinnost na všech úrovních průmyslových procesů (stroje, procesy, továrny). Vědecké studie stále častěji využívají softwarové nástroje, díky nimž mohou dosahovat lepších výsledků na základě přesnějších výpočtů, analýzy dat a využití modelů pro optimalizaci a pokročilé řízení.

Je však zřejmé, že reálná aplikace opatření navrhovaných vědeckou komunitou nebude jednoduchá. Je tedy potřeba hledat cesty, díky nimž by měly progresivní studie možnost dostat se z teoretické roviny do praktické. Tomu by napomohly zejména tyto kroky:

- zacílení zkoumaných přístupů na jejich univerzální aplikovatelnost,
- ověření na více případových studiích,
- návrh metodiky pro vyčíslení očekávané výhodnosti opatření,
- snížení cen za datovou infrastrukturu.

Aplikování některých progresivních metod v praxi je nejspíš jen otázkou času. Čím intenzivněji se budou výše uvedené kroky naplňovat, tím dříve lze praktickou aplikaci progresivních metod očekávat.

6. Seznam použité literatury

- [1] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY, kterou se mění směrnice 2012/27/EU o energetické účinnosti. *EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EVROPSKÉ UNIE* [online]. 11. prosinec 2018 [vid. 2020-09-11]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2002&from=CS>
- [2] *Energy efficiency targets* [online]. 29. červenec 2020 [vid. 2020-09-11]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/targets-directive-and-rules/eu-targets-energy-efficiency_en#2030-targets
- [3] Final energy consumption. *Eurostat - Tables, Graphs and Maps Interface (TGM) graph* [online]. [vid. 2020-09-11]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&pcode=t2020_34&language=en&toolbox=data
- [4] Final energy consumption in industry. *Eurostat - Tables, Graphs and Maps Interface (TGM) table* [online]. [vid. 2020-09-11]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00124&language=en>
- [5] MALÝ, Vladimír. *ENERGETICKÝ AUDIT V PRŮMYSLU*. B.m., 2014. České vysoké učení technické v Praze.
- [6] MÁŠA, Vítězslav. *Komplexní přístup k řešení energetické efektivity objektů a procesů v průmyslové a komunální sféře*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2016
- [7] Final energy consumption by sector and fuel in Europe. *European Environment Agency* [online]. [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-10/assessment>
- [8] Národní akční plán energetické účinnosti ČR. *Ministerstvo životního prostředí*. 2017.
- [9] RAEN, Česká energetická agentura. Energetický audit komplexu s klasickým energetickým zdrojem. 2000, 60.
- [10] VUPEK-ECONOMY, spol. s r. o. *Výzkum a vývoj úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie*. 2000.
- [11] ŠUBRT, Roman. Energetický audit, energetický posudek. 2015, 124.
- [12] 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
- [13] 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>
- [14] *Co znamená TZB? - TZB-info* [online]. [vid. 2020-08-24]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/co-znamenata-tzb>

- [15] 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
- [16] 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
- [17] 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
- [18] YANG, Zheng, Ali GHARAMANI 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
- [19] KARIMIPANAH, Taghi, Roland FORSBERG, Yao LI a Liao XINYAN. *Energy Audit of HiG Examination Building*. 2014.
- [20] *Zákon o hospodaření energií - 406/2000 Sb.* [online]. 2015 [vid. 2020-08-29]. Dostupné z: http://files.odpady.webnode.cz/200005883-a5cf1a6c88/406_2000_Sb_1_7_2015.pdf
- [21] TRUXA, Jan, Jaroslav JAKUBES a Jiří BERANOVSKÝ. *STUDIE MOŽNOSTÍ ÚSPOR ENERGIE V ČESKÉM PRŮMYSLU ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA* [online]. 2008 [vid. 2020-08-24]. Dostupné z: www.hnutiduha.cz
- [22] 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
- [23] 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
- [24] MADEJSKI, Paweł a Piotr ŻYMEŁKA. Calculation methods of steam boiler operation factors under varying operating conditions with the use of computational thermodynamic modeling. *Energy* [online]. 2020, **197**, 117221. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2020.117221
- [25] PAWLITKO, David. *KOGENERACE*. 2013.
- [26] 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
- [27] 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
- [28] 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
- [29] 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
- [30] 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=38133
- [31] KAZEM, Hussein A., Miqdam T. CHAICHAN, Ali H.A. AL-WAELI a K. SOPIAN. *A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 10. prosinec 2020. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.123187
- [32] 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
- [33] *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>
- [34] Turn Motors Off When Not in Use Energy Tips. 2012.
- [35] 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
- [36] 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, s. 534–544. Dostupné z: doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.11010-0
- [37] 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>

- [38] 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
- [39] 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. 3352–3357. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2019.01.962
- [40] 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
- [41] COMMISSION, European. Reference document on best available techniques for energy efficiency [online]. 2009 [vid. 2020-09-03]. Dostupné z: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ENE_Adopted_02-2009.pdf
- [42] 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
- [43] SCOT FOSS, R. Optimizing the compressed air system. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering* [online]. 2005, **102**(1), 49–60 [vid. 2020-11-11]. ISSN 15460118. Dostupné z: doi:10.1080/01998590509509419
- [44] YANG, Ming. Air compressor efficiency in a Vietnamese enterprise. *Energy Policy* [online]. 2009, **37**(6), 2327–2337. ISSN 03014215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2009.02.019
- [45] BARRINGER, Frank Leonard, Keith A. WOODBURY a Brian MIDDLETON. Efficiency improvements for compressed air systems. In: *SAE Technical Papers* [online]. B.m.: SAE International, 2012 [vid. 2020-11-11]. ISSN 26883627. Dostupné z: doi:10.4271/2012-01-0327
- [46] 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
- [47] 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
- [48] 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
- [49] 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
- [50] 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
- [51] 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
- [52] 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
- [53] 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
- [54] Therblig. *Wikipedia* [online]. 1. duben 2020 [vid. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Therblig>
- [55] 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
- [56] *Proč investovat do manipulační techniky?* [online]. [vid. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/proc-se-vyplati-investovat-do-manipulacnich-robotu/>
- [57] 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
- [58] PARK, J. S. Motion profile planning of repetitive point-to-point control for maximum energy conversion efficiency under acceleration conditions. *Mechatronics* [online]. 1996, **6**(6), 649–663. ISSN 09574158. Dostupné z: doi:10.1016/0957-4158(96)00012-8
- [59] MEI, Yongguo, Yung Hsiang LU, Y. Charlie HU a C. S. George LEE. Energy-efficient motion planning for mobile robots. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. 2004, **2004**(5), 4344–4349. ISSN 10504729. Dostupné z: doi:10.1109/robot.2004.1302401
- [60] -, T Gundersen, Norway: International Energy AGENCY, SINTEF ENERGY a undefined 2000. A process integration primer—implementing agreement on process integration. nedatováno.

- [61] KLEMEŠ, Jiří Jaromír a Zdravko KRAVANJA. *Forty years of Heat Integration: Pinch Analysis (PA) and Mathematical Programming (MP)* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 2013 [vid. 2020-09-04]. ISSN 22113398. Dostupné z: doi:10.1016/j.coche.2013.10.003
- [62] *ITC - ISO 50001 - Energetický management* [online]. [vid. 2020-09-04]. Dostupné z: <http://www.itczlin.cz/cz/iso-50001-energeticky-management>
- [63] 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
- [64] 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
- [65] 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
- [66] DHOLE, Vikas R. a Bodo LINNHOFF. 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
- [67] WANG, Y. P. a R. SMITH. Wastewater minimisation. *Chemical Engineering Science* [online]. 1994, **49**(7), 981–1006. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/0009-2509(94)80006-5
- [68] EL-HALWAGI, M. M., F. GABRIEL a D. HARELL. Rigorous graphical targeting for resource conservation via material recycle/reuse networks. *Industrial and Engineering Chemistry Research* [online]. 2003, **42**(19), 4319–4328. ISSN 08885885. Dostupné z: doi:10.1021/ie030318a
- [69] *Revamps and turnarounds: Hydrogen optimisation at minimal investment* [online]. [vid. 2020-09-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/298684955_Revamps_and_turnarounds_Hydrogen_optimisation_at_minimal_investment
- [70] 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
- [71] 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
- [72] SHAHRUDDIN, Munawar Zaman, Ahmad Nafais RAHIMI, Muhammad Afiq

- ZUBIR, Muhammad Fakhru'l 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
- [73] 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
- [74] 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
- [75] WHITE, Martin T. a Abdulnaser 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
- [76] 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/>
- [77] 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
- [78] 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
- [79] 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
- [80] 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
- [81] 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
- [82] 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

- [83] 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
- [84] 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
- [85] 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
- [86] 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
- [87] 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
- [88] *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/>
- [89] Industry 4.0. *IBA Group a.s. CZ* [online]. [vid. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://ibacz.eu/trendy/industry-4-0/>
- [90] 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/>
- [91] 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
- [92] 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/>
- [93] 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
- [94] 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
- [95] 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
- [96] 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/ijeep.8188
- [97] 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
- [98] 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>
- [99] 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
- [100] PATANGE, A. D., R. JEGADEESHWARAN a N. C. DHOBALÉ. 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
- [101] 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
- [102] 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
- [103] 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.
- [104] 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>
- [105] ASOCIACE ENERGETICKÝCH AUDITORŮ - ENERGETICKÝCH SPECIALISTŮ, z.s. *Energetický audit* [online]. [vid. 2020-06-08]. Dostupné

z: <https://www.aea.cz/energeticky-audit>

- [106] 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/>
- [107] *Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií* [online]. [vid. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-406#f4367267>
- [108] STANĚK, Lukáš. *Specializovaná odborná studie: Technicko-ekonomický model potenciálního prům. spotřebitele energie*. 2017.
- [109] AL BALUSHI, Suleiman a Shylesh KUMAR VAKUNDAKAR. *ENERGY EFFICIENCY GUIDEBOOK A GOIC publicatin for GCC industries*. 2013.
- [110] 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>
- [111] 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](https://doi.org/10.3390/en11041006)
- [112] 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](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.021)
- [113] 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](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.10.002)
- [114] 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](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.126)
- [115] JAVŮREK, Karel. Kam míří vývoj počítačů? Hlavně k nízkým cenám. *živě.cz* [online]. 2014 [vid. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/kam-miri-vyvoj-pocitacu-hlavne-k-nizkym-cenam/sc-3-a-174111/default.aspx>
- [116] *Dodecylbenzensulfonát sodný (dodecylbenzensulfonát sodný) Výrobci a dodavatelé - Cena - Fengchen* [online]. [vid. 2020-09-10]. Dostupné z: <http://cz.fengchengroup.org/chemicals/featured-chemicals/sodium-dodecylbenzene-sulfonate-sodium.html>