



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

**KOMPLEXNÍ VÝROBNÍ LINKA PRO ZÁSTRČNOU  
A POVRCHOVOU MONTÁŽ SOUČÁSTEK Z POHLEDU  
ENERGETICKÝCH ÚSPOR**

COMPLEX PRODUCTION LINE FOR THROUGH HOLE AND SURFACE MOUNT COMPONENTS  
ASSEMBLY FROM ENERGY SAVING POINT OF VIEW

**BAKALÁRSKA PRÁCA**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Maroš Tomanček**

**VEDÚCI PRÁCE**

ADVISOR

**Ing. Jiří Starý, Ph.D.**

**BRNO 2023**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Maroš Tomanček

**ID:** 230522

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Komplexní výrobní linka pro zástrčnou a povrchovou montáž součástek z pohledu energetických úspor**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Prostudujte technické a kapacitní vybalancování dané výrobní linky a uveďte úzké profily z hlediska kapacitní průchodnosti. Zpracujte energetickou spotřebu strojů v produkčním módu a ve stand-by módu (zejména pájecí stroje - vlna a přetavovací pec). Navrhněte energeticky úspornější typy pájecích strojů a další možná technologická řešení. Zpracujte a diskutujte dosažené úspory a přínosy jednotlivých řešení.

Spolupráce s firmou RESIDEO Brno

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Dle doporučení vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 1.6.2023

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Starý, Ph.D.

**doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **ABSTRAKT**

Práca sa zaoberá analýzou elektro-montážnej linky z perspektívy energetickej spotreby. Skúma sa priechodnosť a spotreba jednotlivých zariadení súčasťou vybranej elektro-montážnej linky v spoločnosti Resideo. Analýzou časových cyklov sa vyhodnotila pracovná vyváženosť montážnej linky. Meraním s energetickým záznamníkom a termokamerou bol meraný výkon a straty niekoľkých zariadení. Porovnaním získaných dát a rozborom pracovných výkonov zariadení boli vyhodnotené riešenia možnej energetickej úspory. Zvážili sa alternatívy použitia nízkoteplotných spájok a modernejších technologických riešení, ktoré sú odporúčané pre využitie v praxi.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Elektromontážna linka, spájkovanie vlnou, spájkovanie pretavením, bezvývodová povrchová montáž, vývodová otvorová montáž, energetická štúdia, energetická spotreba, výkon, efektivita, priechodnosť, doska plošných spojov, tepelné straty, analýza tepelnou mapou, nízko teplotné spájky

## **ABSTRACT**

Thesis deals with analysis of electronic assembly line from an energy consumption point of perspective. The throughput rate is observed along with consumption of individual devices from the chosen assembly line at Resideo company. The work load balance of the assembly line was evaluated by cycle time analysis. Electrical power and losses were measured with the use of power logger and a thermal camera. The possible energy saving solutions are then concluded from analysis and comparison of power drawn by the devices. Use of low temperature solder alloys and other modern industry solutions were considered with recommendation to be used in the field.

## **KEYWORDS**

Electronical assembly line, wave soldering, reflow soldering, surface mount technology, through hole technology, energetic study, power consumption, power, efectivity, throughput rate, printed circuit board, thermal loss, heatmap analysys, low temperature solder

TOMANČEK, Maroš. *Komplexní výrobní linka pro zástrčnou a povrchovou montáž součástek z pohledu energetických úspor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2023, 81 s. Bakalářská práce. Vedúci práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

## Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko autora:** Maroš Tomanček  
**VUT ID autora:** 230522  
**Typ práce:** Bakalárska práca  
**Akademický rok:** 2022/23  
**Téma závěrečnéj práce:** Komplexní výrobní linka pro zástrčnou a povrchovou montáž součástek z pohledu energetických úspor

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce, pánovi Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za odborné vedenie, perspektívne rozširujúce konzultácie, trpezlivosť, ochotu a obohacujúce návrhy k práci. Rovnako ako aj pánovi Zdeňkovi Jurčíkovi za profesionálny názor, trpezlivosť a záujem o danú problematiku.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Elektrotechnická montážna linka</b>	<b>12</b>
1.1 Osadzovací automat	13
1.2 Aplikácia spájkovacích materiálov a lepidiel	14
1.2.1 Šablónová tlač	15
1.2.2 Tlač sitom	16
1.2.3 Selektívna aplikácia	16
1.3 Spájkovacie stroje	17
1.3.1 Pretavovacia pec	18
1.3.2 Spájkovacia vlna	19
1.3.3 Selektívne spájkovanie	19
1.4 Testovacie zariadenia	21
1.4.1 Optické testy	22
1.4.2 Vnútro obvody test	23
1.4.3 Funkčný obvody test	23
1.5 Materiály pre spájkovanie	24
1.5.1 Olovnaté spájky	25
1.5.2 Bezolovnaté spájky	26
1.5.3 Nízkoteplotné spájky	28
1.5.4 Tavivá	29
<b>2 Metodika merania</b>	<b>30</b>
2.1 Záznamník kvality trojfázového napájania Fluke 1738	30
2.2 Zapojenie meracieho prístroja	31
2.3 Meranie tepelnej emisivity spájkovacích strojov	33
2.3.1 Výpočet tepelných strát konvekciou	34
2.3.2 Výpočet tepelných strát radiáciou	34
2.3.3 Výpočet celkových tepelných strát	35
2.4 Meranie teplotného profilu	36
<b>3 Dosiachnuté výsledky meraní</b>	<b>37</b>
3.1 Kapacitná priechodnosť linky	37
3.1.1 Priechodnosť produktu X	39
3.2 Energetická spotreba	43
3.2.1 Analýza spotreby pretavovacích pecí	44
3.2.2 Analýza spotreby spájkovacích vln	48

3.2.3	Výsledná aktuálna spotreba . . . . .	52
3.3	Tepelné straty spájkovacích vln . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Navrhované riešenia a diskusia výsledkov</b>	<b>59</b>
4.1	Optimalizácia nastavenia pracovných režimov . . . . .	59
4.2	Tepelná izolácia zariadení . . . . .	60
4.3	Výmena strojov . . . . .	60
4.4	Využitie selektívnych spájkovacích technológií . . . . .	61
4.5	Vynechanie procesu spájkovacej vlny . . . . .	61
4.6	Nastavenie teplotných profilov a ich vplyv na spotrebu . . . . .	63
4.6.1	Vplyv voľby profilu RTS a RSS . . . . .	63
4.6.2	Vplyv času a teploty nad tavením spájky . . . . .	64
4.7	Aplikácia nízkoteplotných spájok . . . . .	65
	<b>Záver</b>	<b>66</b>
	<b>Zoznam symbolov a skratiek</b>	<b>70</b>
	<b>Zoznam príloh</b>	<b>71</b>
<b>A</b>	<b>Výsledky výkonových analýz</b>	<b>72</b>



# Zoznam obrázkov

1.1	SMT montážna linka . . . . .	12
1.2	Osadzovací automat . . . . .	13
1.3	Aplikátor spájkovacej pasty . . . . .	14
1.4	Model pre area ratio . . . . .	15
1.5	Pretavovacia pec . . . . .	17
1.6	Testovacie zariadenia . . . . .	21
1.7	Fázový diagram SnPb . . . . .	25
1.8	Fázový diagram SAC . . . . .	26
2.1	Rogovského cievka . . . . .	30
2.2	Schematické zapojenie Fluke 1738 . . . . .	32
2.3	Zapojenie teplotného záznamníku . . . . .	36
3.1	Osadená doska produktu „X“ . . . . .	38
3.2	Tvar panelu . . . . .	39
3.3	Dosky v ráme . . . . .	40
3.4	Postup montáže produktu „X“ . . . . .	40
3.5	Pripojený záznamník Fluke 1738 na spájkovaciú vlnu . . . . .	43
3.6	Ersa Hotflow 4/20 - Priebeh spustenia pretavovacej pece . . . . .	44
3.7	Ersa Hotflow 4/20 - Priebeh procesu čistenia tunelu od zvyškov tavív z inertnej atmosféry . . . . .	45
3.8	Heller 1812EXL - Priebeh spustenia pretavovacej pece . . . . .	47
3.9	Vitronics Soltec Delta 5 - Priebeh spustenia spájkovacej vlny . . . . .	49
3.10	Ersa Powerflow N2 - Priebeh výkonu pri zapnutí . . . . .	51
3.11	Vykreslená tepelná mapa na nákrese spájkovacej vlny Ersu Powerflow	58
3.12	Vykreslená tepelná mapa na nákrese spájkovacej vlny Ersu Powerflow N2 . . . . .	58
4.1	Náčrt rozdielov priebehov teplotných profilov RTS a RSS . . . . .	63
A.1	Ersa Hotflow 4/20 - celkový priebeh výkonu . . . . .	72
A.2	Heller 1812EXL - celkový priebeh výkonu . . . . .	73
A.3	Vitronics Delta 5 - celkový priebeh výkonu . . . . .	74
A.4	Ersa Powerflow - celkový priebeh výkonu . . . . .	75
A.5	Ersa Powerflow N2 - celkový priebeh výkonu . . . . .	76
A.6	Vectra Electrovert - celkový priebeh výkonu . . . . .	77
A.7	Heller 1812EXL - Výkonové priebehy rôzne nastavených teplotných profilov . . . . .	78
A.8	Ersa Hotflow 4/20 - Výkonový priebeh profilu RTS . . . . .	79
A.9	Heller 1812EXL - Obdĺžnikový teplotný profil . . . . .	80
A.10	Heller 1812EXL - Obdĺžnikový teplotný profil . . . . .	81

# Zoznam tabuliek

1.1	Kategorizácia ISO9454-1 . . . . .	29
3.1	Namerané časy cyklov zariadení . . . . .	41
3.2	Vypočítaná hodnota výslednej priechodnosti produktu X . . . . .	42
3.3	Namerané hodnoty výkonov zariadení v linke . . . . .	52
3.4	Výsledné hodnoty spotreby a výkonu meraných spájkovacích strojov .	53
3.5	Výpis vlastností okolia, nastavenia infračervenej kamery a jednotlivých konštánt . . . . .	55
3.6	Namerané a vypočítané hodnoty teploty a tepelných výkonov pre jednotlivé strany stroja Ersa Powerflow . . . . .	56
3.7	Namerané a vypočítané hodnoty teploty a tepelných výkonov pre jednotlivé strany stroja Ersa Powerflow N2 . . . . .	57
4.1	Približné mesačné náklady na prevádzku spájkovacej vlny Ersa Powerflow . . . . .	61
4.2	Namerané parametre profilov s veľkosťou ich pracovných výkonov . .	64

# Úvod

Všade okolo nás sú zariadenia, ktoré potrebujú pre svoju funkciu elektrickú energiu. Táto energia je spracovávaná už či z obnoviteľných, alebo z neobnoviteľných zdrojov. Samotná produkcia energie však má ako všetko na svete svoju hodnotu, ktorá sa mení v závislosti od dostupnosti materiálov, pracovnej sily, aktuálneho stavu produkcie a dokonca aj od politicko-ekonomickej situácie.

S nástupom roku 2023 došlo k ráznemu nárastu cien energií a všetky sektory spoločnosti boli nútené podnikať opatrenia, znižujúce vlastnú spotrebu na úkor sporenia. Táto práca sa zameria na priemysel, konkrétne na elektro-montážnu produkciu, a jej možnosť zmierniť energetické náklady pre chod výroby. V spoločnosti Resideo energetická spotreba elektro-montážnej divízie predstavuje približne 20 % celkovej spotreby podniku. Ďalšiu spotrebu predstavujú mechanické sektory a oblasti kancelárií, výskumu a vývoja. Najväčšiu časť energetickej spotreby podniku tvorí oblasť vzduchotechniky a stlačeného vzduchu, ktorá zaberá približne 60 %. Tieto oblasti budú však vynechané.

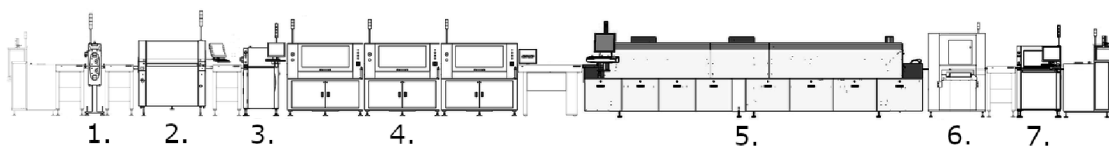
V rámci zadania bude pozornosť upriamená na analýzu priechodnosti vybranej meranej linky a zväži sa jej úzky profil rovnovážneho pracovného zaťaženia. Ďalej pomocou energetického záznamníku a termokamery sa zistí celkový odber energií výrobných strojov a ich prípadné straty. Výsledkom tejto analýzy bude zdôraznenie chýb procesu výroby a nedostatkov v energetickej optimalizácii. Tieto problémy budú nasledovne komplexne prebraté a riešené s cieľom minimalizácie strát. Zo získaných údajov budú riešenia zhodnotené vzhľadom na ich výhodnosť a cenové predpoklady. Práca okrem teoretického náhľadu do problematiky poskytuje aj použiteľné informácie pre zlepšenie efektivity výroby výrobného procesu a jej aplikácia do praxe môže mať pozitívny ekonomický a ekologický vplyv.

# 1 Elektrotechnická montážna linka

Je zoskupenie zariadení, ktorých úlohou je osadenie a pripevnenie elektrických komponentov na dosku plošných spojov. Linky sa prispôbujú v závislosti od variácie produktov („mix“) a od kvantity produktov podľa dopytu („volume“). Napríklad: linka typu „low mix - high volume“, teda, kde je nízka rozličnosť produktov vo veľkej kvantite je linka orientovaná na masovú výrobu, pri ktorej sa optimalizuje zostavenie pre najväčšiu rýchlosť produkcie. Pri „high mix - low volume“ linke je dôležité prispôbenie voči častým zmenám produktov a takisto sú zvyčajne menšie, aby boli modulovateľné a ich nastavenie pre iný prichádzajúci produkt bolo čo najrýchlejšie a najjednoduchšie. Návrh linky si vyžaduje čo najväčšiu priechodnosť. Tento údaj je zvyčajne meraný množstvom vyrobených produktov v závislosti na čase.

Ďalší faktor, ktorý je pre návrh linky dôležitý, je cena. Je nutné zvážiť cenu ako aj pre produkt, tak aj pre samotnú produkciu. Cenu výsledného výrobku ovplyvňuje predovšetkým výber súčiastok a prevedenie výrobných procesov. Pri výpočtoch sa berie do úvahy strojová cena, ktorá zahŕňa: samotnú spotrebu energií, údržbu stroja, cenu potrebných materiálov na výrobu. Pri prepočte všetkých údajov je cieľom dosiahnuť čo najväčšiu kvalitu pri čo najnižšej cene výroby.

Montážne linky sú síce v každej spoločnosti odlišné, no všetky sa skladajú z rovnakých kľúčových častí. Ich základná štruktúra pozostáva z osadzovacích strojov, zo spájkovacieho zariadenia a série niekoľkých funkčných a kvalitatívnych testov. Použitím technológie spájkovania pretavením, je potrebné dodatočne zaobstarat ešte stroj na nanášanie spájkovacej pasty a zároveň aj prístroj na kontrolu jeho tláče.



Obr. 1.1: Náčrt montážnej linky s pretavovacou pecou

Kde predstavuje:

1. čistička DPS Teknek SMT2017,
2. aplikátor spájkovacej pasty ASM DEK NeoHorizom 01IX,
3. testovacie zariadenie SPI Koh Young KY8030-3,
4. osadzovacie stroje SMT ASM Siplace SX2,
5. pretavovacia pec Ersas Hotflow 4/20,
6. zásobník DPS ASYS VEGO Compact BBS 20,
7. optický test AOI Koh Young Zenith.

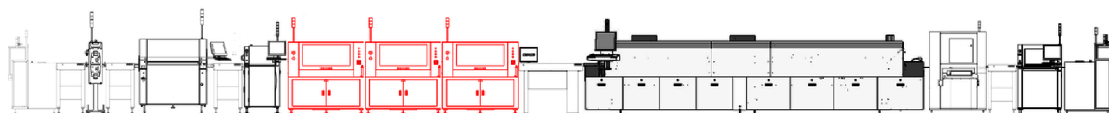
Neoznačené stroje predstavujú dopravníkové systémy série ASYS VEGO Compact.

## 1.1 Osadzovací automat

Slúži na to, aby umiestnil komponenty na správne miesto v krátkom čase na DPS. Okrem súčiastok môže byť použitý aj na umiestnenie preforiem. Tieto automaty sú konštrukčne prispôsobené pre THT a SMT komponenty. U THT komponentov stroj okrem umiestňovania komponentov, ohýba ich vývody podľa potreby. Formou osadzovania sa automaty THT komponentov delia na axiálne a radiálne automaty. Na trhu sú aj kombinované automaty, ktoré sú schopné pracovať s oboma typmi súčiastok. Napriek ich všestrannosti sú ale celkovo pomalšie. U SMT strojov existuje niekoľko odlišných spôsobov, akými automaty môžu byť prevedené:

- simultánne – súčiastky sú odoberané z podávača súčiastok vo forme niekoľkých vertikálnych zásobníkov, kde ich osadzovacia hlava pomocou vákua naraz odoberie a umiestni na DPS; priechodnosť tohto spôsobu je veľmi vysoká ale samotná príprava súčiastok a nastavenie procesu je veľmi náročné a komplikované;
- simultánno-sekvenčne – súčiastky podáva séria podávačov (inak aj ako „feedrov“), ktoré si ťahajú komponenty priamo z kotúčov. Osadzovacia hlava si odoberá celé rady súčiastok, ktoré potom postupne osádza na DPS; spôsob je o niečo v príprave jednoduchší;
- sekvenčne – (inak ako aj „pick & place“) je spôsob, pri ktorom si rotačná jednotka pozbiera na jednotlivé hlavy požadované komponenty z feedrov („pick“) a potom ich začne postupne umiestňovať na pred programované časti DPS („place“); v konfigurácií dvoch alebo viacerých hlavíc vedia spoločne pracovať pomerne rýchlo, ale stále to nebude schopné kompenzovať rýchlosť simultánneho osadenia.

Od osadzovacieho stroja je vyžadovaná predovšetkým presnosť aby súčiastky boli osadené podľa normy a rýchlo. Bežný automat využívaný v dnešnom priemysle je schopný osadiť rádovo niekoľko stoviek tisíc komponentov za hodinu a dokonca aj cez milión za hodinu pri správnej optimalizácii. [1]



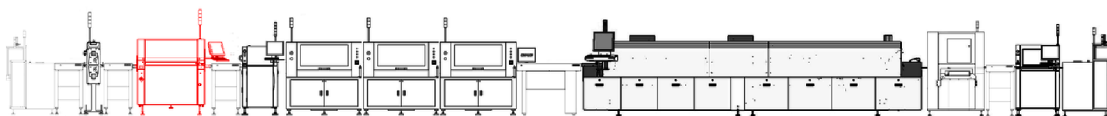
Obr. 1.2: Náčrt montážnej linky (zvýraznené osadzovacie automaty)

## 1.2 Aplikácia spájkovacích materiálov a lepidiel

Spájka sa aplikuje na DPS pre proces pretavenia rôznymi spôsobmi. Najviac osvedčený spôsob aplikácie je vo forme pasty, ktorá je nanosená sitom alebo šablónou. Okrem sita a šablóny sa používajú aj preformy. Preformy sú pevné kusy spájky, ktoré sú tvarované podľa vývodov a plôšok. Ich výhodou je použitie presného množstva spájky na požadovaný spoj. Negatívom je nutná ručná aplikácia alebo potreba osadzovacieho stroja. Veľký vplyv na nanášanie pasty okrem vplyvu použitých technológií má aj spôsob nanášania pasty. Pastu na dosku možno nanášať aj ručne, ale kvôli kvalite a presnosti je najlepšie tlačiť ju strojovo.

Pasta môže byť nanosená na šablónu pomocou pevného stieradla („squeegee“), kde pasta cirkuluje pod jej sklonom počas pohybu. Pri tejto metóde má na výslednú tlač vplyv tlak na stieradlo, uhla na sklon stieradla, rýchlosť a dokonca aj smer nanášania. Ďalší spôsob aplikácie pasty je pomocou dutého nanášadla. Nanášacia hlava je dutá temperovaná komora, do ktorej sa vkladajú kazety so spájkovacou pastou a pôsobí na ňu vertikálna sila piestu, vtlačujúca pastu do šablóny počas toho, ako ňou prechádza. Z oboch strán hlavy sú umiestnené stieradlá, zbierajúce nadbytočnú pastu a tým udržiavajúce šablónu čistú. Vďaka stálej a priamo smerujúcej sile pôsojacej na nanášadlo sa zaplnia aj malé otvory šablóny, čo je vhodné pre štruktúry HDI.

Rovnakými spôsobmi sa aplikuje pasta aj lepidlo, ktoré slúžia primárne na upevnenie potrebných súčiastok na DPS. Jedná sa o komponenty, ktoré nejakým spôsobom pri procese spájkovania môžu vypadnúť alebo sa nechcane posunúť. Časté použitie lepidla je využívané na SMT súčiastky v spájkovacej vlne alebo na väčšie súčiastky, dosahujúc stabilitu a lepšiu prínavosť k doske.



Obr. 1.3: Náčrt montážnej linky (zvýraznený stroj na nanášanie pasty)

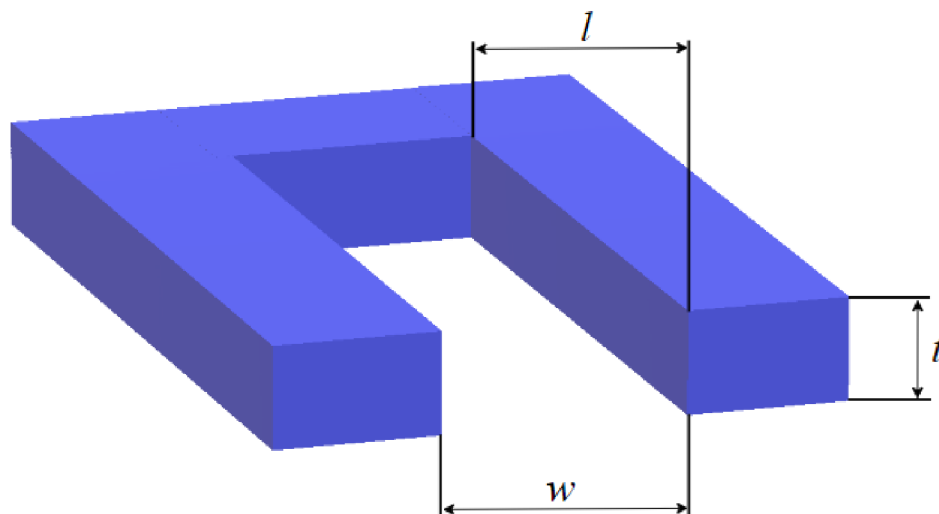
### 1.2.1 Šablónová tlač

Motív DPS je vytvorený na šablóne z pevného materiálu ako je nerezová oceľ alebo plast, do ktorej sa vytvárajú otvory. Otvory môžu byť zhotovené napríklad laserom a leptaním (subtraktívne), alebo galvanizovaním (aditívne). S odstupom času sa osvedčili laserové šablóny oproti galvanickým, kvôli lepšej presnosti a trvanlivosti. Pri tlači šablónou oproti situ je výhoda v jednoduchosti čistenia, údržbe a aj v samotnom používaní. Ďalšou výhodou je priamy kontakt so substrátom, kde nedochádza k rozmerovým rozdielom. Šablóny sú oveľa viac mechanicky odolnejšie a tým sú teda podstatne úspornejšie. Pri návrhu šablóny je nutné dodržať určité kritéria, ktoré zaručujú presnú tlač šablónou. Kritérium „aspect ratio“, hovoriace o tom, že najmenší rozmer pravouhlého motívu „ $w$ “ musí byť o 1,5 násobok hrúbky šablóny väčší. Ďalšie kritérium je o pomere „area ratio“ definujúce pomer medzi plochou motívu k ploche vnútorných stien motívu na šablóne podľa vzorca. Podobne, ako pri tlači sitom, návrh apertúry musí spĺňať podmienku minimálnej priechodnosti motívu pre 4 až 6 guličiek spájky na otvor motívu. Po každej aplikácii musí byť šablóna čistá, aby sa na plôškach neocitli nečistoty, a preto je strojom čistená v pravidelných cyklových intervaloch. Po niekoľkých cykloch je potrebné šablónu vybrať a precíznejšie vyčistiť. [1]

$$\text{Aspect ratio} \Rightarrow \frac{w}{t} \geq 1,5 [-] \quad (1.1)$$

$$\text{Area ratio} \Rightarrow \frac{l \cdot w}{2 \cdot (l \cdot t) + 2 \cdot (w \cdot t)} \geq 0,66 [-] \quad (1.2)$$

Kde „ $l$ “ predstavuje dĺžku motívu, „ $w$ “ šírku motívu a „ $t$ “ je hrúbka šablóny. [1]



Obr. 1.4: Model motívu s vyznačenými rozmerovými premennými

## 1.2.2 Tlač sitom

Je spôsob tlače, pri ktorej je materiál pretláčaný okami sita na substrát (DPS). Táto technológia je bežná v textilnom priemysle ako spôsob tvorenia potlače. Svoje použitie si spomenutá technológia našla aj v elektrotechnickom priemysle aplikáciou spájky. Sito môže byť skonštruované buď z kovových alebo polyesterových vlákien. Zo spodnej strany sita sa často využíva aj tenká kovová planžeta slúžiaca ako šablóna, cez ktorú sa materiál rovnomerne prenáša. Výška sita nad samotným substrátom je nazývaná ako „odtrh“, ktorého vzdialenosť je 0,8 mm až 1 mm. „Odtrh“ pri prechode roztieradla spôsobí priame oddelenie nanesej pasty od sita bez toho, aby sa poškodila nanosená vrstva. S tým však vzniká aj nevýhoda natiahnutia motívu a preto sa nepoužíva na veľmi jemné motívy, napríklad pre QFN púzdra. Pri voľbe pasty tlačou sitom sa dodržiava pomer veľkosti ôk voči veľkosti zrn pasty tak, aby okom sita vedeli prejsť aspoň 3 až 4 zrná spájky. Na zachovanie kvality tlače v pomere k substrátu sa sito zvyčajne používa pod uhlom 45°. Uhol sa však môže v závislosti na kvalite tlače meniť. Hlavnými nevýhodami sú ľahká opotrebovateľnosť a horšia aplikácia na menšie motívy. [1]

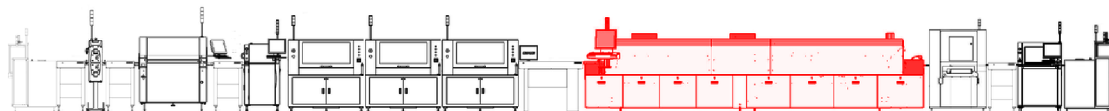
## 1.2.3 Selektívna aplikácia

Sito a šablóna však slúžia na veľkoplošnú a stálu aplikáciu. Pre menší rozsah alebo často sa meniaci motív nánosu materiálov sú používané procesy ako „jet printing“ alebo dávkovač pasty. Dávkovač pasty je selektívny spôsob aplikácie, pri ktorých je spájkovacia pasta udržiavaná vo forme tuby alebo injekčnej striekačky. Za pomoci tlaku vzduchu je následne spájka vytláčaná smerom von a ručne alebo strojovo nanášaná na DPS. Jej dávkovanie je definované v závislosti od tlaku a času, metóda nanášania je kontaktná. „Jet printing“ funguje ako bezkontaktná aplikačná metóda, kde sa kvapky pasty tlakom striekajú na dosku. Metóda nachádza využitie aj pri selektívnej aplikácii tavív. Použitie týchto procesov je vhodné v prípadoch vykonávania častých zmien, kde sa vytváranie šablón v danej miere neoplatí.



## 1.3 Spájkovacie stroje

Slúžia na prevedenie samotného spojenia komponentov s doskou pomocou roztavenia aplikovanej spájky. Zariadenie pozostáva z niekoľkých segmentov, ktoré sa svojou úlohou členia na oblasť predhrievania, oblasť spájkovania čiže oblasť pretavenia a oblasť chladenia. Teplotný priebeh prechodu DPS spájkovacím strojom popisuje teplotný profil. Pomocou nastavovania profilov sú prispôsobené vhodné podmienky na prevedenie kvalitného spoja. Odporúčané teplotné profily sú zvyčajne udávané výrobcom spájkovacej liatiny, no na kvalitu samotného spoja vplýva omnoho viacej faktorov. Tieto profily musia byť testovaním na pracovisku následne doladené.



Obr. 1.5: Náčrt montážnej linky (zvýraznená je pretavovacia pec)

### 1.3.1 Pretavovacia pec

Používa sa aj výraz „reflow“ pec, ktorá je určená na natavenie lokálne aplikovanej spájky. Spájka môže byť nanosená vo forme pasty tlačovou metódou alebo vo forme osadenej preformy. V praxi sa bežne využíva infračervená a konvekčná pec, existuje aj technológia kondenzačného spájkovania, tá sa však využíva zriedka. Pôsobením inertných pár látok s vysokou teplotou odparovania, sa spájka roztavuje a dosahuje vysokú výslednú kvalitu spoja. Pec sa skladá z niekoľkých fáz s jednotlivými účelmi funkcie. Čím viac fáz pec obsahuje, tým presnejšie vie dosiahnuť ideálny teplotný profil na prevedenie spoja.

Štandardne sú zaužívané pre pece dva typy profilov. Profil RSS alebo aj „Ramp, Soak, Spike“ je teplotný profil, ktorý vo fáze predhrievania („ramp“) má na okamih stálu teplotu, aby sa docielila rovnomerná teplota DPS so všetkými komponentmi („soak“) a následne tak mohla začať fáza pretavenia („spike“). Profil RTS inak aj ako „Ramp To Spike“ je teplotný profil, ktorý spočíva v lineárnom nábehu cez predhrev až po pretavenie.

Infračervený ohrev je realizovaný pomocou keramických infračervených ohrievačov. Výhoda tejto metódy je rýchlosť ohrevu a vysoká efektivita procesu dosahujúca až 70 %. [1] Naopak veľkou nevýhodou je nerovnomernosť ohrevu spôsobená rozlične pohlcovaným teplom súčiastkami kvôli ich farbe. Čierne a tmavšie zafarbené súčiastky prijímajú viac tepla oproti plôškam s pastou a svetlejšími miestami na doske. Tento jav je veľkým rizikom pre polovodičové súčiastky, ktorých púzdra sa môžu ohriať na vyššiu teplotu, čo môže viesť k vzniku mikroprasklín, alebo môže dochádzať k prekrytiu spájkovacích plôšok súčiastkou, ako napríklad pri púzdre BGA, kde je všetko teplo pohltené púzdom. Ako prevencia je nutné správne prispôbiť teplotný profil pece alebo zvážiť inú technológiu.

U konvekčnej pece, ktorá je vyhrievaná prúdením vzduchu alebo plynom to problém nepredstavuje, premieta sa to však do ceny energií a odvedeného nadbytočného tepla do okolitého priestoru.

Ďalšou z nevýhod pretavovacích pecí je obmedzené využitie pri vybraných THT komponentoch. Konkrétne sa to týka súčiastok obsahujúcich plasty a ich neprispôsobivosť vysokým teplotám – elektrolytické kondenzátory, konektory, relé a podobne. Pre väčšinu z nich existujú alternatívy špeciálnych polymérov s vylepšeným dizajnom, tie sa však štandardne pohybujú vo vyššej cenovej relácii, čím v niektorých prípadoch zvyšujú konečnú cenu produktu.

### 1.3.2 Spájkovacia vlna

Spájkovanie vlnou, „wave soldering“, je najstarší spôsob priemyselného spájkovania. Princíp spájkovacej vlny spočíva vo vytvorení súvisle tečúcej vlny s pomocou prechodu roztavenej spájky tryskou. DPS je dopravníkovým systémom prenášaná najprv cez aplikátor taviva a potom cez predhrievač. Následne prechádza naprieč vlnou, kde sa povrchovým napätím plôšky roztavená spájka vzlína na dosku a v ostatných miestach so spájkovacou maskou odtečie. Nevyužitá spájka padá do vane, kde je znovu využitý na ďalšie spoje. Veľkou výhodou vlny je vysoká úroveň automatizácie, umožňujúca spracovávať veľké množstvo spojov za relatívne konštantných podmienok. [1] Tento spôsob spájkovania je pomerne náročný na údržbu kvôli tomu, že na vaňu, v ktorej je roztavená spájka, je vyvíjaný stály stres vysokými teplotami.

Pri vstupe do vlny sa na dosku aplikuje najprv tavivo. To je aplikované v kvapalnej forme buď pomocou jemného nánosu tryskou alebo pomocou peny. Nanášanie taviva penou sa vyskytuje málo, má dobrú penetráciu otvorami, no jeho nanášanie je nekonzistentné a zložité na manipuláciu. Pri tryskovom nánose sú vrstvy viac rovnomerné, ale vystreknuté tavivo sa usádza v rôznych častiach stroja a je nutné zavádzať protiopatrenia proti znečisteniu.

Forma prevedenia samotnej vlny a spôsob prechodu dosky vlnou sú podstatné časti vplývajúce na kvalitu spojov. Tlak zabezpečujúci sústavný prechod spájky tryskou je riešený čerpadlom, ktoré je poháňané motorom. Existujú aj systémy fungujúce na princípe Pascalovho zákona s vlnou, ktorá posúva spájku pomocou pôsobenia rovnomerného tlaku cez hydraulický systém. Je to úspornejší systém a veľkosť vlny sa takto lepšie reguluje. Prístroje môžu byť vybavené systémom dvoch tokov vln. Jeden, ktorý pôsobí silnejším prúdom (turbulentná vlna) pre dosky s tesným uložením komponentov a vývodov, kvôli tomu je nazývaný aj ako „chip wave“ a druhý hlavný tok, ktorý je laminárny a vytvára kvalitnejšiu úpravu spoja. Tok turbulentnej vlny sa zabezpečuje pridaním ďalšieho čerpadla alebo zmenou konštrukčného prevedenia trysky a hlavy vlny. Okrem THT komponentov, na ktoré je použitie vlny primárne určené, je možné spájkovať aj SMT komponenty s pomocou lepidla.

### 1.3.3 Selektívne spájkovanie

Je spôsob spájkovania zvyčajne aplikovaný pre malé množstvo spojov, ktoré nemožno alebo sa neoplatí spájkovať veľkými strojmi. Selektívne procesy vnášajú väčšiu mieru univerzálnosti do celého priebehu procesu a zjednodušujú použitie SMT a THT komponentov súčasne.

## **Selektívna vlna**

Často používaný selektívny proces je pomocou selektívnej vlny. Je to zariadenie pozostávajúce zo strojovo navigovanej trysky, ktorá vytvára malý tok vlny. Tlak trysky u týchto strojov môže byť zabezpečený čerpadlom, elektromagnetickou pumpou, alebo tlakom so závažím. Elektromagnetická pumpa funguje na princípe navinutej cievky pozdĺž valcového telesa, ktorého vnútorný objem roztavenej spájky je pomocou magnetických síl vytláčaný nahor. Konštrukcia tohto typu stroja je kompaktná a s nízkym počtom pohyblivých častí. Jej nutnosť údržby je minimálna voči bežnej selektívnej vlny. Využitie selektívnej vlny prichádza najčastejšie v situáciách, v ktorých je problematické zospájkovať súčiastky technológiou pretavenia. Je to technológia zásadne úspornejšia v spotrebe spájky i energie a takisto nevzniká potreba navrhovať a konštruovať masku pre dosku, aby sa zabránilo vstupu spájky do nežiadúcich častí, ako je to u spájkovacej vlny.

## **Spájkovanie laserom**

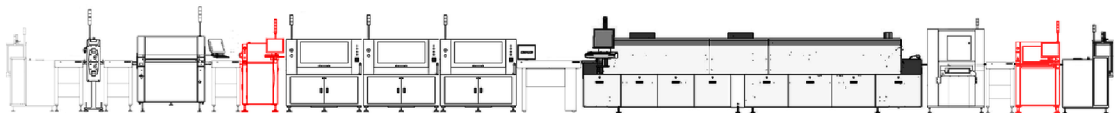
Ďalšia známa selektívna technológia, ktorá nadobúda na popularite, je aj spájkovanie pomocou laseru. Je to spôsob spájkovania, ktorý využíva súdržný a koherentný zdroj tepla na pretavenie aplikovanej spájkovacej liatiny. Kvôli jeho precízosti ohrevu je výhodný pre veľmi husté štruktúry (HDI). Laser môže byť prevedený ako jednobodové spájkovacie zariadenie, upravením oblasti pôsobenia ako simultánny systém a s pomocou masky ako celoplošné spájkovacie zariadenie. Avšak voči veľkým plochám je použitie laseru limitované. Bežne používané lasery ako Nd:YAG, oxiduhličitý alebo diódové sú čoraz častejšie využívané aj kvôli ich rýchlosti. [2] Často sa stáva, že pri použití jednej laserovej hlavy dochádza k „tombstone“ efektu. Z tohto dôvodu sa osvedčilo používať dve laserové hlavy súčasne, čo nielen vyrovnáva pôsobenie tepelno-rozťažných a kapilárnych síl, ale i rázne zvyšuje rýchlosť samotného procesu. Pri celoplošnej aplikácii laseru s pomocou masky motívu alebo štrukturovanej masky do mriežkovitého tvaru môže byť pretavených viacero spojov súčasne.

## **Mechanické kontaktné spájkovanie**

Najjednoduchší spôsob spájkovania, spočívajúci v kontaktnom pretavovaní spájky, je výhrevným hrotom. Najčastejšie sa pracuje s ručnými spájkovačkami na zospájkovanie minimálneho počtu spojov alebo na prípadné doladenie a úpravu už prevedených spojov. Existuje však aj automatizovaná strojová forma kontaktnej spájkovačky, ktorá sa pomocou dávkovača spájky a nahrievaného hrotu pohybuje po oblasti DPS, na ktorej vykonáva spoje. V porovnaní s laserom táto technológia pôsobí väčším tepelným stresom a je pomalšia.

## 1.4 Testovacie zariadenia

Tak, ako je dôležité správne osadiť a zletovať jednotlivé súčiastky na DPS, je následne náročné aj overenie správnosti jednotlivých krokov výroby. Testovanie ako proces môže byť automatizovaný na rozličných úrovniach od základnej kontroly operátora až po plne automatizovaný systém. Celou linkou sa radí za sebou niekoľko rozličných testov, ktoré zabezpečujú kvalitu produkcie. Testovacie stroje okrem údají o chybe pri správnom rozložení poskytnú aj informácie, ako a prečo samotná chyba vlastne vznikla. S pomocou týchto dát sú uvádzané do funkcie opatrenia, aby sa podobné chyby viackrát nevyskytovali. Vďaka testom sa taktiež predchádza možnosti uviesť spotrebiteľovi chybný produkt, z čoho by mohli vzniknúť prípadné nehody nevyčísľiteľných rozmerov. Kvalitatívne vlastnosti spojov, podľa ktorých sú testy všeobecne nastavené, sú definované normou IPC-A-610, ktorá okrem kvality spojov hovorí aj o správnom nakladaní s jednotlivými komponentmi alebo ich značeniami. Testy môžu byť zaintegrovane do samotnej montážnej linky, alebo umiestnené mimo linky, kde sú DPS vkladané do zariadení ručne operátorom.



Obr. 1.6: Náčrt montážnej linky so zvýrazneným SPI (vľavo) a AOI (vpravo)

### 1.4.1 Optické testy

Kontrola nanesej pasty alebo aj „Solder Paste Inspection“ (SPI), je jedným z prvých a najdôležitejších testov, ktorý sa nachádza v linke s technológiou spájkovania pretavením. Jeho úlohou je overiť správne nanesenie spájkovacej pasty na plôšky DPS. Podstata testu spočíva v tom, že nespočetné množstvo vzniknutých defektov spojov nastáva práve v tomto kritickom bode montáže. Preto existuje tvrdenie – pri správne nanesej paste je spoj už polovičato zospájkovaný. SPI vyhodnocuje správnosť nanesenia pasty pomocou snímky, ktorá je následne cez vykreslovací matematický program premietnutá do trojrozmernej sústavy a porovnaná so stanovenými kritériami. Ak tlač pasty spĺňa požadované kritéria, postupuje ďalej k osadzovaciemu stroju. Medzi kritéria testov sa zvažuje hrúbka nanesej pasty, homogenita vrstvy, správne nanesenie pasty na plôšku a výskyt nečistôt.

Automatická optická inšpekcia – alebo AOI, je forma optickej kontroly, ktorá je kompletne strojovo riadená. Pri tejto kontrole sa pozoruje správnosť osadenia komponentov podľa normy. Pri osadzovaní môže dôjsť k zámene súčiastok podobných púzdiar s odlišnými parametrami, k osadeniu súčiastky s obrátenou polaritou, alebo aj mechanickému poškodeniu súčiastky. Pri procese spájkovania môže dôjsť k niekoľkým chybám: k zospájkovaniu mimo spájkovacej plôšky, k veľkému nadvihnutiu, k malému zmáčaniu kontaktu, alebo špeciálnym javom ako je napríklad takzvaný „tombstoning“. Pred týmito nedostatkami poskytuje optická kontrola adekvátnu ochranu. Automatická optická inšpekcia prevádza kontrolu rovnako ako SPI, kde zhotoví snímky DPS, ktoré po postupnom vyhodnotení určia, či doska previerkou prechádza a tieto chyby sa tam nenachádzajú („pass“), alebo je vyradená z obehu („fail“) na podrobnejšiu kontrolu a opravu skúseným pracovníkom. Dosky sú pri kontrole porovnávané s dátami CAD softwaru, v ktorom sú zakreslené presné hodnoty. Prístroj je schopný dosahovať rozpoznávacieho rozlíšenia menšieho ako 15  $\mu\text{m}$  s pomocou laseru a viacfarebného osvetlenia z rôznych smerov. [1]

Na vyhľadávanie skrytých chýb ako napríklad guľčkové spoje pod BGA púzdrami alebo chýb vzniknutých vo vnútri samotnej DPS, slúžia röntgenové optické kontroly. Nevýhodou röntgenu je potreba kvalifikovaného pracovníka na obsluhu prístroja a väčšia mierka rozlíšenia.

Optické kontroly môže vykonávať aj človek, pri tomto spôsobe kontroly sa však do účinnosti procesu započítava aj cena pracovnej sily, chyba ľudského faktoru a únava pracovníka bez ohľadu na kvalitu poskytnutého testovacieho vybavenia.

## 1.4.2 Vnútro obvodový test

Inak známy ako „In-Circuit Test“ (ICT) je forma testu, pri ktorej sa overuje správny kontakt a typ osadenej súčiastky, tentokrát ale elektricky. Privádzaním jednotlivých signálov na svorky súčiastok a funkčných celkov sa overuje spätná väzba. Podobne ako pri ostatných testoch je pre každú súčiastku stanovené kritérium, ktoré musí byť splnené. Prepojenie častí s testovacím zariadením je spracované pomocou ihlíc privádzaných buď na testovacie body, alebo priamo na vývody súčiastok. Celé meranie prebieha vo fixtúrach skladajúcich sa zo série týchto ihlíc, ktorých signály sa pomocou počítača prepínajú vo vysokej rýchlosti. Ďalší variant testovania je prevedený postupným prikladaním ihlíc na meracie body pomocou robotického ramena vo vysokej rýchlosti, tento systém je známy aj ako „flying probe“, oproti bežnému testu ICT je o niečo pomalší.

## 1.4.3 Funkčný obvodový test

Je to konečný test, ktorý overuje všetky funkcie, aby produkt mohol byť uvedený na trh. Pre testovanie sa využívajú vstupy a výstupy zariadenia, prípadne špeciálne odvedené testovacie rozhranie z dosky. Zvyčajne, ak má zariadenie programovateľnú jednotku, tak sa v tomto kroku na ňu nahrávajú potrebné kľúče a licencie.

## 1.5 Materiály pre spájkovanie

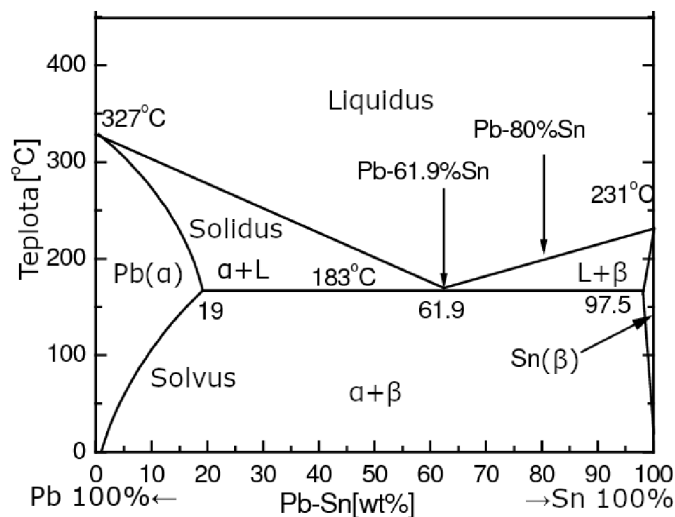
Využitie spájky sa datuje už od roku 4000 pred našim letopočtom počas doby bronzovej. Veľké civilizácie ich využívali na tvorbu dekorácií a zbraní. [3] Zliatiny fungujú ako spájací materiál medzi dvoma kovmi. Na to, aby spoje boli realizovateľné musí mať spájka nižšiu teplotu tavenia ako spájané kovy. Podľa potreby použitia sa delia spájky na mäkké a tvrdé. V elektrotechnickom priemysle sa používajú mäkké spájky, ktoré majú teplotu tavenia pod 450 °C zvyčajne na báze cínu, olova, striebra, bizmutu, india, a iných materiálov. Väčšina používaných mäkkých spájok má teplotu tavenia v rozmedzí 180 °C až 300 °C. [3, 4] Všeobecne sú najčastejšie používané liatiny cínu s inými prvkami, ktoré spoločne definujú vlastnosti spájky. Podľa liatiny môže mať spájka odlišnú teplotu tavenia, zmáčanie, pevnosť, vzhľad po zatuhnutí, mieru oxidácie a ďalšie iné vlastnosti. Medzi jej hlavné vyhľadávané prednosti patria atribúty ako dobrá mechanická a tepelná odolnosť, nízka miera oxidácie, dobrá elektrická a tepelná vodivosť, dobré zmáčanie povrchu a prispôsobivosť masovej produkcii. Pri výrobe spájky je optimálne čo najbližšie dosiahnuť eutektického zloženia liatiny, pri ktorom sa spájka dostáva z kvapalného stavu priamo do tuhého. Samotná spájka ale len z časti definuje samotnú kvalitu spoja, konečnú akosť ovplyvňuje aj spôsob jej aplikácie a pretavenia. Spájkovacia liatina musí byť hlavne kompatibilná s povrchovou úpravou DPS, aby správne na povrch plôšok vzlínala.

Ako pomocné látky pre samotný proces spájkovania sú používané tavivá a inertná atmosféra. Tavivá sú chemikálie napomáhajúce procesu spájkovania. Inertná atmosféra je zabezpečená stlačeným plynom ako napríklad dusík a zlepšuje nielen vlastnosti zmáčania, súběžne aj chráni pred priamou oxidáciou spoja udržiavaním kyslíka mimo prevádzaného kontaktu pri tepelnom spracovaní. Existuje viac plynov ako hélium alebo argón, no ich použitie by bolo zásadne drahšie a ich pôsobenie na spoj nie je v porovnaní s dusíkom výhodnejšie.



### 1.5.1 Olovnaté spájky

V nálezoch starovekých civilizácií sa našli spájkované spoje bronzových vodných rúr pomocou liatiny cínu a olova. V neskorších obdobiach sa objavovalo využitie tejto liatiny pozostávajúcej z dvoch tretín cínu a jednej tretiny olova častejšie a prakticky je uplatnená až do dnešnej doby. [3] Olovnatá spájka bola všeobecne používaná donedávna, od roku 2006 sa uplatnila v Európe Reštrikcia nebezpečných látok (RoHS) zakazujúca ďalšiu produkciu s olovnatou liatinou. Dnes sa olovnatá spájka využíva len na produkty navrhnuté pre tento typ spájky ešte pred uvedením platnosti reštrikcie. Týka sa to predovšetkým náhradných častí starších produktov. Teplota tavenia olovnatej spájky je 183 °C a vyznačuje sa lesklým vzhľadom s nízkym oxidačným charakterom. Percento zastúpenia cínu v zlíčenine udáva jej štruktúrne vlastnosti pri chladnutí. Počas ochladzovania prechádza spájka zo stavu kvapalného cez takzvaný plastický stav až napokon stuhne. Všeobecne platí, že pri 61,9 % zastúpení cínu dosahuje liatina eutektické zloženie a kvôli dvom zložkám je označovaná ako binárna liatina. [1, 4]



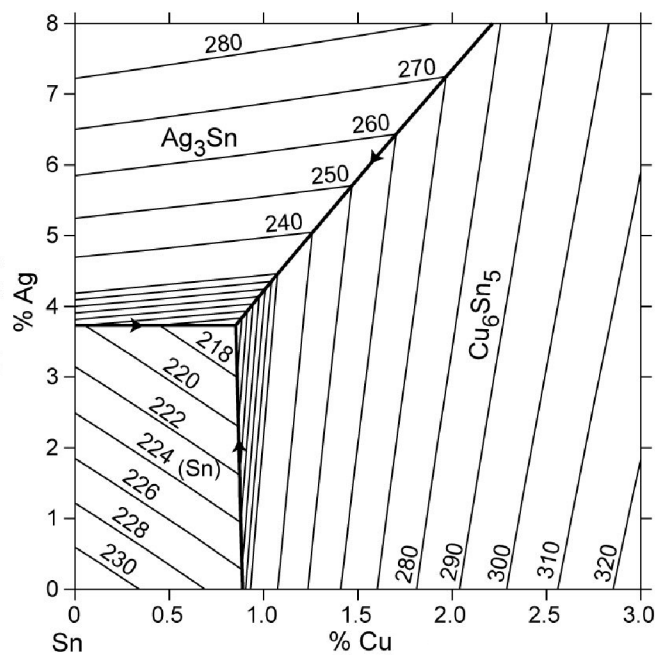
Obr. 1.7: Fázový diagram spájkovacej liatiny SnPb s bodom eutektického zloženia [5]

Roztavená spájkovacia zlíčenina pri spájkovaní silno reaguje s medenými plôškami DPS a dochádza k difúzií. Pri difúzií sa miešajú atómy cínu s atómami medi. Pomer olova v tejto zmesi je zanedbateľný. Tento jav je sám o sebe vhodný z dôvodu lepšieho previazania spoja, ale zároveň dochádza k nepriaznivému vzniku intermetalických vrstiev, ktoré predstavujú bariéru medzi spájkou a meďou. Dlhým pôsobením spájkovania pri vysokej teplote alebo tepelným namáhaním spoja dochádza k vzniku a rozšíreniu  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  vrstiev. Tomuto javu sa nedá vyhnúť, ale správnou teplotnou optimalizáciou sa dá minimalizovať.

## 1.5.2 Bezolovnaté spájky

Ako bolo vyššie spomenuté pri olovnatých spájkach, kvôli reštrikcii sú výrobcovia donútení prechádzať na iné riešenia neobsahujúce olovo. Dnes sa ustálili určité spájkovacie liatiny, ktorých variácie sú celoplošne používané. Kritéria na bezolovnaté spájky sú dané olovnatou spájkou SnPb, pričom vlastnosti týchto spájok musia byť v konečnom výsledku lepšie alebo aspoň porovnateľné medzi sebou.

Najčastejšie používané bezolovnaté spájky sú ternárne liatiny SnAgCu (SAC) a SN100C. SAC v porovnaní s SnPb a inými rôznymi variantami bezolovnatých spájok sa ukázala ako najviac vyvážená. Okrem vysokej mechanickej pevnosti sa vyznačuje dobrou spoľahlivosťou s bodom tavenia na 218 °C. Vo svete sa využívajú rozličné pomery tejto zlúčeniny ako SnAg<sub>3,9</sub>Cu<sub>0,6</sub> v Amerike a SnAg<sub>3,8</sub>Cu<sub>0,7</sub> v Európe. Jej povrch je matnejší s odlišným mechanizmom tuhnutia a dendritickou štruktúrou. [1] Kvôli rozličnému povrchovému napätiu a mechanizmu tuhnutia je zliatina náchyľnejšia na rôzne defekty, ktoré sa pri spájkovaní môžu vyskytnúť. Tie však možno ošetriť optimalizovaním spájkovacieho profilu.



Obr. 1.8: Fázový diagram spájkovacej liatiny SAC [6]

SN100C je spájkovacia liatina založená na kombinácii cínu, medi, niklu a často-krát aj menšej zložky germánia. Vyznačuje sa pekným lesklým povrchom, nízkou agresivitou oproti kovom a v porovnaní so spájkou SAC neobsahuje striebro – je cenovo dostupnejšia. Je určená primárne na použitie v spájkovacej vlně pri teplote tavenia 227 °C. Jednou z jej nevýhod je, že pri spájkovacej vlně kde dochádza k vzniku tzv. strusky, zatuhnutých zostatkových kvapiek spájky. Pomerne často vznikajú na vlně

oxidy kovov príslušnej liatiny spôsobujúce postupnú degradáciu s najväčšími stratami pri germániu a nikle. Z toho dôvodu treba pridať do spájkovacej vane aditíva, dopĺňujúce chýbajúce zložky. Germániu pôsobí ako hlavný antioxidant a redukuje mieru vzniku strusky. [7] Ďalšou dobrou vlastnosťou tejto spájkovej vane je jej nízka erozivita. Podobne ako aj pri olove na týchto liatinách vznikajú intermetalické vrstvy, ktoré zhoršujú samotnú integritu spoja.

S využitím aditív, liatiny nadobúdajú lepších vlastností ako napríklad pri zmesi Innolot®, ktorá sa využíva zvyčajne v automobilovom priemysle. Je to liatina založená na SAC kompozícií obohatená o nikel, antimón a bizmut. Jej prednosťou je veľmi dobrá mechanická a tepelná odolnosť, odolnosť voči vibráciám a dlhá životnosť. Teplota tavenia je 218 °C rovnako ako pre SAC a jej prednostné určenie je na spájkovanie pretavením. So spomínanou liatinou je možné pracovať aj pre spájkovanie vlnou, no jej používanie je náročnejšie ako aj z pohľadu údržby, tak aj prevádzky, pri ktorej by musela byť vaňa spájkovej vane nahrievaná nad 300 °C na dosiahnutie najväčšej homogenity. [8]

### 1.5.3 Nízkoteplotné spájky

Sú to liatiny s veľmi nízkou teplotou tavenia a predstavujú pre budúcnosť elektrotechniky veľký potenciál. Kvôli ich nízkej teplote je pracovná teplota pre spájkovanie jednoduchšie udržateľná a na dosky so spojmi je kladená podstatne menšia tepelná záťaž. Hlavným kandidátom nízkoteplotných spájok je zlúčenina cínu a bizmutu pri eutektickom zložení Bi 58 % a Sn 42 % s bodom tavenia 138 °C. V tejto práci je pozorovaný vplyv na spotrebu použitím tejto spájkovacej liatiny s 1 % prídavkom striebra a teda Sn42Bi57Ag1 od spoločnosti AIM.

V porovnaní so SnPb liatinou má nepravidelnú laminárnu štruktúru, vedúc ku slabšej mechanickej pevnosti spoja. Dôležitou charakteristikou cínovo-bizmutovej spájky je, že pri rastúcej teplote štruktúra liatiny hrubne a od 100 °C sa stáva spájka veľmi tvrdá. Tvrdenie je spôsobené zvýšením mriežkovej konštanty pridaním bizmutu do liatiny s čistou zložkou cínu. Jej tolerantnosť k nečistotám je pomerne nízka, ktoré v kontakte so spájkou pri procese letovania vytvárajú intermetalické zlúčeniny, oslabujúce štruktúru spájky. Ďalšou podstatnou vlastnosťou je slabé zmáčanie voči povrchom s medeným alebo niklovým základom. S nízkou teplotou tavenia prichádza aj problém pre aktiváciu určitých typov tavív a je zásadné určiť správne tavivo, ktoré je s ňou kompatibilné. Bi-Sn liatinu možno obohatiť o striebro a získať tak lepšie tepelno odolné vlastnosti. Pridaním ďalších rôznych kovov vznikajú vylepšené nízkoteplotné liatiny, ktoré sa radia do tzv. nízkoteplotných spájok druhej generácie. Nastávajúcou otázkou je získavanie bizmutu potrebného pre liatinu vzhľadom na fakt, že väčšina produkcie bizmutu zastupuje vedľajšia produkcia olova, čo je nepriamo kolidujúce s reštrikciami RoHS. [3]

Medzi nízkoteplotné spájky druhej generácie patria liatiny ako HRL1 a SBX02.

#### HRL1

HRL1 je ne-eutektická spájkovacia liatina cínu a bizmutu a s približne 2 % prídavných látok dosahuje 99 % tekutého stavu pri teplote 144 °C v závislosti od pomeru aditívnych zložiek. Prednosťami liatiny sú teplota tavenia a vysoká mechanickej pevnosť. Zaujímavou vlastnosťou je dobrá kompatibilita so spájkovacou liatinou SAC v takej miere, že pri vyššej teplote sa liatiny zmiešajú do liatiny s ešte lepšou mechanickej pevnosťou. [9, 10]

#### SBX02

Rovnako ako HRL1 aj SBX02 je mechanickej odolnejšia liatina, ktorá okrem tejto vlastnosti vykazuje dlhšiu životnosť a rezistenciu voči mechanickej a tepelnému stresu. Jej ďalšou výhodou vrátane nižšej teploty tavenia pod 140 °C je kompatibilita s väčšinou bežne používaných bezolovnatých povrchových úprav DPS. [9, 11]

## 1.5.4 Tavivá

Sú chemické zložky pozostávajúce z aktivátorov a rozpúšťadiel s cieľom prípravy spájkovacej plochy na kvalitné prevedenie spoja. Tavivo odstraňuje z miesta spájkovania nečistoty a oxidy zhoršujúce zmáčanie spájky a pevnosť spoja. Okrem čistenia tvoria aj ochrannú vrstvu pred ďalšou možnou oxidáciou vznikajúcou v dôsledku pôsobenia vysokej teploty a zlepšujú styčnú plochu, ktorá napomáha rovnomernejšej distribúcií tepla na rozhraní spoja. Delia sa do mnohých rozličných kategórií podľa ich zloženia a kompozície. Tieto charakteristiky sú určené normou ISO 9454-1 alebo J-STD-004. [1]

Tab. 1.1: Kategorizácia tavív podľa normy ISO 9454-1 [12]

Typ tavidla	Základ	Aktivátory	Kompozícia
1. Živicové	1. Kolofóniový 2. Bez kolofónie (syntetická živica)	1. Bez aktivátorov	A. Tekutá
		2. S halogenidmi	
		3. Bez halogenidov	
2. Organické	1. Rozpustný vo vode 2. Nerozpustný vo vode	1. Bez aktivátorov	B. Tuhá
		2. S halogenidmi	
		3. Bez halogenidov	
3. Anorganické	1. Slaný	1. S chloridom amonným	C. Pastová
		2. Bez chloridu amónneho	
	2. Kyslý	1. S kyselinou fosforečnou	
		2. Bez kyseliny fosforečnej	
	3. Zásaditý	1. S amíni a/alebo amoniakmi	

Aktivátory slúžia ako „podporné“ látky zlepšujúce reakčné pôsobenie taviva a zároveň eliminujú vznik možných rezíduí. Jednou z ich hlavných nevýhod je však zvýšená miera korózných vplyvov, ktorá spočíva v ich zložení a väčšinovom zastúpení, zároveň však pôsobia na celý proces priaznivo. Halogenidové aktivátory alebo aj soli halogenidovodíkových kyselín pôsobia agresívnejšie a zaisťujú tak lepšie zmáčanie spájky, no ochrana pred koróziou je podstatne nižšia.

Jednou z hlavných zložiek tavív sú aj rozpúšťadlá, slúžiace na uľahčenie práce pri aplikácii. Tieto látky sa odparujú pri nižšej teplote počas reakcie taviva, aby rozpúšťadlá neboli pri prechode predhrievaním prítomné. Môžu byť založené buď na báze alkoholu alebo na báze vody („VOC free“). „VOC free“ tavivá sú bez organických prchavých látok a sú väčšinou bezhalidové, vysoko aktívne a stabilné pri izbových teplotách. Ďalšie delenie tavív je členené podľa spôsobu ich čistenia. Delia sa na tavivá, ktoré možno čistiť s pomocou rozpúšťadla, tavivá, ktoré možno čistiť vodou a bezoplachové tavivá tzv. „no-clean“ tavivá.

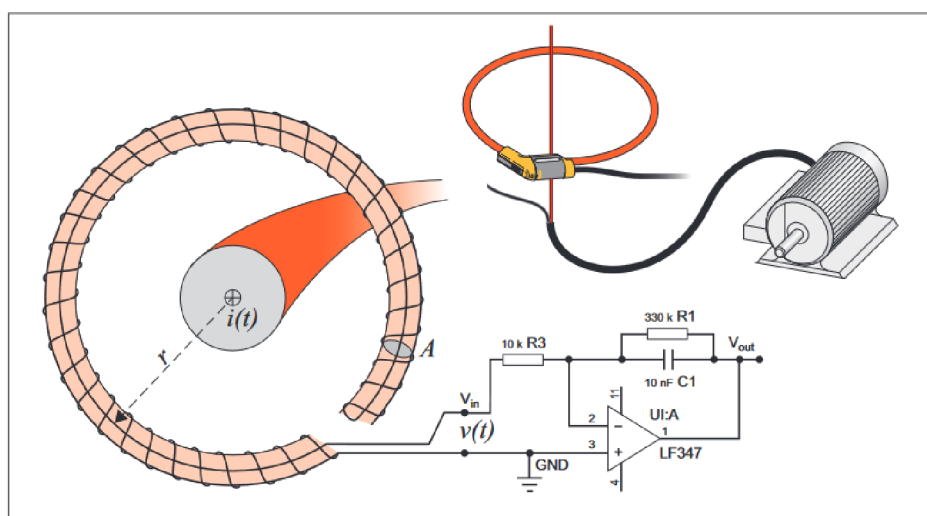
## 2 Metodika merania

Na meranie energetických vlastností zariadení je potrebné definovať základné pojmy. Výkon je veličina s jednotkou W – watt. Popisuje množstvo energie využívanej v danom okamihu pri funkcii stroja. Jednotka Wh – watthodina hovorí o celkovej spotrebovanej energii počas jednej hodiny. Pri stálom pracovnom výkone zariadenia, napríklad 5 kW počas dvoch hodín, bude spotrebovaná energia rovná 10 kWh. Na získanie informácií o spotrebe je potrebné zistiť o akom výkone merané zariadenie pracuje v daný moment. To možno zistiť pomocou odoberaného napätia a prúdu. Súčinom týchto veličín je výsledok elektrický výkon  $P$  [W].

$$P = U \cdot I \text{ [W]}. \quad (2.1)$$

### 2.1 Záznamník kvality trojfázového napájania Fluke 1738

Je merací prístroj určený na meranie výkonov elektrických zariadení so schopnosťou ukladania dát pre vytvorenie komplexnej analýzy elektrickej spotreby. Rovnako, ako vie merací prístroj vyhotoviť elektrickú štúdiu, je schopný vyhodnotiť aj kvalitu spotrebovanej energie, jej činnú a jalovú zložku. Meranie je možné nastaviť a prispôbiť podľa spôsobu napojenia sond, typu elektrickej siete a zároveň aj podľa typu záťaže pre konfigurácie trojuholníka alebo hviezdy. Na meranie sa používajú napäťové svorky, ktoré sa pripájajú priamo na svorky istiacich prvkov v rozvodnej skrini a prúdové slučky, ktoré sa upevňujú okolo prívodových vodičov na merané zariadenie.



Obr. 2.1: Rogovského cievka so zjednodušeným návrhom elektrického obvodu [13]

Prúdové slučky sú založené na princípe Rogovského cievky zobrazenej v obr. 2.1, sú to cievky toroidného tvaru bez feromagnetického jadra. Kvôli mechanickému prevedeniu cievky je ideálna na meranie výkonových obvodov a veľkých, strmých priebehov s nízkym rušením bez nutnosti odpojovania zariadenia. To je optimálne pre túto prácu z hľadiska merania primárne nábehových priebehov priemyselných strojov. Medzi negatíva cievky sa radí jej nutnosť byť sprevádzaná ďalšími zosilňovacími elektronickými obvodmi na dosiahnutie meraných údajov a presnosť merania priamo závisí na vzájomnej polohe cievky a meraného vodiča. [14] Nepresnosti merania sú však ošetrené samotným prístrojom a merané údaje sa môžu považovať za správne.

## 2.2 Zapojenie meracieho prístroja

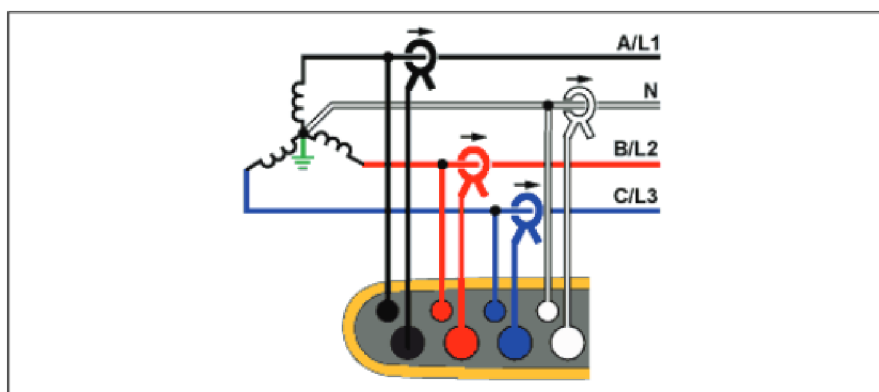
V závislosti od použitej napájacej siete je nutné nastaviť aj merací prístroj tak, aby sa vedel správne prispôbiť obvodu. Pred samotným zapojením prístroja na merané zariadenie je nutné v nastaveniach nastaviť režim meranej siete a režim merania. Prístroj má k dispozícii režim energetickej štúdie a režim záťažovej štúdie. Energetická štúdia spočíva v pripojení prúdových slučiek súčasne s napäťovými sondami na vyhotovenie komplexnej analýzy. Pri záťažovej štúdii postačujú len prúdové slučky a využíva sa na overovanie správnosti funkcií zariadení. [13]

V ďalšom kroku je nutné nastaviť typ meranej siete. Väčšie spájkovacie stroje sú napájané trojfázovým napájaním 3x230/400V zo siete TN-S. Napájacia sieť je popísaná tromi písmenami vychádzajúcimi z francúzštiny kde:

1. písmeno – popisuje uzol zdroja a jeho spojenie so zemou, teda či je izolovaný od zeme (I – „Isolé“) alebo uzemnený (T – „Terre“),
2. písmeno – hovorí o spojení neživých častí zariadení a prvkov s uzemňovacím bodom siete (N – „Nutre“) alebo s uzemnením určitého bodu siete (T – „Terre“),
3. písmeno – definuje spôsob prevedenia zapojenia stredného vodiča a jeho kombináciu s ochranným vodičom (C – „Combiné“) alebo oddelenie od ochranného vodiča (S – „Separé“). [15]

Pri zvolenom spôsobe napájania siete je nutné zvoliť typ konfigurácie záťaže oproti ostatným fázam, teda buď trojuholník, alebo hviezda. Podľa odporúčaní od výrobcu je pre naše meranie najvhodnejšia konfigurácia hviezdy. Na záver sa merací prístroj pripojí na zariadenie a spúšťa sa zaznamenávanie.

Okrem meracieho záznamníka Fluke 1738 bude používaný aj kliešťový ampérmeter Fluke 325, s ktorým sa budú určovať okamžité hodnoty záťaže prístrojov pomocou výpočtu výkonu z prúdu a napätia.



Obr. 2.2: Spôsob napojenia meracieho prístroja [13]

V prípade merania bez záznamníka Fluke 1738 bude meranie prevedené pomocou kliešťového ampérmetra Fluke 325. Dôvodom je obmedzený prístup ku napäťovým svorkám zariadenia. Ako napätie pre výpočet sa použije menovitá hodnota napätia uvedená výrobcom na popisnom štítku stroja.

Tento spôsob merania nie je celkom presný ako s pomocou záznamníka Fluke 1738 vzhľadom na fakt, že prevádzkové napätie môže v jeho hodnotách mierne kolísť. Miera rozpätia sa pohybuje v úrovni  $\pm 5$  V, čo na výsledný výkon pôsobí najnižšou odchýlkou a na konečnú hodnotu výkonu bude vplývať minimálne. Súčtom vypočítaných výkonov jednotlivých fáz v prípade trojfázového napájania zariadenia bude dosiahnutý konečný výkon, ktorý zodpovedá výkonu meraného zariadenia.

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \text{ [W]}. \quad (2.2)$$



## 2.3 Meranie tepelnej emisivity spájkovacích strojov

Na zospájkovanie spoja je potrebné, aby stroj dosahoval interných teplôt do 300 °C. Teplo sa samé o sebe šíri tromi mechanizmami. S ich pomocou sa generované teplo ale uvoľňuje do okolitého priestoru, čo vedie k značným tepelným stratám. Mechanizmy prenosu tepla sú:

- radiácia – inak ako aj sálanie je šírenie tepla emisiou elektromagnetického žiarenia;
- konvekcia – alebo aj šírenie tepla prúdením, teplo sa prenáša kvapalinami a plynmi pohybom vynúteným zmenou hustoty pri zmene ich teploty;
- kondukcia – vedenie tepla spočíva v predávaní kinetickej energie vzájomnými zrážkami častíc pevných látok, teplo teda prechádza z teplejších častí objektu do chladnejších.

Zabránením úniku týchto strát a koncentrovaním tepelnej energie na spoje DPS je možné zásadne zefektívniť samotný proces spájkovania. Použitím termokamery Fluke VT02 bude možné nahliadnuť na časti stroja, ktoré sú pre únik tepla najviac kritické.

Vďaka získaným údajom z merania sa bude dať určiť aj približné množstvo uniknutého tepla zo zariadení, ktoré napovedá o celkovej účinnosti strojov. Na určenie tepelnej emisivity stroja je na začiatku dôležité pomenovať hlavné mechanizmy unikajúceho tepla. Pozorované teplo, ktoré sa uvoľňuje do prostredia je vedené primárne konvekciou a radiáciou. Ďalší krok je stanovenie vzorcov potrebných pre vypočítanie množstva uniknutého tepla. Na vypočítanie tepelných strát radiáciou bude použitý Stefan-Boltzmanov zákon sivého telesa. Pre straty vznikajúce konvekciou sa v odbornej literatúre nachádza množstvo rôznych vzorcov na výpočet tepelného prenosového koeficientu. Kvôli jednoduchosti a všestrannosti budú použité pre výpočet vzorce od troch rôznych autorov. Priemerom týchto výsledných výpočtov sa získa približná hodnota výkonu tepelného úniku. [16]

### 2.3.1 Výpočet tepelných strát konvekciou

Koeficienty tepelného prenosu sú určené podľa vzorcov Mc Adamsa, C. Kinga a F. Michajeva. Koeficient tepelných strát podľa Mc Adamsa:

$$\alpha_{kA} = 1,78 \cdot \Delta t^{0,12} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]. \quad (2.3)$$

Koeficient tepelných strát podľa C. Kinga:

$$\alpha_{kK} = 1,51 \cdot \Delta t^{0,33} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]. \quad (2.4)$$

Koeficient tepelných strát podľa F. Michajeva:

$$\alpha_{kM} = 1,55 \cdot \Delta t^{0,33} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]. \quad (2.5)$$

Výsledný tepelný výkon odvedený konvekciou:

$$q_t = \alpha_k \cdot (t_1 - t_2) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^2], \quad (2.6)$$

kde:

$\alpha_k$  – prenosný koeficient konvekcie  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ ,

$t_1$  – teplota vzduchu  $[^\circ\text{C}]$ ,

$t_2$  – teplota povrchu  $[^\circ\text{C}]$ . [16]

### 2.3.2 Výpočet tepelných strát radiáciou

Spájkovací stroj nielen elektromagnetické žiarenie vyžaruje, ale ho i pohlcuje. Avšak jeho koeficient absorpcie nie je ideálny ako pri čiernom telese a tak je považované za „sivé teleso“. Sivé teleso má povrch, pre ktorý je emisivita konštantná (menšia než 1) v určitom rozsahu spektrálneho pásma. [17] Intenzita radiácie sivého telesa je vypočítaná podľa Stefan–Boltzmannovho zákona:

$$I = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_s^4 \quad [\text{W}]. \quad (2.7)$$

Následne je intenzita radiácie okolia odčítaná od intenzity sivého telesa. Vzorec pre výpočet tepelného stratového výkonu radiáciou je vyrátaný teda podľa:

$$I = (\sigma \cdot \varepsilon_s \cdot T_s^4) - (\sigma \cdot \varepsilon_t \cdot T_t^4) \quad [\text{W}], \quad (2.8)$$

kde:

$\varepsilon_s$  – emisivita sivého telesa [-],

$\varepsilon_t$  – emisivita okolia [-],

$T_s$  – termodynamická teplota sivého telesa [K],

$T_t$  – termodynamická teplota okolia [K],

$\sigma$  – Stefan-Boltzmanova konštanta  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ .

### 2.3.3 Výpočet celkových tepelných strát

Týmito výpočtami bola určená strata tepla len v jednom bode, ale pre určenie celkového množstva strát je potrebné výsledné hodnoty sčítať a premietnuť ich do plochy generujúcej teplo. Z vyrátaných hodnôt je pre jednotlivé typy vzorcov je možné dopočítať výsledný tepelný stratový výkon podľa vzorca:

$$Q = S \cdot (I + q_t) \quad [\text{W}], \quad (2.9)$$

kde:

$I$  – intenzita radiácie sivého telesa [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$q_t$  – tepelný stratový výkon spôsobený konvekciou [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$S$  – plocha stroja emitujúca teplo [ $\text{m}^2$ ].

Následným spriemerovaním výsledných hodnôt vypočítaných podľa prenosových koeficientov Adamsa, Kinga a Michejeva bude dosiahnutá približná hodnota výkonu tepelných strát:

$$Q = \frac{(Q_A + Q_K + Q_M)}{3} \quad [\text{W}], \quad (2.10)$$

kde:

$Q_A$  – tepelný stratový výkon podľa koeficientu Mc Adamsa [ $\text{W}$ ],

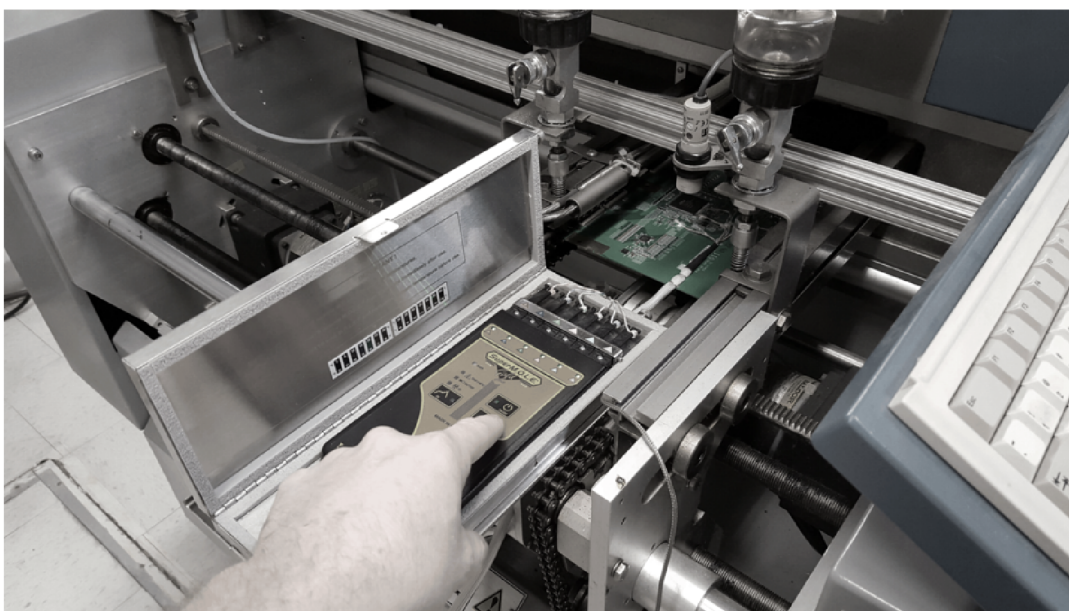
$Q_K$  – tepelný stratový výkon podľa koeficientu C. Kinga [ $\text{W}$ ],

$Q_M$  – tepelný stratový výkon podľa koeficientu F. Michejeva [ $\text{W}$ ]. [16]

## 2.4 Meranie teplotného profilu

Aby bolo možné porovnať vplyv teplotných profilov na energetickú spotrebu, bude nutné zmerať konfiguráciu a vlastnosti vybraných profilov. Pre meranie profilu je použitý teplotný profiler ECD Super M.O.L.E. Gold 2. Je to 6 kanálový záznamník teploty, ktorý odoberá údaje z termočlánkov prilepených zvyčajne kaptonovou páskou na DPS. Vďaka tomuto meraniu je schopné presne doladiť teplotný profil spájkovacieho stroja pre vlastné potreby. Okrem údajov o aktuálnej teplote prístroj poskytuje údaje o strmosti zmien teplôt a čase nad TAL alebo množstve tepla predanom za daný časový interval.

Po nalepení termočlánkov na vybrané časti DPS, sa články pripoja do aktívneho profileru, ktorý je následne vložený do tepelného krytu. Zostava DPS a záznamníku je uložená na dopravník až do prechodu spájkovacím zariadením. Po vyňatí profileru sú namerané dáta stiahnuté pre ďalšiu analýzu zmeraného profilu. Príklad výstupného profilu možno vidieť v prílohe A.9.



Obr. 2.3: Umiestnený teplotný záznamník Super M.O.L.E. Gold 2 na dopravník pretavovacej pece [18]

## 3 Dosaiahnuté výsledky meraní

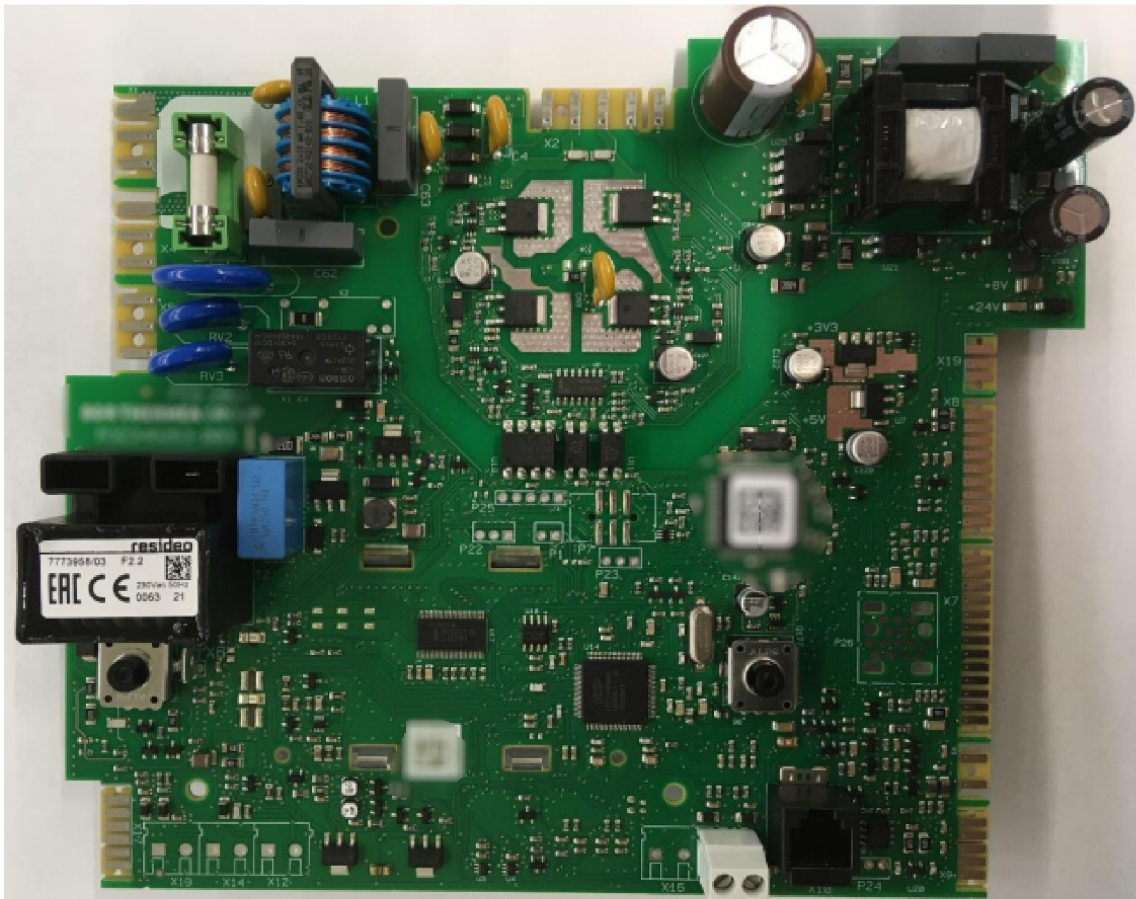
### 3.1 Kapacitná priechodnosť linky

V spoločnosti Resideo je priechodnosť produktov riešená s pomocou výpočtového programu, ktorý na základe celkových zaznamenaných údajov navrhuje, aký produkt sa musí v daný okamih zložiť. Systém zohľadňuje dostupnosť materiálov, jednotlivé časy práce strojov, momentálnu potrebu a mnoho ďalších faktorov. V závislosti od nich zároveň optimalizuje čas za aký produkt linkou prejde, aby vyťaženosť strojov bola maximálna. To znamená, že rovnaký produkt nemá vždy presný výrobný čas lebo v závislosti od prechodu predchádzajúceho a nasledujúceho produktu v poradí sa tento čas mení. Optimalizácia priechodnosti je prevádzaná pomocou zásobníkových systémov, kde sa dosky dočasne odoberajú z procesu výroby a vkladajú naspäť do obehu v prípade očakávaného a neočakávaného prestoja funkčného celku. Systém ukladania produktu a následného využitia počas prestoja na udržanie maximálnej efektivity produkcie sa nazýva ako tzv. „buffering“.

Čas produkcie je závislý nielen od nastavenia strojov, ale zahŕňa aj ľudský faktor, líšiaci sa širokospektrálne podľa skúseností, únavy a množstva ďalších vplyvov. Pri meraní času práce operátora v priebehu niekoľkých dní sa zistilo, že čas je veľmi nekonzistentný a nedá sa presne určiť jeho stabilný medián. Preto práca vykonávaná operátormi bude len súčasťou analýzy priechodnosti z priemeru pracovných časov zaznamenaných počas jedného dňa.

Údaje o priechodnosti budú zjednodušené odobraním „buffrovacích“ systémov a počítaním len s čistým pracovným časom. Pôjde o teoretickú linku s perfektným stavom, kde nedochádza k prestojom a odstávkam.

Z časových údajov a analyzovaných dát bude určená výrobná cena, ktorá bude čisto podliehať cenám energií. Určenie priechodnosti je pre túto prácu významné nakoľko vypočítaná výsledná cena bude porovnávaná s predpokladanými cenami riešení pre určenie ich samotnej výhodnosti. Pozorovanie priechodnosti poskytuje taktiež lepší pohľad na detaily samotného procesu.

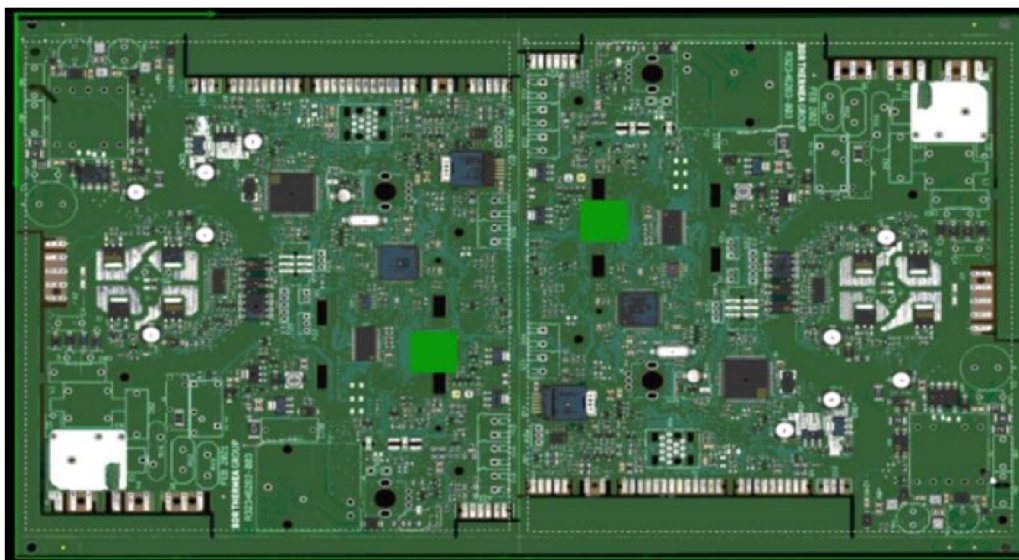


Obr. 3.1: Osadená doska produktu „X“

Priechodnosť linky bude pozorovaná na jednom konkrétnom produkte. Kvôli ochrane súkromného majetku bude označovaný ako produkt „X“. Produkt „X“ je kombinovaná DPS s použitou technológiou ako aj SMT tak i THT a prechádza každým pracoviskom výroby. Vďaka tomu bude možné spozorovať vplyv jednotlivých zmien vo výrobnom procese na kompletnej škále. Jej povrchová úprava vodivých ciest je tvorená pomocou teplovzdušného vyrovnania spájky alebo inak aj HAL. Doska pozostáva zo 471 SMT súčiastok a 26 THT súčiastok.

### 3.1.1 Priechodnosť produktu X

Pred samotným začiatkom montáže dosky sa na DPS naliepa vytlačený štítok, aby bol produkt zaevidovaný v trasovacom a databázovom systéme. Doska je v tomto bode je súčasťou veľkého kusu laminátu FR-4, na ktorom sa nachádzajú spojené 2 DPS rovnakého produktu. Tento krok prebieha v rámci prípravy produktu mimo produkčnej linky.

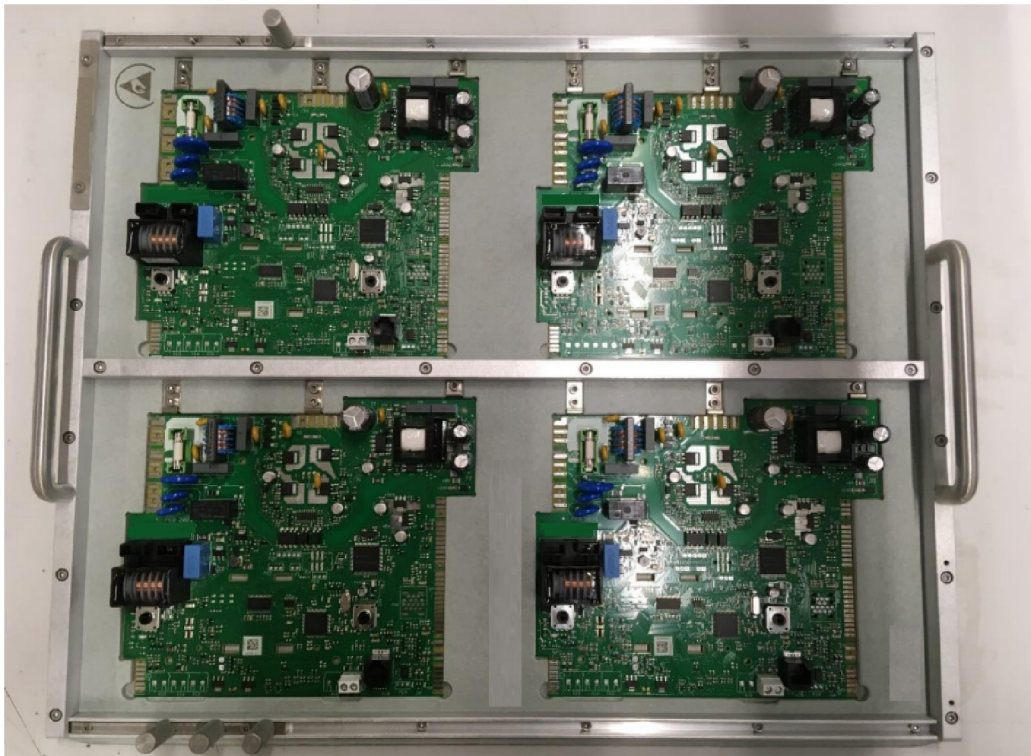


Obr. 3.2: DPS vo forme panelu

V procese montáže je doska umiestnená do vykladača DPS na začiatku SMT linky podľa obrázku 1.1. Po vyložení prechádza doska čističkou a ďalej do tlačiaceho stroja spájkovacej pasty, kde sa pomocou šablóny prenáša pasta na vodivé plôšky DPS. Následne sa skontroluje kvalita nanosenia pasty v testovacom stroji SPI a po úspešnej kontrole sa začína samotná montáž. Osadzovacie automaty s kruhovými hlavicami metódou „pick & place“ ukladajú komponenty na DPS. Na jednom stroji pracujú súčasne 2 osadzovacie hlavice. Táto montáž je rozdelená medzi 3 rovnaké osadzovacie stroje, tak aby čas každého stroja potrebný na osadenie určenej časti bol rovnaký. Osadená DPS prechádza ďalej do pretavovacej pece nastavenej na profil RSS. Spájkovacia pasta sa roztaví a vzniká mechanický spoj medzi plôškami DPS a jednotlivými súčiastkami. Na konci linky je DPS skontrolovaná AOI testerom pre kontrolu správnosti zospájkovania a pri úspešnom teste pokračuje doska na THT linku.

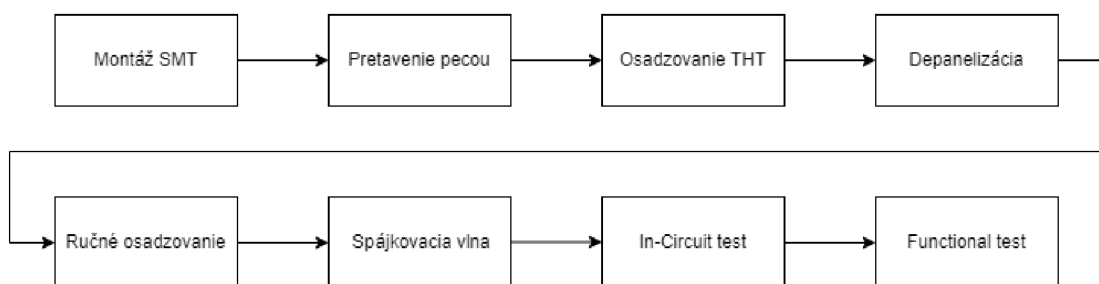
Osadzovací stroj THT najprv osadzuje, zvierá a zastriháva („cut & clinch“) vývody súčiastok, aby sa nevyklonili alebo nevypadli pri manipulácii. Potom doska prechádza ručným osadzovacím pracoviskom, kde operátor depanelizuje DPS a 2 páry

dosiek rozloží do rámu určeného pre spájkovanie vlnou. Zároveň umiestňuje aj rozmerovo atypické súčiastky ako napríklad veľké transformátory alebo relé. Keď sú dosky pripravené, rám je umiestnený na dopravník smerujúci do spájkovacej vlny.



Obr. 3.3: DPS uložené v rámoch pre spájkovaciú vlnu

Po zospájkovaní vlnou operátor skontroluje kvalitu spoja a uloží dosku do police. Rám použitý na spájkovanie sa odnáša k čističke, aby mohol byť znova použitý. Z police operátor umiestňuje dosky do ICT testera a potom FCT testera. Ak DPS spĺňa všetky výsledné požiadavky je umiestnená na proti-ESD podnos a do krabice. Krabica sa zabalí a produkt je pripravený na expedíciu.



Obr. 3.4: Montážny postup pozorovaného produktu



## Výsledná priechodnosť

Pre určenie celkového času výroby je nutné zmerať jednotlivé časy cyklov zariadení pre každý z procesov. Následne sa vypočíta čas pre dosku od momentu začiatku výroby až po jej koniec.

Tab. 3.1: Namerané hodnoty cyklových časov zariadení s prepočítaným časom produkcie na dosku

Názov zariadenia	Funkcia	čas práce [s]	poznámka
ASYS VEGO Compact BLO 03	Nakladač DPS	5,00	
ASYS VEGO Compact BCO 01	Dopravník	2,00	
Teknek smt2017	Čistička dosiek	1,00	Prechod DPS
ASM DEK NeoHorizom 01IX	Aplikátor pasty	14,30	
ASYS VEGO BCO 01	Dopravník	2,00	
Koh Young KY8030-3	SPI	15,20	
ASM Siplace SX2	Osadzovací stroj SMT	66,50	
ASM Siplace SX2	Osadzovací stroj SMT	66,50	
ASM Siplace SX2	Osadzovací stroj SMT	66,50	
ASYS VEGO Compact BCO 02	Dopravník	2,00	
Ersa Hotflow 4/20	Pretavovacia pec	345,00	
ASYS VEGO Compact BCO 01	Dopravník	2,00	
Koh Young Zenith	AOI	20,35	
ASYS VEGO Compact BUL 03	Vykladač DPS	10,00	
ASYS VEGO Compact BLO 03	Nakladač DPS	5,00	
Fuji sfab-D	Osadzovací stroj THT	15,00	
ASYS VEGO Compact BUL 03	Vykladač DPS	10,00	
Operátor	Depanelizácia	27,00	2 panely
Operátor	Osádzanie	87,60	4 DPS naraz
Ersa Powerflow	Spájkovacia vlna	225,00	4 DPS naraz
ICT testovacie zariadenie	ICT	58,00	1 doska
FCT testovacie zariadenie	FCT	112,00	1 doska
Operátor	Obsluha testov	20,00	
Celkom		1177,95	

V skutočnosti sa neprodukuje len jedna doska, ale niekoľko a preto priechodnosť produktu popisuje cyklový čas produktu. Tento čas definuje interval od momentu dokončenia výroby jednej dosky až po dokončenie výroby druhej. Na dosiahnutie najvyššej priechodnosti je potrebné, aby každý cyklus výrobného procesu trval rovnako dlho. Lenže každé zariadenie má inú funkciu a čas vykonania svojej úlohy,

preto sú tieto linky obmedzené článkom najpomalšej produkcie alebo takzvaným „bottleneckom“. Meraním cyklových časov produktu pre jednotlivé pracoviská sa dá určiť výsledná priechodnosť na počet dosiek za hodinu. Čas cyklu v prípade výstupu viacerých DPS naraz ako to je na pracovisku SMT vo forme panelov alebo THT vo forme rámov je potrebné rozdeliť počtom výstupných dosiek v jednom cykle. To znamená rozdelenie časových cyklov pri paneloch dvakrát a pri rámoch štyrikrát, aby bol dosiahnutý čas cyklu na jednu dosku.

Tab. 3.2: Vypočítaná hodnota výslednej priechodnosti produktu X

Pracovisko	Čas cyklu [s]	Priechodnosť [kus/h]	Bottleneck
SMT linka (panel)	67,0	107	Osadzovací stroj
THT linka (rám)	88,6	163	Ručné osadzovanie
Testovacia bunka (doska)	115,0	31	FCT

Podľa zmeraných časov v 3.1 síce najdlhšie trvá samotné spájkovanie, ale stroj je schopný letovať niekoľko dosiek súčasne. Preto je chod linky obmedzený najdlhšie pracujúcim článkom po 1 kuse celku, teda 1 panely v prípade pracoviska SMT, 1 ráme pri THT alebo 1 dosky v testovacej bunke.

Spôsob prevedenia výrobného procesu ako jednotný súvislý tok produktu je nazývaný aj ako OPF teda „One Piece Flow“. Pri zanedbaní buffrovacích systémov je možné vidieť, že v spôsobe OPF je chod tejto linky veľmi nevyrovnaný. Celková produkcia je brzdená hlavne testovacími zariadeniami. Zrýchlenie testovacích zariadení by bolo možné prípadnou zmenou komunikačného rozhrania alebo implementovaním rýchlejších spínacích obvodov. Najjednoduchšie riešenie, ktoré je fyzicky uplatnené, je aplikácia viacerých testovacích zariadení. S použitím 3 testovacích buniek (ICT spoločne s FCT) sa výsledná priechodnosť lineárne strojnásobí na 93 kusov/h, čo už viac zodpovedá produkcii predchádzajúcich článkov. Pridaním 4. testovacej bunky by priechodnosť testov 124 kusov/h by presiahla maximálnu priechodnosť SMT linky. Tým by bola priechodnosť obmedzená SMT linkou na 107 kusov/h. Procesy SMT linky sú natoľko optimalizované, že priestor na ďalšie zlepšenie je minimálny. Na THT pracovisku je priechodnosť pomerne vysoká, avšak je nutné zväžiť spomínaný ľudský faktor. Výpočet je vykonaný s priemernou hodnotou cyklového času operátora, a teda čas môže byť niekoľkonásobne dlhší alebo značne kratší. Vo všeobecnosti sa predpokladá s dlhším cyklovým časom už len kvôli drobným stratám času z pohľadu ľudských potrieb alebo inej práci, ktorú operátor súčasne vykonáva – napríklad skladanie baliacich krabíc či manipulácia so spájkovacími rámami.

## 3.2 Energetická spotreba

Pre určenie veľkosti pracovného výkonu linky je nutné najprv poznať merané stroje a oblasť najväčšieho vplyvu merania. Niektoré z údajov o výkone sú dostupné v dokumentačných listoch alebo inak aj „datasheetoch“. Ostatné stroje, ktoré tieto parametre nemajú špecifikované, bude potrebné meraním zistiť.

Presné spotreby pece, nanášadla pasty a osadzovacích automatov nie sú v listoch uvedené z dôvodu vysokej závislosti veľkosti spotreby od samotnej zaťažnosti stroja.

Vzhľadom na všetky spomínané zariadenia vypísané v kapitole 3.1 na základe logického úsudku je očakávané, že najviac na spotrebu linky budú vplývať spájkovacie stroje, teda meranie bude primárne sústredené na pretavovaciu pec a spájkovaciu vlnu. Pre lepšie porovnanie vlastností boli analyzované aj ďalšie spájkovacie zariadenia s rôznym spôsobom konštrukčného prevedenia a systémovým nastavením. Cieľom meraní je pozorovanie výkonových priebehov zariadenia pri zapnutí, funkcií v aktívnom režime, vypnutom režime a prípadnom „stand by“ režime, kedy je zariadenie aktívne a výhrevné systémy pracujú na obmedzený výkon s cieľom úspory funkčných častí stroja a čiastočne aj energii. Po meraní zariadení v približne týždňových intervaloch boli dosiahnuté nasledovné údaje.



Obr. 3.5: Pripojený záznamník Fluke 1738 na spájkovaciu vlnu

### 3.2.1 Analýza spotreby pretavovacích pecí

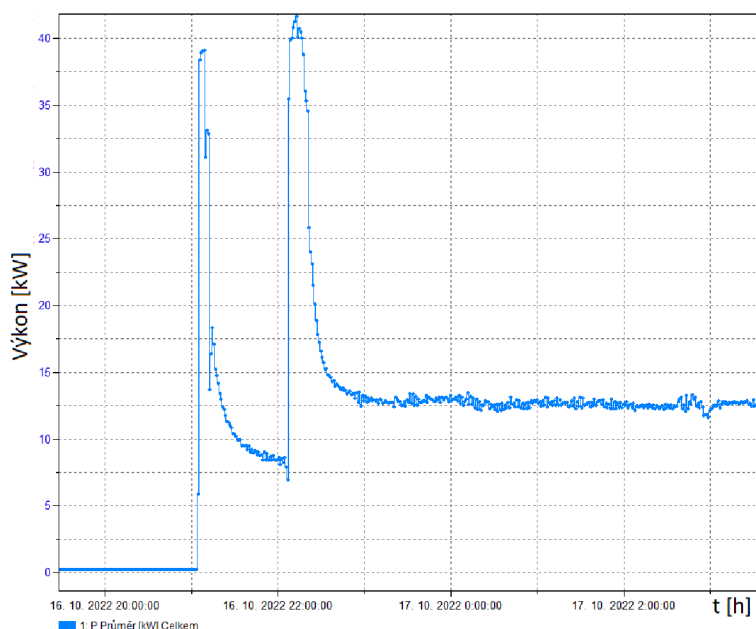
#### Ersa Hotflow 4/20

Je 24 zónová konvekčná pretavovacia pec so 4 zónami vyhradenými na chladenie. Podľa dokumentácie má pec pracovný výkon 10 – 15 kW. [19] Podľa merania sa tieto hodnoty s nameranými stotožňujú s konkrétnou priemernou hodnotou výkonu 12,95 kW. Zariadenie disponuje nastavitelným tzv. „stand-by“ režimom, ktorý slúži na udržanie pracovnej teploty pri dočasnej neaktivite linky. Keďže táto pec pracuje nepretržite okrem víkendov, je nastavenie tohto režimu na udržiavanie teploty o 5 °C nižšej počas nečinnnej doby linky presahujúcej 30 minút. Pre toto meranie je táto zmena nepozorovateľná a kvôli nepretržitej prevádzke nie je možné experimentálne zmerať inú teplotu režimu.

Pri pol hodinovej neaktivite nastupuje pokles teploty v peci celkom rýchlo, opätovné zahriatie by spotrebovalo podstatne viac energie a zabralo by veľa času, počas ktorého by sa nemusela prerušiť výroba.

Podľa prílohy A.1 sú označené jednotlivé body priebehu merania. Každý z bodov vysvetľuje k nemu pridelený dej a odozvu zariadenia na túto situáciu.

V bode 1 dochádza k odstávke stroja na víkend, kedy sa nepracuje. Zároveň sa v tom istom čase konala aj servisná odstávka prívodu elektriny a preto nie je evidovaný žiadny výkon stroja. Spájkovacia pec je riadená PLC ovládačmi prepojenými s počítačom, ktorý je počas vypnutého stavu pece stále aktívny a pracuje konštantným výkonom 193 W.

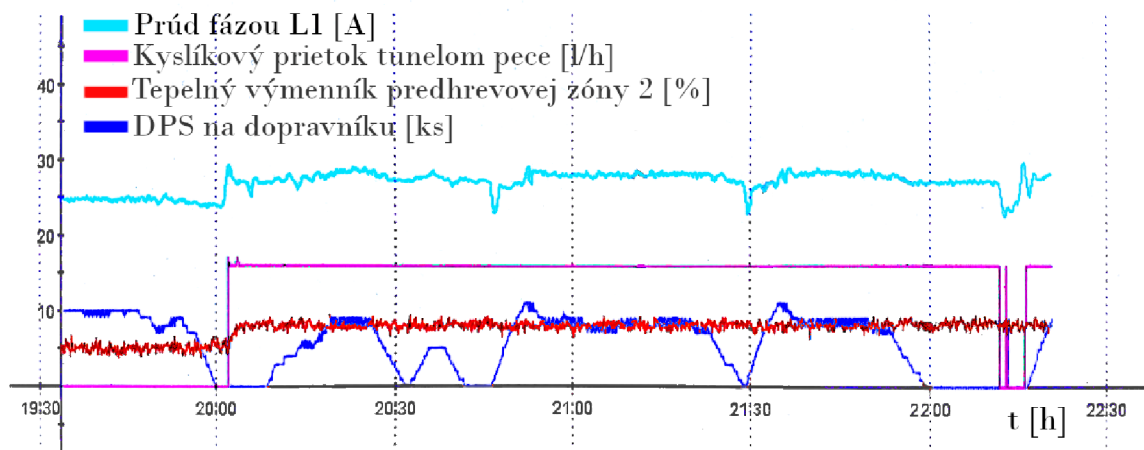


Obr. 3.6: Približený detail výkonového priebehu uvedenia zariadenia Ersas Hotflow 4/20 do prevádzky

Pri nábehu zapnutia pece je možné na obrázku 3.6 vidieť 2 ostré špičky výkonu zariadenia, ktoré siahajú na úroveň približne 40 kW v nadväznosti na menšiu špičku, nasledujúcu krátko po nej. Dôvodom je, aby pri zapnutí pece nedochádzalo k prudkej prúdovej špičke, ktorá by inak spôsobila aktiváciu bezpečnostných prvkov a následne výpadok prívodu energie do stroja. Pri ohreve sa najprv zapína polovica ohrevných zón a následne sa spustí druhá polovica zón. Podľa dokumentácie nominálny výkon môže dosahovať až výkonu 90 kW pri súbežnom spustení výhrevných systémov [19].

V bode 3 po spustení prebieha pravidelná týždenná údržba pece. Zariadenie sa vypína a počas jeho vypnutia sa spúšťa zároveň aj chladiaci „cool down“ režim, ktorý zabezpečuje plynulý pokles teploty vypnutej pece. Po ukončení údržby sa pec znovu spúšťa a začína sa na nej prevádzka.

Bod 4 je vnútorný proces stroja, ktorý využíva tepelné výmenníky a presun plynu na čistenie inertného plynu. Aktiváciou dvoch teplotných výmenníkov a uvoľnením kyslíkového ventilu dochádza k rozloženiu nečistôt a ich následnému odsatiu zo zariadenia. Pri tomto procese dochádza k zníženiu nastavenej teploty, ktorá je ošetrená tepelným výmenníkom. Operácia je riadená samotným strojom s možnosťou úpravy funkcie. Deje sa nezávisle od času alebo momentálnej produkcie. Kvôli tepelným telesám a riadeniu ventilov je výkon v tomto momente vyšší v porovnaní s bežným chodom. Tento proces je zachytený na záznamníku samotného stroja, v ktorom je možné pozorovať stavy a údaje rozličných častí. Prúd fázou L1 [A] a jeho náhly nárast potvrdzuje zvýšenie pracovného výkonu stroja. Výkon tepelného výmenníku je udávaný v [%] a údaj hovorí o jeho pracovnej vyťaživosti.



Obr. 3.7: Priebeg procesu čistenia tunelu od tavivových zbytkov z inertnej atmosféry

Vznik väčšiny ostrých špičiek výkonu, obzvlášť pod bodmi 5, spôsobuje manipulácia so strojom vo forme určitého zásahu do zariadenia alebo jeho zastavenie. Pec sa vychladí pod jej bežnú teplotu a snaží sa čo najrýchlejšie s pomocou PID regulátora dosiahnuť požadovanú prevádzkovú teplotu.

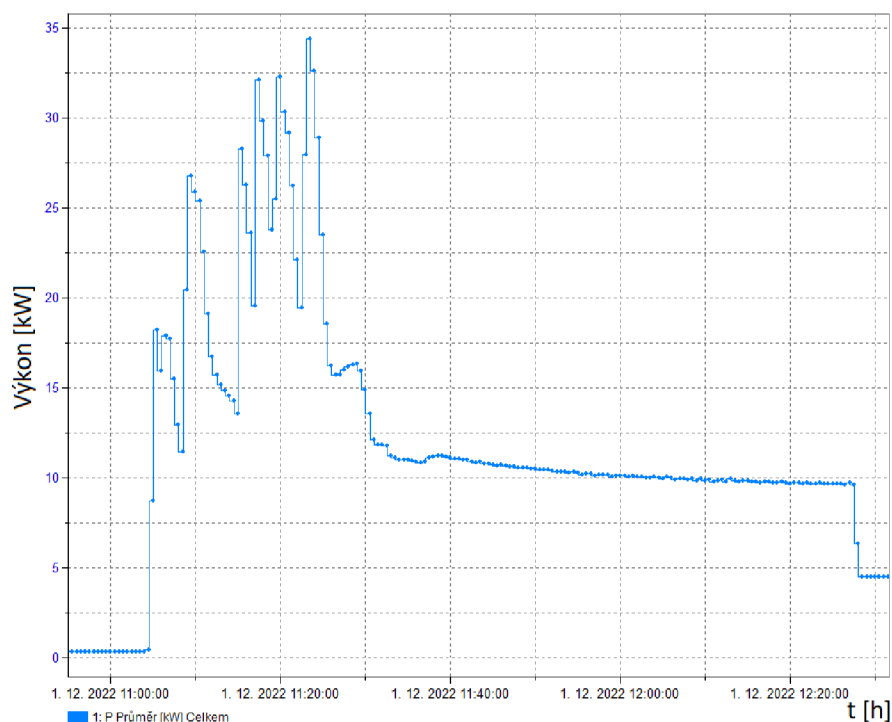
Body 6 predstavujú ochladzovací režim. Tento režim sa aktivuje vždy pri vypnutí pece, aby zabezpečil rovnomerný priebeh chladenia pece. Na výhrevné telesá a materiály v peci je následne vyvíjaný menší teplotný stres a predlžuje sa tak celková životnosť stroja. Tento režim však môže byť zastavený, ako je možné vidieť na bode 6 vľavo.

## Heller 1812EXL

Táto pec v porovnaní s pecou Ersa je rozmerovo menšia s menším počtom výhrevných telies a preto jej spotreba je taktiež nižšia. Na tomto zariadení bol zároveň pozorovaný vplyv rôznych teplotných profilov na energetickú spotrebu, konkrétne pre nízkoteplotnú spájkku SnBiAg, bezolovnatú SAC a pre lepidlo. Pre túto pec sa nevyužíva tzv. stand by režim kvôli jej minimálnej prevádzke s malým množstvom produktov. Prvý bol pozorovaný profil lepidla.

Podľa prílohy A.2 v bode 1 možno pozorovať funkciu „cool down“ režimu a odlišnosti jeho funkcie oproti peci Ersa. V ďalšom bode 2 sa nachádza zapnutie pece a jej ohrev na teplotu pre profil lepidla.

Rozdiel je pozorovateľný obzvlášť pri samotnom nábehu pece. Zatiaľ čo pec Hotflow 4/20 má zabezpečený ohrev rozdelením do dvoch častí, pec Heller disponuje 6 odlišnými časťami. Spúšťanie pece prebieha postupne po každých 2 fázach horného a dolného ohrevu, teda štyroch výhrevných zónach dokopy. Po dosiahnutí požadovanej teploty aktívnych fáz sa zopnú ďalšie 4 fázy, ktoré sa začnú ohrievať. Počas celého procesu, fázy, ktoré boli nahriate na požadovanú teplotu, si ju naďalej udržujú. Keď sú všetky fázy zahriate na správnu teplotu, môže sa spustiť prevádzka.



Obr. 3.8: Priblížený detail výkonového priebehu uvedenia zariadenia Heller 1812EXL do prevádzky

## 3.2.2 Analýza spotreby spájkovacích vln

### Vitronics Soltec Delta 5

Je spájkovacia vlna využívajúca liatinu SN100C. Zariadenie disponuje nočným režimom, pri ktorom udržuje teplotu spájkovacej vane na približne na 200 °C. Pri spájkovaní vlnou je požadované, aby sa roztavená liatina udržiavala vo svojom skupenstve. V prípade zatuhnutia spájky je fyzikálne dané, že bude potrebné vynaložiť viac energie na zmenu skupenstva ako na jeho udržanie. Predhrievanie spájkovacej vlny je vybavený infračerveným predhrievačom pomocou kremennej lampy a konvekčným ohrevom z výhrevných telies. Ďalšie vlny vykazujú oproti peciam rozdiel v tom, že predhrievač, čerpadlo pre vlnu a ohrev spájky pracujú až v momente, kedy nabieha rám s DPS do stroja. To spôsobuje veľkú nerovnomernosť pracovného výkonu zariadenia. V intervaloch medzi rámami sa udržuje určitý stabilný režim, od ktorého je možné rýchlo dosiahnuť požadované pracovné podmienky.

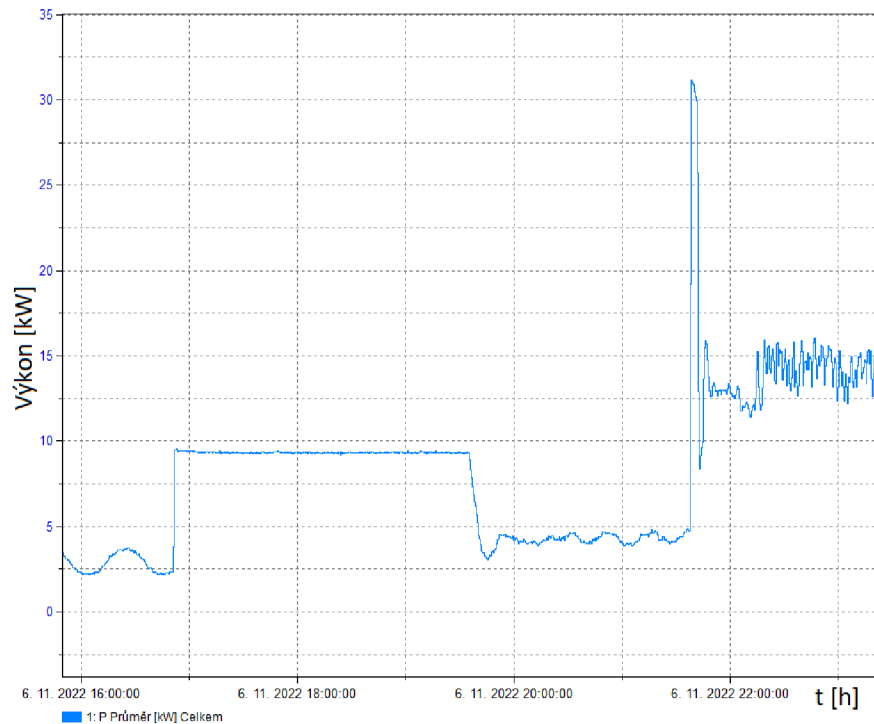
Priemerná hodnota pracovného výkonu počas funkcie je 12,9 kW. V prílohe A.3 je zobrazený priebeh jej výkonovej funkcie s niekoľkými úkazmi.

Špičky s označením bodu pod číslom 1 sú momenty, kedy dochádzalo k technickému zásahu alebo manipulácií so strojom a po následnej operácií bol stroj uvedený naspäť do chodu, čo malo za výsledok ostrý nábeh výhrevných telies na pracovnú teplotu.

Pod bodom 2 v prílohe je zaznamenaný výkon stroja počas samotnej údržby, kde sa predpokladá krátky zásah do zariadenia v aktívnom režime výroby. Spájkovacia vlna udržuje stálu teplotu pomocou hysterézy nastavenej na pracovnú teplotu. Počas údržby je zariadenie otvorené a únik tepla je podstatne rýchlejší, frekvencia hysteréznej funkcie je teda úmerne väčšia. Kvôli nastavenej pracovnej teplote je spotreba v porovnaní s priebehom v bode 3 taktiež vyššia.

V bode 3 je aktivácia nočného režimu, pri ktorom dochádza k nahrievaniu spájkovacej vane na teplotu 200 °C. Proces nahrievania vane je rovnako regulovaný pomocou hysteréznej funkcie, ktorej priemerný výkon je 2,98 kW. Následne sa v momente začiatku prevádzky spájkovacia vlna pomocou časovača nahreje na pracovnú teplotu a začne prebiehať výroba. K nahrievaniu vane na pracovnú teplotu dochádza v bode 4, kde sa zohreje vaňa na teplotu 265 °C.





Obr. 3.9: Priblížený detail na pre nahriatie spájkovacej vane a spustenia zariadenia Vitronic Soltec Delta 5 do prevádzky

### Ersa Powerflow

Táto vlna je vo výrobe v porovnaní s ostatnými viacej prevádzkovo vyťaženejšia a preto možno vidieť na priebehu hustejšiu intenzitu aktivácie predhrievania a motorov. Zariadenie spája s liatinou SN100C nastavenou na pracovnú teplotou spájkovacej vane 265 °C.

Priemerný prevádzkový výkon spájkovacej vlny vyplývajúci z prílohy A.4 je 11,8 kW. Výkon potrebný na vyhrievanie vane so spájkou je 4,5 kW. Na vyznačenom bode 1 v prílohe A.4 je krátky okamih záznamu spotreby počas údržby, pri ktorej sa nahrieva len spájkovacia vaňa.

V bode 2 dochádza k momentu zapnutia spájkovacej vlny a nahriatiu systémov pred začiatkom prvej pracovnej zmeny v týždni. Zariadenie dosiahne potrebnej teploty na prácu za 3,5 hodiny a spotrebuje dokopy počas nábehu až 38 kWh energie.

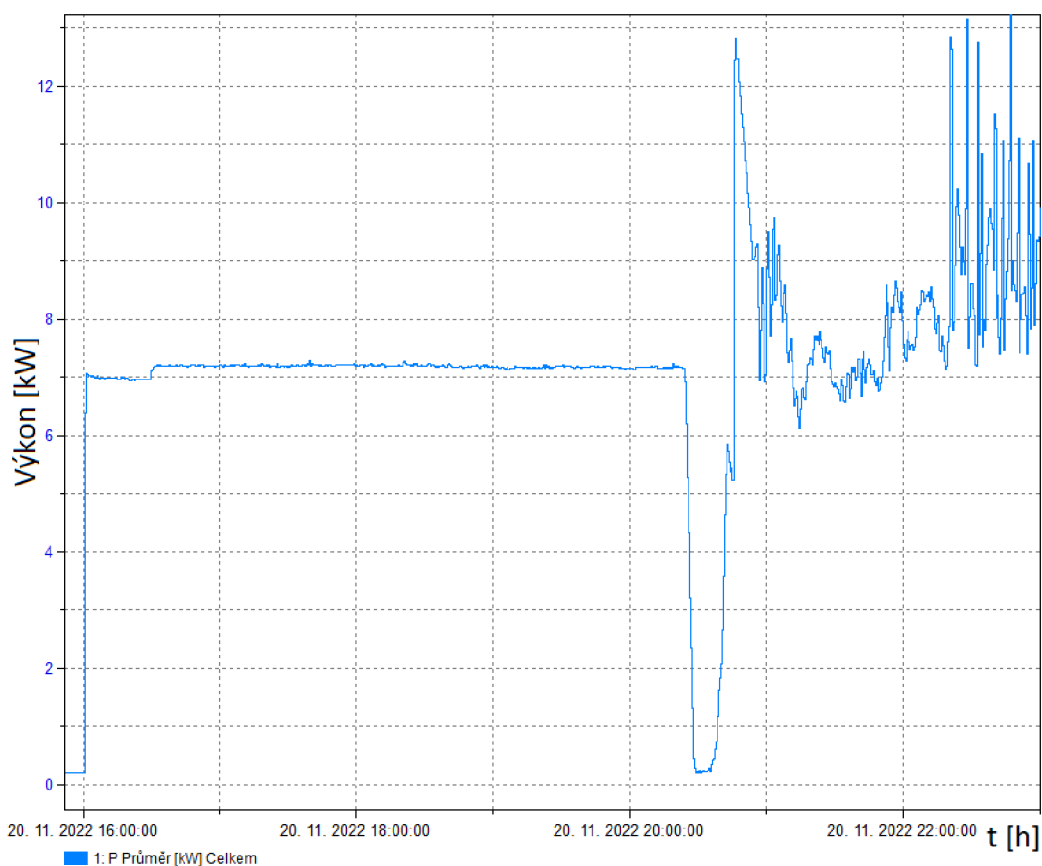
## Ersa Powerflow N2

Je upravený dusíkový variant pôvodnej spájkovacej vlny Ersa Powerflow. Od základného variantu sa líši prevedením samotnej konštrukcie. Dopravníkový pás s výhrevnými zónami predhrievača je vzduchotesne izolovaný a tunel je naplnený inertnou atmosférou dusíku.

Na spájkovacej vlně sa pracuje s rovnakou liatinou SN100C pri teplote 265 °C. Na zariadení funguje prevádzka konzistentne a vykonávajú sa na ňom pravidelné údržby.

Pod bodom 1 v prílohe A.5 prebieha údržba kde je nahrievaná len spájkovacia vaňa pre udržanie tekutého skupenstva spájky. Veľkosť pracovného výkonu nahrievania vane počas údržby je 4,5 kW, rovnako ako u bez dusíkovej verzie stroja Ersa Powerflow.

Z grafu sa dá pozorovať, že priemerná hodnota výkonu v pracovnom režime stroja v porovnaní s jeho bez dusíkovou variáciou je výrazne nižšia. S výkonom spájkovacej vlny 9,15 kW sa spája pokles výkonu o 25 %. Avšak podľa bodu 2 v porovnaní s variantom bez dusíka, samotné nahriatie stroja pri spustení trvá o hodinu dlhšie s výslednou spotrebou 36,5 kWh. Pri nižšom pracovnom výkone je nutné ale uvažovať aj o spotrebe dusíka potrebného pre výrobu.



Obr. 3.10: Priblížený detail na priebeh zapnutia spájkovacej vlny Erska Powerflow N2

### Electrovert Vectra

Je starší model spájkovacej vlny pracujúci so spájkou SnPb. Teplota vane spájky je udržiavaná v tzv. „stand by“ režime na 221 °C. Jej určenie je pre staré produkty, ktoré sú ešte navrhnuté ako náhradné kusy pre opravu starých produktov zavedených pred platnosťou RoHS reštrikcií. Toto zariadenie je pri nečinnosti udržiavané v „stand by“ režime, ktorý počas funkcie v priemere pracuje o výkone 4,17 kW.

V prípade potreby zaznamenananej v prílohe A.6 sa stroj dohrieva na pracovnú teplotu 250 °C. Po nahriatí vane sa spustí ohrev predhrevových zón a ako je možné vidieť v bode 2, pri dosiahnutí všetkých nastavených teplôt je stroj pripravený na prevádzku s priemerným pracovným výkonom 13,65 kW. Po ukončení práce sa zariadenie opätovne schladí na teplotu „stand by“ režimu a pomocou hysterézy ju udržiava do ďalšej potreby.

### 3.2.3 Výsledná aktuálna spotreba

Okrem pecí boli zmerané priemerné operačné výkony osadzovacích automatov a aplikátoru pasty za pomoci ampérmetra Fluke 325, ktorých hodnoty fázových prúdov boli následne prepočítané na výkony podľa vzorca 2.1. Keďže čistička rámov je spúšťaná nezávisle od výroby a miera spúšťania čistiaceho programu sa nedá presne určiť, nebude zahrnutá vo výsledných kalkuláciách. Bolo však odmerané, že program čističky spotrebuje dokopy 0,78 kWh energie.

Tab. 3.3: Namerané hodnoty výkonov zariadení v linke

Názov zariadenia	Funkcia	Výkon [kW]
ASYS VEGO Compact BLO 03	Nakladač DPS	0,15
ASYS VEGO Compact BCO 01	Dopravník	0,11
Teknek smt2017	Čistička dosiek	0,09
ASM DEK NeoHorizom 01IX	Aplikátor pasty	3,00
ASYS VEGO BCO 01	Dopravník	0,11
Koh Young KY8030-3	SPI	2,20
ASM Siplace SX2	Osadzovací stroj SMT	2,30
ASM Siplace SX2	Osadzovací stroj SMT	2,30
ASM Siplace SX2	Osadzovací stroj SMT	2,30
ASYS VEGO Compact BCO 02	Dopravník	0,11
Ersa Hotflow 4/20	Pretavovacia pec	12,95
ASYS VEGO Compact BBS 20	Zásobník DPS	0,50
ASYS VEGO Compact BCO 01	Dopravník	0,11
Koh Young Zenith	AOI	2,20
ASYS VEGO Compact BUL 03	Vykladač DPS	0,15
ASYS VEGO Compact BLO 03	Nakladač DPS	0,15
Fuji sfab-D	Osadzovací stroj THT	2,97
ASYS VEGO Compact BUL 03	Vykladač DPS	0,15
Ersa Powerflow	Spájkovacia vlna	11,79
ICT testovacie zariadenie	ICT	0,95
FCT testovacie zariadenie	FCT	0,48
<b>Celkom</b>		<b>45,07</b>

V celkovom výsledku tabuľky 3.3 výkonovej analýzy je možné vidieť, že linka v celkovej sume pracuje o výkone 45,07 kW. Ak sa uvažuje o chode strojov v 24-hodinovej trojzmennej prevádzke prebiehajúcej 250 pracovných dní v roku pri stálej spotrebe 45,07 kWh, tak ročná spotreba dosahuje až 274,2 MWh energie.

Výsledky boli dosiahnuté nasledovným výpočtom:

$$(T_r \cdot T_d \cdot P_l) + (P_{sr} + P_{sw}) \cdot T_{tr} = (250 \cdot 24 \cdot 45,07) + (37,5 + 38) \cdot 50 = 274\,195 \text{ kW}, \quad (3.1)$$

kde:

$T_r$  – počet pracovných dní v roku,

$T_d$  – počet hodín v jednom dni,

$P_l$  – pracovný výkon montážnej linky,

$P_{sr}$  – spotreba spustenia pretavovacej pece,

$P_{sw}$  – spotreba spustenia spájkovacej vlny,

$T_{tr}$  – počet pracovných týždňov v roku.

Do výpočtu sa zahrňa aj zapínanie spájkovacích zariadení na začiatku pracovného týždňa.

Tab. 3.4: Výsledné hodnoty spotreby a výkonu meraných spájkovacích strojov

Názov stroja	$P_s$ [kW]	$P_w$ [kW]	$E_{20}$ [kWh]	$E_n$ [kWh]
Ersa Hotflow 4/20	X	12,95	37,50	X
Heller 1812EXL	4,10	10,54	10,53	X
Vitronics Soltec	2,98	12,90	X	42,00
Ersa Powerflow	4,50	11,79	38,00	X
Ersa Powerflow N2	4,50	9,15	36,50	X
Vectra Electrovert	4,17	13,65	X	11,80

V tabuľke 3.4 jednotlivé premenné predstavujú:

$P_s$  – pracovný výkon pri „stand by“ režime,

$P_w$  – pracovný výkon počas prevádzky,

$E_{20}$  – energia potrebná na uvedenie stroja do prevádzky z teploty 20 °C,

$E_n$  – energia potrebná na uvedenie stroja do prevádzky z nastavenej teploty,

X – nameraná hodnota.

## Konečný výsledok

Zo získaných údajov v tabulke 3.3 je možné určiť výslednú cenu energie potrebnej na výrobu. Podľa známeho údaje bola za rok 2022 cena energií 1,32 CZK/kWh a ročná vypočítaná cena na prevádzku elektronickej montážnej linky tvorila spolu 361 937,4 CZK alebo 15 233,10 €. Zo všeobecného hľadiska táto cena nie je až tak alarmujúca. Avšak po prvom kvartáli aktuálneho roku 2023 vzrástla cena energií na 5 CZK/kWh. V prepočte nová cena za energie dosahuje ročne až 1 370 975 CZK, teda 57 701,13 €. Zvýšenie o 278,8 % vzbudzuje už podstatne väčšiu pozornosť a zároveň aj nutnosť redukovať spotrebu v každom sektore firmy.

Súčinom z tabuliek časov práce z tab. 3.1 a výkonov zariadení z tab. 3.3 bolo vyrátané, že energetická spotreba potrebná na osadenie jednej DPS je približne 2 149,61 Wh. V porovnaní s cenou energií za rok 2022 prepočet zodpovedá cene 2,83 CZK/kus a pri novej cene na rok 2023 to je 10,74 CZK/kus. V cene nie sú zahrnuté náklady na dusík, spájkku a stlačený vzduch taktiež potrebné pre výrobu. Rovnako sa nepočíta vo výpočtoch s cenou funkcie DPS zásobníka ASYS VEGO Compact BBS 20, ktorého aktivita je rovnako neurčitá ako pri čističke rámov.

### 3.3 Tepelné straty spájkovacích vln

V analýze pracovných výkonov je pozorovateľné, že pri porovnaní spájkovacej vlny Ersas Powerflow a Ersas Powerflow N2 je v tabuľke 3.4 celkový výkon potrebný na prevádzku dusíkovej verzie vlny o 25 % nižší. Keďže ide o stroje, ktoré pracujú s veľkým množstvom tepla, môže sa očakávať, že bude dochádzať aj k úniku tepla. Rozdiel medzi strojmi je v dopravníkovom tuneli. Tunel dopravníku dusíkového variantu je vzduchotesne izolovaný a teda existuje predpoklad, že jeden z faktorov nižšej spotreby je spôsobený aj izoláciou. Toto teplo môže byť využité energeticky efektívnejšie na spájkovanie namiesto jeho uvoľnenia sa do okolia.

Na posúdenie miery tepelných emisií musí byť sledovaný tok tepla a lokalizované jeho úniky. Najväčšie tepelné straty sú očakávané najmä v častiach predhrievačov a spájkovacích vaní. Veľkosť spájkovacích vaní je totožná s objemom pre 525 kg spájky a oba stroje používajú rovnakú bezolovnatú liatinu spájky. Konfigurácia predhrievačov strojov je taktiež rovnaká a teda potrebné energetické nároky sú pre oba stroje identické. [20, 21]

Ďalším pozorovaním pomocou infračervenej kamery Fluke VT02 sa zistilo, že pretavovacie pece majú relatívne dobrú tepelnú izoláciu s priemernou vonkajšou teplotou okolo 30 °C. Naopak, pri spájkovacích vlnách sa vyskytovali miesta presahujúce aj teplotou až 60 °C. Pri týchto strojoch je teda možné predpokladať zvýšené straty spôsobené únikom tepla.

Pred samotným meraním je potrebné určiť najprv počiatkové vlastnosti prostredia, pomocou ktorých sú prevedené potrebné výpočty tepelných strát a zároveň slúžia ako doplňujúca informácia o meranom prostredí.

Tab. 3.5: Výpis vlastností okolia, nastavenia infračervenej kamery a jednotlivých konštánt

Teplota okolia	$t_1$ [°C]	20
Vlhkosť vzduchu	$\varphi$ [%]	60
Emisivita (Hliník - lakovaný, sklo)	$\varepsilon$ [-]	0,89
Meraná vzdialenosť	$l$ [m]	0,75

Meraním v rovnomerne určených bodoch bolo možné zistiť priemerné teploty jednotlivých strán stroja a v nadväznosti boli vypočítané nasledujúce úniky tepla pomocou vzorcov v kapitole 2.3:

Tab. 3.6: Namerané a vypočítané hodnoty teploty a tepelných výkonov pre jednotlivé strany stroja Ers Powerflow

Ersa Powerflow	Čelná str.	Zadná str.	Ľavý bok	Pravý bok	Vrchná str.
d [m]	0,73	0,73	0,73	0,73	0,77
l [m]	2,95	2,95	1,41	1,41	2,95
S [m <sup>2</sup> ]	2,14	2,14	1,03	1,03	2,27
t <sub>2</sub> [°C]	47,50	43,00	52,10	52,00	53,50
Δt [°C]	27,50	23,00	32,10	32,00	33,50
t <sub>2</sub> [K]	320,65	316,15	325,25	325,15	326,65
α <sub>A</sub> [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	2,65	2,59	2,70	2,70	2,71
α <sub>K</sub> [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	4,51	4,25	4,74	4,74	4,81
α <sub>M</sub> [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	4,63	4,36	4,87	4,86	4,94
q <sub>A</sub> [W·m <sup>2</sup> ]	72,86	59,64	86,64	86,34	90,88
q <sub>K</sub> [W·m <sup>2</sup> ]	123,96	97,74	152,28	151,64	161,17
q <sub>M</sub> [W·m <sup>2</sup> ]	127,25	100,33	156,31	155,66	165,44
I [W·m <sup>2</sup> ]	160,79	131,47	192,07	191,37	201,85
Q <sub>A</sub> [W]	499,71	408,73	285,71	284,69	664,95
Q <sub>K</sub> [W]	609,01	490,21	353,00	351,64	824,61
Q <sub>M</sub> [W]	616,03	495,75	357,14	355,76	834,31
Q [W]	574,92	464,90	331,95	330,70	774,62



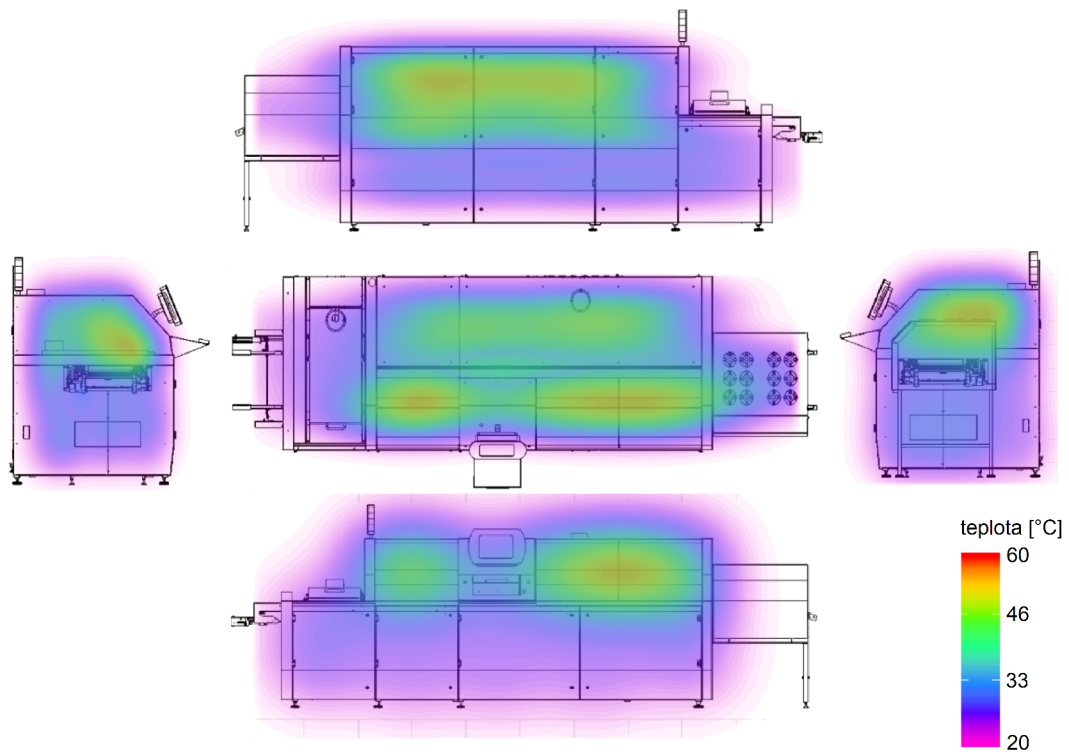
Tab. 3.7: Namerané a vypočítané hodnoty teploty a tepelných výkonov pre jednotlivé strany stroja Ersa Powerflow N2

Ersa Powerflow	Čelná str.	Zadná str.	Lavý bok	Pravý bok	Vrchná str.
d [m]	0,74	0,74	0,74	0,74	0,76
l [m]	3,70	3,70	1,43	1,43	3,70
S [m <sup>2</sup> ]	2,72	2,72	1,05	1,05	2,82
t <sub>2</sub> [°C]	44,70	37,24	40,00	43,6	48,40
Δt [°C]	24,70	17,24	20,00	23,60	28,40
t <sub>2</sub> [K]	317,85	310,39	313,15	316,75	321,55
α <sub>A</sub> [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	2,62	2,50	2,55	2,60	2,66
α <sub>K</sub> [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	4,35	3,86	4,06	4,29	4,56
α <sub>M</sub> [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	4,47	3,97	4,17	4,40	4,68
q <sub>A</sub> [W·m <sup>2</sup> ]	64,60	43,19	51,00	61,39	75,53
q <sub>K</sub> [W·m <sup>2</sup> ]	107,46	66,61	81,16	101,15	129,39
q <sub>M</sub> [W·m <sup>2</sup> ]	110,31	68,38	83,31	103,83	132,81
I [W·m <sup>2</sup> ]	142,40	95,72	112,60	135,30	166,80
Q <sub>A</sub> [W]	562,93	377,74	171,35	206,01	682,35
Q <sub>K</sub> [W]	679,50	441,46	202,94	247,65	833,98
Q <sub>M</sub> [W]	687,24	446,26	205,19	250,46	843,63
Q [W]	643,22	421,82	193,16	234,71	786,66

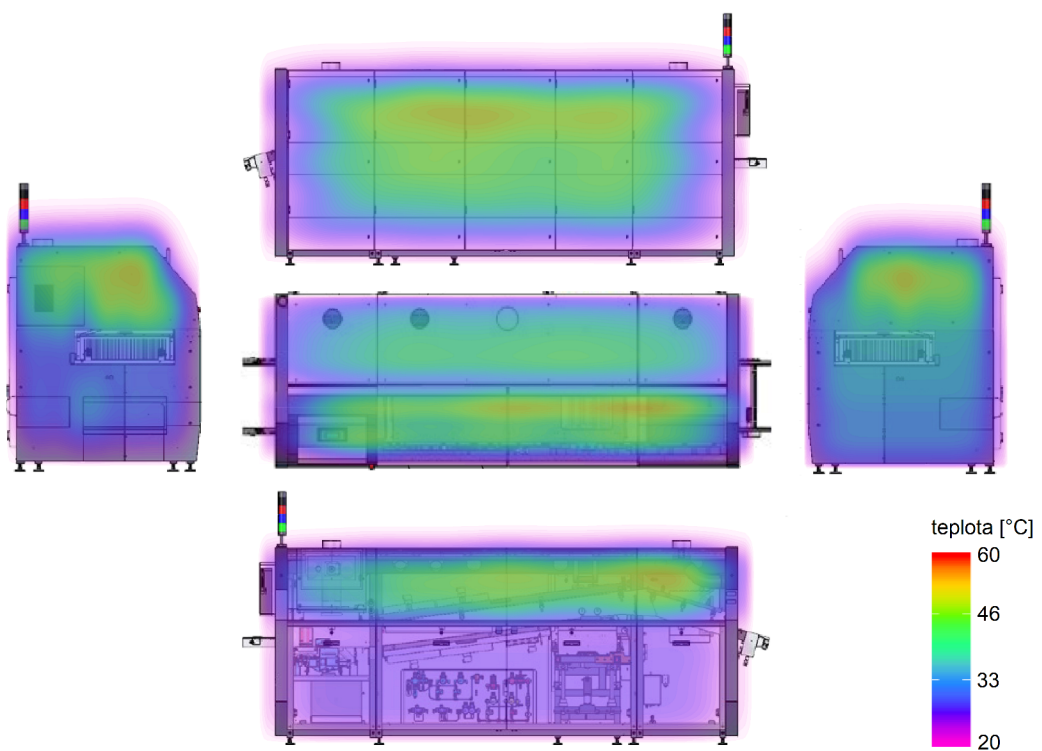
Sčítaním výsledkov strát všetkých strán boli dosiahnuté výsledné hodnoty pre Ersa Powerflow  $Q_1 = 2477,09$  W a Ersa Powerflow N2  $Q_2 = 2279,56$  W. Na prvý pohľad sú rozmery zariadení odlišné a nedá sa priamo povedať, ktoré zo zariadení má menšie straty. Prepočtom celkových strát na 1 m<sup>2</sup> z celkovej plochy strojov sú určené priemerné straty, ktoré vychádzajú pre  $Q_1 = 288,05$  W/m<sup>2</sup> a pre dusíkovú verziu  $Q_2 = 220,25$  W/m<sup>2</sup>.

Pri počítaní s týmito stratami je nutné zvážiť fakt, že tepelné straty sú fyzikálne odlišné od tých elektrických. Je možné narábať s nimi pre analýzu práce podobne a zvažovať ich ako spoločné. Musí sa brať ale do úvahy, že korelácie strát systému nie sú priame a do skutočnosti zasahuje mnoho ďalších faktorov ako efektivita systému, prevádzkové podmienky a samotný proces energetickej premeny z elektrickej na tepelnú.

Zadaním nameraných hodnôt teplôt do vykresľovacieho programu boli vytvorené obrázky tepelných únikov stroja. Týmto náhľadom je možné pozorovať lokality najväčších únikov tepla. Okrem oblastí znázornených v obrázkoch, ďalšie hlavné úniky sú spôsobené medzerami a otvormi v konštrukcii stroja.



Obr. 3.11: Vykreslená tepelná mapa na nákrese spájkovacej vlny Ersas Powerflow



Obr. 3.12: Vykreslená tepelná mapa na nákrese spájkovacej vlny Ersas Powerflow N2

## 4 Navrhované riešenia a diskusia výsledkov

### 4.1 Optimalizácia nastavenia pracovných režimov

Najjednoduchšie a finančne nenáročné riešenie je úprava operačných režimov spájkovacích strojov. Príkladom je obrázok 3.9 vlny Vitronics, kde je možné vidieť, že proces nahrievania spájkovacej vane nie je perfektne načasovaný s aktiváciou predhrievača. Vzniká tak doba neaktivity, počas ktorej sa zariadenie snaží udržať stálu teplotu spájkovacej vane. V dôsledku toho pri každom spustení dochádza ku strate 8,7 kWh. Pri správnom nastavení možno predpokladať spotrebu o veľkosti 33 kWh na spustenie stroja namiesto 42 kWh.

Rovnaký problém sa vyskytuje aj pri časovaní ohrevu spájkovacej vane dusíkovej vlny Ers Powerflow N2 na obrázku 3.10. Medzi začiatkom aktivácie predhrievania a nahriatím spájkovacej vane dochádza ku 20 minútovému intervalu, kedy sa rovnako ako pri stroji Vitronics udržiava teplota spájky vo vani. Celková strata tohto neaktívneho okna tvorí 0,75 kWh.

Ďalším väčším problémom funkcie, ktorý je viditeľný v prílohe A.3 pod bodom 3, je použitie nočného režimu počas víkendov. Tento režim v priemere pracuje o výkone 3 kW. Pri správne nastavenom spúšťaní spájkovacej vlny sa chod tohto režimu neoplatí na viac ako 10 hodín. Po 10 hodinách dochádza ku stratám, pri ktorých je zariadenie nadbytočne vyhrievané a úspornejšie by bolo stroj vypnúť a v čase potreby ho znova spustiť. Aktuálne tento režim každý víkend spotrebuje dokopy až 105 kWh. Riešením problému by bolo opravenie času na aktiváciu len v prípade dlhšej odstavky alebo pri nečinnosti na stroji maximálne však v rozmedzí jednej pracovnej zmeny.

Spájkovacia vlna Electrovert Vectra s priebehom zobrazeným v prílohe A.6 má taktiež chybu v nastavenom režime prevádzky a to pri jej neaktívnej fáze. Režim sám o sebe funguje správne a plní svoju úlohu, problémom je dlhá doba, v ktorej tento režim pracuje. Samotná vlna sa využíva veľmi zriedka a mimo práce zariadenie pracuje na 3,5 kW úrovni. Len za 1 deň neaktivity stroj spotrebuje dokopy 86,5 kWh.

V konečnom prepočte je možné ušetriť až 18 MWh ročne pre všetky spájkovacie stroje.

## 4.2 Tepelná izolácia zariadení

V prípade spájkovacích vln bolo spozorované, že pri týchto strojoch dochádza k značným tepelným stratám, ktoré priamo súvisia s energetickou spotrebou a preto je tento aspekt taktiež zohľadňovaný. Za pomoci termokamery boli zmerané a vypočítané priemerné tepelné stratové výkony jednotlivých strán strojov.

Očakávanie sa potvrdilo v praxi a najväčšie teplo unikajúce zo strojov bolo z oblasti spájkovacej vane a predhrievačov. Týmto únikom tepla by sa dalo zabrániť už či lepším izolovaním v daných oblastiach alebo za-izolovaním celej oblasti dopravníku, čo by však predstavovalo náročnejšiu manipuláciu a údržbu strojov. Prevedenie samotnej izolácie by bolo konštrukčne náročné a mimo možností spoločnosti. Riešenie teda spadá skôr do kompetencie samotných výrobcov týchto strojov. Finančný predpoklad riešenia je na vyčíslenie náročné a odvíja sa od ceny potrebných materiálov a technologického prevedenia.

Je možné ale určiť teoretickú veľkosť úspory, za predpokladu, že by sa podarilo zaizolovať stroje tak, aby ich unikajúce teplo zo všetkých strán dosahovalo priemerne 30 °C. Za tejto podmienky by tepelné straty pre spájkovacia vlna Ersas Powerflow dokopy predstavovali  $Q_1 = 715 \text{ W}$  a pre Ersas powerflow N2  $Q_2 = 860 \text{ W}$ . Pre obidve zariadenia to znamená úšetrienie 15 % z pracovných výkonov strojov. V celkovom prepočte sa to premietne na úspore približne 19,8 MWh energie ročne. Tieto výpočty reprezentujú len hrubý predpoklad možných dosiahnuteľných úspor, ktoré sú overiteľné meraním po aplikácii. Dôvodom je rozličnosť fyzikálnych mechanizmov strát, na ktoré vplyvajú faktory ako procesy premeny energie a efektívnosť systému.

## 4.3 Výmena strojov

Spájkovacie vlny ako Elektrovert Vectra a Vitronics Soltec Delta 5 sa radia medzi staršie stroje. Jednou z možností dosiahnutia energetickej úspory je zváženie kúpy a výmeny stroja za novší variant. Vitronics Soltec na svoj vek stále vykazuje relatívne dobré energetické výsledky. Na druhej strane Elektrovert Vectra s pracovnou spájkou SnPb a podstatne nižšou teplotou tavenia je energeticky náročnejšia ako ktorákoľvek z iných porovnávaných vln. Nevýhodnosť tohto riešenia spočíva v dlhšom časovom intervale návratnosti investície. Odhadovanú cenu návratnosti nie je možné určiť vzhľadom k nestálej cene strojov, mnohým ďalším výdajom a príjmom spoločnosti týkajúcich sa daného zariadenia a neznámej produktivity stroja. Finálne rozhodnutie závisí od zváženia vlastných potrieb a možností spoločnosti. Nesporne však kúpa modernejších strojov predstavuje zníženie energetickej spotreby kvôli vylepšeným systémom izolácie a tepelných výmenníkov.

## 4.4 Využitie selektívnych spájkovacích technológií

Pri nízkom počte THT komponentov je možné efektívne využitie selektívnych procesov. Namiesto prevádzkovania spájkovacej vlny pre zospájkovanie THT súčiastok môže byť použitá selektívna spájkovacia vlna, ktorá by bola schopná vykonať úlohu s podstatne menšou energetickou spotrebou a dokonca aj bez nutnej potreby použitia samotných spájkovacích rámov. Bez použitia rámov je bezpredmetné zapojenie čističky rámov čo ešte viac zvyšuje energetickú úsporu. Treba však dodať, že spomínané ušetrzenie energie spôsobí nižšiu priechodnosť produktov, čo sa v konečnom dôsledku pri veľkom spomalení toku linky môže prejavovať ako negatívum v podobe menšej návratnosti a potencionálnej strate. Okrem zníženia energetickej spotreby klesne aj použitie samotnej spájky. Najlepším variantom tohto riešenia by bolo využitie selektívneho spájkovania laserom. Z pohľadu prevádzky a rýchlosti sa javí ako najefektívnejší, avšak jeho cena môže byť vyššia v porovnaní so štandardnou selektívnou vlnou. Ďalšou výhodou spájkovania laserom je minimálne pôsobenie tepelného stresu na DPS a kvôli jednoduchému prevedeniu stroja aj jeho údržba.

## 4.5 Vynechanie procesu spájkovacej vlny

Jednou z metód možných úspor a zároveň aj zvýšením produkčného času môže byť vylúčenie procesu spájkovacej vlny. Využitím preforiem a kaskádovitých šablón na nanášanie pasty, inak známe aj ako „step stencil“, je možné aplikovať dostatočné množstvo spájky vhodného aj pre vývodovú montáž. Zjednodušeným prepočtom spotreby jednotlivých materiálov potrebných pre výrobu bola určená predpokladaná cena, ktorá zodpovedá mesačným nákladom na prevádzku takéhoto stroja.

Tab. 4.1: Približné mesačné náklady na prevádzku spájkovacej vlny Ers Powerflow

	jednotková cena [CZK]	mesačná spotreba	cena [CZK]
spájka SN100C [kg]	820,47	120,35	98 743,56
dušík [kg]	3,62	7 534,28	27 274,09
tavivo [l]	242,30	60	14 538
energie [kWh]	5	6 200	31 000
cena spolu [CZK]			171 555,66

Eliminácia tohto procesu by viedla k väčším úsporám zasahujúcim aj mimo aspekt energií vo výrobe. Okrem zníženia nákladov toto riešenie skráti dobu produkcie, tým, že bude celá sekcia vynechaná. Medzi ďalšie výhody môžu byť považované aj úspora priestoru a zníženie ďalších nákladov spadajúcich pod údržbu a obsluhu.

Problematickou časťou tohto riešenia je využitie plastových súčiastok v spájkovaní pretavením vzhľadom na fakt, že plasty sa pri vysokej teplote presahujúcej 240 °C začínajú taviť a deformovať. Pre veľké množstvo súčiastok existujú alternatívy prispôbené na spájkovanie pretavením, no ich cena je značne vyššia.

Ďalším faktorom vstupujúcim do náhrady procesu spájkovania vlnou je aj nutnosť samotného preusporiadania linky a to pridaním THT osadzovacích automatov za pôvodné osadzovacie automaty SMT. Použitie bezolovnatej liatiny spájky si vyžaduje zapojenie selektívneho spájkovacieho pracoviska pre určité komponenty, ktoré sú však na spájkovanie pretavením so spomínanou liatinou komplikované.

Uvedením nízkoteplotných liatin zaniká potreba vytvárať dodatočné pracoviská a celý proces montáže sa vykoná čisto na pretavovacej peci. Teploty pretavenia spájky, ktoré presahujú teplotu 138 °C nie sú pre komponenty až tak tepelne zaťažujúce a teda je možné prevažnú väčšinu z nich zospájkovať. V špecifických prípadoch môže teplota nad 120 °C plasty degradovať alebo poškodiť, tu je nutnosť dodatočného selektívneho pracoviska opodstatnená. Využitie plastových obalov súčiastok s väčšou tepelnou toleranciou a následnou optimalizáciou teplotných profilov by sa dalo dosiahnuť spájkovanie pretavením viacerých komponentov s cieľom kompletného vynechania dodatočného selektívneho procesu.

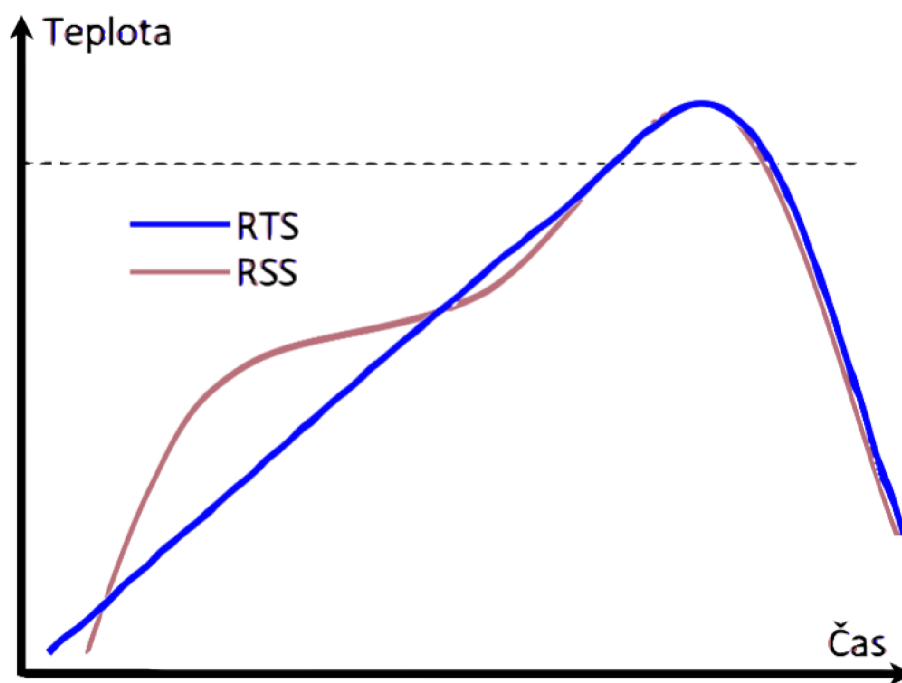
Vylúčením všetkých spájkovacích vln by bolo možné dosiahnuť energetickú úsporu minimálne 293,12 MWh ročne. S týmto riešením samozrejme prichádzajú aj ďalšie úspory týkajúce sa druhých prostriedkov, čo predstavuje markantné zníženie nákladov v rámci elektro-montážnej výroby.

## 4.6 Nastavenie teplotných profilov a ich vplyv na spotrebu

Každá spájka má odporúčaný teplotný profil s odlišným časom teploty presahujúcej nad kvapalným skupenstvom, teda TAL. Úpravou tohto času, v ktorom sa spájka nachádza možno dosiahnuť energetickej úspory s rovnakým výsledkom spájkovaného spoja. Zníženie TAL sa dá dosiahnuť zvýšením rýchlosti dopravníku, alebo znížením teploty jednotlivých zón. Táto teória je overená na niekoľkých rozličných profiloch určených pre nízko-teplotnú spájku Sn42Bi57Ag1 na stroji Heller 1812EXL. Okrem TAL je pozorovaný aj vplyv tvaru profilu na energetickú spotrebu. Rozdiel medzi profilmi RTS a RSS je pozorovaný na pretavovacej peci Erska Hotflow 4/20 pre liatinu SAC.

### 4.6.1 Vplyv voľby profilu RTS a RSS

Detailné porovnanie dvoch používaných profilov RTS a RSS pre rovnakú spájkovaciu liatinu neukázalo žiadny rozdiel v spotrebe. Dôvodom je približne rovnaká veľkosť obsahov plôch pod krivkou teplotných profilov. Niektoré oblasti pece sú síce chladnejšie, iné miesta sú charakterizované naopak vyššími teplotami. V tomto prípade sa odporúča využitie teplotného profilu, ktorého výsledná kvalita spojov je lepšia.



Obr. 4.1: Náčrt rozdielov priebehov teplotných profilov RTS a RSS (čiarkovaná čiara predstavuje teplotu nad tavením)

## 4.6.2 Vplyv času a teploty nad tavením spájky

Meraním ôsmich rozličných profilov s odlišným tvarom, TAL a maximálnou teplotou pre nízkoteplotnú liatinu Sn42Bi57Ag1, bol zistený vplyv nastavenia teplotného profilu na energetickú spotrebu pretavovacej pece Heller 1812EXL. Výsledný priebeh sa nachádza v prílohe A.7. Počas merania bola udržiavaná rovnaká rýchlosť dopravníku. Príklady použitých teplotných profilov sú priložené v prílohe A.9 a prílohe A.10.

Tab. 4.2: Namerané parametre profilov s veľkosťou ich pracovných výkonov

Profil	TAL [s]	P [kW]	T <sub>max</sub> [°C]	T <sub>nad</sub> [°C·s]
Trojuholník 1	55	7,42	160,1	789
Trojuholník 2	69	7,54	168,2	1140
Trojuholník 3	70	7,84	177,5	1488
Obdĺžnik 1	73	7,38	152,0	783
Obdĺžnik 2	79	7,62	156,6	1097
Obdĺžnik 3	87	7,74	162,4	1495
Hranica 1	54	7,91	165,7	848
Hranica 2	96	8,95	184,1	2988

Parameter T<sub>max</sub> predstavuje maximálnu teplotu, ktorú dosiahne liatina počas jej prechodu dopravníkom a parameter T<sub>nad</sub> hovorí o celkovom súčte tepla v [°C·s] predávanom liatine každú sekundu počas intervalu, kedy teplota spájky je nad kvapalným skupenstvom. Tento parameter je generalizovaný údaj hovoriaci o nastavení teplotného profilu. Vo výpočte je reprezentovaná súčtom nadbytku teplôt presahujúcich 138 °C. Suma je podelená dvomi kvôli zaznamenávaniu údajov v 0,5 sekundových intervaloch a teda korešpondencií s časom 1 s. Forma výpočtu vyzerá nasledovne:

$$T_{\text{nad}} = \frac{\sum_i^{T_c} (T_i - 138)}{2} ; T_i > 138. \quad (4.1)$$

Kde T<sub>c</sub> predstavuje celý interval zaznamenaných teplôt pri prechode DPS a T<sub>i</sub> je konkrétna hodnota teploty presahujúca 138 °C.

Pre najnižšiu spotrebu je požadovaný čo najmenší TAL a najnižšie predané teplo nad 138 °C. Je nutné zvážiť pár nevýhod, ktoré môžu vzniknúť práve krátkou dobou pretavenia s nízkou teplotou. Môže dochádzať k nedostatočnému zospájkovaniu komponentov, ktoré môže spôsobovať zlý kontakt spoja, slabé zmáčanie a odpadávanie súčiastok. Medzi ďalšími problémami môže byť veľké množstvo bublín v spoji



takzvaných aj ako „voidy“ alebo vznik tzv. mostíkov medzi kontaktmi z dôvodu krátkej doby zospájkovania súčiastok. Avšak podľa hraničných profilov je možné znížiť pracovný výkon o 11,73 %. Najväčším rozdielom medzi okrajovými profilmi trojuholníka 1;3 a obdĺžnika 1;3 bol približne 5 %. Korektným nastavením a úpravou teplotných profilov sa dá dosiahnuť značných energetických úspor za cenu niekoľkých skúšobných meraní pri minimalizovanom profile. Pri znížení pracovného výkonu aspoň o 5 % optimalizovaním profilu, je možné ušetriť aspoň 3,89 MWh ročne. Toto množstvo energie predstavuje len znížený výkon prevádzky, ale na spustenie strojov bude potrebné taktiež menšie množstvo energie a táto úspora môže byť teda ešte vyššia. Použitie týchto riešení by predstavovalo úsporu spolu pre obe pretavovacie pece minimálne 7,05 MWh na rok.

## 4.7 Aplikácia nízkoteplotných spájk

Najväčšia možná úspora v elektro-montážnej výrobe je riešiteľná nižšou prevádzkovou teplotou strojov. Zároveň s nižšou pracovnou teplotou je vyvíjaný menší stres ako na komponenty a DPS tak aj na samotné spájkovacie zariadenie. Jedinou z nevýhod týchto spájk je ich samotná cena a mechanická integrita. Nízkoteplotné spájky sú kvôli štruktúre tuhnutia ich hlavnej zložky, bizmutu, veľmi krehké. Avšak na trh začínajú byť uvádzané nízkoteplotné spájky druhej generácie, ktorých vlastnosti podľa výrobcov miestami prekonávajú zažité bezolovnaté spájky a dokonca aj olovnatú spájk SnPb. Tieto spájky nie sú ešte plne odskúšané v priemyselných aplikáciách a ich využitie je stále ešte len v priebehu testovania. V práci bol meraný teplotný profil pre spájkováciu liatinu Sn42Bi57Ag1 od spoločnosti AIM. Porovnaním teplotných profilov spájky SAC a SnBiAg bol zistený rozdiel v pracovnom výkone o 29,5 % a nábehovej energetickej spotrebe o 38 % pre pretavovacie pece.

Najväčšou výhodou nízkoteplotných spájk je možnosť kompletného zanechania procesu spájkovacej vlny, ktorý drasticky zníži celkové náklady produkcie. Pred použitím týchto liatin je potrebné zvážiť pár nevýhod. Jedna z prvých je cena spájky, ktorá je väčšia v porovnaní so štandardne používanými spájkami. Typ povrchovej úpravy môže spôsobiť taktiež problémy so zhoršenou vzlínavosťou spájky k plôškam DPS. Je nutné taktiež zvoliť kompatibilné tavivo, ktoré bude aktívne pri nízkych teplotách spájkovania. A najpodstatnejšie je overenie splnenia požadovanej mechanickej pevnosti od spoja tak, aby všetky súčiastky boli schopné odolať fyzickému poškodeniu alebo iným vonkajším vplyvom ako napríklad vplyv prostredia na oxidáciu spoja a tepelná odolnosť spoja pri zmenách teploty a prípadnému prehriatiu výrobku.

Výsledná energetická úspora riešenia použitím týchto liatin pre Ersu Hotflow 4/20 by predstavovala ročne teda 23,31 MWh a 18,89 MWh pre Heller 1812EXL.

## Záver

Pozorovanie priechodnosti vybranej linky ukázalo, že najproblematickejším úsekom sú testovacie zariadenia. Napriek obmedzenému času testovania je linka pomerne vyrovnaná s viacerými testami a zásobníkovými systémami. Je očividné, že táto prevádzka je prispôbena pre „high mix - low volume“ výrobu obzvlášť kvôli generalizovaným procesným metódam montáže na čo najviac všeobecné riešenia. Maximálna priechodnosť montážnej linky, ktorú je možné optimalizáciou dosiahnuť s minimálnymi úpravami je 107 kusov za hodinu.

Analýzou výkonov zariadení sa dospelo k záveru, že najviac ovplyvňujú spotrebu spájkovacie stroje. Podrobnejším rozborom týchto strojov sa prekontrolovala ich funkcia a nedostatky. Porovnaním jednotlivých strojov medzi sebou sa zistilo, že tepelná izolácia, optimalizované režimy a udržiavanie strojov v dobrom stave zásadne vplýva na výslednú spotrebu. Priemerný pracovný výkon spájkovacích strojov sa pohybuje medzi 10 kW až 12 kW.

Výsledným výpočtom produkčnej spotreby sa ukázalo, že ročná spotreba na meranú produkčnú linku tvorí približne 274,2 MWh. V prepočte s cenou energií za rok 2022 táto spotreba zodpovedá 361 937,4 CZK a s cenou pre aktuálny rok 2023 konečná suma tvorí 1 370 975 CZK. Pri prepočte na cenu energií na produkciu jednej dosky sú výsledné hodnoty pre rok 2022 2,83 CZK na dosku a v roku 2023 10,74 CZK na dosku.

Cieľom práce bolo nájsť energetické riešenie úspory. Optimalizáciou pracovných režimov vo výrobe a správnym prevádzkovaním je možné ušetriť aspoň 18 MWh ročne. Lepšou tepelnou izoláciou spájkovacích vlín sa dá predpokladať ušetrenie až do výšky 15 % z pracovných výkonov zariadení čo v ročnom horizonte predstavuje pre merané stroje približne 19,8 MWh ročne. Avšak toto riešenie je technicky náročné na realizáciu.

Výmena strojov alebo kúpa nových zariadení predstavuje ďalšiu možnosť, ktorej návratnosť a cena sa pohybuje v neurčitých číslach. Kvôli neznámej funkcií nových strojov, variabilnosti ich ceny, priechodnosti a spotrebe materiálov je ťažké určiť ekonomický aspekt riešenia. Modernjšie stroje sú ale všeobecne energeticky menej náročné.

Aj keď určenie ceny výmeny strojov je problematické, je možné stanoviť finančnú náročnosť používaných strojov. Výpočtom spotreby jednotlivých materiálov spolu s energiami bolo zistené, že cena na prevádzkovanie spájkovacej vlny zodpovedá približne 171 556 CZK/mesiac bez nákladov na údržbu a iných výdajov. Vynechaním tohto kroku montáže a presunutím THT osadovacieho pracoviska do pracoviska spájkovania technológiou pretavením by sa drasticky znížili celkové náklady na chod linky. Aj keď toto riešenie prichádza s určitými komplikáciami, použitím nízko-teplotných spájkovacích liatin a komponentov určených na spájkovanie pretavením by toto riešenie bolo aplikovateľné. Celkovým vynechaním všetkých používaných spájkovacích vln by sa dosiahlo úspory z hľadiska energií minimálne o 293,12 MWh ročne.

V ďalšej časti sa práca zaoberá vplyvom nastavenia teplotných profilov na výslednú spotrebu a koľko je možné ušetriť jeho správnym nastavením. Pri porovnaní profilov RTS a RSS pre rovnakú spájkovaciu liatinu nebol nájdený žiadny rozdiel v spotrebe. Pri pozorovaní vplyvu veľkosti času TAL a množstva tepla odovzdaného doske nad teplotou likvidu sa na nízko-teplotných liatinách ale nachádzali viditeľné rozdiely. Medzi hornou a dolnou hranicou profilu, ktorým možno danú liatinu Sn-BiAg spájkovať, bol rozdiel v pracovnom výkone o 11,73 %. Medzi ďalšími experimentálnymi profilmi bol pozorovaný rozdiel o približne 5 %. Pri úprave profilu používanej pece Ersas Hotflow 4/20 by sa dalo ušetriť v zhode s touto rozdielnosťou približne 3,89 MWh ročne a pri peci Heller 1812EXL 3,16 MWh ročne.

Posledné z možných riešení je jedno z najvýznamnejších, a to náhrada používaných bezolovnatých liatin nízko-teplotnými bizmutovými liatinami. Porovnaním energetickej spotreby bežného profilu používanej liatiny s minimálnym profilom nízko-teplotnej liatiny sa ukázal rozdiel o 29,5 %. V prepočte na energie to vychádza na 23,31 MWh ročne pre Ersas Hotflow 4/20 a 18,98 MWh ročne pre Heller 1812EXL. Potencionálne nahradenie spájkovania vlnou spájkovaním pretavením môže podstatne zvýšiť celkovú úsporu. Negatívum predstavuje mechanická integrita spojov a ich celková kvalita, no s postupným zlepšovaním týchto liatin a ich pribúdajúcou druhou generáciou sa tento problém postupne eliminuje.

Spojením všetkých aplikovateľných výsledkov spomínaných riešení by bolo možné ušetriť s ponechaním spájkovacích vln minimálne 44,85 MWh ročne a s ich nahradením technológiou pretavením minimálne až 335,41 MWh ročne. Pre konkrétnu pozorovanú linku aplikácia energetických úspor s použitím spájkovacej vlny by predstavovala minimálne 20,69 MWh na rok a pri nahradení spájkovacej vlny minimálne 97,71 MWh na rok.

# Literatúra

1. SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
2. OGOCHUKWU, Ezeonu Stella. Laser Soldering. In: MASTAI, Yitzhak (ed.). *Materials Science*. Rijeka: IntechOpen, 2013, kap. 15. Dostupné z DOI: 10.5772/51527.
3. KARL J. PUTTLITZ, Kathleen A. Stalter. *Handbook of lead-free solder technology for mikroelektronické assemblies*. New York: Marcel Dekker, 2004. Mechanical engineering. ISBN 0-8247-4870-0.
4. WASSINK, R. J. Klein. *Soldering in electronics*. Scotland, 1984. Electrochemical Publications. ISBN 0-901150-14-2.
5. XI, Yun; ZU, FQ; ZU; LIU, Lan-Jun; SHEN, Rong-Rong; LI, Xian; CHEN, Zhi-Hao. Abnormal solidification of Pb-Sn alloy induced by liquid structure transition. 2005, roč. 43, s. 432–439.
6. ZHOU, Wenfan; TIAN, Yanhong; WANG, Chunqing. Microstructure of Sn-Ag-Cu lead-free flip chip interconnects during aging. In: 2005, zv. 2005, s. 427–431. ISBN 0-7803-9449-6. Dostupné z DOI: 10.1109/ICEPT.2005.1564656.
7. *SN100C® Technical Guide*. Greeley, Colorado: FCT Assembly, [b.r.]. Dostupné tiež z: <https://floridacirtech.com/wp-content/uploads/2018/10/SN100C-Technical-Guide.pdf>.
8. *ALPHA® INNOLOT SOLDER ALLOY*. Woking, United Kingdom: Alpha, [b.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.macdermidalpha.com/sites/default/files/2021-11/ALPHA-Innolot-Solid-Solder-EN-09Mar21-TB.pdf>.
9. RIBAS, Morgana; HUNSINGER, Tom; CUCU, Traian; V, Ramakrishna H; LIM, Garian; MURPHY, Mike. *The Printed Circuit Assembler's Guide to... Low-Temperature Soldering*. 1st edition. Rohnert Park, CA 94927, U.S.A.: BR Publishing, Inc., 2018. ISBN 978-0-9998648-4-5.
10. *ALPHA® OM-550 HRL1*. 245 Freight Street, Waterbury, CT 06702, United States: Alpha, [b.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.macdermidalpha.com/sites/default/files/2022-01/Alpha-OM-550-HRL1-Solder-Paste-EN-A4-10Jan22-FL.pdf>.
11. *ALPHA® OM-535*. 245 Freight Street, Waterbury, CT 06702, United States: Alpha, [b.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.macdermidalpha.com/sites/default/files/2021-09/alpha-om-535-solder-paste-en-06mar20-tb.pdf>.

12. Standards for soldering fluxes. In: [online]. Germany, Oskarstraße 3-7 D-42283 Wuppertal: STANNOL GmbH, [b.r.], s. 3 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z : <https://www.scribd.com/document/364987983/Fluxes-EN-pdf>.
13. *Fluke 1736/1738 Power logger Users Manual*. Fluke Corporation, 2015. Dostupné tiež z: [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/173x\\_\\_\\_umeng0200\\_0.pdf?2JZuc3jb6JoHuQ163Haf5bzCdt1HSMvE](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/173x___umeng0200_0.pdf?2JZuc3jb6JoHuQ163Haf5bzCdt1HSMvE).
14. BRYDAK, Kazimierz; SZLACHTA, Anna. Measuring methods of welding process parameters. *Measurement Automation Monitoring*. 2016, roč. 62, s. 26.
15. MAREK ROCH, Marek Höger. *ROZVOD ELEKTRICKEJ ENERGIE*. Alexandra Rudnaya 21, 010 01 Žilina, Slovenská republika, 2014. MARKAB spol. s r.o., Žilina. ISBN 978-80-89072-67-5. Dostupné tiež z: <https://www.markab.sk/MARKAB-html/downloads/Skripta.pdf>.
16. VITEZ, Tomas; TRAVNICEK, Petr. The measurement of heat loss with use of a thermal imaging system. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2011, roč. 59, s. 193–196. Dostupné z DOI: 10.11118/actaun201159030193.
17. ČSN ISO 10878. *Nedestruktivní zkoušení: Infračervená termografie - slovník*. 2013. Dostupné tiež z: <https://www.nlnorm.cz/terminologicky-slovník/71151>.
18. *Teplotný záznamník Super M.O.L.E. Gold 2*. Milwaukie, Oregon 97222-8825 U.S.A, 2021. Dostupné tiež z: <https://ecd.com/products-solutions/thermal-profiling/supermole-gold-2/>.
19. *Ersa HOTFLOW 4/20*. Leonhard-Karl-Str. 24, 97877 Wertheim, Germany: Ersa GmbH, [b.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.interflux.dk/wp-content/uploads/2016/05/ERSA-Hotflow-4-20-reflowovn.pdf>.
20. *Ersa Powerflow*. Leonhard-Karl-Str. 24, 97877 Wertheim, Germany: Ersa GmbH, [b.r.]. Dostupné tiež z: <https://keers-technologies.com/wp-content/uploads/2018/10/ERSA-POWERFLOW-Air.pdf>.
21. *Ersa POWERFLOW N2*. Leonhard-Karl-Str. 24, 97877 Wertheim, Germany: Ersa GmbH, [b.r.]. Dostupné tiež z: <http://www.pmrreps.com/wp-content/uploads/2017/01/POWERFLOW-e-N2.pdf>.
22. *Vitronics Solted Delta 5*. Leonhard-Karl-Str. 24, 97877 Wertheim, Germany: Stryker Instruments, [b.r.]. Dostupné tiež z: <https://keers-technologies.com/wp-content/uploads/2018/10/ERSA-POWERFLOW-Air.pdf>.

## Zoznam symbolov a skratiek

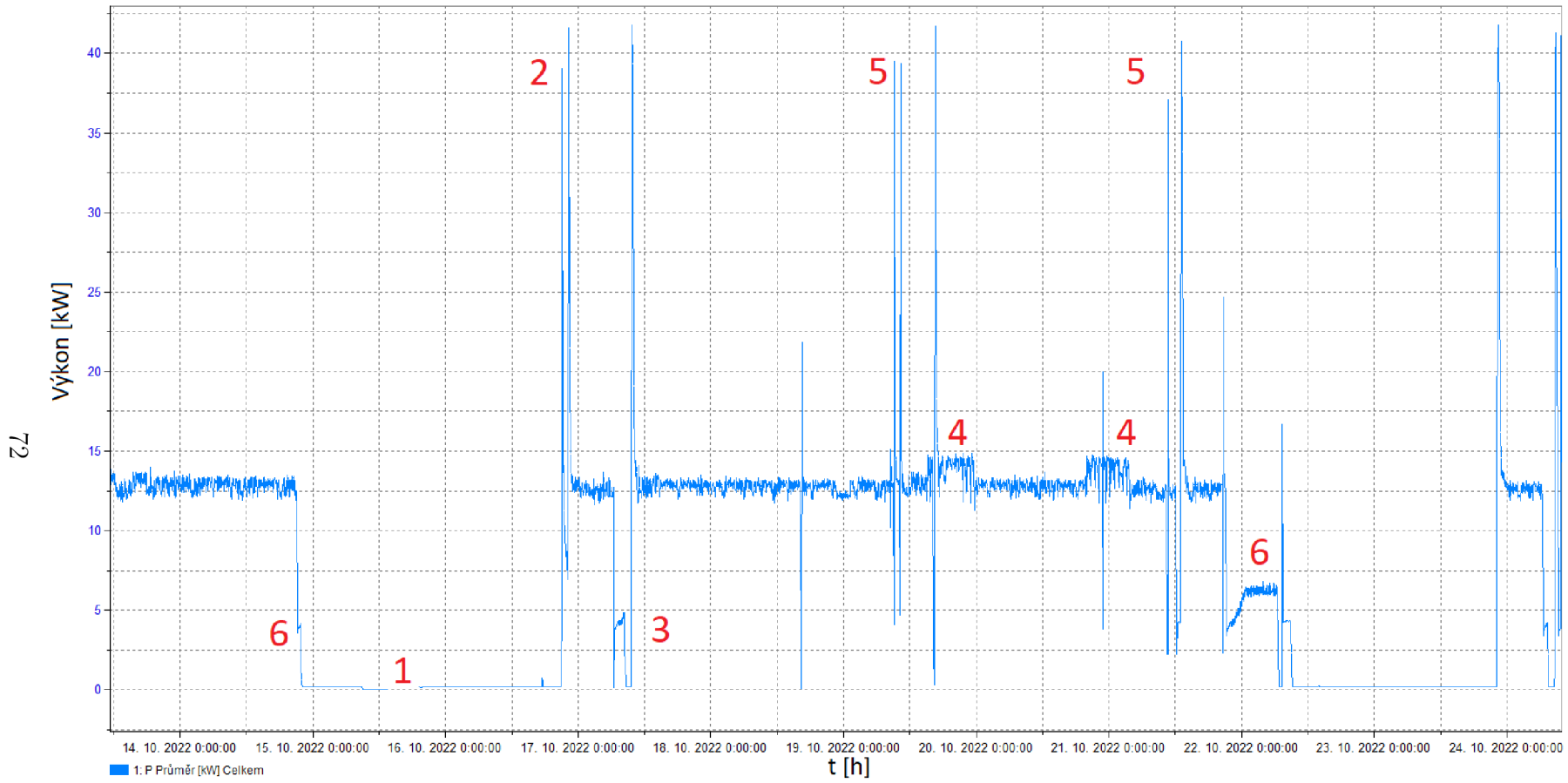
<b>DPS</b>	Doska plošných spojov
<b>THT</b>	Vývodová technológia súčiastok – Trough Hole Technology
<b>SMT</b>	Bez-vývodová technológia súčiastok – Surface Mount Technology
<b>HDI</b>	Prepojenie vysokej hustoty – High Density Interconnection
<b>QFN</b>	Štvorcové ploché bezvývodové púzdro – Quad Flat No-Lead package
<b>RSS</b>	Profil nábehu, prehriatia a špičky – Ramp, Soak, Spike
<b>RTS</b>	Profil nábehu po špičku – Ramp To Spike
<b>BGA</b>	Púzdro s guľčikovým poľom – Ball Grid Array
<b>SPI</b>	Inšpekcia nanesej pasty – Solder Paste Inspection
<b>AOI</b>	Automatická optická inšpekcia – Automatical Optical Inspection
<b>CAD</b>	Projektovanie pomocou počítača – Computer-Aided Design
<b>ICT</b>	Vnútro obvodový test – In-Circuit Test
<b>FCT</b>	Funkčný obvodový test – Functional Test
<b>RoHS</b>	Reštrikcia použitia nebezpečných látok v elektronike a elektronickej výbave – Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment
<b>VOC</b>	Prchavá organická zlúčenina – Volatile Organic Compound
<b>HAL</b>	Vyrovnávanie horúcim vzduchom – Hot Air Leveling
<b>FR</b>	Samozhasínací (materiál) – Flame Retardant
<b>ESD</b>	Elektrostatický výboj – ElectroStatic Discharge
<b>OPF</b>	Tok jedného kusu – One Piece Flow
<b>PLC</b>	Programovateľný logický ovládač – Programmable Logic Controller
<b>PID</b>	Proporcionálny-integrujúco-derivujúci ovládač – Proportional-Integral-Derivative controller
<b>TAL</b>	Time Above Liquidus – Čas nad liquidom

# Zoznam príloh

A Výsledky výkonových analýz

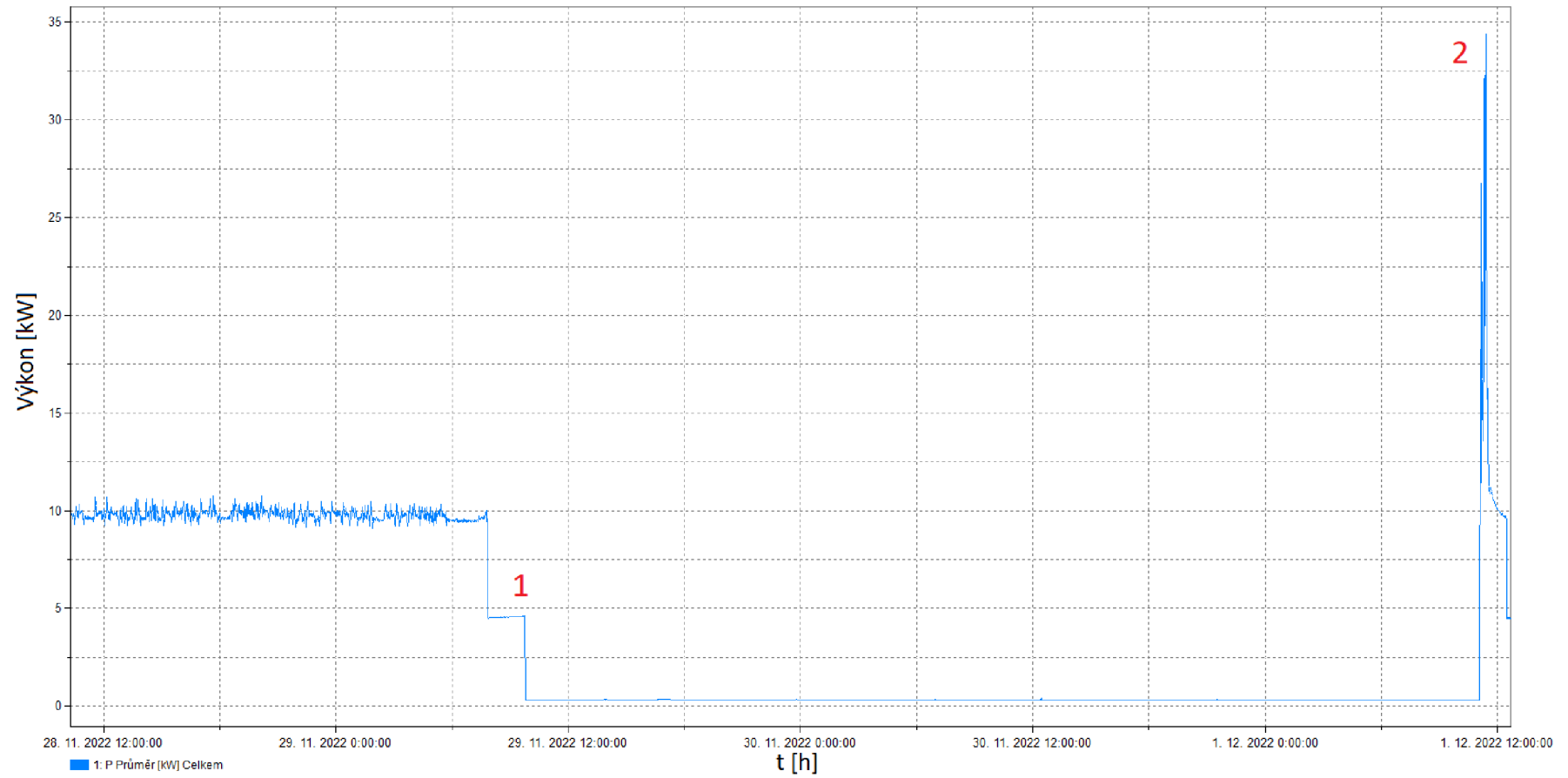
72

# A Výsledky výkonových analýz

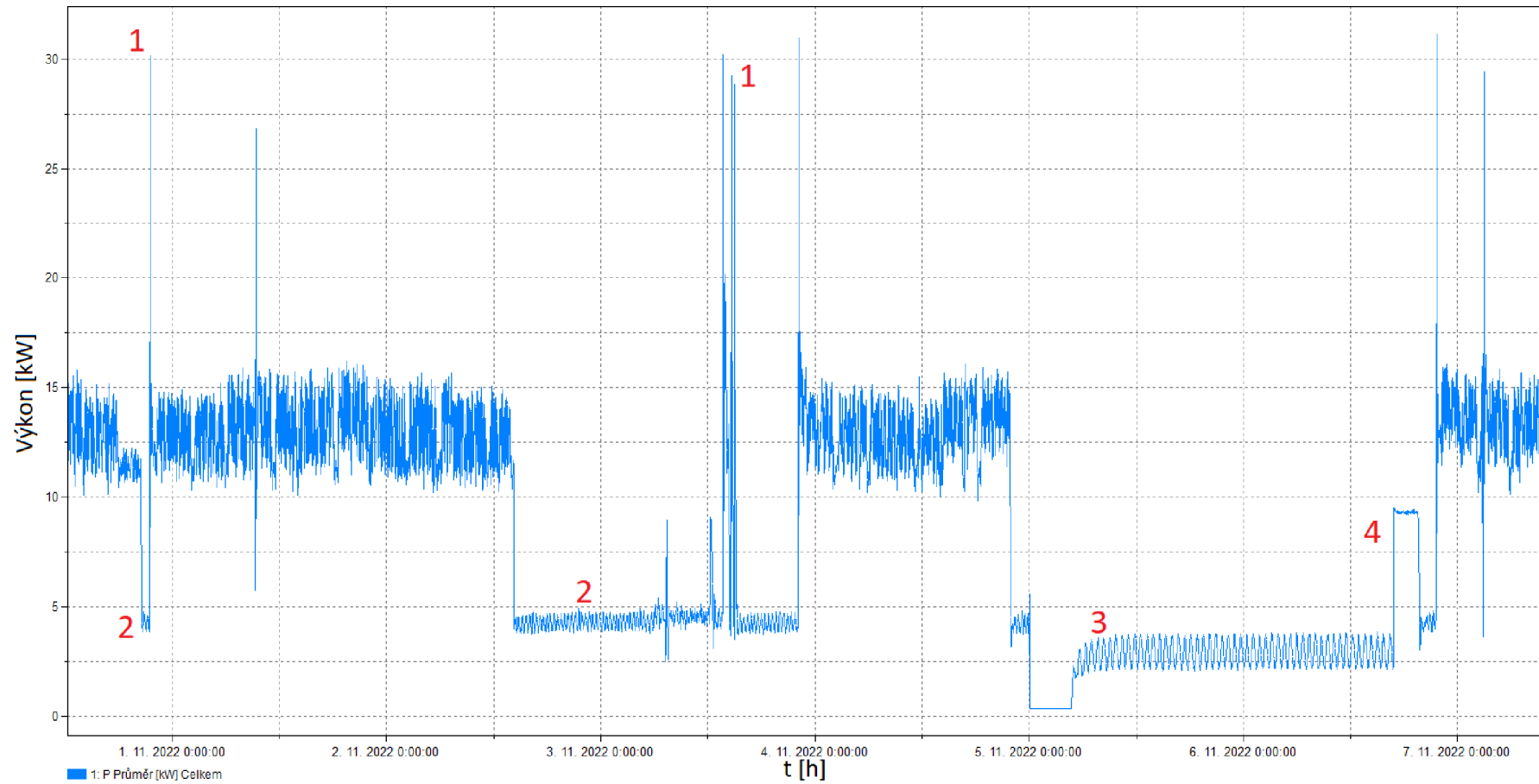


Obr. A.1: Výsledný priebeh pracovného výkonu pretavovacej pece Ersu Hotflow 4/20 v závislosti na čase s vyznačenými bodmi úkazov (profil RSS)

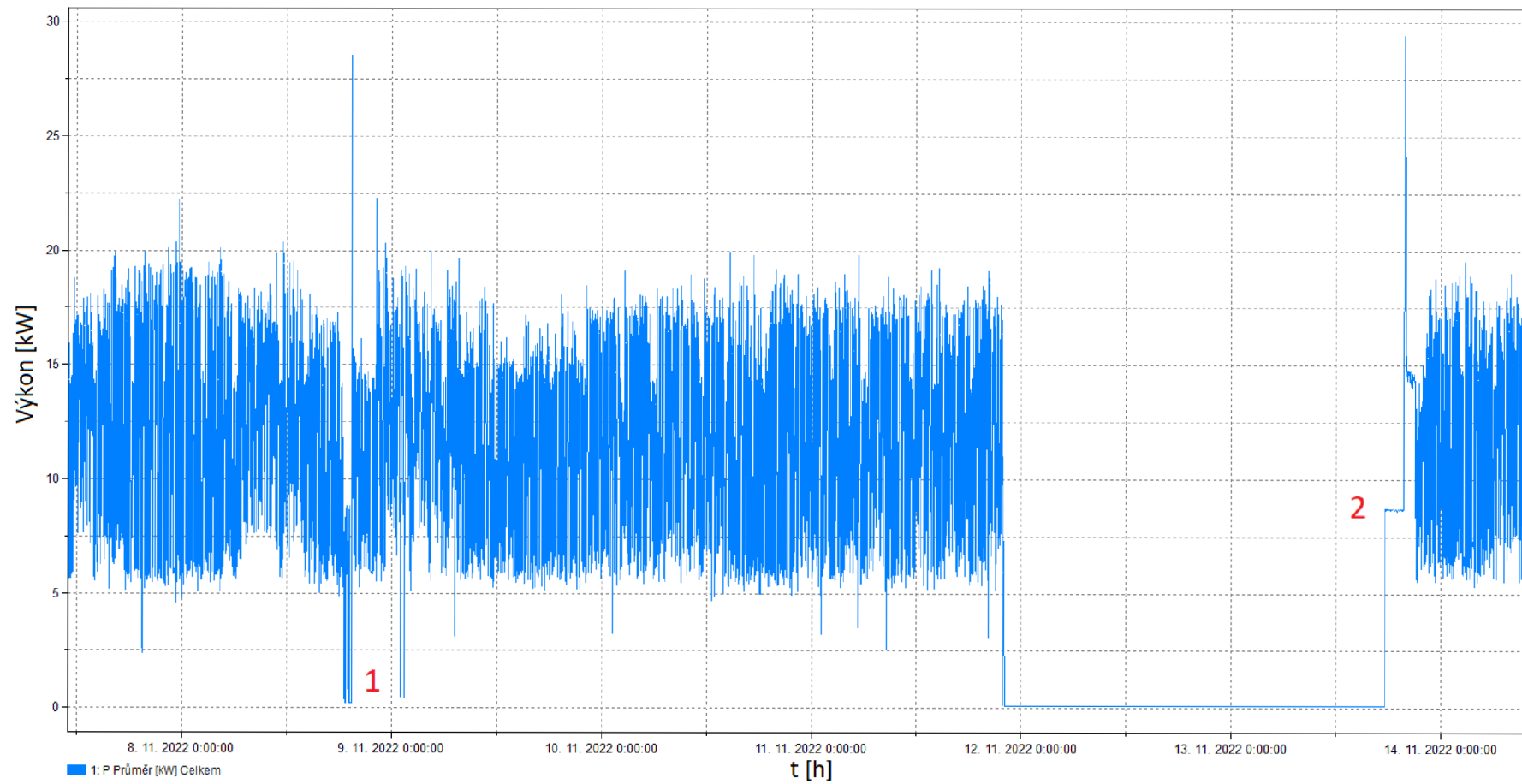




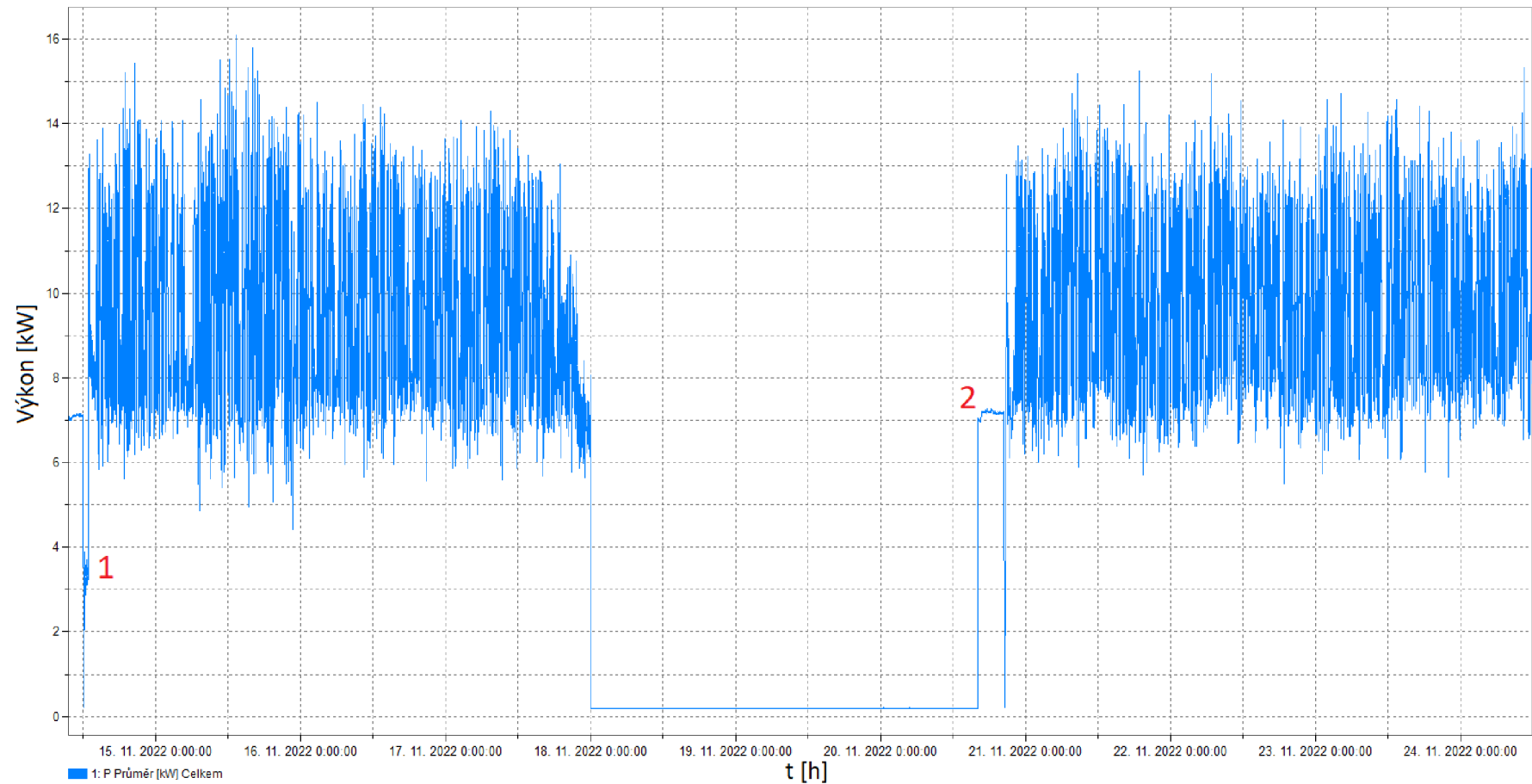
Obr. A.2: Výsledný priebeh pracovného výkonu pretavovacej pece Heller 1812EXL v závislosti na čase s vyznačenými bodmi úkazov



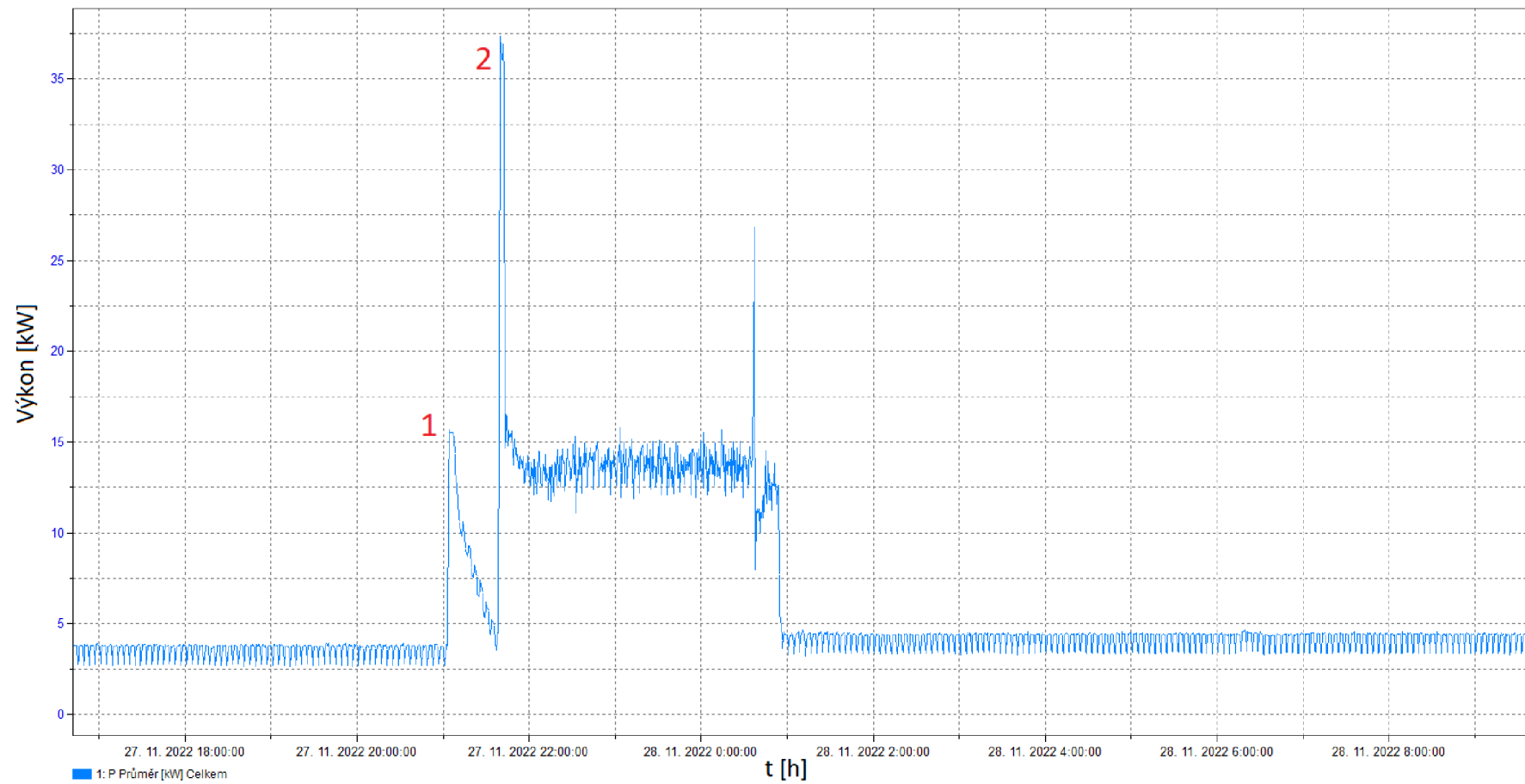
Obr. A.3: Výsledný priebeh pracovného výkonu pájkovacej vlny Vitronics Delta 5 v závislosti na čase s vyznačenými bodmi úkazov



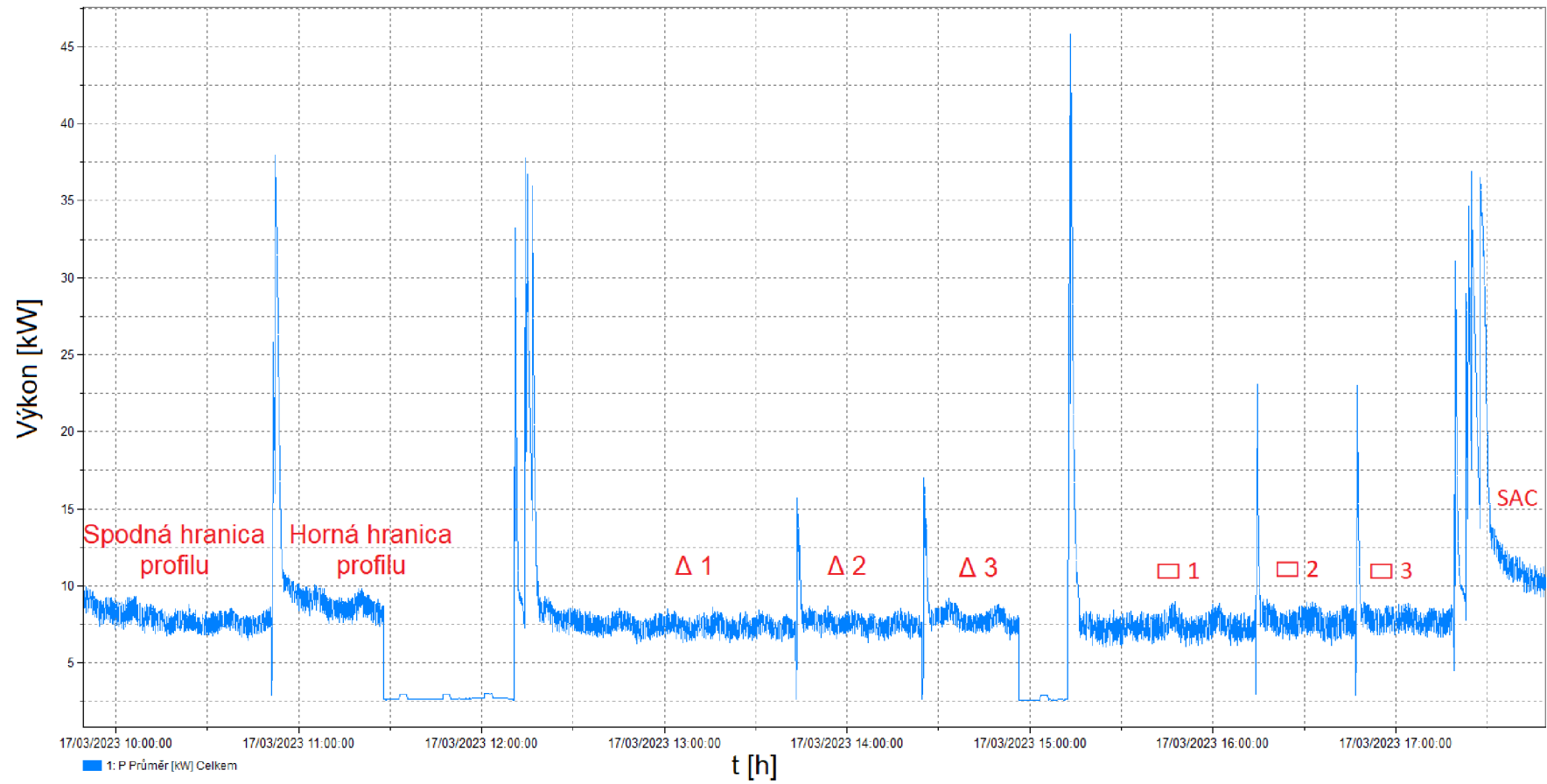
Obr. A.4: Výsledný priebeh pracovného výkonu pájkovacej vlny Ersá Powerflow v závislosti na čase s vyznačenými bodmi úkazov



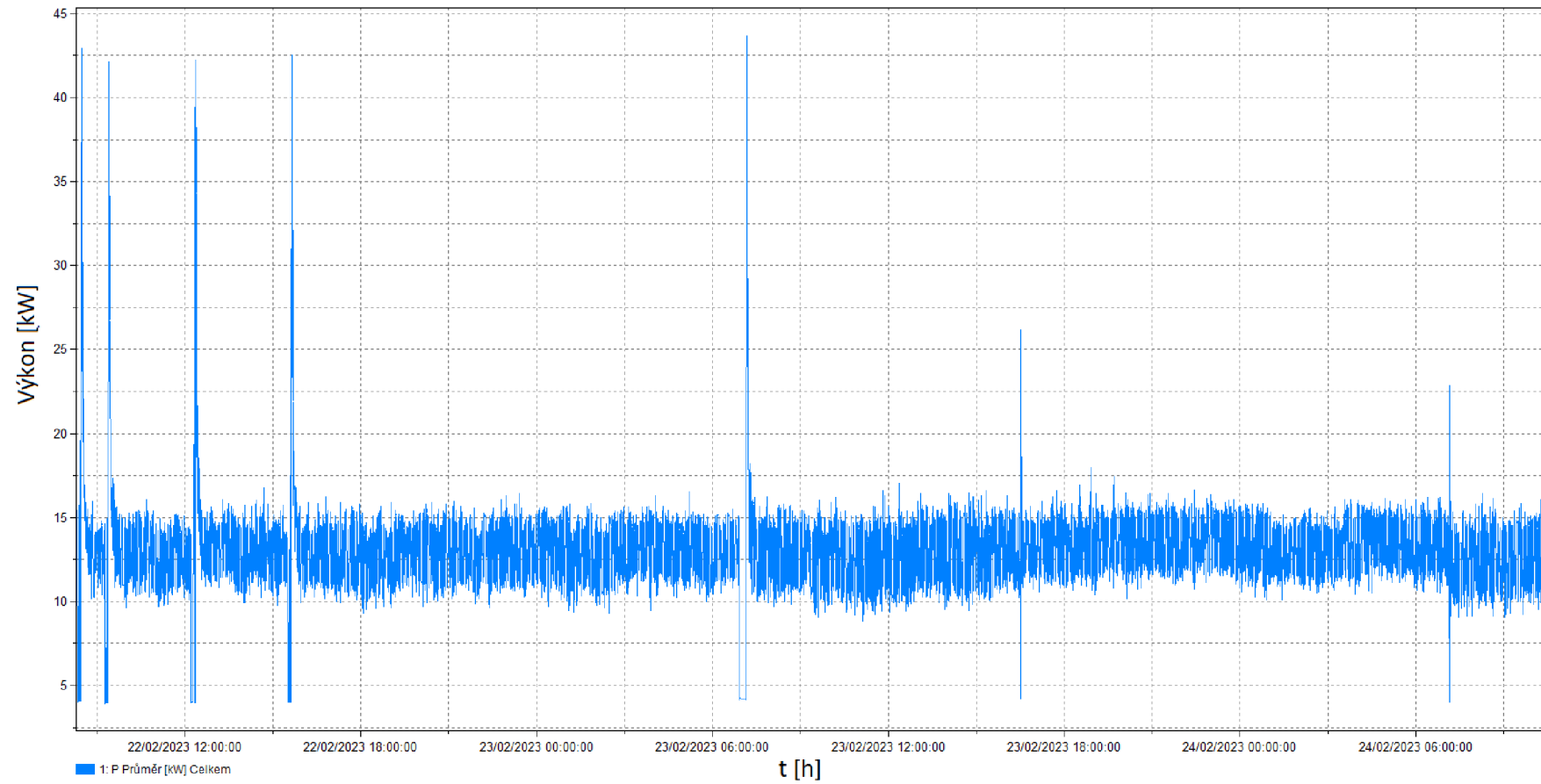
Obr. A.5: Výsledný priebeh pracovného výkonu pájkovacej vlny Ers Powerflow N2 v závislosti na čase s vyznačenými bodmi úkazov



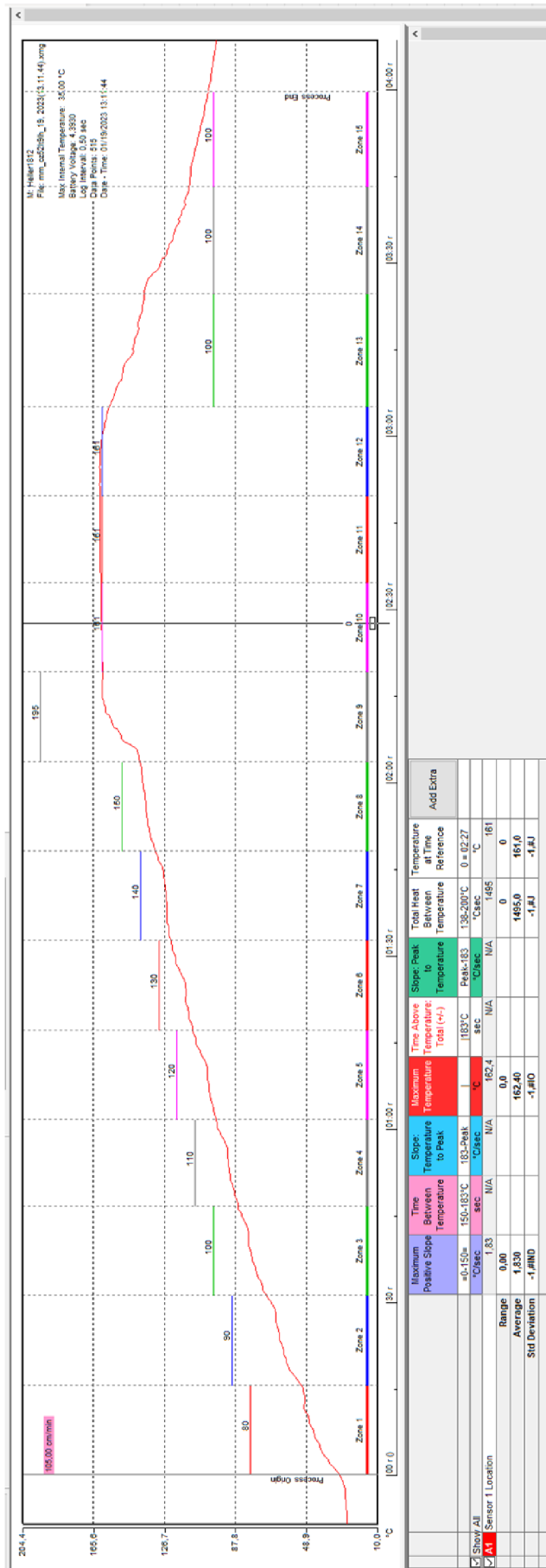
Obr. A.6: Výsledný priebeh pracovného výkonu pájkovacej vlny Vectra Electrovert v závislosti na čase s vyznačenými bodmi úkazov



Obr. A.7: Priebeh záznamu merania energetických vlastností niekoľkých profilov s rôznym nastavením pece

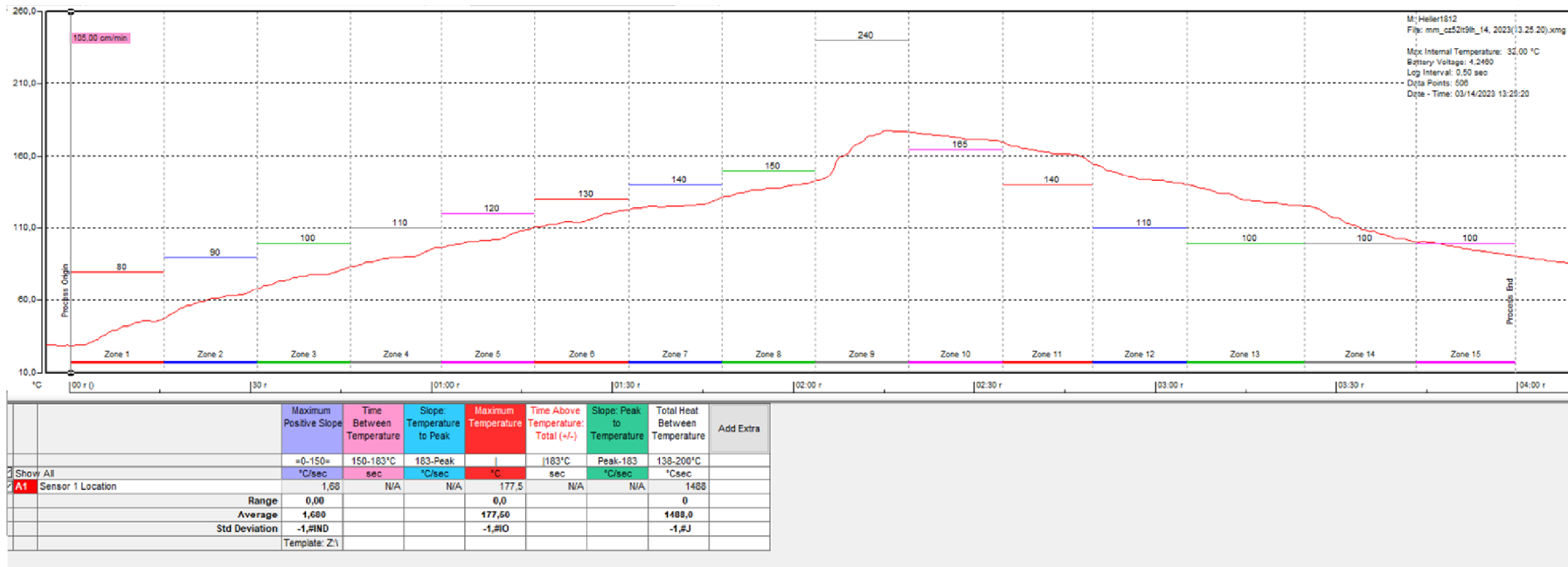


Obr. A.8: Výsledný priebeh pracovného výkonu pretavovacej pece Ersas Hotflow 4/20 pre profil RTS



Obr. A.9: Ukážka obdĺžnikového teplotného profilu použitého pri meraní na pretavovacej peci Heller 1812EXL





Obr. A.10: Ukážka trojuholníkového teplotného profilu použitého pri meraní na pretavovacej peci Heller 1812EXL