



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

APLIKACE PROCESNÍHO SYSTÉMOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

APPLICATION OF PROCESS SYSTEM ENGINEERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Hana Hrnčejarová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Studentka: **Bc. Hana Hrnčejarová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

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

Aplikace procesního systémového inženýrství

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na seznámení se, výpočtové zpracování a praktické aplikování současných moderních a účinných postupů procesního systémového inženýrství pro identifikaci potenciálu úspor energie a reálných možností jeho využití při řešení konkrétního průmyslového případu.

Cíle diplomové práce:

- (1) Seznámit se s moderními a účinnými technikami a postupy procesního systémového inženýrství pro identifikaci potenciálu úspor energie.
- (2) Vybrané postupy systémového inženýrství výpočtově připravit a zpracovat do podoby pro praktickou aplikaci.
- (3) Aplikovat výpočtově zpracované postupy systémového inženýrství na řešení konkrétního průmyslového případu.
- (4) Provést zhodnocení obdržených výsledků a diskusi vlastností použitých systémových postupů a souvisejících aspektů.

Seznam literatury:

KNOPF F. C.: Modeling, Analysis and Optimization of Process and Energy Systems, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2012.

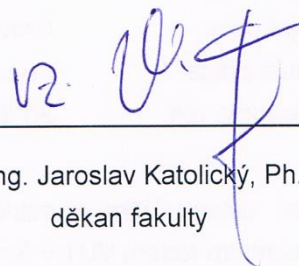
VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen Ed., VDI Heat Atlas, Second Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 15. 11. 2016



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



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

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na seznámení s moderními technikami a postupy procesního systémového inženýrství pro identifikaci úspor energie. Procesní systémové inženýrství je v tomto případě aplikováno na problematiku sítí tepelných výměníků a za účelem úspory energie je zde řešena jejich rekonstrukce. Pro rekonstrukci výměňkových sítí je popsána aktuální metoda *network pinch*, která využívá možností matematického programování. Metoda je uvedena v porovnání s vývojově staršími metodami, a to hlavně s PDM. Dále je zpracován postup výpočtu touto metodou a v prostředí softwaru Maple je aplikován na případ rekonstrukce výměňkové sítě v procesu hydrogenační rafinace oleje. Součástí práce je zhodnocení obdržných výsledků včetně diskuze k vlastnostem použité metody.

KLÍČOVÁ SLOVA

sít' tepelných výměníků, rekonstrukce, pinch analýza, network pinch, integrace procesů, optimalizace

ABSTRACT

The master's thesis is focused on familiarization with modern techniques and procedures of process system engineering for identification of energy savings. In this case, process system engineering is applied to the issue of heat exchanger networks and in order to save energy, their retrofit is solved here. The current network pinch method, which uses mathematical programming options, is described for the retrofit of the heat exchanger networks. The method is presented in comparison to older development methods, mainly with the PDM. In addition, the calculation procedure is also developed by this method and in the Maple software environment it is applied to the case of heat exchanger network retrofit in the process of hydrogenation refining of oil. Part of the thesis is an evaluation of the results obtained, including a discussion of the properties of the method used.

KEYWORDS

heat exchanger network, retrofit, pinch analysis, network pinch, process integration, optimization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRNCSJAROVÁ, H. *Aplikace procesního systémového inženýrství*.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 65 s.
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ AUTORKY PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně s využitím rad vedoucího práce pana doc. Ing. Zdeňka Jegly, Ph.D. a s pomocí informačních zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Brně, dne 26.5.2017

Hana Hrnčejarová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Zdeňku Jeglovi, Ph.D. za poskytnuté cenné rady a konzultace při vytváření práce. Děkuji také své rodině, že mi umožnila toto studium a za veškerou podporu při něm.

OBSAH

1	Úvod do problematiky	9
1.1	Úloha procesního systémového inženýrství	9
1.2	Zaměření diplomové práce	9
1.3	Přehled vývoje metod pro rekonstrukci výměňkových sítí	10
1.3.2	Metody založené na pinch analýze	11
1.3.3	Metody založené na matematickém programování	11
1.3.4	Ostatní metody	12
2	Klasické řešení rekonstrukce výměňkové sítě pomocí PDM	13
2.1	Hlavní rysy klasického řešení rekonstrukce výměňkové sítě pomocí PDM	13
2.2	Nástroje PDM pro rekonstrukci výměňkové sítě	16
2.3	Postup řešení rekonstrukce výměňkové sítě pomocí PDM	16
3	Metoda network pinch pro rekonstrukci výměňkové sítě	18
3.1	Princip metody network pinch a model LP pro diagnostiku	18
3.2	Možnosti překonání network pinch a nové modely pro dělení proudů	21
3.3	Postup aplikace metody network pinch včetně využití intenzifikace přenosu tepla	24
3.3.1	Fáze řešení rekonstrukce výměňkové sítě metodou network pinch	24
3.3.2	Intenzifikace přenosu tepla	25
4	Ukázkový příklad aplikace metody network pinch	27
4.1	Zadání úlohy a diagnostika stávající sítě výměny tepla	27
4.2	Systematické hledání neúčinnějších úprav výměňkové sítě	30
4.2.1	Přepojení výměňku	30
4.2.2	Přidání nového výměňku	31
4.2.3	Rozdělení proudu	32
4.2.4	Další modifikace výměňkové sítě	35
4.3	Dosažené výsledky	37
5	Řešení průmyslového případu	39
5.1	Zadání úlohy a diagnostika stávající výměňkové sítě výměny tepla	40
5.1.1	Zadání hodnot pro výpočet	40
5.1.2	Diagnostika	42
5.2	Systematické hledání nejúčinnějších úprav výměňkové sítě	42
5.2.1	Stanovení minimálního teplotního přiblížení $\Delta T_{\min}(\text{EMAT})$	43
5.2.2	Hledání vhodné varianty umístění nového výměňku	46
5.3	Dosažené výsledky po detailní simulaci	54
6	Závěr	57
	Seznam použité literatury	58
	Seznam použitých symbolů	60
	Seznam použitých zkratk	61
	Seznam obrázků	62
	Seznam tabulek	63
	Slovník pojmů	64
	Seznam příloh	65

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Procesní systémové inženýrství je významným oborem, uplatnitelným v mnoha průmyslových odvětvích. Jeho důležitost stoupá se stálou snahou konstruovat či modifikovat průmyslové výrobní linky k docílení nejvyšších zisků a úspor energie současně se zajištěním co nejnižších investičních a provozních nákladů. Přes užitečnost oboru a objem odborných článků, studií a dalších publikací, jež se zabývají principy využívanými tímto oborem, existuje pouze malé množství podkladů v českém jazyce. Zpracování tématu je tedy vhodnou příležitostí k přiblížení úlohy tohoto oboru. Níže je uvedeno základní vysvětlení jeho ideje.

1.1 Úloha procesního systémového inženýrství

Procesní systémové inženýrství je interdisciplinární obor vycházející z principů chemického inženýrství. Obecně se dá jeho úloha přiblížit jako systematické zjišťování, jak navrhovat a řídit složité inženýrské procesy (zahrnující například aplikace reaktorů, tepelných výměníků, kotlů, pecí, destilačních kolon a dalších). Obor za účelem návrhů procesů, jejich řízení a optimalizace konkrétně využívá výpočetních technik matematického modelování a simulace.

Procesní systémové inženýrství se zabývá celkovým chováním systému od výchozí suroviny po konečný produkt. Přitom zkoumá, jak by měla být kombinována jednotlivá zařízení a složky daného procesu pro dosažení nejoptimálnějšího celkového výkonu (v závislosti na dalších požadavcích, například na nákladech).

Často využívaným a důležitým pojmem je zde integrace procesů (PI, *Process Integration*). Chemický proces je integrovaným systémem propojených jednotek a proudů. Správné porozumění a řešení úloh týkajících se těchto procesů by z pohledu PI mělo korespondovat s procesem jako celkem (nikoliv řešit problémy na oddělených částech systému). Integrace procesů tedy označuje holistický přístup (neboli přístup poskytující celistvý pohled) k návrhu procesů či jejich rekonstrukci [1], zahrnuje postupy umožňující navrhovat procesy v různých průmyslových odvětvích (chemický, petrochemický, potravinářský, farmaceutický průmysl a další, možno souhrnně nazvat procesní průmysl) tak, aby došlo k dosažení maximálních úspor energie, eventuálně ke snížení emisí [2].

1.2 Zaměření diplomové práce

Diplomová práce se zaměřuje na seznámení s moderními technikami a postupy procesního systémového inženýrství pro identifikaci úspor energie. Za účelem úspor energie je v předkládané diplomové práci vyzdvíženo téma rekonstrukce výměňkových sítí a pro tuto rekonstrukci je popsána a zpracována aktuální metoda *network pinch*, využívající matematického programování.

Metoda *network pinch* je pak uvedena v souvislosti s dalšími metodami pro rekonstrukci výměňkových sítí, hlavně s hojně využívanou PDM. Součástí práce je výpočtové zpracování první fáze zmiňované metody. To je realizováno v prostředí softwaru Maple, kde je následně provedena demonstrace výpočtu na síti teplených výměníků u průmyslového procesu hydrogenační rafinace oleje.

1.3 Přehled vývoje metod pro rekonstrukci výměňkových sítí

Metody rekonstrukce sítí tepelných výměníků jsou v literatuře (například [3], [4]) rozdělovány do dvou základních kategorií podle principu přístupu k jejich řešení. Při tomto obecném rozdělení tvoří první kategorii metody založené na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** analýze, druhým přístupem jsou pak metody využívající matematického programování. Některé zdroje [5] uvádí ještě třetí kategorii, zastupující hybridní metody kombinující oba výše zmíněné přístupy.

V historickém vývoji metod je však na prvním místě potřeba zmínit metody využívající tzv. heuristických pravidel. Ta sloužila k navrhování a rekonstrukci výměňkových sítí před formulací dále popisovaných metod. Jedná se o souhrn pravidel vycházejících z praktických zkušeností a poznatků. Jejich výhodou je srozumitelnost a jednoduchost pro aplikaci, u obdrženého řešení však nelze zaručit jeho optimálnost. Taktéž se vyznačují nejednoznačným výkladem a obtíže mohou vznikat při jejich použití na úlohy většího rozsahu. I z toho důvodu jim nelze přisuzovat samozřejmou platnost a funkčnost, mají pouze intuitivní charakter. [6]

Shrnutím vývoje přístupů k rekonstrukci výměňkových sítí se v roce 2014 zabývali B. K. Sreepathi a G. P. Rangaiyah [5], kteří uvádějí přehled zaznamenaný v tabulce 1.1. Dále v textu jsou metody členěné do podkapitol dle rozdělení naznačeném v prvním odstavci. Separátně jsou stručně popsány vybrané metody založené na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** analýze a vybrané metody matematického programování.

Tabulka 1.1 Vývoj přístupu k rekonstrukci HEN v rozsahu uplynulých 30 let* [5]

	před 1990	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2013
Metody založené na principu pinch analýzy	hledání cílů rekonstrukce	omezení tlakovými ztrátami	<i>path analysis</i> (analýza cesty)	pravidla pro konstrukci cesty	optimalizace tlakových ztrát	GDT
	rekonstrukce inspekci	křížová výměna tepla	RDT	nové kompozitní křivky	zdokonalené kompozitní křivky	intenzifikace přenosu tepla
Metody založené na matematickém programování		formulace MINLP	<i>hypertargets</i>	CAT model	GA pro rekonstrukci HEN	intenzifikace přenosu tepla
	Dva stupně: MILP a NLP optimalizace	screening a optimalizace	uvážení tlakových ztrát	typy tepelných výměníků	kombinace GA s ILP a NLP metodami	přístup one-step

*Poznámky k tabulce: RDT (*retrofit thermodynamic diagram*), GDT (*grid diagram table*), MILP (*mixed integer linear programming*), NLP (*nonlinear programming*), MINLP (*mixed integer nonlinear programming*), CAT (*constant approach temperature*), GA (*genetic algorithm*), ILP (*integer linear programming*).

1.3.2 Metody založené na *pinch analýze*

Pinch analýza neboli PDM (*pinch design method*) je grafickou metodou opírající se o zákony termodynamiky. Principům PDM a jejímu podrobnějšímu popisu je věnována kapitola 2 této práce.

Na základě pinch analýzy bylo v uplynulých letech (či desetiletích) prezentováno mnoho rozšiřujících přístupů zmiňovaných v odborné literatuře ([5], [7], [8]). Počátkem devadesátých let to byla například maticová metoda. Ta rozkládá HEN na dvě části (nad a pod *pinchem*), které jsou následně vyhodnocovány a upravovány uživatelem nebo optimalizačním algoritmem pomocí detailních informací o každém propojení HEN shromážděných v tabulce ("matici"). Maticová metoda (*cost matrix method*) se snaží nalézt nákladově optimální řešení uvážením parametrů jako je vzdálenost mezi proudy, typ tepelného výměníku, součinitele přestupu tepla, tlakové ztráty a zanášení.

Kromě *cost matrix method* se ještě objevuje tzv. *area matrix method*, tedy maticová metoda plochy, kde matice reprezentuje rozdělení plochy mezi každý pár horkých a chladných proudů v existující HEN. Funguje na základě snižování odchylek mezi existující maticí plochy a cílovou maticí, která je vytvořena předpokladem vertikálního přenosu tepla mezi chladnými a horkými kompozitními křivkami.

Dalším přístupem je *path analysis* (analýza cesty). Metoda funguje na principu vyhodnocování částí existující HEN (tzv. subsítí, *subnetworks*), zatímco zbývající síť zůstává nezměněna. Každá subsíť obsahuje alespoň jeden chladný a jeden horký servis. Metoda se skládá ze tří fází: identifikace subsítí na základě ekonomického potenciálu, jejich porovnání z hlediska úspor energie, složitosti a praktičnosti, a nakonec rekonstrukce vybrané subsítě včetně porovnání s cíli.

Dále se objevují zdokonalené kompozitní křivky (*advanced composite curves, ACC*), vyvinuty sledováním výsledků získaných maticovou metodou. Metoda spočívá v modifikaci souhrnné kompozitní křivky (*grand composite curve, GCC*). GCC je zde rozdělena na osm různých křivek (čtyři pro oblast nad *pinchem* a čtyři pro oblast pod *pinchem*). Tímto rozdělením a znázorněním všech křivek je dosaženo komplexního pohledu na rekonstruovanou HEN.

Příkladem vizualizačního nástroje PDM je termodynamický diagram rekonstrukce (*retrofit thermodynamic diagram, RTD*), který vznikl modifikací konvenčního mřížkového diagramu. RTD poskytuje stručný grafický popis tepelného zatížení zároveň s hnacími silami v existující HEN. Dalším příkladem vizualizační techniky je tabulka mřížkového diagramu (*grid diagram table, GDT*).

Mnoho dalších přístupů a dílčích metod založených na PDM se objevuje při řešení konkrétních průmyslových případů.

1.3.3 Metody založené na matematickém programování

Metody založené na matematickém programování transformují řešení rekonstrukce HEN do optimalizační úlohy formulováním problému rekonstrukce jako matematického modelu. Mnoho z těchto metod využívá tzv. superstruktury zahrnující všechny potenciální varianty rekonstrukce. Základem je pak nalezení efektivního matematického vyjádření problému a následná optimalizace, jejíž cílem je identifikovat nákladově nejlepší řešení z variant superstruktury [8].

Metody matematického programování mohou být rozděleny do dvou podsekcí podle způsobu optimalizace na metody deterministické a stochastické. Mezi deterministické

strategie jsou klasifikovány metody, využívající MILP (*mixed integer linear programming*, smíšené celočíselné lineární programování), NLP (*non-linear programming*, nelineární programování) a MINLP (*mixed integer non-linear programming*, smíšené celočíselné nelineární programování). Například lze zmínit metodu *assignment-transportation model* využívající MILP. Tato metoda je založena na dříve vytvořeném *transportation* („překládkovém“) modelu, který využívá „překládání“ tepla mezi stanovenými teplotními intervaly. *Assignment-transportation model* pak spočívá v minimalizaci počtu strukturálních změn požadovaných k dosažení dané úrovně procesní výměny tepla. Jeho rozšířením je dvoustupňová metoda, kde prvním stupněm je pre-screening, zjišťující pouze počet modifikací a ve druhém – optimalizačním stupni – je použito MINLP k posouzení všech možných variant modifikace. Mnoho dalších metod pak využívá v prvním stupni MILP a pro následnou optimalizaci NLP.

Dalším příkladem může být dvoustupňový přístup, který ve svém prvním stupni využívá model CAT (*constant approach temperature*, model konstantního teplotního přiblížení), jehož výhodou je linearizace výpočtu plochy výměny tepla definováním fixní hodnoty teplotního přiblížení. Přístup využívá MILP v prvním a MINLP v druhém kroku.

S postupem času jsou stále představovány nové metody či přístupy k rekonstrukci HEN. Například v roce 2017 je předkládána metoda mostu (*bridge*) [7], kde most prezentuje soubor modifikací respektujících pět hlavních podmínek (více v literatuře [7]). Používanými nástroji jsou *energy transfer diagram* (diagram přenosu energie, jedná se o závislost přenášeného tepla [kW] na teplotě [°C]) a *network table* (tabulka sítě), kde jsou proudy rozloženy na *suppliers* (poskytující části) a *receptors* (přijímající části) a ty pak dále na menší teplotní intervaly, pomocí nichž probíhá následné vyhodnocování. K identifikaci vhodných změn v topologii HEN pak může sloužit formulace MILP založena na transportním modelu nebo formulace MINLP založena na využití superstruktury.

Jako stochastické metody lze zařadit metody využívající genetické algoritmy (*genetic algorithms*, GA) nebo simulované ochlazování (*simulated annealing*, SA), které mohou být formulovány například jako NLP problém.

1.3.4 Ostatní metody

V případech využití pinch analýzy i matematického programování se dále objevují přístupy zahrnující uvažování tlakových ztrát či intenzifikaci přenosu tepla. Uvedení možností intenzifikace přenosu tepla je součástí kapitoly 3 této práce.

Kromě metod založených na pinch analýze a matematickém programování byly pak zmíněny ještě hybridní metody. Mezi tyto metody je možno zařadit například metodu *network pinch* kombinující postupy pinch analýzy s matematickým programováním. Na zmiňovanou metodu je především zaměřena tato diplomová práce, vysvětlení principů metody *network pinch* je věnována kapitola 3.

2 KLASICKÉ ŘEŠENÍ REKONSTRUKCE VÝMĚNIKOVÉ SÍTĚ POMOCÍ PDM

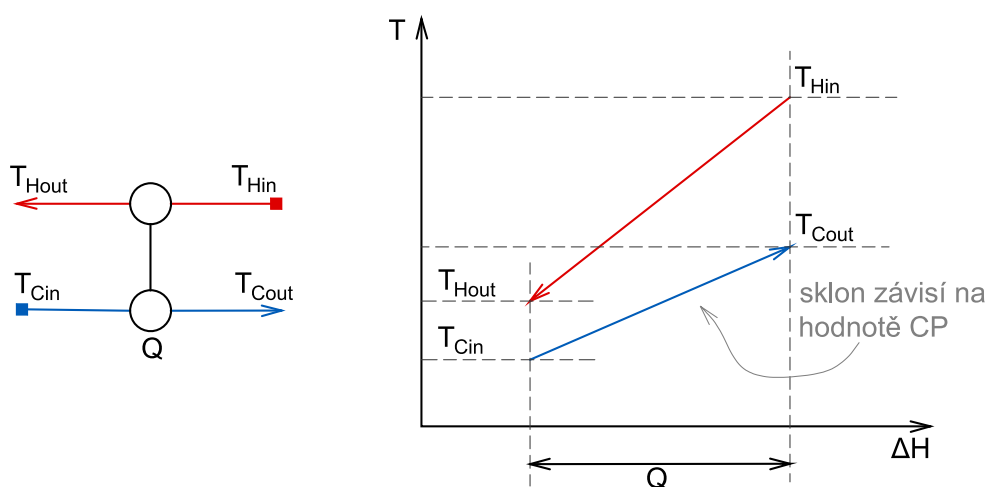
Označení PDM je zkratkou anglického názvu *Pinch Design Method*, jenž pojmenovává stále vysoce využívanou metodu pro integraci procesů. Též principy a postupy můžeme v anglické literatuře a odborných článcích nalézt za slovními spojeními *Pinch Method*, *Pinch Point Analysis*, *Pinch Analysis* či *Pinch Technology*. V českém jazyce je pak možno užít ekvivalenty: *pinch analýza*, *metoda pinch*, *pinch technologie*.

Myšlenka PDM byla zpracována především B. Linnhoffem (1983, [9]). Technologie byla původně vyvinuta jako nástroj pro návrh energeticky efektivních sítí pro výměnu tepla, a to během ropné krize koncem sedmdesátých a počátkem osmdesátých let v reakci na prudký nárůst ceny energie. Od té doby našly postupy založené na pinch technologii další uplatnění v široké škále návrhů energetických systémů, jako je například profilace destilační kolony, návrhy nízkoteplotních procesů, integrace skupinových procesů nebo návrhy zaměřené na emise, minimalizaci spotřeby vody a odpadních vod. [3]

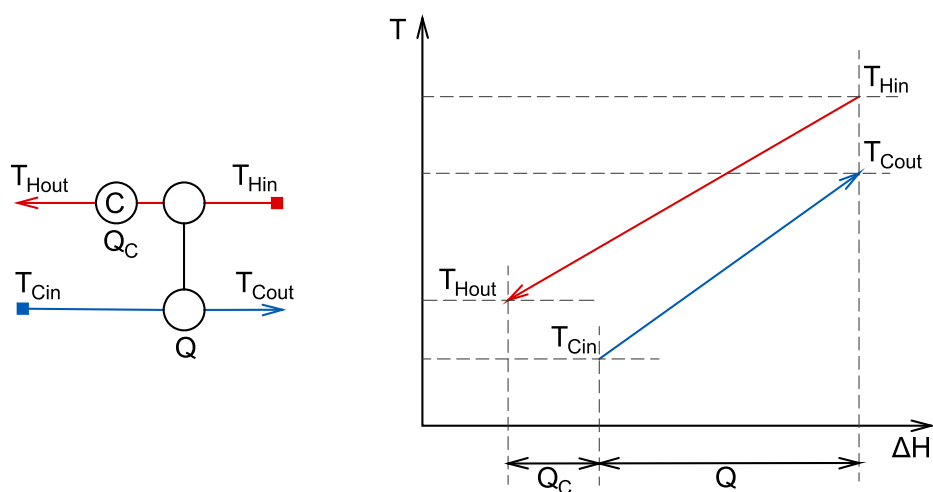
2.1 Hlavní rysy klasického řešení rekonstrukce výměnikové sítě pomocí PDM

Pinch technologie je založená na zákonech termodynamiky, které jsou uplatňovány při stanovení energetické bilance a zajištění kladného teplotního rozdílu mezi horkým proudem a chladným proudem v případě výměny tepla [3]. Při uplatnění metody na rekonstrukci výměnikových sítí se vychází ze zásady ponechat již instalované a provozované výměníky tepla a horká či chladná zařízení a snížení spotřeby energie zajistit vhodnou změnou v zapojení těchto výměníků či přidáním nových jednotek [2].

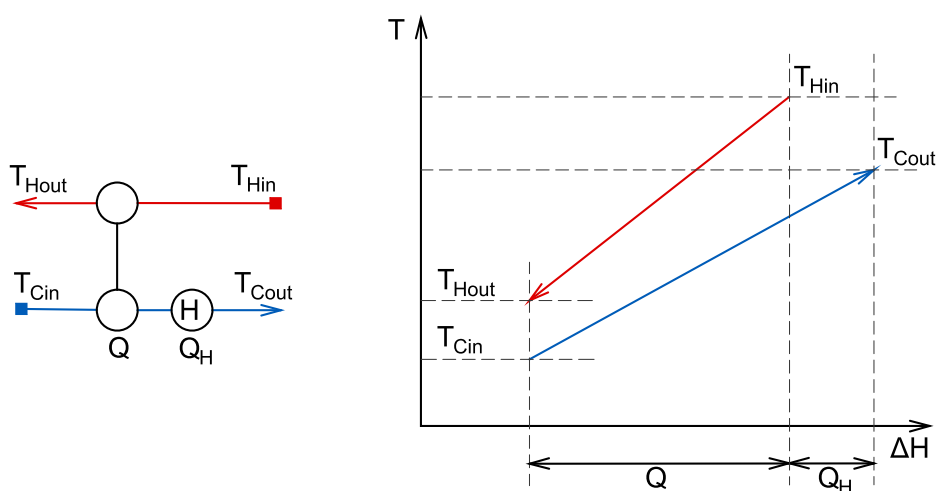
Základním myšlenkou PDM je existence tzv. bodu *pinch*. Ten může být vysvětlen užitím diagramu teplota – tepelný tok. Pro ukázkou využití diagramu jsou nejprve zařazeny varianty s jedním horkým a jedním chladným procesním proudem. Obrázek 2.1 znázorňuje T–H diagram v případě dvou proudů propojených jedním výměníkem, na obrázku 2.2 je pak zobrazena situace s jedním výměníkem a chladičem a obrázek 2.3 se týká stavu pro jeden výměník a ohřívač.



Obrázek 2.1 Diagram T–H pro jeden výměník

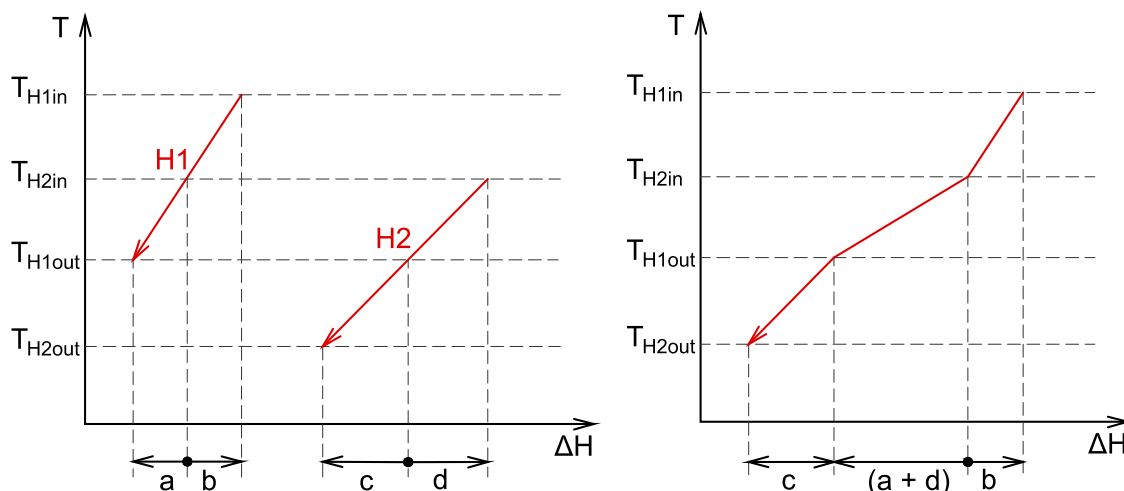


Obrázek 2.2 Diagram T-H pro jeden výměník a chladič



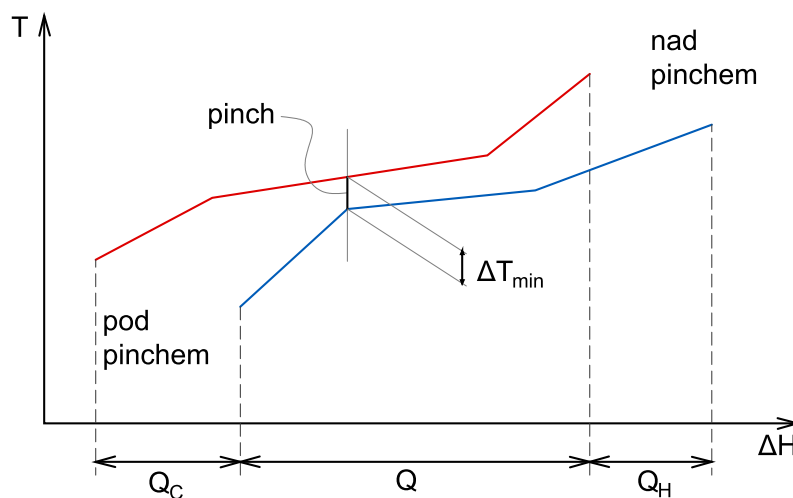
Obrázek 2.3 Diagram T-H pro jeden výměník a ohřivač

V případě sítí tepelných výměníků je ale potřeba do T-H diagramu zanést několik procesních proudů. To lze přehledně provést s využitím tzv. kompozitních křivek (*composite curves, CC*). Všechny horké proudy tak lze prezentovat jedinou horkou kompozitní křivkou (*hot composite curve, HHC*), obdobně všechny chladné proudy lze transformovat do jedné chladné kompozitní křivky (*cold composite curve, CCC*). Způsob vytvoření jedné kompozitní křivky z více procesních proudů je naznačen na obrázku 2.4. Horké a chladné proudy v procesu lze reprezentovat i jedinou souhrnnou kompozitní křivkou (*grand composite curve, GCC*). Ta se dá sestavit z horké a chladné kompozitní křivky odečtením jejich vzájemné horizontální vzdálenosti (v jejich posunuté pozici o $\Delta T_{\min}/2$ směrem do středu).



Obrázek 2.4 Sestavní kompozitní křivky pro horké procesní proudy [2]

Po definování kompozitních křivek je možno ukázat polohu bodu *pinch* na příkladu jednoduché výměníkové sítě o dvou horkých a dvou chladných procesních prouděch (obrázek 2.5).



Obrázek 2.5 Příklad kompozitních křivek a poloha bodu *pinch*

Bod *pinch* se nachází v místě minimální vertikální vzdálenosti kompozitních křivek, která je dána hodnotou minimálního teplotního přiblížení ΔT_{min} [°C]. Bodem *pinch* je celý systém rozdělen do dvou subsystémů, a to na oblast nad *pinchem* a oblast pod *pinchem*. Principem metody je pak řešení rekonstrukce (nebo i nového návrhu) HEN s vazbou na tyto subsystémy. Vzhledem k bodu *pinch* metoda využívá těchto základních pravidel:

- nepřenášet procesní teplo přes *pinch*
- nepoužívat chladné zařízení nad *pinchem*
- nepoužívat horké zařízení pod *pinchem*

2.2 Nástroje PDM pro rekonstrukci výměňkové sítě

Mezi využívané prostředky [2] při rekonstrukci klasickou metodou PDM patří v první řadě **analýza přenosu tepla přes pinch** (*cross pinch analysis*), mající za cíl nalezení problematických výměníků HEN (tedy výměníků, které přenášejí teplo přes *pinch*). Při této analýze se využívá zakreslení do mřížkového diagramu, pomocí něhož se dají tyto problematické výměníky snadno určit. Množství tepla přenášeného přes *pinch* danými výměníky se stanoví výpočtem z bilanční rovnice. Výměníky s největší hodnotou tohoto tepla jsou pak vhodnými kandidáty pro rekonstrukci.

Dalším nástrojem může být **diagram hnací síly** výměníků tepla (*driving force plot*). Dle zvolených souřadnic os existuje několik tvarů tohoto diagramu. Příkladem může být diagram s vynášenými teplotami chladných proudů na vodorovné ose a teplotami horkých proudů na svislé ose. V prvním kroku je do diagramu vynesena závislost získaná z procesních proudů HEN, následně jsou vynášeny závislosti popisující jednotlivé tepelné výměníky této sítě. Vhodně umístěné výměníky v síti jsou pak ty, jejichž vynesené závislosti se nejlépe shodují s křivkou získanou z procesních proudů a naopak.

Následujícím uváděným prostředkem je **analýza zbytkového problému** (*remaining problem analysis*), kde daný problém může zastupovat plocha výměny tepla, minimální teplotní přiblížení či energie. Při analýze zbytkové plochy se vychází z pevně dané hodnoty minimální dodané energie (určené pomocí diagramu závislosti plochy výměny tepla na dodané energii). Diskutovanou veličinou je zde tzv. maximální účinnost plochy výměny tepla, která je přímo úměrná ideální minimální ploše výměny tepla a nepřímo úměrná součtu této minimální plochy s minimální plochou určenou pro zbytkový problém (pro ideální stav tedy platí, že je rovna jedné). Minimální plocha výměny tepla pro zbytkový problém se pak určuje pro každý výměník při jeho pomyslném vyjmutí z HEN. Obdobně lze přistupovat k analýze zbytkového minimálního teplotního přiblížení.

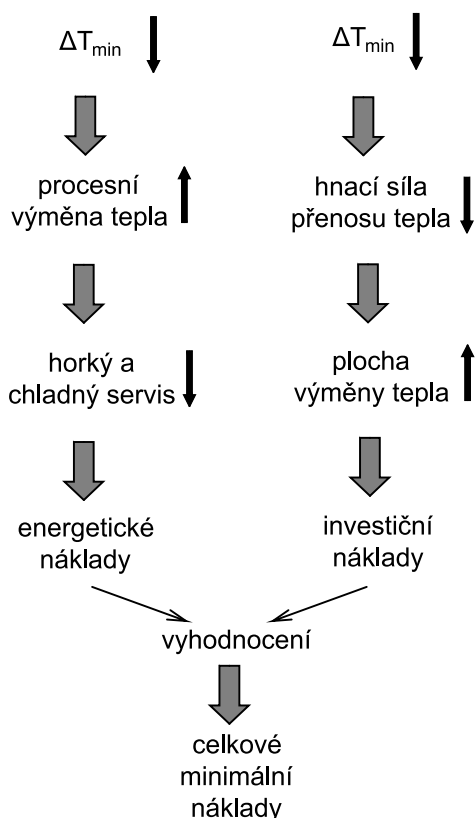
Jako základ pro další zásahy do topologie HEN může sloužit metoda **posunutí výměníku** (*exchanger shifting*), shrnující výsledky výše popsaných postupů. Pomocí tohoto nástroje je popisováno umístění jednotlivých výměníků v HEN a současně naznačen směr posunutí u nevhodně umístěných jednotek.

2.3 Postup řešení rekonstrukce výměňkové sítě pomocí PDM

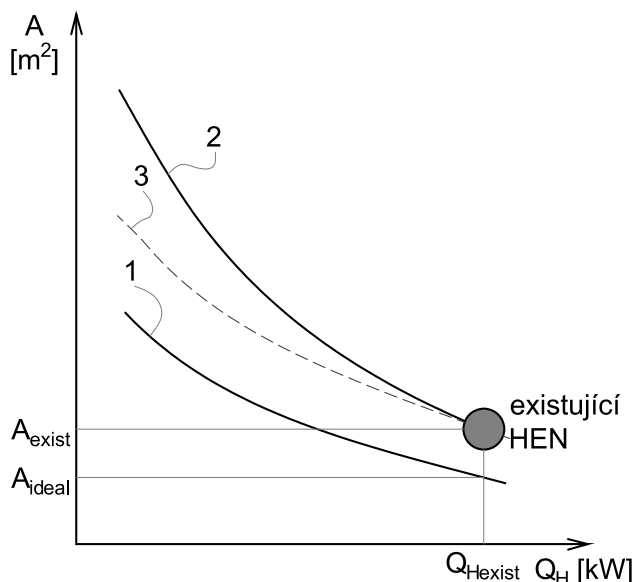
Postup řešení rekonstrukce výměňkových sítí lze v případě *pinch technologie* rozdělit do několika fází. V prvním kroku je nutné z procesního schématu toků identifikovat procesní proudy a potenciální zařízení, použitelná pro účely rekonstrukce. Tato fáze může být nazvána jako **fáze extrakce dat**. Získaná data a informace o proudech jsou podstatná k vytvoření fyzikálního modelu procesu a k určení energetické bilance. Správnost těchto dat je nezbytná pro nalezení reálných možností k úspoře energie.

Po extrakci dat následuje **fáze targetingu** (hledání cílů rekonstrukce). V této fázi je možné vytvořit plán pro zajištění minimální spotřeby horkých a chladných zařízení, minimálního počtu nových použitých jednotek a přídatné plochy výměny tepla. Za tímto účelem se stanovuje optimální úroveň výměny tepla či optimální hodnota minimálního teplotního přiblížení ΔT_{\min} , a to především rozvahou investičních a provozních nákladů (obrázek 2.6), analogicky k postupu při novém návrhu HEN.

Vhodný plán rekonstrukce naznačuje diagram závislosti plochy výměny tepla na dodané energii (mimo energii z procesních zdrojů), který je možno v rámci fáze targetingu sestavit (viz obrázek 2.7). [2]



Obrázek 2.6 Rozvaha investičních a provozních nákladů pro volbu ΔT_{\min} [2]



Obrázek 2.7 Diagram závislosti plochy výměny tepla na dodané energii [2]

V diagramu závislosti plochy výměny tepla na dodané energii (obrázek 2.7) jsou vyznačeny tři křivky. Křivky 1 a 2 jsou vytvořeny pomocí uvažování různých hodnot ΔT_{\min} , kde křivka 1 prezentuje ideální stav minimální plochy, které by bylo dosaženo při vertikálním zapojení výměníků a křivka 2 pak odráží stávající zapojení. Křivkou 3 je znázorněna vhodná cesta rekonstrukce.

Následující fází lze nazvat **fází rekonstrukce**. Ve fázi rekonstrukce se za pomoci nástrojů PDM určí potenciální varianty modifikací a z nich se následně identifikuje optimální úprava stávající HEN. Výstupem této fáze je návrh rekonstrukce HEN.

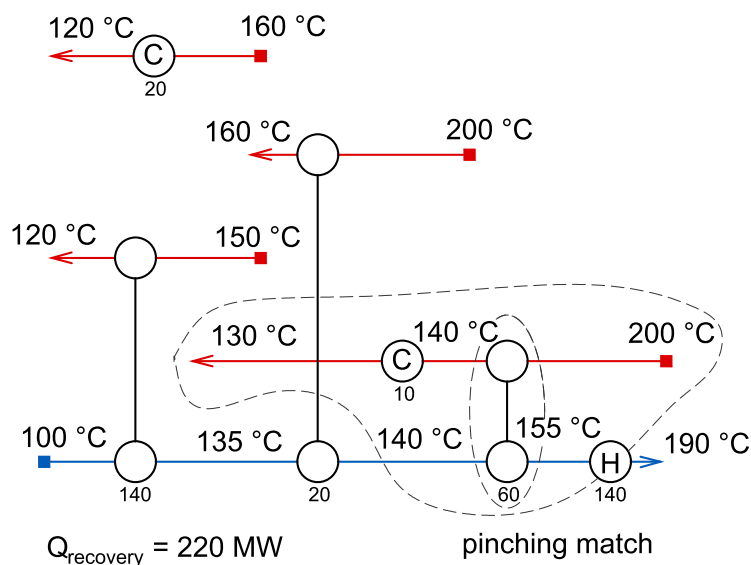
3 METODA NETWORK PINCH PRO REKONSTRUKCI VÝMĚNÍKOVÉ SÍTĚ

S metodou *network pinch* přišli poprvé N. D. K. Asante a X. X. Zhu [11]. Metoda kombinuje výhody pinch analýzy a matematického programování. Skládá se ze dvou stupňů, přičemž prvním z nich je diagnostika – zde jsou navrženy potenciální modifikace existující konfigurace HEN (s využitím zákonů termodynamiky) – a druhým stupněm je optimalizace. Výměníková síť, která je získána po uskutečnění modifikace z prvního stupně je optimalizována užitím techniky nelineárního programování k minimalizaci nákladů na použitou přídavnou plochu výměny tepla.

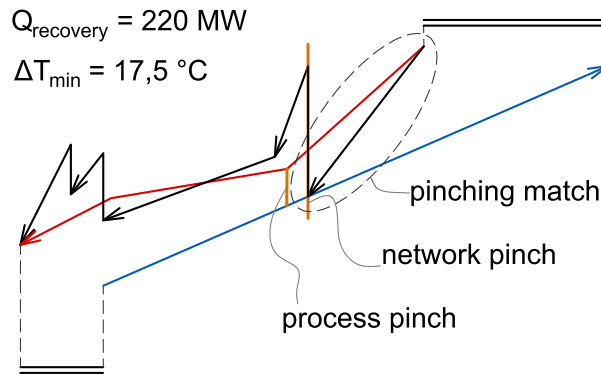
Principy metody, včetně modelu lineárního programování (pro první stupeň metody), jsou v následujících podkapitole prezentovány tak, jak je uvádí X. X. Zhu a N. D. K. Asante [4], [11].

3.1 Princip metody network pinch a model LP pro diagnostiku

U klasické metody PDM, popsané v kapitole výše, se řešení rekonstrukce (nebo i nového návrhu) sítě tepelných výměníků zaměřuje na tzv. *process pinch*. Ten je ale definován pouze procesními podmínkami, tedy teplotami jednotlivých proudů a příslušnými tepelnými kapacitami, a neodráží strukturu stávající HEN. Popisovaná metoda zavádí tzv. *network pinch*, který na rozdíl od původního pojetí koresponduje kromě procesních proudů také s uspořádáním výměníků v HEN. Ačkoliv se poloha *process pinch* a *network pinch* může shodovat, v drtivé většině případů je rozdílná. Situace je vyobrazena teoretickým příkladem kompozitních křivek na obrázku 3.2 vztahujícím se k síti tepelných výměníků prezentované mřížkovým diagramem na obrázku 3.1.



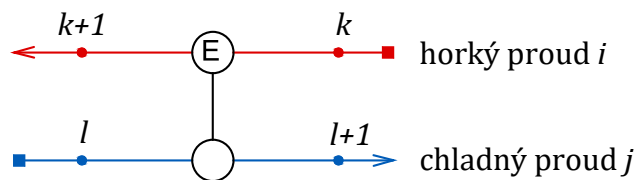
Obrázek 3.1 Mřížkový diagram – příklad HEN [11]



Obrázek 3.2 Process pinch a network pinch na příkladu [11]

V souvislosti s rozdílem v pojetí *proces pinch* a *network pinch* se rozlišují dvě různé hodnoty pro ΔT_{\min} – duální minimální teplotní přiblížení. První z těchto hodnot je HRAT (*heat recovery approach temperature*) neboli minimální teplotní přiblížení pro HEN, definováno nejmenší vertikální vzdáleností kompozitních křivek. Druhou hodnotou pro ΔT_{\min} je EMAT (*exchanger minimum approach temperature*) neboli minimální teplotní rozdíl vztahující se k individuálním tepelným výměníkům. Obvykle platí, že hodnota HRAT je větší než EMAT. [12]

Pro první stupeň metody (diagnostiku) byl vyvinut základní lineární optimalizační model, jehož účelová funkce (*objective function*, OF) je uvedena vztahem (3.1). Označení proměnných v účelové funkci je provedeno v souvislosti s obrázkem 3.3. Při vstupu do výměníku *ijkl* je zde definován uzel *k* na horkém proudu *i* a uzel *l* na chladném proudu *j*, jimž jsou přidruženy teploty $T_{i,k}$ a $T_{j,l}$. Podobně je pak definována poloha horkých zařízení *uik* (u slouží jako označení pro horký či chladný servis – *utility*).



Obrázek 3.3 Definice zapojení výměníku *ijkl* [4]

$$OF = c_1 \cdot \sum_{u,j,l \in H} Q_{u,j,l} + c_2 \cdot \sum_{i,j,k,l \in E} p_{ijkl}^1 + c_2 \cdot \sum_{i,j,k,l \in E} p_{ijkl}^2 \quad (3.1)$$

Cílem modelu je stanovit potenciál maximální procesní výměny tepla a zároveň identifikovat tzv. *pinching matches* (zapojení výměníků, u nichž korespondující teplotní rozdíly dosahují minimální hodnoty EMAT). V uvedeném vztahu značí c_1 a c_2 konstanty, použité k vyzdvižení priority maximalizace procesní výměny tepla (minimalizace tepla dodaného servisem $Q_{u,j,l}$ [W]) nad minimalizací počtu *pinching matches*. Platí, že $c_1 \gg c_2$. Parametry p_{ijkl}^1 a p_{ijkl}^2 [°C] porovnávají teplotní rozdíly na výměnících vzhledem k limitní hodnotě EMAT. Indexy 1 a 2 označují chladnou, resp. horkou stranu výměníku.

K účelové funkci je nutno definovat omezující podmínky. Vztahem (3.2) je určena tepelná bilance horkého proudu, obdobně vztah (3.3) slouží k vyjádření tepelné bilance chladného proudu. Ve vztazích značí T [°C] teplotu, CP [kW/°C] tepelnou kapacitu a Q [kW] předávané teplo.

$$T_{i,k+1} = T_{i,k} - \frac{1}{CP_i} \left[\sum_{i,k} Q_{i,j,k,l \in E} + \sum_u Q_{i,j,k,l \in C} \right] \quad (3.2)$$

$$T_{j,l+1} = T_{j,l} + \frac{1}{CP_j} \left[\sum_{j,l} Q_{i,j,k,l \in E} + \sum_u Q_{i,j,k,l \in H} \right] \quad (3.3)$$

Pro teploty proudů platí následující podmínky, vyjádřené vztahy (3.4) a (3.5). Označením TT [°C] se rozumí teplota na výstupu (*target temperature*), TS [°C] pak značí teplotu na vstupu (*supply temperature*), N je počet uzlů proudu.

$$\begin{aligned} TT_i &\leq T_{i,k} \leq TS_i, & 1 < k < N_i \\ T_{i,k} &= TS_i, & \text{pro } k = 1 \\ T_{i,k} &= TT_i, & \text{pro } k = N_i \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} TT_j &\leq T_{j,l} \leq TS_j, & 1 < l < N_j \\ T_{j,l} &= TS_j, & \text{pro } l = 1 \\ T_{j,l} &= TT_j, & \text{pro } l = N_j \end{aligned} \quad (3.5)$$

Vztahy (3.6) až (3.9) definují teplotní rozdíly na horké ($DT_{ijkl \in E}^2$ [°C]) a chladné ($DT_{ijkl \in E}^1$ [°C]) straně výměníků (případně horkých a chladných servisů). Pomocí vztahů (3.10) až (3.13) jsou pak tyto rozdíly omezeny vzhledem k minimálnímu teplotnímu přiblížení EMAT. EMAT může být specifikováno jako jakékoliv nezáporné číslo. Vhodné je však použít hodnotu, která odráží ekonomické a praktické možnosti návrhu HEN.

$$DT_{ijkl \in E}^1 = T_{i,k+1} - T_{j,l} \quad (3.6)$$

$$DT_{ijkl \in E}^2 = T_{i,k} - T_{j,l+1} \quad (3.7)$$

$$DT_{uik \in C} = T_{i,k+1} - T_{cu} \quad (3.8)$$

$$DT_{ujl \in H} = T_{hu} - T_{j,l+1} \quad (3.9)$$

$$DT_{ijkl \in E}^1 \geq \text{EMAT} \quad (3.10)$$

$$DT_{ijkl \in E}^2 \geq \text{EMAT} \quad (3.11)$$

$$DT_{uik \in C} \geq \text{EMAT} \quad (3.12)$$

$$DT_{ujl \in H} \geq \text{EMAT} \quad (3.13)$$

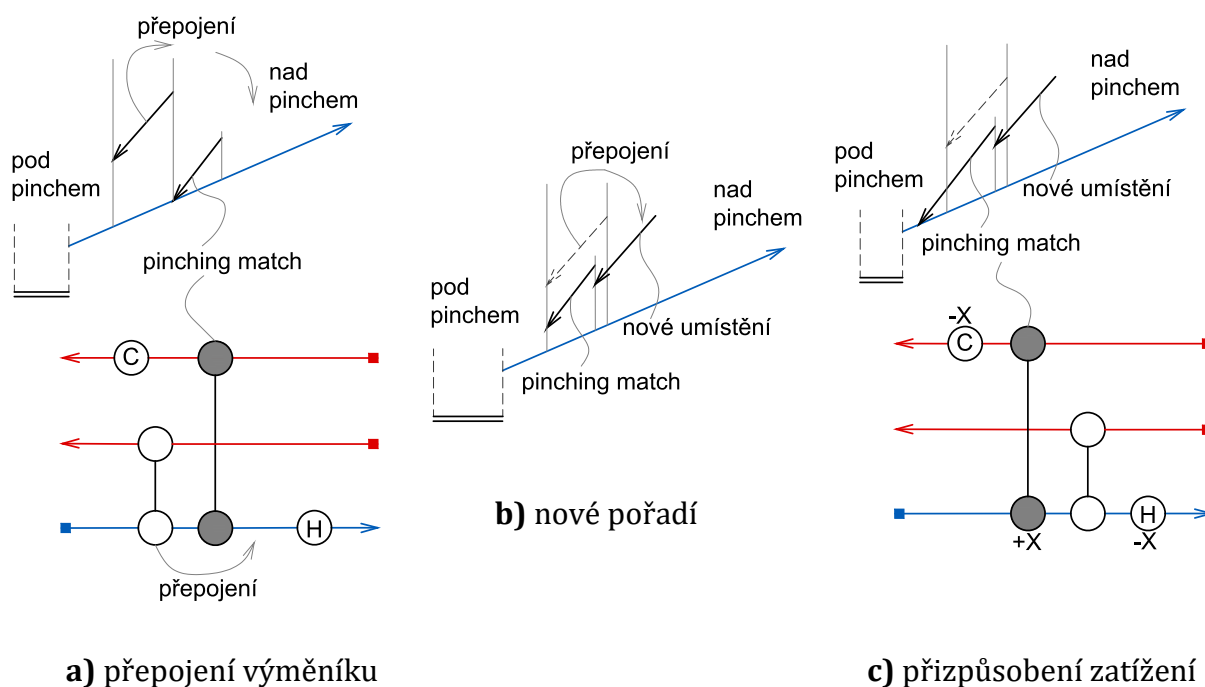
Pro nalezení *pinching matches* jsou vytvořeny vztahy (3.14) a (3.15) za podmínky $0 \leq p_{ijkl}^1 \leq 1$ a $0 \leq p_{ijkl}^2 \leq 1$. Pro výměníky, u nichž se nedosahuje *pinche*, bude hodnota parametrů p_{ijkl} nulová. U výměníků, jejichž DT je menší než $(\text{EMAT} + 1)$, bude hodnota parametru p_{ijkl} rovna rozdílu mezi DT a EMAT .

$$(1 - p_{ijkl}^1) \leq DT_{ijkl}^1 - \text{EMAT}, \quad ijkl \in E \quad (3.14)$$

$$(1 - p_{ijkl}^2) \leq DT_{ijkl}^2 - \text{EMAT}, \quad ijkl \in E \quad (3.15)$$

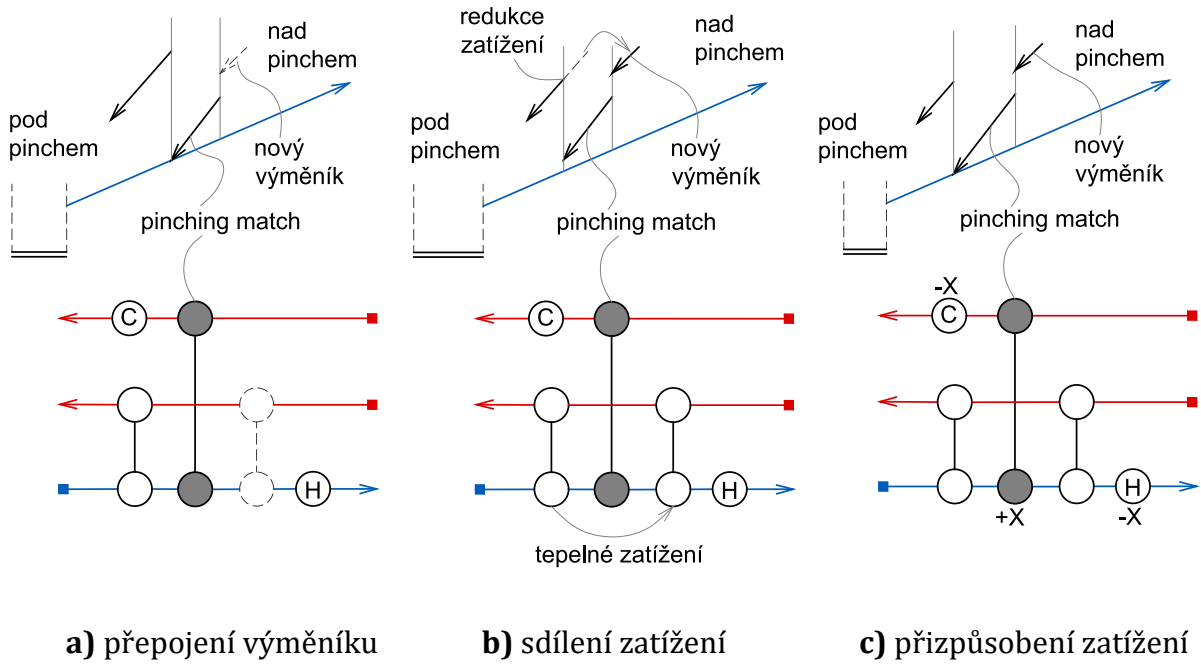
3.2 Možnosti překonání network pinch a nové modely pro dělení proudů

Překonání *network pinch* je možné provedením změn v topologii HEN. První variantou je přepojení výměníků (*resequencing*), jehož princip je znázorněn na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4 Přepojení výměníku (*resequencing*) [11], [13]

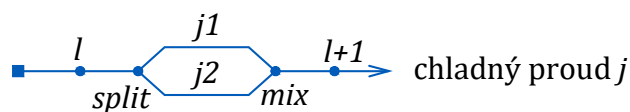
Hlavním pravidlem pro identifikaci potenciálních změn v topologii HEN, umožňujících překonání *network pinch*, je přenášení tepla z oblasti pod *network pinchem* do oblasti nad *network pinchem*, analogicky k principům PDM. Další variantou, jak toho lze dosáhnout, je přidání nového výměníku (*new match*), znázorněné na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5 Přidání nového výměníku (*new match*) [11], [13]

Pro účely překonání *network pinch* může být použito rozdělení proudů. To je efektivní v případech, že v HEN existují dva nebo více přilehlých výměníků, které dosahují *network pinch* (*pinching matches*). K provedení výpočtu varianty s rozdělením proudů je nutné rozšířit model uvedený v předchozí podkapitole. Při rozdělení proudu se mezi nové větve dělí hodnota jeho tepelné kapacity. Pro proud před jeho rozdělením, pro nové větve vzniklé rozdělením a pro výsledný proud, získaný při opětovném spojení větví, musí platit bilanční entalpická rovnováha (tepelná bilance). Z ní je pro případ rozdělení chladného proudu vyjádřena teplota v místě $l+1$ vztahem (3.16). Uzly, mezi nimiž je výpočet definován, jsou znázorněny schématem na obrázku (3.6). Teploty v nově vzniklých uzlech jsou vyjádřeny vztahy (3.17) a (3.18)

$$\begin{aligned}
 T_{j,l+1} = & \frac{CP_{j1}}{CP_j} \left[T_{j,l} + \frac{1}{CP_j} \sum_{j,l}^{split} Q_{i,j,k,l \in E} + \frac{1}{CP_{j1}} \sum_{j1,split}^{mix} Q_{i,j,k,l \in E} \right] \\
 & + \frac{CP_{j2}}{CP_j} \left[T_{j,l} + \frac{1}{CP_j} \sum_{j,l}^{split} Q_{i,j,k,l \in E} + \frac{1}{CP_{j2}} \sum_{j2,split}^{mix} Q_{i,j,k,l \in E} \right] \\
 & + \frac{1}{CP_j} \left[\sum_{j,mix}^{l+1} Q_{i,j,k,l \in E} + \sum_u Q_{u,j,l \in H} \right]
 \end{aligned} \tag{3.16}$$



Obrázek 3.6 Schéma rozdělení proudu

$$T_{j,mix} = T_{j,l+1} - \frac{1}{CP_j} \left[\sum_{j,mix}^{l+1} Q_{i,j,k,l \in E} + \sum_u Q_{u,j,l \in H} \right] \quad (3.17)$$

$$T_{j,split} = T_{j,l} + \frac{1}{CP_j} \sum_{j,l}^{split} Q_{i,j,k,l \in E} \quad (3.18)$$

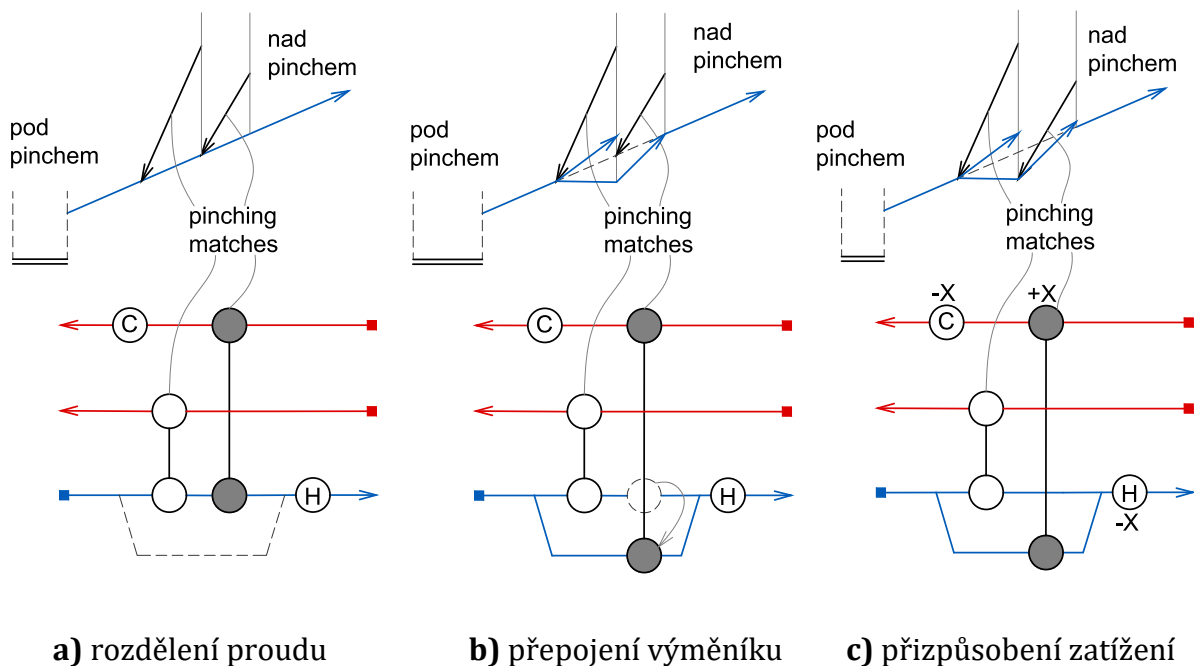
Pro tepelnou kapacitu jednotlivých větví proudu platí vztah (3.19). V tomto tvaru ale není úloha řešitelná lineárním modelem. Pro její řešení lze využít metody NLP, kde ovšem není zaručeno nalezení optimálního výsledku (tj. globálního optima). K nalezení vhodného poměru tepelných kapacit pomocí lineárního modelu lze rovnici upravit do podoby dané vztahy (3.20) a (3.21). Pro uvedený parametr k platí, že $0 < k < 1$. Pomocí cyklu může být proveden výpočet pro celý rozsah parametru k (s vhodnou velikostí kroku) a z výsledků je pak vybrána nejlepší provozní varianta.

Princip rozdělení proudů při rekonstrukci metodou *network pinch* je zachycen na obrázku 3.7.

$$CP_j = CP_{j_1} + CP_{j_2} \quad (3.19)$$

$$CP_{j_1} = k \cdot CP_j \quad (3.20)$$

$$CP_{j_2} = (1 - k) \cdot CP_j \quad (3.21)$$



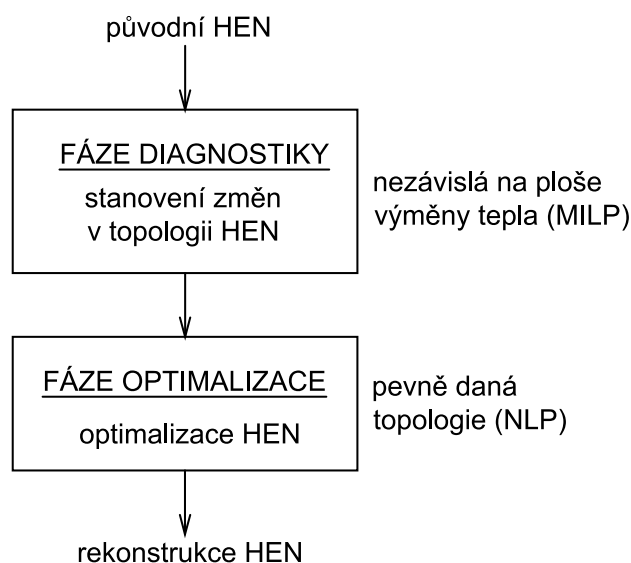
Obrázek 3.7 Rozdělení proudu (*stream split*) [11], [13]

3.3 Postup aplikace metody *network pinch* včetně využití intenzifikace přenosu tepla

Jak již bylo řečeno, metoda *network pinch* sestává ze dvou navazujících fází (či stupňů). Tyto fáze jsou stručně popsány následující podkapitolou. Metoda je taktéž využívána v souvislostech s (v poslední době se rozšiřujícími) aplikacemi intenzifikace přenosu tepla. Postup je takový, že se nejdříve aplikuje metoda *network pinch* a identifikují se potřebné změny v topologii (a požadovaná optimalizovaná přídatná plocha výměny tepla) a následně se využije intenzifikačních technik pro další minimalizaci potřeby této přídatné plochy (tím i minimalizaci nákladů). Intenzifikace přenosu tepla je stručně popsána v další podkapitole této části.

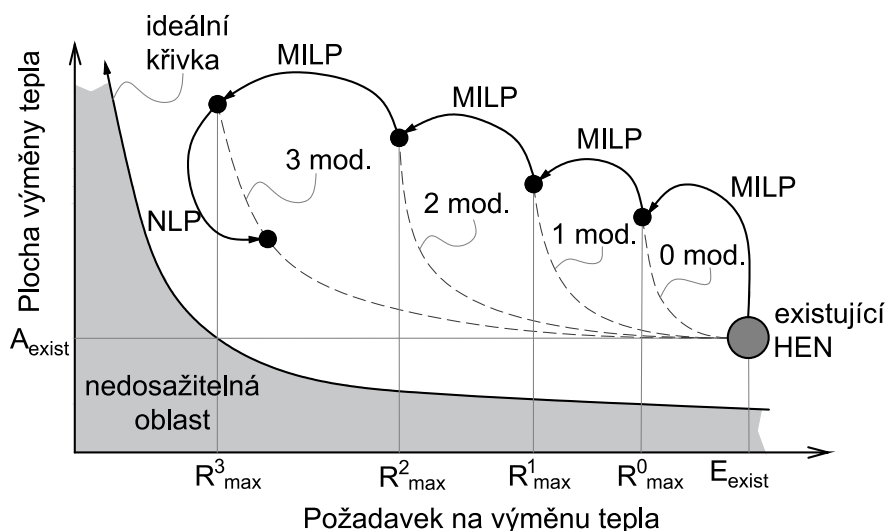
3.3.1 Fáze řešení rekonstrukce výměňkové sítě metodou *network pinch*

První fází při aplikaci metody *network pinch* je diagnostika (viz schéma na obrázku 3.8). Ve fázi diagnostiky je nejprve zjištěna existující topologie HEN a vlastnosti procesních proudů zásadní pro výpočet (což jsou jejich vstupní a výstupní teploty a tepelné kapacity). Na zjištěné parametry je aplikován lineární model (MILP) popsáný výše a dle výsledků je navržena změna v topologii (přepojení výměníku, přidání nového výměníku či rozdělení proudu). Na pozměněnou topologii HEN se znovu aplikuje lineární model a může být provedena další modifikace. Takto lze v první fázi postupovat dál do té doby, dokud jsou zaznamenávána zlepšení výsledků, avšak v závislosti na reálných možnostech změn v konstrukci a na investičních nákladech (jelikož první fáze při výpočtu jejich zvažování nezahrnuje, kromě volby hodnoty EMAT).



Obrázek 3.8 Schéma postupu metody *network pinch* [11]

Druhá fáze metody je fáze optimalizační, ve které je užito nelineárního modelu programování (NLP). Zatímco lineární model je použit k identifikaci změn topologie HEN pro maximální potenciál procesní výměny tepla, nelineární model slouží k minimalizaci nákladů na použitou přídatnou plochu a také k optimalizaci potenciálních průtoků rozdělených proudů. Úloha metody je znázorněna křivkami rekonstrukce na obrázku 3.9. Je zde třeba poznamenat, že diplomová práce je zaměřena na aplikaci první fáze metody *network pinch*, tj. na fázi diagnostiky.



Obrázek 3.9 Křivka rekonstrukce HEN [11]

3.3.2 Intenzifikace přenosu tepla

Konvenční metody rekonstrukce HEN jsou obvykle zaměřeny na modifikace topologie HEN a na přídavné ploše výměny tepla. Nicméně tyto metody nejsou ideální, jelikož vyžadují vysoké investiční náklady, mohou být obtížně realizovatelné v závislosti na konstrukčních omezeních stávající HEN a způsobují výrobní ztráty v důsledku delších odstávek nutných pro provedení rekonstrukce HEN.

Jako důsledek zmíněných nedostatků v poslední době stoupá využití tzv. intenzifikačních technik pro rekonstrukci, které mají potenciál zvýšit procesní výměnu tepla v existující HEN bez změn její topologie (a nutnosti přídavných plocha na výměnu tepla). Intenzifikací přenosu tepla může být také dosaženo vyšší termodynamické účinnosti díky menším potřebným hnacím silám pro přenos stejného množství tepla (či naopak, při stejně velkých hnacích silách a ploše výměny tepla může být dosaženo přenesení většího množství tepla). Velkou výhodou intenzifikačních technik pak je, že úprava HEN s pomocí intenzifikačních prvků může být provedena v čase pravidelných odstávek HEN. Nefigurují zde zásadní změny v konstrukci HEN, které by vyžadovaly dlouhodobé odstavení. [14]

Intenzifikační techniky pak mohou být rozděleny (s úvahou v procesním průmyslu nejvíce využívaných trubkových výměníků tepla) na techniky pro intenzifikaci trubkového prostoru a techniky pro intenzifikaci mezitrubkového prostoru [8]. Mezi konkrétní intenzifikační prvky využívané v trubkovém prostoru mohou být zařazeny:

- zkroucené pásy – vytvářejí rotující nebo sekundární tok po délce trubky
- vinuté drátky (například *hiTRAN Matrix turbulator*)
- zvláštní geometrie trubek (vlnité a drážkované trubky, vnitřní žebrování) – využitelné spíše při novém návrhu HEN

Pro intenzifikaci mezitrubkového prostoru jsou pak využívány:

- přepážky (segmentové, šroubovicové)
- vnější žebrování trubek – vhodné při novém návrhu HEN

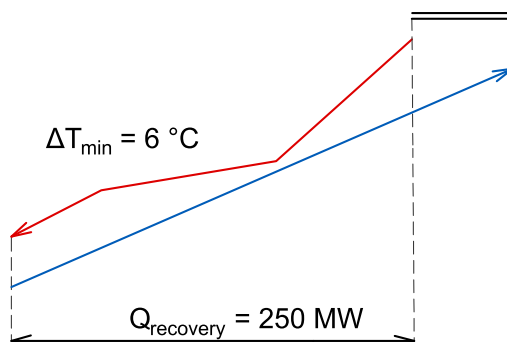
Intenzifikační techniky fungují na principu zvýšení součinitele přestupu tepla. Při rekonstrukci HEN se tedy využijí buď v trubkovém nebo mezitrubkovém prostoru (či na

obou stranách) v závislosti na potenciálu zvýšení hodnoty tohoto součinitele (aplikují se tedy na straně menšího součinitele přestupu tepla).

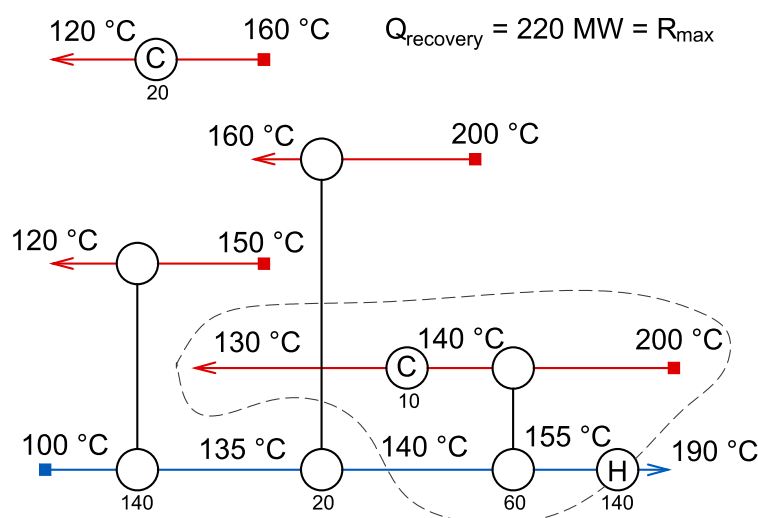
V návaznosti na metodu *network pinch* jsou uváděny dva stupně intenzifikace přenosu tepla při rekonstrukci výměňkových sítí [15]. Prvním stupněm je fáze *targetingu*, skládající se ze čtyř kroků, kde je aplikován princip metody *network pinch* pro stanovení vhodných výměníků určených k intenzifikaci a současně vhodné úrovně intenzifikace. Dle literatury [14] jsou pak k intenzifikaci vhodné takové výměníky, které v HEN tvoří *utility path* (cestu výměny tepla).

Druhou fází je *selection stage* (stupeň výběru), ve které se stanoví vhodná intenzifikační technika pro každý určený výměník, a to za použití kritéria tlakových ztrát. Tento stupeň zahrnuje posouzení výběru intenzifikačního prvku a stanovení jeho parametrů (jako je například šířka a zkroucení pásku).

Jak vyplývá z obrázku 4.1, původní stav HEN dosahuje maximální hodnoty procesní výměny tepla 200 MW, a to při minimálním teplotním rozdílu $\Delta T_{\min} = 22.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (viz HRAT). Při horizontálním posunutí kompozitních křivek (obrázek 4.3) lze zjistit, že maximální potenciál procesní výměny tepla pro popisovanou HEN je 250 MW. To odpovídá $\Delta T_{\min}(\text{HRAT}) = 6 \text{ }^\circ\text{C}$. Avšak konstrukce HEN při uvážení teoretického maxima – tedy při $\Delta T_{\min}(\text{EMAT}) = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ – umožňuje procesní výměnu tepla nejvýše 220 MW (obrázek 4.4).



Obrázek 4.3 Kompozitní křivky při $\Delta T_{\min}(\text{HRAT}) = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ [11]

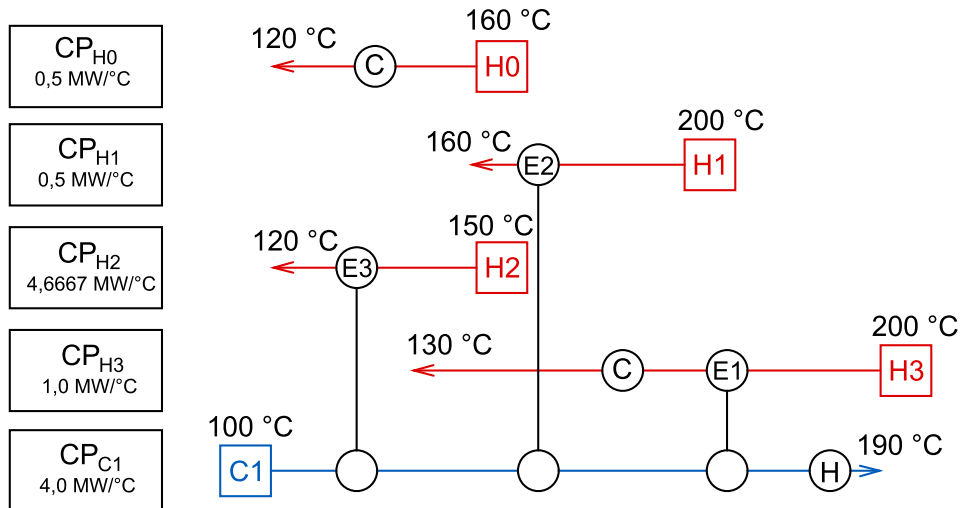


Obrázek 4.4 Mřížkový diagram při $\Delta T_{\min}(\text{EMAT}) = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ [11]

Z výše uvedeného je zřejmé, že pro získání vyšší hodnoty procesní výměny tepla než 220 MW (teoretické maximum stávající úpravy HEN) je nutné provést rekonstrukci výměňkové sítě (*retrofit*).

První fází rekonstrukce je diagnostika, spočívající v posouzení výhodnosti přípustných rekonstrukčních úprav výměňkové sítě. Tuto diagnostiku lze provést pro teoretické řešení rekonstrukce s uvažováním minimálního teplotního přiblížení (EMAT) rovno $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

K diagnostice původního stavu a následné analýze optimálních úprav je využita metoda lineárního programování. Aby bylo možno provést diagnostiku touto metodou, je nezbytné znát základní informace o procesu. Konkrétně to je výchozí a konečná teplota všech proudů, jejich tepelná kapacita, umístění chladných a horkých servisů a umístění samotných výměníků. Všechny podstatné informace jsou shrnuty na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5 Mřížkový diagram – výměníková síť určena k diagnostice

Z předchozích schémat je patrné, že procesní výměna tepla je zde zajištěna třemi výměníky. Účelová funkce pro diagnostiku vzorové HEN se vyjádří pomocí vztahu (3.1). Vzhledem k prioritě minimalizace tepla dodaného horkým servisem jsou zvoleny hodnoty konstant $c_1 = 1000$ a $c_2 = 1$. Konkrétní účelová funkce bude mít tvar daný vztahem (4.1).

$$OF = 1000 \cdot H + pH_{E1} + pH_{E2} + pH_{E3} + pC_{E1} + pC_{E2} + pC_{E3} \quad (4.1)$$

K vytvoření diagnostiky vzorové HEN jsou nejdříve sepsány bilanční rovnice pro jednotlivé proudy. Například pro proud H3 bude bilance dána vztahem (4.2), kde TH_{H3} (resp. TC_{H3}) je počáteční (resp. koncová) teplota proudu H3, dosazovaná ve °C a CP_{H3} je jeho tepelná kapacita, dosazovaná v MW/°C. $E1$ [MW] značí tepelný výkon shodně označeného výměníku a C [MW] značí tepelný výkon chladičného servisu.

$$CP_{H3} \cdot (T_{H,H3} - T_{C,H3}) - E1 - C = 0 \quad (4.2)$$

Minimalizací účelové funkce za omezujících podmínek daných bilančními rovnicemi a dalšími podmínkami (viz kapitola 3.1) na danou výměníkovou síť je potvrzeno, že při její stávající úpravě je možné dosáhnout maximální procesní výměny tepla (součet tepelného výkonu všech výměníků v HEN) 220 MW. Výsledky diagnostiky pak shrnují tabulky 4.1 (výkony) a 4.2 (pomocné parametry).

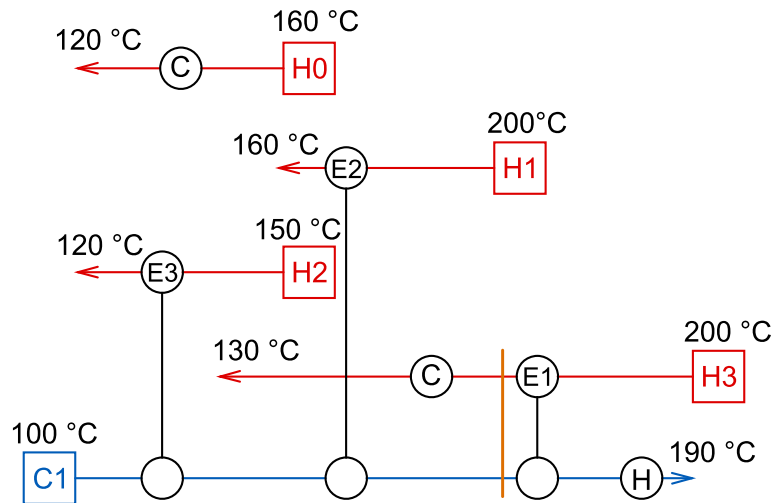
Tabulka 4.1 Výsledky diagnostiky udané v MW

E1	60
E2	20
E3	140
R_{max}	220
C	10
H	140

Tabulka 4.2 Pomocné parametry ve °C (diagnostika, UP)

DTC_{E1}	0	pC_{E1}	1
DTH_{E1}	1	pH_{E1}	0
DTC_{E2}	1	pC_{E2}	0
DTH_{E2}	1	pH_{E2}	0
DTC_{E3}	1	pC_{E3}	0
DTH_{E3}	1	pH_{E3}	0

V tabulce 4.2 je vidět, že hodnota parametrů DTC_{E1} a pC_{E1} je opačná v porovnání s ostatními výsledky. Z definice metody je tedy patrné, že výměník E1 je tzv. *pinching match*. *Network pinch* se nachází na chladné straně tohoto výměníku, což je znázorněno na obrázku 4.6.



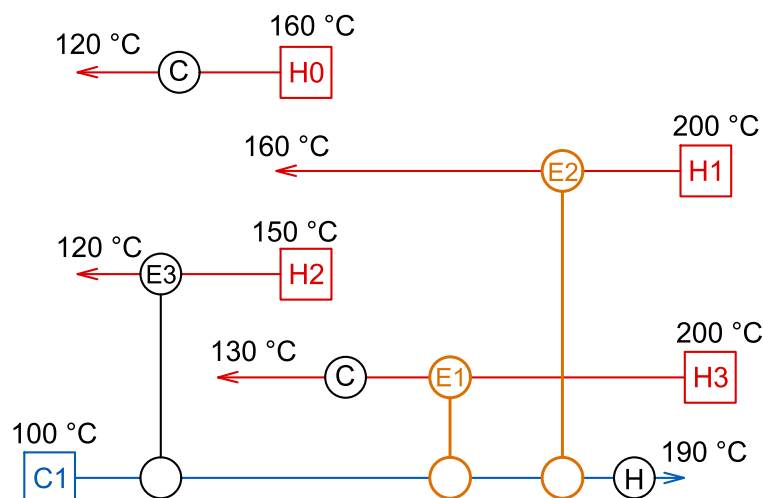
Obrázek 4.6 Mřížkový diagram – diagnostika výměňkové sítě

4.2 Systematické hledání neúčinnějších úprav výměňkové sítě

Překonání *network pinch* je řešitelné třemi možnými způsoby, jak již bylo zmíněno v popisu metody v předchozí kapitole. Na daném teoretickém příkladu byly otestovány a porovnány všechny tři možnosti. Níže jsou uvedena příslušná schémata výměňkové sítě ke každé možnosti modifikace včetně konkrétních dosažených výsledků.

4.2.1 Přepojení výměníku

První možností změny topologie pro překonání *network pinch* je přepojení výměníků. Vzhledem k výsledkům diagnostiky připadá v úvahu přepojení výměníku E1 s výměníkem E2. Situace je znázorněna na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7 Mřížkový diagram – 1. modifikace sítě přepojením dvou výměníků

Tabulka 4.3 Výsledky při přepojení výměníků udané v MW

E1	65
E2	20
E3	140
R_{\max}	225
C	5
H	135

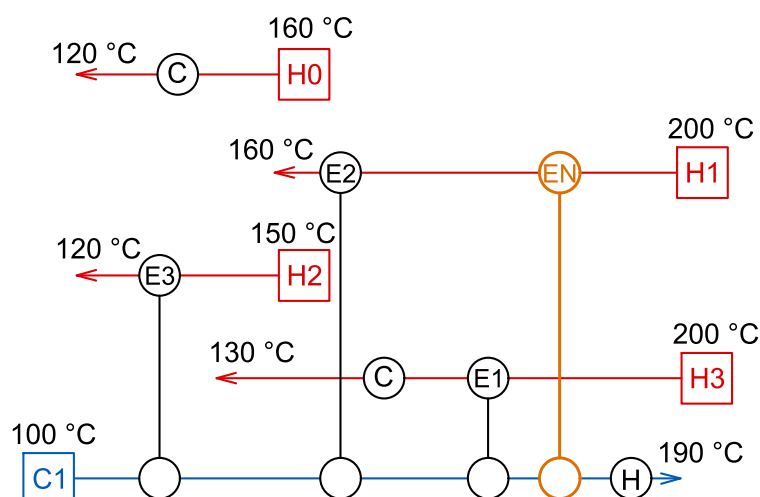
Tabulka 4.4 Pomocné parametry ve °C (1. mod., přepojení, UP)

DTC_{E1}	0	pC_{E1}	1
DTH_{E1}	1	pH_{E1}	0
DTC_{E2}	1	pC_{E2}	0
DTH_{E2}	1	pH_{E2}	0
DTC_{E3}	1	pC_{E3}	0
DTH_{E3}	1	pH_{E3}	0

Z výsledků (viz tabulka 4.3) lze vyčíst, že nastíněnou úpravou se docílí maximálního výkonu procesní výměny tepla 225 MW. Potřeba dodávaného tepla horkým servisem a odebraného tepla chladným servisem by tak klesla o 5 MW. Z tabulky 4.4 je pak zřejmé, že po přepojení výměníku je úzké místo rekonstruované HEN (*network pinch*) opět chladná strana výměníku E1 ($pC_{E1} = 1$ °C, $DTC_{E1} = 0$ °C).

4.2.2 Přidání nového výměníku

V případě přidání nového výměníku se nabízí možnost umístit jej z horké strany výměníku E1 na proud H1 a C1. Modifikovaná síť je znázorněna obrázkem 4.8.

**Obrázek 4.8** Mřížkový diagram – 1. modifikace sítě přidáním nového výměníku**Tabulka 4.5** Výsledky při vřazení nového výměníku v MW

E1	60
E2	0
E3	140
EN	20
R_{\max}	225
C	5
H	135

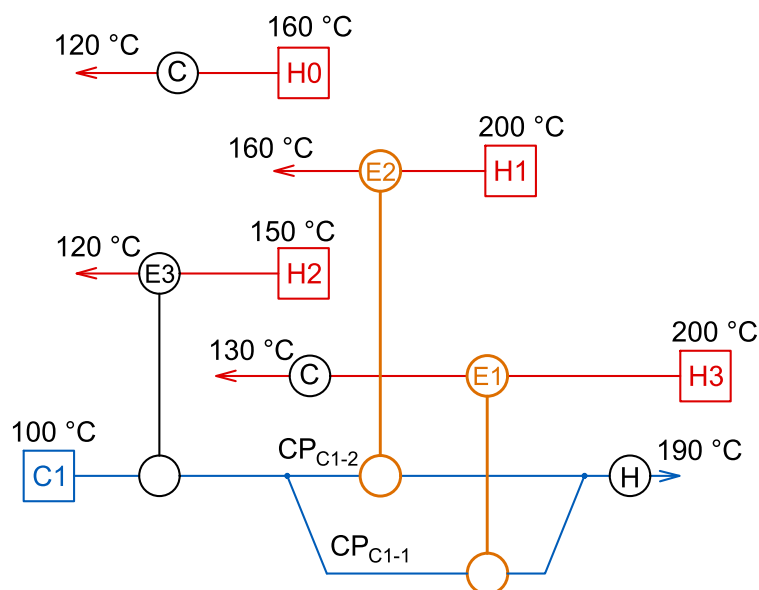
Tabulka 4.6 Pomocné parametry ve °C (1. mod., nový výměník, UP)

DTC_{E1}	0	pC_{E1}	1
DTH_{E1}	1	pH_{E1}	0
DTC_{E2}	1	pC_{E2}	0
DTH_{E2}	1	pH_{E2}	0
DTC_{E3}	1	pC_{E3}	0
DTH_{E3}	1	pH_{E3}	0
DTC_{EN}	1	pC_{EN}	0
DTH_{EN}	1	pH_{EN}	0

Jak ukazuje tabulka 4.5, tepelný výkon výměníku E2 vychází nulový. Z hlediska výpočtu jde tedy o shodnou úpravu výměňkové sítě, jako v případě první varianty – přepojení výměníku. Je tedy jasné, že přidání nového výměníku není efektivním řešením.

4.2.3 Rozdělení proudu

Výpočet byl proveden z důvodu pochopení a vysvětlení metody taktéž pro variantu rozdělení proudu, ačkoliv u reálného problému by nebylo vhodné ji uvažovat (rozdělení proudu je prakticky velmi složité a investičně náročné a dle principu metody je vhodné ho uplatňovat při identifikování více *pinching matches* na jednom proudu). Schéma rozdělení proudu je znázorněno na obrázku 4.9.



Obrázek 4.9 Mřížkový diagram – 1. modifikace sítě rozdělením proudu C1

Pro zjištění výsledků byly použity (kromě dosavadních omezujících podmínek) nově vytvořené podmínky, dané vztahy (3.16) až (3.21). Výsledek byl stanoven nejprve za využití metody NLP, kdy řešič (*NLPSolve*) našel lokální optimální řešení při rozložení tepelné kapacity na $CP_{C1-1} = 1 \text{ MW}/^\circ\text{C}$ a $CP_{C1-2} = 3 \text{ MW}/^\circ\text{C}$. Metoda NLP pak byla použita znovu, tentokrát za upřesnění rozsahu pro tepelnou kapacitu nových větví, která se musí pohybovat mezi $0 \text{ MW}/^\circ\text{C}$ a $4 \text{ MW}/^\circ\text{C}$, což je hodnota tepelné kapacity výchozího proudu. Za těchto podmínek řešič našel jiný lokální optimální výsledek při rovnoměrném rozdělení průtoků jednotlivými novými větvemi, tedy při hodnotách tepelných kapacit nových větví $CP_{C1-1} = 2 \text{ MW}/^\circ\text{C}$ a $CP_{C1-2} = 2 \text{ MW}/^\circ\text{C}$. Výsledné hodnoty tepelných výkonů jednotlivých výměníků a horkého a chladného servisu však v obou variantách zůstávají shodné a jsou uvedeny v tabulce 4.7.

Tabulka 4.7 Výsledky při rozdělení proudu C1 udané v MW

E1	65
E2	20
E3	140
R_{\max}	225
C	5
H	135

Tabulka 4.8 Pomocné parametry ve $^\circ\text{C}$ (1. mod., rozdělení C1, UP)

DTC_{E1}	0	pC_{E1}	1
DTH_{E1}	1	pH_{E1}	0
DTC_{E2}	1	pC_{E2}	0
DTH_{E2}	1	pH_{E2}	0
DTC_{E3}	1	pC_{E3}	0
DTH_{E3}	1	pH_{E3}	0

Jak je zjištěno, řešič metody NLP poskytuje více rovnocenných řešení, není ale zřejmé, která z těchto variant řešení je nejvhodnější. K nalezení nejlepší varianty je využito metody LP při úpravě rovnice pro součet tepelných kapacit zavedením parametru k (viz vztahy (3.20) a (3.21)). Parametr k zde značí poměr rozdělení celkové tepelné kapacity mezi obě nové větve. Pro různé hodnoty parametru k s krokem 0,025 byla vygenerována tabulka 4.9.

Tabulka 4.9 Výsledky LP modelu pro rozdělení proudu C1

k	R _{max}	H	C	T _{split}	T _{mix}	T _{outE1}	T _{outE2}	Bil _{Tm}
[-]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0,100	186,0	174,0	44,0	135,0	146,5	200,0	140,6	0
0,125	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	999
0,150	199,0	161,0	31,0	135,0	149,8	200,0	140,9	0
0,175	160,0	200,0	70,0	135,0	140,0	135,0	141,1	-0
0,200	212,0	148,0	18,0	135,0	153,0	200,0	141,3	0
0,225	218,5	141,5	11,5	135,0	154,6	200,0	141,5	0
0,250	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	999
0,275	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	194,1	141,9	0
0,300	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	189,2	142,1	0
0,325	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	999
0,350	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	999
0,375	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	178,3	143,0	0
0,400	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	999
0,425	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	999
0,450	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	171,1	144,1	0
0,475	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	169,2	144,5	0
0,500	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	167,5	145,0	0
0,525	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	166,0	145,5	0
0,550	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	164,5	146,1	0
0,575	160,0	200,0	70,0	135,0	140,0	135,0	146,8	0
0,600	160,0	200,0	70,0	135,0	140,0	135,0	147,5	0
0,625	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	161,0	148,3	-0
0,650	160,0	200,0	70,0	135,0	140,0	135,0	149,3	0
0,675	160,0	200,0	70,0	135,0	140,0	135,0	150,4	0
0,700	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	158,2	151,7	0
0,725	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	157,4	153,2	-0
0,750	160,0	200,0	70,0	135,0	140,0	135,0	155,0	0
0,775	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	156,0	157,2	-0
0,800	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	155,3	160,0	0
0,825	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	999
0,850	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	154,1	168,3	0
0,875	160,0	200,0	70,0	135,0	140,0	135,0	175,0	-0
0,900	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	153,1	185,0	0

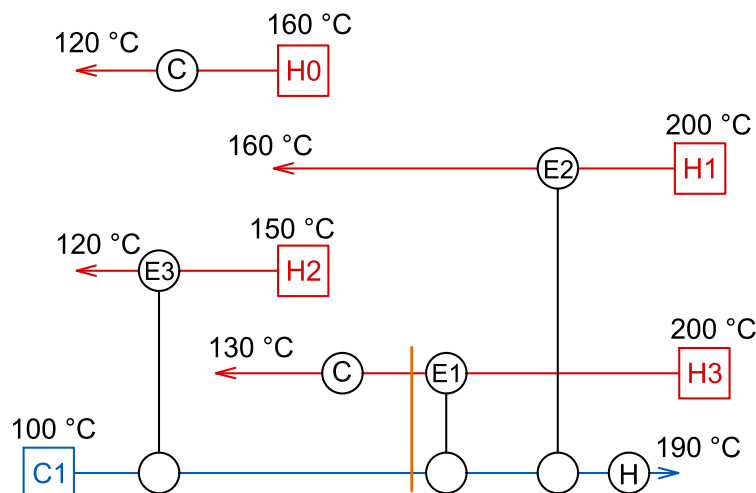
V tabulce 4.9 se vyskytuje parametr Bil_{Tm} , nabývající hodnot 0 (–0) nebo 999. Parametr je určen s respektováním vztahu (3.16) a identifikuje míru vyrovnaní entalpické bilance. V případě, že parametr dosahuje hodnoty 0, je výpočet proveden zcela přesně. Hodnota –0 značí nepřesnost výpočtu (v řádu 10^{-6} a menší), výsledek je přes malou nepřesnost však stále vyhovující. Hodnota 999 pak v tabulce označuje poměr dělení proudu k , při kterém nelze dosáhnout vyrovnanosti entalpické bilance (program nenalezl řešení), tzn. není splněna podmínka uvedená vztahem (3.16) a dělení proudu s tímto poměrem není reálné.

Z tabulky je dále patrné, že výpočet poskytuje více rovnocenných výsledků pro různé poměry dělení proudu, a to z hlediska vyměněného tepla za pomoci výměníků $R_{max} = 225$ MW a tepla dodaného (resp. odebraného) horkým servisem $H = 135$ MW (chladným servisem $C = 5$ MW). K určení nejlepší varianty pak lze vycházet z požadavku, aby rozdíl teplot větví proudu byl před jejich opětovným spojením co nejnižší, což může být upřednostňováno v praxi hlavně z regulačních důvodů. V tabulce 4.9 jsou teploty jednotlivých větví před smícháním reprezentovány označením T_{outE1} a T_{outE2} . Jejich hodnoty by se pak měly co nejvíce přibližovat výsledné teplotě po smíchání T_{mix} . Toto kritérium nejlépe splňují výsledky pro dělicí poměr $k = 0,775$. Pro stanovení přesného poměru, při kterém se diskutované teploty nejvíce přibližují, byl proveden nový výpočet s upřesněným rozsahem $0,75 \leq k \leq 0,78$ a krokem 0,001. Z vygenerovaných výsledků byl vybrán poměr $k = 0,762$, při němž je (s odkazem na vztahy (3.20) a (3.21)) tepelná kapacita ve větvi s výměníkem E1 $CP_{C1-1} = 3,048$ MW/°C a ve větvi s výměníkem E2 $CP_{C1-2} = 0,952$ MW/°C. Přidružené hodnoty ostatních proměnných zobrazuje tabulka 4.10. Kompletní vygenerovaná tabulka je pak k nalezení v příloze A k této práci.

Tabulka 4.10 Upřesněný výsledek LP modelu pro rozdělení proudu C1

k	R_{max}	H	C	T_{split}	T_{mix}	T_{outE1}	T_{outE2}	Bil_{Tm}
[-]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0,762	225,0	135,0	5,0	135,0	156,3	156,3	156,0	0

Výsledky získané při rozdělení proudu jsou takřka totožné s výsledky při přepojení výměníku. Z důvodu komplikovanosti je ale provedení rozdělení proudu nevhodné. Z provedených možných řešení první modifikace je tak nejefektivnější úprava HEN přepojením výměníků. Stav po první modifikaci znázorňuje obrázek 4.10.

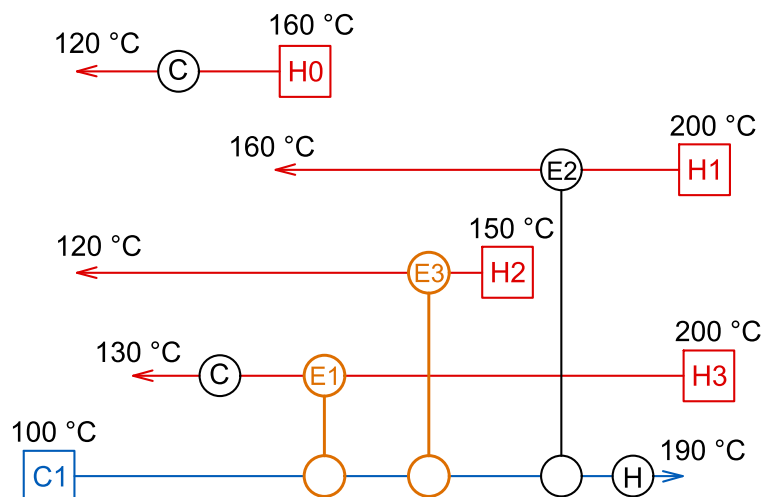


Obrázek 4.10 Mřížkový diagram – stav sítě po první modifikaci

4.2.4 Další modifikace výměňkové sítě

Provedenou první modifikací HEN se dosáhlo úspory 5 MW, což je stále vzdálené od potenciálu daného procesními proudy. Stejným postupem jako při první modifikaci lze však provést výpočet pro modifikaci druhou a zjistit, zda je ještě možné se potenciální hodnotě procesní výměny tepla přiblížit.

Jako první varianta je uvažováno opět přepojení výměníku. Nabízí se zde jediná možnost, a to přepojit výměník E1 s výměníkem E3 (obrázek 4.11). Výpočet je proveden analogicky k první modifikaci, jeho výsledky jsou zobrazeny tabulkami 4.11 a 4.12.



Obrázek 4.11 Mřížkový diagram – 2. modifikace sítě přepojením dvou výměníků

Tabulka 4.11 Výsledky při přepojení výměníků udané v MW

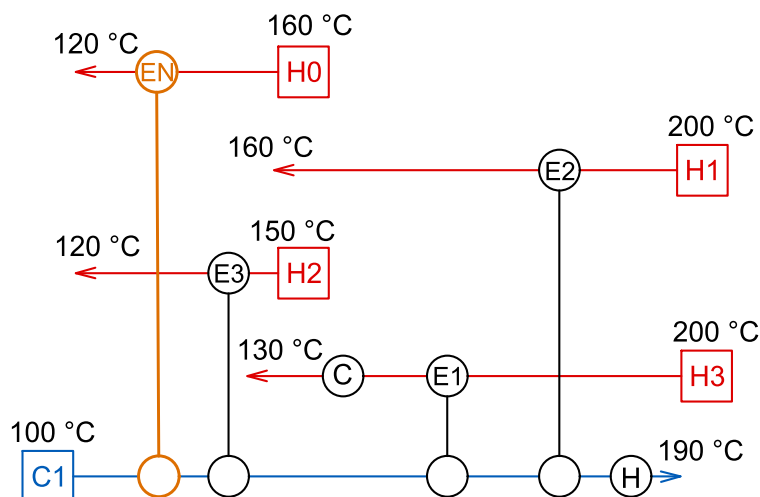
E1	60
E2	20
E3	140
R_{\max}	220
C	10
H	140

Tabulka 4.12 Pomocné parametry ve °C (2. mod., přepojení, UP)

DTC_{E1}	1	pC_{E1}	0
DTH_{E1}	1	pH_{E1}	0
DTC_{E2}	1	pC_{E2}	0
DTH_{E2}	1	pH_{E2}	0
DTC_{E3}	1	pC_{E3}	0
DTH_{E3}	0	pH_{E3}	1

Při prohlédnutí výsledků (viz tabulka 4.11) je zřejmé, že přepojení výměníků E1 a E3 není cestou k úspoře energie. Výsledné hodnoty odpovídají stavu před první modifikací s tou změnou, že *pinching match* je dle parametru pH_{E3} na horké straně výměníku E3.

Další variantou modifikace je přidání nového výměníku. V HEN se vyskytuje proud H0, který nebyl dříve zahrnut do diagnostiky. Jelikož byl regulován pouze chladným servisem – tedy nebyl na něj instalován procesní výměník – jeho zahrnutí by na výsledky výpočtu nemělo žádný vliv. Dá se však uvažovat, že místo chladného servisu použijeme pro regulaci tohoto proudu výměník, který bude přenášet teplo na proud C1. Uvažovaná modifikace je znázorněna na obrázku 4.12. Výsledky, jichž bylo dosaženo pak shrnují tabulky 4.13 a 4.14.



Obrázek 4.12 Mřížkový diagram – 2. modifikace sítě přidáním nového výměníku

Tabulka 4.13 Výsledky při vřazení nového výměníku udané v MW

E1	60
E2	20
E3	140
EN	20
R_{\max}	240
C	10
H	120

Tabulka 4.14 Pomocné parametry ve °C (2. mod., nový výměník, UP)

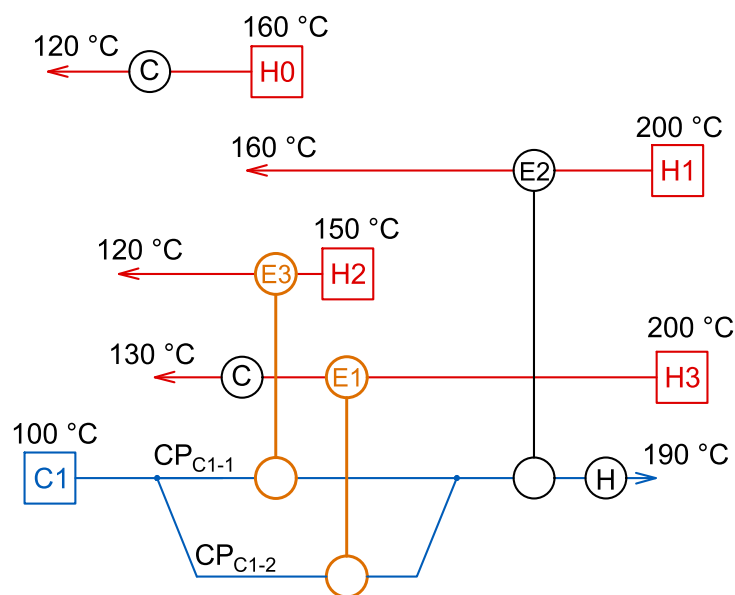
DTC_{E1}	0	pC_{E1}	1
DTH_{E1}	1	pH_{E1}	0
DTC_{E2}	1	pC_{E2}	0
DTH_{E2}	1	pH_{E2}	0
DTC_{E3}	1	pC_{E3}	0
DTH_{E3}	1	pH_{E3}	0
DTC_{EN}	1	pC_{EN}	0
DTH_{EN}	1	pH_{EN}	0

Tepelný výkon původně užitého chladného servisu na proudu H0 byl 20 MW. Je zřejmé, že nový výměník EN musí disponovat stejným tepelným výkonem, což je splněno. Přidáním tohoto výměníku by se pak mohlo zdát, že se též maximální procesní výměna tepla zvýší o 20 MW (jelikož je dána součtem tepelných výkonů výměníků v HEN), to ovšem konfigurace sítě neumožňuje. Při zapojení nového výměníku na chladný konec proudu C1 se sníží přenos tepla výměníkem E1 o 5 MW na úkor zvýšení výkonu chladicího zařízení umístěného na proudu H3. Hodnota maximální procesní výměny tepla R_{\max} pak bude dosahovat 240 MW (viz tabulka 4.13).

Pro kompletní zhodnocení možností je provedena ještě poslední varianta druhé modifikace, tedy rozdělení proudu C1 (obrázek 4.13). Při výpočtu první modifikace se ukázalo, že vytvořený LP model poskytuje podrobnější a korektnější informace než model NLP. Z toho důvodu je při vyhodnocení rozdělení proudu u druhé modifikace použit již pouze model LP. Tabulka 4.15 obsahuje již vybraný zpřesněný výsledek. Kompletní vygenerované výsledky výpočtu pro různé hodnoty dělicího poměru k jsou součástí přílohy A k této práci.

Tabulka 4.15 Upřesněný výsledek LP modelu pro rozdělení proudu C1 při 2. modifikaci

k	R_{\max}	H	C	T_{split}	T_{mix}	T_{outE1}	T_{outE2}	Bil_{Tm}
[-]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0,707	230,0	130,0	0,0	100,0	152,5	159,7	149,5	0



Obrázek 4.13 Mřížkový diagram – 2. modifikace sítě rozdělením proudu C1

Jak ukazuje tabulka 4.15, maximální dosažitelná hodnota procesní výměny tepla by při rozdělení proudu C1 činila 230 MW. Dělicí poměr je v tomto případě $k = 0,707$, čemuž odpovídá tepelná kapacita pro větev s výměníkem E3 $CP_{C1-1} = 2,828 \text{ MW/}^\circ\text{C}$ a pro větev s výměníkem E1 $CP_{C1-2} = 1,172 \text{ MW/}^\circ\text{C}$.

Z porovnání výsledků dvou posledních variant je jako druhá modifikace HEN zvolena varianta se zapojením nového výměníku na proudy H0 a C1. Maximální procesní výměna tepla je při této modifikaci o 10 MW vyšší než při rozdělení proudu a rozdělení proudu by v tomto případě nebylo nákladově přijatelné.

4.3 Dosažené výsledky

Při řešení ukázkového příkladu byla aplikací diagnostické fáze metody *network pinch* nalezena optimální rekonstrukce spočívající ve dvou modifikacích HEN. První modifikace využívá přepojení výměníku E1 s výměníkem E2, druhou modifikací je pak přidání nového výměníku na proudy H0 a C1. Výsledky těchto úprav HEN shrnuje tabulka 4.16.

Tabulka 4.16 Shrnutí výsledků UP pro $\Delta T_{\min}(\text{EMAT}) = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, tepelné výkony v MW

	E1	E2	E3	EN	R_{\max}	C	H
před modifikací	60	20	140	–	220	10 + 20	140
po 1. modifikaci	65	20	140	–	225	5 + 20	135
po 2. modifikaci	60	20	140	20	240	10 + 0	120

V tabulce 4.16 je u výkonu chladného servisu uveden součet dvou hodnot. Je to z toho důvodu, že při výpočtech diagnostiky původní HEN a stavu po první modifikaci nebyl uvažován proud H0, regulovaný chladným servisem o výkonu 20 MW. Při druhé modifikaci byl pak tento proud využit na zapojení nového výměníku místo stávajícího chladného servisu. K adekvátnímu porovnání výsledků daných úprav musí být tedy započten i výkon původně využitého chladného servisu proudu H0 (v tabulce 4.16 je to druhá hodnota výkonu C).

Provedenými úpravami bylo dosaženo hodnoty maximální procesní výměny tepla $R_{max} = 240$ MW. Pokud se vrátíme ke grafu kompozitních křivek na obrázku 4.3, zjistíme, že potenciál (250 MW) daný procesními proudy stále není plně využit. Je tedy ještě prostor k dalším modifikacím HEN. Provádění dalších modifikací však závisí hlavně na investičních nákladech. Nelze požadovat dosažení vyšší procesní výměny tepla, pokud by to znamenalo neúměrné zvýšení přídatné plochy výměny tepla (či velký počet komplikovaných zásahů do instalace HEN).

Ukázkový příklad byl řešen pro ideální případ, kdy se uvažovalo nulové minimální teplotní přiblížení pro jednotlivé výměníky. Taková hodnota však není pro praxi reálná. Celý výpočet byl proveden ještě s uvážením $\Delta T_{min}(EMAT) = \Delta T_{min}(HRAT) = 6$ °C. Výsledná konfigurace HEN po první i druhé modifikaci pak zůstala stejná, jako v případě pro $\Delta T_{min}(EMAT) = 0$ °C. Kompletní výsledky nového výpočtu jsou obsaženy v příloze B k této práci. V tabulce 4.17 jsou pak shrnuty hodnoty dosažené vybranou variantou první a druhé modifikace.

Tabulka 4.17 Shrnutí výsledků UP pro $\Delta T_{min}(EMAT) = 6$ °C, tepelné výkony v MW

	E1	E2	E3	EN	R_{max}	C	H
před modifikací	54	20	140	–	214	16 + 20	146
po 1. modifikaci	59	20	140	–	219	11 + 20	141
po 2. modifikaci	54	20	140	20	234	16 + 0	126

Z uvedeného přehledu výsledků pro oba výpočty můžeme vidět, že zvýšení minima teplotního přiblížení o 6 °C způsobilo snížení maximální procesní výměny tepla v HEN o 6 MW, a tedy zvýšení potřebného tepelného výkonu horkého (chladného) servisu o 6 MW. Je to dáno tím, že *network pinch* se nachází na chladné straně výměníku E1, což znamená vstup chladného proudu C1 a výstup horkého proudu H3 z tohoto výměníku. Na chladném proudu C1 se před vstupem do výměníku E1 nachází pouze další výměník (po 1. modifikaci) nebo dva výměníky (původní stav a po druhé modifikaci), které jsou jedinými regulujícími prvky pro ostatní procesní proudy HEN (E3 na proudu H2, E2 na proudu H1 a EN na proudu H0). To znamená, že jejich tepelné výkony jsou neměnné, závisí na daných vstupních a požadovaných výstupních teplotách uvedených proudů. Teplota chladného proudu na vstupu do výměníku E1 musí být proto při stejné konfiguraci topologie HEN shodná, ač se hodnota minimálního teplotního přiblížení změní. Rozdílu 6 °C tedy může být dosaženo pouze zvýšením teploty na výstupu horkého proudu H3 z výměníku E1. Tepelná kapacita proudu H3 má hodnotu 1 MW/°C, snadno lze pak dopočítat, že změna teploty o 6 °C bude znamenat změnu výkonu 6 MW.

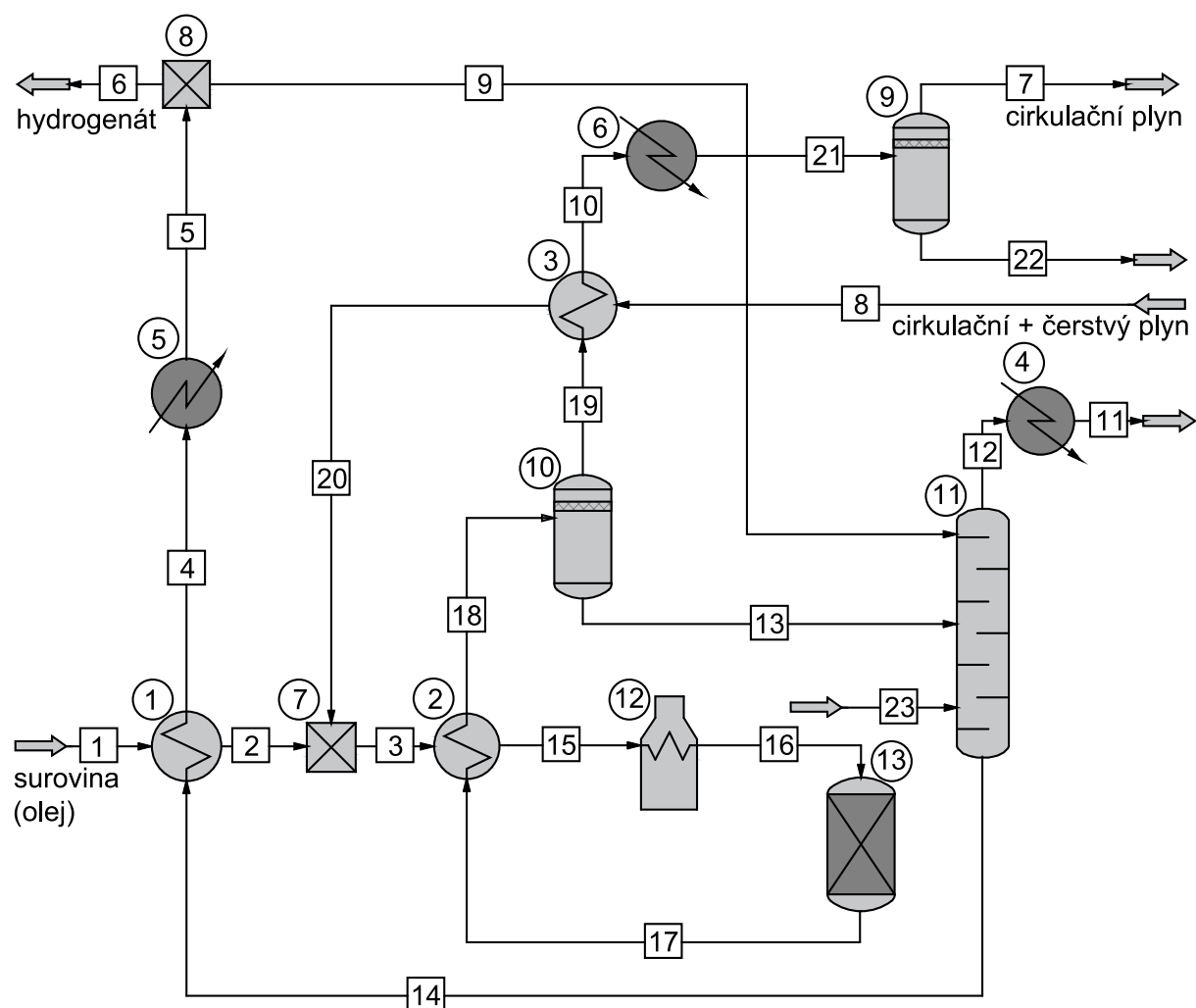
Závěrem tohoto ukázkového příkladu je nutné pro úplnost poznamenat, že v přílohách A a B této práce jsou uvedeny detaily řešení první i druhé modifikace s jejich kompletními výsledky v prostředí softwaru Maple. Načítání vstupních dat a omezujících podmínek je v tomto softwarovém nástroji realizováno voláním externích souborů, které nejsou součástí diplomové práce, avšak jsou k dispozici u vedoucího diplomové práce. Stejným způsobem je pojato i řešení průmyslového případu, jenž je popsán v následující části diplomové práce a jeho výpočtová realizace se nachází v příloze C.

5 ŘEŠENÍ PRŮMYSLUVÉHO PŘÍPADU

Pro aplikaci metody network pinch byl vybrán případ hydrogenační rafinace oleje, který je původně řešen v literatuře [2] za použití PDM.

Hydrogenační rafinace olejů je katalytickým procesem, při kterém se nežádoucí složky v olejích obsažené přeměňují na složky žádoucí. Děj probíhá chemickými reakcemi za přítomnosti vodíku a vhodných katalyzátorů. V závislosti na požadované hloubce rafinace jsou obvykle voleny pracovní podmínky: tlak 10–21 MPa, teploty 250–320 °C, v případě hydrokrakování 380–440 °C, spotřeba H₂ 5–250 Nm³/m³ suroviny). [16]

Obrázek 5.1 znázorňuje technologické schéma daného procesu, jehož cílem je změna viskozity a barvy olejů. Je požadována rekonstrukce HEN vedoucí k úspoře co největšího množství paliva spotřebovávaného ohřevnou pecí (pozice 12), která předehřívá surovinu před jejím vstupem do reaktoru (pozice 13). Konkrétní požadavek je dosáhnout rekonstrukcí HEN úspory energie dodávané ohřevnou pecí alespoň o 30 % vzhledem k původní hodnotě. Zároveň se klade důraz na snížení spotřeby chladicí vody při dochlazování produktu, což znamená požadavek na úspory energie v chladicích zařízeních v procesu (pozice 4, 5 a 6). Procesní výměna tepla je zde zajištěna třemi výměníky (na pozicích 1, 2 a 3).



Obrázek 5.1 Technologické schéma procesu [2],[17]

5.1 Zadání úlohy a diagnostika stávající výměňkové sítě výměny tepla

Pro zpracování diagnostiky HEN je nejprve nutné získat základní informace o prouděch, tepelných výměnících a chladících či topných zařízeních v procesu. Podstatné pro výpočet jsou pak hodnoty teplot a tepelných kapacit jednotlivých proudů. Potřebné hodnoty veličin byly převzaty z diplomové práce Z. Němečka [17], který se problematikou daného procesu hydrogenační rafinace oleje podrobněji zabýval.

5.1.1 Zadání hodnot pro výpočet

Aby byla situace pro výpočet zcela jasná, je technologické schéma, uvedené na obrázku 5.1, zjednodušeno z celkového počtu 23 proudů na čtyři horké proudy s označením H1–H4 a tři chladné proudy, které jsou označeny C1–C3. Pro další zpřehlednění je v následujících schématech a všech výpočtech zvoleno uniformní značení jednotek HEN, které uvádí tabulka 5.1.

Tabulka 5.1 Značení jednotek HEN

Označení zařízení	Pozice zařízení v technologickém schématu (obrázek 5.1)	Poznámka
E1	1	tepelný výměník (<i>heat exchanger</i>)
E2	2	tepelný výměník (<i>heat exchanger</i>)
E3	3	tepelný výměník (<i>heat exchanger</i>)
CS1	5	chladný servis (<i>cold utility</i>)
CS2	6	chladný servis (<i>cold utility</i>)
CS3	4	chladný servis (<i>cold utility</i>)
HS	12	horký servis (<i>hot utility</i>)

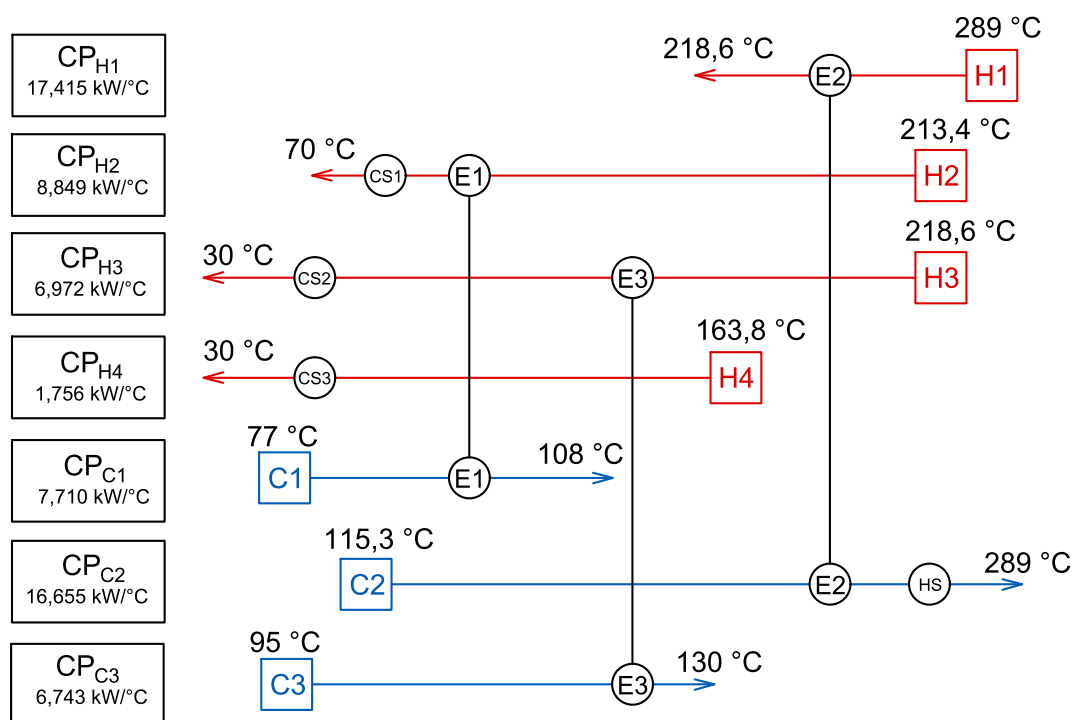
V tabulce 5.2 jsou přehledně uvedeny tepelné kapacity jednotlivých proudů a tabulka 5.3 uvádí příslušné počáteční a koncové teploty. Kromě těchto pro výpočet zásadních údajů je v první řadě nutné určit z technologického schématu správně topologii HEN. Všechny tyto podstatné informace jsou shrnuty na obrázku 5.2.

Tabulka 5.2 Tepelné kapacity proudů uvedené v kW/°C

Označení	Hodnota	Proud
CP _{H1}	17,415	H1
CP _{H2}	8,849	H2
CP _{H3}	6,972	H3
CP _{H4}	1,756	H4
CP _{C1}	7,710	C1
CP _{C2}	16,655	C2
CP _{C3}	6,743	C3

Tabulka 5.3 Teploty proudů uvedené ve °C

Označení	Hodnota	Proud	Poznámka	Odpovídající proud v technologickém schématu (obrázek 5.1)
TH_{H1}	289,0	H1	horký konec	17
TC_{H1}	218,6	H1	chladný konec	18
TH_{H2}	213,4	H2	horký konec	14
TC_{H2}	70,0	H2	chladný konec	5
TH_{H3}	218,6	H3	horký konec	19
TC_{H3}	30,0	H3	chladný konec	10
TH_{H4}	163,8	H4	horký konec	12
TC_{H4}	30,0	H4	chladný konec	11
TH_{C1}	108,0	C1	horký konec	2
TC_{C1}	77,0	C1	chladný konec	1
TH_{C2}	289,0	C2	horký konec	15
TC_{C2}	115,3	C2	chladný konec	3
TH_{C3}	130,0	C3	horký konec	20
TC_{C3}	95,0	C3	chladný konec	8

**Obrázek 5.2** Mřížkový diagram – případ určený k diagnostice

Jak lze vidět na obrázku 5.2, každý z výměníků HEN je instalován na jiných dvou proudech (výměník E1 zajišťuje procesní výměnu tepla mezi proudy H2 a C1, výměník E2 mezi proudy H1 a C2 a výměník E3 je instalován na proudech H3 a C3), přičemž vždy na jednom z těchto dvou proudů není umístěno žádné jiné zařízení, zajišťující přenos tepla (horký či chladný servis). Pokud tedy uvažujeme, že vstupní a výstupní teploty jednotlivých proudů jsou pevně dané (kvůli technologii procesu je nelze změnit), každý

instalovaný výměník musí mít stálý tepelný výkon pro dodržení těchto teplot a není možné uvažovat o jeho zvýšení při modifikaci HEN (viz bilanční rovnice proudu, příkladem byl vztah (4.2)).

5.1.2 Diagnostika

Pro diagnostiku a následné hledání vhodných modifikací byla pomocí vztahu (3.1) vytvořena následující účelová funkce. Kromě požadavku na minimalizaci tepla přeneseného horkým servisem do ní byla vložena také podmínka pro minimalizaci tepla odebíraného chladnými servisy.

$$OF = 1000 \cdot HS + 1000 \cdot (CS1 + CS2 + CS3) + 1 \cdot (pH_{E1} + pH_{E2} + pH_{E3}) + 1 \cdot (pC_{E1} + pC_{E2} + pC_{E3}) \quad (5.1)$$

V tabulce 5.4 jsou uvedeny vypočtené výkony všech jednotek stávající HEN, stanovené pomocí prezentovaného lineárního modelu. Tabulka 5.5 zobrazuje hodnoty pomocných parametrů využívaných prezentovanou metodou.

Tabulka 5.4 Výsledky diagnostiky PP

E1	239,0 kW
E2	1226,0 kW
E3	236,0 kW
R _{max}	1701,0 kW
CS1	1029,9 kW
CS2	1078,9 kW
CS3	235,0 kW
HS	1667,0 kW

Tabulka 5.5 Pomocné parametry ve °C (diagnostika, PP)
 $\Delta T_{\min}(\text{EMAT}) = 0 \text{ °C}$

DTC _{E1}	1,0	pC _{E1}	0,0
DTH _{E1}	1,0	pH _{E1}	0,0
DTC _{E2}	1,0	pC _{E2}	0,0
DTH _{E2}	1,0	pH _{E2}	0,0
DTC _{E3}	1,0	pC _{E3}	0,0
DTH _{E3}	1,0	pH _{E3}	0,0

Jak lze vidět, všechny hodnoty parametru *DTH* (*DTC*) jsou rovny jedné a všechny hodnoty parametru *pH* (*pC*) se rovnají nule. Dle definice metody *network pinch* nebyl tedy žádný z výměníků shledán jako *pinching match*. Vysvětlení tohoto jevu bylo již naznačeno. Problém souvisí s tím, že žádný výměník v procesu nepropojuje proudy s umístěným chladným a horkým servisem, ani dalšími výměníky, které by dále byly nainstalovány na proud regulován chladným nebo horkým servisem. Neexistuje zde tzv. „cesta výměny tepla“, na které by mohl být *pinching match* identifikován.

Není-li přítomen *network pinch* ve výměňkové síti, je pro dosažení hledané úspory energie nutné vřadit nový výměník, a to tak, aby tvořil „cestu výměny tepla“ (přepojení výměníků ani rozdělení proudu zde není možné). Připadá v úvahu řada možných umístění nového výměníku do stávající HEN. Tyto možnosti lze prezentovaným LP modelem diagnosticky vyhodnotit a identifikovat tak nejvhodnější umístění tohoto nového výměníku do HEN.

5.2 Systematické hledání nejúčinnějších úprav výměňkové sítě

Jak je popsáno výše, obecně má smysl instalovat nový výměník na proudy tak, že zajistí propojení horkého a chladného servisu (a tím vytvoří zmiňovanou „cestu“). Na možné varianty vřazení výměníku se systematicky aplikuje metoda *network pinch* a z výsledků této diagnostiky je následně vybrána nejúčinnější úprava.

5.2.1 Stanovení minimálního teplotního příblížení $\Delta T_{\min}(\text{EMAT})$

K provedení výpočtů je ještě nutné určit podstatný parametr – minimální teplotní příblížení $\Delta T_{\min}(\text{EMAT})$. Při vyhodnocování ukázkového příkladu tento problém řešen nebyl, byl zvolen ideální stav ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$, příp. $6\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pro řešení reálného průmyslového případu však tuto hodnotu nelze k získání korektních výsledků zanedbat.

Při určování hodnoty $\Delta T_{\min}(\text{EMAT})$ je potřeba zvážit hlavně investiční náklady na velikost výměníku – tedy náklady na instalovanou plochu výměny tepla. K takovému posouzení poslouží závislost plochy výměny tepla na množství přeneseného tepla (tepelném výkonu), která lze získat pomocí rovnice přenosu tepla, zapsané následujícím vztahem (5.2).

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T_{\ln} \quad (5.2)$$

V uvedeném vztahu značí k [$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$] celkový součinitel prostupu tepla, A [m^2] je plocha výměny tepla a ΔT_{\ln} [$^{\circ}\text{C}$] je střední logaritmický teplotní rozdíl. Z rovnice přenosu tepla se vyjádří plocha A – je získán vztah (5.3).

$$A = \frac{Q}{k \cdot \Delta T_{\ln}} \quad (5.3)$$

Při protiproudém toku pracovních látek tepelným výměníkem se určí střední logaritmický teplotní rozdíl dle následujícího vztahu (5.4), kde T_{Hin} [$^{\circ}\text{C}$] je vstupní teplota horkého proudu, T_{Hout} [$^{\circ}\text{C}$] je výstupní teplota horkého proudu, T_{Cin} [$^{\circ}\text{C}$] označuje vstupní teplotu chladného proudu a T_{Cout} [$^{\circ}\text{C}$] jeho teplotu výstupní.

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_{\text{Hin}} - T_{\text{Cout}}) - (T_{\text{Hout}} - T_{\text{Cin}})}{\ln\left(\frac{T_{\text{Hin}} - T_{\text{Cout}}}{T_{\text{Hout}} - T_{\text{Cin}}}\right)} \quad (5.4)$$

Výstupní teploty horkého a chladného proudu lze vyjádřit pomocí hodnot vstupních teplot proudů, jejich tepelných kapacit a množství přeneseného tepla (z entalpické bilance proudu).

$$T_{\text{Hout}} = T_{\text{Hin}} - \frac{Q}{CP_{\text{H}}} \quad (5.5)$$

$$T_{\text{Cout}} = T_{\text{Cin}} + \frac{Q}{CP_{\text{C}}} \quad (5.6)$$

Dosazením vztahů pro výstupní teplotu horkého (5.5) a chladného (5.6) proudu do rovnice pro výpočet středního logaritmického teplotního rozdílu (5.4) můžeme vyjádřit tento střední logaritmický teplotní rozdíl v závislosti na přeneseném teple pomocí známých veličin. Závislost je uvedena vztahem (5.7).

$$\Delta T_{\ln} = \frac{\frac{Q}{CP_C} + \frac{Q}{CP_H}}{\ln \left(\frac{T_{\text{Hin}} - T_{\text{Cin}} + \frac{Q}{CP_C}}{T_{\text{Hin}} - T_{\text{Cin}} - \frac{Q}{CP_H}} \right)} \quad (5.7)$$

Součinitel prostupu tepla je možno stanovit pomocí jeho převrácené hodnoty jako součet převrácených hodnot součinitelů přestupu tepla na straně horkého (α_H) a chladného (α_C) proudu. Po úpravě získáváme vztah (5.8).

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_H} + \frac{1}{\alpha_C}} \quad (5.8)$$

Střední logaritmičkový rozdíl (5.7) a součinitel prostupu tepla (5.8) je nyní možno dosadit do vztahu pro závislost plochy výměny tepla na přeneseném teple (5.3). Je získáno následující vyjádření:

$$A = \frac{Q \left(\frac{1}{\alpha_H} + \frac{1}{\alpha_C} \right) \cdot \ln \left(\frac{T_{\text{Hin}} - T_{\text{Cin}} + \frac{Q}{CP_C}}{T_{\text{Hin}} - T_{\text{Cin}} - \frac{Q}{CP_H}} \right)}{\frac{Q}{CP_C} + \frac{Q}{CP_H}} \quad (5.9)$$

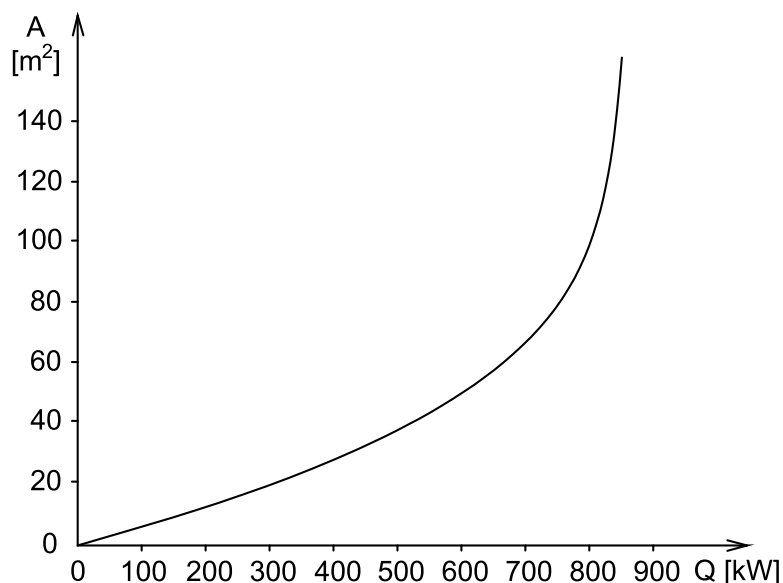
Uvažujme variantu připojení nového výměníku na proud H2 a C2 (úvaha plyne z již vykonaných testovacích výpočtů, které budou prezentovány v následující podkapitole). Z výsledného vyjádření (5.9) je pak možné vytvořit grafickou závislost. Známé hodnoty pro dosazení do vztahu shrnuje tabulka 5.6.

Tabulka 5.6 Hodnoty pro určení závislosti plochy výměny tepla na přeneseném teple

T_{Hin}	213,4 °C	teplota proudu H2 na vstupu do výměníku
T_{Cin}	115,3 °C	teplota proudu C2 na vstupu do výměníku
CP_H	8,849 kW/°C	tepelná kapacita proudu H2
CP_C	16,655 kW/°C	tepelná kapacita proudu C2
α_H	0,383 kW/(m ² · °C)	odhad součinitele přestupu tepla na straně proudu H2
α_C	0,344 kW/(m ² · °C)	odhad součinitele přestupu tepla na straně proudu C2

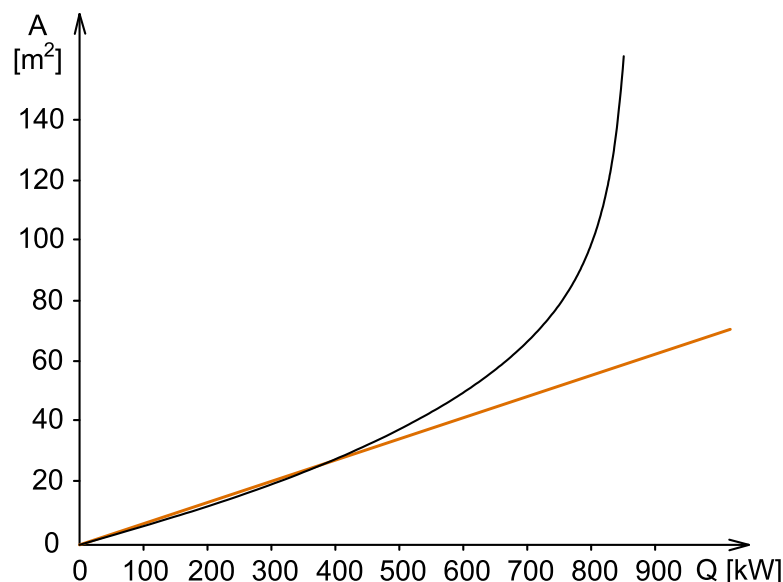
Po dosazení všech hodnot je získána závislost (5.10), jejíž grafické vyjádření je znázorněno na obrázku 5.3.

$$A = 31,887 \cdot \ln \left(\frac{98,1 + 6,004 \cdot 10^{-2} \cdot Q}{98,1 - 11,301 \cdot 10^{-2} \cdot Q} \right) \quad (5.10)$$



Obrázek 5.3 Graf závislosti plochy výměny tepla tepelném výkonu výměníku

Pro srovnání lze zobrazenou závislost proložit přímkou z počátku souřadného systému. Zvolen je takový druhý bod přímky, pro který bude přímka co nejlépe kopírovat danou logaritmickou křivku. Bylo zvoleno $Q = 450$ kW a dle vztahu (5.10) jemu odpovídající hodnota $A = 31,06$ m². Graf závislosti plochy výměny tepla na tepelném výkonu výměníku proložený určenou přímkou je znázorněn na obrázku 5.4.



Obrázek 5.4 Graf závislosti A na Q proložený přímkou

Při pohledu na graf 5.4 lze říci, že cca do výkonu 500–520 kW není průběh závislosti plochy výměny tepla na tepelném výkonu příliš odchýlen od vytvořené přímky. Ovšem naopak se zvyšujícím se výkonem nad tyto hodnoty vykazuje průběh čím dál větší nárůst. Pro malý přírůstek výkonu se pak požadovaná plocha výrazně zvětšuje a například nad výkonem 700 kW je tento nárůst z hlediska investičních nákladů už neúměrný. Pro

instalaci nového výměníku lze tedy za ekonomicky únosnou hranici považovat zmíněný tepelný výkon 520 kW. Pro tento výkon je možné s odkazem na vztahy (5.5) a (5.6) určit očekávané výstupní teploty proudů H2 ($T_{Hout} = 154,6\text{ °C}$) a C2 ($T_{Cout} = 84,1\text{ °C}$). S danými hodnotami všech vstupních a výstupních teplot proudů výměníku lze pak dopočítat teplotní rozdíly na jeho horké a chladné straně:

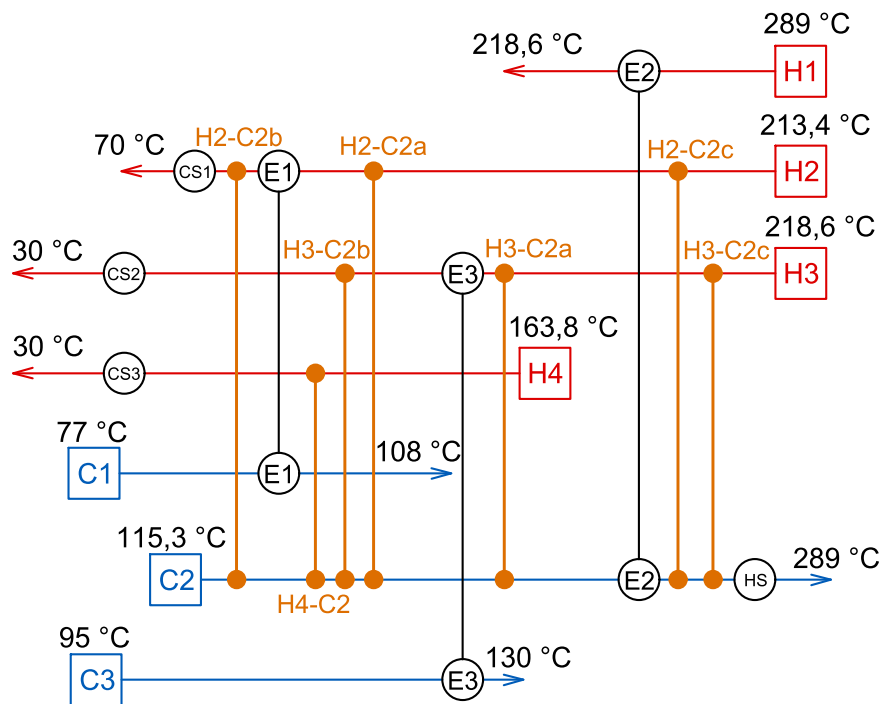
$$\Delta TH_{EN} = T_{Hin} - T_{Cout} \quad (5.11)$$

$$\Delta TC_{EN} = T_{Hout} - T_{Cin} \quad (5.12)$$

Pomocí vztahů (5.11) a (5.12) je určeno $\Delta TH_{EN} = 213,4 - 84,1 = 129,3\text{ °C}$ a $\Delta TC_{EN} = 154,6 - 115,3 = 39,3\text{ °C}$. Získanou minimální hodnotu $39,3\text{ °C}$ pro stanovený výkon 520 kW lze potom ve výpočtech pro instalaci nového výměníku použít jako minimální teplotní přiblížení $\Delta T_{min}(EMAT)$. Ve výpočtech dále bude uvažována hodnota zaokrouhlená na desítky, tedy $\Delta T_{min}(EMAT) = 40\text{ °C}$.

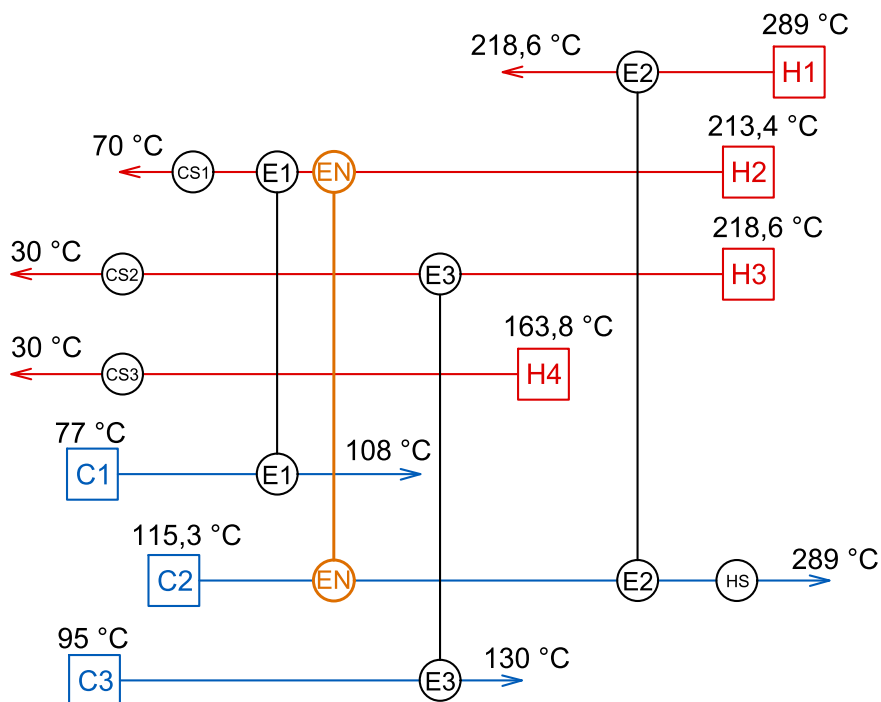
5.2.2 Hledání vhodné varianty umístění nového výměníku

Jak již bylo v úvodu kapitoly zmíněno, nový výměník by měl být instalován na procesní proudy tak, aby vytvořil „cestu“ mezi horkým a chladným servisem (*utility path*). V popisované HEN se vyskytují tři procesní proudy, na kterých je umístěn chladný servis (H2, H3 a H4) a jeden proud regulovaný horkým servisem (C2). Z tohoto hlediska vyplývají tři základní varianty. Nový výměník může být instalován mezi proudy H2–C2, H3–C2 nebo H3–C2. V rámci těchto tří možností může být výměník zapojen na různá místa jednotlivých proudů. Celkem bylo vyzkoušeno sedm různých variant (viz obrázek 5.5). Výpočty byly nejdříve prováděny jako testovací při různých hodnotách $\Delta T_{min}(EMAT)$. Níže jsou pro všechny varianty uvedeny výsledky při stanovené hodnotě 40 °C .



Obrázek 5.5 Varianty umístění nového výměníku

První testovanou variantou je přidání nového výměníku do polohy H2-C2a (viz obrázek 5.5). Diagnostikovanou HEN znázorňuje obrázek 5.6 a obdržené výsledky jsou zaznamenány v tabulkách 5.7 a 5.8.



Obrázek 5.6 Nový výměník na proudech H2 a C2 – varianta a

Tabulka 5.7 Výsledky H2-C2, var. a

E1	239,0 kW
E2	1226,0 kW
E3	236,0 kW
EN	514,1 kW
R_{\max}	2215,2 kW
CS1	515,8 kW
CS2	1078,9 kW
CS3	235,0 kW
HS	1152,8 kW

Tabulka 5.8 Pomocné parametry ve °C (H2-C2, var. a, PP)

DTC_{E1}	11,3	pC_{E1}	29,7
DTH_{E1}	7,3	pH_{E1}	33,7
DTC_{E2}	32,4	pC_{E2}	8,6
DTH_{E2}	29,2	pH_{E2}	11,8
DTC_{E3}	41,0	pC_{E3}	0,0
DTH_{E3}	41,0	pH_{E3}	0,0
DTC_{EN}	0,0	pC_{EN}	41,0
DTH_{EN}	27,2	pH_{EN}	13,8

Jak lze vyčíst z tabulky 5.7, výkon nově vřazeného tepelného výměníku je 514,1 kW. O tuto hodnotu se pak zvyšuje hodnota maximální procesní výměny tepla z původní hodnoty 1701 kW na 2215,2 kW (po zaokrouhlení), přičemž potřebný výkon ohřevné pece H a chladného servisu CS1 byl o 514,1 kW snížen. Provedením této úpravy tedy bylo dosaženo úspory 30,8 % potřebné energie dodávané ohřevnou pecí. Procentuální úspora chladného servisu CS1 je téměř 50 %, při vztažení na celkovou energii potřebnou k dochlazování horkých proudů úspora činí 21,9 %. Z hlediska úspory energie by tedy vřazení nového výměníku do polohy H2-C2a splňovalo vytyčený cíl dosáhnout 30% úspory na tepelném výkonu ohřevné pece.

Tabulka 5.8 obsahuje výsledné hodnoty pomocných parametrů. Doposud byly komentovány pouze případy, kdy pomocné parametry byly rovny nule nebo jedné, avšak při pohlednutí do tabulky lze zjistit, že tyto parametry nyní nabývají hodnot 0–41 °C. V rámci vyhodnocování výsledků dosažených aplikací metody *network pinch* bylo zjištěno, že výměník může být shledán jako *pinching match* na své chladné (resp. horké) straně, pokud parametr DTC (DTH) je roven nule, přičemž příslušný parametr pC (pH) je roven hodnotě $\Delta T_{\min}(\text{EMAT}) + 1$. Z tohoto pravidla plyne, že při zapojení nového výměníku do polohy H2-C2a se *network pinch* nachází na chladné straně tohoto výměníku. Parametr DTC (DTH) pak dále ukazuje, jak se liší skutečné teplotní přiblížení jednotlivých výměníků (chladných a horkých stran výměníků) od minimální hodnoty $\Delta T_{\min}(\text{EMAT})$. To je možno dokázat na jednoduchém výpočtu.

Například pro chladnou stranu výměníku E1 je parametr $DTC_{E1} = 11,3$ °C. Z mřížkového diagramu na obrázku 5.6 lze vyčíst, že teplota chladného proudu C1 na chladné straně výměníku E1 je 77 °C. Teplotu horkého proudu na chladné straně výměníku E1 lze vypočítat vyjádřením ze vztahu (5.5) pomocí známého výkonu chladného servisu $CS1 = 515,8$ kW, tepelné kapacity $CP_{H2} = 8,849$ kW a výstupní teploty proudu H2 $T_{H2out} = 70$ °C (viz obrázek 5.6).

$$T_{H2inCS1} = T_{H2out} + \frac{CS1}{CP_{H2}} \quad (5.13)$$

$$T_{H2inCS1} = 70 + \frac{515,8}{8,849} = 128,3 \text{ °C}$$

Dosazením do vztahu (5.13) získáváme hodnotu vstupní teploty proudu do horkého servisu CS1, což je dle obrázku 5.6 zároveň výstupní teplota proudu H2 z výměníku E1. Příslušná hodnota teplotního přiblížení je pak určena dosazením do vztahu (5.12), konkrétní rovnice je uvedena vztahem (5.14)

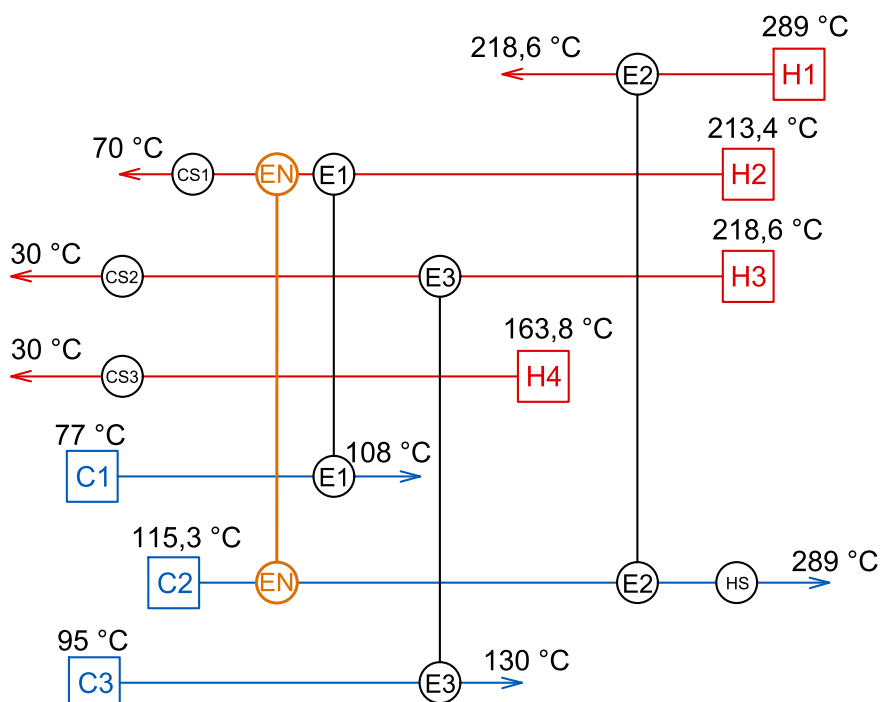
$$\Delta TC_{EN} = T_{H2inCS1} - T_{CinE1} \quad (5.14)$$

$$\Delta TC_{EN} = 128,3 - 77 = 51,3 \text{ °C}$$

Minimální teplotní přiblížení $\Delta T_{\min}(\text{EMAT})$ je pro diagnostiku výměníkové sítě tohoto průmyslového případu stanoveno na 40 °C. Rozdílem hodnoty vypočítaného teplotního přiblížení chladné strany výměníku E1 a stanoveného minimálního teplotního přiblížení získáváme 11,3 °C, což odpovídá diskutované hodnotě parametru DTC_{E1} . Příslušná hodnota parametru pC_{E1} pak dle definice metody *network pinch* odpovídá rozdílu $(\Delta T_{\min}(\text{EMAT}) + 1) - DTC_{E1} = 29,7$ °C.

Z prezentované úvahy vyplývá, že parametr DTC (DTH) poskytuje informaci o tom, jak blízko je skutečné teplotní přiblížení k minimálnímu stanovenému teplotnímu přiblížení. To ovšem platí pouze do hodnoty o jeden stupeň vyšší, než je $\Delta T_{\min}(\text{EMAT})$, v tomto případě 41 °C. Tato hodnota je maximální, je omezena provázáním s parametrem pC (pH), který je minimalizován v účelové funkci. Například pro výměník E3 je $DTC_{E3} = DTH_{E3} = 41$ °C, ale ve skutečnosti se teplotní přiblížení liší od minimální stanovené hodnoty o 48,6 °C na jeho horké straně a o 49,8 °C na jeho chladné straně (hodnoty byly zjištěny analogicky s popsáním postupem u výměníku E1).

Pro případ instalace nového výměníku do polohy H2-C2a již byly výsledky demonstrovány. Další variantou je umístění H2-C2b (viz obrázek 5.5). Diagnostikovaná HEN je znázorněna na obrázku 5.7 a obdržené výsledky jsou uvedeny v tabulkách 5.9 a 5.10.



Obrázek 5.7 Nový výměník na proudech H2 a C2 – varianta b

Tabulka 5.9 Výsledky H2-C2, var. b

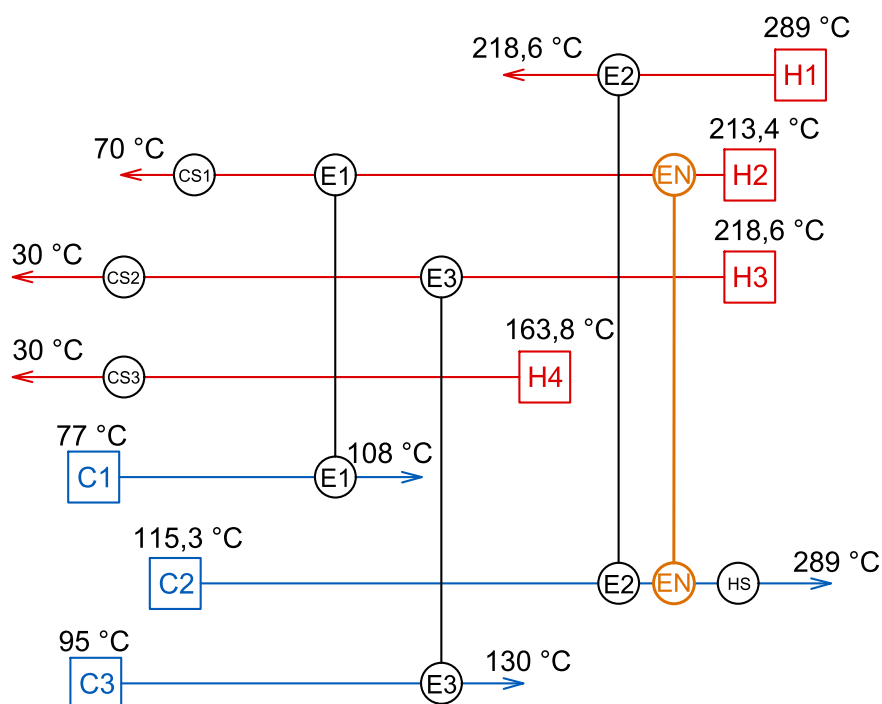
E1	239,0 kW
E2	1226,0 kW
E3	236,0 kW
EN	275,1 kW
R_{\max}	1976,1 kW
CS1	754,8 kW
CS2	1078,9 kW
CS3	235,0 kW
HS	1391,8 kW

Tabulka 5.10 Pomocné parametry ve °C (H2-C2, var. b, PP)

DTC_{E1}	41,0	pC_{E1}	0,0
DTH_{E1}	41,0	pH_{E1}	0,0
DTC_{E2}	41,0	pC_{E2}	0,0
DTH_{E2}	41,0	pH_{E2}	0,0
DTC_{E3}	41,0	pC_{E3}	0,0
DTH_{E3}	41,0	pH_{E3}	0,0
DTC_{EN}	0,0	pC_{EN}	41,0
DTH_{EN}	14,6	pH_{EN}	26,4

Tato varianta umístění nového výměníku umožňuje dosažení celkového výkonu procesní výměny tepla 1976,1 kW (viz tabulka 5.9). Požadovaný výkon ohřevné pece je 1391,8 kW a celkový požadovaný výkon na dochlazování je 2068,7 kW. Oproti původnímu stavu se touto úpravou docílilo úspory požadované energie dodávané ohřevnou pecí o 16,5 %, úspora na výkonu chladného servisu CS1 je 26,7 % a úspora vztažená k celkovému výkonu na dochlazování je 11,7 %. Dle tabulky 5.10 se *network pinch* nachází na chladném konci nově vřazeného výměníku a teplotní přiblížení na horkém konci tohoto výměníku činí 54,6 °C. Teplotní přiblížení u ostatních výměníků v HEN je větší než 81 °C (nebo je této hodnotě rovno – v souladu s vysvětlením u předchozí varianty).

Třetím testovaným umístěním výměníku je poloha H2-C2c (z obrázku 5.5), znázorněna obrázkem 5.8.



Obrázek 5.8 Nový výměník na proudech H2 a C2 – varianta c

Výstupem výpočtu v softwaru Maple (viz příloha C) je prázdná množina. Pro aplikaci modelu zde není dodržena podmínka (3.11), tedy že teplotní rozdíl na horké straně výměníku je větší nebo roven $\Delta T_{\min}(\text{EMAT})$. V uvažovaném místě jeho zapojení je teoretický teplotní rozdíl nejvýše 24,5 °C (odvozeno z výkonu ohřevné pece původní výměníkové sítě – a tedy z nulového výkonu výměníku EN). Výsledkem po aplikování vytvořeného modelu je tedy utvrzení, že navržené zapojení výměníku není schůdné.

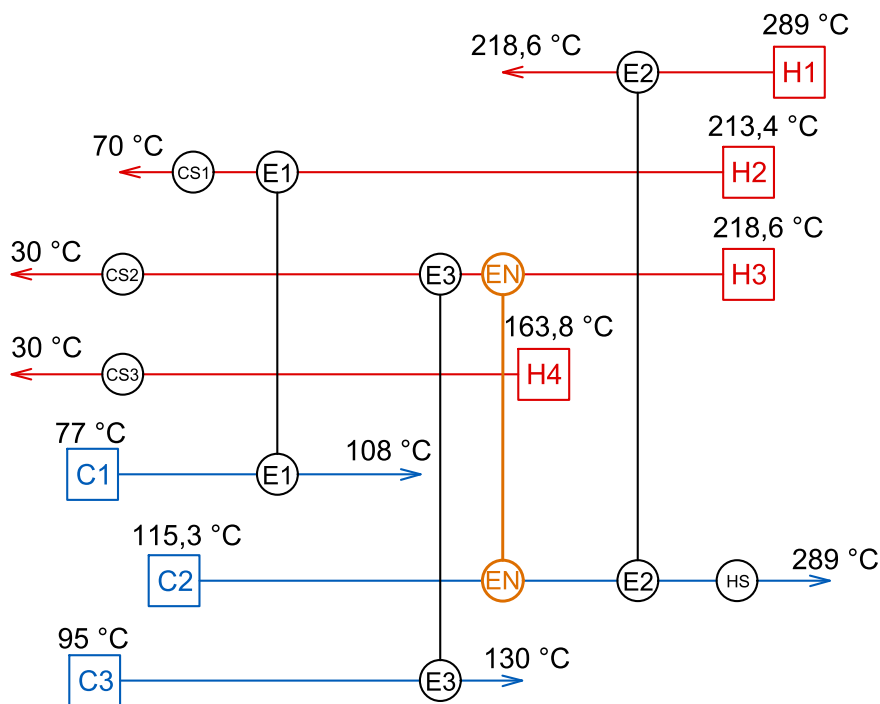
Dalšími třemi variantami pro aplikaci výpočtového modelu jsou různé polohy zapojení nového výměníku na proudy H3 a C2. První z těchto variant s polohou H3-C2a (viz obrázek 5.5) znázorňuje obrázek 5.9. Výsledky jsou pak zaznamenány v následujících tabulkách (tabulka 5.11 a tabulka 5.12).

Tabulka 5.11 Výsledky H3-C2, var. a

E1	239,0 kW
E2	1226,0 kW
E3	236,0 kW
EN	338,8 kW
R_{\max}	2039,9 kW
CS1	1029,9 kW
CS2	740,0 kW
CS3	235,0 kW
HS	1328,1 kW

Tabulka 5.12 Pomocné parametry ve °C (H3-C2, var. a, PP)

DTC_{E1}	41,0	pC_{E1}	0,0
DTH_{E1}	41,0	pH_{E1}	0,0
DTC_{E2}	41,0	pC_{E2}	0,0
DTH_{E2}	39,7	pH_{E2}	1,3
DTC_{E3}	1,1	pC_{E3}	39,9
DTH_{E3}	0,0	pH_{E3}	41,0
DTC_{EN}	14,7	pC_{EN}	26,3
DTH_{EN}	41,0	pH_{EN}	0,0



Obrázek 5.9 Nový výměník na proudech H3 a C2 – varianta a

Výkon nového výměníku je v tomto případě (H3-C2a) 338,8 kW. Dosažený maximální výkon procesní výměny tepla tedy činí 2039,9 kW. Celkový výkon potřebný na dochlazování proudů je 2004,9 kW a požadovaný výkon ohřevné pece 1328,1 kW. Pro srovnání s původním stavem se touto modifikací HEN dosáhlo úspory 14,5 % na celkovém výkonu pro chlazení (úspory 31,4 % vztahované k chladnému servisu CS2) a úspory 20,3 % na výkonu potřebném k dohřátí proudu C2 na požadovanou vstupní teplotu do reaktoru.

Network pinch se v případě zapojení nového výměníku v poloze H3-C2a nachází na horké straně výměníku E3, přičemž na jeho chladné straně je teplotní přiblížení pouze o 1,1 °C větší, než je stanovená minimální hodnota.

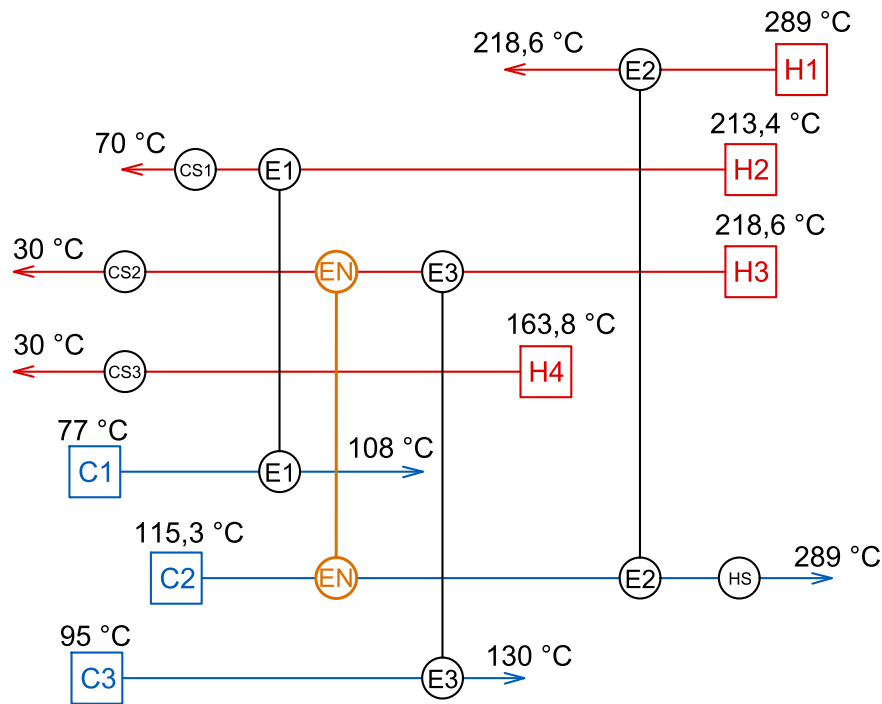
Druhá varianta vřazení nového výměníku na proudy H3 a C2 (H3-C2b) je prezentována obrázkem 5.10 a výčtem výsledků v tabulkách 5.13 a 5.14. Dle tabulky 5.14 a definici metody se *network pinch* nachází na chladné straně nového výměníku EN. Co se týče zhodnocení dosaženého výkonu a úspor, dle výsledků z tabulky 5.13 je úspora na výkonu ohřevné pece 12,3 %, úspora na výkonu chladného servisu CS2 19,2 % a úspora vztahovaná k celkovému potřebnému výkonu na chlazení činí 8,8 %.

Tabulka 5.13 Výsledky H3-C2, var. b

E1	239,0 kW
E2	1226,0 kW
E3	236,0 kW
EN	205,3 kW
R_{\max}	1906,4 kW
CS1	1029,9 kW
CS2	873,6 kW
CS3	235,0 kW
HS	1461,6 kW

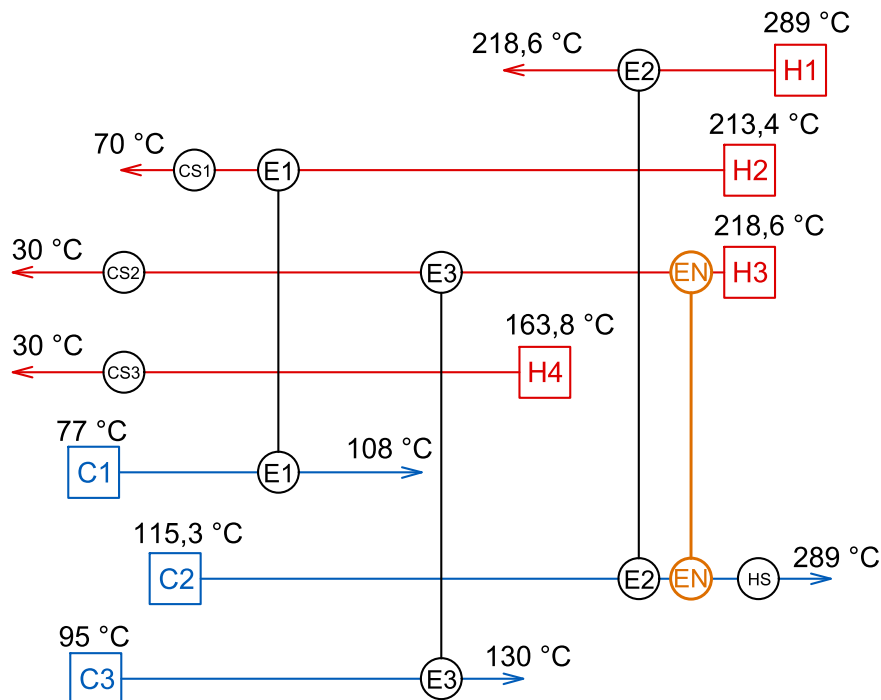
Tabulka 5.14 Pomocné parametry ve °C (H3-C2, var. b, PP)

DTC_{E1}	41,0	pC_{E1}	0,0
DTH_{E1}	41,0	pH_{E1}	0,0
DTC_{E2}	41,0	pC_{E2}	0,0
DTH_{E2}	41,0	pH_{E2}	0,0
DTC_{E3}	41,0	pC_{E3}	0,0
DTH_{E3}	41,0	pH_{E3}	0,0
DTC_{EN}	0,0	pC_{EN}	41,0
DTH_{EN}	17,1	pH_{EN}	23,9



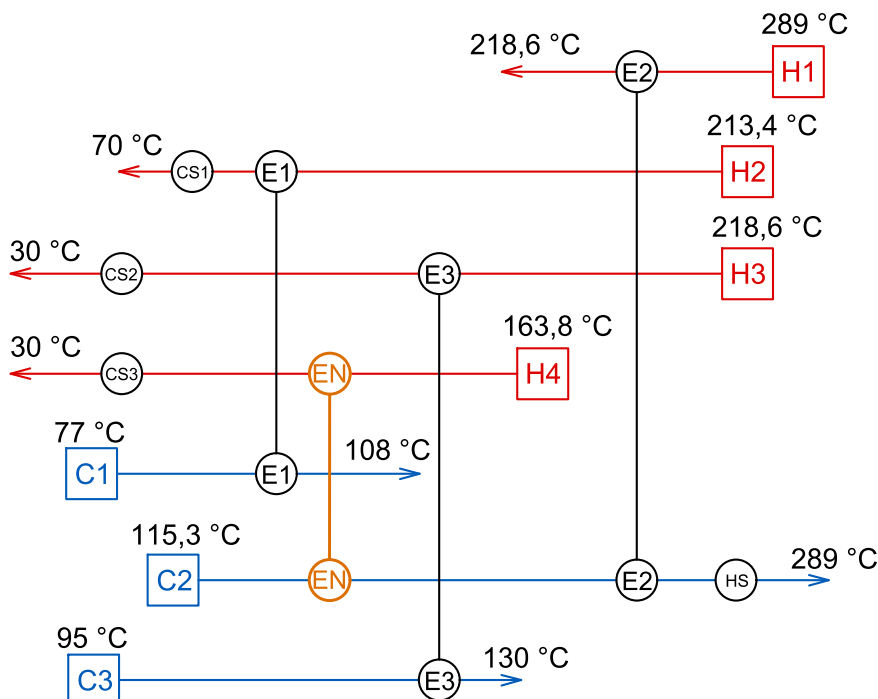
Obrázek 5.10 Nový výměník na proudech H3 a C2 – varianta b

Na obrázku 5.11 je vyznačena třetí varianta zapojení nového výměníku na proudech H3 a C2 (H3-C2c). Tato možnost je dle výsledků neschůdná, analogicky k variantě H2-C2c. Opět zde není splněna podmínka (3.11) o vztahu teplotního rozdílu na horké straně výměníku vzhledem k hodnotě $\Delta T_{\min}(\text{EMAT})$. Minimální teoretické teplotní přiblížení v tomto místě zapojení nového výměníku je $29,7\text{ °C}$ (vztaženo na výkon horkého servisu původní HEN a na nulový výkon nového výměníku).



Obrázek 5.11 Nový výměník na proudech H3 a C2 – varianta c

Poslední testovanou možností je instalace nového výměníku na prouděch H4 a C2, jak je znázorněno na obrázku 5.12. Výsledky získané po aplikaci metody *network pinch* jsou zaznamenány v tabulkách 5.15 a 5.16.



Obrázek 5.12 Nový výměník na prouděch H4 a C2

Tabulka 5.15 Výsledky H4-C2

E1	239,0 kW
E2	1226,0 kW
E3	236,0 kW
EN	14,9 kW
R_{\max}	1716,0 kW
CS1	1029,9 kW
CS2	1078,9 kW
CS3	220,0 kW
HS	1652,0 kW

Tabulka 5.16 Pomocné parametry ve °C (H4-C2, PP)

DTC_{E1}	41,0	pC_{E1}	0,0
DTH_{E1}	41,0	pH_{E1}	0,0
DTC_{E2}	41,0	pC_{E2}	0,0
DTH_{E2}	41,0	pH_{E2}	0,0
DTC_{E3}	41,0	pC_{E3}	0,0
DTH_{E3}	41,0	pH_{E3}	0,0
DTC_{EN}	0,0	pC_{EN}	41,0
DTH_{EN}	7,6	pH_{EN}	33,4

Z tabulky 5.15 je patrné, že přidáním výměníku mezi proudy H4 a C2 se zajistí zvýšení výkonu pouze o 14,9 kW. Pro úplnost lze uvést procentuální úspory i k této variantě (avšak instalace takového výměníku by z hlediska investic na zásahy do HEN a výsledných úspor nebyla reálná). Úspora na výkonu ohřevné pece činí 0,9 % původního výkonu, úspora výkonu chladného servisu CS3 pak 6,3 % a při vztažení na celkový tepelný výkon potřebný k dochlazování horkých proudů je úspora 0,6 %. Při pohledu do tabulky 5.16 je možno zjistit, že *network pinch* se nachází na chladné straně nově vřazeného výměníku a na jeho horké straně je minimální teplotní přiblížení převyšeno pouze o 7,6 °C.

Výpočtová realizace, z níž plynou výše uvedené výsledky, je uvedena v příloze C k této práci (pro prvotní diagnostiku HEN je v příloze C již uvažováno $\Delta T_{\min}(\text{EMAT}) = 40$ °C místo zmiňované nulové hodnoty viz tabulka 5.5).

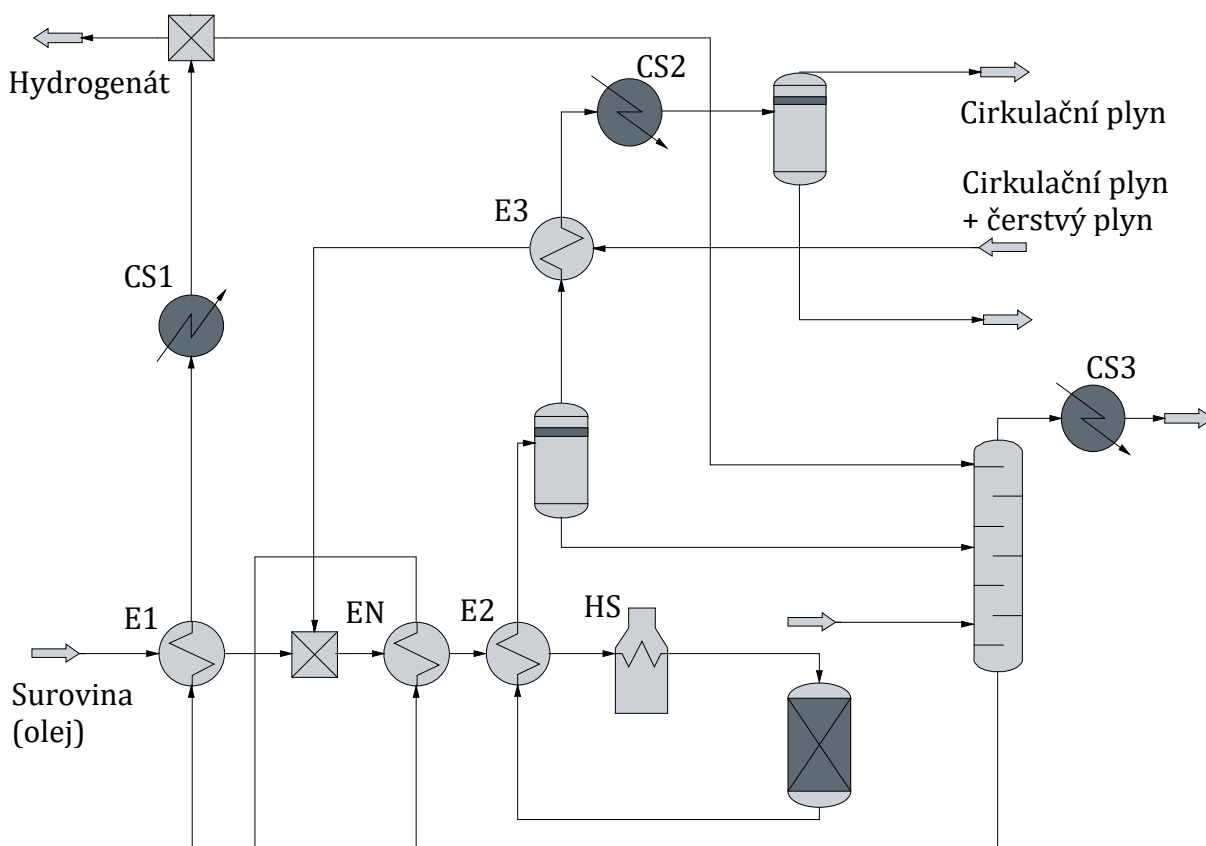
5.3 Dosažené výsledky po detailní simulaci

V tabulce 5.17 je uvedeno porovnání výsledků testovaných variant, přičemž vyřazeny jsou varianty H2-C2c a H3-C2c, u kterých nebyly splněny podmínky výpočtu.

Tabulka 5.17 Srovnání výsledků systematických výpočtů

	R_{\max} [kW]	HS [kW]	Úspora HS [%]	CS [kW]	Úspora CS [%]
H2-C2a	2215,2	1152,8	30,8	1829,7	21,9
H2-C2b	1976,1	1391,8	16,5	2068,7	11,7
H3-C2a	2039,9	1328,1	20,3	2004,9	14,5
H3-C2b	1906,4	1461,6	12,3	2138,5	8,8
H4-C2	1716,0	1652,0	0,9	2328,8	0,6

Optimální variantou (viz tabulka 5.17) je umístění nového výměníku na proudy H2 a C2 do polohy H2-C2a (viz obrázky 5.5 a 5.6). Je to také jediná varianta zapojení nového výměníku, která splňuje vytyčený cíl modifikace – dosáhnout úspory alespoň 30 % na energii dodávané ohřevnou pecí. Umístění nového výměníku v technologickém schématu procesu ukazuje obrázek 5.13.



Obrázek 5.13 Umístění nového výměníku v procesu [17]

Nový výměník dle výsledků metody *network pinch* tedy dosahuje výkonu 514,1 kW, což zvyšuje výkon maximální procesní výměny tepla na 2215,2 kW. Paralelně s touto diplomovou prací byl řešený případ hydrogenační rafinace oleje simulován v softwaru CHEMCAD [17]. Pro finální doporučené umístění nového výměníku jsou výsledky získané simulací v tomto softwaru a aplikací metody *network pinch* porovnány v tabulce 5.18.

Tabulka 5.18 Porovnání s výsledky simulace v softwaru CHEMCAD [17] uvedené v kW

	E1	E2	E3	EN	R _{max}	CS1	CS2	CS3	HS
CHAMCAD	243,0	1220,3	236,2	561,5	2261,0	467,3	1079,3	235,4	1105,1
metoda <i>network pinch</i>	239,0	1226,0	236,0	514,1	2215,2	515,8	1078,9	235,0	1152,8

Z tabulky 5.18 je patrné, že výsledky realizovaného výpočtu pomocí metody *network pinch* a výsledky získané pomocí softwaru CHAMCAD jsou blízké, nejsou však zcela shodné. Největší rozdíl je pak zaznamenán právě u nově vřazeného výměníku EN, kde se od sebe hodnoty jeho výkonu získané dvěma různými postupy liší o 47,4 kW.

Zjištěné rozdíly ve výsledcích mohou být zapříčiněny například tím, že vytvořený lineární model dle principů metody *network pinch* pracuje se zjednodušeným pojetím tepelné kapacity. Tím je míněno, že tepelná kapacita je v uvedených výpočtech považována v celém průběhu jednotlivých proudů za konstantní. Ve skutečnosti ale tato hodnota konstantou není. Kromě druhu proudícího média závisí také na jeho teplotě. Hodnota tepelné kapacity tak byla stanovena jako střední hodnota pro daný rozsah teplot proudů (tedy vstupní a koncové teploty), což může přinést přesný výsledek, pokud je vyhodnocování provedeno pro tento plný rozsah, ovšem při výpočtech prováděných „uvnitř“ proudu se výsledky mohou mírně lišit. Při simulaci v softwaru CHAMCAD je tato proměnná hodnota v závislosti na teplotě uvážena. Oba postupy – jak metoda *network pinch*, tak simulace v softwaru CHAMCAD – pak předpokládají konstantní průtok médií jednotlivými proudy.

V kapitole 3.3.2 byla zmíněna intenzifikace přenosu tepla jako další možný postup rekonstrukce při aplikaci metody *network pinch*. Vzhledem ke skutečnosti, že při rekonstrukci výměníkových sítí je vhodné aplikovat intenzifikační prvky na výměník tvořící již několikrát zmiňovanou cestu výměny tepla (*utility path*), lze v tomto případě doporučit k intenzifikaci nově umístěný výměník EN. Jelikož hodnoty součinitelů přestupu tepla proudů H2 a C2, na nichž má být výměník EN nainstalován, jsou si velmi blízké ($\alpha_H = 0,383 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $\alpha_C = 0,344 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, viz tabulka 5.6), lze pro umístění intenzifikačních prvků doporučit trubkový i mezitrubkový prostor.

Od tohoto výsledného doporučení se odvíjel postup v paralelně řešené práci [17], kde bylo na základě výpočtů a simulací v softwaru HTRI navrženo pro intenzifikaci trubkového prostoru použití zkrouceného pásku o tloušťce 1 mm a poměru délky a šířky 8 a pro intenzifikaci mezitrubkového prostoru šroubovicové přepážky se sklonem 8°. Samotný návrh výměníku pak vycházel z požadavku, aby jeho konstrukce odpovídala konstrukci již existujících výměníků v HEN (což je vhodné pro zajištění například stejného způsobu údržby). Návrh zmíněných intenzifikačních prvků proběhl za předpokladu umístění chladného proudu C2 do trubek a horkého proudu H2 do mezitrubkového prostoru, tedy naopak oproti původní úvaze znázorněné na obrázku 5.13.

Při řešení diagnostické fáze metody *network pinch* na případu hydrogenační rafinace oleje bylo tedy uvažováno celkem sedm variant modifikace HEN, jež byly určeny po prvotní aplikaci výpočtového modelu na danou výměňkovou síť. Z těchto původních výpočtů vyplynul poznatek, že při absenci tepelného výměníku, který by zajišťoval cestu výměny tepla mezi horkým a chladným servisem, je z hlediska využívané metody jediná cesta úspory energie (tím míněno jediná možnost modifikace) – a tedy instalovat nový výměník tak, aby tato cesta byla zajištěna. S popsanou úvahou byla vytvořena „superstruktura“ zmiňovaných sedmi možností. Termín „superstruktura“ je zde vyzdvižen záměrně pro naznačení možnosti automatizace dalších postupů, jež zahrnovaly aplikaci výpočtového nástroje v softwaru Maple na každou z těchto variant zvlášť s následným vyhodnocením. Tato vyhodnocení všech potenciálních úprav struktury HEN byla uváděna v průběhu kapitoly současně s vysvětlením vyskytujících se aspektů metody na konkrétních dílčích výsledcích.

6 ZÁVĚR

Cílem předložené diplomové práce bylo seznámení se současnými technikami a postupy procesního systémového inženýrství k identifikaci úspor energie, výpočtové zpracování a následná aplikace vybraného postupu procesního systémového inženýrství včetně zhodnocení obdržených výsledků a aspektů vybrané metody.

Procesní systémové inženýrství tak bylo v této diplomové práci přeneseno na konkrétní oblast řešení, a to provádění rekonstrukcí výměníkových sítí. Na toto konkretizované téma byla úvodem zpracována stručná rešerše poskytující základní informace o možnostech přístupů k rekonstrukci výměníkových sítí.

Druhá kapitola práce byla zaměřena na představení dosud nejvyužívanějších principů v problematice rekonstrukcí výměníkových sítí (ale i vytváření nových návrhů výměníkových sítí) – zásad PDM (*pinch design method*).

Hlavní část diplomové práce byla ovšem věnována metodě *network pinch* pro rekonstrukci výměníkových sítí. Pro tuto metodu byl prezentován lineární model představující její první fázi, který byl výpočtově zpracován v prostředí softwaru Maple. Principy metody *network pinch* pak byly vysvětleny aplikací tohoto výpočtového zpracování na ukázkový příklad. Metoda *network pinch* spočívá v nalezení úzkého místa výměníkové sítě (tzv. *pinching match*) a v následném nalezení optimální možnosti jeho překonání. Toho je možné dosáhnout třemi způsoby: přepojením výměníku, vřazením nového výměníku nebo rozdělením proudu. Pro třetí možnost – rozdělení proudu – byl v rámci řešení ukázkového příkladu vytvořen nový výpočtový model. Úloha byla nejprve řešena jako NLP problém a posléze přeformulována na problém LP. Z těchto dvou způsobů řešení je pak možno doporučit pro další aplikace vytvořený LP model, jelikož jeho výstupem je objem informací, který může lépe posloužit k projektování rekonstrukce než u druhé varianty řešení – modelu NLP.

Metoda *network pinch* byla dále uplatněna při řešení skutečného průmyslového případu, a to na rekonstrukci výměníkové sítě v procesu hydrogenační rafinace oleje. Po aplikaci metody bylo navrženo vřadit nový výměník, dalšími použitými diagnostickými výpočty pak bylo upřesněno místo jeho vřazení. Touto úpravou tak bylo dosaženo úspory 30,8 % energie potřebné k dodání ohřevnou pecí v procesu. Nový výměník byl v souladu s principy metody dále navržen jako vhodný kandidát pro intenzifikaci přenosu tepla.

V rámci řešení průmyslového i ukázkového případu byly průběžně diskutovány objevující se aspekty využívané metody. Výsledky řešení rekonstrukce výměníkové sítě v procesu hydrogenační rafinace oleje byly na závěr porovnány s hodnotami získanými simulací v softwaru CHAMCAD.

Výpočtový model řešený v této diplomové práci se váže na první stupeň popisované metody, tj. fázi diagnostiky. Zpracování tématu tak otevírá možnost pro další rozvinutí tohoto řešení. Práce může sloužit jako podklad pro kompletní zpracování řešení metodou *network pinch*, pro kombinaci s dalšími metodami rekonstrukce výměníkových sítí, či alespoň k pochopení dané problematiky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EL-HALWAGI, Mahmoud M. *Process integration*. Boston: Elsevier Academic Press, 2006. ISBN 978-012-3705-327.
- [2] STEHLÍK, Petr. *Integrace procesů a její význam pro redukci spotřeby energie a škodlivých emisí: základní principy*. Praha: Procesní inženýrství, 1995. MAPRINT. ISBN 80-860-5900-6.
- [3] RAŠKOVIĆ, Predrag a Sreten STOILJKOVIĆ. Pinch design method in the case of a limited number of process streams. *Energy* [online]. 2009, **34**(5), 593-612. DOI: 10.1016/j.energy.2008.04.004. ISSN 03605442.
- [4] ZHU, X. X. a N. D. K. ASANTE. Diagnosis and optimization approach for heat exchanger network retrofit. *AIChE Journal*. 1999, **45**(7), 1488-1503. DOI: 10.1002/aic.690450712. ISSN 00011541.
- [5] SREEPATHI, Bhargava Krishna a G. P. RANGAIAH. Review of Heat Exchanger Network Retrofitting Methodologies and Their Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014, **53**(28), 11205-11220. DOI: 10.1021/ie403075c. ISSN 08885885.
- [6] JEGLA, Zdeněk. *Studijní opory k předmětu Systémové přístupy pro procesy a energetiku*. Ústav procesního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Brno, 2017.
- [7] BONHIVERS, Jean-Christophe, Balasubrahmanyam SRINIVASAN a Paul R. STUART. New analysis method to reduce the industrial energy requirements by heat-exchanger network retrofit: Part 1 – Concepts. *Applied Thermal Engineering*. 2017, **119**, 659-669. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.078. ISSN 13594311.
- [8] WANG, Yufei. *Heat exchanger network retrofit through heat transfer enhancement* [online]. Manchester, 2012 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:166974&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>. University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sciences.
- [9] LINNHOFF, B. a E. HINDMARSH. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*. 1983, **38**(5), 745-763. DOI: 10.1016/0009-2509(83)80185-7. ISSN 00092509.
- [10] KNOPE, F. Carl. *Modeling, analysis, and optimization of process and energy systems*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2012, s. 314-342. ISBN 978-0-470-62421-0.
- [11] ASANTE, N. D. K. a X. X. ZHU. An Automated and Interactive Approach for Heat Exchanger Network Retrofit. *Chemical Engineering Research and Design*. 1997, **75**(3), 349-360. DOI: 10.1205/026387697523660. ISSN 02638762.

- [12] KEMP, Ian. *Pinch analysis and process integration a user guide on process integration for the efficient use of energy*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-008-0468-266.
- [13] SMITH, Robin, Mary O. AKPOMIEMIE a Abdul-Malik AJENIFUJA. Heat Exchanger Network Retrofit – A Review. *CEAS, The University of Manchester* [online]. Manchester: Centre for Process Integration, 2015 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.ceas.manchester.ac.uk/media/eps/schoolofchemicalengineeringandanalyticalscience/content/researchall/centres/processintegration/pirc2015/presentations/Heat-Exchanger-Network-Retrofit---Research-Review---Robin-Smith.pdf>
- [14] AKPOMIEMIE, Mary O. a Robin SMITH. Retrofit of heat exchanger networks with heat transfer enhancement based on an area ratio approach. *Applied Energy*. 2016, **165**, 22-35. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.056. ISSN 03062619.
- [15] X. X. ZHU, M. ZANFIR, J. KLEMES. Heat Transfer Enhancement for Heat Exchanger Network Retrofit. *Heat Transfer Engineering*. 2010, **21**(2), 7-18. DOI: 10.1080/014576300270988. ISSN 0145-7632.
- [16] *Hydrogenační rafinace minerálních olejů* [online]. Praha: VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE, Fakulta technologie ochrany prostředí, Ústav technologie ropy a alternativních paliv, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://utrapp.vscht.cz/files/uzel/0014788/MzI01TPSM9T1qEwpyk9PzUs80pt3eK1CUWJaZl5icqpCbmZeathhhTlAweQMhfyc1Kyj6wE.pdf>
- [17] NĚMEČEK, Z. *Studie potenciálu intenzifikace přenosu tepla ve výrobním procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 109 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A	m^2	plocha výměny tepla
Bil_{Tm}	–	pomocný parametr při dělení proudu
C, CS1–CS3	kW	výkon chladného servisu, chladný servis
c_1	–	konstanta účelové funkce LP modelu
c_2	–	konstanta účelové funkce LP modelu
CP	$kW/^\circ C$	tepelná kapacita
DT^1 , DTC	$^\circ C$	rozdíl teplot na chladné straně výměníku
DT^2 , DTH	$^\circ C$	rozdíl teplot na horké straně výměníku
E, E1–E3, EN	kW	výkon tepelného výměníku, tepelný výměník
H, HS	kW	výkon horkého servisu, horký servis
k	–	dělicí poměr
k	$kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$	součinitel prostupu tepla
N	–	počet uzlů
OF	–	účelová funkce
p^1 , pC	$^\circ C$	parametr účelové funkce pro chladnou stranu výměníku
p^2 , pH	$^\circ C$	parametr účelové funkce pro horkou stranu výměníku
Q	kW	tepelný výkon
R_{max}	kW	maximální výkon procesní výměn tepla
T	$^\circ C$	teplota
TS	$^\circ C$	vstupní teplota
TT	$^\circ C$	výstupní teplota
α	$kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$	součinitel přestupu tepla
ΔH	kW	entalpie
ΔTC	$^\circ C$	teplotní přiblížení na chladné straně výměníku
ΔTH	$^\circ C$	teplotní přiblížení na horké straně výměníku
ΔT_{ln}	$^\circ C$	logaritmický teplotní rozdíl
ΔT_{min}	$^\circ C$	minimální teplotní přiblížení
$\Delta T_{min}(EMAT)$	$^\circ C$	minimální teplotní přiblížení vztahované na výměník tepla
$\Delta T_{min}(HRAT)$	$^\circ C$	minimální teplotní přiblížení vztahované na HEN

Dolní indexy

H, i	horký proud
C, j	chladný proud
in	vstup proudu do jednotky
out	výstup proudu z jednotky
exist	původní stav
recovery	procesní výměna tepla
k	uzel na vstupu horkého proudu do jednotky
k+1	uzel na výstupu horkého proudu z jednotky

j1, j2	rozdělené větve chladného proudu
l	uzel na vstupu chladného proudu z jednotky
l+1	uzel na výstupu chladného proudu do jednotky
u	horký nebo chladný servis
split	uzel při rozdělení proudu
mix	uzel při spojení rozděleného proudu

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ACC	zdokonalené kompozitní křivky (Advanced Composite Curves)
CAT	konstantní teplotní přiblížení (Constant Approach Temperature)
CC	kompozitní křivka (Composite Curve)
EMAT	minimální teplotní přiblížení pro jednotlivé výměníky (Exchanger Minimum Heat Approach)
GCC	souhrnná kompozitní křivka (Grand Composite Curve)
GDT	tabulka mřížkového diagramu (Grid Diagram Table)
HEN	síť tepelných výměníků (Heat Exchanger Network)
HRAT	teplotní přiblížení – nejmenší vertikální vzdálenost mezi chladnou a horkou kompozitní křivkou (Heat Recovery Approach Temperature)
ILP	celočíslné lineární programování (Integer Linear Programming)
LP	lineární programování (Linear Programming)
MILP	smíšené celočíslné lineární programování (Mixed Integer Linear Programming)
MINLP	smíšené celočíslné nelineární programování (Mixed Integer Non-Linear Programming)
NLP	nelineární programování (Non-Linear Programming)
PDM	metoda pinch řešení rekonstrukce HEN (Pinch Design Method)
PI	integrace procesů (Process Integration)
PP	průmyslový případ
RTD	termodynamický diagram rekonstrukce (Retrofit Thermodynamic Diagram)
UP	ukázkový příklad
GA	genetické algoritmy (Genetic Algorithm)
SA	simulované ochlazování (Simulated Annealing)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1	Diagram T–H pro jeden výměník	13
Obrázek 2.2	Diagram T–H pro jeden výměník a chladič	14
Obrázek 2.3	Diagram T–H pro jeden výměník a ohříváč.....	14
Obrázek 2.4	Sestavní kompozitní křivky pro horké procesní proudy [2]	15
Obrázek 2.5	Příklad kompozitních křivek a poloha bodu pinch	15
Obrázek 2.6	Rozvaha investičních a provozních nákladů pro volbu ΔT_{\min} [2]	17
Obrázek 2.7	Diagram závislosti plochy výměny tepla na dodané energii [2]	17
Obrázek 3.1	Mřížkový diagram – příklad HEN [11].....	18
Obrázek 3.2	Process pinch a network pinch na příkladu [11]	19
Obrázek 3.3	Definice zapojení výměníku ijkl [4].....	19
Obrázek 3.4	Přepojení výměníku (resequencing) [11], [13]	21
Obrázek 3.5	Přidání nového výměníku (new match) [11], [13].....	22
Obrázek 3.6	Schéma rozdělení proudu	22
Obrázek 3.7	Rozdělení proudu (stream split) [11], [13].....	23
Obrázek 3.8	Schéma postupu metody network pinch [11].....	24
Obrázek 3.9	Křivka rekonstrukce HEN [11].....	25
Obrázek 4.1	Mřížkový diagram – stávající výměníková síť [11]	27
Obrázek 4.2	Kompozitní křivky pro danou HEN při $\Delta T_{\min} = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ [11]	27
Obrázek 4.3	Kompozitní křivky při $\Delta T_{\min}(\text{HRAT}) = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ [11]	28
Obrázek 4.4	Mřížkový diagram při $\Delta T_{\min}(\text{EMAT}) = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ [11]	28
Obrázek 4.5	Mřížkový diagram – výměníková síť určena k diagnostice	29
Obrázek 4.6	Mřížkový diagram – diagnostika výměníkové sítě.....	30
Obrázek 4.7	Mřížkový diagram – 1. modifikace sítě přepojením dvou výměníků	30
Obrázek 4.8	Mřížkový diagram – 1. modifikace sítě přidáním nového výměníku	31
Obrázek 4.9	Mřížkový diagram – 1. modifikace sítě rozdělením proudu C1	32
Obrázek 4.10	Mřížkový diagram – stav sítě po první modifikaci	34
Obrázek 4.11	Mřížkový diagram – 2. modifikace sítě přepojením dvou výměníků	35
Obrázek 4.12	Mřížkový diagram – 2. modifikace sítě přidáním nového výměníku	36
Obrázek 4.13	Mřížkový diagram – 2. modifikace sítě rozdělením proudu C1	37
Obrázek 5.1	Technologické schéma procesu [2],[17]	39
Obrázek 5.2	Mřížkový diagram – případ určený k diagnostice	41
Obrázek 5.3	Graf závislosti plochy výměny tepla tepelném výkonu výměníku.....	45
Obrázek 5.4	Graf závislosti A na Q proložený přímkou	45
Obrázek 5.5	Varianty umístění nového výměníku	46
Obrázek 5.6	Nový výměník na proudech H2 a C2 – varianta a	47
Obrázek 5.7	Nový výměník na proudech H2 a C2 – varianta b.....	49
Obrázek 5.8	Nový výměník na proudech H2 a C2 – varianta c	50
Obrázek 5.9	Nový výměník na proudech H3 a C2 – varianta a	51
Obrázek 5.10	Nový výměník na proudech H3 a C2 – varianta b	52
Obrázek 5.11	Nový výměník na proudech H3 a C2 – varianta c.....	52
Obrázek 5.12	Nový výměník na proudech H4 a C2	53

Obrázek 5.13	Umístění nového výměníku v procesu [17]	54
--------------	---	----

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1	Vývoj přístupu k rekonstrukci HEN v rozsahu uplynulých 30 let* [5]	10
Tabulka 4.1	Výsledky diagnostiky udané v MW.....	29
Tabulka 4.2	Pomocné parametry ve °C (diagnostika, UP)	29
Tabulka 4.3	Výsledky při přepojení výměníků udané v MW	31
Tabulka 4.4	Pomocné parametry ve °C (1. mod., přepojení, UP).....	31
Tabulka 4.5	Výsledky při vřazení nového výměníku v MW	31
Tabulka 4.6	Pomocné parametry ve °C (1. mod., nový výměník, UP).....	31
Tabulka 4.7	Výsledky při rozdělení proudu C1 udané v MW.....	32
Tabulka 4.8	Pomocné parametry ve °C (1. mod., rozdělení C1, UP).....	32
Tabulka 4.9	Výsledky LP modelu pro rozdělení proudu C1	33
Tabulka 4.10	Upřesněný výsledek LP modelu pro rozdělení proudu C1	34
Tabulka 4.11	Výsledky při přepojení výměníků udané v MW	35
Tabulka 4.12	Pomocné parametry ve °C (2. mod., přepojení, UP)	35
Tabulka 4.13	Výsledky při vřazení nového výměníku udané v MW.....	36
Tabulka 4.14	Pomocné parametry ve °C (2. mod., nový výměník, UP)	36
Tabulka 4.15	Upřesněný výsledek LP modelu pro rozdělení proudu C1 při 2. modifikaci	36
Tabulka 4.16	Shrnutí výsledků UP pro $\Delta T_{min}(EMAT) = 0$ °C, tepelné výkony v MW	37
Tabulka 4.17	Shrnutí výsledků UP pro $\Delta T_{min}(EMAT) = 6$ °C, tepelné výkony v MW	38
Tabulka 5.1	Značení jednotek HEN.....	40
Tabulka 5.2	Tepelné kapacity proudů uvedené v kW/°C.....	40
Tabulka 5.3	Teploty proudů uvedené ve °C.....	41
Tabulka 5.4	Výsledky diagnostiky PP	42
Tabulka 5.5	Pomocné parametry ve °C (diagnostika, PP) $\Delta T_{min}(EMAT) = 0$ °C	42
Tabulka 5.6	Hodnoty pro určení závislosti plochy výměny tepla na přeneseném teple..	44
Tabulka 5.7	Výsledky H2-C2, var. a.....	47
Tabulka 5.8	Pomocné parametry ve °C (H2-C2, var. a, PP).....	47
Tabulka 5.9	Výsledky H2-C2, var. b.....	49
Tabulka 5.10	Pomocné parametry ve °C (H2-C2, var. b, PP)	49
Tabulka 5.11	Výsledky H3-C2, var. a.....	50
Tabulka 5.12	Pomocné parametry ve °C (H3-C2, var. a, PP)	50
Tabulka 5.13	Výsledky H3-C2, var. b	51
Tabulka 5.14	Pomocné parametry ve °C (H3-C2, var. b, PP)	51
Tabulka 5.15	Výsledky H4-C2.....	53
Tabulka 5.16	Pomocné parametry ve °C (H4-C2, PP)	53
Tabulka 5.17	Srovnání výsledků systematických výpočtů.....	54
Tabulka 5.18	Porovnání s výsledky simulace v softwaru CHEMCAD [17] uvedené v kW	55

SLOVNÍK POJMŮ

<i>area matrix method</i>	maticová metoda plochy
<i>assignment-transportation model</i>	metoda programování založená na „překládkovém“ modelu
<i>bridge method</i>	metoda mostu
<i>cold utility</i>	chladný servis
<i>cost matrix method</i>	maticová metoda nákladů
<i>cross pinch analysis</i>	analýza přenosu tepla přes <i>pinch</i>
<i>driving force plot</i>	diagram hnací síly výměny tepla
<i>energy transfer diagram</i>	diagram přenosu energie
<i>exchanger shifting</i>	posunutí výměníku
<i>heat exchanger</i>	tepelný výměník
<i>hot utility</i>	horký servis
<i>network pinch</i>	místo minimálního teplotního přiblížení EMAT
<i>network table</i>	tabulka sítě
<i>new match</i>	nový výměník
<i>path analysis</i>	analýza cesty
<i>process pinch, pinch</i>	místo minimálního teplotního přiblížení HRAT
<i>pinching matches</i>	zapojení výměníků, u nichž korespondující teplotní rozdíly dosahují minimální hodnoty EMAT
<i>receptors</i>	přijímající části
<i>remaining problem analysis</i>	analýza zbytkového problému
<i>resequencing</i>	přepojení výměníků
<i>retrofit</i>	rekonstrukce
<i>stream split</i>	rozdělení proudu
<i>subnetworks</i>	subsítě
<i>suppliers</i>	poskytující části
<i>targeting</i>	hledání cílů rekonstrukce
<i>transportation model</i>	„překládkový“ model
<i>utility path</i>	cesta výměny tepla (mezi horkým a chladným servisem)
<i>supply temperature</i>	teplota na vstupu
<i>target temperature</i>	teplota na výstupu

SEZNAM PŘÍLOH**Příloha A**

Dokumentace výpočtu v softwaru Maple pro řešení ukázkového příkladu při nulovém minimálním teplotním přiblížení

Příloha B

Dokumentace výpočtu v softwaru Maple pro řešení ukázkového příkladu při $\Delta T_{\min} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$

Příloha C

Dokumentace výpočtu v softwaru Maple pro řešení průmyslového případu

PŘÍLOHA A

UKÁZKOVÝ PŘÍKLAD APLIKACE METODY NETWORK PINCH

Postup 1. fáze rekonstrukce ($\Delta T_{\min} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Diagnostika existující výměňkové sítě

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek

```
> read './Initial.mpl' : # zadané hodnoty
```

```
read './Constraints1.mpl' :
```

omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace

Účelová funkce (objective function)

```
> OF := 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1 + pC_E2  
+ pC_E3) : ``
```

(1)

Řešení

```
> with(simplex);
```

```
[basis, convexhull, cterm, define_zero, display, dual, feasible, maximize, minimize,  
pivot, pivoteqn, pivotvar, ratio, setup, standardize]
```

(2)

```
> R0 := minimize(OFF, CO);
```

```
assign(R0) :
```

```
R0 := {C = 10.00025000, DTC_E1 = 0., DTC_E2 = 1., DTC_E3 = 1., DTH_E1 = 1.,  
DTH_E2 = 1., DTH_E3 = 1., E1 = 59.99975000, E2 = 20.00000000, E3  
= 140.00100000, H = 139.99925000, pC_E1 = 1., pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pH_E1  
= 0., pH_E2 = 0., pH_E3 = 0.}
```

(3)

Výsledky:

```
> C := C;
```

```
H := H;
```

```
Rmax0 := E1 + E2 + E3;
```

```
C := 10.00025000
```

```
H := 139.9992500
```

```
Rmax0 := 220.0007500
```

(4)

1. modifikace výměňkové sítě - nový výměňník

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
> read './Initial.mpl' : # zadané hodnoty
```

```
read './Constraints1.mpl' :
```

omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace

Účelová funkce (objective function)

```
> OF1 := 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3 + pH_EN) + 1 * (pC_E1  
+ pC_E2 + pC_E3 + pC_EN) :
```

Řešení

```
> with(simplex) :  
R1 := minimize(OF1, CO1);  
assign(R1) :  
R1 := {C = 5.000250000, DTC_E1 = 0., DTC_E2 = 1.000000000, DTC_E3  
= 1.000000000, DTC_EN = 8.749812500, DTH_E1 = 1.000000000, DTH_E2  
= 1.000000000, DTH_E3 = 1.000000000, DTH_EN = 1.000000000, E1  
= 64.99975000, E2 = 0., E3 = 140.0010000, EN = 20.00000000, H  
= 134.9992500, pC_E1 = 1., pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pC_EN = 0., pH_E1 = 0.,  
pH_E2 = 0., pH_E3 = 0., pH_EN = 0.}
```

(5)

Výsledky:

```
> C := C;  
H := H;  
Rmax1 := E1 + E2 + E3 + EN;  
C := 5.000250000  
H := 134.9992500  
Rmax1 := 225.0007500
```

(6)

1. modifikace výměňkové sítě - přepojení výměňku

```
> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty  
read `./Constraints1.mpl` :  
# omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace
```

Účelová funkce (objective function)

```
> OF2 := 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1 + pC_E2  
+ pC_E3) :
```

Řešení

```
> with(simplex) :  
R2 := minimize(OF2, CO2);  
assign(R2);  
R2 := {C = 5.000250000, DTC_E1 = 0., DTC_E2 = 1., DTC_E3 = 1., DTH_E1 = 1.,  
DTH_E2 = 1., DTH_E3 = 1., E1 = 64.99975000, E2 = 20.00000000, E3  
= 140.0010000, H = 134.9992500, pC_E1 = 1., pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pH_E1  
= 0., pH_E2 = 0., pH_E3 = 0.}
```

(7)

Výsledky:

```
> C := C;  
H := H;  
Rmax2 := E1 + E2 + E3;  
C := 5.000250000  
H := 134.9992500  
Rmax2 := 225.0007500
```

(8)

1. modifikace výměňkové sítě - rozdělení proudu

NLP metoda - A

```
[> restart;
Účelová funkce (objective function)
> OF3 := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1
+ pC_E2 + pC_E3) :
Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:
> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty
read `./Constraints1.mpl` :
# omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace
> with(Optimization);
[ImportMPS, Interactive, LPSolve, LSSolve, Maximize, Minimize, NLPsolve, QPSolve] (9)
> R3NLP_A := NLPsolve(OF3, CO3NLP);
assign(R3NLP_A[2]) :
R3NLP_A := [1.400005000000000029 105, [C = 5.000250000000000, CP_C1_1
= 1.01562506103181, DTC_E1 = 0., DTC_E2 = 1., DTC_E3 = 1., DTH_E1
= 1.000000000000000, DTH_E2 = 1., DTH_E3 = 1., E1 = 64.9997500000000, E2
= 20., E3 = 140.0010000000000, H = 134.9992500000000, pC_E1 = 1., pC_E2 =
-3.51080195891950 10-35, pC_E3 = 0., pH_E1 = -1.35525271560688 10-20,
pH_E2 = 0., pH_E3 = 0.]] (10)
Výsledky:
> C := C; H := H; Rmax3NLP_A := E1 + E2 + E3;
C := 5.000250000000000
H := 134.9992500000000
Rmax3NLP_A := 225.0007500000000 (11)
Dopočty a kontola:
> CP_C1_1 := CP_C1_1; # Tepelná kapacita první větve proudu C1
CP_C1_2 := (CP_C1 - CP_C1_1); # Tepelná kapacita druhé větve proudu C1
CP_C1 - CP_C1_1 - CP_C1_2; #` Kontrola
CP_C1_1 := 1.01562506103181
CP_C1_2 := 2.98437493896819
0. (12)
> Tmix := (TH_C1 - H/CP_C1); # Teplota při smíšení proudů
Tsplít := (TC_C1 + E3/CP_C1); # Teplota při rozdělení proudů
ToutE1 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1);
# Teplota první větve proudu před smíšením (teplota na výstupu z E1)
ToutE2 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/CP_C1_2);
# Teplota druhé větve proudu před smíšením (teplota na výstupu z E2)
Tmix := 156.250187500000
Tsplít := 135.000250000000
ToutE1 := 199.000000000226
ToutE2 := 141.701820817678 (13)
```

```

> (TH_C1 - H/CP_C1) - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1)·CP_C1_1/CP_C1
  - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/(CP_C1 - CP_C1_1))·CP_C1_2/CP_C1;
  (TH_C1 - H/CP_C1) - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1)·CP_C1_1/CP_C1
  - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/(CP_C1 - CP_C1_1))·(CP_C1 - CP_C1_1)
  /CP_C1;
# Bilanční rovnováha

  ToutE1·CP_C1_1 + ToutE2·CP_C1_2;
  CP_C1·(TH_C1 - H/CP_C1);
  (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1)·CP_C1_1 + (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2
  /CP_C1_2)·CP_C1_2;
# Entalpická rovnováha

                                0.
                                0.
                                625.000750000000
                                625.000750000000
                                625.000750000000

```

(14)

NLP metoda - B - Výpočet s upřesněním rozsahu tepelné kapacity

```

[> restart;
Účelová funkce (objective function)
> OF3 := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1
  + pC_E2 + pC_E3) :
Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:
> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty
  read `./Constraints1.mpl` :
  # omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace
> with(Optimization) :
> R3NLP_B := NLPsolve(OF3, CO3NLP, CP_C1_1 = 0 .. 4.0);
  assign(R3NLP_B[2]) :
R3NLP_B := [1.400005000000000029 105, [C = 5.000250000000000, CP_C1_1 = 2.,
  DTC_E1 = 0., DTC_E2 = 1., DTC_E3 = 1., DTH_E1 = 1., DTH_E2 = 1., DTH_E3
  = 1., E1 = 64.99975000000000, E2 = 20., E3 = 140.0010000000000, H
  = 134.9992500000000, pC_E1 = 1., pC_E2 = 1.11022302462516 10-16, pC_E3
  = 1.11022302462516 10-16, pH_E1 = 1.11022302462516 10-16, pH_E2
  = 1.11022302462516 10-16, pH_E3 = 1.11022302462516 10-16]]

```

(15)

Výsledky:

```

> C := C; H := H; Rmax3NLP_B := E1 + E2 + E3;
  C := 5.000250000000000
  H := 134.9992500000000
  Rmax3NLP_B := 225.0007500000000

```

(16)

Dopočty a kontrola:

```

> CP_C1_1 := CP_C1_1; # Tepelná kapacita první větve proudu C1
  CP_C1_2 := (CP_C1 - CP_C1_1); # Tepelná kapacita druhé větve proudu C1
  CP_C1 - CP_C1_1 - CP_C1_2; # Kontrola

```

```

CP_CI_1 := 2.
CP_CI_2 := 2.
0.

```

(17)

```

> Tmix := (TH_CI - H/CP_CI); # Teplota při smíšení proudů
Tsplif := (TC_CI + E3/CP_CI); # Teplota při rozdělení proudů
ToutE1 := (TC_CI + E3/CP_CI + E1/CP_CI_1);
# Teplota první větve proudu před smíšením (teplota na výstupu z E1)
ToutE2 := (TC_CI + E3/CP_CI + E2/CP_CI_2);
# Teplota druhé větve proudu před smíšením (teplota na výstupu z E2)

```

```
Tmix := 156.250187500000
```

```
Tsplif := 135.000250000000
```

```
ToutE1 := 167.500125000000
```

```
ToutE2 := 145.000250000000
```

(18)

```

> (TH_CI - H/CP_CI) - (TC_CI + E3/CP_CI + E1/CP_CI_1) · CP_CI_1 / CP_CI
- (TC_CI + E3/CP_CI + E2 / (CP_CI - CP_CI_1)) · CP_CI_2 / CP_CI;
(TH_CI - H/CP_CI) - (TC_CI + E3/CP_CI + E1/CP_CI_1) · CP_CI_1 / CP_CI
- (TC_CI + E3/CP_CI + E2 / (CP_CI - CP_CI_1)) · (CP_CI - CP_CI_1)
/ CP_CI;

```

Bilanční rovnováha

```
ToutE1 · CP_CI_1 + ToutE2 · CP_CI_2;
```

```
CP_CI · (TH_CI - H/CP_CI);
```

```
(TC_CI + E3/CP_CI + E1/CP_CI_1) · CP_CI_1 + (TC_CI + E3/CP_CI + E2
/ CP_CI_2) · CP_CI_2;
```

Entalpická rovnováha

```
-1.42108547152020 10-14
```

```
-1.42108547152020 10-14
```

```
625.000750000000
```

```
625.000750000000
```

```
625.000750000000
```

(19)

LP metoda

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty
```

```
read `./Constraints1.mpl` :
```

omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace

Řešení a tisk výsledků

```
> with(simplex) :
```

```
printf("\nVýsledek LP modelu dělení proudu: \n");
```

```
printf("-----\n");
```

```
printf(" K Rmax3LP H C Tsplif Tmix ToutE1 ToutE2 BilTm \n");
```

```
printf("[zl.] [MW] [MW] [MW] [°C] [°C] [°C] [°C] [0=OK] \n");
```

```
printf("-----\n");
```

```
for K from 0.1 by 0.025 to 0.9 do
```

```

C := 'C': H := 'H': E1 := 'E1': E2 := 'E2': E3 := 'E3': DTC_E1 := 'DTC_E1': DTC_E2
:= 'DTC_E2': DTC_E3 := 'DTC_E3': DTH_E1 := 'DTH_E1': DTH_E2 :=
'DTH_E2': DTH_E3 := 'DTH_E3': pC_E1 := 'pC_E1': pC_E2 := 'pC_E2': pC_E3
:= 'pC_E3': pH_E1 := 'pH_E1': pH_E2 := 'pH_E2': pH_E3 := 'pH_E3':
# Nulování proměnných

```

```

OF3LP := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1
+ pC_E2 + pC_E3) :# Účelová funkce

```

```

R3LP := minimize(OF3LP, CO3LP); # Řešení

```

```

if (R3LP = { }) then

```

```

Rmax3LP := 0.0 : H := 0.0 : C := 0.0 : Tmix := 0.0 : Tsplite := 0.0 : ToutE1
:= 0.0 : ToutE2 := 0.0 : BilTm := 999.0;

```

```

else

```

```

assign(R3LP) :

```

```

Rmax3LP := E1 + E2 + E3;

```

```

H := H;

```

```

C := C;

```

```

Tmix := (TH_C1 - H/CP_C1);

```

```

Tsplite := (TC_C1 + E3/CP_C1);

```

```

BilTm := (TH_C1 - H/CP_C1) - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/(K*CP_C1)) * (K
* CP_C1) / CP_C1 - (100 + E3/CP_C1 + E2/((1-K)*CP_C1)) * ((1-K)
* CP_C1) / CP_C1;

```

```

ToutE1 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/(K*CP_C1));

```

```

ToutE2 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/((1-K)*CP_C1));

```

```

end if:

```

```

printf("%5.3f%6.1f%6.1f%6.1f%6.1f%7.1f%6.1f%7.1f%5.0f\n", K, Rmax3LP,
H, C, Tsplite, Tmix, ToutE1, ToutE2, BilTm);

```

```

end do:

```

```

printf("-----\n")

```

Výsledky LP modelu dělení proudu:

K	Rmax3LP	H	C	Tsplite	Tmix	ToutE1	ToutE2	BilTm
[z1.]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0.100	186.0	174.0	44.0	135.0	146.5	200.0	140.6	0
0.125	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.150	199.0	161.0	31.0	135.0	149.8	200.0	140.9	0
0.175	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	141.1	-0
0.200	212.0	148.0	18.0	135.0	153.0	200.0	141.3	0
0.225	218.5	141.5	11.5	135.0	154.6	200.0	141.5	0
0.250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.275	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	194.1	141.9	0
0.300	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	189.2	142.1	0
0.325	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.350	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.375	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	178.3	143.0	0
0.400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.425	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.450	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	171.1	144.1	0

0.475	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	169.2	144.5	0
0.500	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	167.5	145.0	0
0.525	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	166.0	145.5	0
0.550	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	164.5	146.1	0
0.575	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	146.8	0
0.600	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	147.5	0
0.625	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	161.0	148.3	-0
0.650	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	149.3	0
0.675	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	150.4	0
0.700	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	158.2	151.7	0
0.725	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	157.4	153.2	-0
0.750	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	155.0	0
0.775	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	156.0	157.2	-0
0.800	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	155.3	160.0	0
0.825	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.850	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	154.1	168.3	0
0.875	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	175.0	-0
0.900	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	153.1	185.0	0

Upřesnění rozsahu K:

> *with(simplex)* :

```
printf("\nVýsledky pro škálu 0.75<K<0.78 s krokem 0.001\n");
printf("-----\n");
printf(" K Rmax3LP H C Tsplite Tmix ToutE1 ToutE2 BilTm \n");
printf("[zl.] [MW] [MW] [MW] [°C] [°C] [°C] [°C] [0=OK] \n");
printf("-----\n");
```

for K from 0.75 by 0.001 to 0.78 do

```
C := 'C': H := 'H': E1 := 'E1': E2 := 'E2': E3 := 'E3': DTC_E1 := 'DTC_E1': DTC_E2 := 'DTC_E2': DTC_E3 := 'DTC_E3': DTH_E1 := 'DTH_E1': DTH_E2 := 'DTH_E2': DTH_E3 := 'DTH_E3': pC_E1 := 'pC_E1': pC_E2 := 'pC_E2': pC_E3 := 'pC_E3': pH_E1 := 'pH_E1': pH_E2 := 'pH_E2': pH_E3 := 'pH_E3':
```

Nulování proměnných

```
OF3LP := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1 + pC_E2 + pC_E3) : # Účelová funkce
```

```
R3LP := minimize(OF3LP, CO3LP); # Řešení
```

if (R3LP = { }) then

```
Rmax3LP := 0.0 : H := 0.0 : C := 0.0 : Tmix := 0.0 : Tsplite := 0.0 : ToutE1 := 0.0 : ToutE2 := 0.0 : BilTm := 999.0;
```

else

```
assign(R3LP) :
```

```
Rmax3LP := E1 + E2 + E3;
```

```
H := H;
```

```
C := C;
```

```
Tmix := (TH_C1 - H/CP_C1);
```

```
Tsplite := (TC_C1 + E3/CP_C1);
```

```
BilTm := (TH_C1 - H/CP_C1) - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/(K*CP_C1)) * (K * CP_C1) / CP_C1 - (100 + E3/CP_C1 + E2/((1-K)*CP_C1)) * ((1-K) * CP_C1) / CP_C1;
```

```
ToutE1 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/(K*CP_C1));
```

```
ToutE2 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/((1-K)*CP_C1));
```

end if:

```
printf("%5.3f%6.1f%6.1f%6.1f%6.1f%7.1f%6.1f%7.1f%5.0f\n", K, Rmax3LP,
H, C, Tsplrit, Tmix, ToutE1, ToutE2, BilTm);
```

end do:

```
printf("-----\n");
```

Výsledky pro škálu $0.75 < K < 0.78$ s krokem 0.001

K	Rmax3LP	H	C	Tsplrit	Tmix	ToutE1	ToutE2	BilTm
[z1.]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0.750	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	155.0	0
0.751	180.0	180.0	50.0	135.0	145.0	141.7	155.1	0
0.752	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	156.6	155.2	0
0.753	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	155.2	0
0.754	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.755	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.756	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	155.5	0
0.757	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.758	180.0	180.0	50.0	135.0	145.0	141.6	155.7	0
0.759	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.760	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.761	180.0	180.0	50.0	135.0	145.0	141.6	155.9	0
0.762	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	156.3	156.0	0
0.763	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.764	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	156.2	0
0.765	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.766	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.767	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.768	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	156.6	0
0.769	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.770	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.771	180.0	180.0	50.0	135.0	145.0	141.5	156.8	0
0.772	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	156.9	0
0.773	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	156.0	157.0	-0
0.774	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.775	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	156.0	157.2	-0
0.776	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.777	225.0	135.0	5.0	135.0	156.3	155.9	157.4	-0
0.778	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	157.5	0
0.779	180.0	180.0	50.0	135.0	145.0	141.4	157.6	0
0.780	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999

Nejlepšího výsledku je dosaženo při $K=0,762$.

2. modifikace výměňkové sítě - nový výměňník

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
[> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty
```

```
read `./Constraints2.mpl` : # omezující podmínky pro výpočty druhé modifikace
```

Účelová funkce (objective function)

```
> OF4 := 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3 + pH_EN) + 1 * (pC_E1 + pC_E2 + pC_E3 + pC_EN) :
```

Řešení

```
> with(simplex) :  
R4 := minimize(OF4, CO4);  
assign(R4) :  
R4 := {C = 10.00025000, DTC_E1 = 0., DTC_E2 = 1., DTC_E3 = 1., DTC_EN = 1.,  
DTH_E1 = 1., DTH_E2 = 1., DTH_E3 = 1., DTH_EN = 1., E1 = 59.99975000, E2 = 20.00000000, E3 = 140.0010000, EN = 20.00000000, H = 119.9992500, pC_E1 = 1., pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pC_EN = 0., pH_E1 = 0., pH_E2 = 0., pH_E3 = 0., pH_EN = 0.} (20)
```

Výsledky

```
> C := C;  
H := H;  
Rmax4 := E1 + E2 + E3 + EN;  
C := 10.00025000  
H := 119.9992500  
Rmax4 := 240.0007500 (21)
```

2. modifikace výměňkové sítě - přepojení výměňku

```
> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty  
> read `./Constraints2.mpl` : # omezující podmínky pro výpočty druhé modifikace
```

Účelová funkce (objective function)

```
> OF5 := 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1 + pC_E2 + pC_E3) :
```

Řešení

```
> with(simplex) :  
R5 := minimize(OF5, CO5);  
assign(R5) :  
R5 := {C = 10.00100000, DTC_E1 = 1., DTC_E2 = 1., DTC_E3 = 1., DTH_E1 = 1.,  
DTH_E2 = 1., DTH_E3 = 0., E1 = 59.99900000, E2 = 20.00000000, E3 = 140.0010000, H = 140.0000000, pC_E1 = 0., pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pH_E1 = 0., pH_E2 = 0., pH_E3 = 1.} (22)
```

Výsledky

```
> C := C;  
H := H;  
Rmax5 := E1 + E2 + E3;  
C := 10.00100000  
H := 140.0000000  
Rmax5 := 220.0000000 (23)
```

2. modifikace výměňkové sítě - rozdělení proudu

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
[> read './Initial.mpl' : # zadané hodnoty  
read './Constraints2.mpl' : # omezující podmínky pro výpočty druhé modifikace
```

Řešení a tisk výsledků

```
> with(simplex) :
```

```
printf("Výsledky LP modelu dělení proudu: \n");  
printf("-----\n");  
printf(" K   Rmax6   H   C   Tsplit   Tmix   ToutE3   ToutE1   BilTm   \n");  
printf("[zl.] [MW] [MW] [MW] [°C] [°C] [°C] [°C] [0=OK] \n");  
printf("-----\n");
```

```
for K from 0.1 by 0.025 to 0.975 do
```

```
  C := 'C': H := 'H': E1 := 'E1': E2 := 'E2': E3 := 'E3': DTC_E1 := 'DTC_E1': DTC_E2  
    := 'DTC_E2': DTC_E3 := 'DTC_E3': DTH_E1 := 'DTH_E1': DTH_E2 :=  
    'DTH_E2': DTH_E3 := 'DTH_E3': pC_E1 := 'pC_E1': pC_E2 := 'pC_E2': pC_E3  
    := 'pC_E3': pH_E1 := 'pH_E1': pH_E2 := 'pH_E2': pH_E3 := 'pH_E3':  
  # Nulování proměnných
```

```
  OF6 := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1  
    + pC_E2 + pC_E3) : # Účelová funkce
```

```
  R6 := minimize(OF6, CO6); # Řešení
```

```
if (R6 = { }) then
```

```
  Rmax6 := 0.0 : H := 0.0 : C := 0.0 : Tmix := 0.0 : Tsplit := 0.0 : ToutE3 := 0.0 :  
  ToutE1 := 0.0 : BilTm := 999.0;
```

```
else
```

```
  assign(R6) :  
  Rmax6 := E1 + E2 + E3;  
  H := H;  
  C := C;  
  Tmix := (TH_C1 - (H + E2) / CP_C1);  
  Tsplit := TC_C1;  
  BilTm := (TH_C1 - (H + E2) / CP_C1) - (TC_C1 + E3 / (K * CP_C1)) * (K * CP_C1)  
    / CP_C1 - (TC_C1 + E1 / ((1 - K) * CP_C1)) * ((1 - K) * CP_C1) / CP_C1;  
  ToutE3 := (TC_C1 + E3 / (K * CP_C1));  
  ToutE1 := (TC_C1 + E1 / ((1 - K) * CP_C1));
```

```
end if:
```

```
printf("%5.3f%6.1f%6.1f%6.1f%6.1f%7.1f%6.1f%7.1f%5.0f\n", K, Rmax6, H,  
  C, Tsplit, Tmix, ToutE3, ToutE1, BilTm);
```

```
end do:
```

```
printf("-----\n");
```

Výsledky LP modelu dělení proudu:

K	Rmax6	H	C	Tsplit	Tmix	ToutE3	ToutE1	BilTm
[zl.]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0.100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.125	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.150	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.175	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.225	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.275	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.325	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.350	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.375	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.425	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.450	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.475	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.525	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.550	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.575	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.625	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.650	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.675	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.725	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	148.3	163.6	0
0.750	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.775	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	145.2	177.8	0
0.800	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	143.8	187.5	0
0.825	160.0	200.0	70.0	100.0	135.0	142.4	100.0	0
0.850	220.0	140.0	10.0	100.0	150.0	141.2	200.0	0
0.875	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.900	200.0	160.0	30.0	100.0	145.0	138.9	200.0	0
0.925	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.950	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.975	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999

Upřesnění rozsahu K:

```
> with(simplex) :  
  printf("\nVýsledky pro škálu 0.70<K<0.75 s krokem 0.001\n");  
  printf("-----\n");  
  printf(" K Rmax6 H C Tsplit Tmix ToutE1 ToutE3 BilTm \n");  
  printf("[zl.] [MW] [MW] [MW] [°C] [°C] [°C] [°C] [0=OK] \n");  
  printf("-----\n");
```

for K from 0.70 by 0.001 to 0.75 do

C := 'C': H := 'H': E1 := 'E1': E2 := 'E2': E3 := 'E3': DTC_E1 := 'DTC_E1': DTC_E2 := 'DTC_E2': DTC_E3 := 'DTC_E3': DTH_E1 := 'DTH_E1': DTH_E2 := 'DTH_E2': DTH_E3 := 'DTH_E3': pC_E1 := 'pC_E1': pC_E2 := 'pC_E2': pC_E3 := 'pC_E3': pH_E1 := 'pH_E1': pH_E2 := 'pH_E2': pH_E3 := 'pH_E3':
 # Nulování proměnných

*OF6 := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1 + pC_E2 + pC_E3) : # Účelová funkce*

R6 := minimize(OF6, CO6); # Řešení

if (R6 = { }) then

Rmax6 := 0.0 : H := 0.0 : C := 0.0 : Tmix := 0.0 : Tsplit := 0.0 : ToutE1 := 0.0 : ToutE3 := 0.0 : BilTm := 999.0;

else

assign(R6) :

Rmax6 := E1 + E2 + E3;

H := H;

C := C;

Tmix := (TH_C1 - (H + E2) / CP_C1);

Tsplit := TC_C1;

*BilTm := (TH_C1 - (H + E2) / CP_C1) - (TC_C1 + E3 / (K * CP_C1)) * (K * CP_C1) / CP_C1 - (TC_C1 + E1 / ((1 - K) * CP_C1)) * ((1 - K) * CP_C1) / CP_C1;*

*ToutE3 := (TC_C1 + E3 / (K * CP_C1));*

*ToutE1 := (TC_C1 + E1 / ((1 - K) * CP_C1));*

end if:

printf("%5.3f%6.1f%6.1f%6.1f%6.1f%7.1f%6.1f%7.1f%5.0fn", K, Rmax6, H, C, Tsplit, Tmix, ToutE1, ToutE3, BilTm);

end do:

printf("-----\n");

Výsledky pro škálu 0.70<K<0.75 s krokem 0.001

K	Rmax6	H	C	Tsplit	Tmix	ToutE1	ToutE3	BilTm
[z1.]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0.700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.701	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.702	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.703	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.704	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.705	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.706	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.707	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	159.7	149.5	0
0.708	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.709	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.710	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	160.3	149.3	0
0.711	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	160.6	149.2	0
0.712	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	160.8	149.2	0

0.713	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	161.0	149.1	0
0.714	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	161.2	149.0	0
0.715	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.716	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	161.6	148.9	0
0.717	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	161.8	148.8	0
0.718	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	162.1	148.7	0
0.719	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	162.3	148.7	0
0.720	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	162.5	148.6	0
0.721	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	162.7	148.5	0
0.722	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	162.9	148.5	0
0.723	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.724	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.725	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	163.6	148.3	0
0.726	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.727	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.728	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.729	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.730	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.731	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	165.1	147.9	0
0.732	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.733	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	165.5	147.7	0
0.734	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	165.8	147.7	0
0.735	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.736	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	166.3	147.6	0
0.737	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	166.5	147.5	0
0.738	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	166.8	147.4	0
0.739	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	167.0	147.4	0
0.740	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	167.3	147.3	0
0.741	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.742	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.743	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	168.1	147.1	0
0.744	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.745	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	168.6	147.0	0
0.746	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.747	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.748	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.749	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	169.7	146.7	-0
0.750	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999

Nejlepšího výsledku je dosaženo při $K=0,707$.

PŘÍLOHA B

UKÁZKOVÝ PŘÍKLAD APLIKACE METODY NETWORK PINCH

Postup 1. fáze rekonstrukce ($\Delta T_{\min} = 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Diagnostika existující výměňkové sítě

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek

```
> read './InitialEMAT.mpl': # zadané hodnoty
```

```
read './Constraints1.mpl':
```

omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace

Účelová funkce (objective function)

```
> OF := 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1 + pC_E2  
+ pC_E3) : ``
```

(1)

Řešení

```
> with(simplex);
```

```
[basis, convexhull, cterm, define_zero, display, dual, feasible, maximize, minimize,  
pivot, pivoteqn, pivotvar, ratio, setup, standardize]
```

(2)

```
> R0 := minimize(OFF, CO);
```

```
assign(R0) :
```

```
R0 := {C = 16.00025000, DTC_E1 = 0., DTC_E2 = 7., DTC_E3 = 7., DTH_E1 = 7.,  
DTH_E2 = 7., DTH_E3 = 7., E1 = 53.99975000, E2 = 20.00000000, E3  
= 140.00100000, H = 145.99925000, pC_E1 = 7., pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pH_E1  
= 0., pH_E2 = 0., pH_E3 = 0.}
```

(3)

Výsledky:

```
> C := C;
```

```
H := H;
```

```
Rmax0 := E1 + E2 + E3;
```

```
C := 16.00025000
```

```
H := 145.99925000
```

```
Rmax0 := 214.00075000
```

(4)

1. modifikace výměňkové sítě - nový výměňník

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
> read './InitialEMAT.mpl': # zadané hodnoty
```

```
read './Constraints1.mpl':
```

omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace

Účelová funkce (objective function)

```
> OF1 := 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3 + pH_EN) + 1 * (pC_E1  
+ pC_E2 + pC_E3 + pC_EN) :
```

Řešení

```
> with(simplex) :  
R1 := minimize(OF1, CO1);  
assign(R1) :  
R1 := {C = 11.00025000, DTC_E1 = 0., DTC_E2 = 7.000000000, DTC_E3  
= 7.000000000, DTC_EN = 4.249812500, DTH_E1 = 7.000000000, DTH_E2  
= 7.000000000, DTH_E3 = 7.000000000, DTH_EN = 7.000000000, E1  
= 58.99975000, E2 = 0., E3 = 140.0010000, EN = 20.00000000, H  
= 140.9992500, pC_E1 = 7.000000000, pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pC_EN  
= 2.750187500, pH_E1 = 0., pH_E2 = 0., pH_E3 = 0., pH_EN = 0.}
```

Výsledky:

```
> C := C;  
H := H;  
Rmax1 := E1 + E2 + E3 + EN;  
C := 11.00025000  
H := 140.9992500  
Rmax1 := 219.0007500
```

1. modifikace výměňkové sítě - přepojení výměňku

```
> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
> read `./InitialEMAT.mpl` : # zadané hodnoty  
read `./Constraints1.mpl` :  
# omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace
```

Účelová funkce (objective function)

```
> OF2 := 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1 + pC_E2  
+ pC_E3) :
```

Řešení

```
> with(simplex) :  
R2 := minimize(OF2, CO2);  
assign(R2);  
R2 := {C = 11.00025000, DTC_E1 = 0., DTC_E2 = 4.249812500, DTC_E3  
= 7.000000000, DTH_E1 = 7.000000000, DTH_E2 = 7.000000000, DTH_E3  
= 7.000000000, E1 = 58.99975000, E2 = 20.00000000, E3 = 140.0010000, H  
= 140.9992500, pC_E1 = 7., pC_E2 = 2.750187500, pC_E3 = 0., pH_E1 = 0.,  
pH_E2 = 0., pH_E3 = 0.}
```

Výsledky:

```
> C := C;  
H := H;  
Rmax2 := E1 + E2 + E3;  
C := 11.00025000  
H := 140.9992500  
Rmax2 := 219.0007500
```

1. modifikace výměňkové sítě - rozdělení proudu

NLP metoda - A

```
[> restart;
```

Účelová funkce (objective function)

```
[> OF3 := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1  
+ pC_E2 + pC_E3) :
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
[> read `./InitialEMAT.mpl` : # zadané hodnoty
```

```
read `./Constraints1.mpl` :
```

```
# omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace
```

```
[> with(Optimization);
```

```
[ImportMPS, Interactive, LPSolve, LSSolve, Maximize, Minimize, NLPsolve, QPSolve] (9)
```

```
[> R3NLP_A := NLPsolve(OF3, CO3NLP);
```

```
assign(R3NLP_A[2]) :
```

```
R3NLP_A := [1.52006500000000029 105, [C = 11.0002500000000, CP_C1_1 (10)
```

```
= 1.13461603180782, DTC_E1 = -6.03892873536335 10-21, DTC_E2
```

```
= 7.00176433993959, DTC_E3 = 7.00176433993971, DTH_E1 = 7., DTH_E2
```

```
= 7.00176426663542, DTH_E3 = 7.00176433993960, E1 = 58.9997500000000,
```

```
E2 = 20., E3 = 140.001000000000, H = 140.999250000000, pC_E1 = 7., pC_E2 =
```

```
-2.995359876 10-311, pC_E3 = -1.26629538948331 10-19, pH_E1 =
```

```
-8.180992401 10-314, pH_E2 = -1.95872944022604 10-19, pH_E3 =
```

```
-1.348357552 10-311]]
```

Výsledky:

```
[> C := C; H := H; Rmax3NLP_A := E1 + E2 + E3;
```

```
C := 11.0002500000000
```

```
H := 140.999250000000
```

```
Rmax3NLP_A := 219.000750000000 (11)
```

Dopočty a kontola:

```
[> CP_C1_1 := CP_C1_1; # Tepelná kapacita první větve proudu C1
```

```
CP_C1_2 := (CP_C1 - CP_C1_1); # Tepelná kapacita druhé větve proudu C1
```

```
CP_C1 - CP_C1_1 - CP_C1_2; #` Kontrola
```

```
CP_C1_1 := 1.13461603180782
```

```
CP_C1_2 := 2.86538396819218
```

```
0. (12)
```

```
[> Tmix := (TH_C1 - H/CP_C1); # Teplota při smísení proudů
```

```
Tsplit := (TC_C1 + E3/CP_C1); # Teplota při rozdělení proudů
```

```
ToutE1 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1);
```

```
# Teplota první větve proudu před smísením (teplota na výstupu z E1)
```

```
ToutE2 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/CP_C1_2);
```

```
# Teplota druhé větve proudu před smísením (teplota na výstupu z E2)
```

```
Tmix := 154.750187500000
```

```
Tsplit := 135.000250000000
```

```
ToutE1 := 187.000000000001
```

```
ToutE2 := 141.980117348326 (13)
```

```

> (TH_C1 - H/CP_C1) - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1)·CP_C1_1/CP_C1
  - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/(CP_C1 - CP_C1_1))·CP_C1_2/CP_C1;
  (TH_C1 - H/CP_C1) - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1)·CP_C1_1/CP_C1
  - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/(CP_C1 - CP_C1_1))·(CP_C1 - CP_C1_1)
  /CP_C1;
# Bilanční rovnováha

  ToutE1·CP_C1_1 + ToutE2·CP_C1_2;
  CP_C1·(TH_C1 - H/CP_C1);
  (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1)·CP_C1_1 + (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2
  /CP_C1_2)·CP_C1_2;
# Entalpická rovnováha

                                0.
                                0.
                                619.000750000000
                                619.000750000000
                                619.000750000000

```

(14)

NLP metoda - B - Výpočet s upřesněním rozsahu tepelné kapacity

```

[> restart;
Účelová funkce (objective function)
> OF3 := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1
  + pC_E2 + pC_E3) :
Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:
> read `./InitialEMAT.mpl` : # zadané hodnoty
  read `./ConstraintsI.mpl` :
  # omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace
> with(Optimization) :
> R3NLP_B := NLPsolve(OF3, CO3NLP, CP_C1_1 = 0 ..4.0);
  assign(R3NLP_B[2]) :
R3NLP_B := [1.520065000000000029 105, [C = 11.00025000000000, CP_C1_1 = 2.,
  DTC_E1 = 6.810123617 10-309, DTC_E2 = 7., DTC_E3 = 7., DTH_E1 = 7.,
  DTH_E2 = 7., DTH_E3 = 7., E1 = 58.99975000000000, E2 = 20., E3
  = 140.00100000000000, H = 140.99925000000000, pC_E1 = 7., pC_E2
  = 2.22044604925031 10-16, pC_E3 = 2.22044604925031 10-16, pH_E1
  = 2.22044604925031 10-16, pH_E2 = 2.22044604925031 10-16, pH_E3
  = 2.22044604925031 10-16]]

```

(15)

Výsledky:

```

> C := C; H := H; Rmax3NLP_B := E1 + E2 + E3;
  C := 11.00025000000000
  H := 140.9992500000000
  Rmax3NLP_B := 219.0007500000000

```

(16)

Dopočty a kontrola:

```

> CP_C1_1 := CP_C1_1; # Tepelná kapacita první větve proudu C1
  CP_C1_2 := (CP_C1 - CP_C1_1); # Tepelná kapacita druhé větve proudu C1
  CP_C1 - CP_C1_1 - CP_C1_2; # Kontrola

```

```

CP_C1_1 := 2.
CP_C1_2 := 2.
0.

```

(17)

```

> Tmix := (TH_C1 - H/CP_C1); # Teplota při smíšení proudů
Tsplif := (TC_C1 + E3/CP_C1); # Teplota při rozdělení proudů
ToutE1 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1);
# Teplota první větve proudu před smíšením (teplota na výstupu z E1)
ToutE2 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/CP_C1_2);
# Teplota druhé větve proudu před smíšením (teplota na výstupu z E2)

```

```
Tmix := 154.750187500000
```

```
Tsplif := 135.000250000000
```

```
ToutE1 := 164.500125000000
```

```
ToutE2 := 145.000250000000
```

(18)

```

> (TH_C1 - H/CP_C1) - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1) · CP_C1_1 / CP_C1
- (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2 / (CP_C1 - CP_C1_1)) · CP_C1_2 / CP_C1;
(TH_C1 - H/CP_C1) - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1) · CP_C1_1 / CP_C1
- (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2 / (CP_C1 - CP_C1_1)) · (CP_C1 - CP_C1_1)
/ CP_C1;

```

Bilanční rovnováha

```
ToutE1 · CP_C1_1 + ToutE2 · CP_C1_2;
```

```
CP_C1 · (TH_C1 - H/CP_C1);
```

```
(TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/CP_C1_1) · CP_C1_1 + (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2
/ CP_C1_2) · CP_C1_2;
```

Entalpická rovnováha

```
-1.42108547152020 10-14
```

```
-1.42108547152020 10-14
```

```
619.000750000000
```

```
619.000750000000
```

```
619.000750000000
```

(19)

LP metoda

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
> read './InitialEMAT.mpl': # zadané hodnoty
```

```
read './Constraints1.mpl':
```

omezující podmínky pro výpočty diagnostiky a první modifikace

Řešení a tisk výsledků

```
> with(simplex) :
```

```
printf("\nVýsledek LP modelu dělení proudu: \n");
```

```
printf("-----\n");
```

```
printf(" K Rmax3LP H C Tsplif Tmix ToutE1 ToutE2 BilTm \n");
```

```
printf("[zl.] [MW] [MW] [MW] [°C] [°C] [°C] [°C] [0=OK] \n");
```

```
printf("-----\n");
```

for K from 0.1 by 0.025 to 0.9 do

```
C := 'C': H := 'H': E1 := 'E1': E2 := 'E2': E3 := 'E3': DTC_E1 := 'DTC_E1': DTC_E2
```

```

:= 'DTC_E2': DTC_E3 := 'DTC_E3': DTH_E1 := 'DTH_E1': DTH_E2 :=
'DTH_E2': DTH_E3 := 'DTH_E3': pC_E1 := 'pC_E1': pC_E2 := 'pC_E2': pC_E3
:= 'pC_E3': pH_E1 := 'pH_E1': pH_E2 := 'pH_E2': pH_E3 := 'pH_E3':
# Nulování proměnných

OF3LP := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1
+ pC_E2 + pC_E3) : # Účelová funkce

R3LP := minimize(OF3LP, CO3LP); # Řešení

if (R3LP = { }) then
  Rmax3LP := 0.0 : H := 0.0 : C := 0.0 : Tmix := 0.0 : Tsplīt := 0.0 : ToutE1
  := 0.0 : ToutE2 := 0.0 : BilTm := 999.0;
else
  assign(R3LP) :
  Rmax3LP := E1 + E2 + E3;
  H := H;
  C := C;
  Tmix := (TH_C1 - H/CP_C1);
  Tsplīt := (TC_C1 + E3/CP_C1);
  BilTm := (TH_C1 - H/CP_C1) - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/(K·CP_C1))·(K
  ·CP_C1)/CP_C1 - (100 + E3/CP_C1 + E2/((1 - K)·CP_C1))·((1 - K)
  ·CP_C1)/CP_C1;
  ToutE1 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/(K·CP_C1));
  ToutE2 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/((1 - K)·CP_C1));
end if:

  printf("%5.3f%6.1f%6.1f%6.1f%6.1f%7.1f%6.1f%7.1f%5.0f\n", K, Rmax3LP,
  H, C, Tsplīt, Tmix, ToutE1, ToutE2, BilTm);

end do:
  printf("-----\n")

```

Výsledky LP modelu dělení proudu:

K	Rmax3LP	H	C	Tsplīt	Tmix	ToutE1	ToutE2	BilTm
[zl.]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0.100	183.6	176.4	46.4	135.0	145.9	194.0	140.6	0
0.125	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.150	195.4	164.6	34.6	135.0	148.9	194.0	140.9	0
0.175	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	141.1	-0
0.200	207.2	152.8	22.8	135.0	151.8	194.0	141.3	0
0.225	213.1	146.9	16.9	135.0	153.3	194.0	141.5	0
0.250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.275	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	188.6	141.9	0
0.300	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	184.2	142.1	0
0.325	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.350	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.375	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	174.3	143.0	0
0.400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.425	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.450	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	167.8	144.1	0
0.475	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	166.1	144.5	0

0.500	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	164.5	145.0	0
0.525	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	163.1	145.5	0
0.550	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	161.8	146.1	0
0.575	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	146.8	0
0.600	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	147.5	0
0.625	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	158.6	148.3	0
0.650	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	149.3	0
0.675	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	150.4	0
0.700	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	156.1	151.7	0
0.725	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.3	153.2	-0
0.750	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	155.0	0
0.775	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	154.0	157.2	0
0.800	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	153.4	160.0	0
0.825	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.850	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	152.4	168.3	0
0.875	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	175.0	-0
0.900	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	151.4	185.0	0

Upřesnění rozsahu K:

```

> with(simplex) :
  printf("\nVýsledky pro škálu 0.72<K<0.78 s krokem 0.001\n");
  printf("-----\n");
  printf(" K  Rmax3LP  H    C  Tsplite  Tmix  ToutE1  ToutE2  BilTm \n");
  printf("[zl.] [MW]  [MW] [MW] [°C]  [°C]  [°C]  [°C]  [0=OK] \n");
  printf("-----\n");

for K from 0.72 by 0.001 to 0.78 do

  C := 'C': H := 'H': E1 := 'E1': E2 := 'E2': E3 := 'E3': DTC_E1 := 'DTC_E1': DTC_E2 := 'DTC_E2':
  DTC_E3 := 'DTC_E3': DTH_E1 := 'DTH_E1': DTH_E2 := 'DTH_E2':
  DTH_E3 := 'DTH_E3': pC_E1 := 'pC_E1': pC_E2 := 'pC_E2': pC_E3 := 'pC_E3':
  pH_E1 := 'pH_E1': pH_E2 := 'pH_E2': pH_E3 := 'pH_E3':
  # Nulování proměnných
  OF3LP := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1
  + pC_E2 + pC_E3) : # Účelová funkce

  R3LP := minimize(OF3LP, CO3LP); # Řešení

if (R3LP = { }) then
  Rmax3LP := 0.0 : H := 0.0 : C := 0.0 : Tmix := 0.0 : Tsplite := 0.0 : ToutE1
  := 0.0 : ToutE2 := 0.0 : BilTm := 999.0;
else
  assign(R3LP) :
  Rmax3LP := E1 + E2 + E3;
  H := H;
  C := C;
  Tmix := (TH_C1 - H/CP_C1);
  Tsplite := (TC_C1 + E3/CP_C1);
  BilTm := (TH_C1 - H/CP_C1) - (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/(K*CP_C1)) * (K
  * CP_C1) / CP_C1 - (100 + E3/CP_C1 + E2/((1-K)*CP_C1)) * ((1-K)
  * CP_C1) / CP_C1;
  ToutE1 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E1/(K*CP_C1));
  ToutE2 := (TC_C1 + E3/CP_C1 + E2/((1-K)*CP_C1));
end if:

```

```
printf("%5.3f%6.1f%6.1f%6.1f%6.1f%7.1f%6.1f%7.1f%5.0f\n", K, Rmax3LP,
H, C, Tsplit, Tmix, ToutE1, ToutE2, BilTm);
```

end do:

```
printf("-----\n");
```

Výsledky pro škálu 0.72<K<0.78 s krokem 0.001

K	Rmax3LP	H	C	Tsplit	Tmix	ToutE1	ToutE2	BilTm
[z1.]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0.720	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.5	152.9	0
0.721	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.5	152.9	-0
0.722	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.4	153.0	0
0.723	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	153.1	0
0.724	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	153.1	0
0.725	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.3	153.2	-0
0.726	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	153.2	0
0.727	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	153.3	0
0.728	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	153.4	0
0.729	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	153.5	0
0.730	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	153.5	0
0.731	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.2	153.6	-0
0.732	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	153.7	0
0.733	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.1	153.7	0
0.734	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.1	153.8	0
0.735	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	153.9	0
0.736	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.0	153.9	0
0.737	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.0	154.0	0
0.738	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.0	154.1	0
0.739	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	155.0	154.2	0
0.740	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	154.9	154.2	0
0.741	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	154.3	0
0.742	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	154.4	0
0.743	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	154.9	154.5	0
0.744	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	154.5	0
0.745	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	154.8	154.6	0
0.746	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	154.7	0
0.747	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	154.8	-0
0.748	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	154.8	0
0.749	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	154.7	154.9	-0
0.750	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	155.0	0
0.751	180.0	180.0	50.0	135.0	145.0	141.7	155.1	0
0.752	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	154.6	155.2	0
0.753	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	155.2	0
0.754	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.755	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.756	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	155.5	0
0.757	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.758	180.0	180.0	50.0	135.0	145.0	141.6	155.7	0
0.759	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.760	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.761	180.0	180.0	50.0	135.0	145.0	141.6	155.9	0
0.762	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	154.4	156.0	0
0.763	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.764	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	156.2	0

0.765	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.766	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.767	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.768	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	156.6	0
0.769	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.770	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.771	180.0	180.0	50.0	135.0	145.0	141.5	156.8	0
0.772	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	156.9	0
0.773	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	154.1	157.0	-0
0.774	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.775	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	154.0	157.2	0
0.776	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.777	219.0	141.0	11.0	135.0	154.8	154.0	157.4	0
0.778	160.0	200.0	70.0	135.0	140.0	135.0	157.5	0
0.779	180.0	180.0	50.0	135.0	145.0	141.4	157.6	0
0.780	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999

Nejlepšího výsledku je dosaženo při $K=0,749$.

2. modifikace výměňkové sítě - nový výměňník

[> *restart*;

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

[> *read* `./InitialEMAT.mpl` : # zadané hodnoty

read `./Constraints2.mpl` : # omezující podmínky pro výpočty druhé modifikace

Účelová funkce (objective function)

[> *OF4* := $1000 \cdot H + 1 \cdot (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3 + pH_EN) + 1 \cdot (pC_E1 + pC_E2 + pC_E3 + pC_EN)$:

Řešení

[> *with*(*simplex*) :

R4 := *minimize*(*OF4*, *CO4*);

assign(*R4*) :

R4 := {*C* = 16.00025000, *DTC_E1* = 0., *DTC_E2* = 0.4998125000, *DTC_E3* = 7.0000000000, *DTC_EN* = 7.0000000000, *DTH_E1* = 7.0000000000, *DTH_E2* = 7.0000000000, *DTH_E3* = 3.9997500000, *DTH_EN* = 7.0000000000, *E1* = 53.99975000, *E2* = 20.00000000, *E3* = 140.0010000, *EN* = 20.00000000, *H* = 125.9992500, *pC_E1* = 7., *pC_E2* = 6.500187500, *pC_E3* = 0., *pC_EN* = 0., *pH_E1* = 0., *pH_E2* = 0., *pH_E3* = 3.000250000, *pH_EN* = 0.}

(20)

Výsledky

[> *C* := *C*;

H := *H*;

Rmax4 := *E1* + *E2* + *E3* + *EN*;

C := 16.00025000

H := 125.9992500

Rmax4 := 234.0007500

(21)

2. modifikace výměňkové sítě - přepojení výměňníku

[> *restart*;

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

[> *read* `./InitialEMAT.mpl` : # zadané hodnoty

```
read './Constraints2.mpl' : # omezující podmínky pro výpočty druhé modifikace
Účelová funkce (objective function)
```

```
> OF5 := 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1 + pC_E2
+ pC_E3) :
```

```
Řešení
```

```
> with(simplex) :
R5 := minimize(OF5, CO5);
assign(R5) :
R5 := { C = 34.00100000, DTC_E1 = 7., DTC_E2 = 7., DTC_E3 = 5.000250000,
DTH_E1 = 7., DTH_E2 = 7., DTH_E3 = 0., E1 = 35.99900000, E2
= 20.00000000, E3 = 140.0010000, H = 164.0000000, pC_E1 = 0., pC_E2 = 0.,
pC_E3 = 1.999750000, pH_E1 = 0., pH_E2 = 0., pH_E3 = 7.000000000 } (22)
```

```
Výsledky
```

```
> C := C;
H := H;
Rmax5 := E1 + E2 + E3;
C := 34.00100000
H := 164.0000000
Rmax5 := 196.0000000 (23)
```

2. modifikace výměňkové sítě - rozdělení proudu

```
> restart;
```

```
Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:
```

```
> read './InitialEMAT.mpl' : # zadané hodnoty
read './Constraints2.mpl' : # omezující podmínky pro výpočty druhé modifikace
```

```
Řešení a tisk výsledků
```

```
> with(simplex) :
printf("Výsledky LP modelu dělení proudu: \n");
printf("-----\n");
printf(" K Rmax6 H C Tsplit Tmix ToutE3 ToutE1 BilTm \n");
printf("[zl.] [MW] [MW] [MW] [°C] [°C] [°C] [°C] [0=OK] \n");
printf("-----\n");

for K from 0.1 by 0.025 to 0.975 do

C := 'C': H := 'H': E1 := 'E1': E2 := 'E2': E3 := 'E3': DTC_E1 := 'DTC_E1': DTC_E2
:= 'DTC_E2': DTC_E3 := 'DTC_E3': DTH_E1 := 'DTH_E1': DTH_E2 :=
'DTH_E2': DTH_E3 := 'DTH_E3': pC_E1 := 'pC_E1': pC_E2 := 'pC_E2': pC_E3
:= 'pC_E3': pH_E1 := 'pH_E1': pH_E2 := 'pH_E2': pH_E3 := 'pH_E3':
# Nulování proměnných

OF6 := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1
+ pC_E2 + pC_E3) : # Účelová funkce

R6 := minimize(OF6, CO6); # Řešení

if (R6 = { }) then
Rmax6 := 0.0 : H := 0.0 : C := 0.0 : Tmix := 0.0 : Tsplit := 0.0 : ToutE3 := 0.0 :
ToutE1 := 0.0 : BilTm := 999.0;
```

```

else
  assign(R6) :
  Rmax6 := E1 + E2 + E3;
  H := H;
  C := C;
  Tmix := (TH_C1 - (H + E2) / CP_C1);
  Tsplit := TC_C1;
  BilTm := (TH_C1 - (H + E2) / CP_C1) - (TC_C1 + E3 / (K * CP_C1)) * (K * CP_C1)
  / CP_C1 - (TC_C1 + E1 / ((1 - K) * CP_C1)) * ((1 - K) * CP_C1) / CP_C1;
  ToutE3 := (TC_C1 + E3 / (K * CP_C1));
  ToutE1 := (TC_C1 + E1 / ((1 - K) * CP_C1));
end if:

printf("%5.3f%6.1f%6.1f%6.1f%6.1f%7.1f%6.1f%7.1f%5.0fn", K, Rmax6, H,
  C, Tsplit, Tmix, ToutE3, ToutE1, BilTm);

end do:

printf("-----\n");

```

Výsledky LP modelu dělení proudu:

K	Rmax6	H	C	Tsplit	Tmix	ToutE3	ToutE1	BilTm
[zl.]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0.100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.125	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.150	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.175	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.225	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.275	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.325	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.350	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.375	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.425	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.450	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.475	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.525	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.550	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.575	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.625	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.650	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.675	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.725	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.750	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.775	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.800	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	143.8	187.5	0

0.825	160.0	200.0	70.0	100.0	135.0	142.4	100.0	0
0.850	216.4	143.6	13.6	100.0	149.1	141.2	194.0	0
0.875	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.900	197.6	162.4	32.4	100.0	144.4	138.9	194.0	0
0.925	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.950	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.975	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999

Upřesnění rozsahu K:

```

> with(simplex) :
printf("\nVýsledky pro škálu 0.79<K<0.82 s krokem 0.001\n");
printf("-----\n");
printf(" K Rmax6 H C Tsplit Tmix ToutE1 ToutE3 BilTm \n");
printf("[zL] [MW] [MW] [MW] [°C] [°C] [°C] [°C] [0=OK]\n");
printf("-----\n");

for K from 0.79 by 0.001 to 0.82 do

C := 'C': H := 'H': E1 := 'E1': E2 := 'E2': E3 := 'E3': DTC_E1 := 'DTC_E1': DTC_E2 := 'DTC_E2': DTC_E3 := 'DTC_E3': DTH_E1 := 'DTH_E1': DTH_E2 := 'DTH_E2': DTH_E3 := 'DTH_E3': pC_E1 := 'pC_E1': pC_E2 := 'pC_E2': pC_E3 := 'pC_E3': pH_E1 := 'pH_E1': pH_E2 := 'pH_E2': pH_E3 := 'pH_E3':
# Nulování proměnných

OF6 := 1000 * C + 1000 * H + 1 * (pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1 * (pC_E1 + pC_E2 + pC_E3) : # Účelová funkce

R6 := minimize(OF6, CO6); # Řešení

if (R6 = { }) then
Rmax6 := 0.0 : H := 0.0 : C := 0.0 : Tmix := 0.0 : Tsplit := 0.0 : ToutE1 := 0.0 :
ToutE3 := 0.0 : BilTm := 999.0;
else
assign(R6) :
Rmax6 := E1 + E2 + E3;
H := H;
C := C;
Tmix := (TH_C1 - (H + E2) / CP_C1);
Tsplit := TC_C1;
BilTm := (TH_C1 - (H + E2) / CP_C1) - (TC_C1 + E3 / (K * CP_C1)) * (K * CP_C1) / CP_C1 - (TC_C1 + E1 / ((1 - K) * CP_C1)) * ((1 - K) * CP_C1) / CP_C1;
ToutE3 := (TC_C1 + E3 / (K * CP_C1));
ToutE1 := (TC_C1 + E1 / ((1 - K) * CP_C1));
end if:

printf("%5.3f%6.1f%6.1f%6.1f%6.1f%7.1f%6.1f%7.1f%5.0f\n", K, Rmax6, H,
C, Tsplit, Tmix, ToutE1, ToutE3, BilTm);

end do:

printf("-----\n");

```

Výsledky pro škálu $0.79 < K < 0.82$ s krokem 0.001

K	Rmax6	H	C	Tsplit	Tmix	ToutE1	ToutE3	BilTm
[zl.]	[MW]	[MW]	[MW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[0=OK]
0.790	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.791	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.792	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.793	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.794	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.795	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.796	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	185.8	144.0	0
0.797	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.798	160.0	200.0	70.0	100.0	135.0	100.0	143.9	0
0.799	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.800	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	187.5	143.8	0
0.801	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.802	160.0	200.0	70.0	100.0	135.0	100.0	143.6	0
0.803	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.804	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.805	230.0	130.0	0.0	100.0	152.5	189.7	143.5	0
0.806	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.807	160.0	200.0	70.0	100.0	135.0	100.0	143.4	0
0.808	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.809	160.0	200.0	70.0	100.0	135.0	100.0	143.3	0
0.810	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.811	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.812	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.813	160.0	200.0	70.0	100.0	135.0	100.0	143.1	0
0.814	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.815	160.0	200.0	70.0	100.0	135.0	100.0	142.9	0
0.816	229.2	130.8	0.8	100.0	152.3	194.0	142.9	0
0.817	160.0	200.0	70.0	100.0	135.0	100.0	142.8	0
0.818	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	999
0.819	160.0	200.0	70.0	100.0	135.0	100.0	142.7	0
0.820	227.7	132.3	2.3	100.0	151.9	194.0	142.7	0

Nejlepšího výsledku je dosaženo při $K=0,796$.

PŘÍLOHA C

ŘEŠENÍ PRŮMYSLOVÉHO PŘÍPADU METODOU NETWORK PINCH

Postup 1. fáze rekonstrukce

Diagnostika existující výměňkové sítě

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek

```
[> read `./Initial.mpl` : # vstupní hodnoty  
read `./Constraints.mpl` : # omezující podmínky
```

Účelová funkce (objective function)

```
[> OF := 1000·HS + 1000·(CS1 + CS2 + CS3) + 1·(pH_E1 + pH_E2 + pH_E3) + 1  
·(pC_E1 + pC_E2 + pC_E3);  
OF := 1000 HS + 1000 CS1 + 1000 CS2 + 1000 CS3 + pH_E1 + pH_E2 + pH_E3  
+ pC_E1 + pC_E2 + pC_E3 (1)
```

Řešení

```
[> with(simplex);  
[basis, convexhull, cterm, define_zero, display, dual, feasible, maximize, minimize,  
pivot, pivoteqn, pivotvar, ratio, setup, standardize] (2)
```

```
[> R0 := minimize(OF, CO);  
assign(R0) :  
R0 := {CS1 = 1029.936600, CS2 = 1078.914200, CS3 = 234.9528000, DTC_E1 = 41.,  
DTC_E2 = 41., DTC_E3 = 41., DTH_E1 = 41., DTH_E2 = 41., DTH_E3 = 41., E1  
= 239.0100000, E2 = 1226.016000, E3 = 236.0050000, HS = 1666.957500,  
pC_E1 = 0., pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pH_E1 = 0., pH_E2 = 0., pH_E3 = 0.} (3)
```

Výsledky:

```
[> C := CS1 + CS2 + CS3;  
H := HS;  
Rmax0 := E1 + E2 + E3;  
  
C := 2343.803600  
H := 1666.957500  
Rmax0 := 1701.031000 (4)
```

Modifikace výměňkové sítě - přidání nového výměníku H2-C2 a

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
[> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty  
read `./Constraints.mpl` : # omezující podmínky
```

Účelová funkce (objective function)

```
[> OF := 1000·HS + 1000·(CS1 + CS2 + CS3) + 1·(pH_E1 + pH_E2 + pH_E3  
+ pH_EN) + 1·(pC_E1 + pC_E2 + pC_E3 + pC_EN) :
```

Řešení

```
> with(simplex) :  
  R1a := minimize(OF, CO1a);  
  assign(R1a) :  
  R1a := {CSI = 515.8096998, CS2 = 1078.914200, CS3 = 234.9528000, DTC_E1  
    = 11.29016839, DTC_E2 = 32.43077753, DTC_E3 = 41., DTC_EN = 0., DTH_E1  
    = 7.300000000, DTH_E2 = 29.21828879, DTH_E3 = 41., DTH_EN  
    = 27.23077753, E1 = 239.0100000, E2 = 1226.016000, E3 = 236.0050000, EN  
    = 514.1269002, HS = 1152.830600, pC_E1 = 29.70983161, pC_E2  
    = 8.569222470, pC_E3 = 0., pC_EN = 41.00000000, pH_E1 = 33.70000000,  
    pH_E2 = 11.78171121, pH_E3 = 0., pH_EN = 13.76922247}
```

Výsledky:

```
> C := CSI + CS2 + CS3;  
  H := HS;  
  Rmax1a := E1 + E2 + E3 + EN;  
          C := 1829.676700  
          H := 1152.830600  
          Rmax1a := 2215.157900
```

Modifikace výměňkové sítě - přidání nového výměňku H2-C2 b

```
> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty  
  read `./Constraints.mpl` : # omezující podmínky
```

Účelová funkce (objective function)

```
> OF := 1000·HS + 1000·(CSI + CS2 + CS3) + 1·(pH_E1 + pH_E2 + pH_E3  
  + pH_EN) + 1·(pC_E1 + pC_E2 + pC_E3 + pC_EN) :
```

Řešení

```
> with(simplex) :  
  R1b := minimize(OF, CO1b);  
  assign(R1b) :  
  R1b := {CSI = 754.8196998, CS2 = 1078.914200, CS3 = 234.9528000, DTC_E1  
    = 41.00000000, DTC_E2 = 41.00000000, DTC_E3 = 41.00000000, DTC_EN  
    = 0., DTH_E1 = 41.00000000, DTH_E2 = 41.00000000, DTH_E3  
    = 41.00000000, DTH_EN = 14.57159137, E1 = 239.0100000, E2  
    = 1226.016000, E3 = 236.0050000, EN = 275.1169002, HS = 1391.840600,  
    pC_E1 = 0., pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pC_EN = 41.00000000, pH_E1 = 0., pH_E2  
    = 0., pH_E3 = 0., pH_EN = 26.42840863}
```

Výsledky:

```
> C := CSI + CS2 + CS3;  
  H := HS;  
  Rmax1b := E1 + E2 + E3 + EN;  
          C := 2068.686700  
          H := 1391.840600  
          Rmax1b := 1976.147900
```

Modifikace výměňkové sítě - přidání nového výměňku H2-C2 c

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
[> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty
  read `./Constraints.mpl` : # omezující podmínky
```

Účelová funkce (objective function)

```
[> OF := 1000·HS + 1000·(CS1 + CS2 + CS3) + 1·(pH_E1 + pH_E2 + pH_E3
  + pH_EN) + 1·(pC_E1 + pC_E2 + pC_E3 + pC_EN) :
```

Řešení

```
[> with(simplex) :
  R1c := minimize(OF, CO1c);
  assign(R1c) :
```

R1c := { } (9)

Výsledky:

```
[> C := CS1 + CS2 + CS3;
  H := HS;
  Rmax1c := E1 + E2 + E3 + EN;
  C := CS1 + CS2 + CS3
  H := HS
  Rmax1c := E1 + E2 + E3 + EN
```

(10)

Modifikace výměňkové sítě - přidání nového výměňku H3-C2 a

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
[> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty
  read `./Constraints2.mpl` : # omezující podmínky pro první modifikaci
```

Účelová funkce (objective function)

```
[> OF := 1000·HS + 1000·(CS1 + CS2 + CS3) + 1·(pH_E1 + pH_E2 + pH_E3
  + pH_EN) + 1·(pC_E1 + pC_E2 + pC_E3 + pC_EN) :
```

Řešení

```
[> with(simplex) :
  R2a := minimize(OF, CO2a);
  assign(R2a) :
```

R2a := { CS1 = 1029.936600, CS2 = 740.0750000, CS3 = 234.9528000, DTC_E1 = 41.00000000, DTC_E2 = 41., DTC_E3 = 1.149598400, DTC_EN = 14.70000000, DTH_E1 = 41., DTH_E2 = 39.74291804, DTH_E3 = 0., DTH_EN = 41., E1 = 239.0100000, E2 = 1226.016000, E3 = 236.0050000, EN = 338.8392001, HS = 1328.118300, pC_E1 = 0., pC_E2 = 0., pC_E3 = 39.85040160, pC_EN = 26.30000000, pH_E1 = 0., pH_E2 = 1.257081961, pH_E3 = 41.00000000, pH_EN = 0. } (11)

Výsledky:

```
[> C := CS1 + CS2 + CS3; H := HS;
  Rmax2a := E1 + E2 + E3 + EN;
  C := 2004.964400
  H := 1328.118300
  Rmax2a := 2039.870200
```

(12)

Modifikace výměňkové sítě - přidání nového výměňku H3-C2 b

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
[> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty  
read `./Constraints2.mpl` : # omezující podmínky pro první modifikaci
```

Účelová funkce (objective function)

```
[> OF := 1000·HS + 1000·(CSI + CS2 + CS3) + 1·(pH_E1 + pH_E2 + pH_E3  
+ pH_EN) + 1·(pC_E1 + pC_E2 + pC_E3 + pC_EN) :
```

Řešení

```
[> with(simplex) :  
R2b := minimize(OF, CO2b);  
assign(R2b) :  
R2b := { CSI = 1029.936600, CS2 = 873.5915999, CS3 = 234.9528000, DTC_E1  
= 41.00000000, DTC_E2 = 41.00000000, DTC_E3 = 41.00000000, DTC_EN  
= 0., DTH_E1 = 41.00000000, DTH_E2 = 41.00000000, DTH_E3  
= 41.00000000, DTH_EN = 17.12161280, E1 = 239.0100000, E2  
= 1226.016000, E3 = 236.0050000, EN = 205.3226001, HS = 1461.634900,  
pC_E1 = 0., pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pC_EN = 41.00000000, pH_E1 = 0., pH_E2  
= 0., pH_E3 = 0., pH_EN = 23.87838720 } (13)
```

Výsledky:

```
[> C := CSI + CS2 + CS3; H := HS;  
Rmax2b := E1 + E2 + E3 + EN;  
C := 2138.481000  
H := 1461.634900  
Rmax2b := 1906.353600 (14)
```

Modifikace výměňkové sítě - přidání nového výměňku H3-C2 c

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
[> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty  
read `./Constraints2.mpl` : # omezující podmínky
```

Účelová funkce (objective function)

```
[> OF := 1000·HS + 1000·(CSI + CS2 + CS3) + 1·(pH_E1 + pH_E2 + pH_E3  
+ pH_EN) + 1·(pC_E1 + pC_E2 + pC_E3 + pC_EN) :
```

Řešení

```
[> with(simplex) :  
R2c := minimize(OF, CO2c);  
assign(R2c) :  
R2c := { } (15)
```

Výsledky:

```
[> C := CSI + CS2 + CS3; H := HS;  
Rmax2c := E1 + E2 + E3 + EN;  
C := CSI + CS2 + CS3  
H := HS  
Rmax2c := E1 + E2 + E3 + EN (16)
```

Modifikace výměňkové sítě - přidání nového výměňku H4-C2

```
[> restart;
```

Volání zadaných hodnot a omezujících podmínek:

```
[> read `./Initial.mpl` : # zadané hodnoty  
read `./Constraints3.mpl` : # omezující podmínky
```

Účelová funkce (objective function)

```
[> OF := 1000·HS + 1000·(CSI + CS2 + CS3) + 1·(pH_E1 + pH_E2 + pH_E3  
+ pH_EN) + 1·(pC_E1 + pC_E2 + pC_E3 + pC_EN) :
```

Řešení

```
[> with(simplex) :  
R3a := minimize(OF, CO3a);  
assign(R3a) :  
R3a := {CSI = 1029.936600, CS2 = 1078.914200, CS3 = 220.0268000, DTC_E1  
= 41.00000000, DTC_E2 = 41.00000000, DTC_E3 = 41.00000000, DTC_EN  
= 0., DTH_E1 = 41.00000000, DTH_E2 = 41.00000000, DTH_E3  
= 41.00000000, DTH_EN = 7.603812665, E1 = 239.0100000, E2  
= 1226.016000, E3 = 236.0050000, EN = 14.92600000, HS = 1652.031500,  
pC_E1 = 0., pC_E2 = 0., pC_E3 = 0., pC_EN = 41.00000000, pH_E1 = 0., pH_E2  
= 0., pH_E3 = 0., pH_EN = 33.39618733 } (17)
```

Výsledky:

```
[> C := CSI + CS2 + CS3;  
H := HS;  
Rmax3a := E1 + E2 + E3 + EN;  
C := 2328.877600  
H := 1652.031500  
Rmax3a := 1715.957000 (18)
```