

E priedas. Taikomosios termodinaminės analizės metodai

Entropijos generavimo minimizavimas

Bendruoju atveju antrasis termodinamiko dėsnis nusako, kad bendrasis pagamintos entropijos kiekis negali būti neigiamas:

$$\dot{S}_{gen} = \frac{dS}{dt} - \sum_{i=0}^n \frac{\Phi_i}{T_i} - \sum_{in} \dot{m}s + \sum_{out} \dot{m}s \geq 0$$

Bendrasis termodinaminio darbo perdavimas gali būti suformuluotas sujungiant PTD ir ATD :

$$\dot{W} = \frac{d}{dt}(E - T_0 S) + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \Phi_i + \sum_{in} \dot{m}(h - T_0 s) - \sum_{out} \dot{m}(h - T_0 s) - T_0 \dot{S}_{gen}$$

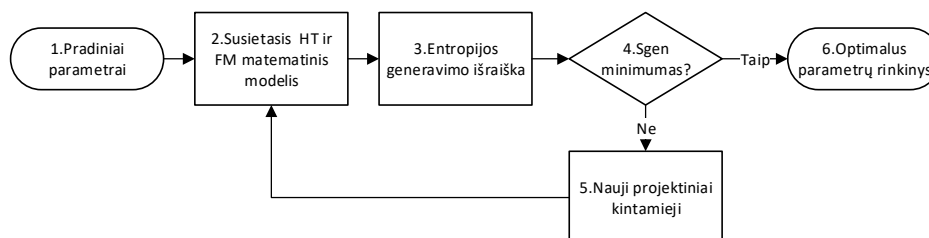
Eksergijos arba prieinamo termodinaminio darbo kiekis netenckamas proceso metu yra proporcingas pagamintos entropijos kiekiui, pagal Gouy-Stodola teoremą (Gouy 1889, Stodola 1898):

$$\dot{W}_{rev} - \dot{W} = T_0 \dot{S}_{gen}$$

Gouy-Stodola teorema leidžia teigti, kad termodinaminio proceso efektyvumas gali būti pagerintas pakoregavus komponento parametrus veikiančius entropijos gamybą, tokiu būdu sumažinant termodinaminio darbo nuostolius. Inžinerinėje praktikoje metodas orientuotas į identifikavimą ir termodinaminių negrįžtamumų sumažinimą yra žinomas kaip entropijos generavimo analizė (EGA). Šios analizės atšaka integruojanti optimizavimo metodus ieškant mažiausią entropijos generavimo intensyvumą užtikrinančio parametų rinkinio, esant nustatytiems apribojimams yra vadinamas entropijos generavimo minimizavimu (EGM). Šis metodas yra išplėtotas A.Bejan atlikto darbo ir yra išvystytas į daugiadisciplininį metodą aprėpiantį termodinamikos, skysčių mechanikos ir šilumos mainų mokslų šakas.

Entropijos generavimo minimizavimas yra deterministinių požiūrį propaguojantis metodas, kurio uždavinys gali būti apibrėžiamas entropijos generavimo kaip tikslo funkcijos minimizavimas, kai kritiniai parametrai, tokie kaip funkcionavimo sąlygos, yra matomi kaip projektiniai kintamieji. Tokiu būdu EGM analizė susideda iš optimalių parametų paieškos, užtikrinančių minimalų entropijos generavimo intensyvumą.

Literatūroje nėra gausu šio metodo taikymo schematinių algoritmų, kurie būtų tinkami tiesioginiam adaptavimui, todėl šio darbo kontekste, apibendrinant Bejan, Sciacovelli et. al. Darbus pateikiama adaptuota algoritmo versija apibendrinanti EGM metodo principus.



E.1 pav. Entropijos generavimo minimalizavimo algoritmas

Paveiksle pateikiamas algoritmas:

1. Pradiniai parametrai – optimizuojamo elemento principinė funkcija ir charakteringi parametrai apibrėžiantys šilumos mainų intensyvumą ir fluidų mechanikos procesų specifiką.
2. Susietasis šilumos mainų ir fluidų mechanikos matematinis modelis – funkcinės priklausomybės išreiškiančios komponento parametrų ir pirminių kintamųjų (fluido greičio, slėgio ir temperatūros) priklausomybes.
3. Entropijos generavimo išraiška – matematinė išraiška entropijos generavimą susiejanti su pirminių kintamųjų pokyčiu vykstant susietajam procesui elemente.
4. Pasiektas entropijos generavimo minimumas – užfiksuotos entropijos generavimo vertės minimumas per atliktą iteracijų skaičių.
5. Nauji projektiniai kintamieji – nesant aptikto vertės minimumo optimizavimo algoritmas parenka sekančią parametrų rinkinio vertę ir kartoja minimumo paieškos ciklą
6. Optimalus parametrų rinkinys – radus minimumą užtikrinantį parametrų rinkinį, pateikiamas rezultatas.

Taikant šį algoritmą randamos sąlygos kurioms esant komponentas funkcionuoja sukurdamas mažiausią kiekį termodinaminių nuostolių, esant nustatytiems apribojimams. Pasitelkus daugriterijinius optimizavimo metodus gali būti randamas parametrų rinkinys užtikrinantis absoliučiai mažiausią generuojamos entropijos kiekį. Šis dydis žymi faktiškai pasiekiamą termodinaminio efektyvumo ribą.

Analitinės entropijos generavimo minimumo išraiškos

Entropijos generavimo minimumas gali būti nustatomas atliekant optimizavimo metodais pagrįstą minimumo paiešką arba pasinaudojant publikuotų studijų rezultatais. Remiantis Bejan 1996 pateiktomis formuluotėmis gali būti išreikštas saulės kolektorių entropijos generavimo minimumas

$$S_{gen.min} = \frac{1}{T_a} \left[G \left(1 - \frac{T_a}{T_{sun}} \right) - Q_{coll} \left(1 - \frac{T_a}{T_{C.opt}} \right) \right]$$

Šildančių ir vėsinančių terminalų entropijos generavimo minimumas:

$$S_{gen.min} = mc_f \cdot \log \left[\frac{\left(1 + \frac{T_{room}}{T_f} \cdot \frac{UA}{mc_f} \right) \left(1 + \frac{T_f}{T_{room}} \cdot \frac{UA}{mc_f} \right)}{\left(1 + \frac{UA}{mc_f} \right)^2} \right]$$

Gruntinio kolektoriaus entropijos generavimo minimumas gali būti išreikštas pagal formuluotę

$$S_{gen.min} = \frac{1}{T_a} m \left[c_f (T_{f1} - T_{f2}(Re_{opt})) + \frac{\Delta P}{\rho_f} \right] + mc_f \cdot \ln \frac{T_{f2}(Re_{opt})}{T_{f1}}$$

Kur optimalus tekamės rodiklis, Re išreiškiamas kaip:

$$Re_{opt} = 1,2 \left[\frac{A\Theta_m}{(1 + \Phi)B} \right]^{4/15}$$

Išplėstinės termodinaminės analizės išreiškiami vidiniai ir išoriniai termodinaminiai negrįžtamumai

Išplėstinė termodinaminė analizės tikslas – suskaidyti identifikuotus termodinaminius negrįžtamumus pagal jų kilmę ir neišvengiamumą (Tsatsaronis, Morosuk 2001). Negrįžtamumų kilmės supratimas sudaro galimybę identifikuoti komponentus, kuriuose dominuoja sunaikintos eksergijos kiekis dėl išorinių veiksnių. Todėl pastarųjų komponentų tobulinimas nėra prasmingas, nes atliekami keitimai nešalina priežasties. Identifikavus komponentus turinčius dominuojančius vidinius veiksnius ir juos eliminavus sumažinamas neigiamas poveikis ir kitiems sistemos komponentais, su kuriais koreguojamas dėmuo yra susijęs.

Sunaikintos eksergijos kiekis, pagal išplėstinės termodinaminės analizės teoriją (Tsatsaronis et. Al) gali būti suskaidytas į dėl vidinių (endogenous) ir išorinių (exogenous) veiksnių atsirandančių termodinaminių negrįžtamumų. Kiekvieno elemento patiriami nuostoliai dėl vidinių veiksnių gali būti išreiškiami kaip tapatus komponento sunaikintam eksergijos kiekiui, kai visi kiti elementai funkcionuoja nesukurdami termodinaminių negrįžtamumų, t.y. entropijos gamyba lygi 0. Vidinių ir išorinių komponentų negrįžtamumų suskaidymas yra pagrįstas formuluote:

$$Ex_{dest} = Ex_{dest}^{EN} + Ex_{dest}^{EX}$$

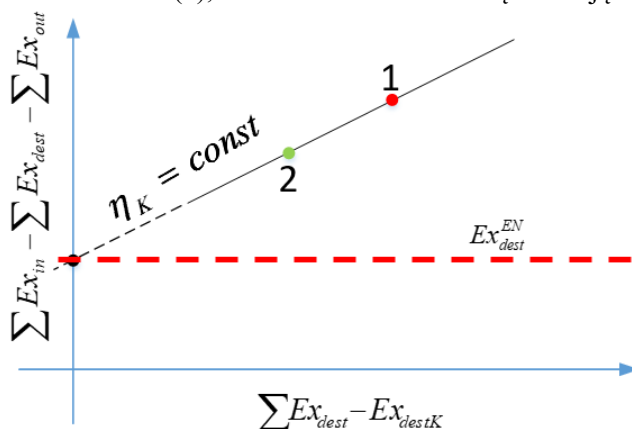
Dėl fizikinių apribojimų, sistemos komponentai negali veikti termodinamiškai idealiomis sąlygomis, nes tokiu atveju neatliks savo funkcijos. Dėl šios priežasties pasitelkiama tiesinė priklausomybė paremta aproksimacija, suformuota Kelly (Kelly 2003).

$$f(y) = (Ex_{F.tot}^{ID} - Ex_{F.tot}^{RS}) - Ex_{P.tot}$$

$$f(x) = Ex_{dest.tot} - Ex_{dest.Others}$$

Todėl, laikantis prielaidų, kad nagrinėjamo komponento efektyvumas keičiantis kitų elementų efektyvumui išlieka pastovus ir kitų elementų efektyvumas artėja prie idealaus ir galutinis eksergijos srautas paliekantis sistemos ribas išlieka pastovus, gali būti suformuota grafinė išraiška reprezentuojanti susijusių funkcijų kitimo tendenciją

Atlikus papildomas modeliavimo procedūras, nustatomas nagrinėjamos sistemos dedamosios, ribojamos kontrolinio tūrio efektyvumas ir sunaikintos eksergijos kiekis, kai kiti komponentai funkcionuoja arčiau idealaus efektyvumo ribos. Tokiu būdu gaunamas alternatyvus sistemos funkcionavimo parametų taškas (2), kuris lyginant su faktinius sistemos funkcionavimu (1), leidžia suformuoti tiesinę funkciją.



E.2 pav. Sistemos termodinaminių nuostolių kitimas, išlaikant pastovų k-tojo elemento efektyvumą nepakitusį.

Pirmasis taškas [1] reprezentuoja realų sistemos funkcionavimą

Antrasis taškas [2] reprezentuoja situaciją, kai nagrinėjamas elementas K funkcionuoja realiu efektyvumu, o visi kiti elementai turi aukštesnį efektyvumą kuriam esant entropijos generavimas artėja prie galimo minimumo (neišvengiamų eksperimento nuostolių būseną)

Prie vidinių negrįžtamųjų dominavimo sąlygų artėjančio (2) taško rodikliai gaunami atliekant papildomą simuliacijos iteraciją, kai nagrinėjamo komponento, arba jų grupės efektyvumas padidinamas taip, kad būtų artimesnis termodinamiškai idealiam procesui ir sumažėtų entropijos gamyba.

Posistemėje susidedančioje iš keletos elementų grupių, termodinaminiai nuostoliai analizuojami kiekvienam elementui, todėl papildomos simuliacijos turi būti atliekamos pakartojant efektyvumo rodiklių pakeitimo procedūrą taip, kad būtų nustatomos reikalingos charakteristikos kiekvienam elementui. Modeliavimo procedūrų logika šiame etape gali būti apibendrinta lentelėje pateiktu eiliškumu grandinei susidedančiai iš n komponentų grupių. Lentelėje apibendrinama analizės ciklo atlikimo seka

E.1 lentelė. Išplėstinės termodinaminės analizės modeliavimo derinių matrica

Table E.1. The combination matrix of extended thermodynamic analysis simulation

	Grupė 1	Grupė 2	...	Grupė n
Pradinis modeliavimas	Realus	Realus		Realus
Rodiklių gavimas 1 grupei	Realus	Idealizuotas		Idealizuotas
Rodiklių gavimas 2 grupei	Idealizuotas	Realus		Idealizuotas
...	...	...		...
Rodiklių gavimas n grupei	Idealizuotas	Idealizuotas		Realus

Elementų efektyvumas realiomis ir idealizuotomis sąlygomis išreiškimas kaip šilumos mainų ir skyčių mechanikos procesų sukurtamų termodinaminių negrįžtamųjų atsiradimą veikiančius parametrus. Tipinių elementų sutinkamų termohidrodinaminių kontūrų sistemose realios ir idealizuotos charakteristikos apibedrinamos lentelėje.

E.2 lentelė. Komponentų parametrai realiomis ir idealizuotomis sąlygomis
Table E.2. The parameters of components at real and idealized conditions

Komponentas	Realiomis sąlygomis	Idealizuotomis sąlygomis
Saulės kolektoriai	Tipiniai, projektiniai rodikliai	Nuostoliai į aplinką minimalus, ruošiama didžiausia galima temperatūra.
Šilumos siurblys	Tipiniai, projektiniai rodikliai	Veikia su minimaliu temperatūrų skirtumu kondensatoriuje ir garintuve, todėl COP arteja prie idealaus
Akumuliacinė talpa	Tipiniai, projektiniai rodikliai	Nevyksta maišymasis, skirtumas tarp įtekančio ir talpos šilumnešio temperatūrų - minimali
Šilumokaitis, šildymo/vėsinimo terminalas	Tipiniai, projektiniai rodikliai	Minimalus temperatūrų skirtumas ir minimalus slėgio nuostoliai
Hidraulinis kontūras	Tipiniai, projektiniai rodikliai	Nėra slėgio nuostolių, adiabiatinė sistema

Siekiant išlaikyti palyginamumą, tarp atskirų modeliavimo procedūrų, svarbu užtikrinti, kad visos sistemos sukuriamas produktas –energinė paslauga išliktų nepakitęs ir visais atvejais vienodas.

Suformavus tiesinę priklausomybę pagal (1) ir (2) taškus, randamas šios tiesinės funkcijos taškas, kuriame išoriniai veiksniai yra neveiksni. Tokia eiga leidžia suformuoti išraišką išreiškiančią vidinius termodinaminius negrįžtamumus komponente.

Tokiu atveju gali būti užrašoma tiesinė funkcija apibrėžianti per apskaičiuotus du taškus einančios tiesės matematinę išraišką:

$$\begin{aligned}
 (Ex_{dest.tot} - Ex_{dest.K})' = & \\
 & \frac{(Ex_{dest.tot} - Ex_{dest.K}) - (Ex_{dest.tot} - Ex_{dest.K})}{(Ex_F - Ex_P) - (Ex_F - Ex_P)} \cdot (Ex_F - Ex_P)' + \\
 & + \frac{(Ex_F - Ex_P)_1 (Ex_{dest.tot} - Ex_{dest.K})_2 -}{(Ex_F - Ex_P)_2 - (Ex_F - Ex_P)_1} - \\
 & - \frac{(Ex_F - Ex_P)_2 (Ex_{dest.tot} - Ex_{dest.K})_1}{(Ex_F - Ex_P)_2 - (Ex_F - Ex_P)_1}
 \end{aligned}$$

Iš šios tiesinės priklausomybės išreikšus vertė,kai $(Ex_F - Ex_P)' = 0$ gaunama sunaikintos eksergijos dalis atsirandanti komponente dėl vidinių veiksnių

$$EX_{dest}^{EN} = \frac{(EX_F - EX_P)_1 (EX_{dest.tot} - EX_{dest.K})_2}{(EX_F - EX_P)_2 - (EX_F - EX_P)_1} - \frac{(EX_F - EX_P)_2 (EX_{dest.tot} - EX_{dest.K})_1}{(EX_F - EX_P)_2 - (EX_F - EX_P)_1}$$

Pagal balanso lygtį, likusioji sunaikintos eksergijos dalis gali būti priskiriama išorinių veiksnių poveikiui, todėl išorinių veiksnių sukurti termodinaminiai negrįžtamumai išreiškiami priklausomybe

$$EX_{dest.tot} - EX_{dest}^{EN} - EX_{dest}^{EX} = 0$$

$$EX_{dest}^{EX} = EX_{dest.tot} - EX_{dest}^{EN}$$

Dėl komponentų tarpusavio sąveikos sistemoje, komponentai, kuriuose dominuoja išoriniai veiksniai patiria termodinaminius negrįžtamumus dėl kitų komponentų poveikio. Įdentifikavus komponentus kuriuose dominuoja vidinė negrįžtamumų kilmė, dėl komponentų tarpusavio sąsajos, galima teigti, kad dėl tokio jo funkcionavimo atsiranda nuostolių prieaugis kituose komponentuose.

Siekiant įvardyti dominuojančius veiksnius išreiškiant komponento efektyvumą, nustatomas svertinis rodiklis

$$\gamma = \frac{EX_{dest}^{EN}}{EX_{dest}^{EN} + EX_{dest}^{EX}}$$

Pasinaudojant svertinio rodiklio vertėmis, komponentų grupės gali būti išrikiuojamos pagal dominuojančius vidinius arba išorinius veiksnius.