

OPTIMALIZACE PLÁŠTĚ BUDOV

Jindřiška Svobodová¹

Úvod

Optimalizace je postup, jímž se snažíme dospět k co nejlepšímu řešení uvažovaného konkrétního problému. Mnohé praktické optimalizace vycházejí z tak jednoduché matematiky, že působí příliš „selsky“. Učit studenty jednoduchým optimalizacím, které vyústí do jakéhosi „citu pro věc“ se může zdát jako záležitost, která je pod úroveň cílů vysokoškolské matematiky. Bohužel, právě schopnost modelovat reálnou situaci jednoduchým způsobem je to, co konkrétně projektům drtivě většiny dnešních staveb budov chybí.

Cílem tohoto příspěvku je ukázat konkrétní příklad ze stavební praxe. Jak lze velmi prostými optimalizačními postupy dojít k závěru, že kvalitně zateplené budovy jsou výhodnou investicí a že i doporučené hodnoty parametrů zateplení uvedené v dnešní normě o tepelné ochraně budov jsou jen jakýmsi kompromisem mezi skutečným optimem a lobbistickými zájmy výrobců stavebních systémů.

Ač si každý z nás velmi dobře uvědomujeme cenu energie, často se podle toho nechováme. To je markantní hlavně ve stavebnictví, kde je nová norma o tepelné ochraně budov považována za odpudivého strašáka, který architektům a projektantům ztěžuje život, neboť je nutí přemýšlet o konstrukcích opláštění budov. Přitom na energetickou náročnost produktů stavebnictví by se mělo hledět ze všeho nejprísněji, neboť budovy projektujeme na životnost 100 až 200 let. Postavíme-li tedy dnes energeticky neúspornou budovu, zatížíme tímto břemenem řadu generací.

Je převážně na budoucích majitelích, zda se jim podaří vymoci si na architektech a projektantech „ústupek“ a ti jim vyprojektují energeticky úsporný dům.

Zjevně by do budoucna bylo žádoucí, kdyby dnešní studenti (budoucí architekti a projektanti) byli školou naučeni schopnosti jednoduchých optimalizací a stali se tak chápavějšími vůči požadavkům uživatelů na dobré zateplení budov.

Metody optimalizace stavebních konstrukcí

Optimalizaci - hledání nejvhodnějšího řešení lze provádět podle řady kritérií. Volba toho nejsprávnějšího kritéria obvykle vyplývá z cílů a účelu vyhodnocení. Základními ekonomickými cíli jsou snižování nákladů a zvyšování zisku. Obecně lze optimalizační kritéria rozdělit do dvou kategorií:

1. vycházející pouze z aktuálních cen stavebních systémů a energií;
2. zahrnující též jistý předpokládaný vývoj cen energie, inflace a úrokových měr úvěrů.

Jelikož lze očekávat, že nárůst cen energie bude v budoucnu vyšší než míra inflace i úrokové míry úvěrů, představují optimalizační kritéria kategorie 1. spodní odhad optimální míry zateplení budov. Optimalizační kritéria kategorie 2. jsou založeny na spekulativních předpokladech a proto nebudou v příspěvku uvažována. Z kategorie 1. lze vybrat dvě základní optimalizační kritéria:

- (a) Kritérium minimální prosté doby návratnosti.

Nevýhodou této metody je to, že neuvažuje výnosy po době splacení, nemůže proto být všeobecnou mírou pro posuzování investic. Poskytuje však důležitou informaci o riziku investice (doba splacení 2 roky je menším rizikem než doba 10 let) a o likviditě investice (ukazuje, jak dlouho bude původní kapitál v investici vázán).

- (b) Kritérium minima investic + nákladů na určitou dobu provozu (metoda současné hodnoty).

Metoda čisté současné hodnoty se doporučuje jako základní a prvotní metoda hodnocení

¹ RNDr. Jindřiška Svobodová, Ph.D., Kf PdF Masarykova univerzita v Brně, svobodova@ped.muni.cz

efektivnosti investic. Doba provozu vystupující v kritériu (b) nesmí převýšit předpokládanou životnost systému či zařízení, na druhé straně by měla představovat podstatnou část životnosti. V případě staveb je vhodné zvolit dobu např. 30 let (doba odpisu staveb je 35 let), i když ani doba blízká 80-100 letům není s ohledem na předpokládanou životnost stavebních konstrukcí a očekávaný vývoj cen energie nerealná.

Metoda současné hodnoty je založena na předpokladu, že je, mimo jiné, známa životnost systému n v rocích a dále že je známa úroková míra úvěru p a procento ročního vzestupu ceny energie q . Pak můžeme vypočítat tzv. násobitel n^* jako

$$n^* = \frac{\left(\frac{1 + q/100}{1 + p/100} \right)^n - 1}{\left(\frac{1 + q/100}{1 + p/100} \right) - 1} \quad (1)$$

Násobitel n^* hraje v metodě současné hodnoty úlohu námi uvažované doby provozu (30 let). V případě, že $p=q$ vychází $n^*=n$, pro $p>q$ je $n^*<n$ a pro $p<q$ je $n^*>n$.

Pro zajímavost pro $n=50$, $p=6\%$ a $q=10\%$ vychází $n^*=142$. Tyto uvažované hodnoty nejsou z dnešního pohledu nijak nereálné. Kdybychom brali takto vypočítaný násobitel n^* vážně, byly by doporučené tloušťky izolací více jak dvojnásobné než ty, ke kterým dospějeme, vezmeme-li v následných optimalizacích velmi střízlivou hodnotu doby provozu 30 let.

Doba provozu v kritériu (b) však není jedinou nejistotou v optimalizačních kritériích. V optimalizačních kritériích vystupuje cena energie, která je z různých zdrojů různá a je dána cenou vstupů a amortizací zařízení na výrobu tepla. Podobně je značný rozdíl v ceně dodávek různých stavebních systémů od různých stavebních firem. Není proto možné výsledky získané na základě optimalizačních kritérií přeceňovat. Svou významnou roli v rozhodovacím procesu jak moc dobře dům zateplit jistě hraje i již zmíněná skutečnost, že stavbou velmi dobře zateplené budovy významně snížíme riziko nutnosti budovu v budoucnosti nákladně dodatečně zateplovat. I přes všechny uvedené výhrady však lze považovat optimalizační kritéria jako významný nástroj pro hodnocení a srovnání různých stavebních zateplovacích systémů a pro vyvážení investic do jednotlivých úsporných opatření.

Optimalizace obvodové stěny budovy

Obvodová stěna většinou plní tři základní funkce: statickou – nese podstatnou část tíhy budovy, akumulaci – významnou měrou přispívá k akumulaci tepla i vlhkosti, a tepelně izolační.

Z hlediska statického je nutné, aby obvodové zdi masivních staveb měly tloušťku adekvátní statickému výpočtu, obvykle alespoň 25cm (pokud není pro stavbu obvodových zdí použit beton). Pro rodinné domy se často pro stavbu obvodových zdí používají vylehčené izolační cihelné tvárnice nebo pórobetonové tvárnice. V obou případech je obvyklé, že obvodová zeď je homogenní a pro dosažení tepelného odporu předepsaného normou je třeba, aby zeď měla tloušťku mezi 36 a 45cm. V těchto případech obvodové zdivo plní všechny tři výše zmíněné funkce, i když funkce akumulaci a tepelně-izolační nepřilíhají dobře.

Zjevně podstatně lépe plní zmíněné funkce sendvičová (vrstevnatá) stěna, kdy vnitřní část obvodové stěny je vyzděna z nepřilíhajícího a dobře akumulujícího zdiva o tloušťce 25cm a druhou venkovní vrstvu tvoří tepelná izolace – např. fasádní pěnový polystyrén se stěrkovou omítkou. V tomto případě každý materiál plní jen ty funkce, ke kterým má dobré předpoklady, tj. cihla nese a akumuluje a pěnový polystyrén tepelně izoluje. Oba typy obvodových stěn podrobíme optimalizační analýze.

Pro aplikaci optimalizačních kritérií je třeba znát ceny příslušných stavebních materiálů včetně

práce za jejich zabudování, jejich tepelné vlastnosti a cenu energie. Koeficienty tepelných vodivostí materiálů najdeme v příslušných tabulkách či firemních prospektech.

Pro výpočty můžeme vycházet z hodnot tepelné vodivosti pro izolační cihelnou tvárnici i pórobeton přibližně stejnou $\lambda = 0,17 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, pro běžné cihlové zdivo $\lambda = 0,8$ až $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a pro pěnový polystyrén $\lambda = 0,04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Obvyklá cena za 1 m^3 zdiva ze všech uvažovaných materiálů je 2500 Kč . Běžná cena venkovní omítky je 150 Kč/m^2 . V případě zateplování kontaktním systémem na bázi pěnového polystyrénu je obvyklá cena dána cenou pěnového polystyrénu (1500 Kč/m^3) + práce (včetně venkovní fasádní omítky) a další materiál v ceně 500 Kč/m^2 .

Cenu tepla předpokládáme 1 Kč/kWh . Za rok předpokládáme $\tau = 212 \cdot 24 \text{ hodin}$ topné sezóny o průměrné teplotě 4°C . Teplotu vzduchu v obytných místnostech předpokládáme 21°C , tedy $\Delta T = 17 \text{ K}$.

Pro jednoduchost budeme při všech analýzách předpokládat koeficienty přestupu tepla mezi stěnami a vzduchem za nekonečně velké. Tento předpoklad je oprávněný pro výpočty tepelných charakteristik dobře izolujících stěn.

Homogenní stěna

Pro případ homogenní stěny z izolačních tvárníc nebo z pórobetonu o tloušťce d je její cena C_1 v Kč za 1 m^2 včetně venkovní omítky

$$C_1 = 2500d + 150. \quad (2)$$

Součinitel prostupu tepla této stěny k_1 v $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ je

$$k_1 = 0.17 / d. \quad (3)$$

Množství tepla Q_1 v kWh, které projde 1 m^2 stěny za rok je dáno $Q_1 = \tau \cdot \Delta T \cdot k_1 \cdot 0.001$

$$Q_1 = 212 \cdot 24 \cdot 17 \cdot k_1 \cdot 0.001 = 86.5k_1. \quad (4)$$

Q_1 též představuje díky volbě 1 Kč/kWh zároveň cenu v Kč za teplo, které projde 1 m^2 obvodové stěny za rok. Můžeme tedy stanovit účelovou funkci představující cenu investice + náklady na prošlé teplo za 30 let jako

$$f_1(d) = C_1 + 30Q_1 = 2500d + 150 + 441 / d \quad (5)$$

Účelová funkce má minimum 2250 Kč.m^{-2} pro tloušťku stěny $d = 42 \text{ cm}$. Tepelný odpor stěny je $R = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$

Složená vícevrstvá stěna

Cena v Kč 1 m^2 cihlové zdi o tloušťce 25 cm zateplená pěnovým polystyrénem o tloušťce d_p včetně venkovní stěrkové omítky je

$$C_2 = 1125 + 1500 \cdot d_p. \quad (6)$$

Součinitel přestupu tepla této stěny k_2 v $Wm^{-2}K^{-1}$ je (bereme-li v úvahu běžné cihlové zdivo s $\lambda=1Wm^{-1}K^{-1}$)

$$k_2 = \frac{1}{(0.25 + 25 \cdot d_p)} . \quad (7)$$

Účelová funkce odpovídající investici + 30letým nákladům na teplo je pak

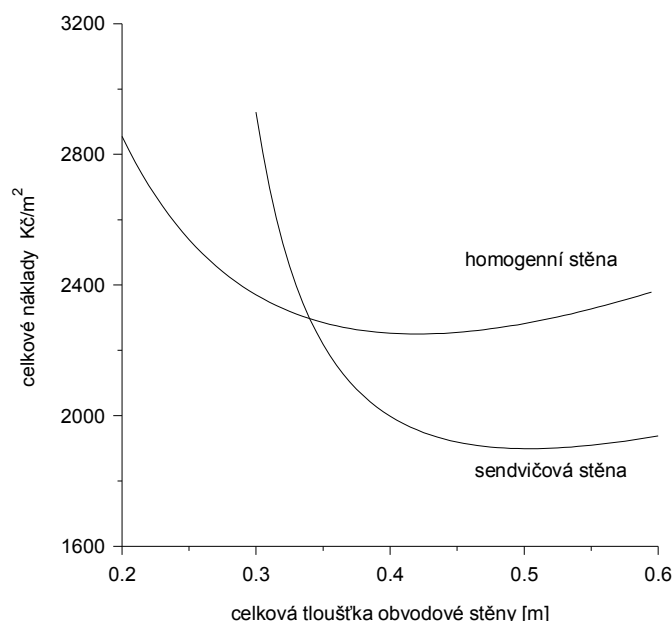
$$f_2(d_p) = C_2 + 30.86,5.k_2 = 1125 + 1500 \cdot d_p + \frac{10380}{1 + 100d_p} . \quad (8)$$

Účelová funkce nabývá minima 1900Kč.m² pro tloušťku polystyrénu $d_p=25cm$. Tepelný odpor stěny je $R=6,5m^2K/W$.

Průběhy obou účelových funkcí v závislosti na celkové tloušťce obvodové stěny jsou znázorněny na obrázku 1. Z něj je vidět, že z hlediska celkových nákladů je sendvičová stěna nezanedbatelně výhodnější. Obě stěny mají své nedostatky i přednosti. Stavba stěny s homogenní konstrukcí je na 1m² o 300Kč levnější než sendvičová stěna. Dále je venkovní omítka na stěně s homogenní konstrukcí méně zranitelná a nejsou problémy s instalací předmětů na venkovní fasádu.

Na druhé straně každý 1m² sendvičové stěny ušetří 10W instalovaného topného výkonu v domě, což lze ohodnotit asi na 100Kč (počítáme, že tepelný zdroj 1kW instalovaného topného výkonu vyjde na asi 10 000Kč). Dále každý 1m² sendvičové stěny ušetří ročně 22kWh v ceně 22Kč. Považujeme-li homogenní stěnu o síle 42cm jako základ a naproti ní dražší sendvičovou stěnu tvořenou 25cm zdiva a 25cm izolace jako investici, její prostá doba návratnosti je asi 9let.

Další předností vrstevnaté konstrukce je, že tato konstrukce stěny umožní prakticky dokonalé odstranění tepelných mostů v plášti budovy, což přináší další úspory tepla a vylučuje vznik plísní na stěnách. Nezanedbatelné je zvýšení tepelné pohody a teplotní setrvačnosti budovy. Mohou vzniknout obavy, že zateplení pěnovým polystyrénem bude mít nižší životnost než zbytek stavby, a plášť budovy stejně bude potřeba rekonstruovat. Zde si je však třeba uvědomit, že stavba se sendvičovými zdmi již počítá s prostorem na izolaci a tudíž rekonstrukce bude bezproblémová.



Obr. 1. Srovnání celkových nákladů za 30let pro homogenní a sendvičovou stěnu.

Optimalizace zasklení oken

Okna zaznamenala v posledních desetiletích velký pokrok co se týče těsnosti, tepelně-izolačních vlastností i životnosti. Přesto lze v praxi najít řadu případů, které svědčí o minimálním povědomí projektantů o úsporách energie.

Mezi vážné prohřešky v obytných budovách patří používání lepených dvojskel bez nízkoemisní vrstvy na vnitřním povrchu. Běžné lepené dvojsklo má součinitel přestupu tepla $k = 2,9 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ a stojí asi 500 Kč/m^2 . Dvojsklo s měkkou nízkoemisní vrstvou plněné argonem (izolační dvojsklo) má součinitel přestupu tepla $k = 1,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ a stojí asi 900 Kč/m^2 . Dnes je třeba brát v úvahu i zasklení trojvrstevným sklem (izolační trojsklo), které má součinitel přestupu tepla $k = 0,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ a stojí asi 1500 Kč/m^2 .

Máme tedy k dispozici tři základní varianty zasklení oken, pro něž můžeme vypočítat cenu investice + cenu prošlého tepla za 30 let. V případě obyčejného dvojskla je cena investice + cena prošlého tepla za 30 let asi 8000 Kč/m^2 , v případě izolačního dvojskla je to asi 3750 Kč/m^2 a v případě izolačního trojskla je to asi 3300 Kč/m^2 . Podle tohoto výpočtu tedy vychází izolační trojsklo nejlépe. Zde však je třeba podotknout, že izolační trojsklo kvůli své větší tloušťce a vyšší hmotnosti nelze dát do standardních rámců eurooken. Navíc izolační trojsklo propouští o asi 20% procent méně světla i sluneční energie do interiéru než izolační dvojsklo, a tedy by měla mít okna s trojím zasklením o 20% větší plochu. Tím je výhoda izolačního trojskla úplně smazána.

Lze tedy konstatovat, že dnes standardně používaná eurookna se zasklením izolačním dvojsklem lze považovat za optimální variantu řešení otvorových výplní.

Závěr

Optimalizační výpočty ukázaly, že projektování obvodových stěn s homogenní konstrukcí lze považovat za špatné řešení. Bohužel, lobbistické tlaky výrobců cihelných a pórobetonových tvárnic jsou velmi silné a zřejmě budou mít i do budoucna značný brzdný účinek na myšlení projektantů.

Má-li se stát absolvent stavební fakulty dobrým projektantem, musí být schopen pružně provádět jednoduché výpočty, odhady a optimalizace. K tomu by měl být veden již průběhu studia.

Matematické vzdělávání vysokoškoláků bude přínosnější, bude-li pěstovat zvědavost a schopnost kritického myšlení. Pro praxi jsou tyto dovednosti u průměrného absolventa podstatně důležitější, nežli formálně zvládnutá vyšší matematika.