VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební
práce ve studijním programu 36 07 V

NÍZKONÁKLADOVÝ NÍZKOENERGETICKÝ DŮM

Klíčová slova:

Nízkoenergetický dům, pasivní dům, snižování energetické náročnosti budov, dynamická simulace teploty v nízkoenergetické budově

Přínos
V této práci se pokusíme nalézt vhodná řešení jednotlivých prvků obvodového pláště nízkonákladového nízkoenergetického domu a vyjádřit jejich optimální koncepční souhru. Podobně se budeme zabývat optimálním řešením aktivních systému. Navazující text se týká výpočtů a také ověření vlastností realizovaného nízkonákladového domu pomocí modelové simulace. Výsledkem bude srovnání nízkoenergetického a běžného rodinného domu stejného typu.

4.1 Optimalizace prvků obvodového pláště budovy
Optimalizaci - hledání nejpříhodnějšího řešení lze provádět podle řady kritérií. Volba toho nejsprávnějšího kritéria obvykle vyplyne z cílů a účelu vyhodnocení. Základními ekonomickými cíli jsou snižování nákladů a zvyšování zisku. Obecně lze optimalizační kritéria rozdělit do dvou kategorií:
vycházející pouze z aktuálních cen stavebních systémů a energií;
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 práci používána. Z kategorie 1 lze vybrat dvě základní optimalizační kritéria:

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

Metoda čisté současné hodnoty [6,13,16] se doporučuje jako základní a prvotní metoda hodnocení 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 předpokládaný vývoj cen energie nereálná.

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

$$n^* = \frac{\left(\frac{1+q/100}{1+p/100}\right)^n - 1}{\left(\frac{1+q/100}{1+p/100}\right) - 1} \quad . \qquad [4.1]$$

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 při uvažované době 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.

4.1.1 Optimalizace obvodové stěny budovy

Obvodová stěna většinou plní tři základní funkce: statickou – nese podstatnou část tíhy budovy, akumulační – podstatnou 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 25*cm* (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 45*cm*. V těchto případech obvodové zdivo plní všechny tři výše zmíněné funkce, i když funkce akumulační a tepelně-izolační nepříliš dobře.
Zjevně podstatně lépe plní zmíněné funkce sendvičová (vrstevnatá) stěna, kdy vnitřní část obvodové stěny je vyzděna z nepříliš dobře izolujícího a dobře akumulujícího zdiva o tloušťce 25*cm* 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.
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.

Vstupní údaje a vztahy

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

Obvyklá cena za $1m^3$ zdiva ze všech uvažovaných materiálů je $2500Kč$. Běžná cena venkovní omítky je $150Kč/m^2$. V případě zateplování kontaktním systémem na bázi pěnového polystyrénu je obvyklá cena dána cenou pěnového polystyrénu ($1500Kč/m^3$) + práce (včetně venkovní fasádní omítky) a další materiál v ceně $500Kč/m^2$. [10]

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

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

Homogenní stěna z izolačních tvárnic

Je-li tloušťka stěny z izolačních cihlových tvárnic nebo z pórobetonu d je její cena C_1 v Kč za $1m^2$ včetně venkovní omítky

$$C_1 = 2500d + 150 . \qquad [4.2]$$

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

$$k_1 = 0.17 / d .$$

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

$$Q_1 = 212 \cdot 24 \cdot 17 \cdot k_1 \cdot 0.001 = 86.5 k_1 . \qquad [4.3]$$

Q_1 též představuje díky volbě $1Kč/kWh$ zároveň cenu v $Kč$ za teplo, které projde $1m^2$ obvodové stěny za rok.

Bereme-li stěnu o tloušťce $25cm$ jako výchozí stav a její tloušťku nad $25cm$ považujeme za investici do zateplení, pak prostou dobu t návratnosti v rocích pro stěnu tloušťky $d > 0.25m$ můžeme vypočítat z rovnice

$$2500(d - 0.25) = 86.5 \cdot 0.17(1/0.25 - 1/d) \cdot t , \qquad [4.4]$$

kde na levé straně je rozdíl cen pořízení, na pravé straně je rozdíl v úniku tepla, mezi případem stěny tloušťky $0{,}25m$ a stěny tloušťky d, tedy po úpravě

$$t = 170 \cdot \frac{d - 0.25}{4 - 1/d} = 42.5 \cdot d . \qquad [4.5]$$

Funkce $t(d)$ je v celém otevřeném intervalu $(0.25, \infty)$ lineárně rostoucí a tudíž je minimální prostá doba návratnosti t_{min} pro $d \to 0{,}25m$.

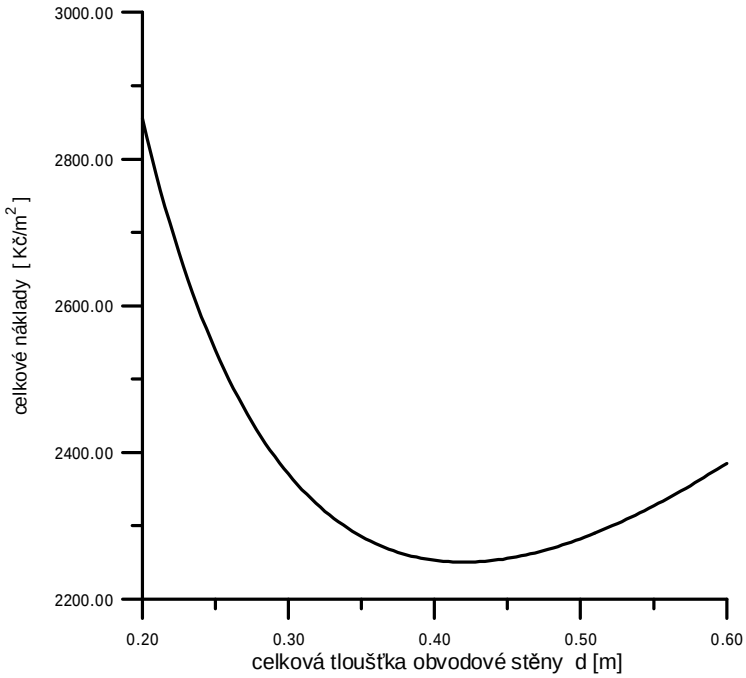
Zvolíme-li jako výchozí jakoukoli jinou tloušťku stěny D, bude podle výše uvažovaného kritéria minimální prostá doba návratnosti opět pro $d \to D$. Obecně lze říct, že není-li investice spojena s nějakou konstantní částkou nezávislou na d, bude minimální prostá doba návratnosti vždy pro hodnotu $d \to D$. Nelze tedy minimální prostou dobu návratnosti pro námi uvažovaný model vyhodnotit.

Pro kritérium minima investice + $30let$ provozu je třeba minimalizovat funkci $f(d) = C_1 + 30Q_1$. [4.6]

$$f(d) = 2500 \cdot d + 150 + 30 \cdot t \cdot \Delta T \cdot k_1 = 2500 \cdot d + 150 + 30 \cdot 212 \cdot 24 \cdot 17 \cdot \frac{0{,}17}{d} \cdot 0{,}001 \to \min$$

Souřadnice minima: celk. tloušťka stěny d=0.42m, celk.náklady=2250Kč.m^{-2} .

Průběh této funkce je znázorněn na Obr.6.



Obr. 1 Závislost celkových nákladů na tloušťce homogenní stěny

Minima nabývá tato funkce pro *d=0,42m* při nákladech na $1m^2$ zdiva s vnější omítkou 1200*Kč* a nákladech na energii za 30*let* 1050*Kč*. Tepelný odpor zdiva je R=2,5m^{2}K/W. Je třeba podotknout, že tato hodnota tepelného odporu dobře koresponduje se stávající normou.

Složená vícevrstvá stěna - tzv. „sendvičová“.

Cena v *Kč* $1m^2$ cihlové zdi například s $l=1Wm^{-1}K^{-1}$ o tloušťce 25*cm* (pak k_{cihl}=4 $Wm^{-2}K^{-1}$) zateplená pěnovým polystyrénem o tloušťce d_p včetně venkovní stěrkové omítky je

$$C_2 = 1125 + 1500 \cdot d_p . \qquad [4.7]$$

Součinitel přestupu tepla této stěny k_2 v $Wm^{-2}K^{-1}$ je

$$\frac{1}{k_2} = \frac{1}{k_{cihl}} + \frac{1}{k_p} = \frac{0.25}{1} + \frac{d_p}{0.04}, \qquad [4.8]$$

tedy

$$k_2 = \frac{1}{(0.25 + 25 \cdot d_p)} . \qquad [4.9]$$

Vezměme nyní cihlovou stěnu o tloušťce 25*cm* jako základ a zateplení pěnovým polystyrénem tloušťky d_p považujme za investici.

Prostou dobu návratnosti t pak získáme z rovnice

$$1125 + 1500 \cdot d_p - (2500 \cdot 0.25 + 150) = 86.5(4 - k_2) \cdot t$$

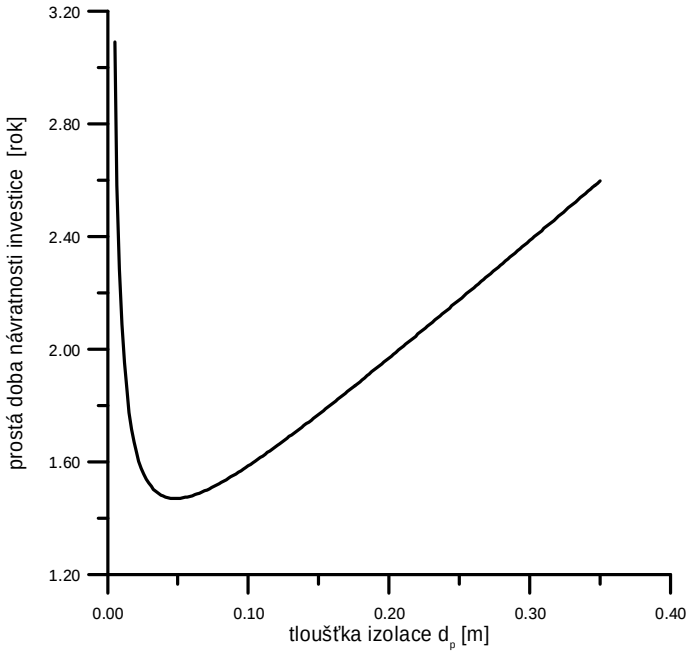
neboli

$$1500 d_p + 350 = 86.5(4 - k_2) \cdot t ,$$

neboli

$$t = 4.33(d_p + 0.233)(d_p + 0.01)/d_p \qquad [4.10]$$

Průběh funkce $t(d_p)$ je znázorněn na Obr.7.

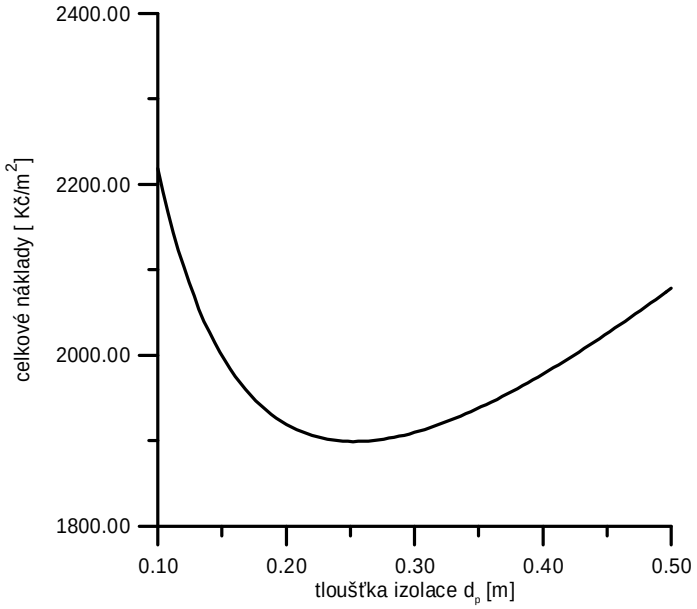


Obr. 2 Závislost prosté doby návratnosti zateplení na tloušťce izolace.

Minimální prostá doba návratnosti je 1,5*roku* pro tloušťku pěnového polystyrénu 5*cm* a s hodnotou tepelného odporu stěny R=1,5m^2K/W. Z grafu je vidět, že prostá doba návratnosti pro tloušťku pěnového polystyrénu tloušťky 25*cm* je stále velmi nízká - pouze 2,2*roku*.

Pro kritérium minima investice + 30*let* nákladů na provoz je třeba minimalizovat funkci C_2+30*86,5*k_2. Průběh této funkce je znázorněn na obr.8.

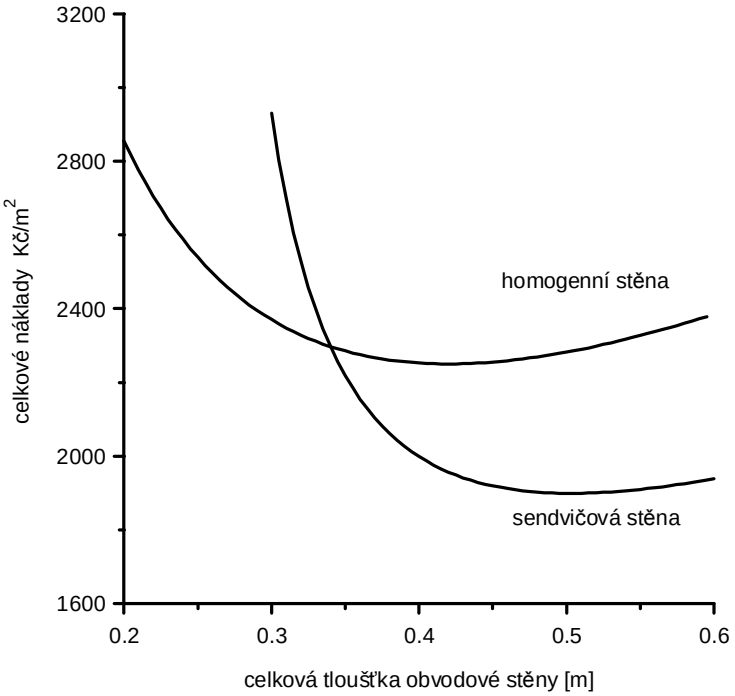
$$f(d) = 1125 + 1500 \cdot d_p + 30 \cdot 86.5 \cdot \frac{1}{(0.25 + 25 \cdot d_p)} = \min . \qquad [4.11]$$



Obr. 3 Závislost celkových nákladů za 30*let* na tloušťce izolace d_p

Minima nabývá funkce pro d_p=0,25*m* při nákladech na 1m^2 stěny s vnější omítkou 1500*Kč* a nákladech na energii za 30*let* 400*Kč*.
Tepelný odpor takovéto stěny je R=6,5m^2K/W.

Srovnejme nyní obě řešení obvodové stěny:

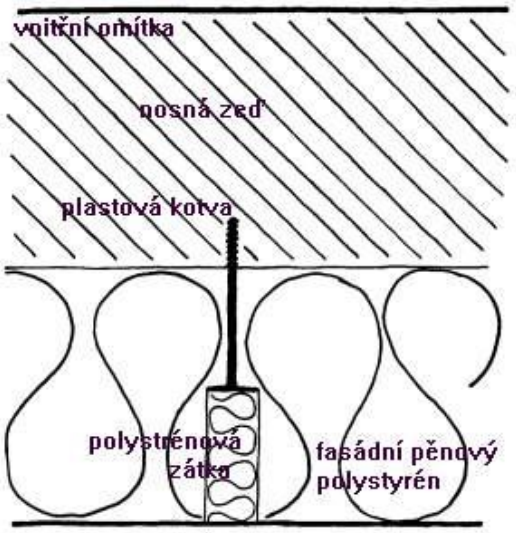


Obr. 4 Srovnání celkových nákladů za 30*let* pro homogenní a sendvičovou stěnu.

Z obrázku obr.9 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 1m^2 o 300*Kč* 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 1m^2 sendvičové stěny ušetří 10*W* instalovaného topného výkonu v domě, což lze ohodnotit asi na 100*Kč* (počítáme, že tepelný zdroj 1*kW* instalovaného topného výkonu vyjde na asi 10 000*Kč*). Dále každý 1m^2 sendvičové stěny ušetří ročně 22*kWh* v ceně 22*Kč*. Považujeme-li tedy homogenní stěnu o síle 42*cm* jako základ a naproti ní dražší sendvičovou stěnu tvořenou 25*cm* zdiva a 25*cm* izolace jako investici, její prostá doba návratnosti bude asi 9*let*.

Jak bude ukázáno později, vrstevnatá (sendvičová) konstrukce stěny umožní prakticky dokonalé odstranění tepelných mostů v plášti budovy, což přináší další úspory tepla. Nezanedbatelné je zvýšení tepelné pohody a teplotní setrvačnosti budovy, což bude též dále v práci rozebráno.
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 z prostorem na izolaci a tudíž rekonstrukce bude bezproblémová. Proti stěně se silnou izolací pěnovým polystyrénem lze namítat, že většina dodavatelů zateplovacích systémů systémy v těchto tloušťkách vůbec nedodává, protože považuje kotvení tak tlusté izolace za složité a drahé. Tento problém

řeší velmi elegantně a levně firma Novopol způsobem, jak je znázorněno na Obr. 10.



Obr. 5 Způsob kotvení polystyrénové izolace o velké tloušťce podle fy. Novopol.

Zde je třeba uvést komentář, proč jsou námi vypočtené optimální tloušťky izolací zhruba dvojnásobné, než ty, jež jsou doporučeny normou nebo ty, které vyšly optimalizací řadě autorů článků podle prakticky totožného kritéria. Klíčem k pochopení této nesrovnalosti je extrémní nereálný nárůst ceny zateplení v závislosti na tloušťce izolace. Autoři článků běžně počítají se zvýšením ceny na $1m^2$ o 40-50$Kč$ za 1cm izolace (my uvažujeme 15$Kč$ za 1cm). Autoři argumentují dramatickým nárůstem cen kotvících prvků, zakládacích lišt či okenních parapetů. Přitom při zvyšování tloušťky izolace se prakticky pracnost téměř neměnní a nárůst ceny materiálu (kromě pěnového polystyrénu) je opravdu jen nepatrný.

Jako příklad lze uvést cenu za kotvení izolace od firmy Novopol. Cena jedné plastové kotvy v délce 17cm je dnes nižší než 3$Kč$ a cena polystyrénové zátky je asi 1$Kč$. Kotvící prvky na $1m^2$ izolace o tloušťce 25cm tedy stojí méně než 30$Kč$. Je tedy třeba konstatovat, že proces optimalizace je nutno spojit i s nalezením vhodné dodavatelské a prováděcí firmy. Ukazuje se, že možnosti homogenních obvodových stěn již pravděpodobně vyčerpaly svůj potenciál a měly by být nahrazeny složenými - sendvičovými konstrukcemi.

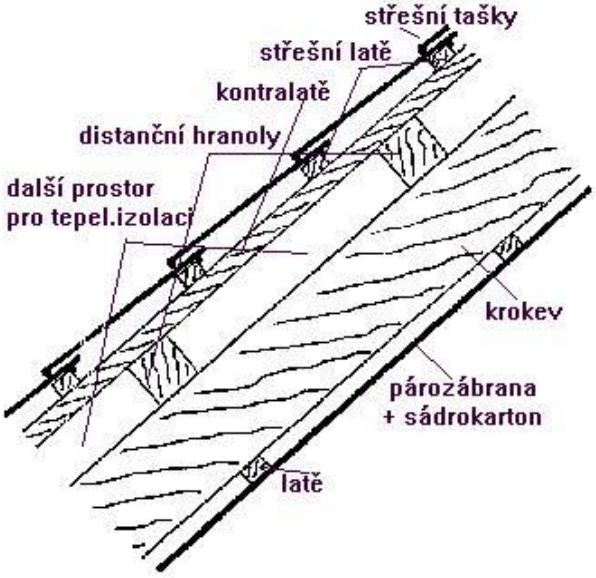
4.1.2 Optimalizace zateplení střešní konstrukce

Existuje celá řada vyzkoušených střešních konstrukcí. V případě moderních střešních konstrukcí, kdy možnost zatékání dešťové vody je minimalizována, nejvážnější problém střech představuje kondenzace vzdušné vlhkosti, která může vážně poškozovat střešní nosnou konstrukci a degradovat tepelnou izolaci. Tento problém většinou řeší kvalitní parotěsná zábrana na vnitřní straně střešní konstrukce, která efektivně brání pronikání vzdušné vlhkosti z interiéru do střešní konstrukce. Jelikož parozábrana není nikdy dokonalá, každou střešní konstrukci je třeba odvětrávat prouděním venkovního vzduchu nebo umožnit dobrou difúzní komunikaci střešní konstrukce s venkovním prostorem.

Jediným problémem v řešení dobré tepelné izolace střechy je tedy otázka, jak je možné zabudovat do střechy dostatečnou vrstvu tepelné izolace.

V případě rovných jednoplášťových střech by nemělo být problém zvětšovat tloušťku izolace, aniž bychom museli provádět zvláštní opatření. Podobně u rovných dvouplášťových střech je konstrukce kvalitativně nezměněna, je třeba pouze počítat s větším prostorem pro tepelnou izolaci.

Pro rodinné domky je dnes standardně používaná sedlová střecha. Izolace střechy se běžně provádí v prostoru mezi krokvemi nebo méně často nad krokvemi speciálními tvarovkami z pěnového polystyrénu nesoucími střešní tašky [17]. Jestliže je výška krokví kolem 20*cm*, kombinací obou systémů lze dosáhnout patřičného izolačního efektu.
K pěnovému polystyrénu nesoucímu střešní tašky však nemusí být plná důvěra a tento systém též nepředstavuje nejlevnější řešení. Je tedy třeba hledat způsob, jak získat další prostor mezi krokvemi a střešní krytinou. Jedno z možných řešení je zobrazeno na Obr.11.



Obr. 6 Návrh konstrukce šikmé střechy s dostatečným prostorem pro tepelnou izolaci.
Prostor lze získat odsazením kontralatí od krokví distančními hranoly. Tím získáme další prostor o tloušťce větší než 10*cm*, navíc se podstatně redukuje tepelný most způsobený krokvemi. Je též podstatné, že krokve představující nosnou konstrukci střechy jsou v prostoru s teplotou blízkou teplotě interiéru, kde nejsou podmínky pro kondenzaci vodní páry, což snižuje nebezpečí degradace krokví.
Konstrukcí sedlových střech je celá řada. Každopádně je třeba rozlišovat střechy s difúzně propustnou krytinou (nejběžněji střešní taška) a difúzně nepropustnou krytinou (např. plech). Střechy s difúzně nepropustnou krytinou je třeba provětrávat. Střechy s difúzně propustnou krytinou provětrávány být nemusí - kvalitní parozábrana a difúzní komunikace s venkovním prostorem by měly zaručit bezpečnost střechy. V takovém případě může být celý prostor střešní konstrukce vyplněn tepelnou izolací např. minerální vlnou.

Výpočet pro optimalizaci
Pro výpočet minimální doby návratnosti u sedlové střechy můžeme považovat za základ stav, kdy je prostor mezi krokvemi o výšce 20*cm* vyplněn minerální vlnou. V tomto případě budeme uvažovat ekvivalentní koeficient tepelné vodivosti výplně $l = 0{,}055 Wm^{-1}K^{-1}$. Tento koeficient snížíme na hodnotu $l = 0{,}050 Wm^{-1}K^{-1}$ v případě, že mezi krokvemi a kontralatěmi vznikne další prostor vyplněný minerální vlnou a tepelný most způsobený krokvemi je redukován. Náklady na vytvoření prostoru mezi krokvemi a kontralatěmi lze odhadnout na 100 $Kč/m^2$. Cenu minerální vlny předpokládáme 1200$Kč/m^3$.

Součinitel přestupu tepla k_3 v $Wm^{-2}K^{-1}$ střechy v základním stavu je
$k_3 = 0.055 / 0.2 = 0.275$
Součinitel přestupu tepla k_4 v $Wm^{-2}K^{-1}$ střechy s celkovou výškou izolace d_v je
$k_4 = 0.05 / d_v$

Cena investice C_4 v *Kč/m*^{2} je
$C_4 = 100 + 1200(d_v - 0.2)$.
Dobu návratnosti investice *t* v rocích spočítáme z rovnice
$C_4 = 86.5(k_3 - k_4)t$. [4.12]
Minimální doba návratnosti investice je *t* = 23,5 *roku* a tomu odpovídá tloušťka d_v=29*cm* při tepelném odporu *R*=5,8 *m*^{2}*K/W*. Cena investice je 208 *Kč/m*^{2}.

Vezmeme-li za kritérium minimum investice + 30*let* provozu, hledáme minimum funkce C_4+30*86,5 k_4.
$100 + 1200(d_v - 0.2) + 30 \cdot 86{,}4 \cdot k_4 \rightarrow \min$. [4.13]
Minima nabývá funkce pro d_v=0,33*m* při investici na 1*m*^{2} střechy 256*Kč* a snížení nákladů na energii za 30*let* je 320*Kč*. Tepelný odpor střechy je *R*=6,6 *m*^{2}*K/W*.
Každý 1*m*^{2} střechy tedy sníží potřebný výkon otopného systému o 5*W*, což znamená, že se investice na 1*m*^{2} střechy sníží o asi 50*Kč* tedy na 206*Kč*. Prostá doba návratnosti investice je pak 19 *let*.

4.1.3 Optimalizace tepelné izolace podlahy nad studeným podložím

Pro výšku izolace v podlaze v přízemí nad studeným podložím nemáme v podstatě u nově navrhovaných staveb žádná omezení. Stejně jako u homogenních stěn ani v tomto případě nelze k optimalizaci použít kritérium minimální doby prosté návratnosti investice.

Pro výpočet minimální investice + nákladů na topení za 30*let* použijeme již výše uvedené hodnoty pro pěnový polystyrén. Dále počítejme, že průměrná teplota podloží v období topné sezóny je 10°*C*. Je-li tloušťka izolace v podlaze d_i, její cena za 1*m*^{2} C_5 je
$C_5 = 1500 d_i$
a součinitel přestupu tepla k_5 v *Wm*$^{-2}$*K*$^{-1}$ bude
$k_5 = 0.04 / d_i$.
Hledáme minimum funkce C_5*+30*56,0** k_5 ® *min.* [4.14]
Minima nabývá funkce pro d_i=0,21m při investici na 1*m*^{2} podlahy 317*Kč* a nákladech na energii za 30*let* 320*Kč*. Tepelný odpor podlahy je *R*=5,25*m*^{2}*K/W*.

Běžně je dnes podlaha izolována 8*cm* polystyrénu. Považujeme-li tuto tloušťku jako základ bude investice na 1*m*^{2} 195*Kč* a roční úspora 17*Kč*. Každý 1*m*^{2} podlahy sníží potřebný výkon otopného systému o 4*W*, což znamená, že se investice na 1*m*^{2} podlahy sníží o asi 40*Kč* tedy na 155*Kč*. Prostá doba návratnosti investice je pak 9*let*.

4.1.4 Optimalizace tepelné izolace oken

Okna zaznamenala v posledních desetiletích velký pokrok co se týče těsnosti, tepelněizolačních 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 *Wm*$^{-2}$*K*$^{-1}$ zatímco dvojsklo s měkkou nízkoemisní vrstvou má součinitel přestupu tepla *k*= 1,4 *Wm*$^{-2}$*K*$^{-1}$.
Je-li dvojsklo plněno argonem, uvádí se [Halahyja] jeho součinitel přestupu tepla *k*= 1,1 *Wm*$^{-2}$*K*$^{-1}$. Dvojsklo s tímto součinitelem přestupu tepla je asi o 500*Kč/m*^{2} dražší než obyčejné dvojsklo.

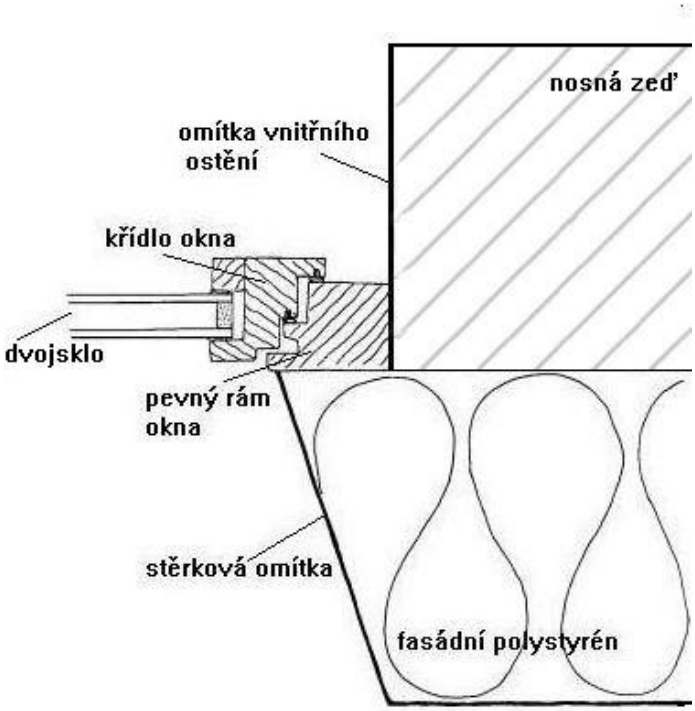
Úspora energie za rok na $1m^2$ izolačního skla činí $147Kč$ a prostá návratnost investice je necelé $4roky$. Počítáme-li navíc, že každý $1m^2$ izolačního skla nám ušetří $68W$ na otopném systému, vydělá nám již při stavbě každý $1m^2$ izolačního skla $180Kč$. Navíc nám za $30let$ $1m^2$ izolačního skla ušetří $4410Kč$, což je více jak čtyřnásobkem pořizovací ceny izolačního dvojskla.
Pravděpodobně nejúčinnějším východiskem ze stávající situace by bylo, kdyby vyhláška běžná dvojskla zakázala ve vytápěných obytných objektech nově instalovat.

Dalším energeticky slabým místem je používání oken v místnostech, kde žádná okna nejsou potřeba. V koupelnách a na toaletách může být jen umělé osvětlení a větrání je možné zajistit podstatně účinněji jednoduchým ventilačním systémem. Taktéž je často používáno mnoho menších oken tam, kde by mohly být nahrazeny menším počtem větších oken. U malých oken tvoří velký podíl plochy rám okna, který místnost neprosvětluje a jen způsobuje tepelné ztráty. Také menší počet větších oken bývá levnější.

Velmi diskutabilní je použití střešních oken. Tepelné parametry střešních oken naměřené ve zkušebnách bývají poměrně dobré, neboť se měří jen ztráty oknem a nikoli celkové ztráty okna včetně způsobu zabudování do střechy. Pokud se zatím nedokonalý způsob zabudování do střechy, který vytváří významné tepelné mosty v ostění okna, nedořeší, zůstanou střešní okna slabým článkem každého domu s nízkou spotřebou energie. Je proto vhodné pokud možno střešní okna nepoužívat.

Součinitel přestupu tepla rámu (běžně $k=1,7Wm^{-2}K^{-1}$) je větší než součinitel přestupu tepla izolačního skla ($k=1,1Wm^{-2}K^{-1}$). U menších oken tudíž dochází k situaci, že tepelné ztráty rámem jsou vyšší než ztráty sklem.

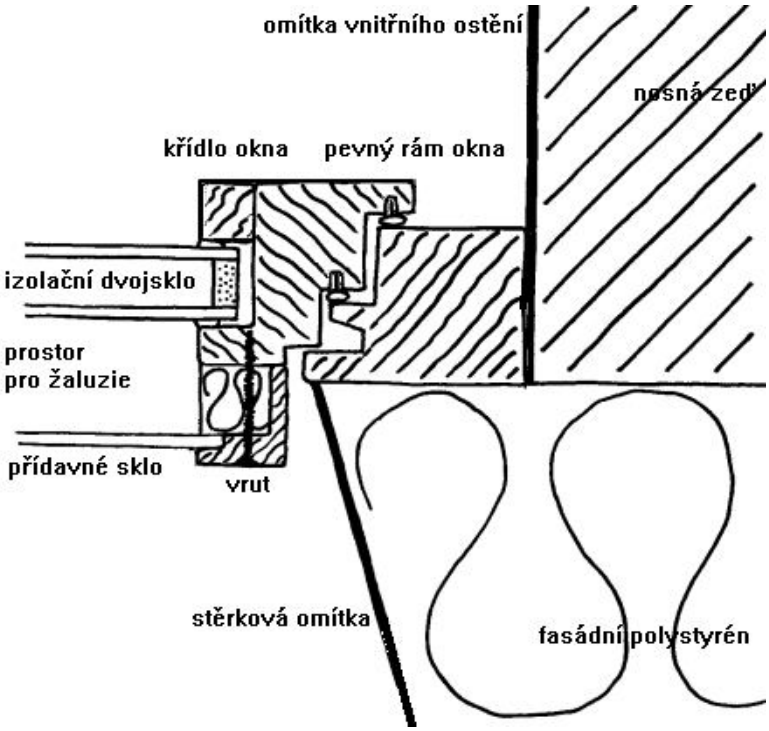
V případě, že obvodové stěny jsou sendvičové konstrukce, nabízí se způsob osazení oken zobrazený na Obr.12. Tím je únik tepla pevnými částmi rámů oken prakticky zamezen a tepelné ztráty rámem okna mohou klesnout až o 60%. Toto opatření je prakticky bez nákladů, stejně jako řada dalších drobnějších úprav týkajících se potlačení tepelných mostů.



Obr. 7 Navrhovaný způsob osazení okna v nosné zdi a způsob zateplení jeho pevného rámu.

Ani s okny osazenými podle Obr.12 ještě nemusíme být spokojeni. Oknům chybí účinný způsob stínění na léto a přece jen tepelné ztráty okny by mohly být ještě nižší. Stínit lze vnitřní či venkovní žaluzií. Obě varianty však mají své nedostatky - vnitřní žaluzie nebrání v létě účinně tepelným ziskům a práší se na ni, venkovní je drahá a ve větru může být hlučná. Vnější roletový systém bývá dost nákladný. Snížení tepelných ztrát lze dosáhnout nahrazením izolačního dvojskla třívrstvým lepeným sklem Heat Mirror s k=0,6$Wm^{-2}K^{-1}$. Díky své ceně je však toto sklo podle kritéria minima investic + 30*let* nákladů na topení právě na hranici rentability.

Problém účinného stínění a současně zvýšení tepelného odporu okna lze řešit způsobem zobrazeným na Obr.13. K oknu lze zvenku přišroubovat dodatečný odnímatelný dobře izolující rámeček se sklem s tvrdou nízkoemisní vrstvou. Tím se zaizoluje křídlo okna a zlepší se součinitel přestupu tepla zasklení na hodnotu k=0,8$Wm^{-2}K^{-1}$ a vznikne prostor pro meziokenní žaluzii. Takto instalovaná meziokenní žaluzie brání v létě tepelným ziskům téměř stejně dobře jako venkovní žaluzie a nemá již zmíněné nevýhody venkovní žaluzie. Nevýhodou tohoto řešení je, že jednou za několik let je třeba rámeček se sklem odšroubovat a skla očistit. Při výrobě oken je třeba počítat s vyšším zatížením závěsů a patřičně je dimenzovat.



Obr. 8 Navrhovaný způsob zvýšení tepelného odporu okna a vytvoření prostoru pro meziokenní žaluzii.

Dodatečný rámeček představuje investici asi 1000*Kč/m*^{2} okna. Tím se sníží koeficient prostupu *k* okna z 1,2*Wm*$^{-2}$*K*$^{-1}$ na 0,8*Wm*$^{-2}$*K*$^{-1}$ a za 30*let* činí úspora 1038*Kč*. Instalovaný výkon otopného systému lze snížit o 16*W* na 1*m*^{2} okna, což sníží investici o 160*Kč* na 840 *Kč*. Prostá návratnost této investice je 24*let*. Je třeba přiznat, že investice do dodatečného rámečku se sklem nepředstavuje příliš efektivní úsporné opatření a není na něm třeba trvat.

Velmi vhodnou variantou otvorových výplní s velmi dobrými tepelně-izolačními vlastnostmi jsou zdvojená okna, která jsou ve vnitřní části křídla osazena izolačním dvojsklem s *k* = 1,1*Wm*$^{-2}$*K*$^{-1}$ a vnější část křídla je osazena sklem s tvrdou nízkoemisní vrstvou. Samozřejmě je možné do takového okna zabudovat meziokenní žaluzii. Vezmeme-li v úvahu zateplení pevných rámů podle Obr. 12, nebude *k* okna vyšší než 0,8*Wm*$^{-2}$*K*$^{-1}$. Bohužel takováto okna nejsou ve standardní nabídce českých výrobců zdvojených oken.
Firma Dipro Rájec Jestřebí o takovéto variantě odmítá uvažovat. Firma Lineta - České dřevařské závody vyrábí okno Linat, které již s tenkým izolačním dvojsklem na vnitřní straně počítá. Aby mohlo být okno osazeno podle výše popsaného způsobu, je třeba změnit způsob zalištování vnitřní části křídla okna. Výrobce slibuje v tomto přání zákazníka vyhovět.

4.1.5 Ošetření tepelných mostů

Tepelné mosty mohou hrát velmi významnou roli v celkových ztrátách budovy s velmi nízkou spotřebou energie, pokud nejsou dobře ošetřeny. Za tepelné mosty lze považovat i rámy oken a jejich ostění – způsob ošetření těchto tepelných mostů je popsán v předchozím odstavci.

Nejvýznamnějším tepelným mostem, který je třeba ošetřit, je únik tepla zdmi prvního obytného podlaží do studeného podloží. Veškeré tyto zdi je třeba založit na tvárnici s lepšími izolačními vlastnostmi např. z pěnového skla, případně, dovolí-li to statické a vlhkostní poměry, na pórobetonových tvárnicích. Toto opatření zamezí úniku tepla do studeného podloží.
Pěnové sklo má součinitel *l* =0,044*Wm*$^{-1}$*K*$^{-1}$, tedy asi 4krát lepší tepelně izolační vlastnosti

než pórobeton s l=0,17$Wm^{-1}K^{-1}$, je vysoce odolné proti vlhkosti, nepropouští vodní páru, naproti tomu je asi 10krát dražší než pórobeton (pěnové sklo Foamglass 15000$Kč/m^3$) a je poměrně křehké.

Předpokládejme, že styčná plocha zdí s podložím činí u běžného rodinného domku asi 15m^2. Pokud zůstane tento tepelný most neošetřen, představuje únik tepla v topné sezóně 660W. Založíme-li cihlové zdivo např. na tvárnicích z pórobetonu o výšce 25cm, je tento únik redukován na 112W, což představuje úsporu na instalovaném výkonu otopného systému 548W (úspora při instalaci otopného systému 5 480$Kč$), roční úsporu za topení 2790$Kč$ a úsporu za topení za 30let téměř 84 000$Kč$. Tyto tepelné mosty jsou samozřejmě ošetřeny u staveb z pórobetonu, nikoli však u staveb z izolačních cihlových tvárnic, neboť tepelná vodivost zdí z těchto tvárnic je ve svislém směru velmi vysoká.

V oblasti nadokenních překladů a věnců mohou být v případě použití sendvičové konstrukce obvodových stěn tepelné mosty dokonale ošetřeny. Podobně sendvičová konstrukce obvodových stěn umožní téměř dokonalé napojení izolace obvodových stěn a izolace střechy. Vše předpokládá pečlivost při vlastním provedení.

Vážným problémem je ošetření tepelných mostů jakýchkoli konstrukcí vystupujících z povrchu budovy tvořících např. podlahy balkonů nebo stříšky. V podstatě jediným schůdným řešením problému je tyto konstrukce nepoužívat a prvky řešit jako samonosné, staticky i tepelně oddělené od pláště budovy. Taktéž tepelně nevýhodným prvkem jsou lodžie, které výrazně zvětšují povrch budovy. Uvedené prvky je třeba eliminovat již při architektonickém návrhu budovy.

4.1.6 Nízkoenergetická architektura

Konstrukčnímu návrhu nízkoenergetického objektu předchází architektonický návrh, který respektuje základní principy dispozičního řešení a umožňuje využití především pasivních solárních zisků. Jedná se nejen o možnost dodržení hierarchie teplotních zón a systematické oddělení vytápěných a nevytápěných prostorů, ale i o optimální orientaci objektu ke světovým stranám a odpovídající hmotové řešení budovy. Optimalizace objemového řešení budovy je dána hledáním ideálního poměru mezi plochou obalových konstrukcí budovy a jejím obestavěným poměrem.

Je zřejmé, že energeticky výhodnějšími jsou objekty v řadové zástavbě než budovy stojící samostatně. Z hlediska dispozice a polohy objektu vůči světovým stranám měl by být objekt navržen tak, aby umožňoval co nejvyšší využití pasivních solárních zisků. Znamená to situování hlavních prostor budovy převážně jižním až jihozápadním směrem a umístění podružných nebo příležitostně používaných místností do směrů s minimem slunečního záření. Tomuto záměru by měly odpovídat i plošné dimenze otvorových výplní. V reálné konkrétní situaci ovšem nemáme vždy možnost všechny výše uvedené okolnosti ovlivnit, stavební pozemek je prostě takový, jaký je k dispozici, typ a poloha stavby bývají dopředu vymezeny územním plánem apod.

V souvislosti s výše uvedenými tepelnými mosty a architektonickým návrhem domu je třeba prodiskutovat problém tzv. nízkoenergetické architektury. Jde většinou o opatření jdoucí za rámec výše zmíněných doporučení, které mohou podstatným způsobem zvýšit pasivní solární zisky domu nebo ještě více napomoci potlačení úniku tepla pláštěm budovy.

Jde v podstatě o dvě pojetí, která se vzájemně nevylučují:

Vytvářet na jižní straně fasády budovy velké prosklené plochy s možností předávat teplo ze solárních zisků do interiéru budovy [4].

Zapustit podstatnou část domu do terénu, tedy do míst se stabilní celoroční teplotou nad bodem mrazu [18].

Striktnímu využití těchto pojetí se přikládá projektanty i laickou veřejností příliš velká váha a často je mezi těmito koncepcemi a nízkoenergetickými stavbami kladeno rovnítko. To má v podstatě dva velmi nemilé dopady:
1. Vzniká dojem, že stavbu s velmi nízkou spotřebou energie je možné stavět jen v místech se zvláštní ojedinělou dispozicí.
2. Stavba s velmi nízkou spotřebou energie musí vypadat zvláštně, pro velkou část běžných lidí v podstatě nepřijatelně.

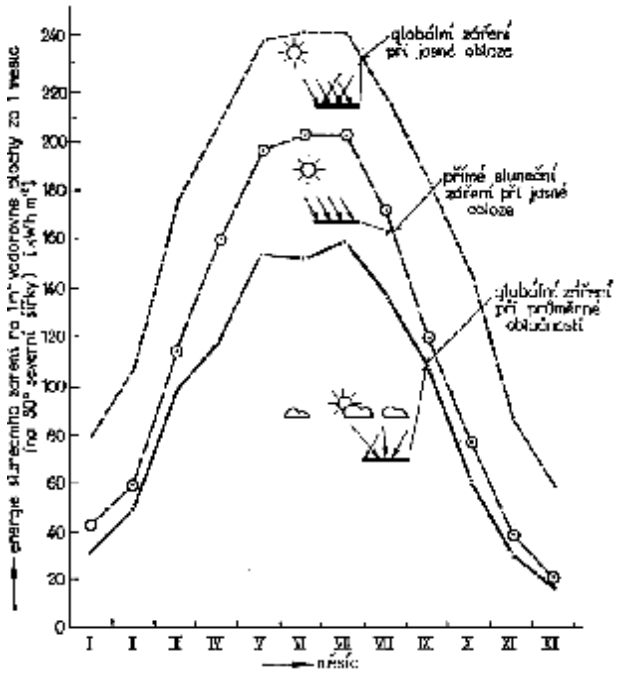
Zmíněné koncepce je možné dále okomentovat. Prosklené stěny orientované na jih bezesporu přinášejí při slunných dnech velké solární zisky. Tyto zisky však zdaleka nejsou zadarmo. Je třeba připustit, že stavba prosklené stěny s kvalitními tepelně-izolačními skly je několikanásobně dražší než stavba velmi dobře zateplené obvodové stěny. Prosklená stěna je též výrazně zranitelnější a vyžaduje vyšší údržbu. Docela běžné je přehřívání a přesvětlení prostor za prosklenou stěnou při slunných dnech, což znamená, že prostory za prosklenou jižní stěnou nemohou být plnohodnotně využívány.

Je třeba si uvědomit, že nejvíce slunečních zisků je v tzv. přechodném období, tedy na počátku a konci běžné topné sezóny. Jenže topná sezóna začíná u dobře izolovaného domu podstatně později a končí podstatně dříve než je běžná topná sezóna a tudíž je omezena jen na měsíce s nejmenším slunečním svitem. Jsou tedy započitatelné solární zisky jižních prosklených stěn u kvalitně zateplených domů podstatně nižší, než u běžných domů.

Nakonec je třeba poukázat na fakt, že tepelně izolační odpor prosklené stěny je mnohonásobně nižší než u kvalitní obvodové stěny. Pak ztráty prosklenou stěnou ve velmi dobře zaizolovaném domě s krátkou topnou sezónou v období s malým slunečním svitem mohou i převýšit solární zisky prosklenou stěnou.

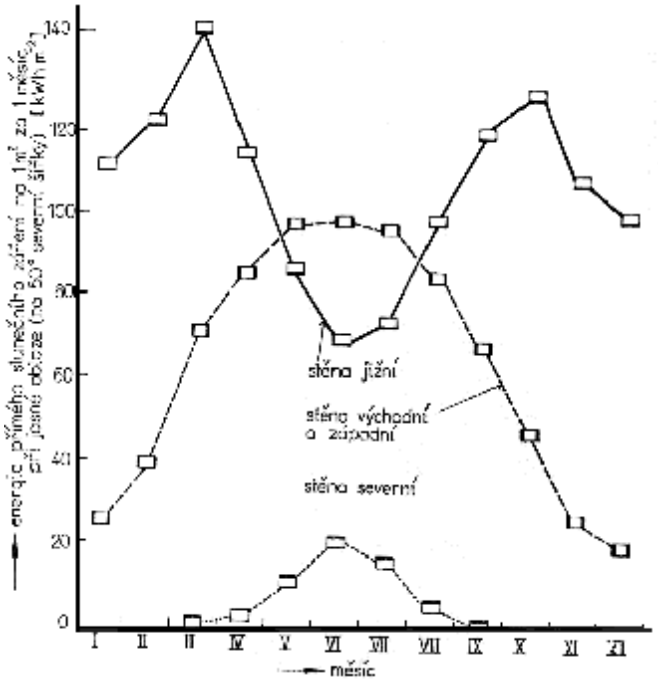
Předpokládejme, že topná sezóna v dobře zaizolovaném domě běžně trvá tři měsíce – prosinec, leden a únor. Za tyto tři měsíce dopadne na jižní stěnu průměrně asi $126 kWh/m^2$ ve formě slunečního záření [7].
Z tohoto množství projde asi 70% do interiéru, tedy asi $90 kWh/m^2$. Při průměrné venkovní teplotě $-1°C$ v uvažovaných měsících [7] jsou tepelné ztráty prosklenou stěnou vyjádřených v kWh/m^2 za topnou sezónu asi $50*k$, kde k je součinitel přestupu tepla této stěny ve $Wm^{-2}K^{-1}$. Je-li pro dobře zateplenou obvodovou stěnu součinitel přestupu tepla $k=0.2 Wm^{-2}K^{-1}$, pak prosklená stěna se součinitelem přestupu tepla $k=2.0 Wm^{-2}K^{-1}$ nepřinese pro dům žádný energetický přínos. U prosklené stěny je reálné dosáhnout součinitele přestupu tepla $k=1.2 Wm^{-2}K^{-1}$, což přinese roční zisk kolem $40 kWh$ z $1 m^2$.

Zvážíme-li však poměrně vysoké pořizovací náklady prosklené stěny a výše zmíněný diskomfort, nejeví se investice do jižní prosklené stěny příliš vhodná. Podrobněji se této problematice věnuje podkapitola 4.2.4.
Grafická znázornění na následujících obrázcích jsou převzata z [63] a dokreslují situaci.



Obr. 9 Sluneční energie dopadající na vodorovnou plochu $1m^2$ za 1měsíc [63]

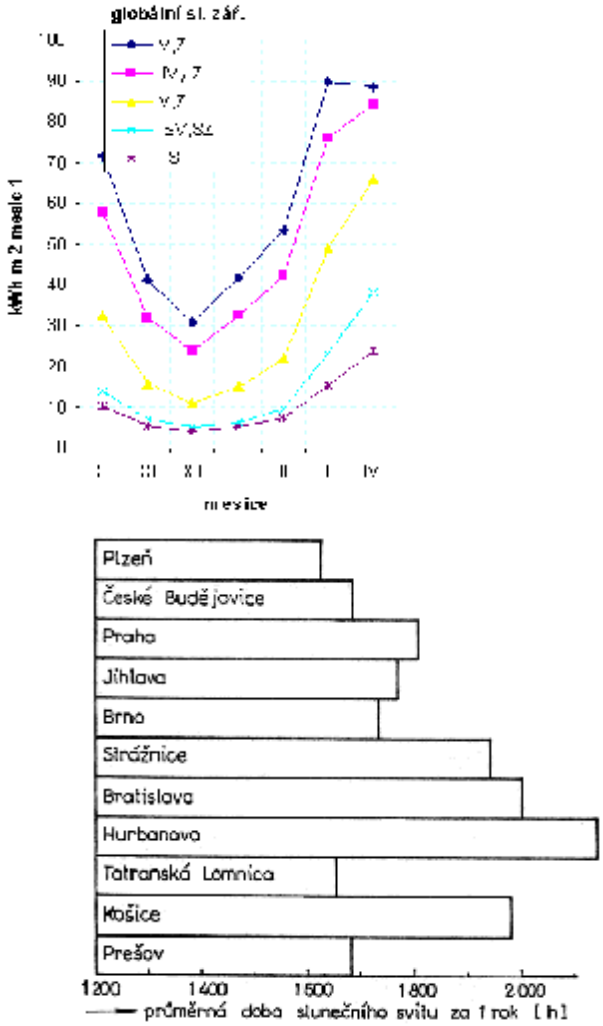
Na obr.14 vidíme, jak se mění množství sluneční energie dopadající na vodorovnou plochu $1m^2$ v místech 50.rovnoběžky v různou roční dobu. Hodnoty na svislé ose v kWh znamenají celkovou sluneční energii za měsíc. Nejvyšší křivka odpovídá globálním u záření za předpokladu stálého jasného počasí. Střední křivka odpovídá přímému slunečnímu záření, porovnáním s hořejší křivkou si uděláme představu o slunečním záření rozptýleném v atmosféře. Spodní křivka pro normální oblačnost nejlépe odpovídá skutečnosti.



Obr. 10a Sluneční energie dopadající na svislou plochu $1m^2$ za 1měsíc [63]

Na Obr.15a je vynesena max. energie přímého slunečního záření dopadajícího za jeden měsíc na svislé stěny obrácené k jihu, východu a západu za předpokladu jasné oblohy. Jsou uvedeny hodnoty pro jednotlivé měsíce. V [7-příloha A] je k dispozici tabulka zprůměrňovaného globálního slunečního záření za daný měsíc, která se běžně užívá pro odhad

velikosti solárních zisků při různých orientacích během topného období, z těchto údajů je sestaven graf na Obr.15b.



Obr. 11 Průměrná doba slunečního svitu v hodinách v období jednoho roku v různých místech. Hodnoty jsou průměry za mnoho let a jsou vzaty z [63].

Co se týče zapouštění staveb do terénu je známo, že v topné sezóně je teplota zeminy vyšší, než je průměrná teplota venkovního vzduchu. Jestliže si však uvědomíme náklady se zapuštěním stavby (výkopové práce, izolace proti zemní vlhkosti a radonu…) s podstatně menšími náklady na velmi kvalitní tepelnou izolací obvodové zdi nad terénem, nelze považovat zapuštění staveb do terénu jako rentabilní řešení.

4.1.7 Těsnost, infiltrace

Těsnost stavebních konstrukcí a její vliv na přenos tepla a vodní páry se začíná stávat v posledních letech frekventovaným tématem. Ukazuje se totiž, že moderní konstrukce s prodyšnými tepelnými izolacemi a s vysokým tepelným odporem jsou citlivé na přenos tepla a vlhkosti prouděním trhlinami a spárami. U konstrukcí s extrémně vysokým tepelným odporem může být dokonce přenos tepla prouděním spárami rozhodujícím transportním mechanismem. Definitivní a úplné řešení problému tepelné ztráty infiltrací lze spatřovat pouze v její úplné likvidaci a zavedením řízeného systému větrání s nuceným oběhem a případnou rekuperací. [29].

Řízené větrání s dokonalou rekuperací je úspěšné jen pokud je dům těsný. Ověřením těsnosti se často objeví i jinak skryté stavebních vady. Těsnost domu se ověřuje tzv. blow-door testem, kdy se místo vstupních dveří napne do rámu fólie s velkým ventilátorem. Ta vyvine uvnitř podtlak 50Pa a zjišťuje se, zda průtok vzduchu ven je při tomto testu menší než polovina objemu budovy za hodinu.

4.2 Optimalizace aktivních systémů v NED

Aktivní systémy v nízkoenergetických domech mají tyto hlavní úkoly: větrání, vytápění a ohřev TUV. V naší republice, kde roční minimální teploty vnějšího vzduchu dosahují hodnot pod –15°C, je i u velmi kvalitně zatepleného domu nutné mít alespoň levný a jednoduchý otopný systém. Zcela odlišná situace může nastat např. v Anglii či Nizozemí, kdy venkovní teploty klesnou pod 0°*C* jen výjimečně a velmi dobře zateplený dům by se mohl zcela obejít bez otopného systému (tepelné ztráty domu by byly v rovnováze s jeho vnitřními zisky při teplotě kolem 0°*C*).
Nutnou podmínkou nízké spotřeby energie domu je jeho dostatečná těsnost. Z toho ovšem vyplývá nutnost řízené výměny vzduchu nejlépe spojená s rekuperací. V tomto případě je vzduch odsáván z míst s jeho největším znečištěním (WC, koupelna, kuchyň) a vyháněn přes rekuperační výměník ven, venkovní vzduch je přes rekuperační výměník vháněn do obytných místností. V rekuperačním výměníku se odcházející vzduch ochladí na teplotu blízkou venkovnímu vzduchu a přicházející vzduch se ohřeje na teplotu blízkou teplotě interiéru (odcházející vzduch předá teplo přicházejícímu vzduchu). Účinnost rekuperačních výměníků bývá až 80-90%. Kromě významné úspory energie se též podstatně zvyšuje komfort bydlení, jelikož odpadá nutnost větrat místnosti otvíráním oken a okna mohou být zcela těsná a „netáhne“ od nich.

Získávání tepla ve slunečních kolektorech k ohřevu teplé užitkové vody je používáno již několik desetiletí, ovšem v naší zeměpisné šířce užívané systémy balancují na pokraji rentability. V mnoha státech (včetně České republiky) jsou proto systémy na sluneční ohřev teplé užitkové vody dotovány. Pokud bude cena energie růst a ceny systémů na sluneční ohřev vody budou klesat, jejich rentabilita poroste. Mezi nejpropracovanější a ve světě nejrozšířenější metodu aktivního využívání sluneční energie je používání kapalinových kolektorů. Aktivní využívání sluneční energie prostřednictvím slunečních kolektorů a zdařilých komplexních realizací slunečních otopných systémů se začíná v různých lokalitách České republiky objevovat stále více. Předpokládané energetické zisky 25-30% celkové roční spotřeby energie objektu jsou skutečně dosahovány a v mnoha případech uvedené hodnoty překračují.

Zatímco bez otopného systému se neobejdeme, systém pro rekuperaci vzduchu či sluneční kolektory nutné nejsou. Přesto je vhodné, aby všechny tyto systémy v domě byly a byly dokončeny již před uvedením domu do provozu. Má to následující důvody:
- Podíl tepelných ztrát výměnou vzduchu je právě v dobře zatepleném domě významný. Rekuperační výměník umožní ztráty spojené s výměnou vzduchu snížit na 10% až 20%, čímž umožní podstatně snížit instalovaný výkon otopného systému.
- Pro přípravu teplé užitkové vody (TUV) je třeba vyřešit součinnost slunečních kolektorů a dalšího zdroje (např. kotle otopného systému).
- Při stavbě je třeba počítat s rozvody vzduchu ventilačního systému, vyčlenit místo pro umístění slunečních kolektorů, případně s výhodou zabudovat sluneční kolektory do střešní konstrukce.

Právě nalezení jednoduchých levných a účinných řešení všech tří systémů a sladění jejich funkcí představuje významnou část tvůrčí práce projektanta.

4.2.1 Otopný systém

Koncepční řešení systému technického zařízení budov by v nízkoenergetickém domě mělo zohlednit využití obnovitelných zdrojů energie a sladit technické zařízení s daným staveb-

ním řešením při zachování optimálního interního mikroklimatu.
Oproti tradičním budovám se u nízkoenergetických budov zvyšuje vliv vnitřních zdrojů tepla a větrání, snižuje se účinek chladných obvodových stěn a povrchů na tepelnou pohodu (vyšší povrchová teplota) a díky celkově menší potřebě tepla lze snížit i teplotu teplonosné látky.
Potřebný výkon otopného systému pro rodinný nízkoenergetický dům by neměl přesáhnout $4kW$. Standard pasivního domu uvažuje asi $10Wm^{-2}$ na vytápěné plochy. Trh na takové nízké výkony není příliš zařízen, přesto je jistě možné uspokojivé řešení nalézt.
Předně je třeba rozhodnout, zda použít teplovzdušné, či teplovodní topení. Teplovzdušné topení se přímo podbízí, jelikož se v domě počítá s ventilačním systémem. Rozumná výměna vzduchu plynoucí z hygienických požadavků v rodinném domku je kolem $150m^3/hod$ (běžný RD má asi 300-400m^3 obytných místností a tedy výměna pri n=0.5hod^{-1} by měla být 150 až 200m^3/hod).

Jestliže chceme předávat tomuto vzduchu topný výkon 4kW, musíme jej za rekuperačním výměníkem ohřát o 70°C. Dá se tedy očekávat teplota vzduchu přicházejícího do místnosti kolem 90°C, což je příliš mnoho (doporučuje se, aby přicházející vzduch měl nejvíce 50°C, jinak je příliš suchý.Tedy při potřebě topného výkonu nad $4kW$ topit teplovzdušně nejde a je třeba budovat jiný např. teplovodní systém.
Vyjdeme-li však ze standardu pro pasivní dům t.j. topný výkon $10W/m^2$ podlahové plochy a předpokládáme-li normou stanovenou výměnu vzduchu n=0,5hod^{-1}, pak je třeba vzduch dohřívat jen o asi $22°C$ tedy na $43°C$. Tato teplota vzduchu je již zcela běžná nad radiátory topení, a proto lze považovat teplovzdušný otopný systém pro kvalitně zateplený NNED za velmi vhodný, protože se dá předpokládat, že bude velmi levný a plně vyhovující.
V nabídce firmy Atrea [19] jsou rekuperační jednotky s možností dohřevu vzduchu elektrickou spirálou nebo teplovodním výměníkem. Též existují rekuperační jednotky v kombinaci s tepelnými čerpadly. Podstatně vhodnější by však bylo, kdyby byly na trhu teplovzdušné kotle potřebného výkonu na zemní plyn či biomasu (ve stáložárném provedení s potřebou přikládat jen několikrát denně).

V případě teplovodního otopného systému je třeba po domě rozmístit jen několik radiátorů, které není nutno umisťovat pod okna. Jsou-li totiž okna dobře izolující a těsná, nevnímáme od nich žádný pocit chladu ani při velmi nízkých venkovních teplotách. Přesto je třeba počítat s tím, že instalace jen nízkého počtu malých radiátorů přijde na několik desítek tisíc korun. V případě, že se rozhodneme pro podlahové teplovodní topení, lze jej dimenzovat na malé topné výkony a nízkou teplotu média.
V místech se zavedeným zemním plynem lze využít toto topné medium. Zemním plynem je třeba jen pokrýt potřeby tepla na vytápění a na ohřev či dohřev TUV v době, kdy sluneční kolektory a zisky k tomu nestačí. Zde se nabízí následující jednoduché řešení. Pro přípravu TUV se dnes často používají tzv. zásobníkové plynové ohřívače vody [20]. Existují i typy zásobníkových plynových ohřívačů s výměníkovou vložkou pro alternativní ohřev slunečními kolektory. Právě výměníkovou vložku lze využít jako zdroj tepla pro topení. Topný výkon nejmenších zásobníkových plynových ohřívačů je kolem $5kW$, což postačí pro vytápění domu. Zásobníkový plynový ohřívač bude zapnut jen tehdy, je-li potřeba topit, nebo ohřívat či dohřívat TUV (nestačí-li sluneční kolektory).
V souvislosti s ekologickým vytápěním je často zmiňováno jako zdroj tepla tepelné čerpadlo. Při dotovaných cenách elektrického proudu pro tepelná čerpadla se tepelné čerpadlo jeví i jako velmi ekonomický zdroj. Je si třeba uvědomit, že instalací tepelného čerpadla získá dům velmi výhodnou sazbu na elektrický proud, který je využíván i ve všech ostatních domácích spotřebičích. U velmi dobře izolovaného domu může být spotřeba

elektrického proudu domácími spotřebiči několikanásobně vyšší než průměrná spotřeba tepelného čerpadla. Pak může dojít dokonce k situaci, že díky současné velmi výhodné sazbě topení tepelným čerpadlem peníze provozovateli domu vydělává.
Odhlédneme-li od vysokých pořizovacích nákladů na vybudování celého zařízení (řádově 100 000*Kč*), nelze z eko-fyzikálního hlediska považovat tepelné čerpadlo za vhodný zdroj tepla z následujícího důvodu. V tepelné elektrárně se vyrobí ze tří jednotek tepla jedna jednotka elektřiny. Tepelné čerpadlo pak vyrobí z jedné jednotky elektřiny tři jednotky tepla. Obecně řečeno lze tedy tepelné čerpadlo spolu s adekvátní částí elektrárny nahradit obyčejnými kamny, které udělají podstatně jednodušeji to stejné.
V běžném domě vnímáme jako ideální případ, je-li otopný systém schopen pružně reagovat na změny potřeby energie, které jsou vyvolány především změnami klimatických podmínek a vnitřních zdrojů tepelné zátěže.
V nízkoenergetickém domě jsou teplotní poměry natolik stabilizovány, že nároky na regulaci jsou minimální a i velmi jednoduchá regulace - např. spínání otopného systému jednoduchým prostorovým termostatem je plně vyhovující.

4.2.2 Příprava teplé vody - TUV

Systém by měl zajistit pokrytí potřeby teplé užitkové vody - TUV. Spotřeba je závislá na počtu uživatelů, počtu odběrných míst TUV, typu výtokových armatur a režimu provozu. Na straně spotřeby TUV lze energetických úspor bez snížení komfortu dosáhnout působením na chování uživatelů a aplikací úsporných armatur.
Spotřeba energie na přípravu TUV je dána zařízením, které zejména z uživatelského pohledu by mělo být schopné reagovat na okamžité požadavky. Jeho účinnost je závislá především na zdroji tepla a dále na systému - nejhorší účinnost vykazují systémy centrální přípravy TUV.
Problém lokálního průtokového ohřevu, který tyto ztráty nevykazuje, je v instalaci potřebného výkonu pro danou výtokovou armaturu (komfortní sprchování cca 24*kW*), který však pracuje velmi krátkou dobu. Z tohoto důvodu se volí akumulační ohřev, který požadavky na příkon v odběrové špičce rozloží do delšího časového úseku a tím sníží potřebný instalovaný výkon zařízení. Snížení spotřeby energie na straně systému TUV je především v celkovém pojetí, dále pak dáno kvalitní tepelnou izolací rozvodů a omezením doby provozu cirkulace TUV.
Rozdíl mezi tradičními a nízkoeneregetickými budovami v oblasti přípravy TUV je v důrazu na využití alternativních zdrojů tepla (sluneční záření) a v integraci systému na přípravu TUV s ostatními energetickými systémy budovy. Snahou vždy je, aby si jednotlivá kombinovaná opatření při integraci nekonkurovaly.

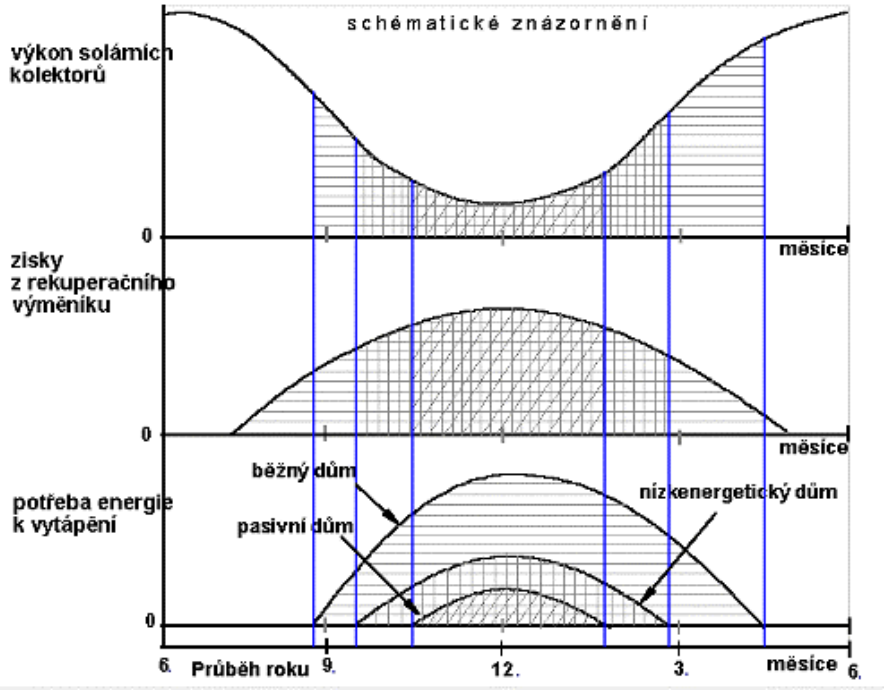
4.2.3 Ventilační systém

Účelem větrání obytných budov je zajistit hygienicky nutnou výměnu vzduchu ve všech místnostech a odvod škodlivin z místností, kde škodliviny vznikají. V tradičních budovách je větrací systém řešen kombinací infiltrace (neřízeného, přirozeného větrání netěsnostmi oken a obvodových konstrukcí) a podtlakového větrání v místech s produkcí škodlivin (kuchyně, koupelna, toaleta). Tento způsob větrání je sice vcelku osvědčený, z hlediska energetického však velmi nehospodárný, neboť intenzita infiltrace závisí na klimatických podmínkách a lze ji jen obtížně regulovat. V nízkoenergetickém domě ani nepřichází moc

v úvahu, neboť snahou je realizovat budovu co nejtěsnější, tedy ztráty infiltrací jsou malé a bez řízeného větrání lze větrat pouze otvíráním oken a dveří.
Potřeba energie na větrání je dána požadovaným množstvím větracího vzduchu a klimatickými podmínkami. Systémy přirozeného větrání infiltrací neumožňují regulovat množství větracího vzduchu, takže větrání nízkoenergetických budov se řeší řízeným větráním. Spotřeba energie větracím zařízením je pak dána způsobem řešení odvodu vzduchu z budovy.
Jako vhodné se jeví použití zařízení pro zpětné získávání tepla, které část energie obsažené v odváděném vzduchu vrací zpět do budovy. Zpětné získávání tepla má být oddělené pro každou užitkovou jednotku, tak aby uživatel mohl ovlivňovat objemový tok vzduchu a mělo by být v chodu nepřetržitě. Teplo získané z rekuperace by mělo být přednostně využíváno před teplem vytvářeným v topném zařízení. [69]
Vyměňuje-li se v domě $150 m^3/hod$ vzduchu a je-li rozdíl vnitřní a venkovní teploty $20°C$, šetří rekuperační výměník při účinnosti 80% asi $900W$. Příkon ventilátoru rekuperační jednotky bývá kolem 20-50W, je zapotřebí dvou ventilátorů tedy celkem asi 40 -100W. Ve srovnání s tepelným čerpadlem je rekuperační jednotka asi 3krát až 7krát účinnější.
Rozdíl mezi tradičními a nízkoeneregetickými budovami v oblasti větrání je v důrazu na řízené větrání, aplikaci zařízení na zpětné získávání tepla a sladění systémů vytápění a větrání.

4.2.4 Možnosti využívání sluneční energie – solární prvky

V podstatě každý dům využívá pasivních solárních zisků, nejvíce tím, že má okna. Doporučená plocha oken je 15% podlahové plochy a je rozumné orientovat okna co nejvíce na jih, aby byly solární zisky maximální. Je samozřejmě lákavé využívat sluneční energii pro topení v domech co nejvíce. Zde se nabízí několik možností:
Získávat po celý rok teplo slunečními kolektory a uschovávat získanou energii na zimu.
Využívat sluneční kolektory jen v topném období (systém bez dlouhodobé akumulace).
Získávat sluneční energii (z hlediska osvětlení) předimenzovanou prosklenou stěnou orientovanou na jih – pasivní způsob.
První způsob je kriticky závislý na existenci dostatečného zásobníku tepla. Dosavadní praxe ukazuje, že vhodný zásobník zatím nebyl vymyšlen a zkonstruován a tudíž se od tohoto způsobu prakticky ustupuje. Druhý a třetí způsob je používán dosti často a je proto třeba kritického zhodnocení možností spojení těchto systémů s nízkoenergetickými a pasivními domy.
Na Obr. 17 jsou ve spodní části odhadnuty průběhy spotřeby tepla na vytápění u běžného domu, nízkoenergetického domu a pasivního domu. Roční spotřeba energie odpovídá obsahu vyšrafovaných ploch.



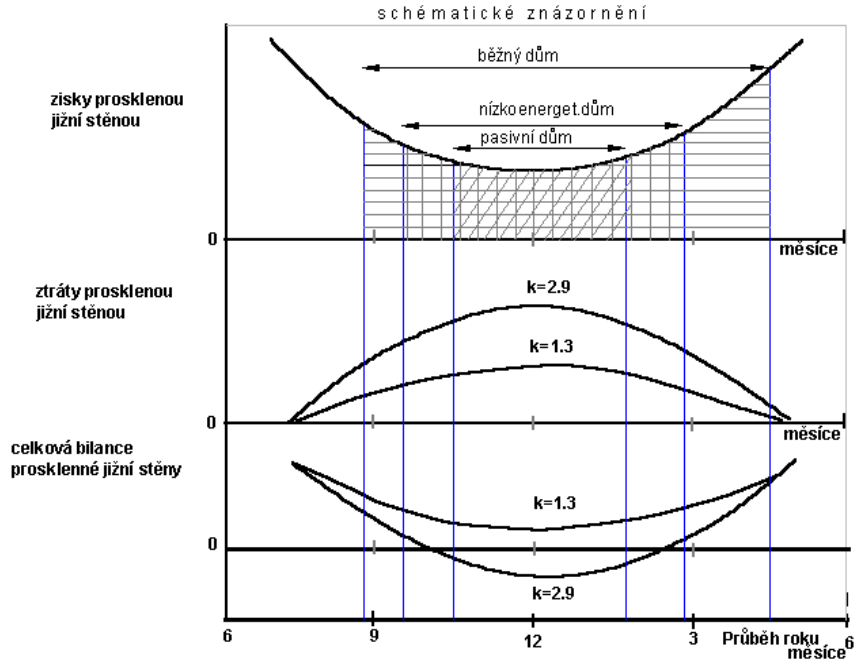
Obr. 12 Schematické srovnání potřeby energie na vytápění a zisků ze slunečních kolektorů a rekuperačního výměníku u různých typů domů.

Z tohoto obrázku je vidět, že délka topné sezóny v budově je závislá na kvalitě zateplení domu. U pasivního domu představuje jen o něco málo více než tři nejchladnější měsíce. Na prostřední části obrázku jsou znázorněny úspory energie při výměně vzduchu se zpětným získáváním tepla. Tyto úspory však lze započítat jen v době topné sezóny a tudíž je vidět, že úspory v pasivním domě jsou asi poloviční oproti úsporám v běžném domě.

Ještě výraznější rozdíl v úsporách je však při využívání slunečních kolektorů k vytápění. Jelikož je u pasivního domu topná sezóna právě v období nejmenšího slunečního svitu, lze očekávat, že zisky ze slunečního kolektoru budou představovat možná jen 1/10 zisku celoročně provozovaného kolektoru. Je proto na místě otázka, jak levné by sluneční kolektory pro topení v pasivním domě musely být, aby byly rentabilní. Jednoduché odhady ukazují, že cenu $1m^2$ instalovaného kolektoru je nutno stlačit pod $1000Kč$. Je třeba ještě dodat, že každý systém slunečních kolektorů potřebuje elementární údržbu a systémy s nuceným oběhem spotřebovávají elektrický proud.

Svá tvrzení můžeme podepřít jednoduchým výpočtem pro odhad kolektoru. Předpokládejme, že v pasivním domě trvá topná sezóna od začátku prosince do konce února. Podle literárních údajů [2] dopadne v průměru na $1m^2$ slunečního kolektoru o optimálním sklonu 60° necelých $100kWh$ v Bratislavě a necelých 85kWh v Praze. Předpokládáme-li účinnost celého systému 50% (což je pro nepříznivé zimní období vysoká účinnost), nelze počítat s ročním energetickým ziskem na $1m^2$ slunečního kolektoru větším než $50kWh$. Počítáme-li cenu $1kWh$ za $1Kč$ a dobu prosté návratnosti $20let$, nemůže přesahovat cena systému vztažená na $1m^2$ kolektoru $1000Kč$, mají-li být tyto kolektory použity jen na topení v pasivním domě.

Další obrázek umožní schematicky vysvětlit zisky prosklených jižních stěn postavených v různě zateplených domech.



Obr. 13 Srovnání energetické bilance prosklených jižní stěny s různou kvalitou zasklení v různých typech domů.

Svislé čáry v obr.18 znázorňují začátek a konec topné sezóny u jednotlivých typů domů. Prosklená jižní stěna může být zasklena různě izolujícím zasklením – např. obyčejným dvojsklem s k=2,9$W/(Km^2)$ nebo dvojsklem s nízkoemisní vrstvou s k=1,3$W/(Km^2)$. Pro jednoduchost předpokládejme, že propustnost světla při obou způsobech zasklení je stejná a tudíž i závislost solárních zisků na ročním období je stejná (viz. horní část obrázku).
Na druhé straně tepelné ztráty prosklenou stěnou se výrazně liší – prostřední část obrázku. Celková energetická bilance je znázorněna ve spodní části obrázku obr.15. Z ní je vidět, že v případě běžného domu má prosklená stěna z obyčejného dvojskla zisky na počátku a konci topného období, kdežto ztráty uprostřed topného období. Celková roční energetická bilance je zhruba nulová. To však neplatí u pasivního domu, kde je energetická bilance prosklené stěny po celou dobu topné sezóny negativní. Podstatně jiná je energetická bilance u stěny s dvojsklem s nízkoemisní vrstvou, kdy je energetická bilance po celý rok pozitivní.

Opět tedy platí, že u pasivního domu je roční energetický zisk několikanásobně nižší než u obyčejného domu. Každopádně lze říci, že obyčejná dvojskla jsou pro stavbu prosklených jižních stěn zcela nevyhovující stejně jako jsou nevyhovující pro zasklívání běžných oken. Dále je třeba uvážit to, že prosklené stěny je třeba umývat a že je třeba zabránit přehřívání prostorů za prosklenou stěnou v době intenzivního slunečního svitu.

Své argumenty opět podepřeme jednoduchým odhadem. Předpokládejme, že v pasivním domě trvá topná sezóna od začátku prosince do konce února. Víme, že na 1m^2 jižní svislé stěny za toto období dopadne v průměru 100kWh energie v Bratislavě a necelých 85kWh v Praze. Je-li propustnost dobře izolující skleněné stěny asi 60%, nelze počítat s průměrným ročním energetickým ziskem na 1m^2 jižní svislé stěny větším než 60kWh.

Nahradíme-li podstatnou část jižní prosklené stěny s k=1,3$W/(Km^2)$ (ponecháme okna o přiměřené ploše) neprůhlednou stěnou s k=0,15$W/(Km^2)$, sníží se ztráty na 1m^2 za rok asi o

50*kWh*. To znamená, že energetický přínos prosklené jižní stěny ve spojení s pasivním domem je prakticky nulový. Navíc je v případě prosklené jižní stěny třeba více dimenzovat otopný systém.
Je vidět, že pokud jde o ekonomická hodnocení, je nejspolehlivější cestou k úsporám energie kvalitní tepelná izolace, těsnost obálky budovy společně s řízenou výměnou vzduchu spojenou se zpětným získáváním tepla. Spojení prvků solární architektury s NNED může přinést další úspory energie, tyto úspory však budou absolutně několikanásobně nižší než v případě spojení těchto prvků s běžným domem. Pro kvalitně zateplené domy nemají výše uvedené solární prvky architektury prvotní význam, zde je jejich přínos spíše v jiné než energeticko-ekonomické rovině. Mohou zvýšit esteticko-výtvarné pojetí domu, přispět pro vytápění skleníku nebo sušení zemědělských produktů.

4.3 Realizace NNED

Realizovaný nízkoenergetický dům je navržen tak, aby jeho provozní energetické nároky činily asi $20 kW/m^2/rok$ a aby se typově nelišil od běžné výstavby. Dům je postaven z materiálů a technologiemi běžně dostupnými na českém trhu a za cenu prakticky stejnou jako je cena běžného rodinného domu stejné velikosti a vybavení. Realizovaný dům by měl ověřit rozhodujících principy rentabilního nízkoenergetického stavění.
Dům obsahuje tři aktivní systémy:
systém slunečních kolektorů pro ohřev TUV a vytápění. Pro instalaci slunečních kolektorů je využita sedlová střecha se sklonem 40^o orientovaná na jih. Sluneční kolektory o ploše $40m^2$ jsou součástí střechy a jsou rozděleny do dvou polí.
podlahové vytápění je nízkoteplotní. Díky nízké teplotě otopné vody se podstatně zvýší účinnost slunečních kolektorů v zimním období. Jako zdroj tepla bude užit zásobníkový plynový ohřívač TUV s výměníkovou vložkou o výkonu $4,5kW$.
ventilační systém s rekuperací. Ventilace je opatřena zařízením pro zpětné získávání tepla. Čerstvý vzduch vstupuje do domu přes zemní registr (vytvořený při stavbě v základech), a přes rekuperátor je vháněn do obytných částí domu. Teplý využitý vzduch je odsáván z kuchyní, koupelen a toalet a přes rekuperátor vyháněn ven. Podzemní registr předehřeje vzduch natolik, že rekuperační výměník nemůže nikdy zamrznout.
U všech tří systémů je kladen rozhodující důraz na jejich jednoduchost, spolehlivost a levnost.

4.3.1 Parametry domu

Poloha domu nemohla být zvolena libovolně, ale bylo nutno se přizpůsobit územnímu plánu. Jde o lokalitu v zástavbě nových RD na okraji Brna, orientace štítových zdí je východ-západ. Dům je třípodlažní, lze jej flexibilně rozdělit na 1 až 3 samostatné bytové jednotky. Dům nemohl být podsklepen kvůli vysoké hladině spodní vody.
Architektura domu se snaží nevybočit z běžných zásad a zvyklostí při stavbě rodinných domů se sedlovou střechou. Střešní konstrukce je dřevěná s vestavěným podkrovím. V domě se klade důraz na důsledné potlačení tepelných mostů.
Venkovní rozměry obytné části domu jsou $10,0m$ x $12,0m$ a výška po hřeben střechy je $9,05m$.
Dům má celkovou podlahovou plochu $240m^2$ (A/V=0,73).

Předpokládáme tyto koeficienty prostupu tepla /průměrné/:

k_n=$0,15 Wm^{-2}K^{-1}$ pro neprůhlednou část obálky,
k_o=$0,80 Wm^{-2}K^{-1}$ pro otvorové výplně obálky .

Tvar budovy a uspořádání prostoru jsou patrné z obrázků a nákresů v příloze. Výpočet koeficientu prostupu oken k_o je níže uveden.

4.3.2 Výčet pasivních opatření pro nízkou energetickou náročnost

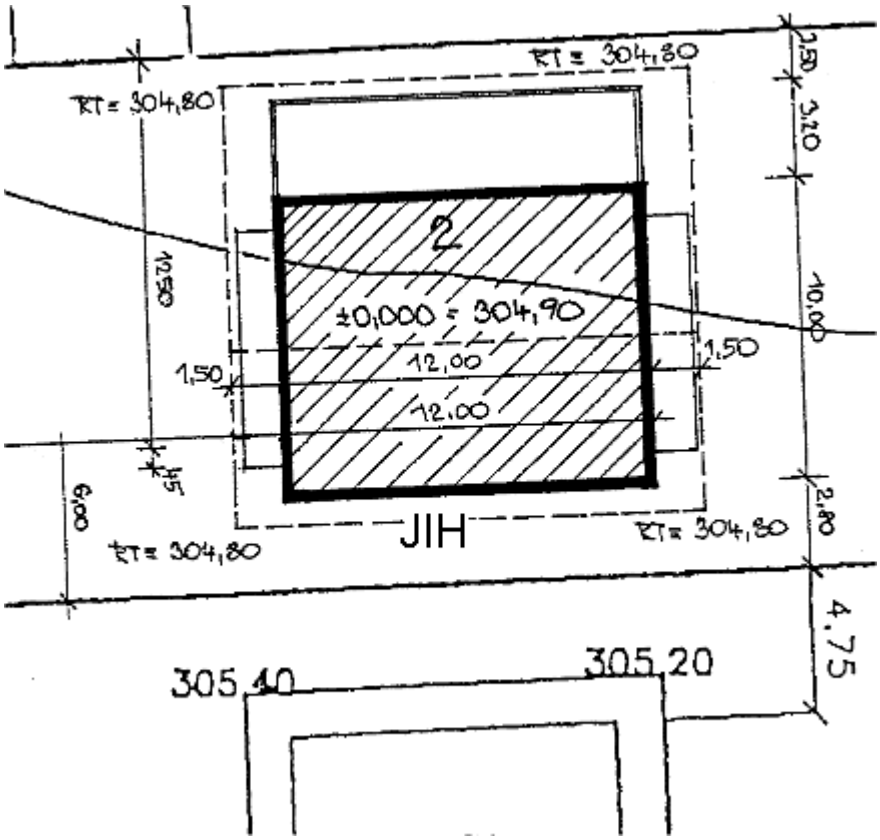
V realizovaném NNED je nízkoenergetičnost dosahována těmito pasivními opatřeními:
Důkladná tepelná izolace obvodového zdiva – obvodové zdivo je postaveno jako nosné zdivo o minimální nutné tloušťce tj. tloušťce $25cm$ z voštinových cihel (CDM) a zvenku zatepleno $25cm$ pěnového polystyrénu se stěrkovou omítkou. Obvodové zdivo představuje

rozhodující prvek tepelné akumulace domu. První řada veškerého zdiva je vyzděna z pórobetonu, aby byl redukován únik tepla do základů.
Důkladná tepelná izolace přízemní podlahy 20*cm* pěnového polystyrénu. Skladbu podlahy tvoří :
podlahová krytina
betonová mazanina + podlahové topení +armovací síť
tepelná izolace 20*cm* pěnový polystyrén
hydroizolace protiradonová
základová deska
Důkladná tepelná izolace šikmé střechy – prostor mezi krokvemi (výška 20*cm*) je vyplněn minerální vatou + 12*cm* izolace minerální vatou nad krokvemi a 5*cm* pod krokvemi. Na vnitřní straně střešní konstrukce je důsledná parozábrana.
Osazení stěnových otvorů okny a dveřmi s vysokým tepelným odporem. Jsou použita dřevěná okna a dveře typu „eurooken“ s následujícími modifikacemi:
okna i dveře budou osazeny tak, aby pevné rámy lícovaly s venkovním lícem nosné obvodové zdi a tyto rámy budou zaizolovány spolu s obvodovou zdí,
veškerá zasklení budou provedena nízkoemisními izolačními dvojskly s nejlepšími tepelnými parametry,
na křídla oken a dveří bude zvenku přimontováno třetí sklo s tvrdou nízkoemisní vrstvou osazené v kompozitním rámečku z vrstvy dřeva a 3*cm* vrstvy extrudovaného pěnového polystyrénu (rámeček zateplí rám křídla okna),
vzniklý prostor mezi skly bude opatřen meziokenní žaluzií pro efektivní stínění v letních měsících,
zbylé pevné rámy budou obloženy 3*cm* vrstvou extrudovaného polystyrénu a dřevem.
Zemní registry pro předehřívání ventilačního vzduchu mají délku 44m, trubice o průměru 125mm umístěné v základech v hloubce 1,3m.

4.3.3 Výčet aktivních opatření pro nízkou energetickou náročnost

Dům obsahuje tři aktivní systémy – systém slunečních kolektorů na ohřev TUV a vytápění, podlahové vytápění napojené na solární zásobník a plynový zásobníkový ohřívač TUV a ventilační systém.
Pro instalaci slunečních kolektorů je využita sedlová střecha se sklonem 40^o orientovaná na jih. Sluneční kolektory o ploše $40m^2$ jsou součástí střechy a jsou rozděleny do dvou polí. Pod hřebenem střechy je umístěn řádně zaizolovaný netlakový zásobník o velikosti $2m^3$ s výměníky z kolektorů, na TUV a na topení.

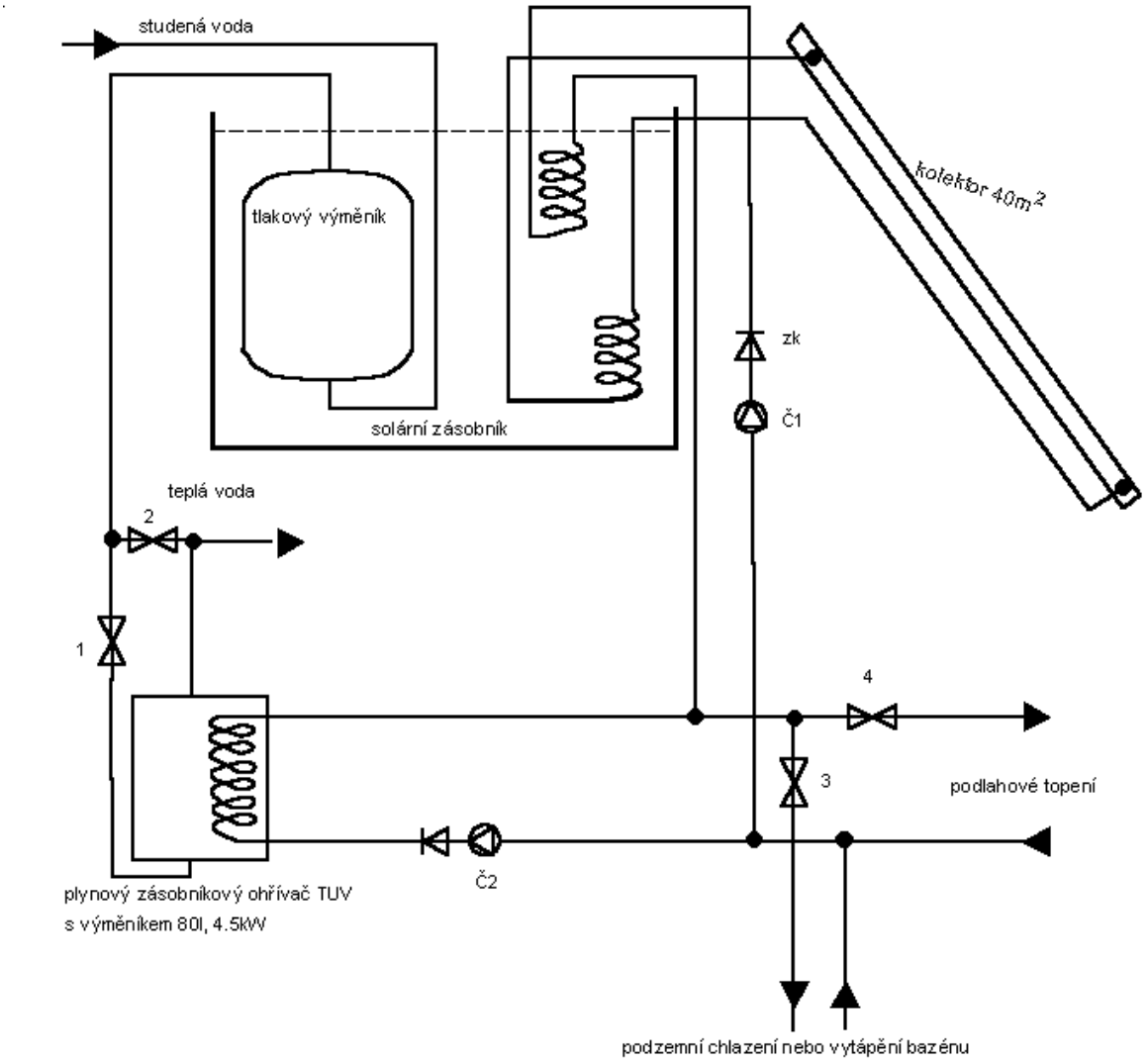
Systém je samotížný. Sluneční kolektory jsou vlastní konstrukce, která umožní dramatické snížení nákladů na pořízení kolektorů t.j. na cenu asi $1000Kč/m^2$ při svépomocné instalaci na jižní stranu střechy.



4.3.4. Otopný systém a příprava TUV

Podlahové topení je dimenzováno tak, aby k vytápění stačila voda o max. teplotě 35^{o}C. Pak lze pro podlahové topení použít černé polyetylénové hadice, které jsou asi desetkrát levnější než standardní trubky pro podlahové topení. Kromě výměníku v solárním zásobníku bude jako zdroj tepla sloužit plynový zásobníkový ohřívač s výměníkem.

Je zřejmé, že solární kolektor má tím vyšší účinnost, čím nižší je jeho pracovní teplota. K tomu, aby byla účinnost kolektoru co nejvyšší, je třeba ze solárního zásobníku odebírat teplo při co nejnižší teplotě. Toho lze dosáhnout tím, že teplo ze zásobníku bude využíváno pro topení již od teploty solárního zásobníku 25°*C*. Kdybychom v zimním období solární kolektory využívali jen k ohřevu TUV, dosahovala by teplota solárního zásobníku běžně podstatně vyšších teplot a účinnost kolektorů by značně poklesla.
Schéma otopné soustavy je znázorněno na Obr. 19.



Obr. 14 Schéma otopné soustavy a systému pro ohřev TUV

Podle teploty v domě a aktuálního stavu počasí bude nastaven otopný režim. Otopný systém v realizovaném domě bude na dané požadavky reagovat následovně:
Režim 1 – v domě je dost teplo, není třeba topit.
Ventil 4 zavřen, ventil 3 otevřen, čerpadlo 1 zapnuto v případě, že solární zásobník vykazuje teplotu T> 70°*C* (chlazení solárního zásobníku). Je-li T>45°*C* ventil 2 otevřen a ventil 1 zavřen. Je-li T<45°*C*, ventil 2 zavřen, ventil 1 otevřen, TUV se dohřívá v plynovém zásobníkovém ohřívači.

Režim 2 – v domě je třeba topit, ale stačí topit slunečními kolektory.
Ventil 4 otevřen, ventil 3 zavřen, čerpadlo 1 zapnuto v případě, že solární zásobník vyka-

zuje teplotu T> 25°*C*. Ventil 1 otevřen, ventil 2 zavřen – dohřev TUV v plynovém zásobníkovém ohřívači.

Režim 3 – v domě je třeba topit, nevystačí topit slunečními kolektory.
V době 10^{00} - 16^{00} hodin stejné jako režim 2, v době 16^{00} - 10^{00} ventil 4 otevřen, ventil 3 zavřen, ventil 1 otevřen, ventil 2 zavřen, čerpadlo 2 spínáno pokojovým termostatem.

4.3.5.Větrání - výměna vzduchu

V těsné nízkoenergetické budově chybí tzv. přirozená výměna vzduchu, tudíž ventilační systém se stává nutností. Použitím ventilačního systému se výrazně zvýší komfort bydlení, není třeba větrat okny a v kuchyních a koupelnách nedochází k akumulaci vlhkosti, vzduch je spolehlivě trvale vyměňován.
V realizovaném domě bude využito ventilačního zařízení se zpětným získáváním tepla. Tento ventilační systém s rekuperací bude v domě vyměňovat 150m^3 vzduchu za hodinu. Vzduch bude odsáván z kuchyní, WC a koupelen. Čistý vzduch bude přiváděn do obytných místností. Rekuperační výměník je zatím vlastní konstrukce s účinností kolem 90% (laboratorně měřeno). Čistý vzduch je vháněn přes zemní registr vytvořený v základech domu.

4.3.6 Energetické hodnocení objektu NNED

K hodnocení energetické náročnosti budovy lze užít buď tradičně tzv. celkovou tepelnou charakteristiku budovy nebo nověji podle vyhlášky 291/2001 měrnou spotřebou tepla na vytápění vázanou na objem vytápěné zóny budovy ve smyslu ČSN EN 832 [65], [12]. V literatuře se objevuje také hodnocení budovy prostřednictvím průměrného součinitele prostupu tepla U_{em} nebo podle potřeby tepla za rok.
Celková tepelná charakteristika budovy [$Wm^{-3}K^{-1}$]se stanovuje pro jednotnou úroveň vnějších klimatických podmínek a je vztažena k rozdílu výpočtové venkovní a výpočtové vnitřní teploty 1*K*. Tato veličina je určena k vzájemnému porovnávání budov, proto je stanovována pro standardizované podmínky t_e=-15°*C*, t_i=20°*C* normální nechráněná poloha (*B*=6$Pa^{0,67}$ pro řadové, *B*=8$Pa^{0,67}$ pro osamělé budovy), počet denostupňů 3422*Kden*, součinitel nesoučasnosti tepel.ztrát infiltrací a prostupem tepla $\acute{e}$=0,895.
Normovou hodnotu q_c lze stanovit v závislosti na geometrické charakteristice přímo z tabulky Tab.6, případně přesněji výpočtem, známe-li celkovou tepelnou ztrátu budovy pro daný obestavěný prostor.
Celková tepelná ztráta budovy *Q* se stanoví podle ČSN 060210(6) za kvazistacionárních podmínek při nepřerušovaném vytápění, užívá se pro dimenzování otopné soustavy.
Celková tepelná ztráta budovy *Q*[W] se určuje jako součet tepelných ztrát místností s případným započtením zisků a uvažováním současnosti infiltrace a doby provozu jednotlivých místností. Tepelná ztráta místnosti [W] se vypočítá jako součet tepelné ztráty prostupem konstrukcemi, tepelné ztráty větráním , snížený o trvalejší tepelné zisky.

Celková tepelná ztráta
Přibližný způsob výpočtu celkových tepelných ztrát je možný také tzv. obálkovou metodou. Ta se nezabývá ztrátami vnitřních konstrukcí, ale stanovuje pouze tepelnou ztrátu

obalovými konstrukcemi, tedy obalovým pláštěm včetně infiltrací střešních konstrukcí a podlahovou konstrukcí pod nejnižším podlažím.
Pro výpočet energetického vyhodnocení uvažovaného NNED obálkovou metodou byly použity tyto údaje:
Výpočtová teplota vnějšího vzduchu t_e -15°C
Průměrná výpočtová vnitřní teplota t_i 20°C
Teplota přilehlé zeminy +5°C

Vlastnosti obálky budovy:
podlaha nad studeným podložím: $S_1=100m^2$, $k=0,2Wm^{-2}K^{-1}$
obvodové zdi: $S_2=230m^2$, $k=0,16Wm^{-2}K^{-1}$
střecha: $S_3=148m^2$, $k=0,13Wm^{-2}K^{-1}$
okna: $S_4=42m^2$, $k=0,8Wm^{-2}K^{-1}$
$S=S_1/2+S_2+S_3+S_4=470m^2$
obestavěný objem budovy $V=648m^3$
geometrická charakteristika budovy $S/V=0,73m^2/m^3$
průměrný součinitel prostupu tepla vnějších konstrukcí $k_{e,pr}=0,233Wm^{-2}K^{-1}$
Přirážky:
p_1 přirážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí (v našem případě 0.03)
p_2 přirážka na urychlení zátopu (v našem případě 0)
p_3 přirážka na světovou stranu (v našem případě 0)
výměna vzduchu $n_{pr}=0,1hod^{-1}$ (rekuperátor)
Vztahy pro výpočet celkové tepelné ztráty Q_c, Q_{cz}, tepelné ztráty prostupem Q_p a tepelné ztráty větráním Q_v:

$$Q_c = Q_p + Q_V$$
$$Q_{cz} = Q_p + Q_V - Q_{zisk} \qquad [4.15]$$
$$Q_p = (1 + p_1 + p_2 + p_3)\sum_j S_j k_j (t_i - t_{ej}) \quad \text{a} \quad Q_V = \frac{1300}{3600}\cdot n \cdot V \cdot (t_i - t_e) \quad .$$

Celková tepelná ztráta uvažované budovy bez započtení zisků byla stanovena na hodnotu Q_c=4340W.
Přihlédneme-li k tomu, že součet tepelných zisků od vnitřních zdrojů tepla odhadujeme na 1250W a součet tepelných zisků skly oken 500W, lze celkovou tepelná ztrátu objektu se započtením zisků vyčíslit na Q_{cz}=2600W.

Celková tepelná charakteristika
Celková tepelná charakteristika budovy q_c a redukovaná q_{red} hodnotí energetické řešení objektu, pro výpočet tepelné charakteristiky užijeme celkovou tepelnou ztrátu budovy a postup podle ČSN 730540-2-7.1.
Celková tepelná charakteristika budovy q_c je součtem $q_c = q_{c,p} + q_{c,v}$, kde pro námi uvažovanou budovu nízkoenergetického domu vychází:
tepelná charakteristika budovy prostupem tepla $q_{c,p}$=0,196Wm^{-3}K^{-1} ,
tepelná charakteristika budovy výměnou vzduchu $q_{c,v}$=0,036Wm^{-3}K^{-1} ,
tedy celkem q_c=0,232Wm^{-3}K^{-1}.

Pro danou geometrii je v Tab.6 doporučená hodnota je q_{cN}=0,54Wm^{-3}K^{-1}.

Stanovení redukované tepelné charakteristiky q_{red} budovy vychází ze vztahu

$$q_{red} = q_c - \frac{\sum Q_{i,j} + m \cdot \sum Q_{ok,j}}{V_n (t_i + 15)} \qquad \mathrm{Wm^{-3}K^{-1}}, \qquad [4.16]$$

kde
$SQ_{i,j}$=1250W je součet tepelných zisků od vnitřních zdrojů,
$SQ_{ok,j}$=500W je součet tepelných zisků skly oken a
μ bezrozměrný součinitel využití slunečního záření $m \approx 0{,}95$.
V případě námi uvažované budovy nízkoenergetického domu dostáváme hodnotu redukované tepelné charakteristiky q_{red}=0,155Wm^{-3}K^{-1}, přičemž doporučená hodnota z normy pro danou geometrickou charakteristiku je $q_{red,N}$=0,42Wm^{-3}K^{-1}.

Poznámka.
Při výpočtu $k_{e,pr}$ se počítá s paušálním koeficientem 1,1 (10% navýšení) zohledňujícím tepelné mosty vzniklé při zabudování konstrukcí. Výpočtová ztráta naší budovy prostupem tepla vnějšími konstrukcemi budovy byla stanovena na 3520W.
Pokud bychom neoddělili zdi od studeného podloží vrstvou pórobetonu a cihelné zdivo bychom vyzdívali přímo na studené podlaží činil by jen těmito zdmi tepelný tok do studeného podloží asi 660W (odstavec 4.1.5). Tento tepelný most tedy paušální přirážka 10% na součinitel prostupu konstrukce zdaleka nepokryje a tudíž je výpočet chybně.
Jelikož jsme však cihelné zdivo oddělili vrstvou pórobetonu, redukoval se únik tepla do studeného podloží na hodnotu asi 112W a tyto ztráty již lze paušální přirážkou postihnout. Tento příklad dokumentuje, jak obrovský podíl na celkových ztrátách mohou mít tepelné mosty, pokud nejsou důsledně ošetřeny.

Výpočet potřeby tepla na vytápění
Výpočet potřeby tepla na vytápění nyní vychází z ČSN EN 832 [12], [65]. Tato evropská norma schválená v roce 1998, která má status naší národní normy od r.2000, přinesla pokrok v podobě možnosti stanovit délku topného období v závislosti na kvalitě zateplení budovy, jejich energetických ziscích, klimatických údajích, případně dalších parametrech. Tak se výrazně zpřesnil způsob výpočtu potřeby tepla zvláště pro budovy s velmi nízkou spotřebou energie.
Postup výpočtu podle této normy vychází z ustálené energetické bilance, která zohledňuje dynamický účinek vnitřních a solárních zdrojů tepla pomocí stupně využitelnosti. Předmětem této normy je zjednodušený postup výpočtu stanovení potřeby tepla a potřeby energie na vytápění prostorů obytné budovy.
Aplikovali jsme postup doporučený v [64] na navrhovaný NNED a sestavili program *dum.exe* pro výpočet hlavních energetických ukazatelů jednozónové budovy. Výpis zdrojového textu je na konci této části.

Podle návodního příkladu uvedeného v [64] bylo postupováno v těchto komentovaných krocích:
1, Stanovit hranice vytápěného prostoru, příp. hranice zón - uvažujeme budovu jako jednozónovou.

2, Určit požadovanou výpočtovou vnitřní teplotu t_i a provozní podmínky, uvažujeme t_i=21°C, nepřerušované vytápění.

3, Stanovit účinnou tepelnou kapacitu budovy *C*, buď podle typu budovy nebo výpočtem

- v našem případě jsme stanovili výpočtem: *C*= 90MJ/K = 25kWh/K.

4, Určit měrnou tepelnou ztrátu zóny - budovy *H*.
Pozn. : Měrná tepelná ztráta objektu (zóny) je vyjádřitelná součtem:

$$H = H_T + H_V \,, \qquad [4.17]$$

kde H_T je měrná tepelná ztráta prostupem [*W/K*],
Hv je měrná tepelná ztráta větráním [*W/K]*.
Měrná tepelná ztráta větráním se počítá $H_v = n \cdot V \cdot r_a c_a = n \cdot V \cdot 0{,}34$.

Výpočet měrné tepelné ztráty prostupem je uveden v ČSN EN ISO 13789 [67]:

$$H_T = L_D + L_S + H_U \quad , \qquad [4.18]$$

kde L_D je tepelná propustnost mezi vytápěným prostorem a vnějším vzduchem [*W/K*],
L_S je ustálená tepelná propustnost zeminou [*W/K*],
H_U je měrná tepelná ztráta nevytápěnými prostory [*W/K*].
Vztahy pro výpočet tepelné propustnosti mezi vytápěným prostorem jsou uvedeny v ČSN EN ISO 13789 [67] , podobně jako pro výpočet měrné tepelné ztráty nevytápěnými prostory (garáže, zimní zahrady, půdy apod.). Vztahy pro výpočet ustálené tepelné propustnosti zeminou jsou uvedeny v ČSN EN ISO 13370 [66].

V našem výpočtu jsme postupovali pro určení H_T poněkud jinak, využili jsme toho, že programem lehce určíme tepelnou ztrátu budovy prostupem Q_p[*W*] k daným průměrným měsíčním teplotám t_e, takže měrnou tepelnou ztrátu prostupem tepla v daném měsíci H_T jsme vždy vypočítali ze vztahu

$$H_T = \frac{Q_p}{t_i - t_e} \qquad [WK^{-1}], \text{ přitom } \qquad [W] \qquad [4.19]$$

Q_p je množství tepla na pokrytí tepelné ztráty prostupem při dané průměrné teplotě v měsíci.

5, V dalším kroku se pro každý časový úsek - měsíc vypočte tepelná ztráta vycházející z předpokladu konstantní vnitřní teploty a průměrné vnější teploty v daném měsíci jako

$$Q_{celk} = Q_p + n \cdot V \cdot 0{,}34\left(t_i - t_{ej}\right) \quad [W]. \qquad [4.20]$$

Výpočet vnitřních tepelných zisků stanovíme z rovnice

$$Q_g = Q_i + Q_s \qquad [W], \qquad [4.21]$$

přičemž interní zisky Q_i odhadujeme jako $5W$ na $1m^2$ podlahové plochy budovy: Q_i=1200W a solární zisky Q_s se stanovují pomocí klimatických údajů [7- Př.A] a solárně účinných ploch.

$$Q_s = \sum_j I_{sj} \sum_n A_{snj} \quad [\mathrm{W}],$$

I_{sj} je průměrný výkon globálního slunečního záření za měsíc na jednotku plochy *n* o orientaci *j* a A_{snj} je solárně účinná plocha povrchu *n* o orientaci *j*. Je to plocha černého tělesa, které má stejný zisk jako uvažovaná plocha.
Tepelné ztráty Q_{celk} a tepelné zisky Q_g se tedy vyčíslí pro každý měsíc, pro který je známa průměrná teplota a zářivá energie slunce pro různé orientace ploch dopadu slunečního záření.

6, Potřeba tepla na vytápění pro každý časový úsek se stanovuje ze vztahu:

$$Q_h = Q_{celk} - Q_g \cdot h\,, \qquad [4.22]$$

přičemž Q_t=0 a h=0, je-li průměrná vnější teplota vyšší než požadovaná vnitřní teplota.

Stupeň využití tepelných zisků h je redukčním činitelem tepelných zisků. Zavádí se do ustálené energetické bilance pro zohlednění dynamického chování budovy.

Stupeň využití tepelných zisků h závisí na tepelné setrvačnosti budovy a na podílu zisků a ztrát γ:

pro $\gamma \neq 1$ $h = \frac{1-g^{\,a}}{1-g^{\,a+1}}$ nebo pro $\gamma = 1$ $h = \frac{a}{a+1}$, [4.22a]

γ je poměr tepelných zisků a tepelných ztrát $g = \frac{Q_g}{Q_{celk}}$

$$a = a_0 + \frac{t}{t_0} \qquad t = \frac{C}{H} \qquad [4.22b]$$

C je tzv. účinná vnitřní tepelná kapacita, a v našem případě je a_0 =1, t_0=16 *hod* (hodnoty pro výpočet po měsících) [64] a C=25 *kWh/K*.

7, Roční potřeba tepla budovy je součtem hodnot ze všech měsíců, pro které je průměrná vnější teplota nižší než požadovaná vnitřní teplota.

Tab. 1 Výsledné energetické výpočty pro navrhovaný nízkonákladový dům

měsíc v roce	**10.**	**11.**	**12.**	**1.**	**2.**	**3.**	**4.**
měrná tep. ztr. H [W/K]	157.5	146.4	142.7	141.8	142.8	144.8	155.4
časová konst. tau [hod]	158.7	170.8	175.2	176.4	175.1	172.7	160.9
číselný parametr a [-]	10.92	11.67	11.95	12.02	11.94	11.79	11.05
zisky/ztráty gamma [-]	1.13	0.638	0.502	0.514	0.602	0.896	1.447
st.využ. zisků eta [-]	0.85	0.998	1	1	0.999	0.962	0.687
ztr.do podloží q_pod [W]	384	384	384	384	384	384	384
ztráty prostupem q_T [W]	1185	1793	2158	2279	2147	1935	1266
ztráty větráním q_v [W]	274	414	498	526	496	447	292
interní zisky q_int [W]	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
solární zisky q_sol [W]	883	454	327	440	622	1277	1612
potřeba tepla Qh [W]	73	940	1513	1550	1207	382	10
teplo za měsíc [kWh]	52	677	1090	1116	869	275	7

spotřeba tepla za rok 4086 *kWh*
měrná potřeba tepla 17.03 kWh/(m^2 rok)
potřebný topný výkon pro -15°C bez solárních zisků 3673W

Výpis zdrojového textu vytvořeného programu *dum.exe*

```
program dum
implicit real*8 (a-h,o-z)
real*8 s(10),fk(10),f(5),g(5),t(7),sl(5,7),hh(7),ttau(7),aa(7),eeta(7),ppv(7),&
ppo(7),ppp(7),ggam(7),pp(7)
open(unit=55,file='dumdat.dat')
open(unit=66,file='dumout.dat')
read(55,*)v,ss,fn,tint
read(55,*)p1
read(55,*)p2
read(55,*)c
read(55,*)n
```

dumdat.dat

```
648 240 0.1 21 objem [m3], plocha[m2], výměna vzduchu n[hod-1], t_inter [oC]
1200     konstant. zisky interní (obv.5W na m2 podlah.plochy -> 120*5*2) [W]
384      konstant. ztráty podlahou do podloží  120m2*0,2*16 [W]
25000    učinná vnitřní tepelná kapacita [WhK-1]
3        počet typů obálkových konstrukcí
230 0.16      plocha stěn [m2], k [Wm-2K-1]
148 0.13      plocha střechy[m2], k [Wm-2K-1]
42 0.8        plocha oken [m2], k [Wm-2K-1]
0.13     přirážky: na tepelné mosty(0,1), chladné konstrukce (0,03),
4 0.6         plocha okenního skla [m2], g [-] orientace J,
0 0.6         plocha okenního skla [m2], g [-] orientace JV,JZ
```

```
      do i=1,n
      read(55,*)s(i),fk(i)
      enddo
      read(55,*)prir
      do i=1,5
      read(55,*)f(i),g(i)
      enddo
      do i=1,7
      read(55,*)t(i),(sl(j,i),j=1,5)
      enddo
      sum=0
      do i=1,7
      pp(i)=0
      do j=1,n
      pp(i)=pp(i)+(tint-t(i))*s(j)*fk(j)*(1+prir)
      enddo
      ppv(i)=v*fn*(tint-t(i))*1.3/3.6
      ppo(i)=0
      do j=1,5
      ppo(i)=ppo(i)+f(j)*g(j)*sl(j,i)/30/24*1000
      enddo
      hh(i)=(p2+pp(i)+ppv(i))/(tint-t(i))
      ttau(i)=c/hh(i)
      aa(i)=1+ttau(i)/16
      ggam(i)=(p1+ppo(i))/(p2+pp(i)+ppv(i))
      eeta(i)=(1-ggam(i)**aa(i))/(1-ggam(i)**(aa(i)+1))
      ppp(i)=p2+pp(i)+ppv(i)-eeta(i)*(ppo(i)+p1)
!     write(66,'(i10,5f11.4)')mes,h,tau,a,gam,eta
!     write(66,'(7f11.4)')p1,p2,p,pv,po,p2+p+pv-eta*(po+p1),& (p2+p+pv-eta*(po+p1))*.72
!     sum=sum+max(0d0,(p2+pp(i)+ppv(i)-eeta(i)*(ppo(i)+p1))*.72)
      sum=sum+max(0d0,ppp(i)*.72)
      enddo
      top=p2-p1+(pp(7)+ppv(7))*(tint+15)/(tint-t(7))
      write(66,'(a27,f8.0,6f9.0)')'      měsíc           |',10.,11.,12.,1.,2.,3.,4.
      write(66,'(a90)')'----------------------------------------------------------------------------------------------'
      write(66,'(a27,7f9.1)')'měrná tep. ztr. H [W/K]  |',hh
      write(66,'(a27,7f9.1)')'časová konst. tau [hod]  |',ttau
      write(66,'(a27,7f9.2)')'číselný parametr a [-]   |',aa
      write(66,'(a27,7f9.3)')'zisky/ztráty gamma [-]   |',ggam
      write(66,'(a27,7f9.3)')'st.využ. zisků eta [-]   |',eeta
      write(66,'(a27,7f9.0)')'ztr.do podloží q_pod [W] |',p2,p2,p2,p2,p2,p2,p2
      write(66,'(a27,7f9.0)')'ztráty prostupem q_T [W] |',pp
      write(66,'(a27,7f9.0)')'ztráty větráním q_v [W]  |',ppv
      write(66,'(a27,7f9.0)')'interní zisky q_int [W]  |',p1,p1,p1,p1,p1,p1,p1
      write(66,'(a27,7f9.0)')'solární zisky q_sol [W]  |',ppo
      write(66,'(a27,7f9.0)')'prům. topný výkon q [W]  |',ppp
      write(66,'(a27,7f9.0)')'teplo za měsíc Q_H [kWh] |',ppp*.72
      write(66,*)
      write(66,'(a33,f9.0)') 'spotř.tepla za rok [kWh]        ',sum
      write(66,'(a33,f9.2)') 'měrná spotř.tepla [kWh/(m2.rok)]',sum/ss
      write(66,'(a55,f9.0)') 'potřebný topný výkon [W] při -15°C bez solárních zisků',top
      end
```

4.4 Simulace NED

V širším slova smyslu se pojem simulace používá pro označení popisu reálného systému matematickým modelem. Simulace se často využívá k vyhodnocování pravděpodobných dopadů různých opatření.

Metody matematického modelování a počítačové simulace se stávají součástí návrhu budov a jejich zařízení. Simulace umožňuje modelovat dynamické změny a akumulaci systémů pro větrání, vytápění a klimatizaci v interakci s budovou. V praxi se objevují problémy, jejichž řešení bylo na základě dosavadních návrhových metod a zkušeností obtížné. Aplikace numerických metod, na kterých je simulace založena, a velké množství detailních výstupních parametrů umožňuje vysledovat příčiny a důsledky mnoha fyzikálních dějů v budově. To napomáhá k optimalizaci návrhu nových i stávajících budov a systémů vytápění. Při současných zvyšujících se nárocích na kvalitu vnitřního prostředí a úspory energie jde o podstatný přínos.

Počítačová simulace umožňuje řešit budovu a její zařízení jako dynamický komplex, který je ovlivňován změnami mnoha parametrů jako jsou venkovní počasí, provoz a regulace vytápění, pobyt osob v budově a podobně.

Zpřesnění výpočtů a možnost detailních analýz, které simulační programy nabízejí, vyžaduje podrobná vstupní data a co nejvýstižnější zadání okrajových podmínek.Vnější klimatické podmínky, které jsou specifické pro danou lokalitu, jsou podstatným faktorem ovlivňujícím tepelnou bilanci budovy. Pro zachycení vnějších klimatických podmínek jsou v dynamických simulačních modelech vyžadovány soubory hodinových dat šesti klimatických parametrů:

- teplota vzduchu měřená suchým teploměrem *[°C]*
- globální záření na horizontální plochu nebo normálová složka přímého záření *[Wm^{-2}]*
- difusní záření na horizontální plochu *[Wm^{-2}]*
- směr větru *[°]*
- rychlost větru *[ms^{-1}]*
- relativní vlhkost *[%]*

Při rozsahu standardního klimatického souboru 1rok, je požadováno 8760 údajů pro každý výše uvedený klimatický parametr, což je celkem 52 560 hodnot. Z tohoto důvodu je v simulačních programech podporována tvorba databází, které jednou vytvořeny jsou používány v dalších studiích. V současné době byla dokončena klimatická databáze pro Prahu, která byla vytvořena ze souboru hodinových dat měřených za posledních 14 let. Klimatické databáze pro další typické lokality v ČR jsou předmětem současných prací.

V tepelné bilanci vnitřního prostředí navrhované budovy jsou zohledněny odpovídající časově proměnné toky energie, které jsou tvořeny [28]:

- krátkovlnným zářením, které prochází zasklením do vnitřního prostředí
- dlouhovlnným zářením mezi sálavými plochami (sálání stěn a oblohy)
- konvekcí z povrchů do vzduchu
- konvekcí a sáláním topení a ventilačního systému
- prouděním vzduchu obvodovým pláštěm budovy, uvnitř budovy
- sáláním a konvekcí od osob a zařízení

4.4.1 Software

Simulace provozu námi uvažovaného nízkoenergetického domu byla prováděna pomocí programu EAGLE. Tento softwarový produkt je od roku 1992 průběžně budován doc.Šťastníkem [71]. Postupně se zpřesňují způsoby popisů vazeb a dílčích tepelných procesů.

Program EAGLE umožňuje vytvořit dynamický simulační model s daným časovým krokem budovy metodou tepelné rovnováhy. Simuluje teplotní chování jednotlivých místností budovy v čase v určitých intervalech. Berou se do úvahy vnitřní tepelné zátěže, sluneční radiace, volné teplo, vnější teplota klimatu. Výpočet zohledňuje přenos tepla mezi místnostmi, přičemž se modelují všechny místnosti (vazby).
Pro výpočet konkrétní budovy se podrobně zadávají tepelně technické parametry jednotlivých prvků konstrukce a požadavky na výměnu vzduchu. Pro zpřesnění výpočtů se zadávají poloha a vnější klimatické podmínky specifické pro danou lokalitu.

4.4.2 Zadání simulace

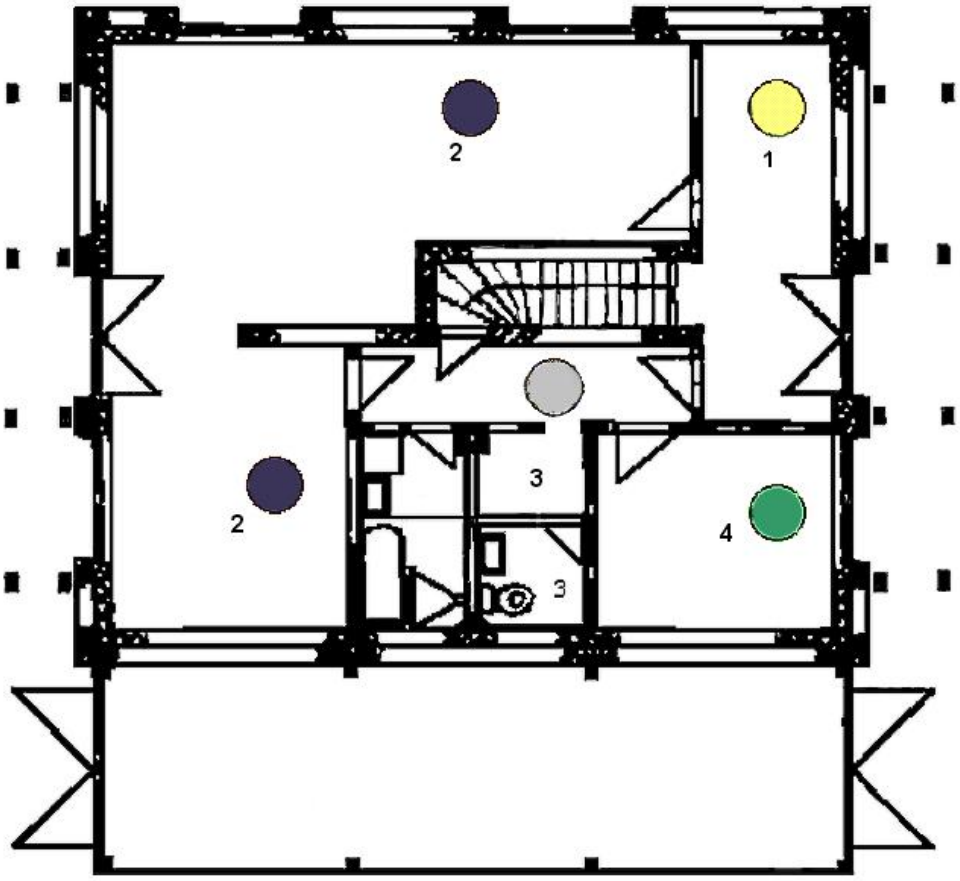
Objektem simulační studie byl stejný objekt - rodinný dům a to ve dvojím provedení. Jednou jako běžný dům s konstrukčními prvky splňujícími požadavky na konstrukční prvky podle doporučených hodnot ČSN 73540 a jednou jako nízkoenergetický dům, který tyto hodnoty překračuje směrem k vyššímu tepelně izolačnímu standardu.
Výsledkem bylo srovnání teplotních poměrů v obytných místnostech daných domů.

Hodnoty parametrů pro simulaci programem EAGLE:
Klimatická lokalita Brno
Poměr A/V=0,8m^{-1}
Obestavěný objem domu....648m^3
Plocha obálky.....520m^2

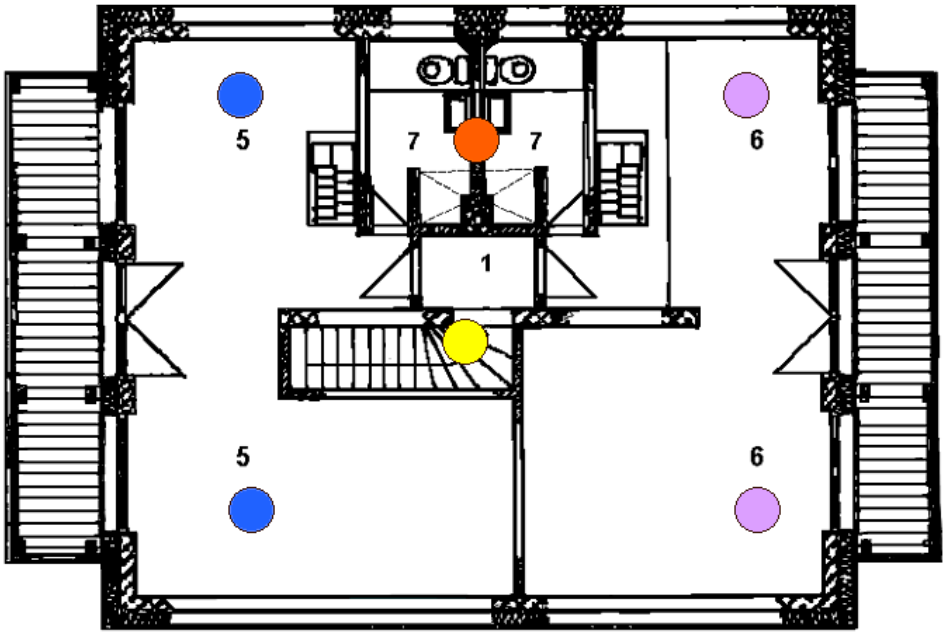
Celková tepelná charakteristika budovy q_c:
pro NNED…….....……...…….0,23$Wm^{-3}K^{-1}$
pro běžný dům …doporučená hodnota z Tab.6.....……0,54$Wm^{-3}K^{-1}$
$R_{podlahy}$ = 5 m^2KW^{-1}
$R_{obvstěna}$ = 6,5 m^2KW^{-1}
$R_{střecha}$ = 7 m^2KW^{-1}
k_{oken} = 0,8 $Wm^{-2}K^{-1}$

Do vstupního datového souboru pro simulační výpočet se dále vkládají údaje:
propustnosti skelných výplní *T_OK_PROPUST*=0,6
intenzity výměny vzduchu n=0,1hod^{-1} (zohledňuje se rekuperace)
pohltivosti vnějších stěn A=0,40

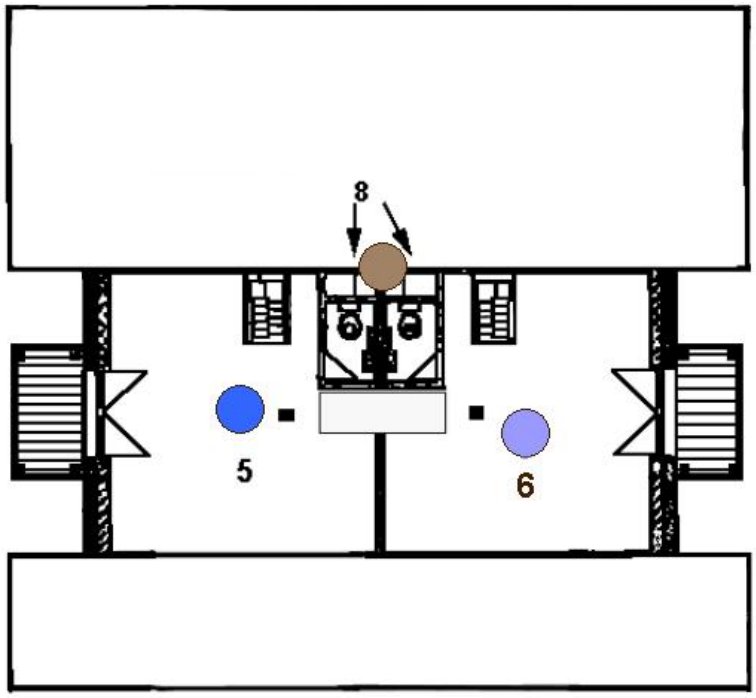
Místnosti v uvažovaném NNED byly označeny čísly a barevnou značkou, která odpovídá barevnému značení teplotních křivek v simulaci. Přiřazení a poloha jednotlivých místností jsou vidět na obrázcích Obr.20-22. Podrobnosti lze vyčíst z dokumentace v příloze práce.



Obr. 15 První nadzemní podlaží



Obr. 16 Druhé podlaží



Obr. 17 Podkroví

4.4.3 Výsledky simulace

Simulací byly řešeny tyto úlohy:
1.úkol: srovnání domů v zimním topném období
2.úkol: srovnání obou domů na začátku topné sezóny

1.úkol: srovnání domů v zimním topném období

Simulací byly predikovány poměry ve srovnávaných domech v zimním období v lednu. Konkretně to byl kalendářní den 25.1. Jde vždy o ustálené teploty (počítáno od 15.1.). V domech bylo topeno přerušovaně konstantním topným výkonem v době od 16^{00}*hod* do 24^{00}*hod*.

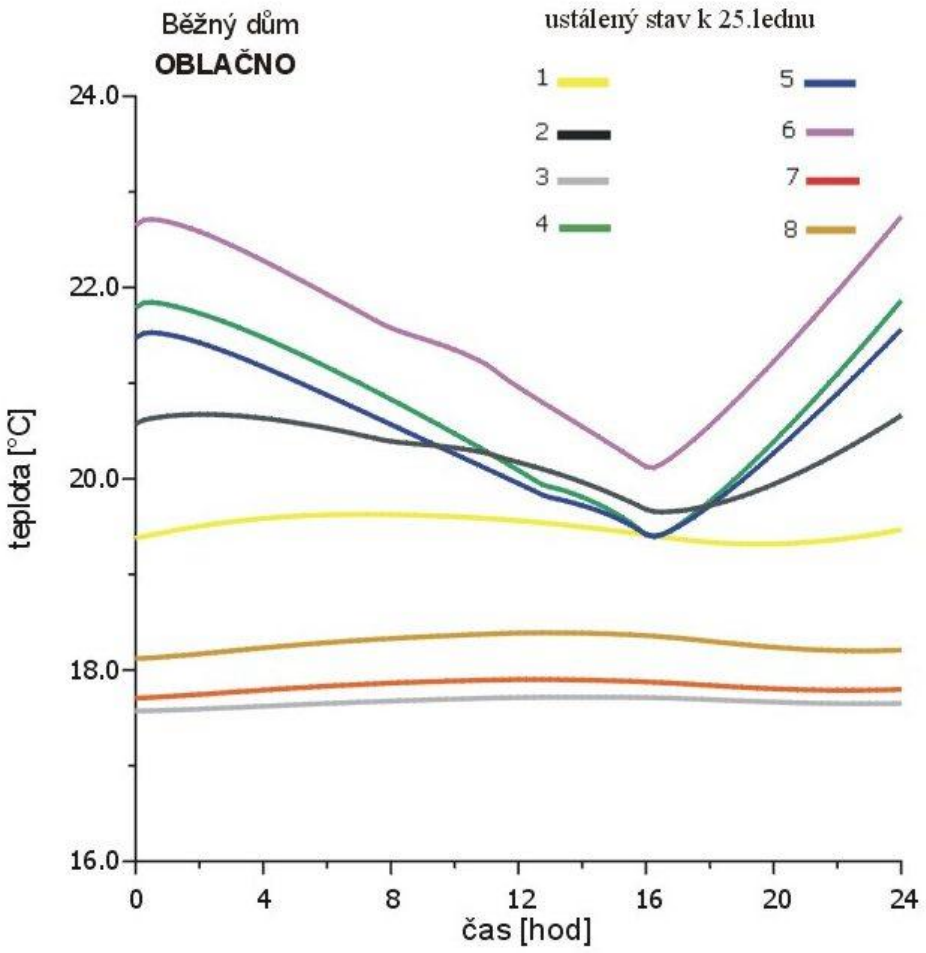
Z výsledků topných výkonů uvedených v tabulce Tab.20 je vidět:
vliv slunečního záření na topný výkon není příliš významný (není započítán zisk slunečních kolektorů),
spotřeba tepla na vytápění je u běžného domu téměř trojnásobná,
jaké jsou topné výkony v jednotlivých místnostech domu $[Wm^{-2}]$.

Tab. 2 Potřebné topné výkony (analýza vlivu slunečního svitu u NED)

Topný výkon v místnosti $[Wm^{-2}]$**:**	**Číslo 2**	**Číslo 4**	**Číslo 5 a 6**	**Celkový výkon** *[W]*
NED jasno	0	50	50	7350
NED zataženo	5	57	56	8637
NED oblačno	5	56	55	8490

Běžný dům oblačno	35	140	155	22650

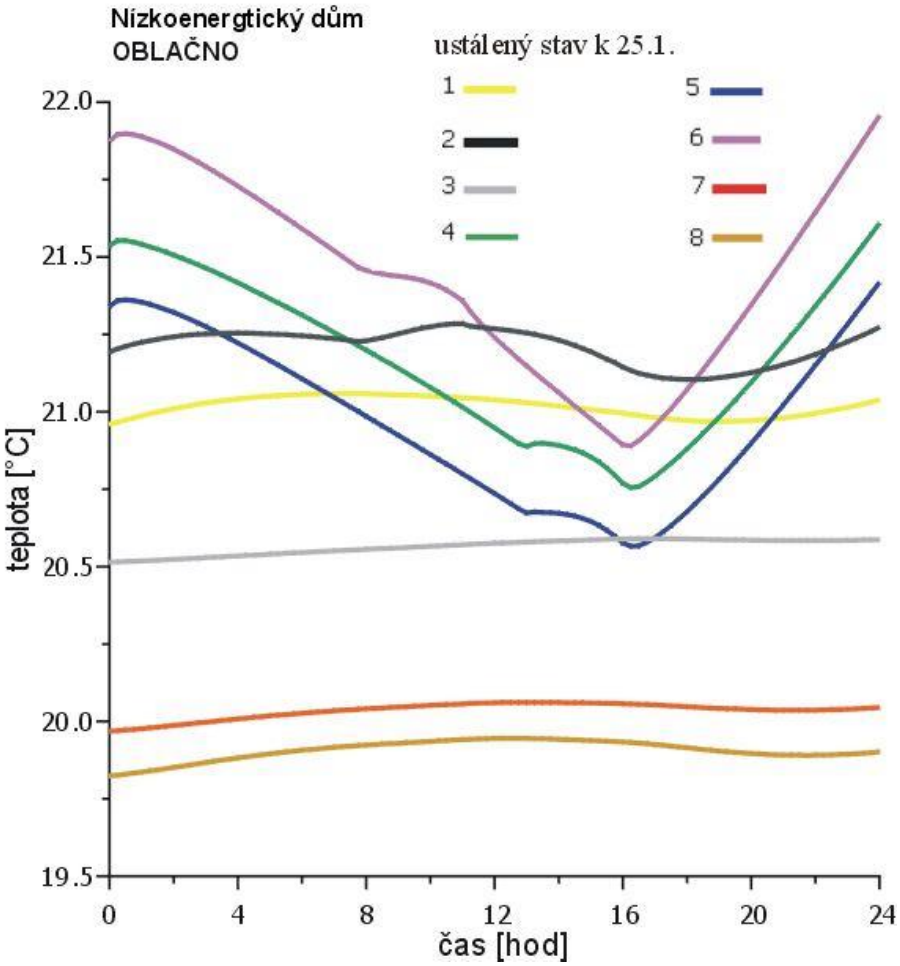
Na následujících obrázcích vidíme denní chod teplot ve všech případech pro jednotlivé místnosti. Barvy a číslice křivek označují vždy teplotu v konkrétní místnosti domu.



Obr. 18 Běžný dům oblačno

Průběhy výsledných teplot jsou při stejném způsobu topení v obytných místnostech běžného domu charakterizovány výkyvy až o 2,4°C, kdežto v NNED jsou to výkyvy o 1°C.
I na chodbách a neobývaných místech je teplota o více než dva stupně vyšší. Přitom potřebný topný výkon u běžného domu je téměř třikrát vyšší než u NNED (viz tabulka).

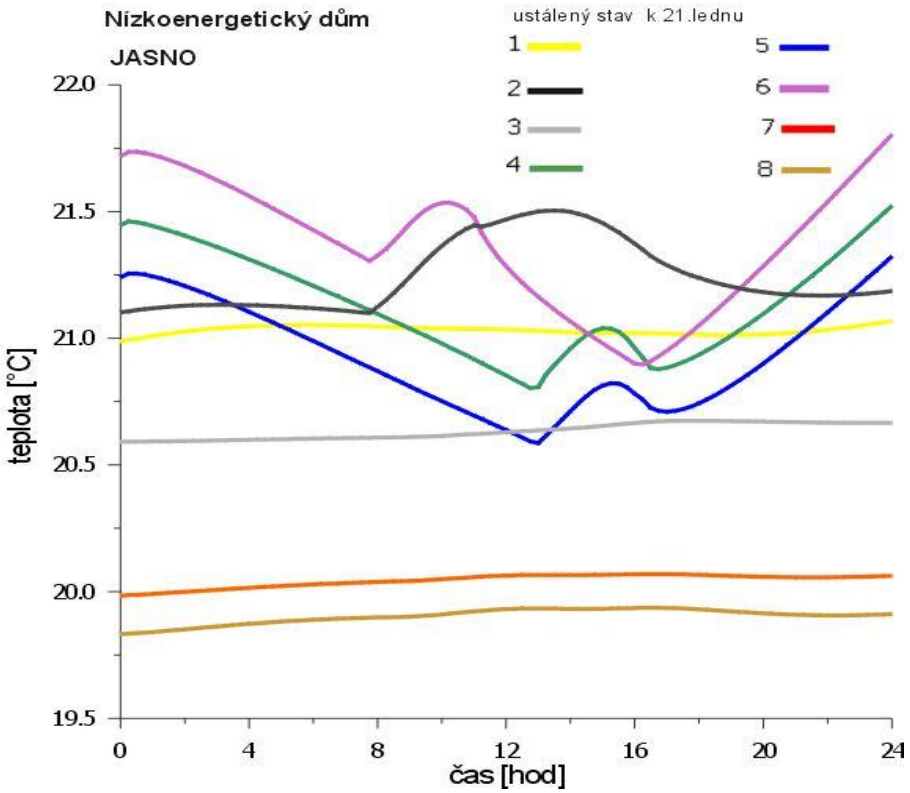
Na obrázcích Obr.24, Obr.25 vidíme opět průběhy teplot v jednotlivých místnostech nízkoenergetického domu ovšem v případě odlišného počasí.



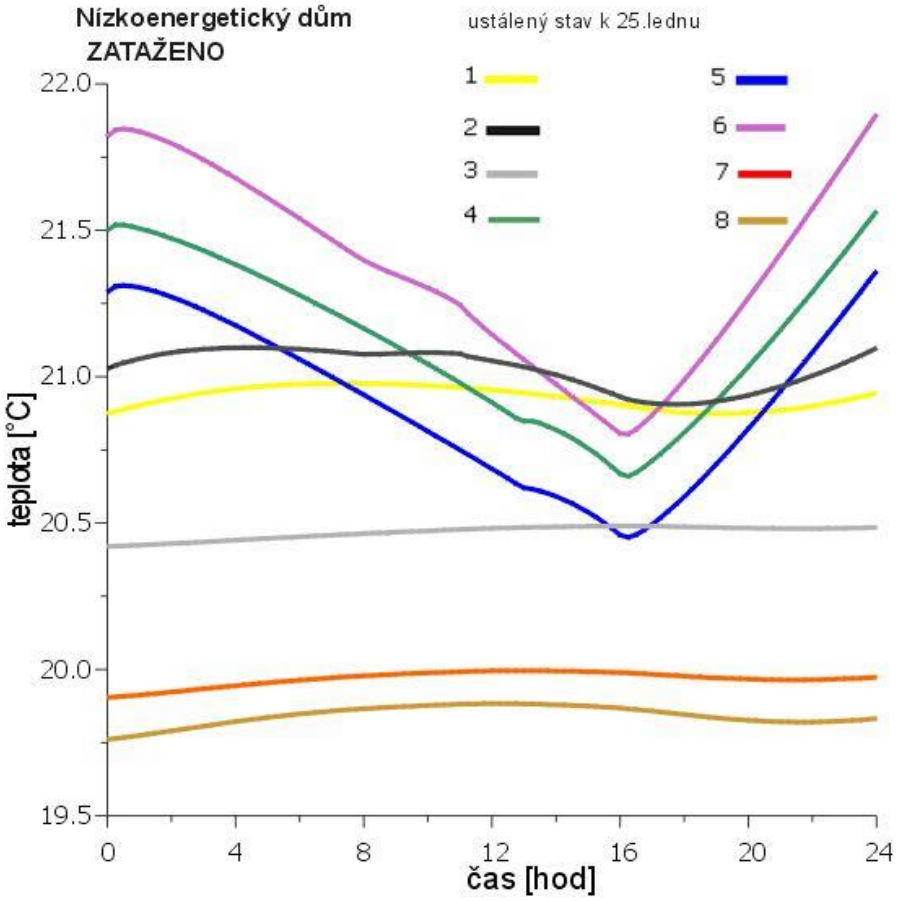
Obr. 19

Na následujícím obrázku Obr.25 je zobrazeno teplotní chování jednotlivých místností NNED ve stejném ročním období, ale v případě, že je jasné počasí. Ze simulace je vidět, že solární zisky u námi uvažovaného nízkoenergetického domu nezpůsobují významné přehřátí žádné z místností. Je patrné, že změny teploty v místnostech jsou na úrovni 0,5°C. Topné výkony potřebné pro analyzované případy vlivu slunečního svitu jsou uvedeny v tabulce Tab.20.

Na dalším obrázku Obr.26 je zobrazen výsledek simulace teplotních průběhů v místnostech navrhovaného nízoenergetického domu pro stejné roční období, t.j. k 25.lednu, ale v případě, že je zataženo.

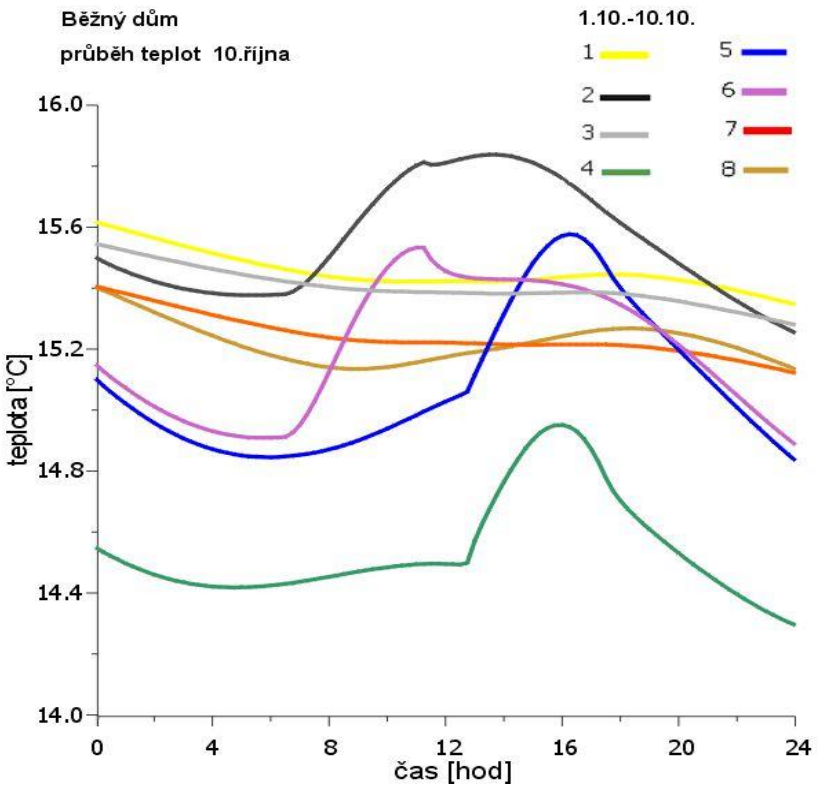

Nízkoenergetický dům
JASNO
ustálený stav k 21.lednu
1
2
3
4
5
6
7
8
22.0
21.5
21.0
20.5
20.0
19.5
teplota [°C]
0
4
8
12
16
20
24
čas [hod]

Obr. 20

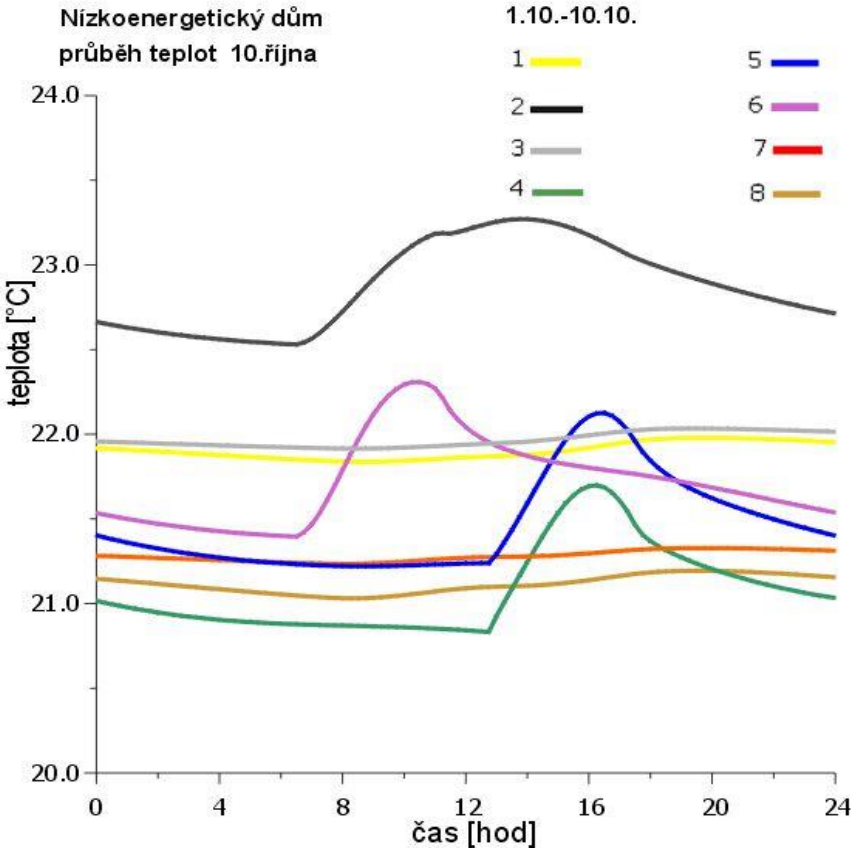

Nízkoenergetický dům
ZATAŽENO
ustálený stav k 25.lednu
1
2
3
4
5
6
7
8
22.0
21.5
21.0
20.5
20.0
19.5
teplota [°C]
0
4
8
12
16
20
24
čas [hod]

Obr. 21

2.úkol: srovnání obou domů na začátku topné sezóny 1.-10.října



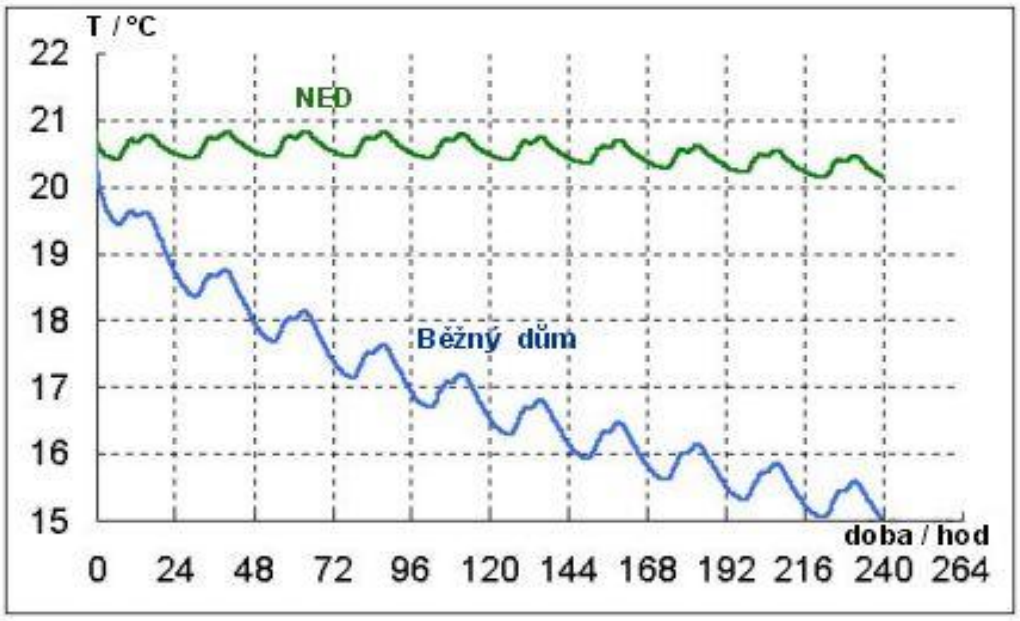
Obr. 22



Obr. 23

Simulací byly srovnávány průběhy teplot v NED a běžném domě od 1.10. do 10.10. bez vytápění. Na obrázcích Obr.27 a Obr.28 vidíme, jak budou průběhy teplot v jednotlivých místnostech vypadat 10.října v běžném domě a v NED.

Srovnání trendu průměrných teplot v NED a běžném domě během počátku října:



Obr. 24 Srovnání trendu průměrných teplot během počátku října

Počítačový model dává obraz o energetickém chování objektu. Simulace modelu prokázala nevyhovující tepelný komfort v běžném domě bez topení.
K odstranění tepelné nepohody je nutno začít začátkem října topit, kdežto v NNED je teplota stále kolem 20°C. Stabilizace teplotních poměrů v nízkoenergetickém domě je díky všem tepelně izolačním opatřením velmi účinná.

4.5 Rentabilita

Rentabilita je označuje výnosnost investice. Měří se jako poměr celkového dosaženého zisku k některému základnímu ekonomickému ukazateli, např. k vlastnímu kapitálu, k nákladům apod.

Ziskem nechť je pro nás rozdíl v cenách energiích na provoz RD (100 $kWh\ m^{-2}rok^{-1}$) a NNED (20 $kWh\ m^{-2}rok^{-1}$) za rok a náklady budiž rozdíl financí potřebných k realizaci těchto domů, pak

$$r = \frac{(100-20)kWhm^{-2}rok^{-1} \cdot 240m^2}{I_{NED} - I_{RD}} * 1Kč / kWh . \qquad [4.23]$$

Předpokládáme-li rozdíl v nákladech 120 000$Kč$, což vychází z orientačního srovnání nákladů níže v tabulce, dostáváme rentabilitu 16% .

4.5.1 Investiční energetická náročnost

Zlepšováním izolačních vlastností konstrukcí a umožněním efektivnějšího využití solární energie i vnitřních zdrojů tepla dochází ke snižování provozní energetické náročnosti domu. Do celkové provozní náročnosti se započítává nejen spotřeba energie na vytápění a na přípravu TUV, ale i spotřeba energie na vaření, osvětlení a další energetické nároky na běžný provoz. Ve všech těchto položkách dochází v NNED k cílenému snižování spotřeby energie. To má za následek, že klesá nejen absolutní hodnota provozní energetické náročnosti, ale i podíl provozní energetické náročnosti na celkové energetické bilanci objektu, kterou chápeme jako součet investiční a provozní energetické náročnosti.

Právě u nízkoenergetických budov je daleko výraznější podíl investiční energetické náročnosti než náročnosti provozní. Investiční energetická náročnost v obecném pojetí zahrnuje spotřebu energie na výrobu jednotlivých stavebních materiálů a prvků, náklady na nezbytnou údržbu a opravy objektu, náklady na odstranění objektu po skončení jeho životnosti, recyklaci materiálů. Jedná se tedy v podstatě o spotřebu energie, sumarizující požadavky od pořízení objektu až po jeho úplnou likvidaci.

Hodnocení investiční energetické náročnosti budov je v současné době ve stadiu výzkumu, k jeho výraznějšímu rozšíření chybí především podrobný systém přesných údajů o energetické náročnosti výroby jednotlivých materiálů a prvků. V nedaleké budoucnosti však lze očekávat, že bude nezbytné hodnotit energetickou náročnost budov opravdu komplexně, to znamená s uvážením všech energetických vstupů a s ohledem na celý cyklus životnosti objektu.

4.5.2 Investiční náklady

Pokud jde o vyjádření investičních finančních nákladů na realizaci obou typů domů, je třeba vycházet z podrobného výkazu výměr pro obě stavby, který by se nechal ocenit různými firmami. Toto zadání se ovšem dále komplikuje odlišnostmi v technickém zařízení budov a důsledností, s jakou jsou nízkoenergetické zásady preferovány před jinými privátními požadavky. Například pokud někdo vyžaduje velký počet malých oken, okno v koupelně či ve střeše, je to jeho privátní preference, o to více se oba domy budou lišit nejen v investičních, ale i v provozních nákladech.

Vzhledem k tomu, že nemáme zatím k dispozici rozpočtářské prostředky a vypreparovat výkaz výměr z projektové dokumentace je zadání spíše pro stavební ekonomy, budou v této práci investiční náklady odhadnuty rozdílově tedy na základě diferencí mezi oběma typy stavby.

Předpokládejme, že oba domy mají stejnou dispozici, rozměry a zčásti stavební řešení, proto a srovnejme investiční náročnost pouze v položkách, ve kterých se obyčejný RD a NNED odlišují.

Tab. 3 Srovnávací propočty obou možností řešení domů stejné dispozice.

Stavební prvek, zařízení	**Rozdíl v nákladech NNED - běžný dům**
obvodové stěny	75 000 Kč
podlaha nad studeným podložím	15 000 Kč
střecha	30 000 Kč
rámy oken	-40 000 Kč
zasklení oken	20 000 Kč
otopný systém	-100 000 Kč
ventilace s rekuperací	50 000 Kč
sluneční kolektory	70 000 Kč
celkem	**120 000 Kč**
roční úspora energie (současná cena - 2001)	20 000 Kč
úspora energie za 100let (současná cena 2001)	2 000 000 Kč

4.6 Následné souvislosti

Z dosavadních úvah lze vyvodit závěr, že budovy stavěné podle dnešních předpisů budou prakticky celou svou dobu životnosti zaostávat, nedojde-li v budoucnu k jejich rekonstrukci. Při stavbě nových domů i při rekonstrukci stávajících objektů je lépe současné tepelně technické požadavky výrazně překročit, aby se budova v budoucnu znovu a jistě nákladněji nemusela zateplovat. Může samozřejmě v budoucnu nastat situace, že dům i s velmi nízkou spotřebou energie podle dnešních představ nebude považován za dostatečně zateplený.

Je však velmi pravděpodobné, že energetické potřeby takového domu bude v budoucnu výhodnější krýt z obnovitelných zdrojů jako je sluneční energie a biomasa, než provádět jeho náročnou rekonstrukci. Právě topení biomasou je velmi výhodné kombinovat s bydlením v domě s velmi nízkou spotřebou energie z následujících důvodů:

Topná sezóna v nízkoenergetickém domě bude kratší, odhaduje se jen tři, nejvýše pět, měsíců v roce.

Díky velké tepelné stabilitě budovy lze při zachování dostatečné tepelné pohody topit přerušovaně s dlouhými prodlevami (desítky hodin v silných mrazech a několik dní v přechodném období).

Množství ročně spálené biomasy není velké (kolem 1000 kg za rok na jeden rodinný domek) a její spalování nemusí být pro bydlící přílišnou zátěží.

Z těchto důvodů je dům s velmi nízkou spotřebou energie ideálním prototypem domu pro venkov, kam není zaveden zemní plyn a kde je možno získat biomasu v blízkém okolí.

4.6.1 Potenciální úspory

Vytápění budov tvoří ve vyspělých zemích mírného klimatu až 40% konečné spotřeby energie. Rozhodující položku v tom tvoří vytápění budov pro bydlení. V ČR je přibližně 3,7 milionů bytů s průměrnou plochou 70 m^2. Přes 40% z nich je v rodinných domcích, zhruba jedna čtvrtina v bytových domech z období před zahájením hromadné panelové výstavby (přibližně do r.1957), zbytek v panelových domech. Průměrné stáří rodinných domků je asi 60 let.

Z globálních údajů o spotřebě energie lze odvodit, že průměrný byt má měrnou spotřebu tepla přibližně v intervalu 100 –240 $kWh/(m^2 rok)$, přičemž rozptyl hodnot je velmi značný. Spotřeba energie na vytápění budov pro bydlení (včetně ohřevu teplé vody) v ČR ve výši 277 *PJ* za rok.

Na toto téma bylo zpracováno několik studií [3,8]. Závěry, které se ve studiích navrhují se týkají zlepšování tepelných vlastností plášťů budov a také dalších opatření v oblasti regulace a údržby. Úspory získané díky sanaci obvodových plášťů tvoří největší podíl alespoň 60% energie. Nové veřejné budovy by se měly stavět jako nízkoenergetické.

4.6.2 Globální kriteria

Jednoznačným a kvantifikovatelným globálním projevem každé budovy jsou emise CO_2 spojené s její existencí a provozem. Emise CO_2 z vytápění budov mají velký význam v celkové bilanci skleníkových plynů. Potřebné parametry budov je možné tedy odvozovat z požadavku na snižování těchto emisí např. pro zajištění splnění mezinárodních závazků

v této oblasti.
Evropská Unie se ve svých směrnicích zabývá úsporami energií ve všech oblastech a tedy i v budovách (Základní požadavek č.6. Úspory energie a tepelná ochrana) a Směrnice 93/76 Rady, program SAVE atd.). Programy jsou zaměřeny především na zvyšování účinnosti využívání energie, snižování emisí skleníkových plynů a hledání cest k řešení problémů zaměstnanosti a rozvoje regionů. Pátý rámcový program pro výzkum a vývoj technologií v technickém programu „Energy, Environment and Sustainable Development“ [5] obsahuje významnou část „Economic and Efficient Energy for a Competitive Europe“.
Technologie pro racionální zacházení s energií se mají dostat do stavu, aby vedly ke snížení spotřeby energie v budovách o 30% střednědobě (2010) a o 50% dlouhodobě. Dále se má zdvojnásobit podíl obnovitelných zdrojů v bytovém a komerčním sektoru na 12% energetické potřeby.
Pro zajištění udržitelnosti rozvoje v souvislosti s budovami to podle programu znamená snižovat tepelné ztráty o 25% při rekonstrukcích a o 30% u novostaveb oproti standardním hodnotám. Vyspělé technologie oken mají vést k hodnotám výsledného součinitele prostupu tepla až $0,5 W/(m^2K)$. Úsporné vytápění, chlazení, větrání, osvětlení, používání domácích spotřebičů a využití obnovitelných zdrojů má vést k poklesu emisí CO_2 o dalších 25% u rekonstrukcí a o 30% u novostaveb.

4.6.3 Doporučení pro další studie

Pro doplnění a podrobnější rozbor tématiky nízkoenergetického nízkonákladového stavitelství se jako perspektivní jeví tato navazující témata:
vývoj střešních oken a jejich způsobu zabudování bez vzniku tepelných mostů,
vývoj nízkonákladových stavebních systémů s vysokým tepelným odporem,
vývoj rekuperačních výměníků s vysokou účinností a s nízkou tlakovou ztrátou,
analýza a vývoj rentabilních systémů solárních kolektorů,
zkoumání nových možností pro akumulaci tepla na bázi fázových přeměn,
vývoj databáze environmentálních dopadů stavebních prvků a technologií,
podrobný popis tepelně vlhkostních procesů v jednoplášťových střechách,
dynamické modelování vlhkostně teplotních procesů v jednoplášťových superizolovaných střechách,
vývoj softwarových prostředků pro energetický audit nízkoenergetických domů,
instalace zařízení pro měření veličin pro stanovení tepelné pohody a registrace vnějších podmínek v realizované nízkoenergetickém objektu.

Aktuálním problémem dneška je potřeba vyvíjet levné a kvalitní zateplovací systémy a hledat zásady umožňující stavět cenově dostupné kvalitně zateplené stavby. Pak se dá očekávat, že případné zvýšené náklady na stavbu budou zaplaceny již v prvních letech užívání budovy na úsporách energie. Bylo by třeba podpořit vývoj a výzkum efektivních a kvalitních technologií pro budování nízkoenergetických staveb.

5 Závěr

Práce se zabývala konkrétní koncepcí nízkoenergetického domu, a to takového který dovoluje cenově efektivní snížení energetické náročnosti při zlepšení interního mikroklimatu obyvatel.
Řešení navrhovaného domu vychází z následujících dvou principů:
1. jednoduchost spočívající v optimalizaci všech nezbytných komponent tvořících budovu, jako obvodového pláště, oken, ventilačního systému. Zlepšení energetické efektivnosti těchto částí dovoluje omezit standardní vytápěcí systém a ušetřit část nákladů na jeho in-

stalaci;
2. minimalizace tepelných ztrát před maximalizací aktivních solárních zisků, což je pro naše geografické pásmo prokázáno výpočty.
Celkové investiční náklady včetně provozních nákladů po dobu 30 let jsou srovnatelné se standardní výstavbou.
Nízkoenergetický dům analyzovaný v práci je budova s komfortním vnitřním prostředím v zimním i v letním období. Potřeba tepla na vytápění objektů tohoto typu nepřesáhne $20 kWh/m^2/rok$.
Z hygienických důvodů je instalováno řízené větrání bytů, které díky rekuperaci je využito i energeticky. Ve srovnání se standardními budovami je potřeba tepla na vytápění objektu snížena až o 80%. Předpokládáme také minimalizaci ostatních potřeb energií v objektu, např. potřeby elektrické energie pro provoz domácích spotřebičů. Vše je navrhováno tak, aby konečná spotřeba energií na vytápění, větrání, přípravu TUV, i provoz domácích spotřebičů nepřesáhla 45 $kWh/m^2/rok$.

5.1 Shrnutí výsledků

Práce prokazuje, že lze stavět nízkonákladové budovy s velmi nízkou spotřebou energie pomocí běžných stavebních materiálů. K tomu, aby budova vyhověla z hlediska tepelných ztrát očekávanému dlouhodobému vývoji cen energie, je nutno stavět domy hlavně s mnohem lepšími vlastnostmi obvodového pláště.
V úvodní kapitole 3 předkládané práce jsou shrnuty poznatky, pojmy, vztahy a předpisy stavební tepelné techniky. Podrobněji je veden výklad problematiky interního mikroklimatu a tepelné pohody. Odstavce 3.5 a 3.6 se zabývají ekologickým a ekonomickým hodnocením stavby.
Kapitola 4 je věnována vlastnímu přínosu, tedy koncepčnímu návrhu a analýze konkrétního nízkoenergetického domu.
V podkapitole 4.1 jsou formulována kritéria pro hodnocení investice do vyššího tepelně izolačního standardu budovy, pomocí nichž byla určena skladba obálky budovy. Vhodným kritériem je požadavek minimalizace nákladů na stavbu + nákladů na topení za 30 let při současných cenách. Při aplikaci tohoto kritéria pro návrh obvodového pláště budovy budou sice vyšší náklady na použití izolačních materiálů, na druhé straně však mohou být redukovány náklady na nosné obvodové zdi a podstatně se sníží i náklady na otopný systém, který může být i několikanásobně méně výkonný.
Taktéž, jak je v podkapitolách 4.1-4.2 ukázáno, lze nalézt řadu doporučení, která vedou k úsporám energie i ke snížení nákladů na stavbu. Tak může dojít k situaci, že náklady na stavbu domu s velmi nízkou spotřebou energie mohou být velmi blízké nákladům na stavbu běžného domu navrženého projektantem bez aplikace doporučení na úspory energie.
Dílčí cíl 1.: nalezení vhodných řešení jednotlivých konstrukčních prvků nízkonákladového nízkoenergetického stavitelství,
Byl sestaven souhrn opatření pro prvky obvodového pláště budovy sestavený na základě optimalizačního kritéria požadavku minima investičních nákladů + nákladů na provoz za 30 let :
Tepelné parametry homogenních obvodových stěn masivních staveb nemohou dosáhnout hodnot potřebných pro nízkoenergetickou výstavbu a je třeba je nahradit stěnami sendvičové konstrukce. V této konstrukci cihlová zeď nutné tloušťky plní úlohu nosnou a akumulační, zatímco vnější izolace dostatečné dimenze ($25 cm$) plní úlohu izolační. Uvažovaný způsob zateplení umožní efektivní odstranění tepelných mostů v místech rámů oken, nadokenních překladů a věnců a napojení izolace obvodových stěn a izolace střechy.

V sedlových střechách je třeba vytvořit dodatečný prostor nad krokvemi pro další tepelnou izolaci střechy a veškerý prostor vyplnit izolačním materiálem. Celková vrstva izolace střech by měla dosahovat tloušťky 35*cm*.

Tloušťka izolace podlahy nad studeným podložím by měla dosahovat 20*cm*.

Pro zasklení oken je třeba používat alespoň izolační dvojskla s nízkoemisní vrstvou nejlépe plněné izolačním plynem.
Je třeba minimalizovat počet oken s využitím možnosti zvětšení jejich ploch a izolačně ošetřit rámy a ostění.

Veškeré stěny nad studeným podložím je třeba založit na lépe izolujících tvárnicích.

Je třeba vyloučit z povrchu budovy jakékoli výstupky, balkony a stříšky je vhodné řešit jako samonosné konstrukce s minimálním stykem s nosnou částí obvodového pláště.

Budování rozsáhlých prosklených stěn na jižní fasádě a zapouštění staveb do terénu jsou diskutabilní koncepce, které nemusejí vést ve srovnání s kvalitně zateplenými domy k úsporám energie.

V odstavci 4.1.5 uvádíme, že v důsledku nároků na kompaktnost budovy a odstranění tepelných mostů je třeba přijmout jistá omezení pro tvar a dispozici budovy. Uvedená doporučení je nutno zohlednit již v architektonickém návrhu, což představuje pro architekta jistá omezení. Tato omezení nevylučují zachování standardních užitných hodnot projektovaných staveb ani možnost jejich pěkného vzhledu.

V odstavci 4.1.4 je navrženo, jak se lze vypořádat s osazením rámu do stavebního otvoru. Tímto opatřením a použitím skel s dobrými tepelně izolačními vlastnostmi lze dosáhnout koeficient prostupu *k* okna 0,8 $Wm^{-2}K^{-1}$ při přiměřených finančních nákladech.

Dílčí cíl 2.:zkoumání optimální koncepční souhry inovačních prvků

Z odstavců 4.1.6 a 4.2.3 vyplývá, že nízkoenergetické domy mají být vybaveny vhodným ventilačním systémem.Utěsnění obvodového pláště budovy vede ke snížení samovolné výměny vzduchu s nebezpečím nedodržení hygienického limitu. Je zde jasně formulováno, že rozdíl mezi tradičními a nízkoeneregetickými budovami v oblasti větrání je v důrazu na řízené větrání a větrání se zpětným získáváním tepla.

Nedílnou součástí vlastního návrhu je sladění technického zařízení budovy s daným stavebním řešením při zachování podmínek tepelné pohody. V kapitole 4.2 jsou rozebrány podrobněji možnosti aktivních systémů. Jde především o přímé a nepřímé využití sluneční energie. Přímé využití představují v daném domě hlavně solární kolektory. Nepřímé využití sluneční energie je realizováno podzemními registry pro předehřívání ventilačního

vzduchu. Odhady uvedené v 4.2.4 ukazují, že pro kvalitně zateplené domy nemají prvky solární architektury prvotní energeticko-ekonomickou důležitost.

Dílčí cíl 3.: navržení nízkonákladového nízkoenergetického rodinného domu

Podkapitola 4.3 se zabývá skutečnou souběžně realizovanou stavbou rodinného NNED. Uvádí se zde výčet pasivních a aktivních opatření pro tuto konkrétní stavbu. Nákresy jsou v příloze práce.

Dílčí cíl 4.: vytvoření programu pro určení energetické náročnosti domu,

Pomocí vytvořeného programu je provedeno energetické zhodnocení navrhovaného objektu. Výpis zdrojového programu sestaveného tak, aby vycházel z metodiky evropské normy EN 832 pro výpočet potřeby energie na vytápění, je uveden v příloze práce. Určení energetických parametrů budovy probíhá před realizací otopné soustavy. Díky snížené spotřebě energie na vytápění, je možné využít výkonově menší zdroj tepla. Zefektivnění otopného systému se projeví jak v provozních nákladech, tak u nově budovaných systémů v pořizovacích investičních nákladech.

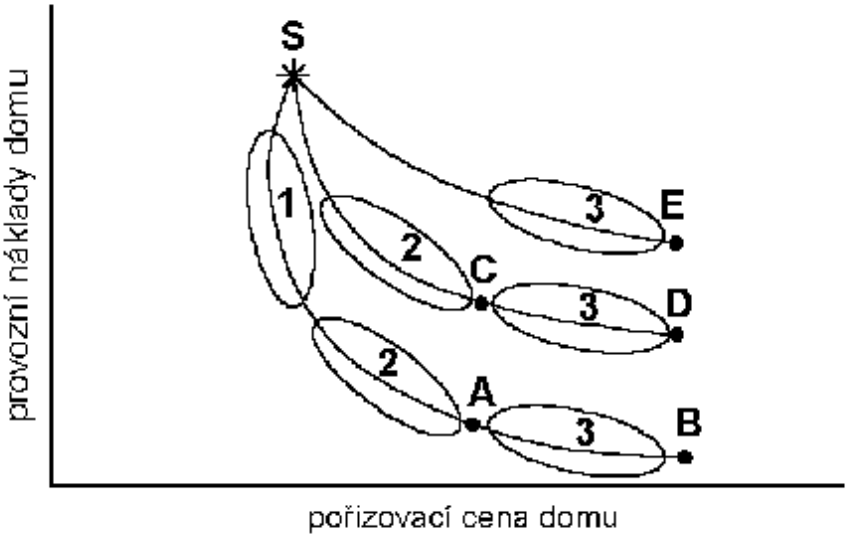
Dílčí cíl 5.: provedení orientačního srovnání nákladů na stavbu NNED s běžným domem

Z odhadu rentability (kapitola 4.5) vychází hodnota rentability vícenákladů na NNED asi 16% za rok, což je výrazně vyšší než běžná úroková míra. Srovnáním investičních položek pro oba typy domů jsme došli k rozdílu 120000Kč, což odpovídá v literatuře uváděným vícenákladům v rozmezí 5-10%.

Dílčí cíl 6.: simulace teplotní dynamiky domů během otopné sezóny.

V podkapitole 4.4 se simulují teplotní poměry v navrhovaném domě a v domě se srovnatelnou dispozicí ovšem postaveného tradiční technologií. Domy se nejprve srovnávaly v zimním topném období. Zjistili jsme, že potřebný topný výkon u běžného domu je během srovnavací doby téměř třikrát vyšší než u NNED. Další srovnání obou domů bylo provedeno na začátku topné sezóny, kde se jasně prokázala výborná stabilizace teplotních poměrů u NNED.

5.2 Závěrečné poznámky



Obrázek schematicky znázorňuje různé strategie při stavbě domu vedoucí ke snižování energetické náročnosti provozu (S – běžný dům).
Nejúčinnějšími jsou opatření typu 1 – kvalitní zasklení, malý počet velkých oken, potlačení tepelných mostů, těsnost obvodového pláště.
Velice rentabilními jsou opatření typu 2 – kvalitní zateplení pláště budovy spojené s redukcí tloušťky obvodových zdí, ventilační systém s rekuperací.
Na pokraji rentabilnosti jsou opatření typu 3 – solární architektura, tepelná čerpadla, sluneční kolektory.
Z hlediska dlouhodobé perspektivy trvale udržitelného rozvoje jsou možnými řešeními jen domy typu A a B. Domy typu S, C, D a E bude s velkou pravděpodobností v budoucnu třeba rekonstruovat a doplnit.

Nakonec lze uvést několik doporučení pro oblast nejen nízkoenergetického stavebnictví. Domníváme se, že lze provést další zpřísnění tepelně technických požadavků na novostavby. S tím spojené zvýšení investičních nákladů je vcelku nepodstatné - při racionálním řešení bude ležet pravděpodobně okolo 5-10 % a tedy v rámci běžného rozptylu nabídek.
Je rovněž třeba zpřísnit požadavky na okna a stanovit další přísnější výhledové hodnoty.

Otázkou je, zda podporovat snižování energetické náročnosti bez rozdílu, zda jde o úspory zateplením budovy, či aplikací obnovitelných zdrojů. Podpora by měla být vázána na prokázání splnění stanovených energetických cílů nebo na stanovení procentního poklesu závislosti na neobnovitelných zdrojích a měla by mít nárokový charakter.

Veškeré administrativní snahy i audity se minou účinkem, pokud se nezačne k problému úspor energie přistupovat aktivně a s dostatečným nadhledem. Jen tak lze očekávat, že investice do úsporných opatření budou efektivní a vyvážené.
Předpokládaná životnost staveb je okolo 100 let. Tím se stavby výrazně liší od spotřebního zboží s podstatně nižší předpokládanou životností. Z důvodu soustavného růstu cen energie budovy postupně přestávají plnit požadavky na tepelnou ochranu a musejí být velmi ná-

kladně rekonstruovány. Na základě analýzy trhu s existujícími stavebními systémy a za pomoci optimalizačního kritéria minimalizace investice + nákladů na provoz za 30 let byl učiněn závěr, že stavba budov s velmi nízkou spotřebou energie je u nás bez problémů realizovatelná a rentabilní. Současně u budov s velmi nízkou spotřebou energie lze očekávat, že tyto budovy za celou svou dobu životnosti nebudou muset být podrobeny náročné rekonstrukci z důvodu zvýšení tepelné ochrany a tudíž jsou prakticky jedinou správnou alternativou pro nově stavěné budovy. Snížení tepelných ztrát je základem pro efektivní využití obnovitelných zdrojů energie.

6 Summary

The main objective of the dissertation is to formulate the principles for low energy building and to express the most important energy consumption factors. The methodology includes educated guess, estimations, modelling and calculations. The methodology used enables to perform the optimisation in the costs and heat consumption of the proposed building.

Research activities are concentrated on the design of highly insulated envelopes for low energy buildings and sustainable constructions. The research is concentrated to the following envelope components: highly insulated walls, roof and floor systems and windows with very low energy loses. Furthermore the passive and active systems in the low energy buildings are discussed in detail.

The used object function may involve some different optimisation criteria. The criteria can be economic, environmental or energy related. Destined for our purpose the criterion of life cycle cost method, which covers the costs of initial investment and the energy consumption for 30 years manifests apposite.

We compare a usual building and a low energy building by means of simulation software Eagle. The simulations offer detailed temperature dynamics of individual rooms in the buildings in dependence on the external conditions and the mode of heating. The prediction of energy consumption of the low energy house was also impressed with a self-made program. That program represents a tool for draft calculation of energy use for heating in low energy house according the European standard for thermal performance of buildings.

Economical discretion of profitability shows that the cost difference between both types of buildings can be negligible (5-10%). Thus the low energy buildings can be considered as a standard for the design of new buildings. In such buildings (without special systems for utilisation of solar energy) the need for heating reduces only to clear days with very low temperature or to cloudy days with medium temperature. d

7 Citace

Halahyja a kol.: Stavebná tepelná technika , Jaga Bratislava 1998

Tywoniak J.: Úspory energie v budovách pro bydlení, In Ekologie, fyzika a energie ve škole,Vydavatelství I.Straka 2000
Studie SRCI CS, 1999

Humm O.:Nízkoenergetické domy, Grada 1999

Energy, Environment and Sustainable Development – Work programme (5.rámcový program EU pro výzkum a vývoj), 1999
Šála J.:Zateplování budov, Grada 2000

ČSN 73 0540-1 až 4 Tepelná ochrana budov, ČSNI 1994

ČSN 060210 Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění,ČSNI 1994

ČSN 730549 Výpočet tepelných bilancí zasklených ploch, ČSNI 1995

Kulhánek F., Tywoniak J.: Stavební fyzika, Stavební tepelná technika, ČVUT 1999

Možnosti zvýšení energet.účinnosti v ČR. Studie E.V.A., závěr.zpráva, 1994

EN 832 Thermal performance of buildings - Calculation of energy use for heating

Katalog stavebních prací URS 2000, Brno

Chylský J., Hemzal K. a kol: Větrání a klimatizace, Praha -Brno Bolit 1993

Hollan J.: Stavby pro příští tisíciletí, Ekologie, fyzika a energie, MU Brno 2000

Dahlsveen T., Petráš D.: Energetický audit budov, Jaga Bratislava 1996

Tichý F., Mužík V.: Zateplování budov, Stavební informační agentura 1996

Kupilík V.:Závady a životnost staveb, Grada 1999

Řehánek J., Janouš A.:Tepelně technické normy. Komentáře k ČSN, Praha1982.

http://www.thermodach.cz , 1.8.2001

Svoboda,Z.: Nízkonáklad.nízkoenerg.byt.dům, Sborník přednášek z workshopu, str.18-21, Seven 1999
Vrbka P.:Ceny stavebních prací, Tepelná ochrana budov 2/99

Tichá A.,Marková L.,Puchýř B.: Ceny ve stavebnictví I, URS Brno 1999

Drkal F. a kol., Ekologie a ochrana ŽP, ČVUT. Praha 1997

Olesen B. W., Thermal Comfort. Technical Review, No.2, 1982, Bruel &Kjaer, ISSN 0007-2621

ČSN ISO 7726, Směrnice č.46 sv.38/78 Sb. o hyg. požadavcích na prac. prostředí, tepelně vlhkostní mikroklima v budovách

Hujňák J.: Dřevěné stavební konstrukce a dílce, Praha, SNTL 1986

Environmental Building News, EBN ,Volume 4, No. 1 -- January/February 1995

Meister F.: Vývoj tep.kvality staveb., Sborník konference Rekonstrukce a energeticky úsporné stavby, Brno 1999
Halahyja m., Valášek J.: Solárna energia a jej využitie, Alfa Brastislava 1983

Clarke, J.A.: Energy simulation in building design. Adam Hilger, Bristol, 1985

Nízkonákladový nízkoenergetický bytový dům, Sborník SEVEN 1999

Mrlík, F. : Problémy výzkumu prostupu tepla oken. X.konference VUT, Brno 89

http://www.cepheus.de , 1.9.2001

http://www.passivhaus-info.de, 1.9.2001

Kotulán, J.: Preventivní lékařství, RMU Brno, 1992

ANSI/ASHRAE Standard 55-1992. Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, 1992
ČSN EN ISO 7730 Mírné tepelné prostředí - Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody, 1997
ASHRAE Fundamentals Handbook, 1997

BRAGER, G. S., de DEAR, R. J.: Thermal adaptation in the built environment: a literature review, Energy and Buildings 27, 1998
http://www.energ.cz/uspory/zatepleni 1.9.2001

Pavelek M., Štětina J.: Experimentální metody v technice prostředí, VUT Brno 1997

Ochrana před radonem doma a na pracovišti, překlad Doporučení mezinár.komise pro radiolog.ochranu č.65, 1994, k dispozici na regionálních centrech SÚJB.
ICLEI Environmental Guide, 2000, Svazek 16 Stavebnictví a údržba budov

ČSN 73 401-1 Obytné budovy

ČSN 73 0580-1 Denní osvětlení budov

Projekt UNDP č. CEH/93/007/99 "Ekonomické informace, účetnictví a nástroje pro ochranu životního prostředí v ČR". HÚ 04-Mikroekonomické souvislosti ochrany životního

prostředí
An Introduction to Environmental Accounting As A Business Management Tool: Key Concepts And Terms. (EPA 742-R-95-001) US Environmental Protection Agency, Office of Pollution Prevention And Toxic, Washington D.C. 1995
Kennedy M.L.: Total Cost Assessment for Environmental Engineers and Managers. J.Wiley&Sons, New York/Chichester, 1998
Walz R.: Development of Environmental Indicators Systems: Experiences from Germany. Environmental Management, Vol. 25,No.6, 2000, p.613-623
http://www.env.cz , 8.10.2001

http://www.eea.dk 1.10.2001

www.un.org./Depts/unsd/enviro/environment 8.10.2001

Hájek, M.: Poplatky a daně k ochraně životního prostředí. Finance a úvěr č. 11/1997.

Kabele, K.: Modelování a analýza pasivních solárních systémů prostředky počítačové simulace , sborník konference Obnovitelné zdroje, Kroměříž 1998

Kabele, K.: Vliv otopné soustavy na vnitřní prostředí v obytných budovách. 15. konference o vytápění. Praha: Společnost pro techniku prostředí. 1997. s. 165-169. - ISBN 80-20-01139-2.
Dunovská T.: Matematické modelování a počítačová simulace tepelné bilance v technice prostředí. Disertační práce. ČVUT, Praha, 1999.

Hensen, J.L.M.: On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system, Doctoral dissertation Eindhoven University of Technology, 1991. ISBN 90-386-0081-X
CD-ROM Ekodomy - inspirace pro každého, Liga ekologických alternativ 2001

http://cde.ecn.cz/PUBL/EKODOMY/ 8.10.2001

http://www.buildinggreen.com/features/ins/insulation 8.10.2001

Šafránek, J.: Snižování energ. nároč. budov. Materiály a technologie 4/95, Praha 1995

Kleczek, J. : Sluneční energie, Úvod do helioenergetiky, SNTL, 1981

Chlum M., Jokl M.; Papež K.: Progresivní způsoby bytového větrání, Společnost pro techniku prostředí, Odb.sekce obytné prostředí, Praha 1999
ČSN EN 832 Tepelné chování budov - Výpočet potřeby energie na vytápění-Obytné budovy. Listopad 2000
[66] ČSN EN ISO 13370 Tepelné chování budov – Přenos tepla zeminou – Výpočtové metody, ČNI Praha 1999
[67] EN ISO 13789 Tepelné chování budov – Měrná tepelná ztráta – Výpočetní metoda, pracovní překlad, CEN 1999
[68] ČSN EN ISO 14683 Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích – Lineární činitel prostupu tepla – Zjednodušená metoda a orientační hodnoty, ČNI Praha 2000
[69] Chlum M., Jokl M., Papež K.,:Progresivní způsoby bytového větrání, Společnost pro

techniku prostředí, Praha 1999
[70] Feist, W.:Nízkoenergetický dům, HEL, Ostrava 1994

[71]Šťastník, S.: Softwarový produkt EAGLE pro Windows95, 2000
[72] Kučera, P. a kol: Komplexní energetické vyhodnocení, Výzk.zpráva CSI, Praha 1999

Abecedně uspořádáná použitá literatura

Brager, G.S., de Dear, R.J.: Thermal adaptation in the built environment: a literature review, Energy and Buildings 27, 1998
Clarke, J.A.: Energy simulation in building design. Adam Hilger, Bristol, 1985
Dahlsveen T., Petráš D.: Energetický audit budov, Jaga Bratislava 1996
Drkal F. a kol.: Ekologie a ochrana ŽP, ČVUT. Praha 1997
Dunovská T.: Matematické modelování a počítačová simulace tepelné bilance v tech-nice prostředí. Disertační práce. ČVUT, Praha, 1999.
Feist, W.:Nízkoenergetický dům, HEL, Ostrava 1994
Hájek, M.: Poplatky a daně k ochraně životního prostředí. Finance a úvěr č. 11/1997.
Halahyja a kol.: Stavebná tepelná technika , Jaga Bratislava 1998
Halahyja m., Valášek J.: Solárna energia a jej využitie, Alfa Brastislava 1983
Hensen, J.L.M.: On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system, Doctoral dissertation Eindhoven University of Technology (FAGO), 1991. (ISBN 90-386-0081-X)
Hollan J.: Stavby pro příští tisíciletí, Ekologie, fyzika a energie, MU Brno 2000
Hujňák J.: Dřevěné stavební konstrukce a dílce, Praha, SNTL 1986
Humm O.:Nízkoenergetické domy, Grada 1999
Chlum M., Jokl M.; Papež K.: Progresivní způsoby bytového větrání, Společnost pro techniku prostředí, Odb.sekce obytné prostředí, Praha 1999
Chylský J., Hemzal K. a kol: Větrání a klimatizace, Praha -Brno Bolit 1993
Kabele, K.:Vliv otopné soustavy na vnitřní prostředí v obyt. budovách. 15. konf. o vytápění. Praha: Společ. pro techniku prostředí. 1997. s. 165-169. - ISBN 80-20-01139-2.
Kabele, K.: Modelování a analýza pasivních solárních systémů prostředky počítačové simulace, sborník konf. Obnovitelné zdroje, Kroměříž 1998
Kennedy M.L.: Total Cost Assessment for Environmental Engineers and Managers. J.Wiley&Sons, New York/Chichester, 1998
Kleczek, J. : Sluneční energie, Úvod do helioenergetiky, SNTL, 1981
Kolektiv : Nízkonákladový nízkoenergetický bytový dům, Sborník SEVEN 1999
Kotulán, J.: Preventivní lékařství, RMU Brno, 1992
Kučera, P. a kol: Komplexní energetické vyhodnocení, Výzk.zpráva CSI, Praha 1999
Kulhánek F., Tywoniak J.: Stavební fyzika, Stavební tepelná technika, ČVUT 1999
Kupilík V.: Závady a životnost staveb, Grada 1999
Meister F.: Vývoj tep.kvality staveb., Sborník konference Rekonstrukce a energeticky úsporné stavby, Brno 1999
Mrlík, F. : Problémy výzkumu prostupu tepla oken. X.konference VUT, Brno 89
Olesen B. W., Thermal Comfort. Technical Review, No.2, 1982, Bruel &Kjaer, ISSN
Pavelek M., Štětina J.: Experimentální metody v technice prostředí, VUT Brno 1997
Reinberg, G.W.: Cesta k nízkoenerget.domu, sborník Rekonstrukce a energ.úsporné stavby, ČEA ČKAIT, 1999
Řehánek J., Janouš A.:Tepelně technické normy. Komentáře k ČSN, Praha1982.
Svoboda,Z.: Nízkonáklad.nízkoenerg.byt.dům, Sborník přednášek, str.18-21, Seven 1999
Šafránek, J.: Snižování energ.nároč.budov, Materiály a technol.pro stavbu 4/95, Praha 1995
Šála J.:Zateplování budov, Grada 2000
Tichá A.,Marková L.,Puchýř B.: Ceny ve stavebnictví I, URS Brno 1999
Tichý F., Mužík V.: Zateplování budov, Stavební informační agentura 1996

Tywoniak J.: Úspory energie v budovách pro bydlení, In Ekologie, fyzika a energie ve škole,Vydavatelství Straka 2000
Vrbka P.:Ceny stavebních prací, Tepelná ochrana budov 2/99
Walz R.: Development of Environmental Indicators Systems: Experiences from Germany.

Normy, předpisy:

ČSN 060210-6 Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění,ČSNI 1994
ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov, ČSNI 1994
ČSN 73 0540-1 Termíny, definice, veličiny pro navrhování a ověřování
ČSN 73 0540-2 Funkční požadavky
ČSN 73 0540-3 Výpočtové hodnoty veličin pro navrhování a ověřování
ČSN 73 0540-4 Výpočtové metody pro navrhování a ověřování
ČSN 73 0580-1 Denní osvětlení budov
ČSN 73 401-1 Obytné budovy
ČSN 730549 Výpočet tepelných bilancí zasklených ploch, ČSNI 1995
ČSN EN 832 Tepelné chování budov - Výpočet potřeby energie na vytápění-Obytné budovy. Listopad 2000
ČSN EN ISO 13370 Tepelné chování budov – Přenos tepla zeminou – Výpočtové metody, ČNI Praha 1999
ČSN EN ISO 14683 Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích – Lineár.čin. prostupu tepla – Zjednodušená metoda a orientační hodnoty, ČNI Praha 2000
ČSN EN ISO 7730 Mírné tepelné prostředí - Stanovení ukazatelů PMV a PPD, popis podmínek tepelné pohody, 1997
ČSN ISO 7726, Směrnice č.46 sv.38/78 Sb. o hyg. požadavcích na prac. prostředí, tepelně vlhkostní mikroklima v budovách, 1978
EN 832 Thermal performance of buildings - Calculation of energy use for heating, 1998
EN ISO 13789 Tepelné chování budov – Měrná tepelná ztráta – Výpočetní metoda, pracovní překlad, CEN 1999
Ochrana před radonem doma a na pracovišti, překlad Doporučení mezinár.komise pro radiolog.ochranu č.65, 1994, k dispozici na regionálních centrech SÚJB.

Příručky, zprávy:

An Introduction to Environmental Accounting As A Business Management Tool: Key Concepts And Terms. (EPA 742-R-95-001) US Environmental Protection Agency, Office of Pollution Prevention And Toxic, Washington D.C. 1995
ANSI/ASHRAE Standard 55-1992. Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, 1992
ASHRAE Fundamentals Handbook, 1997
Energy, Environment and Sustainable Development – Work programme (5.rámcový program EU pro výzkum a vývoj), 1999
Environmental Building News, EBN ,Volume 4, No.1 - January/February 1995
Environmental Management, Vol. 25,No.6, 2000, p.613-623
ICLEI Environmental Guide, 2000, Svazek 16 Stavebnictví a údržba budov
Katalog stavebních prací URS 2000, Brno
Projekt UNDP č. CEH/93/007/99 "Ekonomické informace pro ochranu životního prostředí

v ČR". HÚ 04-Mikroekonom. souvislosti ochrany životního prostředí
Možnosti zvýšení energet.účinnosti v ČR. Studie E.V.A., závěr.zpráva, 1994

Elektronické zdroje:
http:// www.un.org./Depts/unsd/enviro/environment 8.10.2001
http://cde.ecn.cz/publ/ekodomy/ 8.10.2001
http://www.buildinggreen.com/features/ins/insulation 8.10.2001
http://www.cepheus.de , 1.9.2001
http://www.eea.dk 1.10.2001
http://www.energ.cz/uspory/zatepleni 1.9.2001
http://www.env.cz , 8.10.2001
http://www.passivhaus-info.de, 1.9.2001
http://www.thermodach.cz , 1.8.2001
http://amper.ped.muni.cz, 1.1.2002

Seznam publikací vztahujících se k tématu doktorského studia

Svobodová, Jindřiška. Cost Effective Steps for Energy Efficient Building. In Sustainable Building & Solar Energy. 1. vyd. Czech Republic : Technology Centre of the Academy of Sciences CR, 2001., s. 94-96.

Svobodová, Jindřiška. Environmental Awareness in Physics Education. In New Trends in Physics. 1. vyd. Brno : VUT Brno, 2001., s. 528-531. ISBN 80-214-1992.

Svobodová, Jindřiška. Nízkoenergetický dům a jeho tepelně ekonomické hodnocení. In The 3th Expert Conference of Postgraduate Students. Brno : FAST VUT Brno, 2001., s. 56-59. ISSN1212-9275. ISBN 212-9275.

Svobodová, Jindřiška. Nízkonákladový nízkoenergetický dům. In Snižování energetické náročnosti budov. Ostrava. ČKAIT, Český svaz vědeckotechnickych společností, 2001.

Svobodová, Jindřiška. Model nízkoenergetického domu. 1.vyd. Brno: XI. mezinárodní vědecká konference VUT, Akademické nakladatelství CERM, 1999. 130 s. Sborník příspěvků Aplikovaná fyzika VUT. ISBN 80-214-1432-4.

SEZNAM OZNAČENÍ VELIČIN

t [K,°C] teplota
t [s] čas, příp. časová konstanta
j [%] relativní vlhkost vzduchu
g[-] podíl tepelných zisků a tepelných ztrát
h[-] účinnost, stupeň využití tepelných zisků
l [$Wm^{-1}K^{-1}$] tepelná vodivost
α_e *součinitel přestupu na vnější straně konstrukce*
α_i *součinitel přestupu na vnitřní straně konstrukce*
m faktor difuzního odporu
m_{ok} *charakteristický faktor solárního zisku okna*
a, a_0 číselný parametr pro stupeň využití tepelných zisků
A[m^2] plocha obálky budovy
B[$Pa^{-0,67}$] charakteristické číslo budovy
C[Jkg^{-1}] účinná tepelná kapacita zóny
c[$Jkg^{-1}K^{-1}$] měrná tepelná kapacita
CF[Kč] hotovostní tok
C_i[Kč] cena i-tého produktu
CNP[mgm^{-3}, mgm^{-3}] přípustná koncentrace
d [m] délka, tloušťka
D[den K] počet denostupňů
d_p[m] tloušťka zateplení
e_v[kWh m^{-3} rok^{-1}] měrná spotřeba tepla za otopné období
e_{VA}[kWh$m^{-2}rok^{-1}$] normou požadovaná měrná spotřeba tepla za otop. období na m^2
e_{VN}[kWh$m^{-3}rok^{-1}$] normou požadovaná měrná spotřeba tepla za otopné období na m^3
f_C koeficient zvětšení povrchu těla oděvem
f_R koeficient vzájemného osálávání částí těla
g[-] energetická propustnost zasklení
H[WK^{-1}] měrná tepelná ztráta objektu, (jednotková ztráta)
H_T[WK^{-1}] měrná tepelná ztráta (jednotková ztráta) prostupem
H_u[WK^{-1}] měrná tepelná ztráta (jednotková ztráta) nevytápěnými prostory
H_v[WK^{-1}] měrná tepelná ztráta (jednotková ztráta) větráním
i_L[m3$s^{-1}m^{-1}Pa^{-0,67}$] součinitel spárové průvzdušnosti
IN[Kč] investice
I_{sj}[Wm-2] průměrný výkon glob.sluneč.záření za měsíc na m^2
k_{ef}[$Wm^{-2}K^{-1}$] efektivní celkový koeficient prostupu okna
k_{epr}[$Wm^{-2}k^{-1}$] průměrný součinitel prostupu tepla
k_{ok}[$Wm^{-2}K^{-1}$] tmavý celkový koeficient prostupu okna
k_{pj}[$Wm^{-2}K^{-1}$] koeficient prostupu zabudované j-té konstrukce
L[m] délka spár
L_d[WK^{-1}] tepelná propustnost mezi vytápěným prostorem a vnějším vzduchem
L_s[WK^{-1}] tepelná propustnost zeminou
M[-] charakteristické číslo místnosti
n[hod^{-1}] násobnost, intenzita výměny vzduchu
n_{pr}[hod^{-1}] násobnost, intenzita výměny vzduchu
p[%] úroková míra
p_1 přirážka na vyrovnání vlivu chladných stěn

p_2 *přirážka na urychlení zátopu*
p_3 *přirážka na světovou stranu*
pd[Pa] parciální tlak vodní páry
q[%] procento ročního vzestupu ceny energie
Q[J, kWh] teplo
Q[W] tepelná ztráta, tepelný výkon
$q[Wm^2, met]$ *měrná tepelná produkce*
$q_c\,[Wm^{-3}K^{-1}]$ *celková tepelná charakteristika budovy*
$q_K\,[Wm^2]$ *charakt.hustota tepelného toku*
$Q_c[W]$ *celkové tepelné ztráty*
q_{cN} *normou požadovaná celková tepelná charakteristika budovy*
$Q_{cz}[W]$ *celkové tepelné ztráty se započtenými zisky*
$Q_g[W]$ *vnitřní ziskový tepelný výkon*
$Q_i[W]$ *interní ziskový tepelný výkon od lidí a technologií*
$Q_p[W]$ *tepelné ztráty prostupem*
$q_{red}[Wm^{-3}K^{-1}]$ *redukovaná tepelná charakteristika*
$Q_s[W]$ *solární ziskový tepelný výkon*
$Q_v[W]$ *tepelné ztráty výměnou vzduchu*
$Q_{zisk}[W]$ *vnitřní ziskový tepelný výkon*
r[% / rok] rentabilita
$R[m^2KW^{-1}]$ *tepelný odpor prostupu tepla*
$Ri, Re[m^2KW^{-1}]$ *přestupový tepelný odpor na vnitřní, resp. vnější straně*
$R_{cl}[m^2KW^{-1}]$ *tepelný odpor oděvu*
$R_{zad}[m^2KW^{-1}]$ *žádaná hodnota tepelného odporu, splňující nějaké kritérium*
$S[m^2]$ *plocha*
$S_{ei}[m^2]$ *plocha vnější i-té konstrukce*
t[s, hod, den, rok] čas, doba návratnosti
$t_a[K, °C]$ *teplota vzduchu*
$t_e[K, °C]$ *venkovní, vnější teplota*
$t_i[K, °C]$ *vnitřní, interiérová teplota*
$t_k[K, °C]$ *teplota vzduchu*
$t_p[K, °C]$ *průměrná teplota okolních stěn nebo teplota povrchu oděvu člověka*
$t_u[K, °C]$ *účinná teplota okolních stěn*
$V[m^3]$ *obestavěný objem*

© 2001 Jindřiška Svobodová