

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí (zaměření: Konstrukce budov)

Diplomová práce

TEPELNÁ STABILITA OBYTNÝCH BUDOV

THERMAL STABILITY OF RESIDENTAL BUILDINGS

Bc. Martin Pich

Vedoucí práce: Ing. Pavel Kopecký Ph.D.

2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Pich

Jméno: Martin

Osobní číslo: 410182

Zadávací katedra: K124 (Katedra konstrukcí pozemních staveb)

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Tepelná stabilita obytných budov

Název diplomové práce anglicky: Thermal stability of residential buildings

Pokyny pro vypracování:

- 1) Diplomant provede stručný rozbor parametrů ovlivňujících tepelnou bilanci budovy.
- 2) Diplomant provede analýzu časového vývoje tepelné akumulačních a tepelné izolačních vlastností obytných budov od počátku 20. století po současnost.
- 3) Diplomant provede tepelné simulační výpočty pro zhodnocení zimní tepelné stability modelových budov (chladnutí budovy, čas a energie potřebná k zpětnému vytopení domu).
- 4) Diplomant provede tepelné simulační výpočty pro zhodnocení letní tepelné stability modelových budov (časový průběh teploty vnitřního vzduchu během modelového období).

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Kopecký, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 11.10.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

11.10.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci „Tepelná stabilita obytných budov“ vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Pavla Kopeckého, Ph.D. a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Praze dne 6.1.2018

.....
Bc. Martin Pich

Poděkování

Děkuji Ing. Pavlu Kopeckému, Ph.D. za příkladné vedení diplomové práce, odbornou pomoc a vstřícnost při konzultacích. Děkuji také své rodině za plnou podporu během studia.

Abstrakt

Předpokládaná změna klimatu v nedaleké budoucnosti vyvolává obavu o chování velmi dobře tepelně izolovaných budov, které již za dnešních klimatických podmínek mohou mít problémy s přehříváním. Rozsáhlý výpadek dodávky energie také může na nějakou dobu znemožnit budovy vytápět. Proto je cílem této práce vytvořit analytickou studii, která popíše dynamické tepelné chování obytných budov při delším výpadku dodávky energie v zimním období a při delším období letního horka. Sleduje se tepelné chování jednoduchého modelového domu v extrémní zimní a letní situaci. Tepelné chování modelové budovy je vypočteno dynamickým simulačním modelem. Hodnotí se šest variant modelové budovy, přičemž tepelné technické vlastnosti vnějších a vnitřních stavebních prvků se mění podle vývoje tepelně technických parametrů od počátku 20. století až po současnost. Jednotlivé varianty jsou porovnávány z hlediska rychlosti chladnutí, rychlosti zpětného vytopení a z hlediska tendence k letnímu přehřívání. Rychlost chladnutí modelových budov závisí na hodnotě časové konstanty budovy (poměr celkové účinné tepelné kapacity a měrného tepelného toku budovy). Nezanedbatelnou úlohu ve zpomalení chladnutí hraje teplo uložené ve vnitřních stavebních prvcích. Paradoxním výsledkem je nejrychlejší zpětné vytopení nejhůře izolovaných domů a nejpomalejší zpětné vytopení těžkého pasivního domu. Lehké domy v pasivním standardu naopak vykazovaly nejhorší výsledky z hlediska letního přehřívání, které mu je prakticky nemožné zabránit bez účinného systému stínění. Stínění oken se jeví jako nejúčinnější opatření bránící přehřívání interiéru. U velmi dobře tepelně izolovaných staveb je proto účelné se pečlivě věnovat jejich technickému návrhu. Noční větrání je naopak možné považovat pouze za opatření doplňkové. Tato práce umožňuje vytvořit si představu o chladnutí a přehřívání budovy v závislosti na změně tepelně izolační kvality obvodových konstrukcí, tepelně akumulacích vlastnostech vnějších a vnitřních stavebních prvků a na zlepšujících provozních opatřeních (stínění, noční větrání).

Klíčová slova

Obytné budovy, chladnutí, přehřívání, simulace budov

Abstract

The expected climate change in the near future causes concerns about the behavior of very well-insulated buildings, that may already have overheating problems in today's climatic conditions. Excessive blackout may make heating the building impossible for some time. The target of this work is to create an analytical study which describes the dynamic thermal behavior of residential buildings during a longer power supply outage in the winter and longer summer heat periods. The thermal behavior of a simple model house in an extreme winter and summer situation is monitored. The thermal behavior of the model building is calculated by the dynamic simulation model. Six variants of the model building are evaluated, where the thermal-technical properties of the external and internal building components are changing with the development of the thermal-technical parameters from the beginning of the 20th century to the present. Individual variants are compared in aspect of cooling rate, rate of re-heating and tendency to summer overheating. The cooling rate of model buildings depends on the value of the building's time constant (the ratio of the total effective thermal capacity and the specific heat flow of the building). A significant role in slowing down cooling plays the heat stored in internal building components. The paradoxical result is the fastest re-heating of the worst insulated houses and the slowest re-heating of the heavy passive house. Lightweight houses in the passive standard showed the worst results in aspect of summer overheating, which is practically impossible to prevent without an effective shading system. Window shading appears to be the most effective way of preventing overheating. For very well-insulated buildings it is therefore advisable to carefully deal with their technical design. Night ventilation can be conversely considered supplementary measures. This work allows to create view of getting cool and overheating of a building, depending on the change in the thermal insulating properties of the external building components, the thermal accumulation properties of the external and internal building components and the improvement of the operational measures (shading, night ventilation).

Keywords

Residential buildings, cooling, overheating, building simulation

Obsah

1. Úvod	11
2. Historický vývoj obytných budov	12
2.1. Úvod.....	12
2.2. Přehled konstrukcí v časových obdobích.....	14
2.3. Modelový dům	21
2.4. Sledované parametry.....	23
2.5. Souhrn tepelně-technických vlastností budov	26
3. Matematické modelování tepelného chování budov.....	29
3.1. Modelové situace	29
3.1.1. Zimní modelové situace	29
3.1.2. Letní modelové situace.....	30
3.2. Popis výpočetních modelů	32
3.2.1. Zjednodušený model	32
3.2.2. Simulační model.....	34
3.3. Okrajové podmínky	35
3.3.1. Zimní modelové situace	35
3.3.2. Letní modelové situace.....	37
3.4. Počáteční podmínky	41
3.4.1. Zimní modelové situace	41
3.4.2. Letní modelové situace.....	42
4. Výsledky	43
4.1. Zimní modelové situace	43
4.1.1. Chladnutí objektů	43
4.1.2. Doba vychladnutí objektů pod kritickou teplotu 17 °C	44
4.1.3. Teplota po 10 dnech chladnutí	45
4.1.4. Vytápění objektů z teploty po 10 dnech chladnutí.....	45
4.1.5. Vliv vnitřních konstrukcí na chladnutí objektů.....	46
4.2. Vyhodnocení výsledků zimních modelových situací	47
4.2.1. Chladnutí objektů	47
4.2.2. Doba chladnutí pod kritickou teplotu 17 °C.....	48
4.2.3. Teplota po 10 dnech chladnutí	48

4.2.4.	Vytápění objektů z teploty po 10 dnech chladnutí	49
4.2.5.	Vliv vnitřních konstrukcí	49
4.3.	Letní modelové situace	50
4.3.1.	Přehřívání objektů	50
4.3.2.	Chlazení objektů.....	56
4.3.3.	Vliv opatření na jednotlivé modelové objekty	58
4.3.4.	Doba potřebná k dosažení kvazistacionárního stavu.....	61
4.3.5.	Vliv vnitřních konstrukcí na letní přehřívání	62
4.4.	Vyhodnocení výsledků letních modelových situací	63
4.4.1.	Přehřívání objektů	63
4.4.2.	Chlazení objektů.....	64
4.4.3.	Vliv opatření na jednotlivé budovy	64
4.4.4.	Doba potřebná k dosažení kvazistacionárního stavu.....	65
4.4.5.	Vliv vnitřních konstrukcí na letní přehřívání	65
5.	Závěr	67
	Seznam grafů	69
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam tabulek.....	72
	Literatura	73

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

A_e	Celková plocha konstrukcí na obálce budovy	m^2
A_i	Plocha konstrukce	m^2
c	Měrná tepelná kapacita	$J/(kg \cdot K)$
c_a	Měrná tepelná kapacita vzduchu	$J/(kg \cdot K)$
C	Účinná tepelná kapacita	J/K
$C_{building}$	Celková tepelná kapacita budovy	J/K
C_{ext}	Tepelná kapacita stavebních prvků ve styku s exteriérem	J/K
C_{fur}	Tepelná kapacita nábytku	J/K
$C_{i,air}$	Tepelná kapacita vnitřního vzduchu	J/K
$C_{i,noc}$	Tepelná kapacita vnitřních stavebních konstrukcí	J/K
C_{int}	Tepelná kapacita vnitřních stavebních prvků	J/K
C_{tot}	Celková tepelná kapacita	J/K
C/V	Objemová tepelná kapacita	$J/(m^3 \cdot K)$
d	Tloušťka stavebního prvku	m
g	Celkový činitel propustnosti solárního záření v kolmém směru	$[-]$
G_{gh}	Intenzita globálního solárního ozáření	W
H	Měrný tepelný tok	W/K
H_o	Měrný tepelný tok horní částí budovy	
H_t	Měrný tepelný tok prostupem tepla	W/K
$H_{t,soil}$	Měrný tepelný tok prostupem podlahou	W/K
$H_{t,u}$	Měrný tepelný tok prostupem horní částí obvodových konstrukcí	W/K
H_v	Měrný tepelný tok větráním	
H_t/V	Celková tepelná charakteristika budovy	$W/(m^3 \cdot K)$
i	Stavební konstrukce	
j	Stavební prvek	
n	Intenzita větrání	h^{-1}
n_{50}	Násobnost výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa	h^{-1}
n_{noc}	Intenzita nočního větrání	h^{-1}
n_{nuc}	Intenzita nuceného větrání	h^{-1}
Q	Energie	J
Q_c	Výkon chlazení	W
Q_v	Výkon tepelného zdroje	W
t	Čas	s
T	Teplota	$K; ^\circ C$
T_{crit}	Kritická teplota	$^\circ C$
T_e	Venkovní teplota	$^\circ C$
$T_{e,m}$	Průměrná venkovní teplota	$^\circ C$
$T_{e,max}$	Extrémní venkovní teplota	$^\circ C$
$T_{ext,1,uzel}$	Počáteční teplota v prvním uzlu obvodových konstrukcí	$^\circ C$
$T_{ext,2,uzel}$	Počáteční teplota ve druhém uzlu obvodových konstrukcí	$^\circ C$

T_i	Vnitřní teplota	$^{\circ}\text{C}$
$T_{i,0}$	Počáteční vnitřní teplota	$^{\circ}\text{C}$
$T_{i,c}$	Požadovaná vnitřní teplota pro chlazení	$^{\circ}\text{C}$
$T_{i,v}$	Požadovaná vnitřní teplota pro vytápění	$^{\circ}\text{C}$
T_{int}	Počáteční teplota ve vnitřních konstrukcích	$^{\circ}\text{C}$
T_i^{new}	Vnitřní teplota na konci časového kroku	$^{\circ}\text{C}$
T_i^{old}	Vnitřní teplota na začátku časového kroku	$^{\circ}\text{C}$
T_{soil}	Teplota v zemině	$^{\circ}\text{C}$
T_{ust}	Teplota v ustáleném stavu	$^{\circ}\text{C}$
U	Součinitel prostupu tepla	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
U_{em}	Průměrný součinitel prostupu tepla	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
V	Objem stavebního prvku	m^3
V_a	Objemový průtok větracího vzduchu	m^3/h
V_b	Objem větraného prostoru	m^3
V_e	Objem budovy z vnějších rozměrů	m^3

Řecké symboly

λ	Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
ρ	Objemová hmotnost materiálu	kg/m^3
ρ_a	Objemová hmotnost vzduchu	kg/m^3
τ	Časová konstanta	s
ΔT	Rozdíl teplot	K
ΔU	Přirážka na tepelné vazby	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Σ	Suma výsledků	
Φ	Tepelný tok	W
Φ_{acu}	Tepelný tok do akumulární hmoty	W
Φ_i	Tepelné zisky od vnitřních zdrojů tepla	W
Φ_s	Tepelné zisky od Slunce	W
Φ_t	Tepelný tok vedením tepla	W
$\Phi_{t,\text{soil}}$	Tepelný tok prostupem podlahou	W
$\Phi_{t,u}$	Tepelný tok prostupem horní částí obvodových konstrukcí	W
Φ_v	Tepelný tok větráním	W
η_{ztt}	Účinnost zpětného získávání tepla	%

Zkratky

EPS	Expandovaný polystyren – tepelná izolace
NP	Nadzemní podlaží
OSB	Oriented strand board – deska z plochých orientovaných třísek
VC	Vápenocementová omítka
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČSN	Česká technická norma
ŽB	Železobeton

1. Úvod

V obytných budovách lidé stráví velkou část svého života. Vnitřní prostor rodinných i bytových domů by měl být příjemný, funkční a bezpečný. Také by měl být v interiéru zajištěn tepelný komfort obyvatel. Provoz domu by měl být navíc i ekonomicky výhodný. Dnešním trendem je výstavba nízkoenergetických a pasivních domů. Tato práce porovnává moderní budovy s objekty stavěnými před sto lety a hodnotí pokrok ve výstavbě obytných budov z hlediska tepelné bilance. Dále je ukázáno, které typy domů nejlépe vyhovují uživatelským požadavkům na tepelný komfort v extrémních situacích.

Asi nejvíce sledovanou vlastností v současné výstavbě je tepelně izolační schopnost objektu. Vysoce kvalitní tepelně izolační obálka vede ke snížení spotřeby tepla na vytápění budovy v zimním období, naopak v létě vede k problémům s přehříváním. Méně sledovaným a mnohdy opomíjenými parametry jsou tepelně akumuláční schopnost budovy, velikost oken, způsob stínění a orientace budovy.

V průběhu roku nastávají z hlediska venkovních teplot dvě extrémní období. První zátěžovou zkouškou na kvalitu budovy jsou zimní mrazy. V současnosti je zimní tepelná stabilita opomíjena. Důvodem nejspíš je, že nikdo nepředpokládá výpadek dodávky tepla. Masivní blackout způsobený přírodní katastrofou či teroristickým útokem ovšem může tento pohled brzy změnit. Druhou mimořádnou roční situací jsou letní horka. Při dlouhotrvajících vysokých teplotách, které jsou spojeny s velkou solární intenzitou, mohou mít obytné budovy problém s přehříváním. Současným trendem navíc je výstavba obytných domů s velkými prosklenými plochami.

V práci je zhodnocen význam tepelné kapacity na udržení komfortních teplot v interiéru. Je provedena analýza vlivu tepelně izolačních a tepelně akumuláčních vlastností na tepelné chování obytných budov. Je zkoumána rychlost chladnutí obytných budov při výpadku dodávky tepla. Další otázkou, kterou si klade tato práce, je rychlost zpětného vytopení vychladlých budov. Také je řešena problematika zpětného vytopení pasivních domů, které se navrhuje s malým topným výkonem. Výpočtem je ověřováno, jestli je v obytných budovách zajištěn tepelný komfort i v letních měsících. Analyzován je vliv stínění oken a nočního větrání na odvedení tepelné zátěže. Samostatná kapitola se zabývá otázkou, jestli velmi dobře izolované domy potřebují strojní chlazení. Součástí analýzy je také vyhodnocení vlivu vnitřních konstrukcí na tepelné chování obytných budov.

2. Historický vývoj obytných budov

2.1. Úvod

Obytné budovy prošly v uplynulém století výrazným vývojem zejména z hlediska tepelně izolačních vlastností obálky. Hlavním cílem je snižování potřeby energie na vytápění. Konstrukční systém se v principu nezměnil. Jedná se o stěnový systém obvodových konstrukcí doplněný o vnitřní nosné stěny. Dispozičně jsou objekty děleny zděnými příčkami. Stěny doznaly ovšem materiálových změn, kámen a plnou cihlu nahradily keramické dutinové tvarovky, či tvárnice z lehčených betonů. Od konce 20. století se využívají sendvičové konstrukce s tepelnou izolací.

Podlahy na terénu se v počátcích 20. století zhotovovaly z dusané hlíny s kamennou či keramickou dlažbou nebo jako dřevěné tesařské podlahy. Takové podlahy měly z dnešního pohledu zcela nedostatečné tepelně izolační vlastnosti. Zpřísnování požadavků vedlo k integraci tepelně izolačních materiálů do konstrukcí podlah.

Stropní konstrukce se v rané části 20. století realizovaly výhradně jako dřevěné trámové, později se objevují stropy železobetonové a keramické. Vývoj stropních konstrukcí souvisel se změnou využití podstřešního prostoru, který se z nevyužívané a nevytápěné půdy změnil na obytné podkroví.

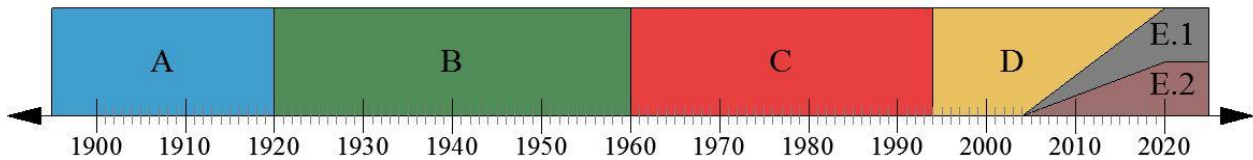
Se změnou využití podkroví souvisí také změna provádění střešní konstrukce. Střechy v průběhu století začaly plnit, kromě ochrany před povětrnostními vlivy, také tepelněizolační funkci. Od padesátých let se začaly ve větším rozsahu používat střechy ploché.

Okna prošla vývojem od dřevěných špaletových přes dřevěná zdvojená až k oknům s tepelně izolačními dvojskly a trojskly.

Výrazně odlišnou stopou jsou bytové domy realizované od padesátých let a zejména v období normalizace. Jednalo se o typizovanou výstavbu z betonových prefabrikovaných dílců. Konstrukční systém byl stěnový a skeletový. Obvodové stěny tvořily jednovrstvé panely z lehkých betonů či sendvičové panely s vloženou vrstvou tepelné izolace. Byty byly členěny betonovými příčkami. Bytové domy měly nevytápěný suterén. Stropní konstrukce byly systémové ze železobetonových prefabrikátů. Panelové domy měly výhradně plochou střechu, kde tepelně izolační vrstvu tvořila spádová vrstva lehčeného betonu a později také tepelná izolace.

Zásadní změnu navrhování budov přinesla revize tepelně-technické normy ČSN 73 0540 v roce 1994. Došlo ke zpřísnění požadavků a začaly se používat nové stavební výrobky a materiály s lepšími tepelně izolačními vlastnostmi. Dalšími posuny ve výstavbě obytných budov jsou nízkoenergetické domy kde měrná potřeba tepla nepřekračuje $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ a pasivní domy, které jsou charakterizovány minimalizací potřeby energie, která nepřekračuje $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. [7], [8]

Nástupem nových materiálů a technologických možností došlo k rozvoji dřevostaveb zejména pro rodinné bydlení. Tyto objekty lze považovat za lehké stavby s nízkým objemem tepelně akumulací hmoty.



Obrázek 1: Časová osa s rozdělením výstavby do časových období

Pro potřeby této práce byl vývoj obytných budov rozdělen do pěti období. Každé období charakterizují typické vnější a vnitřní konstrukce. Poslední období je navíc rozděleno do dvou podkategorií popisující těžkou a lehkou variantu výstavby. *Obrázek 1* zobrazuje časovou osu s rozdělením výstavby do časových období.

Dělení výstavby do časových období:

- A) Počátek 20. století (do roku 1920)
- B) Polovina 20. století (1920-1960)
- C) Konec 20. století (1960-1994)
- D) Nízkoenergetické domy
- E) Pasivní domy - E.1) těžké
- E.2) lehké

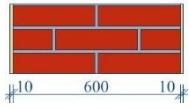
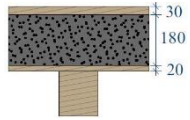
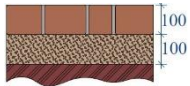
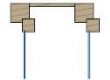
Zdroje informací o historickém vývoji budov

Podkladem pro tuto práci byl projekt TABULA, který obsahuje soubor vzorových budov s charakteristickými parametry energetické náročnosti a má reprezentovat tzv. Národní typologii budov. Příručka poskytuje základní údaje o tepelně-technických vlastnostech a o vývoji technologií a materiálových řešení konstrukcí obálky budovy, které jsou typické pro budovy v daném období. [9]

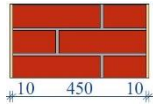

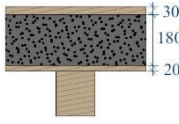
Projekt TABULA pro tuto práci posloužil zejména jako zdroj materiálové základny budov s příslušnými skladbami konstrukcí pro dané časové období. Nicméně tepelně-technické vlastnosti materiálů byly převzaty z normy ČSN 73 0540-3 [10] a tepelně-technické parametry konstrukcí byly vypočítány v souladu s ČSN 73 0540-1. [2]

2.2. Přehled konstrukcí v časových obdobích

A) Počátek 20. století (do roku 1920)

OBVODOVÉ KONSTRUKCE	Tloušťka	Součinitel tepelné vodivosti	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Součinitel prostupu tepla	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	U [W/(m ² ·K)]	
Obvodová stěna						
Omítka vápenná	10	0,88	1600	840	1,10	
Cihla plná	600	0,84	1800	900		
Omítka vápenná	10	0,88	1600	840		
Σ	620					
Střeška – dřevěný trámový strop*						
Dřevěná podlaha	30	0,18	600	2510	0,87	
Škvárový zásyp	180	0,27	750	750		
Dřevěný záklop	20	0,18	600	2510		
Σ	230					
Podlaha na terénu						
Kamenná dlažba	100	1,40	2400	840	0,91	
Dusaná hlína	100	0,70	1600	750		
Zemina #	1000	1,40	1800	920		
Σ	1200					
Okna						
Dřevěná špaletová					2,35	
Σ						

Tabulka 1: A) Počátek 20. století (do roku 1920) - obvodové konstrukce

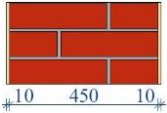
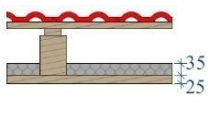
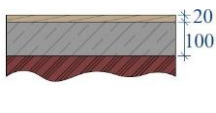

VNITŘNÍ KONSTRUKCE	Tloušťka	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	
Obvodová stěna				
Omítka vápenná	10	1600	840	
Cihla plná	450	1800	900	
Omítka vápenná	10	1600	840	
Σ	470			
Příčka				
Omítka vápenná	10	1600	840	
Cihla plná	150	1800	900	
Omítka vápenná	10	1600	840	
Σ	170			
Stropní konstrukce				
Dřevěná podlaha	30	600	2510	
Škvárový zásyp	180	750	750	
Dřevěný záklop	20	600	2510	
Σ	230			

Tabulka 2: A) Počátek 20. století (do roku 1920) - vnitřní konstrukce


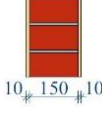
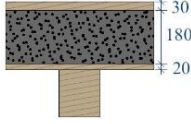
* stropní konstrukce k nevytápěné půdě pro potřeby výpočtu nahrazuje střešní konstrukci

pro potřeby výpočtu je uvažováno s vrstvou 1 m zeminy pod podlahou

B) Polovina 20. století (1920-1960)

OBVODOVÉ KONSTRUKCE	Tloušťka	Součinitel tepelné vodivosti	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Součinitel prostupu tepla	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	U [W/(m ² ·K)]	
Obvodová stěna						
Omítka vápenná	10	0,88	1600	840	1,37	
Cihla plná	450	0,84	1800	900		
Omítka vápenná	10	0,88	1600	840		
Σ	470					
Střeška**						
Tepelná izolace - heraklit	35	0,075	350	1630	1,24	
Dřevěný podhled	25	0,18	600	2510		
Σ	60					
Podlaha na terénu						
Dřevěná podlaha	20	0,18	600	2510	0,93	
Beton	100	1,30	2300	1020		
Zemina #	1000	1,40	1800	920		
Σ	1120					
Okna						
Dřevěná špaletová					2,35	
Σ						

Tabulka 3: B) Polovina 20. století (1920-1960) - obvodové konstrukce

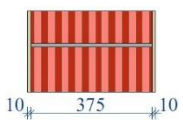
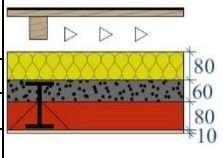
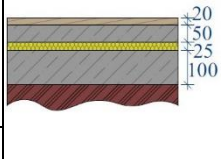

VNITŘNÍ KONSTRUKCE	Tloušťka	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	
Obvodová stěna				
Omítka vápenná	10	1600	840	
Cihla plná	450	1800	900	
Omítka vápenná	10	1600	840	
Σ	470			
Příčka				
Omítka vápenná	10	1600	840	
Cihla plná	150	1800	900	
Omítka vápenná	10	1600	840	
Σ	170			
Stropní konstrukce				
Dřevěná podlaha	30	600	2510	
Škvárový zásyp	180	750	750	
Dřevěný záklop	20	600	2510	
Σ	230			

Tabulka 4: B) Polovina 20. století (1920-1960) - vnitřní konstrukce

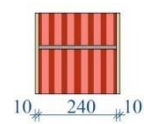

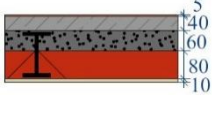
** Šikmá střeška – nahrazuje výpočtově plochou střeškou

pro potřeby výpočtu je uvažováno s vrstvou 1 m zeminy pod podlahou

C) Konec 20. století (1960-1990)

OBVODOVÉ KONSTRUKCE	Tloušťka	Součinitel tepelné vodivosti	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Součinitel prostupu tepla	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	U [W/(m ² ·K)]	
Obvodová stěna						
Omítka VC	10	0,99	2000	790	1,10	
Cihla příčně děrovaná	375	0,52	1450	960		
Omítka VC	10	0,99	2000	790		
Σ	395					
Střecha ***						
Skelná vata	80	0,05	35	940	0,46	
Škvára	60	0,27	750	750		
Hurdís strop	80	0,60	710	960		
Omítka VC	10	0,99	2000	790		
Σ	230					
Podlaha na terénu						
Dřevěná podlaha	20	0,18	600	2510	0,62	
Beton	50	1,30	2300	1020		
Skelná vata	25	0,05	35	940		
Beton	100	1,30	2300	1020		
Zemina #	1000	1,40	1800	920		
Σ	1195					
Okna						
Dřevěná zdvojená					2,40	
Σ						

Tabulka 5: C) Konec 20. století (1960-1990) - obvodové konstrukce

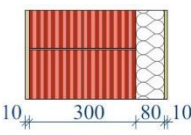
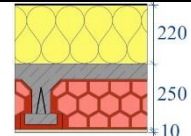
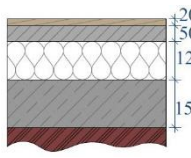

VNITŘNÍ KONSTRUKCE	Tloušťka	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	
Obvodová stěna				
Omítka VC	10	2000	790	
Cihla příčně děrovaná	240	1450	960	
Omítka VC	10	2000	790	
Σ	260			
Příčka				
Omítka VC	10	2000	790	
Cihla plná	150	1800	900	
Omítka VC	10	2000	790	
Σ	170			
Stropní konstrukce				
PVC	5	1400	1100	
Beton	40	2300	1020	
Škvára	60	750	750	
Hurdís strop	80	710	960	
Omítka VC	10	2000	790	
Σ	195			

Tabulka 6: C) Konec 20. století (1960-1990) - vnitřní konstrukce

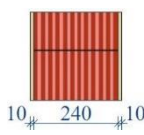

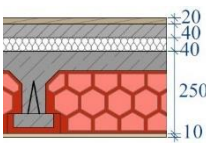
*** dvouplošňová plochá střecha

pro potřeby výpočtu je uvažováno s vrstvou 1 m zeminy pod podlahou

D) Nízkoenergetické domy

OBVODOVÉ KONSTRUKCE	Tloušťka	Součinitel tepelné vodivosti	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Součinitel prostupu tepla	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	U [W/(m ² ·K)]	
Obvodová stěna						
Omítka VC	10	0,99	2000	790	0,25	
Keramické tvárnice	300	0,18	850	1000		
EPS	80	0,038	16	1270		
Omítka minerální.	10	0,80	1500	1000		
Σ	400					
Střeška						
Minerální vata	220	0,038	125	1080	0,16	
Strop MIAKO	250	0,83	800	960		
Omítka VC	10	0,99	2000	790		
Σ	480					
Podlaha na terénu						
Dřevěná podlaha	20	0,18	600	2510	0,23	
Anhydritový potěr	50	1,2	2050	850		
EPS	120	0,038	16	1270		
Beton	150	1,30	2300	1020		
Zemina #	1000	1,40	1800	920		
Σ	1340					
Okna						
S izolačním dvojsklem						
Σ					1,20	

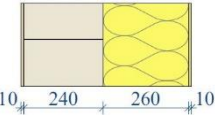
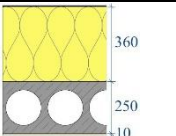
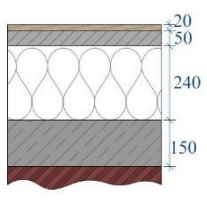

Tabulka 7: D) Nízkoenergetické domy - obvodové konstrukce

VNITŘNÍ KONSTRUKCE	Tloušťka	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	
Obvodová stěna				
Omítka VC	10	2000	790	
Keramické tvárnice	240	900	1000	
Omítka VC	10	2000	790	
Σ	260			
Příčka				
Omítka VC	10	2000	790	
Keramické tvárnice	115	900	1000	
Omítka VC	10	2000	790	
Σ	135			
Stropní konstrukce				
Dřevěná podlaha	20	600	2510	
Anhydritový potěr	50	2050	8500	
EPS	40	16	1270	
Strop MIAKO	250	800	960	
Omítka VC	10	2000	790	
Σ	360			

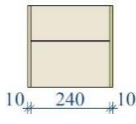
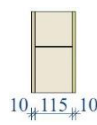
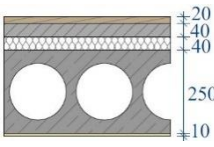
Tabulka 8: D) Nízkoenergetické domy - vnitřní konstrukce

pro potřeby výpočtu je uvažováno s vrstvou 1 m zeminy pod podlahou

E.1) Pasivní domy – těžké

OBVODOVÉ KONSTRUKCE	Tloušťka	Součinitel tepelné vodivosti	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Součinitel prostupu tepla	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	U [W/(m ² ·K)]	
Obvodová stěna						
Omítka VC	10	0,99	2000	790	0,14	
Vápenopískové tvárnice	240	0,99	1800	1000		
Minerální vata	260	0,038	125	1080		
Omítka minerální.	10	0,80	1500	1000		
Σ	520					
Střecha						
Minerální vata	360	0,038	125	1080	0,10	
ŽB panel dutinový	250	1,2	1200	1020		
Omítka VC	10	0,99	2000	790		
Σ	620					
Podlaha na terénu						
Dřevěná podlaha	20	0,18	600	2510	0,13	
Anhydritový potěr	50	1,2	2050	850		
EPS	240	0,038	16	1270		
Beton	150	1,30	2300	1020		
Zemina #	1000	1,40	1800	920		
Σ	1460					
Okna						
S izolačním trojsklem						
Σ					0,80	

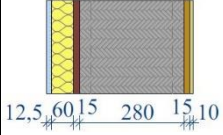
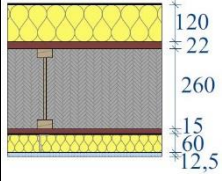
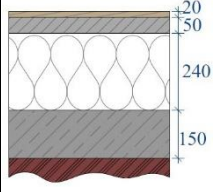

Tabulka 9: E.1) Pasivní domy - těžké - obvodové konstrukce

VNITŘNÍ KONSTRUKCE	Tloušťka	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	
Obvodová stěna				
Omítka VC	10	2000	790	
Vápenopískové tvárnice	240	1800	1000	
Omítka VC	10	2000	790	
Σ	260			
Příčka				
Omítka VC	10	2000	790	
Vápenopískové tvárnice	115	1800	1000	
Omítka VC	10	2000	790	
Σ	135			
Stropní konstrukce				
Dřevěná podlaha	20	600	2510	
Anhydritový potěr	50	2050	8500	
EPS	40	16	1270	
Strop MIAKO	250	800	960	
Omítka VC	10	2000	790	
Σ	360			

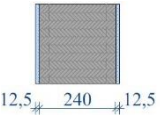
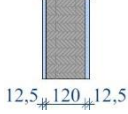
Tabulka 10: E.1) Pasivní domy - těžké - vnitřní konstrukce

pro potřeby výpočtu je uvažováno s vrstvou 1 m zeminy pod podlahou

E.2) Pasivní domy – lehké

OBVODOVÉ KONSTRUKCE	Tloušťka	Součinitel tepelné vodivosti	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Součinitel prostupu tepla	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	U [W/(m ² ·K)]	
Obvodová stěna						
Sádrokarton	12,5	0,22	750	1060		
Minerální vata	60	0,038	125	1080		
OSB desky	15	0,15	630	1580		
Celulóza	280	0,056	76	2000		
Dřevovláknitá izolace	15	0,047	230	1380		
Omítka minerální.	10	0,80	1500	1000		
Σ	337,5					
Střecha						
Sádrokarton	12,5	0,22	750	1060		
Minerální vata	60	0,038	125	1080		
OSB desky	15	0,15	630	1580		
Celulóza	260	0,056	76	2000		
OSB desky	22	0,15	630	1580		
Minerální vata	120	0,038	125	1080		
Σ	489,5					0,10
Podlaha na terénu						
Dřevěná podlaha	20	0,18	600	2510		
Anhydritový potěr	50	1,2	2050	850		
EPS	240	0,038	16	1270		
Beton	150	1,30	2300	1020		
Zemina #	1000	1,40	1800	920		
Σ	1460					0,13
Okna						
S izolačním trojsklem						
Σ					0,80	

Tabulka 11: E.2) Pasivní domy – lehké - obvodové konstrukce

VNITŘNÍ KONSTRUKCE	Tloušťka	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	
Obvodová stěna				
Sádrokarton	12,5	750	1060	
Celulóza	240	76	2000	
Sádrokarton	12,5	750	1060	
Σ	265			
Příčka				
Sádrokarton	12,5	2000	790	
Celulóza	120	1800	1000	
Sádrokarton	12,5	2000	790	
Σ	145			

Tabulka 12: E.2) Pasivní domy – lehké - vnitřní konstrukce 1/2

pro potřeby výpočtu je uvažováno s vrstvou 1 m zeminy pod podlahou

VNITŘNÍ KONSTRUKCE	Tloušťka	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Schéma konstrukce
Materiál	d [mm]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]	
Stropní konstrukce				
Dřevěná podlaha	20	600	2510	
OSB desky	36	630	1580	
Minerální vata	40	125	1080	
OSB desky	22	630	1580	
Vzduch	100	1,2	1010	
Minerální vata	100	125	1080	
Sádrokarton	12,5	750	1060	
Σ	328,5			

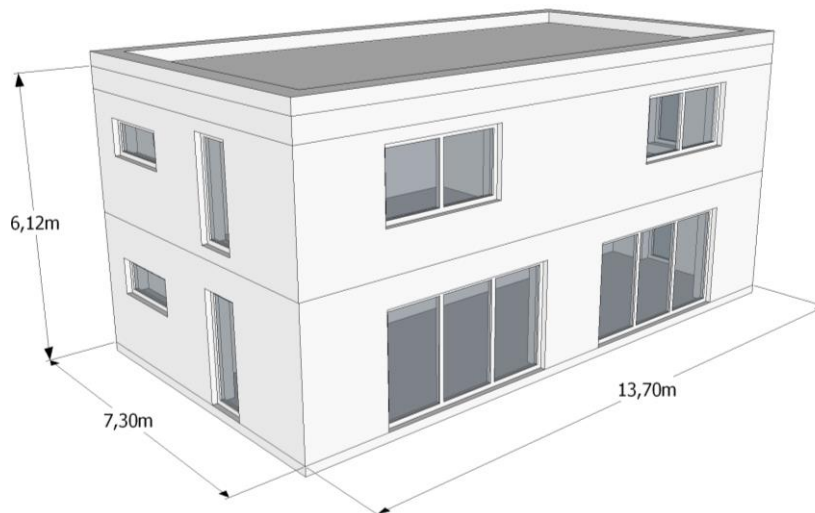
Tabulka 13: E.2) Pasivní domy – lehké - vnitřní konstrukce 2/2

2.3. Modelový dům

Historický vývoj obytných domů od počátku 20. století probíhá v důsledku pokroku stavebních materiálů, u kterých se mění tepelně-technické vlastnosti. Mění se také tvar a rozměry budov, funkční využití, způsob vytápění a větrání apod. Tato práce si klade za cíl porovnání budov napříč uplynulým stoletím. Jednodušší výpočty a lepší porovnatelnost budov vedle k idealizaci objektů do jednoho virtuálního domu s danými rozměry a tvarem.

Zjednodušeně je možné odvodit, že bytový dům se od rodinného domu liší pouze velikostí, tedy rozměry, množstvím konstrukcí, počtem obyvatel, výkonem tepelného zdroje apod. Používané materiály a technologie jsou v průběhu století shodné, nebo alespoň velmi podobné pro oba typy objektů určených k bydlení. Z pohledu analýzy, kterou se zabývá tato práce je odlišnost zejména v chování vnitřního vzduchu. Zatímco u malých domů je možné uvažovat vnitřní prostředí jako jednu zónu s jednotnou teplotou, tak u velkých bytových domů by toto zjednodušení mohlo vést k hrubé chybě. Cíle této práce je analyzovat vliv tepelně akumulčních a tepelně izolačních vlastností konstrukcí na vnitřní prostředí v průběhu modelového zimního a letního období. Cílem práce není popsat rozložení teplot vzduchu a jeho chování v budově.

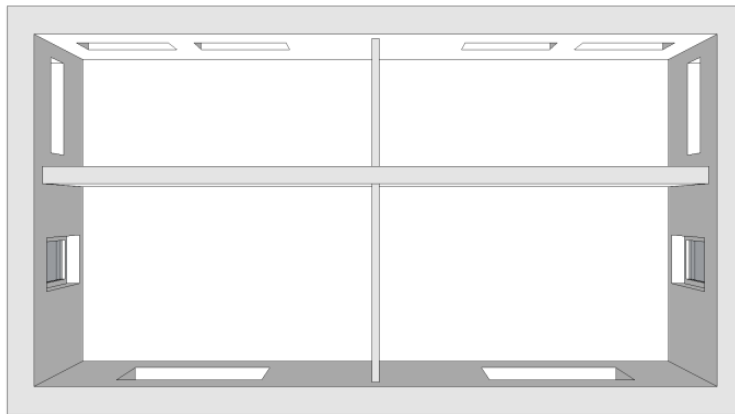
Jako modelový dům byl zvolen dvoupodlažní rodinný dům s obdélníkovým půdorysem o vnějších rozměrech 13,7 x 7,3 metru. Dům není podsklepený a podlaha 1.NP leží na terénu. Dům je zakončen plochou střechou. Modelový dům má na jižní fasádě největší plochu oken a na severní straně naopak nejmenší. Vnitřní dispozici tvoří jedna podélná nosná stěna, na kterou kolmo navazuje jedna příčka.



Obrázek 2: Rozměry modelového domu

Domy z různých časových období mají odlišné konstrukce s nesterjnými tloušťkami. Modelový dům je nastaven tak, že se stěny a strop rozšiřují směrem dovnitř. Vnější rozměry zůstávají vždy pro všechna časová období stejné, dochází tak pouze ke změně vnitřního objemu vzduchu. Podlaha 1.NP a venkovní terén jsou koncipovány bez výškového rozdílu. Zvyšující se skladba podlah narůstá směrem do terénu a nezpůsobuje změnu vnitřního objemu. Pro potřeby výpočtu, který se zabývá tepelně akumulčními schopnostmi konstrukcí je pod podlahou vždy uvažována vrstva zeminy vysoká 1 m.

Idealizace historicky odlišných domů má za následek odchylky spojené zejména s tvarem střešní konstrukce. Jak již bylo zmíněno modelový dům má plochou střechu, v počátcích 20. století se ovšem rodinné domy s plochou střechou téměř nevyskytovaly. Z tohoto důvodu je uvažováno u objektu z období *B) Polovina 20. století (1920-1960)* se zjednodušením, které ovšem nebude vést k fatálním nepřesnostem. Skladba šikmé střešní konstrukce bude do výpočtů aplikována jako plochá střecha, byť z konstrukčního hlediska je to čirý nesmysl. Ještě výraznější optimalizace je u domu reprezentující první skupinu zkoumaného období, konkrétně *A) Počátek 20. století (do roku 1920)*. V této době se podkroví ještě nevyužívalo pro bydlení, a tak byl půdní prostor nevytápěný. Střešní konstrukce se skládanou krytinou měla zanedbatelnou tepelně izolační funkci a díky intenzivnímu větrání je možné konstatovat, že vzduch v půdním prostoru je shodný se vzduchem venkovním. Z těchto důvodů reprezentuje střešní konstrukci u domů z prvního sledovaného období stropní konstrukce pod nevytápěnou půdou.



Obrázek 3: Dispozice modelového domu

Velikost okenních otvorů se v průběhu doby měnila. Dříve byla malá okna. Dnes se můžeme setkat s celými prosklenými stěnami. Velikost oken ovlivňuje tepelné ztráty v zimním období a solární zátěž v letním období. Modelový dům má pro všechna období okna stejně velká. Kvůli lepší porovnatelnosti objektů napříč 20. stoletím je připuštěna tato nepřesnost. Velikost oken v modelovém domě shrnuje následující tabulka:

ORIENTACE	ROZMĚRY 1.NP	ROZMĚRY 2.NP	PLOCHA [m ²]
Sever	4 × (1,8 × 0,8)	4 × (1,8 × 0,8)	11,52
Jih	2 × (4,15 × 2,4)	2 × (2,8 × 1,5)	28,32
Východ	1,8 × 0,8 + 1,0 × 2,4	1,8 × 0,8 + 1,0 × 2,4	7,68
Západ	1,8 × 0,8 + 1,0 × 2,4	1,8 × 0,8 + 1,0 × 2,4	7,68
Celkem			55,20

Tabulka 14: Rozměry oken

2.4. Sledované parametry

Účinná tepelná kapacita C [J/K]

Tepelná kapacita popisuje schopnost materiálů pojmout a uložit tepelnou energii. Měrná tepelná kapacita c [J/(kg·K)] patří k základní tepelně technické vlastnosti každého materiálu a udává množství tepelné energie, které je potřeba danému materiálu o hmotnosti 1 kg dodat, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K [2]. Celková tepelná kapacita C_{tot} [J/K] je definována jako množství tepla, které je potřeba stavebnímu prvku dodat, aby se ohřál o 1 K. Pokud je teplota prostředí vyšší než aktuální teplota stavebního prvku, tak se stavební prvek postupně ohřívá. Rychlost změny teploty stavebního prvku je přímo úměrná hodnotě tepelné kapacity stavebního prvku. [1]

Celková tepelná kapacita stavebního prvku C_{tot} [J/K] se vypočítá jako součet tepelných kapacit jednotlivých vrstev stavebního prvku.

$$C_{tot} = \sum_j c_j \cdot \rho_j \cdot V_j \quad [\text{J/K}] \quad (2.1)$$

kde j značí stavební prvek, c [J/(kg·K)] je měrná tepelná kapacita, ρ [kg/m³] je objemová hmotnost a V [m³] je objem stavebního prvku

Celkovou tepelnou kapacitu budovy $C_{building}$ [J/K] můžeme popsat jako součet tepelné kapacity vnitřních stavebních prvků C_{int} [J/K] a tepelné kapacity stavebních prvků ve styku s venkovním prostředím C_{ext} [J/K].

$$C_{building} = C_{int} + C_{ext} \quad [\text{J/K}] \quad (2.2)$$

Vnitřní tepelná kapacita C_{int} [J/K] je tvořena tepelnou kapacitou stavebních konstrukcí uvnitř budovy $C_{i,con}$ [J/K] (vnitřní nosné stěny, příčky, stropní konstrukce a podlahy), ale je možné započítat i tepelnou kapacitu nábytku C_{fur} [J/K] a tepelnou kapacitu vnitřního vzduchu $C_{i,air}$ [J/K].

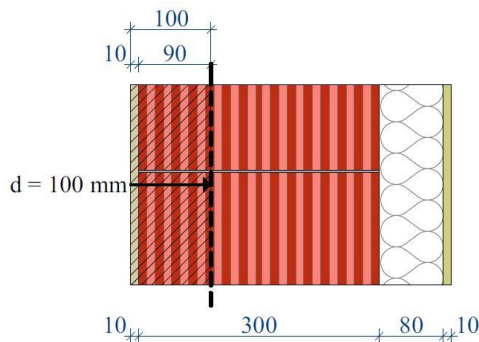
$$C_{int} = C_{i,con} + C_{fur} + C_{i,air} \quad [\text{J/K}] \quad (2.3)$$

Exteriérovou složku tepelné kapacity C_{ext} [J/K] tvoří konstrukce na obálce budovy (obvodové stěny, střešní konstrukce, podlaha na terénu či podlaha nad suterénem a výplně otvorů). Tyto konstrukce jsou přímo napojeny na vnější prostředí.

Účinná tepelná kapacita C [J/K] vyjadřuje změnu akumulovaného tepla v konstrukcích budovy při změně vnitřní teploty o ± 1 K během dané výpočtové periody.[3] Je počítána jako suma všech materiálových vrstev od vnitřního povrchu až k maximální tloušťce 100 mm, případně do středu konstrukce, podle toho, čeho je dosaženo dřívě. Tloušťka do středu konstrukce se uplatní zejména u tenkých interiérových konstrukcí jako jsou příčky. Tloušťka 100 mm vychází z obecných zvyklostí pro zjednodušený výpočet účinné tepelné kapacity, tento parametr je také zachycen v knize Stavební tepelná technika a energetika budov.[3] Princip výpočtu účinné tepelné kapacity přibližuje *Obrázek 4* a *Obrázek 5*.

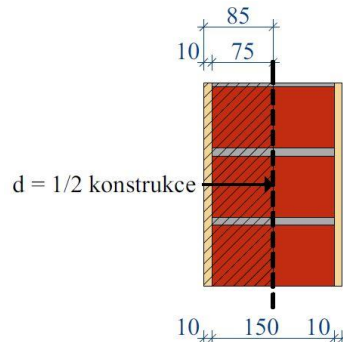
Tloušťka pro výpočet tepelné kapacity:

100 mm od vnitřního povrchu



Obrázek 4: Tloušťka pro výpočet tepelné kapacity (100 mm)

od vnitřního povrchu do středu konstrukce



Obrázek 5: Tloušťka pro výpočet tepelné kapacity (střed)

Měrný tepelný tok H [W/K]

Tepelný tok Φ [W] je množství tepla, které proudí do systému (prostoru) nebo ze systému za jednotku času a zahrnuje všechny složky šíření tepla. Je definován podílem přenášeného tepla Q [J] a příslušného času t [s]. [2],[3]

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{W}] \quad (2.4)$$

Měrný tepelný tok H [W/K] je podíl tepelného toku Φ [W] a rozdílu teplot ΔT [K] mezi dvěma prostředím. Lze ho rozdělit na měrný tepelný tok prostupem tepla H_t [W/K] a měrný tepelný tok větráním H_v [W/K]. [4]

$$H = \frac{\Phi}{\Delta T} = H_t + H_v \quad [\text{W/K}] \quad (2.5)$$

Měrný tepelný tok prostupem tepla H_t [W/K] je podíl mezi tepelným tokem prostupujícím obálkou budovy vedením tepla Φ_t [W] a rozdílem tepla ΔT [K] na obou stranách konstrukce [4]. Můžeme ho také vypočítat jako součin součinitele prostupu tepla U [W/(m²·K)] a plochy konstrukce A_i [m²]. Toho využijeme zejména ve fázi výpočtu, kdy neznáme teploty okolního prostředí a potřebujeme určit měrný tepelný tok skrze dílčí konstrukce.

$$H_t = \frac{\Phi_t}{\Delta T} = U \cdot A_i \quad [\text{W/K}] \quad (2.6)$$

Celkový měrný tepelný tok prostupem tepla H_t [W/K] se rovná součtu dílčích měrných tepelných toků prostupujících přes dílčí konstrukce na obálce budovy, ale také součinu průměrného součinitele prostupu tepla U_{em} [W/(m²·K)] a celkové ploše konstrukcí na obálce budovy A_e [m²].

$$H_t = \sum H_{t,i} = \sum U_i \cdot A_i = U_{em} \cdot A_e \quad [\text{W/K}] \quad (2.7)$$

kde i značí dílčí stavební konstrukci

Pro potřeby dalších výpočtů této práce je potřeba rozdělit celkový měrný tepelný tok H_t [W/K] na měrný tepelný tok horní částí obvodových konstrukcí $H_{t,u}$ [W/K] a měrný tepelný tok podlahou $H_{t,soil}$ [W/K].

$$H_t = H_{t,u} + H_{t,soil} \quad [\text{W/K}] \quad (2.8)$$

Součtem měrného tepelného toku horní částí obvodových konstrukcí $H_{t,u}$ [W/K] a měrného tepelného toku větráním H_v [W/K] dostaneme měrný tepelný tok horní částí budovy H_o [W/K]:

$$H_o = H_{t,u} + H_v \quad [\text{W/K}] \quad (2.9)$$

Dosazením vztahu (2.8) do rovnice (2.5) a použitím úpravy (2.9) získáme vztah potřebný pro další výpočty této práce:

$$H = H_o + H_{t,\text{soil}} \quad [\text{W/K}] \quad (2.10)$$

Měrný tepelný tok větráním H_v [W/K] odpovídá podílu tepelného toku vlivem větrání ve větraném prostoru Φ_v [W] a rozdílu vnitřního vzduchu a teploty přiváděného vzduchu ΔT [K]. [4] Také ho můžeme získat součinem objemové hmotnosti vzduchu ρ_a [kg/m³], měrné tepelné kapacity vzduchu c_a [J/(kg·K)] a objemovému průtoku větracího vzduchu V_a [m³/h].

$$H_v = \frac{\Phi_v}{\Delta T} = \rho_a \cdot c_a \cdot V_a \quad [\text{W/K}] \quad (2.11)$$

Objemový průtok větracího vzduchu V_a [m³/h] odpovídá součinu intenzity větrání n [h⁻¹] a objemu větraného prostoru V_b [m³].

$$V_a = n \cdot V_b \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (2.12)$$

Je-li systém větrání vybaven zpětným získáváním tepla (rekuperací) s účinností η_{zst} [%], pak se ve výpočtu zohlední snížením hodnoty objemového průtoku vzduchu V_a [m³/h]. [5]

$$V_a = n \cdot V_b \cdot (1 - \eta_{zst}) \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (2.13)$$

Časová konstanta budovy τ [s]

Vyjadřuje tepelnou setrvačnost (stabilitu) budovy. Stanovuje se výpočtem na základě tepelně akumulacních vlastností rozhodujících konstrukcí budovy. Čím má budova větší tepelnou setrvačnost (vyšší hodnotu časové konstanty), tím je schopna využít větší část tepelných zisků. [3], [6] S rostoucí časovou konstantou se tlumí kolísání vnitřní teploty. [1] Časová konstanta τ [s] je rovna podílu účinné tepelné kapacity budovy C [J/K] a měrného tepelného toku H [W/K]. Pro přehlednější práci s daty se časová konstanta vyjadřuje v hodinách či ve dnech.

$$\tau = \left(\frac{C}{H} \right) / 3600 \quad [\text{h}] \quad (2.14)$$

$$\tau = \left(\frac{C}{H} \right) / 86400 \quad [\text{dny}] \quad (2.15)$$

Celková tepelná charakteristika budovy H_t/V [$W/(m^3 \cdot K)$]

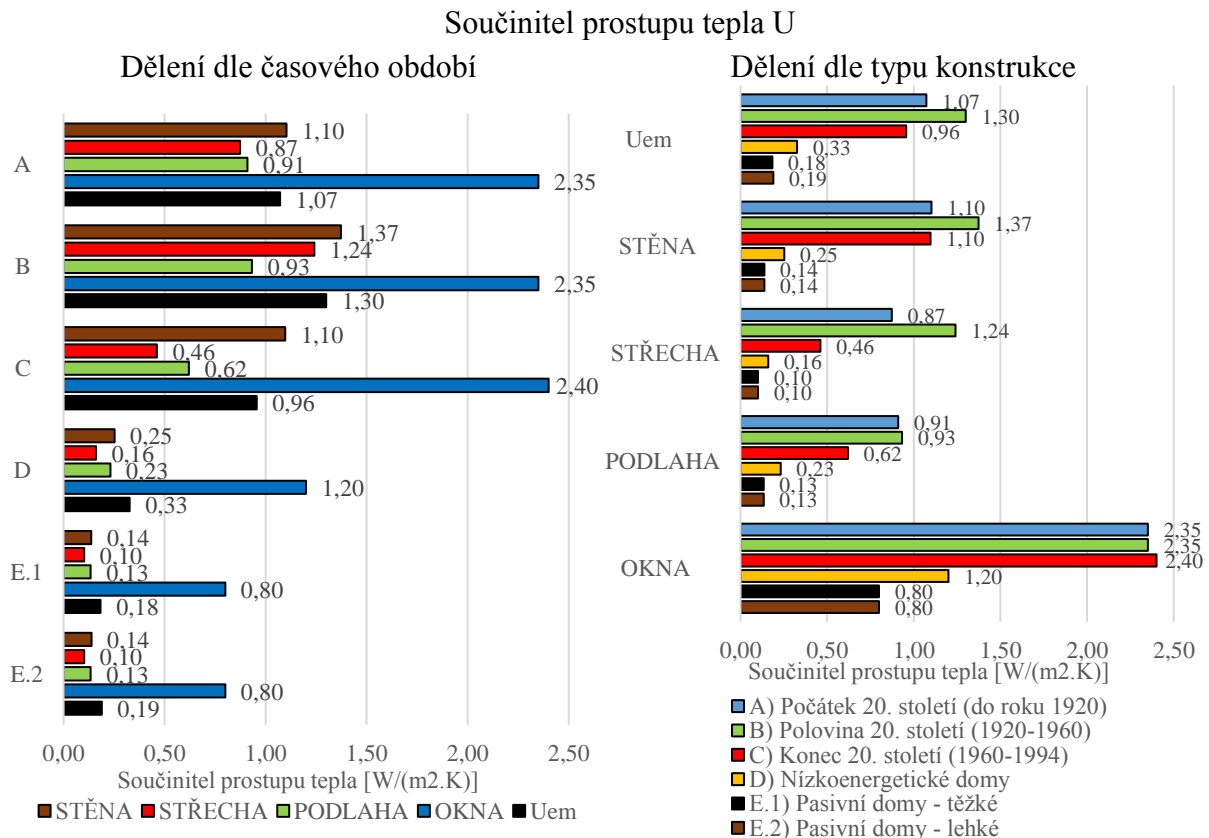
Celková tepelná charakteristika vyjadřuje tepelnou ztrátu budovy při teplotním rozdílu 1 K vztaženou na 1 m³ vytápěného objemu. [1] Jedná se o součin průměrného součinitele prostupu tepla U_{em} [$W/(m^2 \cdot K)$] a celkové plochy obálky budovy A_e [m^2] podělený objemem řešené budovy V_e [m^3]. Parametr umožňuje porovnání velikosti tepelných toků s ostatními objekty.

$$H_t/V = U_{em} \cdot A_e / V_e \quad [W/(m^3 \cdot K)] \quad (2.16)$$

Objemová tepelná kapacita C/V [$J/(m^3 \cdot K)$]

Objemová tepelná kapacita popisuje schopnost objemové jednotky konstrukcí budovy akumulovat teplo při teplotním rozdílu 1 K. Jedná se o poměr účinné tepelné kapacity budovy C [J/K] a vytápěného objemu řešené budovy V_e [m^3].^[1] Parametr složí ke vzájemnému porovnávání množství akumulční hmoty mezi objekty.

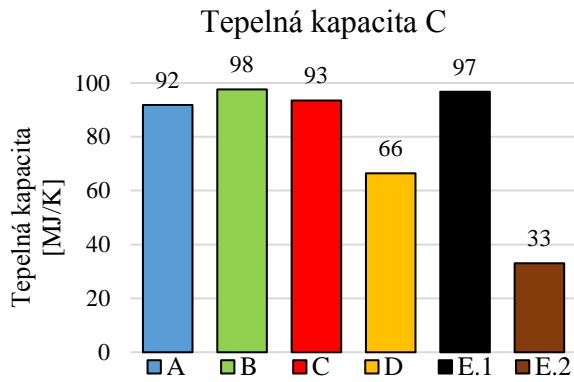
2.5. Souhrn tepelně-technických vlastností budov



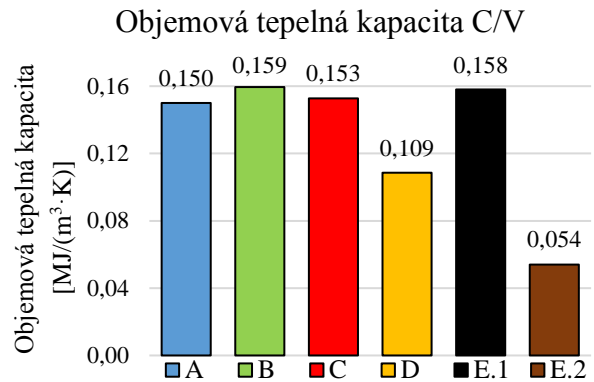
Graf 1: Přehled součinitele prostupu tepla

V prvních třech pozorovaných obdobích, tj. od počátku 20. století do 90. let, prakticky nedošlo k žádnému vývoji izolačních schopností budovy. Skok nastává teprve u nízkoenergetických staveb. U pasivních budov jsou tepelně izolační vlastnosti ještě více vylepšeny. Největší slabinou obytných staveb jsou okna. Zatímco u objektů A, B a C jsou okna 2-3x horší než ostatní konstrukce, tak u pasivních budov jsou horší téměř 8x.

Neprůsvitné konstrukce na obálce budovy (stěna, střecha, podlaha) se v průběhu století podařilo vylepšit 8x. Průsvitné konstrukce (okna) v současných budovách mají 3x lepší tepelně izolační vlastnosti než v budovách z prvních třech sledovaných časových období.

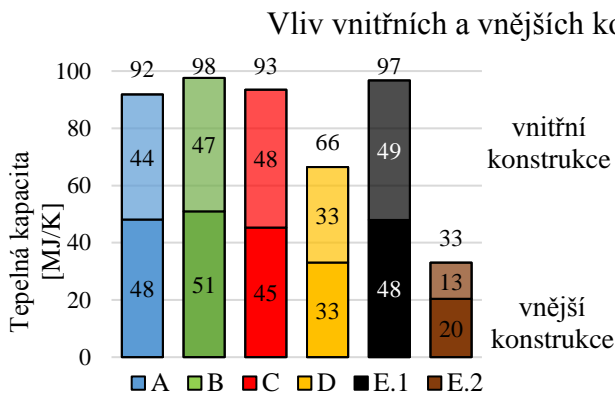


Graf 2: Přehled účinné tepelné kapacity modelové budovy

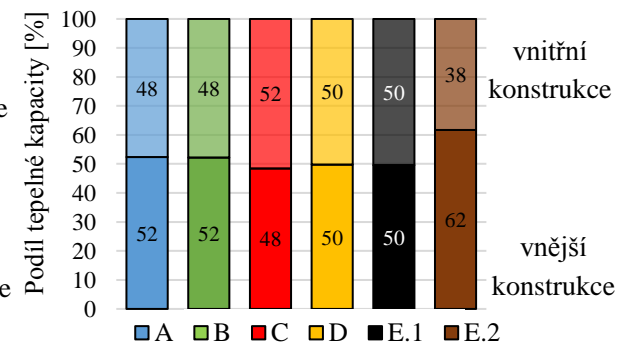


Graf 3: Přehled objemové tepelné kapacity

Účinná tepelná kapacita zděných budov se s časovým vývojem výrazně nemění. Objekt D má nižší kapacitu o 30 MJ/K. Výrazné snížení je pouze u objektu E.2. Tepelná kapacita objektu E.2 je oproti objektu E.1 nižší o 65 %.

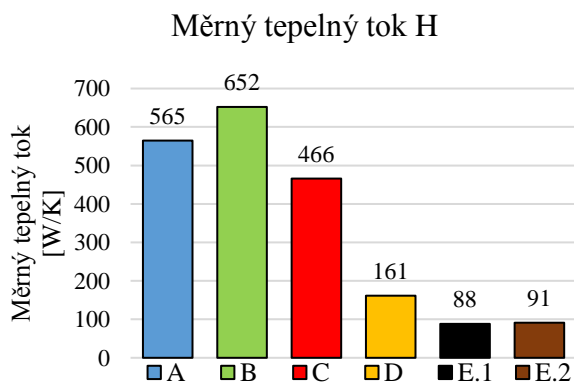


Graf 4: Rozdělení tepelné kapacity na vnitřní a vnější

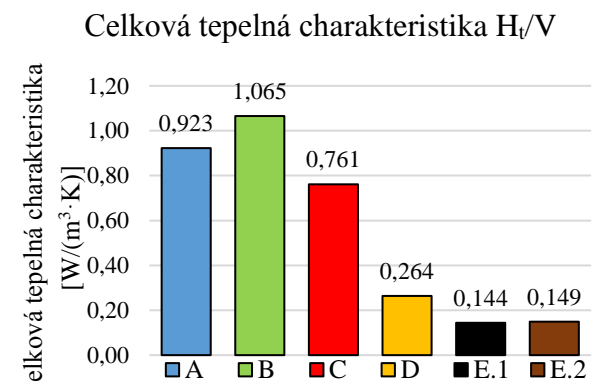


Graf 5: Procentuální podíl vnitřní a vnější tepelné kapacity

Vnitřní konstrukce se na celkové tepelné kapacitě podílejí z 50 %. Pouze u lehkého pasivního objektu (E.2) tvoří vnitřní konstrukce méně než 40 % z celkové tepelné kapacity.

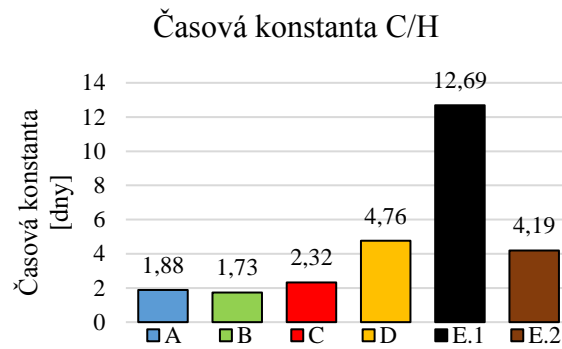


Graf 6: Přehled měrného tepelného toku modelové budovy



Graf 7: Přehled celkové tepelné charakteristiky

Měrný tepelný tok se oproti tepelné kapacitě v průběhu 20. století výrazně snížil. V období B došlo nejprve ke zvýšení oproti období A o 15 %. Od druhého zkoumaného období se tepelný tok snížil až o 86 %.



Graf 8: Přehled celkové tepelné charakteristiky

Časová konstanta u objektů A, B a C je 2 dny. Pasivní těžké objekty (E.1) mají časovou konstantu výrazně vyšší než ostatní objekty. Oproti domům z období A, B a C je vyšší o více než 80 %. Časová konstanta objektu E.1 je vyšší o více jak 60 % než u objektů D a E.2.

Vyhodnocení tepelně-technických vlastností budov

Porovnáním objektů stavěných v různých časových obdobích 20. století je jasně prokazatelné zlepšování tepelně izolačních vlastností budov. Zlepšení tepelně izolačních konstrukcí prokazuje snížení hodnot součinitele prostupu tepla – viz *Graf 1*. Postupné snižování součinitele prostupu tepla je důsledkem zpřísnění legislativy, která cílí na snižování potřeby energií. Pozitivním jevem ve výstavbě obytných budov za posledních 100 let je snížení tepelných ztrát o více než 80 %.

Okna jsou ve všech zkoumaných časových obdobích výrazně horší než ostatní neprůsvitné konstrukce. Potřebné je dodat, že okna jsou zároveň nejtěsnější konstrukce.

Tepelná kapacita obytných budov se v průběhu století výrazně nezměnila – viz *Graf 2*. Objekty A a B mají těžkou podlahu (kámen, beton) bez tepelné izolace, lehký (dřevěný) strop a lehkou střechu. Tepelná kapacita podlah objektů C, D a E.1 je nízká, neboť mají potenciální akumulaci hmotu podlahy oddělenou tepelnou izolací. Mají ale oproti dvěma předcházejícím obdobím těžké stropy. Součet tepelných kapacit vodorovných konstrukcí je u všech typů objektů téměř stejný. Objekty A, B, C a E.1 jsou zděné z materiálů s téměř totožnou objemovou hmotností i měrnou tepelnou kapacitou. Nižší tepelná kapacita o 30 MJ/K je u nízkoenergetického domu (D) způsobena obvodovými i vnitřními stěnami, které jsou vyzděny z dutinových tvárnic s nízkou objemovou hmotností.

Samostatnou kapitolou vyhodnocení tepelné kapacity je objekt E.2 - lehký pasivní dům, který zastupuje dřevostavby. Nemá žádnou významnou akumulaci konstrukci. Objemová hmotnost všech konstrukcí je nízká, a proto má celý dům výrazně nižší tepelnou kapacitu než masivní stavby. Řešením zvýšení akumulaci schopnosti dřevostaveb může být zejména masivní podlaha.

Přestože tepelná kapacita starých domů (A, B, C) je vysoká, tak tepelná setrvačnost je nízká. Nízkoenergetické domy (D) a lehké pasivní domy (E.2) mají tepelnou kapacitu nižší, a přesto se tepelná setrvačnost 2,5x zvýšila. Těžké pasivní domy (E.1) mají tepelnou kapacitu stejnou jako domy z prvních třech období a časovou konstantu 6x vyšší. Je to způsobeno závislostí tepelné setrvačnosti nejen na tepelné kapacitě, ale také na tepelných ztrátách. Je možné konstatovat, že rychlost chladnutí a přehřívání budov souvisí s akumulaci hmotou stejně jako s tepelně izolačními vlastnostmi obvodových konstrukcí.

3. Matematické modelování tepelného chování budov

3.1. Modelové situace

Roční cyklus přináší dvě extrémní situace, které ovlivňují celkový komfort osob při pobytu v budovách. Jsou to zimní mrazy a letní horka. V zimním období je sledovaným parametrem chladnutí budovy a vytápění. V létě zase přehřívání objektu a jeho případné chlazení.

3.1.1. Zimní modelové situace

Chladnutí objektu

V současné době, kdy jsou kladeny vysoké nároky na tepelně izolační vlastnosti obálky budovy, může být tepelná stabilita budov v zimním období opomíjena. Dobře zateplené a utěsněné budovy mají významně redukovány tepelné ztráty a nejsou náročné na přívod tepla. ^[13] Je ovšem opomíjen fakt, že může dojít k masivnímu výpadku energetického systému.

K výpadku přívodu energií a masivnímu blackoutu může dojít rozsáhlou poruchou elektráren a tepláren. Přírodní katastrofy, jako je pád stromů na elektrické vedení či poškození teplovodů způsobené rozsáhlými záplavami, mohou vést k nemožnosti budovy vytápět. Katastrofou se může stát teroristický útok na distribuční síť, případně mezinárodní politické problémy spojené s dodávkami zemního plynu. Všechny jmenované jevy mohou být málo pravděpodobné a nemusí nikdy nastat. Nelze ovšem vyloučit situaci, kdy dojde k souběhu několika katastrofických jevů najednou a je proto vhodné mít představu o rychlosti chladnutí budov.

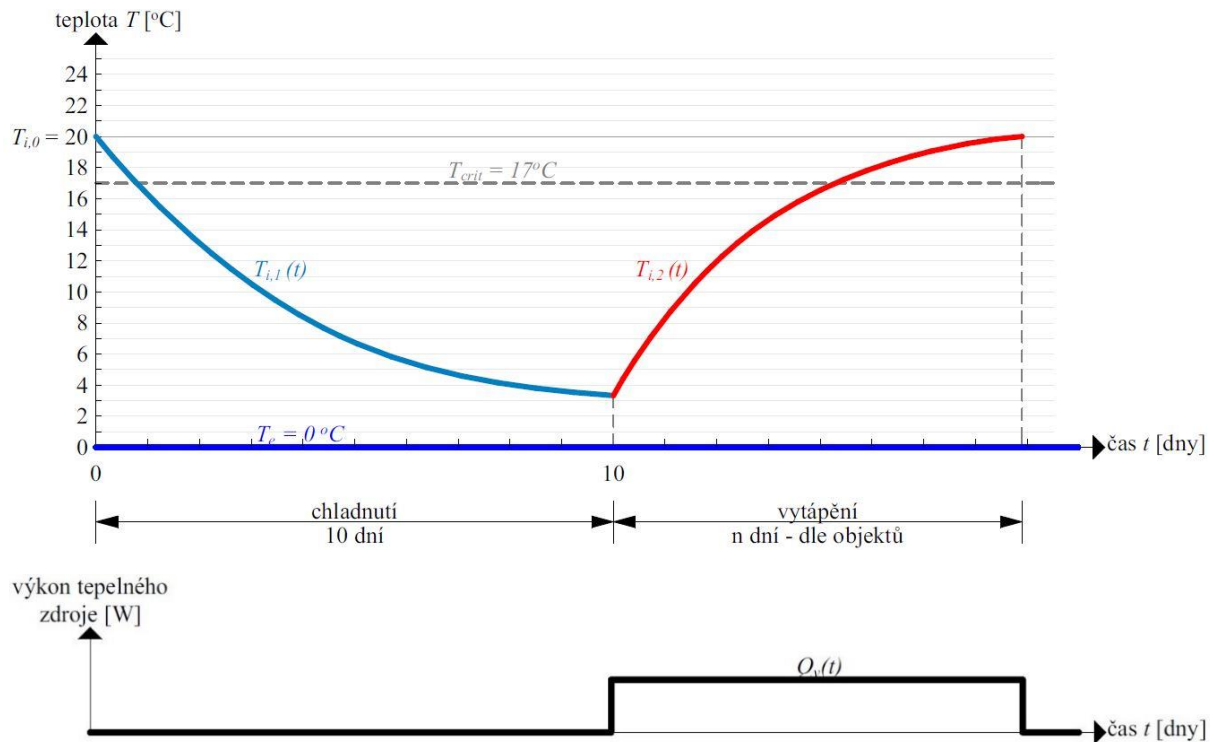
Jelikož jsou stále obývány i 100 let staré budovy, nabízí se porovnání mezi budovami stavěnými od počátku 20. století a dnešními high-tech stavbami. Jestli vůbec došlo v problematice chladnutí budov k výraznému progresu.

Sledovaným parametrem je pokles teploty pod kritickou hodnotu, která znamená výrazný diskomfort obyvatel. Pokles teplot za střednědobý časový úsek (10 dní) zobrazuje vliv použitých materiálů a porovnává výhody tepelné izolace. Princip výpočtu chladnutí zobrazuje *Obrázek 6* ve své první polovině.

Vytápění vychladlého objektu

Případ, který bezprostředně navazuje na chladnutí budovy, je vytopení vychladlého systému zpět do komfortních teplot. Pasivní domy se z principu navrhují s malými výkony tepelných zdrojů. V kombinaci s velkým množstvím akumulární hmoty může vytopení studeného domu znamenat značnou komplikaci.

Kromě časového úseku, za který by byl dům vytopen, je porovnán celkový výkon kotle a celkové množství energie potřebné k vytopení systému. Je zřejmě možné předpokládat kratší dobu vyhřátí lehkých budov a objektů s velkým topným výkonem. Princip výpočtu vytápění zobrazuje *Obrázek 6* ve své druhé polovině.



Obrázek 6: Zimní modelové situace

3.1.2. Letní modelové situace

Přehřívání objektu

Současná legislativa spolu s trendy dnešní výstavby obytných budov vede k realizaci velmi kvalitně izolovaných domů s velkými prosklenými plochami. Takové domy mohou mít v letních horkých měsících problémy s interiérovým diskomfortem způsobeným přehříváním budovy. Přehřívání interiéru způsobuje vysoké množství solární energie procházející průsvitnými konstrukcemi – zejména okny. Následně vysoký tepelný odpor konstrukcí brání úniku tepla i při poklesu teplot v nočních hodinách.

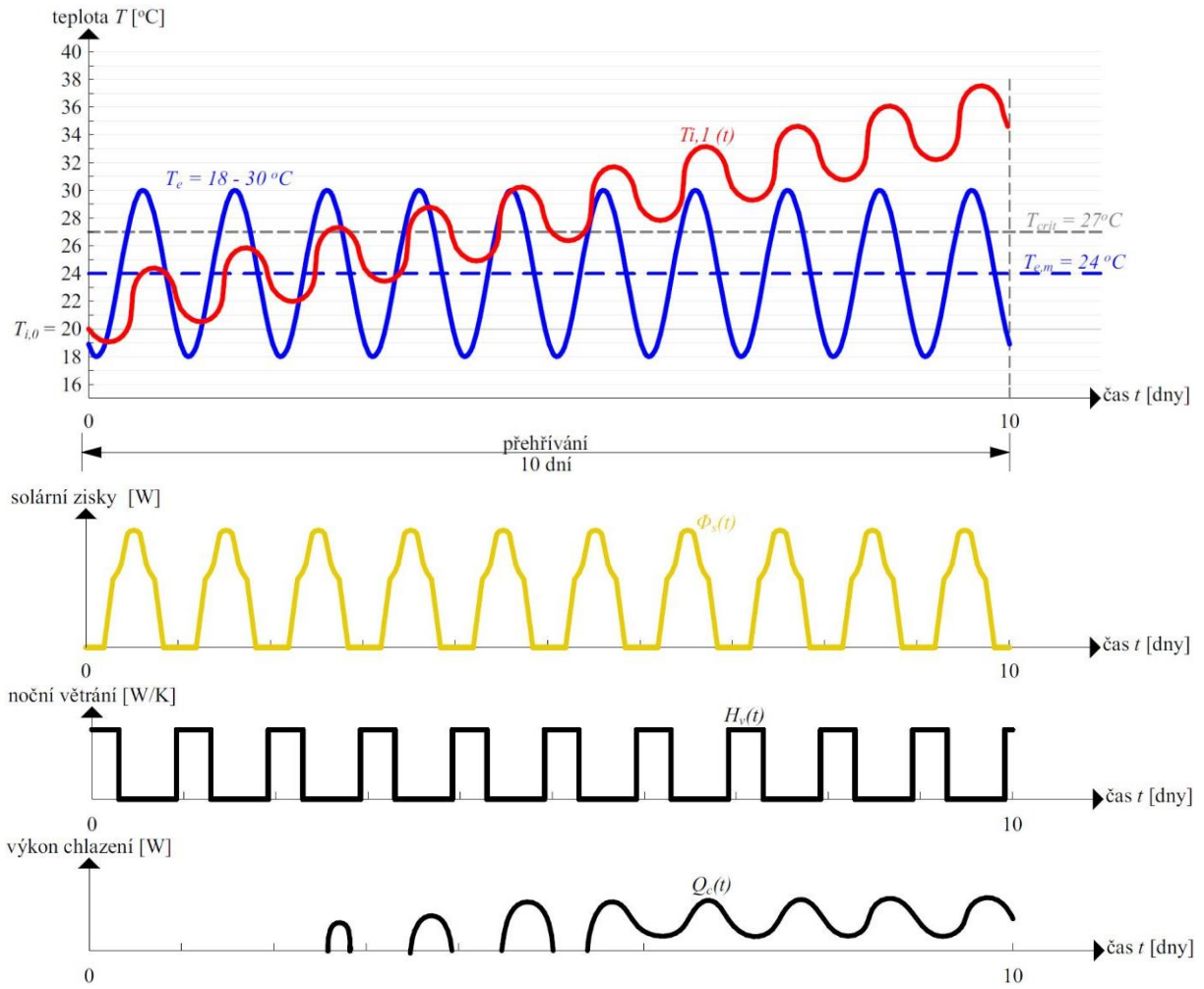
Obranou proti přehřívání obytných budov můžou být žaluzie či rolety. Dalším možným řešením je noční provětrávání budovy. Kombinací je možné analyzovat vliv těchto opatření na udržení komfortních teplot v interiéru obytných budov. Porovnáním objektů z různých časových období 20. století je možné analyzovat vliv tepelně akumulční hmoty a tepelně izolačních vlastností na přehřívání domů.

Sledovaným parametrem je překročení kritické teploty, které výrazně zhoršuje podmínky pro pobyt uvnitř objektu. Nárůst teplot v časovém cyklu (10 dní) zobrazuje vliv stínění, nočního větrání a kvality tepelně izolační obálky budovy.

Chlazení přehřátého objektu

V případě, kdy není možné odclonit či odvětrat letní tepelnou zátěž, je nutné instalovat do objektu chladicí systém. V této práci je uvažováno s klimatizační jednotkou a je sledován čas a výkon potřebný k vychlazení přehřátého objektu.

Princip výpočtu letních modelových situací znázorňuje *Obrázek 7*.



Obrázek 7: Letní modelové situace

3.2. Popis výpočetních modelů

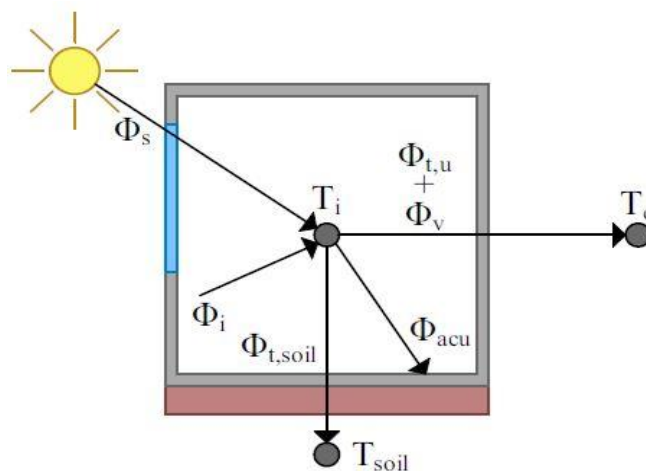
Výpočty zimní modelové situace jsou provedeny dvěma výpočetními modely. První výpočetní model je zjednodušený a druhý je podrobnější – simulační. Cílem zjednodušeného modelu je vytvořit představu o chování budov v neustáleném stavu pomocí několika jednoduchých parametrů. Výpočty letní modelové situace, které potřebují zahrnout větší škálu vlivů, budou provedeny simulačním modelem.

3.2.1. Zjednodušený model

Zjednodušený model je sestaven na principu jednoduzlového systému. Zjednodušený model umožňuje, při změně skladeb konstrukcí a několika okrajových podmínek, získat přehled o tepelně-technických vlastnostech budovy. Navíc zobrazuje přibližné chování objektu v neustáleném stavu.

Tepelnou bilanci zobrazuje *Obrázek 8* a je sestavena z následujících tepelných toků:

- Φ_s ... tepelné zisky od slunce
- Φ_i ... tepelné zisky od vnitřních zdrojů tepla (vytápění, obyvatelé, elektrické vybavení)
- $\Phi_{t,u}$... tepelný tok prostupem horní částí obvodových konstrukcí
- $\Phi_{t,soil}$... tepelný tok prostupem podlahou
- Φ_v ... tepelný tok větráním
- Φ_{acu} ... tepelný tok do akumulční hmoty



Obrázek 8: Tepelná bilance objektu

Rovnici tepelné bilance je možné zapsat jako:

$$\Phi_s + \Phi_i = \Phi_{t,u} + \Phi_v + \Phi_{t,soil} + \Phi_{acu} \quad [W] \quad (3.1)$$

Celkové tepelné ztráty horní části obvodových konstrukcí lze vyjádřit jako:

$$\Phi_{t,u} + \Phi_v = (H_{t,u} + H_v) \cdot (T_i - T_e) = H_o \cdot (T_i - T_e) \quad [W] \quad (3.2)$$

kde $H_{t,u}$ [W/K] je měrný tepelný tok prostupem tepla horní části budovy více popsán ve vztahu (2.8) a H_o je celkový měrný tepelný tok horní části budovy, který je popsán ve vztahu (2.9).

Tepelnou ztrátu přes podlahu $\Phi_{t,soil}$ [W] můžeme vyjádřit jako:

$$\Phi_{t,soil} = H_{t,soil} \cdot (T_i - T_{soil}) \quad [W] \quad (3.3)$$

Tepelný tok do akumulační hmoty $\Phi_{acu} [W]$ je možné vyjádřit jako změnu teploty vnitřního vzduchu za jednotku času:

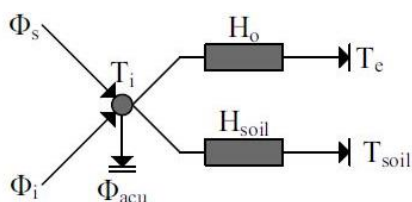
$$\Phi_{acu} = C \cdot \frac{dT_i}{dt} \quad [W] \quad (3.4)$$

Zde je uplatněno zjednodušení, které předpokládá, že akumulační hmota uvnitř budovy je okamžitě dostupná k akumulaci tepla, tzn. že teplota akumulační hmoty je rovna teplotě vnitřního vzduchu.

Po dosazení rovnic (3.2), (3.3) a (3.4) do rovnice (3.1) dostaneme:

$$\Phi_s + \Phi_i - H_o \cdot (T_i - T_e) - H_{t,soil} \cdot (T_i - T_{soil}) = C \cdot \frac{dT_i}{dt} \quad [W] \quad (3.5)$$

Výraz na pravé straně rovnice (3.5) je model akumulace tepla v budově.



Obrázek 9: Elektrická analogie tepelné bilance budovy

Za derivaci dT_i / dt můžeme zjednodušeně dosadit diskrétní vyjádření:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{T_i^{new} - T_i^{old}}{t} \quad [W] \quad (3.6)$$

kde $t [s]$ je časový krok výpočtu, $T_i^{old} [^{\circ}C]$ je teplota interiéru na začátku časového kroku a $T_i^{new} [^{\circ}C]$ je teplota interiéru na konci časového kroku.

Pokud do rovnice (3.5) dosadíme diskrétní vyjádření derivace (3.6) dostaneme:

$$\Phi_s + \Phi_i - H_o \cdot (T_i - T_e) - H_{t,soil} \cdot (T_i - T_{soil}) = C \cdot \frac{T_i^{new} - T_i^{old}}{t} \quad [W] \quad (3.7)$$

Algebraickou úpravou rovnice (3.7) vzhledem k T_i^{new} dostaneme:

$$T_i^{new} \cdot \left(H_o + H_{t,soil} + \frac{C}{t} \right) = \Phi_s + \Phi_i + T_e \cdot H_o + T_{soil} \cdot H_{t,soil} + T_i^{old} \cdot \frac{C}{t} \quad [W] \quad (3.8)$$

Použitím vztahu (2.10) můžeme rovnici (3.8) upravit:

$$T_i^{new} = \frac{\Phi_s + \Phi_i}{H + \frac{C}{t}} + \frac{T_e \cdot H_o}{H + \frac{C}{t}} + \frac{T_{soil} \cdot H_{soil}}{H + \frac{C}{t}} + \frac{T_i^{old} \cdot \frac{C}{t}}{H + \frac{C}{t}} \quad [^{\circ}C] \quad (3.9)$$

Algebraickou úpravou rovnice (3.9) dostaneme:

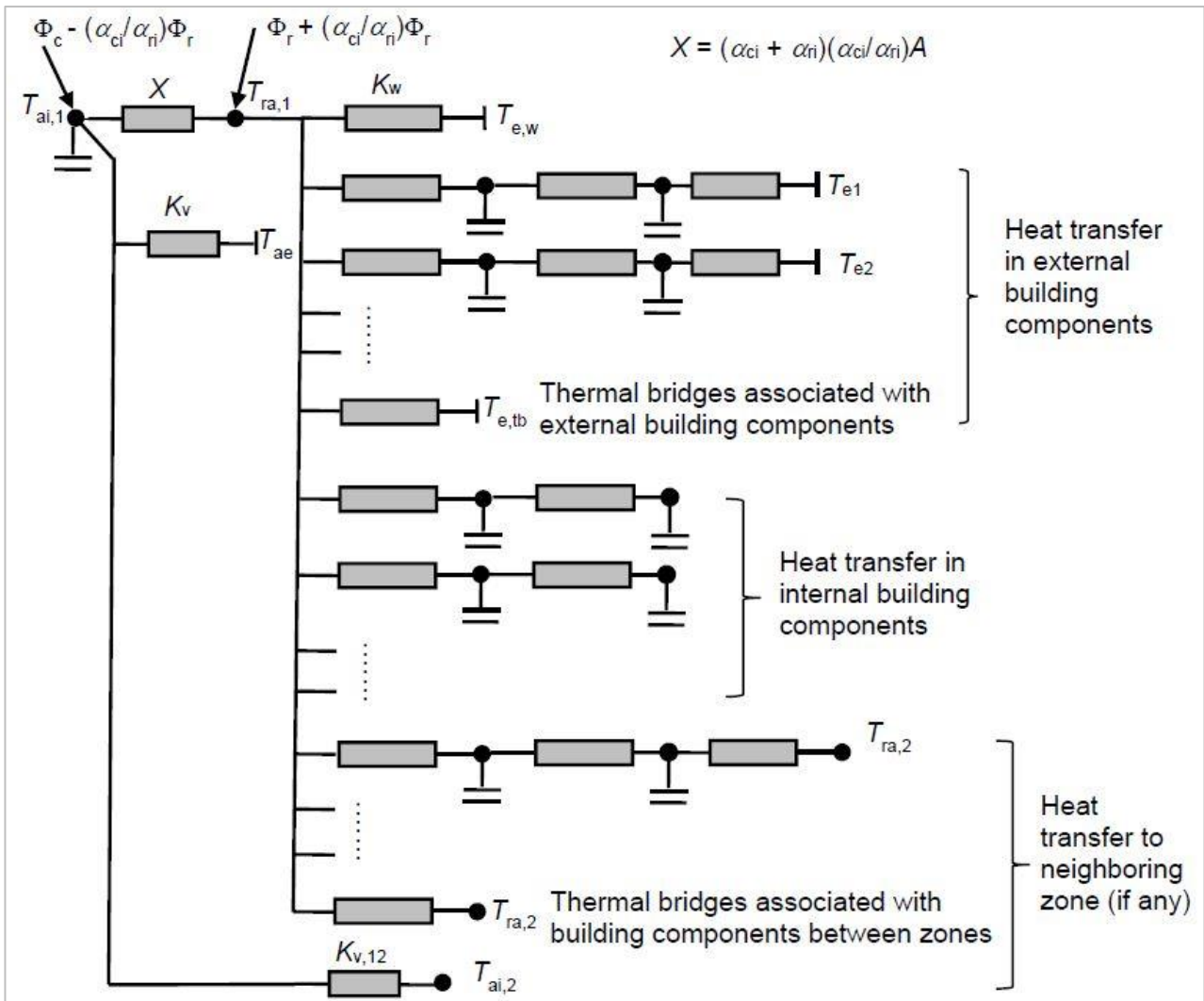
$$T_i^{new} = \frac{1}{H \cdot t + C} \cdot \{ (\Phi_s + \Phi_i) \cdot t + T_e \cdot H_o \cdot t + T_{soil} \cdot H_{t,soil} \cdot t + T_i^{old} \cdot C \} \quad [^{\circ}C] \quad (3.10)$$

3.2.2. Simulační model

Popis simulačního modelu je obsažen v článku *Comparative testing of simplified lumped parameter building thermal models* [14].

Strukturu modelu tvoří dva teplotní uzly pro vnitřní prostředí (vnitřní teplota vzduchu a radiální teplota vzduchu), dva teplotní uzly pro každou konstrukci na obálce budovy, dva teplotní uzly pro každou vnitřní konstrukci a dvě rychlé teplotní cesty reprezentující okna a větrání. Přenos tepla přes tepelné vazby je zjednodušeně modelován jednou vodivostí. [14]

Simulační výpočet je zpracován ve výpočetním programu Matlab – Simulink.[15]



Obrázek 10: Struktura simulačního modelu [14]

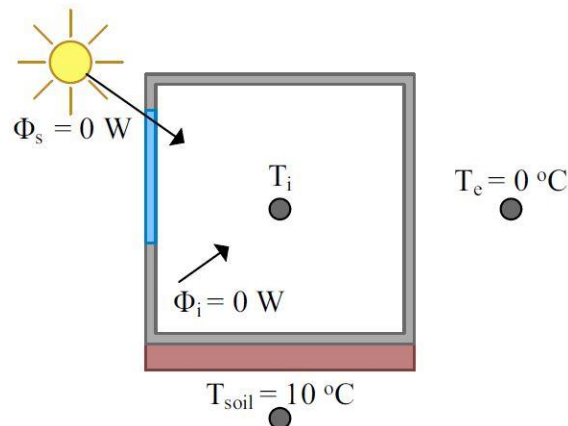
3.3. Okrajové podmínky

3.3.1. Zimní modelové situace

Venkovní teplota odpovídá dlouhodobému průměru teplot v České republice v zimních měsících dle ČHMÚ [11]. Teplota v zemině 1 m pod konstrukcí podlahy odpovídá závěrům z měření teplot pod velmi dobře tepelně izolovanou podlahou [12]. Časový krok výpočtu byl zvolen dostatečně krátký, aby názorně reflektoval chování budov i v delších časových cyklech. Z důvodu popsání chování konstrukcí a budov v jednotlivých časových obdobích jsou zanedbány vlivy, které by prosté chladnutí budov deformovaly. Konkrétně je uvažováno s nulovými vnitřními i solárními zisky. Předpokladem je přerušení dodávky všech energií do budovy, a proto je i nucené větrání nulové.

Jedním ze zkoumaných parametrů je doba vychladnutí systému pod kritickou teplotu, která je definovaná v normě ČSN 73 0540-2 poklesem teploty o 3 °C [7]. Tento parametr popisuje, jak dlouho zůstane v obytném prostoru komfortní teplota.

Další částí zimní modelového stavu je vytopení vychladnutého domu, který chladl 10 dní. Zde je zvolen požadavek na opětovné vytopení na počáteční vnitřní teplotu, kde se považuje za uspokojivou teplota odchylka od této teploty 0,2 K. Pro návrh výkonu tepelného zdroje je uvažováno s extrémní venkovní návrhovou teplotou v zimním období, která je typická pro Českou republiku dle normy ČSN 73 0540-3 [10]. V simulačním modelu je teplo do prostoru sdíleno z 60 % radiací a z 40 % konvekcí.



Obrázek 11: Schéma zimních okrajových podmínek

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotka
Venkovní teplota	T_e	0	°C
Teplota v zemině	T_{soil}	10	°C
Časový krok výpočtu	t	3600	s
Vnitřní zisky	Φ_i	0	W
Solární zisky	Φ_s	0	W
Intenzita nuceného větrání	n_{nuc}	0	h^{-1}
Kritická teplota při chladnutí	T_{crit}	17	°C
Požadovaná teplota pro vytápění	$T_{i,v}$	20	°C
Max. odchylka od $T_{i,v}$	ΔT	0,2	K
Extrémní venkovní teplota	$T_{e,max}$	-15	°C

Tabulka 15: Přehled okrajových podmínek pro zimní modelové situace

Zhodnocení kvality provádění a napojení tepelně izolačních vrstev je zahrnuto do výpočtu přírážkou na tepelné vazby ΔU :

Časové období	ΔU [W/(m ² ·K)]
A) Počátek 20. století (do roku 1920)	0,10
B) Polovina 20. století (1920-1960)	0,10
C) Konec 20. století (1960-1994)	0,05
D) Nízkoenergetické domy	0,02
E.1) Pasivní domy – těžké	0,00
E.2) Pasivní domy – lehké	0,00

Tabulka 16: Přírážka na tepelné vazby

Přestože je nucené větrání kvůli uvažovanému výpadku elektřiny nulové, tak probíhá výměna vzduchu netěsnostmi obálky stavby. Intenzita výměny vzduchu n [h⁻¹] je dána vztahem:

$$n = \frac{1}{20} \cdot n_{50} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (3.11)$$

kde n_{50} je násobnost výměny vzduchu v budově při tlakovém rozdílu 50 Pa, která se v průběhu doby vlivem vyšší kvality těsnosti obvodového pláště snižuje:

Časové období	n_{50}
A) Počátek 20. století (do roku 1920)	10
B) Polovina 20. století (1920-1960)	7,0
C) Konec 20. století (1960-1994)	3,5
D) Nízkoenergetické domy	1,5
E.1) Pasivní domy – těžké	0,6
E.2) Pasivní domy – lehké	0,6

Tabulka 17: Násobnost výměny vzduchu n_{50}

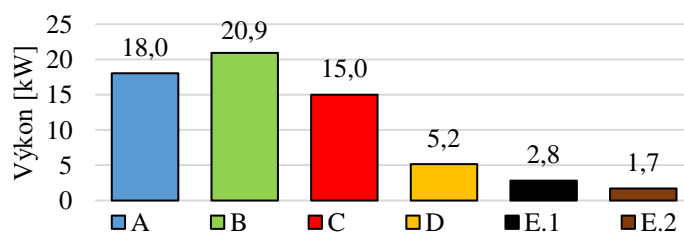
Minimální teplotu, při které je objekt zcela vychladlý, je možno popsat jako teplotu v ustáleném stavu T_{ust} :

$$T_{ust} = (H_o \cdot T_e + H_{t,soil} \cdot T_{soil}) / H \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.12)$$

kde H_o je celkový měrný tepelný tok horní částí obvodových konstrukcí, $H_{t,soil}$ je měrný tepelný tok podlahou, T_e je teplota venkovního vzduchu a T_{soil} je teplota v zemině.

Pro zpětné vytápění vychladlého objektu je výkon tepelného zdroje vypočítán dle vztahu:

$$Q_v = H_o \cdot (T_i - T_{e,max}) + H_{t,soil} \cdot (T_i - T_{soil}) \quad [\text{W}] \quad (3.13)$$

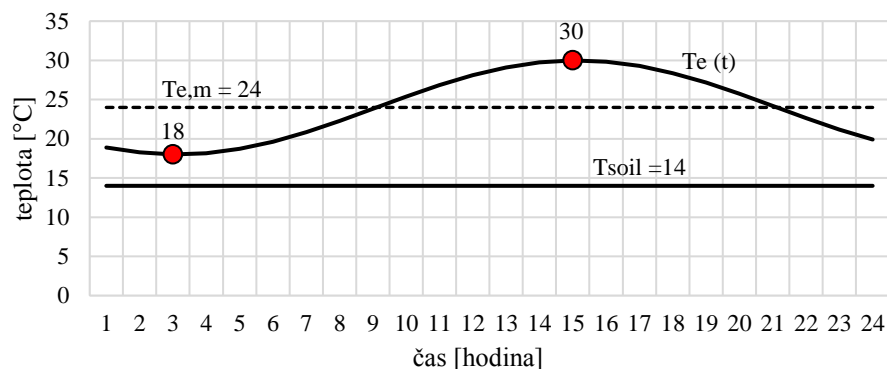


Graf 9: Návrhový výkon tepelného zdroje

Výkon tepelného zdroje v pasivním domě může být kvůli kvalitní tepelně izolační obálce nízký. Neizolované objekty potřebují k vytápění výrazně vyšší výkon tepelného zdroje.

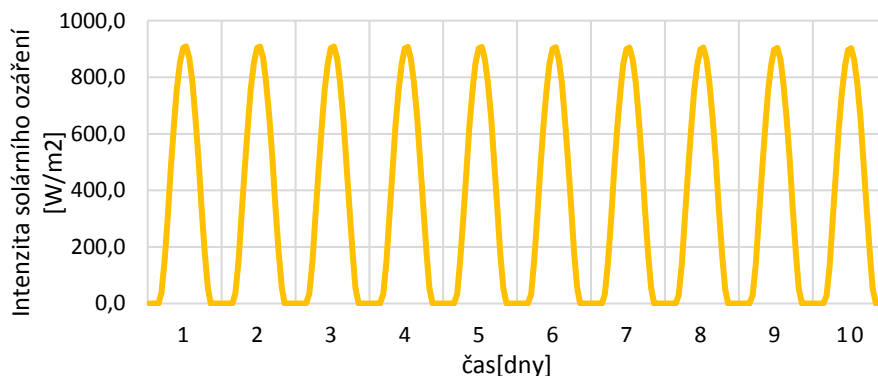
3.3.2. Letní modelové situace

Venkovní teplota probíhá v denním cyklu v rozsahu teplot od 18 °C do 30 °C. Teplota v zemině 1 m pod podlahou je oproti zimnímu období vyšší a odpovídá dlouhodobým měřením teplot [12]. Časový krok výpočtu je 60 minut.



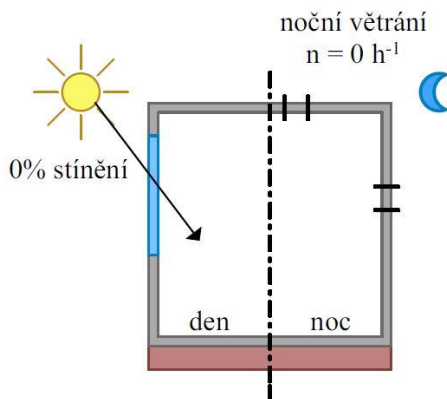
Graf 10: Průběh teplot v letní modelové situaci - denní cyklus

Intenzita globálního solárního záření na vodorovnou rovinu je v rozmezí od 0 do 910 W/m².

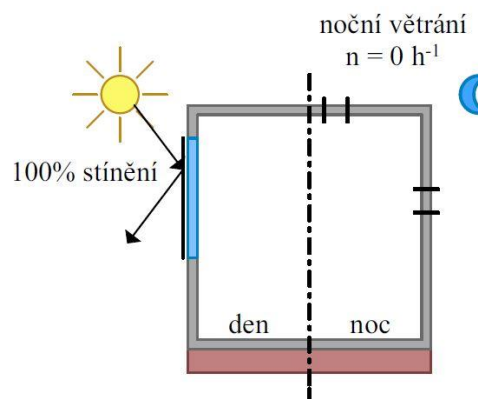


Graf 11: Globální solární ozáření

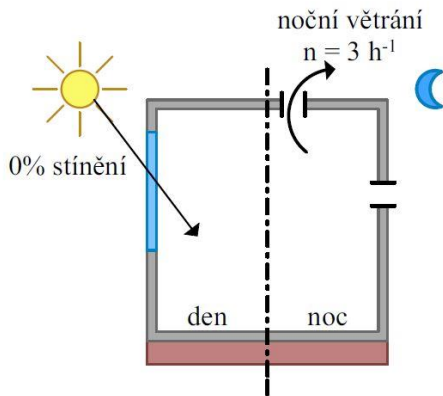
Zkoumány jsou dvě hlavní opatření bránící přehřívání budov – jedná se o stínění oken a noční větrání interiéru. Součástí analýzy jsou také jejich kombinace, které mají prokázat význam opatření pro odvedení tepelné zátěže. Aby mohl být hodnocen vliv nočního provětrávání, tak je uvažováno se 100 % stíněním. V reálných možnostech není odclonění 100 % solární zátěže pravděpodobné, a tak je navíc vypočítána varianta s 80 % stíněním.



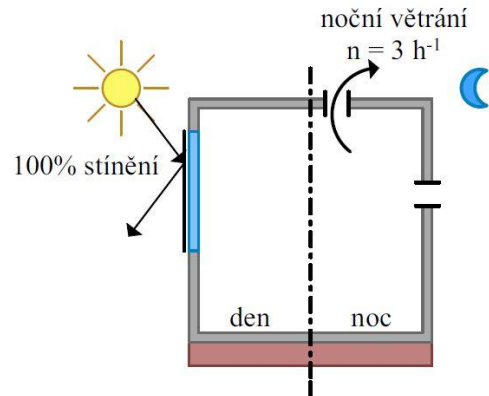
Obrázek 12: Výchozí stav pro letní přehřívání



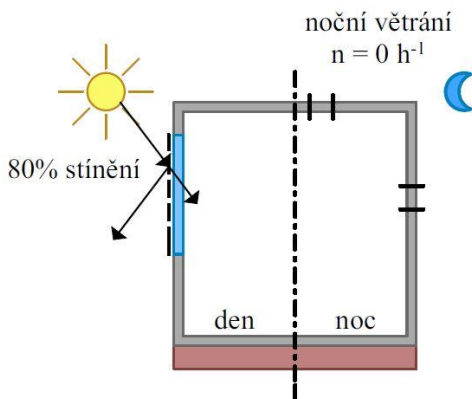
Obrázek 13: Opatření 1 - 100 % stínění



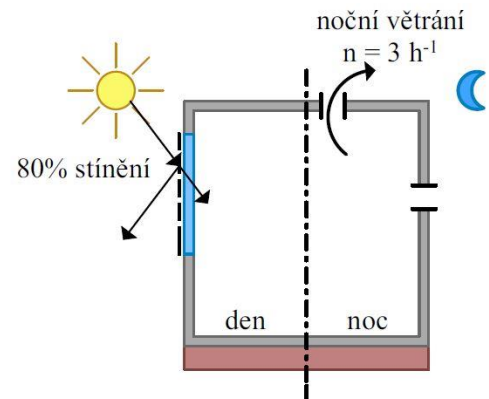
Obrázek 14: Opatření 2 - noční větrání



Obrázek 15: Opatření 3 - 100 % stínění, noční větrání



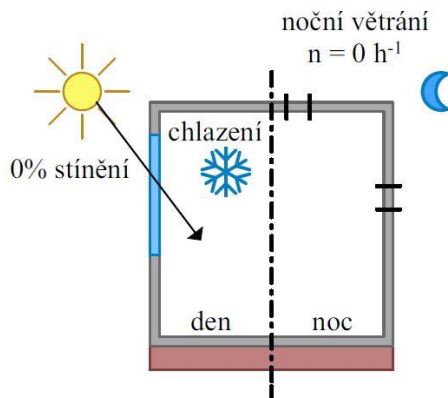
Obrázek 16: Opatření 4 - 80 % stínění



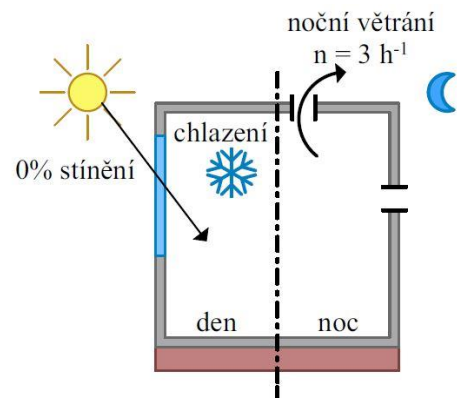
Obrázek 17: Opatření 5 - 80 % stínění, noční větrání

Množství a doba trvání vnitřních zisků (teplo od osob a spotřebičů) je závislá na uživateli a do značné míry je nejistá. Proto je v letních modelových situacích uvažováno s nulovými vnitřními zisky. Dá se ovšem předpokládat, že vnitřní zisky by přehřátí budov urychlily.

V situacích kdy dojde k přehřátí budovy je nutné tepelnou zátěž odvést. Z toho důvodu je další řešením chlazení interiéru. Maximální výkon chlazení je 9 kW. Pro snazší zadávání je u všech modelových objektů stejný. Maximální výkon chlazení je nastaven s dostatečnou rezervou a neměl by u žádného modelového domu nastat. Chlazení udržuje maximální teplotu interiéru na 27 °C.



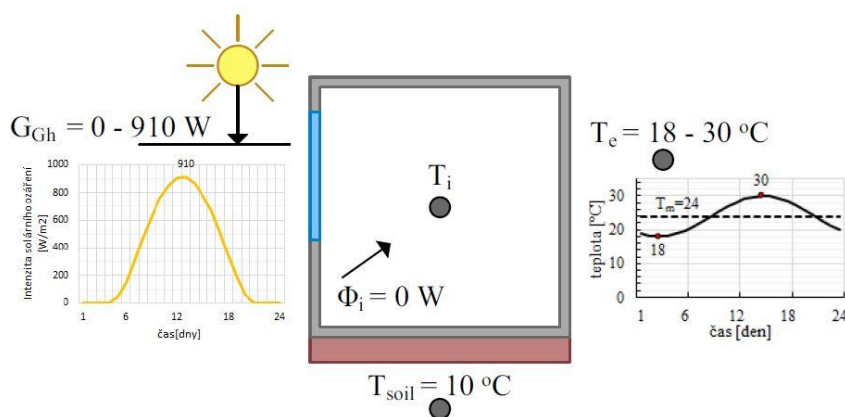
Obrázek 18: Opatření 6 - chlazení



Obrázek 19: Opatření 7 - chlazení, noční větrání

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotka
Venkovní teplota	T_e	cyklus 18 – 30	°C
Průměrná venkovní teplota	$T_{e,m}$	24	°C
Teplota v zemině	T_{soil}	14	°C
Časový krok výpočtu	t	3600	s
Vnitřní zisky	Φ_i	0	W
Intenzita globálního solárního ozáření	G_{gh}	cyklus 0 - 910	W
Intenzita nočního větrání	n_{noc}	3	h^{-1}
Kritická teplota při přehřívání	T_{crit}	27	°C
Požadovaná teplota pro chlazení	$T_{i,c}$	27	°C
Maximální výkon chlazení	Q_c	9000	W

Tabulka 18: Přehled okrajových podmínek pro letní modelové situace



Obrázek 20 - Schéma letních okrajových podmínek

Výměna vzduchu netěsnostmi obálky stavby je oproti zimnímu modelovému stavu snížena z důvodu předpokládaného nižšího rozdílu tlaků na polovinu. Předpokládaná intenzita výměny vzduchu n [h^{-1}] je dána vztahem:

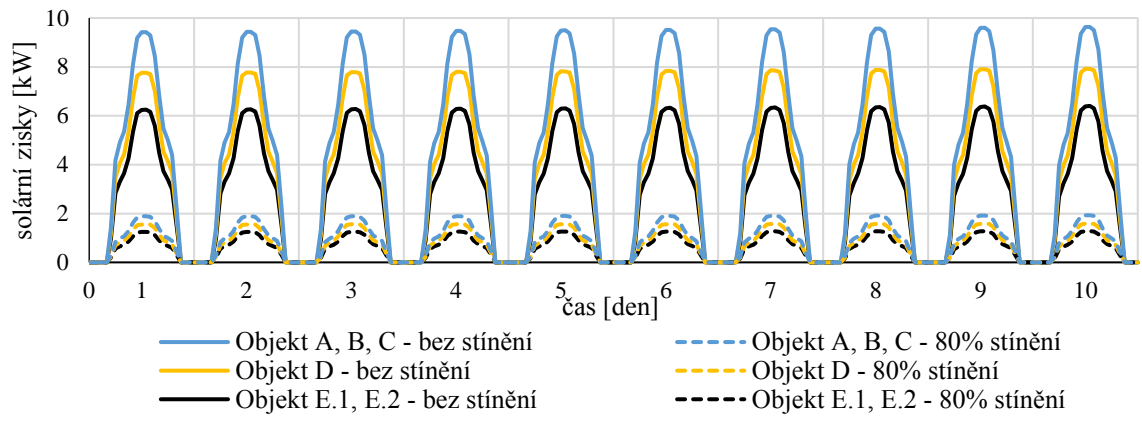
$$n = \frac{1}{40} \cdot n_{50} \quad [h^{-1}] \quad (3.14)$$

násobnost výměny vzduchu v budově při tlakovém rozdílu 50 Pa n_{50} je stejná jako v zimních modelových situacích – hodnoty obsahuje *Tabulka 17*.

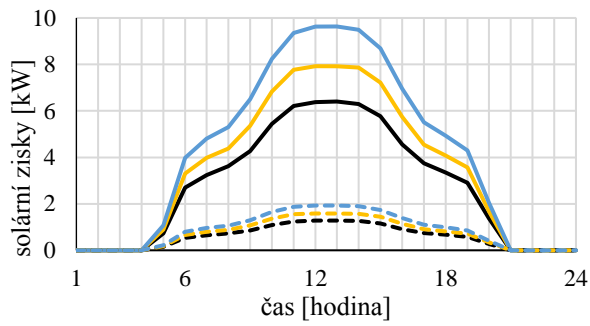
Různé typy okenních výplní ovlivňují propustnost solárního záření do interiéru. Propustnost popisuje celkový činitel propustnosti solárního záření v kolmém směru g :

Časové období	g [-]
A) Počátek 20. století (do roku 1920)	0,72
B) Polovina 20. století (1920-1960)	0,72
C) Konec 20. století (1960-1994)	0,72
D) Nízkoenergetické domy	0,60
E.1) Pasivní domy – těžké	0,50
E.2) Pasivní domy – lehké	0,50

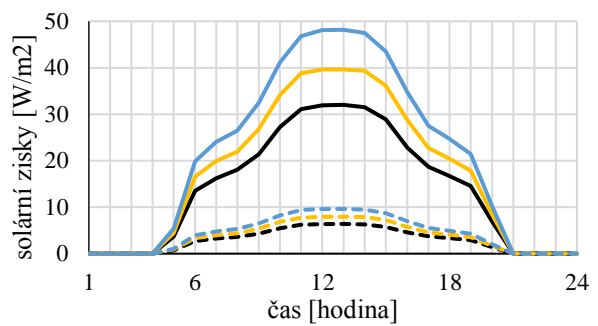
 Tabulka 19: Celkový činitel propustnosti solárního záření v kolmém směru g



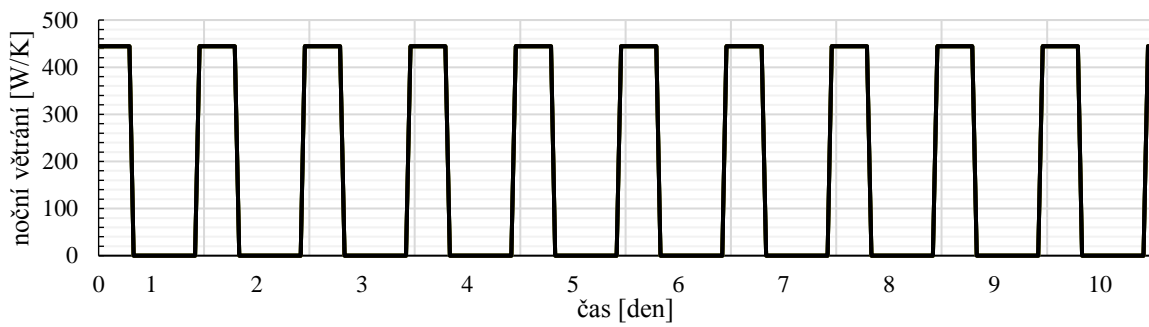
Graf 12: Solární zisky – sledované období



Graf 13: Solární zisky – den



Graf 14: Solární zisky vztahené k podlahové ploše – den



Graf 15: Noční větrání

3.4. Počáteční podmínky

3.4.1. Zimní modelové situace

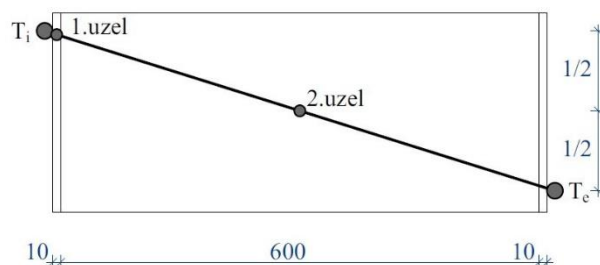
Počáteční teplota vnitřního vzduchu, před přerušením dodávky tepelné energie do systému, odpovídá vnitřní návrhové teplotě pro obytné místnosti dle normy ČSN 73 0540-2 [7].

Sofistikovanější simulační model má dále zadanou počáteční teplotu v jednotlivých uzlech konstrukcí. Teplota ve všech uzlech vnitřních konstrukcí je rovna teplotě vnitřního vzduchu. V prvním uzlu obvodových konstrukcí, který je umístěn v tenké vrstvě nejbližší interiéru (např. omítka), je počáteční teplota rovna teplotě vnitřního vzduchu T_i . Ve druhém uzlu obvodových konstrukcí odpovídá počáteční teplota přibližnému rozložení teplot v ustáleném stavu.

Počáteční teplota ve druhém uzlu $T_{\text{ext},2.\text{uzel}}$ pro budovy z období A , B a C je dána vztahem:

$$T_{\text{ext},2.\text{uzel}} = (T_i + T_e) / 2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.15)$$

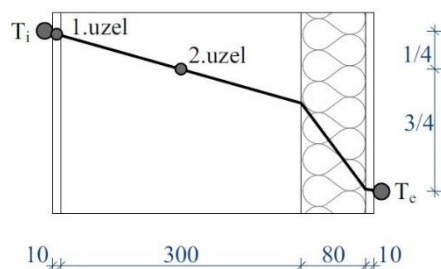
kde T_i je počáteční teplota vnitřního vzduchu a T_e je venkovní teplota.



Obrázek 21: Princip výpočtu počáteční teploty ve 2. uzlu objektů A , B , C

Počáteční teplota ve druhém uzlu $T_{\text{ext},2.\text{uzel}}$ pro budovu typu D je dána vztahem:

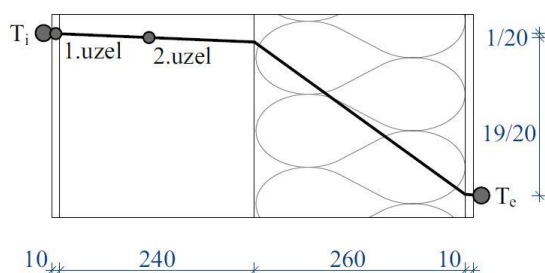
$$T_{\text{ext},2.\text{uzel}} = (3 \cdot T_i + 1 \cdot T_e) / 4 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.16)$$



Obrázek 22: Princip výpočtu počáteční teploty ve 2. uzlu objektu D

Počáteční teplota ve druhém uzlu $T_{\text{ext},2.\text{uzel}}$ pro pasivní budovy ($E.1$ a $E.2$) je dána vztahem:

$$T_{\text{ext},2.\text{uzel}} = (19 \cdot T_i + 1 \cdot T_e) / 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.17)$$



Obrázek 23: Princip výpočtu počáteční teploty ve 2. uzlu objektů $E.1$ a $E.2$

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotka
Počáteční vnitřní teplota	$T_{i,0}$	20	°C
Počáteční teplota ve vnitřních konstrukcích	T_{int}	20	°C
Počáteční teplota v 1.uzlu obvodových konstrukcí	$T_{ext,1.uzel}$	20	°C
Počáteční teplota ve 2.uzlu obvodových konstrukcí (A, B, C)	$T_{ext,2.uzel}$	10	°C
Počáteční teplota ve 2.uzlu obvodových konstrukcí (D)	$T_{ext,2.uzel}$	15	°C
Počáteční teplota ve 2.uzlu obvodových konstrukcí (E.1, E.2)	$T_{ext,2.uzel}$	19	°C

Tabulka 20: Přehled počátečních podmínek pro zimní modelové situace

3.4.2. Letní modelové situace

Počáteční teplota vnitřního vzduchu na začátku desetidenního cyklu vysokých teplot je shodná s návrhovou teplotou pro obytné místnosti dle normy ČSN 73 0540-2 [7].

Počáteční teploty ve druhých uzlech v letním modelovém stavu vycházejí ze vztahů (3.15), (3.16) a (3.17). Ve vztazích je pouze nahrazena venkovní teplota T_e průměrnou venkovní teplotou $T_{e,m}$.

Počáteční teplota ve druhém uzlu $T_{ext,2.uzel}$ pro budovy typu A, B, C je dána vztahem:

$$T_{ext,2.uzel} = (T_i + T_{e,m}) / 2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.18)$$

Počáteční teplota ve druhém uzlu $T_{ext,2.uzel}$ pro budovu typu D je dána vztahem:

$$T_{ext,2.uzel} = (3 \cdot T_i + 1 \cdot T_{e,m}) / 4 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.19)$$

Počáteční teplota ve druhém uzlu $T_{ext,2.uzel}$ pro pasivní budovy (E.1 a E.2) je dána vztahem:

$$T_{ext,2.uzel} = (19 \cdot T_i + 1 \cdot T_{e,m}) / 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.20)$$

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotka
Počáteční vnitřní teplota	$T_{i,0}$	20	°C
Počáteční teplota ve vnitřních konstrukcích	T_{int}	20	°C
Počáteční teplota v 1.uzlu obvodových konstrukcí	$T_{ext,1.uzel}$	20	°C
Počáteční teplota ve 2.uzlu obvodových konstrukcí (A, B, C)	$T_{ext,2.uzel}$	22	°C
Počáteční teplota ve 2.uzlu obvodových konstrukcí (D)	$T_{ext,2.uzel}$	21	°C
Počáteční teplota ve 2.uzlu obvodových konstrukcí (E.1, E.2)	$T_{ext,2.uzel}$	20,2	°C

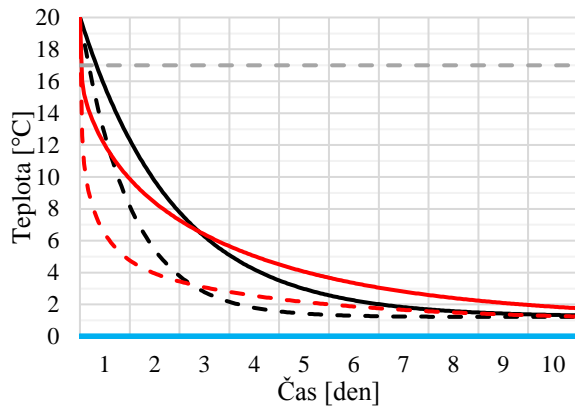
Tabulka 21: Přehled počátečních podmínek pro letní modelové situace

4. Výsledky

4.1. Zimní modelové situace

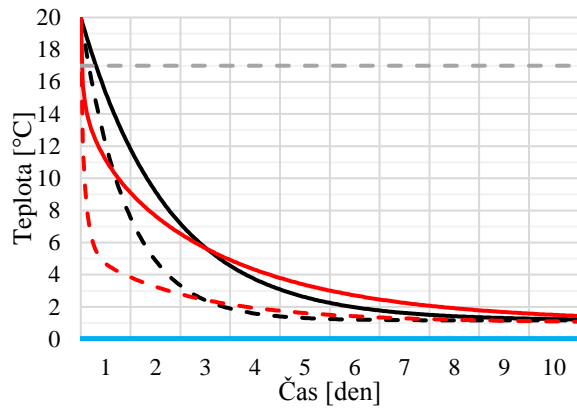
4.1.1. Chladnutí objektů

A) Počátek 20. století (do roku 1920)



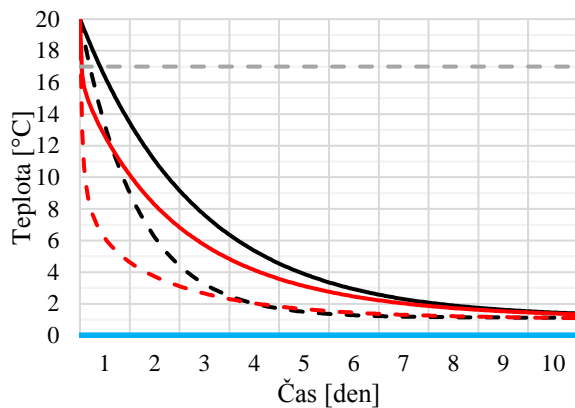
Graf 16: Chladnutí objektu A

B) Polovina 20. století (1920-1960)



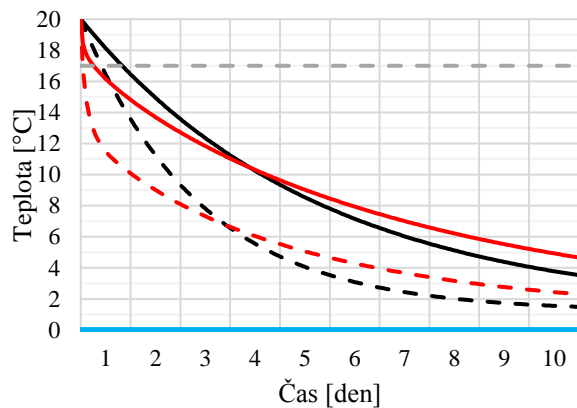
Graf 17: Chladnutí objektu B

C) Konec 20. století (1960-1990)



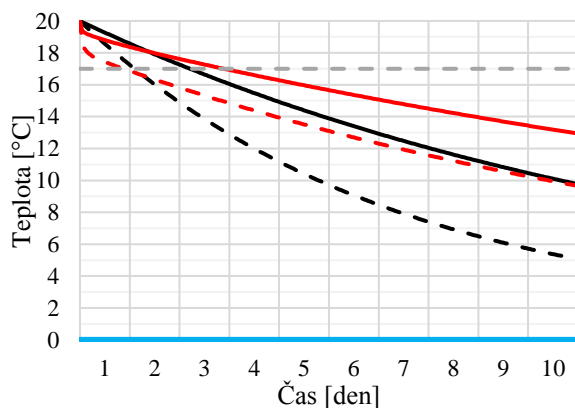
Graf 18: Chladnutí objektu C

D) Nízkoenergetické domy



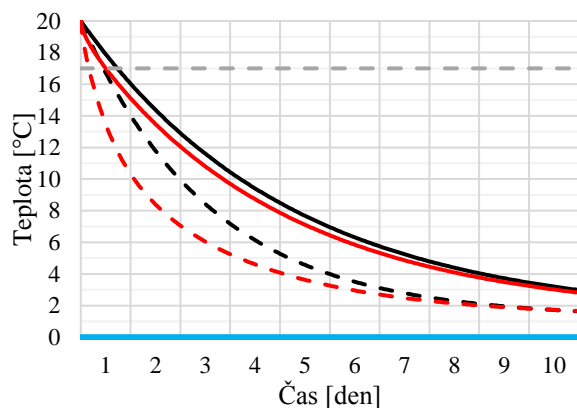
Graf 19: Chladnutí objektu D

E.1) Pasivní domy – těžké



Graf 20: Chladnutí objektu E.1

E.2) Pasivní domy – lehké



Graf 21: Chladnutí objektu E.2

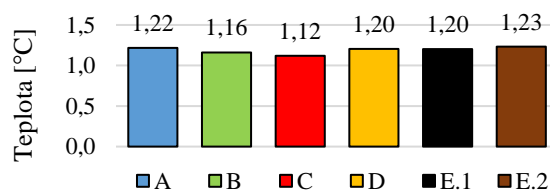


Objekty A, B, C, D a E.2 ve všech modelových situacích vychladnou pod kritických 17 °C během prvního dne po vypnutí tepelného zdroje. Teplota těžkého pasivního domu klesne pod kritickou teplotu během třetího dne. Teplota vnitřního vzduchu objektu E.1 klesne pod kritickou teplotu během prvního dne pouze v teoretickém modelu bez vnitřních konstrukcí. Staré budovy (A, B a C) na konci sledovaného období vychladly na teplotu nižší než 2 °C. Nízkoenergetický dům (D) vychladne za 10 dní na teplotu 4 °C. V těžkém pasivní domě (E.1) klesne teplota za 10 dní na 10 °C ve zjednodušeném modelu a na 13 °C v simulačním modelu. Teplota vzduchu lehkého pasivního domu (E.2) se na konci desátého dne po vypnutí zdroje tepla zastaví na 3 °C.

Při matematické analýze chladnutí budov simulačním modelem dochází ihned po vypnutí tepelného zdroje ke skokovému poklesu. Zatímco u pasivních objektů (E.1 a E.2) je pokles pouze o 0,5 °C, tak u budovy D o 1,5 °C a u objektů A, B a C dokonce o 4 °C. Při výpočtu zjednodušeným modelem ke skokovému poklesu nedochází.

Modelové objekty bez vnitřních konstrukcí chladnou rychleji. Budovy z prvních třech sledovaných období výrazně chladnou zejména v prvních třech dnech a od pátého dne se teploty ustalují. U objektů D a E.2 je největší pokles během prvního dne.

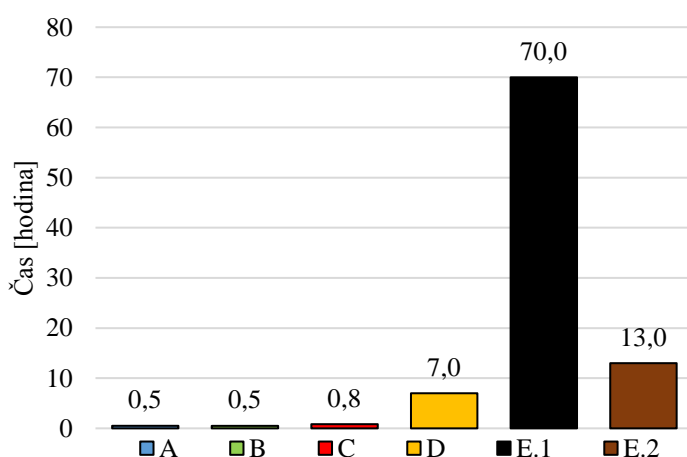
Teplota v ustáleném stavu



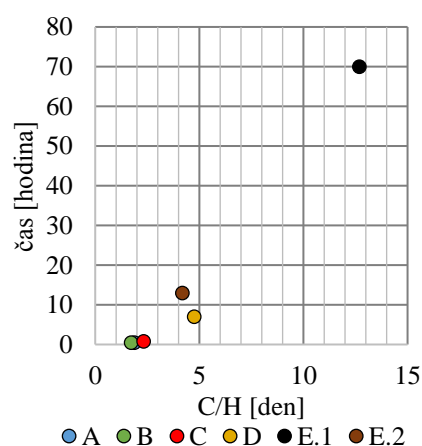
Graf 22: Teplota v ustáleném stavu

Teplota ve všech objektech se ustaluje okolo 1,2 °C.

4.1.2. Doba vychladnutí objektů pod kritickou teplotu 17 °C



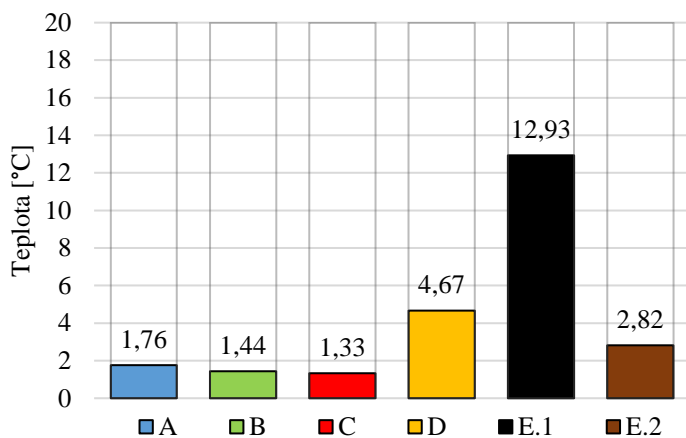
Graf 23: Doba vychladnutí objektů pod kritickou teplotu



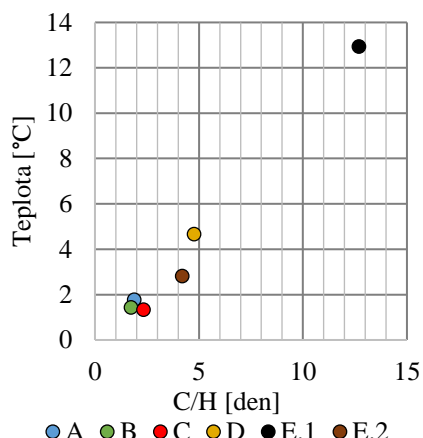
Graf 24: Závislost chladnutí pod kritickou teplotu a časové konstanty

Objekty A, B a C vychladnou pod kritických 17 °C během první hodiny po vypnutí zdroje. Nízkoenergetický dům (D) vychladne pod kritickou teplotu za 7 hodin. Teplota lehkého pasivního domu (E.2) klesne pod 17 °C za 13 hodin. Těžký pasivní dům (E.1) udrží požadovaných 17 °C po dobu 70 hodin, tedy 5x déle než lehký pasivní dům. Objekt E.2 chladne pod kritickou hodnotu déle, i když má o něco nižší časovou konstantu než objekt D.

4.1.3. Teplota po 10 dnech chladnutí



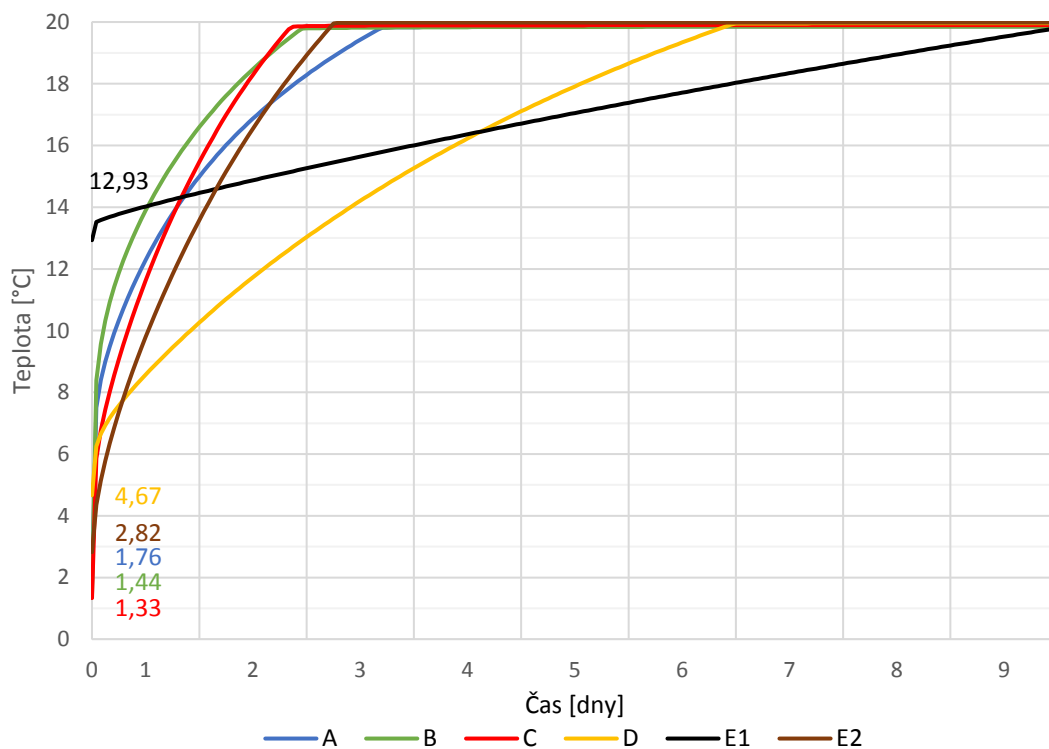
Graf 25: Teplota po 10 dnech chladnutí



Graf 26: Závislost teploty po 10 dnech chladnutí a časové konstanty

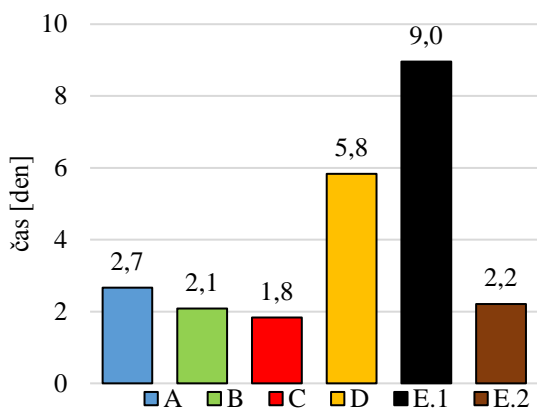
V objektech A, B a C klesne za deset dní teplota pod 2°C. Objekt D vychladne pod teplotu 5 °C. Lehký pasivní dům (E.2) bude mít teplotu vnitřního vzduchu pod 3 °C. Těžký pasivní dům si na konci desátého dne chladnutí udrží teplotu 12,9 °C. Závislost časové konstanty a poklesu teplot na konci desetidenního úseku je skoro lineární.

4.1.4. Vytápění objektů z teploty po 10 dnech chladnutí

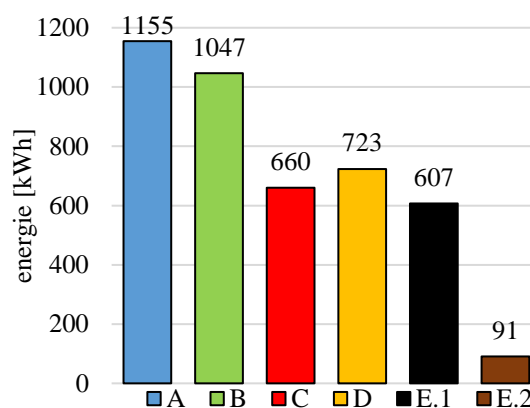


Graf 27: Vytápění objektů z teploty po 10 dnech chladnutí

Objekty A, B, C a E.2 mají rychlý nárůst teplot a jsou vytopeny do třech dnů. Nízkoenergetický dům (D) potřebuje na vytopení 6 dní. Těžký pasivní dům (E.1) má pozvolný náběh teplot a je vytopen za 9 dní, i když je vytápěn z teploty 13 °C.



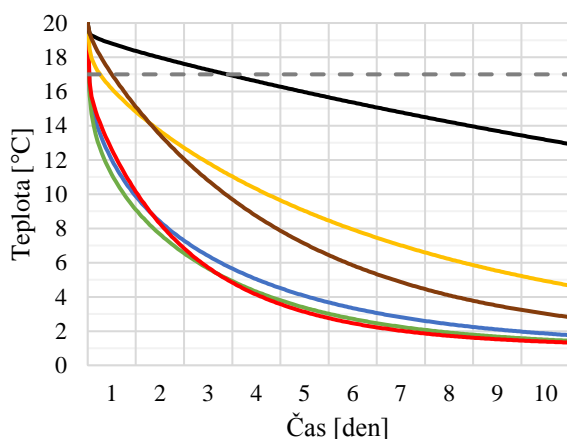
Graf 28: Doba vytopení objektů z teploty po 10 dnech chlazení



Graf 29: Celková energie potřebná k vytopení

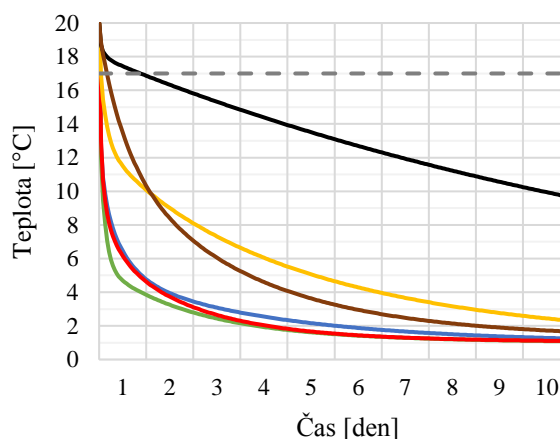
Objekty A a B potřebují k vytopení krátký čas a velké množství energie. Lehký pasivní dům (E.2) je vytopen v krátkém čase malým množstvím energie. K vytopení těžkého pasivního domu (E.1) je potřeba časový úsek delší než jeden týden.

4.1.5. Vliv vnitřních konstrukcí na chlazení objektů



Graf 30: Chlazení objektů s vnitřními konstrukcemi

— A) Počátek 20. století (do roku 1920)
 — C) Konec 20. století (1960-1994)
 — E.1) Pasivní domy - těžké
 - - - kritická teplota

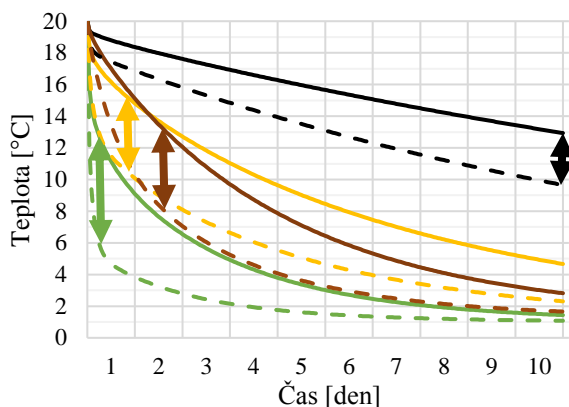


Graf 31: Chlazení objektů bez vnitřních konstrukcí

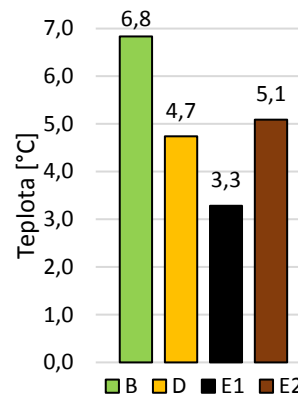
— B) Polovina 20. století (1920-1960)
 — D) Nízkoenergetické domy
 — E.2) Pasivní domy - lehké

Nejrychleji chladnou objekty A, B a C. Nejvíce tepla udrží po dobu deseti dní těžký pasivní dům (E.1). Chlazení modelových objektů bez vnitřních konstrukcí je na počátku sledovaného období výrazně rychlejší. Teplota v objektech A, B a C bez vnitřních konstrukcí klesne za 12 hodin pod 7 °C. Budovy D a E.2 bez vnitřních konstrukcí vychladnou za 24 hodin na 10 °C.

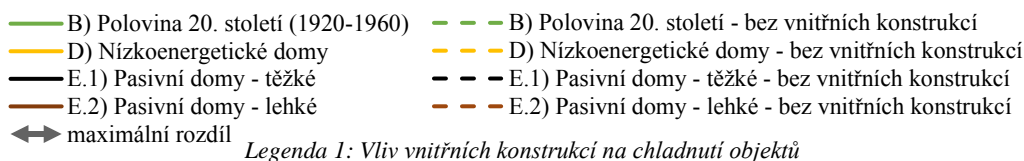
Chování budov z prvních třech modelových období (A, B, C) je téměř totožné. Pro vyhodnocení vlivu vnitřních konstrukcí budou pro přehlednost zmíněné tři období zastoupena prostředním obdobím B.



Graf 32: Vliv vnitřních konstrukcí na chladnutí



Graf 33: Maximální pokles teplot



U objektu z poloviny 20. století (B) bez vnitřních konstrukcí je teplota nižší o 6,8 °C již v prvních hodinách po výpadku topení. Nízkoenergetický dům (D) bez vnitřních konstrukcí má největší pokles na konci prvního dne o 4,7 °C. Lehký pasivní dům (E.2) bez vnitřních konstrukcí poklesne v průběhu druhého dne o 5,1 °C. Vnitřní konstrukce u těchto objektů mají největší vliv na začátku chladnutí. U těžkého pasivního domu rozdíl teplot z působený vlivem vnitřních konstrukcí postupně narůstá a maxima (3,3 °C) dosáhne na konci sledovaného období.

4.2. Vyhodnocení výsledků zimních modelových situací

4.2.1. Chladnutí objektů

Průběh teplot vypočtený dvěma různými výpočetními modely je téměř shodný. Rozdíl je na počátku sledovaného období. Zjednodušený model počítá s okamžitou dostupností naakumulovaného tepla a předpokládá, že počáteční teplota konstrukcí je stejná jako počáteční teplota vnitřního vzduchu. To je ovšem nereálné. Teplota konstrukcí nikdy nebude rovna teplotě vzduchu, ale bude nižší v závislosti na tepelně izolační kvalitě obvodových konstrukcí. Po vypnutí tepelného zdroje dojde nejprve k rychlému ochlazení vzduchu a až poté začne uvolňování naakumulovaného tepla. Zjednodušený model selhává u těžkých pasivních domů, které mají velkou tepelnou setrvačnost, jejich chladnutí je pomalé a odchylka od simulačního modelu je velká.

Na počátku chladnutí dochází ke skokovému poklesu teploty vnitřního vzduchu. Vlivem netěsností obvodového pláště a tlakovému rozdílu mezi interiérem a exteriérem dojde k rychlému ochlazení vzduchu. U objektů s vysokou průvzdušností je počáteční pokles teploty výraznější. Dále skokový pokles na počátku ovlivňuje počáteční teplota v obvodových konstrukcích. Pasivní budovy mají vnější konstrukce naakumulované na teplotu blízkou vnitřnímu vzduchu a uvolňování energie do vnitřního prostoru se aktivuje dříve než u budov s nekvalitní tepelnou izolací. Nejlepší obranou proti rychlému vychladnutí obytných budov je tedy kvalitní tepelně izolační obálka s vysokou neprůvzdušností.

Velmi podobný průběh chladnutí budov A, B a C je dán podobnými tepelně technickými

vlastnostmi. Přestože mají vysokou tepelnou kapacitu, tak chladnou rychle. Hlavními důvody rychlého poklesu teplot jsou vysoká průvzdušnost a nízký tepelný odpor konstrukcí. Z vypočítaných výsledků je možno říci, že obytné budovy od počátku 20. století do devadesátých let nedoznaly žádnému výraznému zlepšení tepelně izolačních vlastností. Modelový dům C reprezentující období od roku 1960 do roku 1994 ovšem zahrnuje velké časové období a příliš nezachycuje změnu tepelně technických požadavků v roce 1977. Podrobnější studie by mohla v další analýze zhodnotit význam jednotlivých úprav tepelně technické normy na chladnutí budov.

Rychlost chladnutí lehkého pasivního domu s malými tepelnými ztrátami se blíží rychlosti chladnutí starých domů s velkými tepelnými ztrátami. Těžký i lehký pasivní dům mají velmi kvalitní tepelně izolační obálku, a přesto lehký chladne 5x rychleji. Tyto případy ukazují význam akumulací hmoty v obytných domech. I při velmi kvalitní tepelně izolační obálce dochází k rychlému poklesu teplot. Lehké domy si nevytvářejí zásobu tepelné energie a nemohou tak mírnit následky havárie jakou je přerušování dodávky tepla.

4.2.2. Doba chladnutí pod kritickou teplotu 17 °C

V objektech z prvních třech sledovaných období je vysoký tepelný tok směrem do exteriéru hlavním důvodem poklesu teploty pod kritických 17 °C už během první hodiny. Důvodem poklesu teploty lehkého pasivního domu, pod kritickou hranici už za 13 hodin, je malé množství akumulací hmoty. Na těchto dvou extrémních případech je možné demonstrovat význam časové konstanty. Vysoká hodnota časové konstanty se jeví jako nejdůležitější parametr pro zpomalení chladnutí obytných budov.

Nabízí se otázka, proč nízkoenergetický dům vychladne pod kritickou teplotu 17 °C rychleji než lehký pasivní dům, i když má vyšší časovou konstantu? Lehký pasivní dům má více tepelné izolace, má vyšší počáteční teploty v obvodových konstrukcích a je více vzduchotěsný. To jsou hlavní vlivy, které v první fázi po vypnutí tepelného zdroje snižují rychlost chladnutí.

4.2.3. Teplota po 10 dnech chladnutí

Na konci pozorovaného desetidenního úseku dosahuje teplota budov A, B a C ustáleného stavu. O těchto budovách můžeme říci, že jsou zcela vychladlé. A zatímco objekty z prvních třech sledovaných období jsou zcela vychladlé, teplota v těžkém pasivním domě klesla pouze o 7 °C. Pomalé chladnutí těžkého pasivního domu je dáno velmi kvalitní tepelně izolační obálkou a velkým množstvím tepla, které je uloženo v akumulací hmotě.

V dlouhodobějším časovém úseku vychladne lehký pasivní dům více než nízkoenergetický i přes to, že v první fázi po vypnutí tepelného zdroje chladne pomaleji. Nízkoenergetický dům má vyšší časovou konstantu než lehký pasivní. V delším časovém intervalu narůstá význam časové konstanty. U málo izolovaných budov dochází k rychlému uvolňování tepla uloženého v konstrukcích. U kvalitně izolovaných budov se naakumulované teplo uvolňuje pomaleji. Objekty s nízkou tepelnou kapacitou mají naakumulováno málo energie, a tak i přes malé tepelné ztráty vyčerpají rychle všechno uložené teplo. Potvrzuje se tím závislost chladnutí na časové konstantě. Čím má budova vyšší časovou konstantu, tím chladne pomaleji.

Pokud chceme, aby budovy chladly pomalu, tak musíme navrhovat objekty s velmi kvalitní tepelně izolační obálkou a velkým množstvím tepelně akumulací hmoty.

4.2.4. Vytápění objektů z teploty po 10 dnech chladnutí

Výkony tepelných zdrojů v pasivních domech jsou z principu velmi nízké. Běžný návrh kotle přihlíží pouze k nejvyššímu tepelnému toku při extrémní venkovní teplotě. Výkon tepelného zdroje lehkého pasivního domu je menší než výkon nízkoenergetického domu, i když má nižší časovou konstantu. Je to dáno faktem, že návrh tepelného zdroje neuvažuje s tepelnou kapacitou, ale pouze s tepelnými ztrátami.

Paradoxem je, že nejhůře izolované domy jsou nejrychleji vytopené zpět na 20 °C. Je to způsobeno vysokými výkony tepelných zdrojů v těchto domech. Mezi nejrychleji vytopené domy se ale řadí i lehký pasivní dům s malým výkonem tepelného zdroje. Neizolovaný dům díky vysokému výkonu dokáže rychle vytopit vnitřní prostor i s velkou akumulací hmotou. Dochází při tom ale k velkým tepelným ztrátám a spotřebuje velké množství energie. Lehký pasivní dům je rychle vytopen, protože nedochází skoro k žádným tepelným ztrátám a vytápí pouze malé množství akumulací hmoty. Velkou výhodou lehkého pasivního domu je rychlé vytopení s malou spotřebou energie.

Vytopení těžkého pasivního domu trvá nejdéle, i když je teplota na začátku vytápění nejvyšší. Pasivní dům musí nejprve ohřát stejnou akumulací hmotu jako neizolovaný dům, ale na rozdíl od něho má 7x menší výkon tepelného zdroje. Zde je velká nevýhoda těžkých pasivních domů a nedokonalost návrhu výkonu tepelných zdrojů bez započtení tepelné kapacity. Běžně se totiž nepředpokládá extrémní situace, jako je totální blackout. Řešením pro urychlení zpětného vytopení těžkého pasivního domu může být použití dalších tepelných zdrojů – například přenosných elektrických přímotopů. Vytopení těžkého pasivního domu, po deseti dnech chladnutí, trvá 4x déle než vytopení starého neizolovaného domu. Při vytápění se ale spotřebuje polovina energie.

4.2.5. Vliv vnitřních konstrukcí

Vnitřní konstrukce mají významný vliv na chladnutí objektu. Ukrývá se v nich velká část celkového množství tepelné kapacity. U modelových domů s vysokou kapacitou tvoří vnitřní konstrukce 50 % z celkové tepelné kapacity. Pouze u lehkého pasivního modelového domu zabírají příčky a strop $\frac{2}{5}$ z celkové kapacity. Vnitřní konstrukce jsou v běžném provozu ohřáté na teplotu blízkou vnitřnímu vzduchu. Po ukončení vytápění začnou tedy velmi rychle uvolňovat naakumulované teplo. Vnitřní konstrukce se jako první podílejí na zpomalení chladnutí.

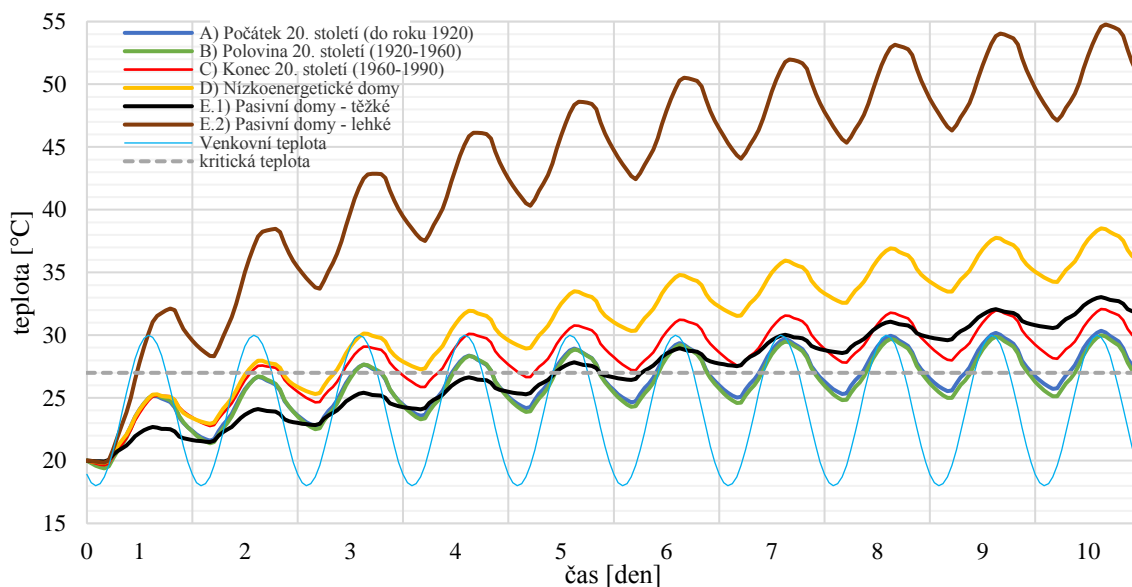
Graf 32 zobrazuje maximální rozdíl v chladnutí, pokud by v budovách nebyly žádné vnitřní konstrukce. U objektů s nízkou časovou konstantou dochází k největšímu rozdílu hned na začátku chladnutí. U těžkého pasivního domu je největší rozdíl až na konci sledovaného období. To dokazuje stěžejní vliv vnitřních konstrukcí u domů neizolovaných a lehkých.

Při návrhu obytných budov by mělo být přihlíženo k vlivu vnitřních konstrukcí. Cílem mají být vnitřní konstrukce s vysokou tepelnou kapacitou, které budou zpomalovat pokles teplot. Zvláštní důležitost má použití vnitřních konstrukcí u lehkých objektů – například masivní betonové podlahy.

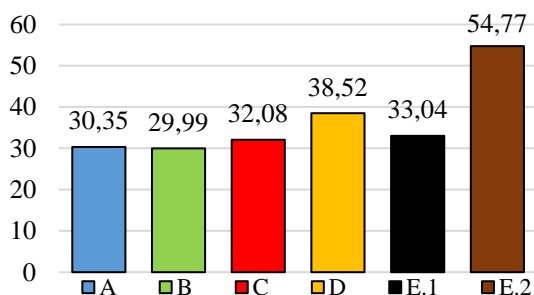
4.3. Letní modelové situace

4.3.1. Přehřívání objektů

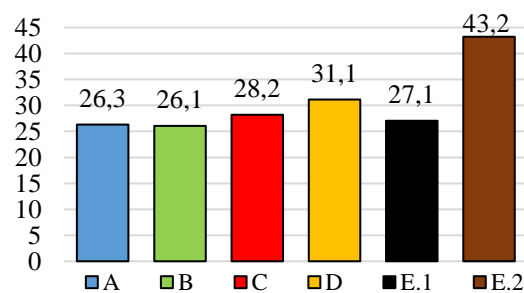
Výchozí stav – bez opatření bránících přehřívání



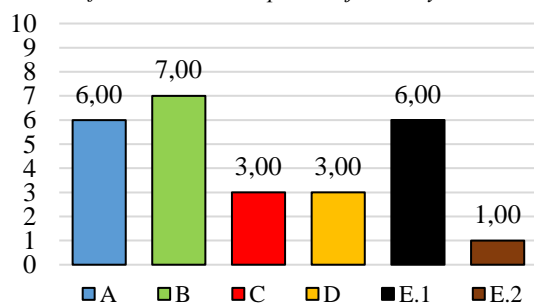
Graf 34: Průběh teplot v letní modelové situaci – výchozí stav



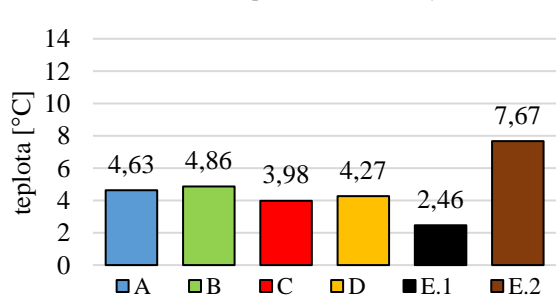
Graf 35: Maximální teplota objektů – výchozí stav



Graf 36: Průměrná teplota za 10 dní – výchozí stav



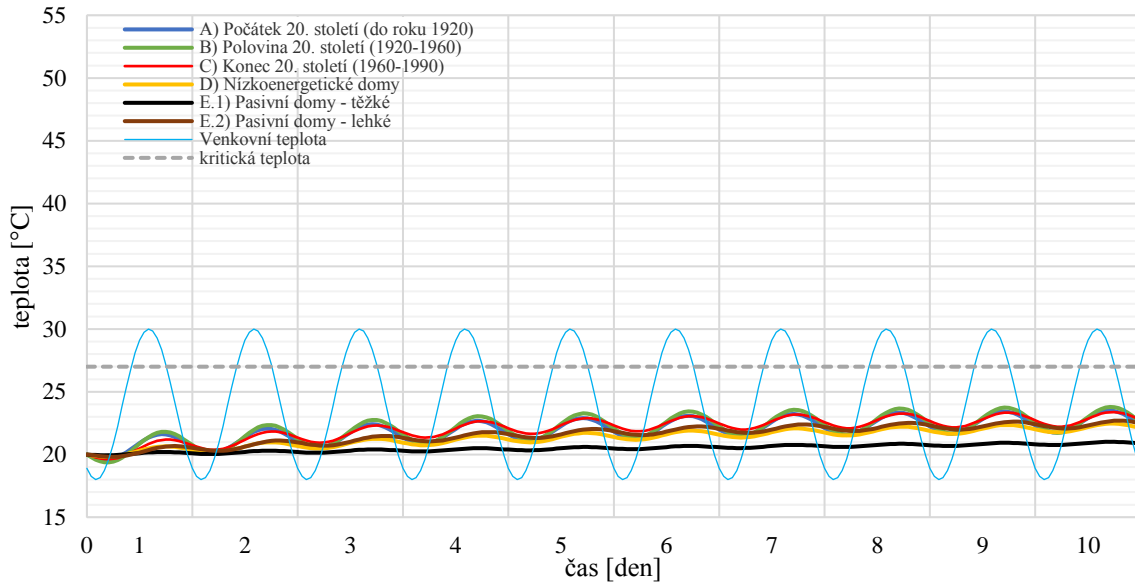
Graf 37: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – výchozí stav



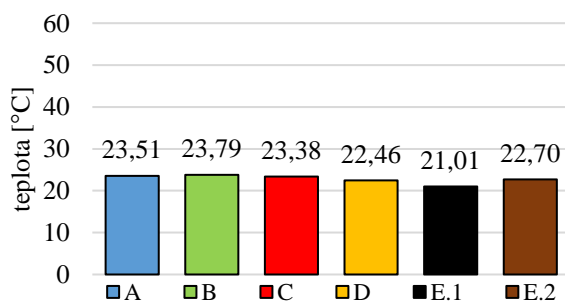
Graf 38: Rozkmit teplot v 10 dní – výchozí stav

Ve výchozí letní modelové situaci dojde k přehřátí všech modelových objektů. Nejrychleji průměrná denní teplota překročí kritických 27 °C v lehkém pasivním domě (E.2). V objektu B se nejdéle udrží průměrná denní teplota kritickými 27 °C. Největší amplituda je v objektu E.2. Nejnižší rozkmit teplot je v těžkém pasivní domě. Teplota v lehkém pasivním domě přesáhne 50 °C

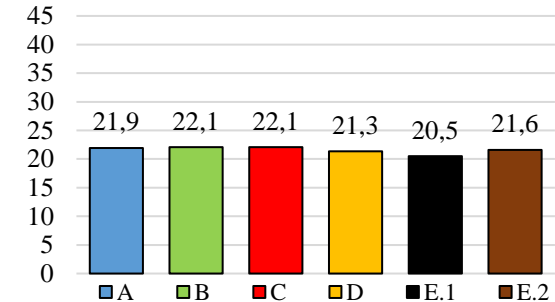
Opatření 1 - 100 % stínění



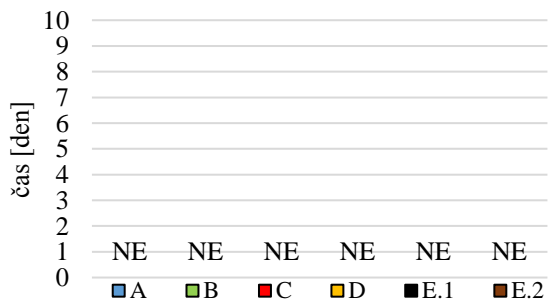
Graf 39: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 1



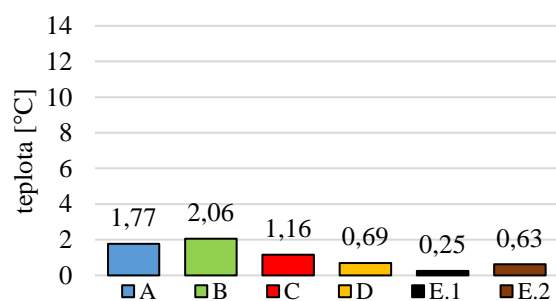
Graf 40: Maximální teplota objektů – opatření 1



Graf 41: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 1



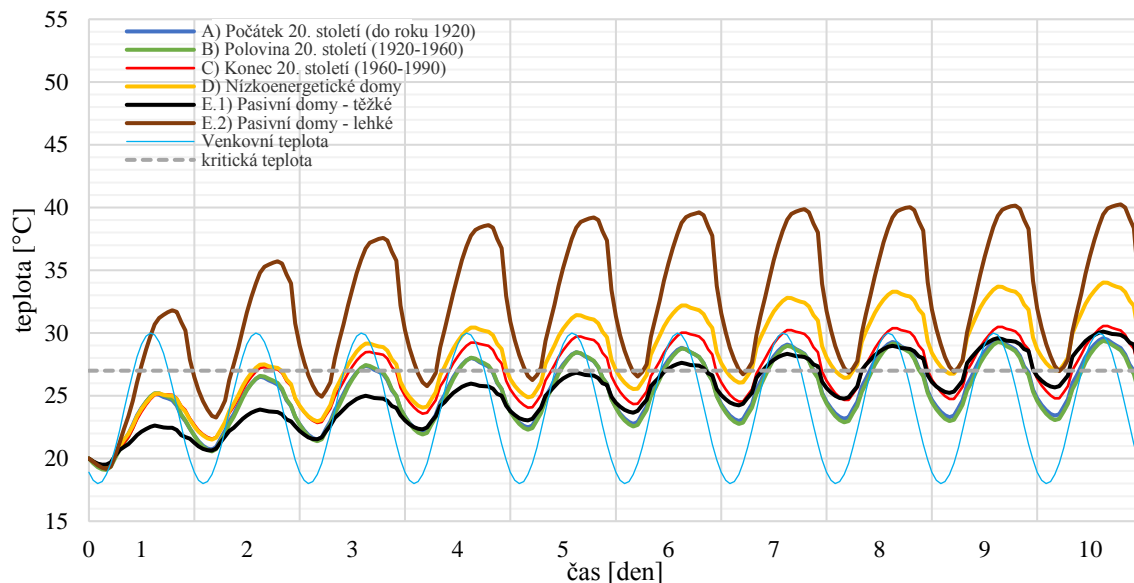
Graf 42: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – opatření 1



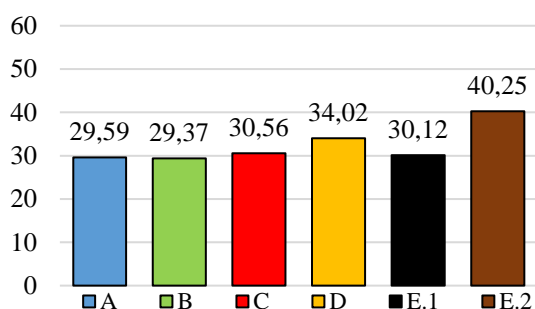
Graf 43: Rozkmit teplot v 10 dní – opatření 1

Při úplném stínění v žádném modelovém objektu nepřekročí teplota 24 °C. V žádném z objektů nedojde k přehřívání. Největší amplituda je u objektu B. Nejmenší rozkmit teplot má těžký pasivní dům. Průměrná teplota se od počátečních 20 °C zvýší maximálně o 2,1 °C. V těžkém pasivním domě se průměrná teplota zvýší o 0,5 °C.

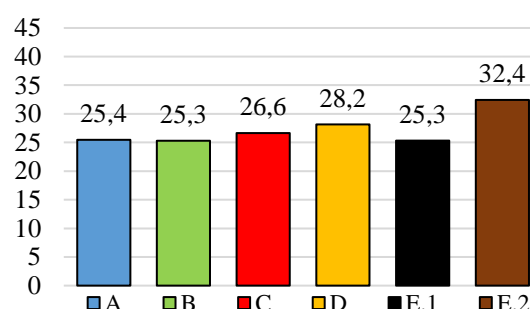
Opatření 2 - noční větrání



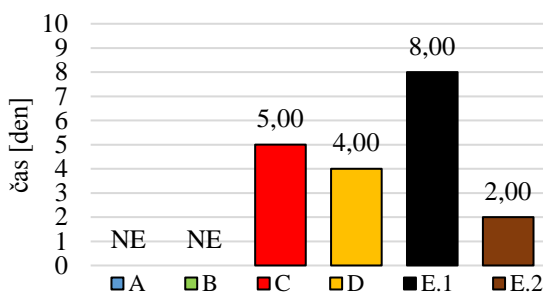
Graf 44: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 2



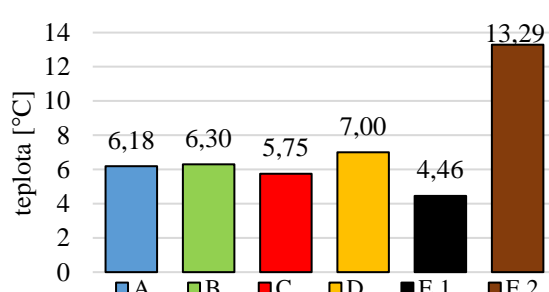
Graf 45: Maximální teplota objektů – opatření 2



Graf 46: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 2



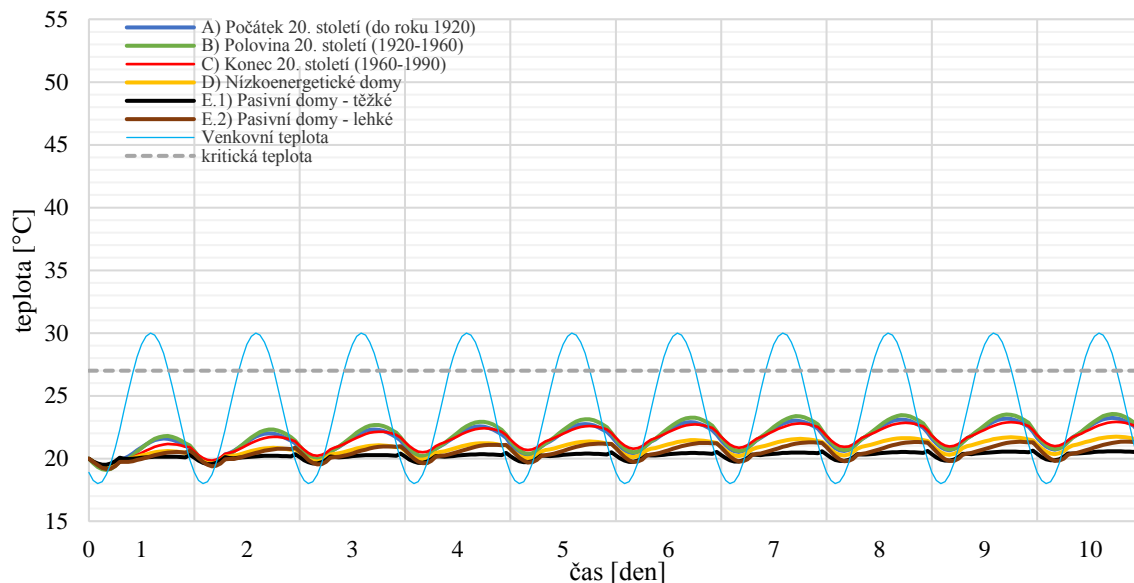
Graf 47: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – opatření 2



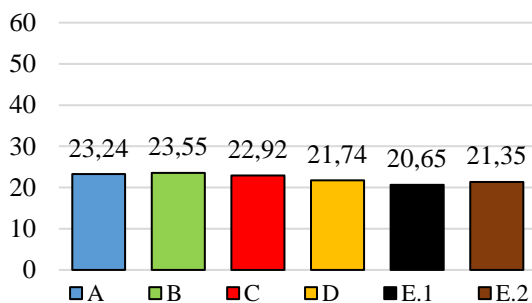
Graf 48: Rozkmit teplot v 10 dní – opatření 2

V letní modelové situaci s nočním větráním dojde k přehřátí všech modelových objektů. Pouze v objektech A a B však průměrná denní teplota nepřekročí kritických 27 °C. Nejrychleji průměrná denní teplota překročí kritických 27 °C v lehkém pasivním domě (E.2). V těžkém pasivním domě (E.1) dojde k přehřátí v průběhu osmého dne. Největší amplituda teploty v denním cyklu je v objektu E.2. Nejnižší rozkmit má teplota v těžkém pasivním domě. Teplota v lehkém pasivním domě přesáhne 40 °C

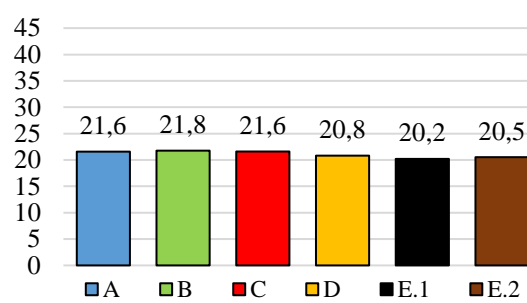
Opatření 3 - 100 % stínění, noční větrání



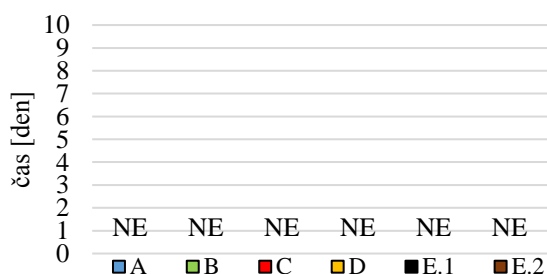
Graf 49: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 3



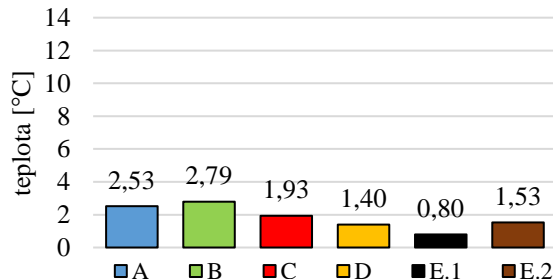
Graf 50: Maximální teplota objektů – opatření 3



Graf 51: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 3



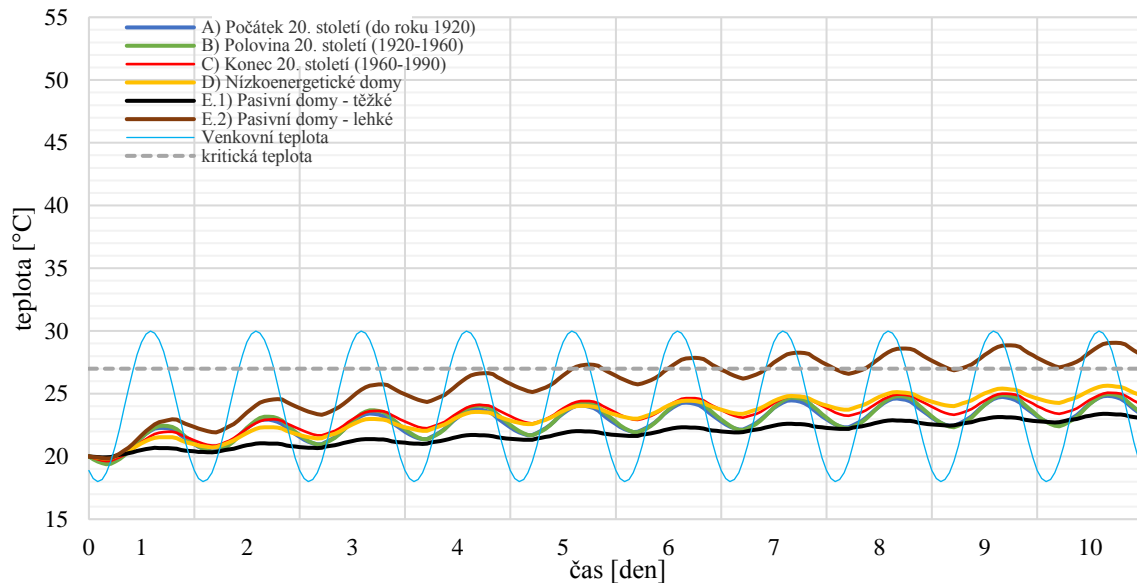
Graf 52: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – opatření 3



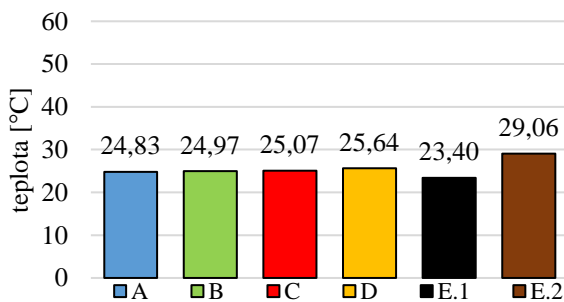
Graf 53: Rozkmit teplot v 10 dní – opatření 3

V letní modelové situaci s úplným zastíněním a nočním větráním nepřekročí teplota v žádném objektu 24 °C. V žádném objektu nedojde k přehřívání. Největší amplituda v denním cyklu je u objektu B. Nejmenší rozkmit teplot má těžký pasivní dům. Průměrná teplota se od počátečních 20 °C zvýší maximálně o 1,8 °C. Nejméně se průměrná teplota zvýší v těžkém pasivním domě – o 0,2 °C. Průběh teplot je ve všech modelových domech velmi podobný.

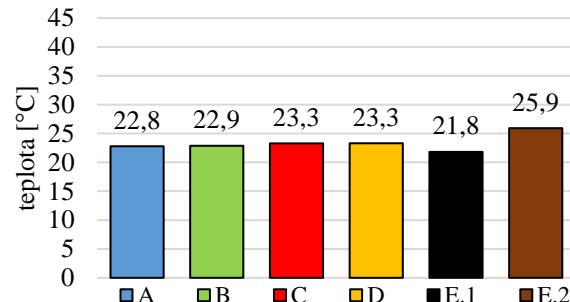
Opatření 4 - 80 % stínění



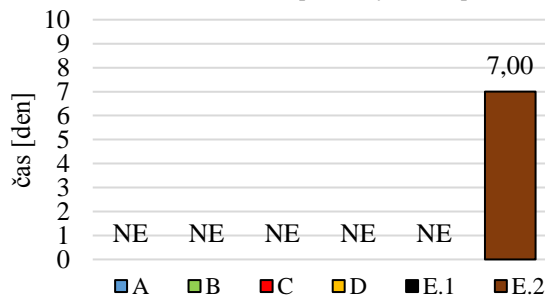
Graf 54: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 4



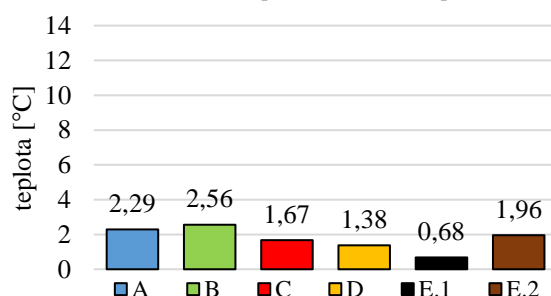
Graf 55: Maximální teplota objektů – opatření 4



Graf 56: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 4



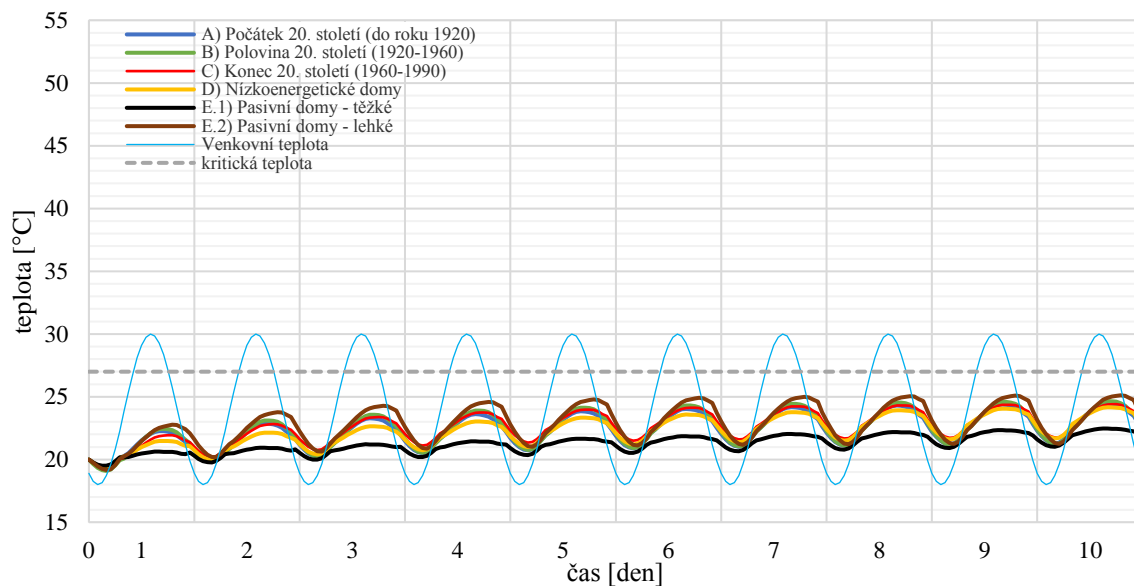
Graf 57: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – opatření 4



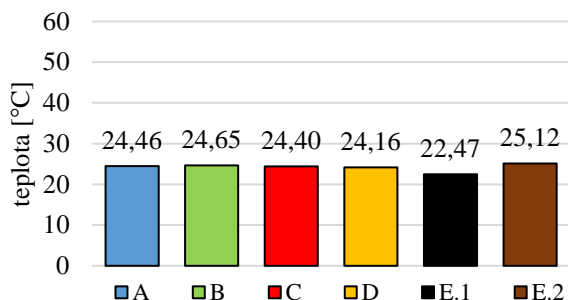
Graf 58: Rozkmit teplot v 10 dní – opatření 4

V letní modelové situaci s 80 % odcloněním solární zátěže dojde k přehřátí lehkého pasivního domu (E.2). Teplota překročí kritickou hranici v sedmém sledovaném dni. Největší amplituda v denním cyklu je u objektu B. Nejmenší rozkmit teplot má těžký pasivní dům. Teplota v lehkém pasivním domě nepřesáhne 30 °C.

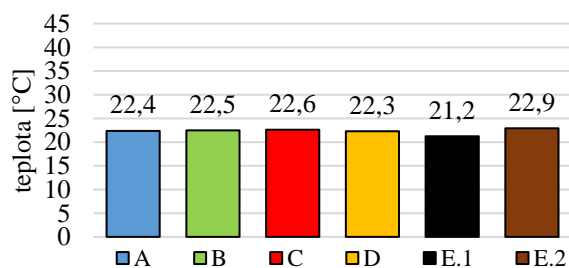
Opatření 5 - 80 % stínění, noční větrání



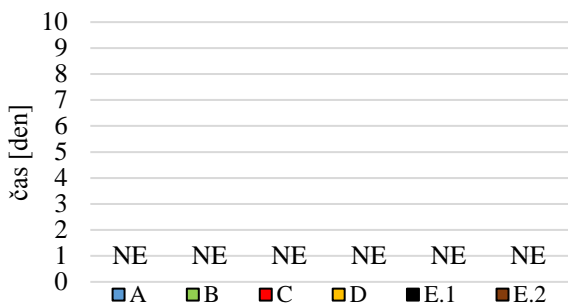
Graf 59: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 5



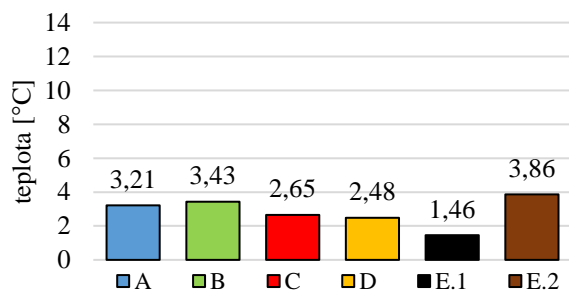
Graf 60: Maximální teplota objektů – opatření 5



Graf 61: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 5



Graf 62: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – opatření 5

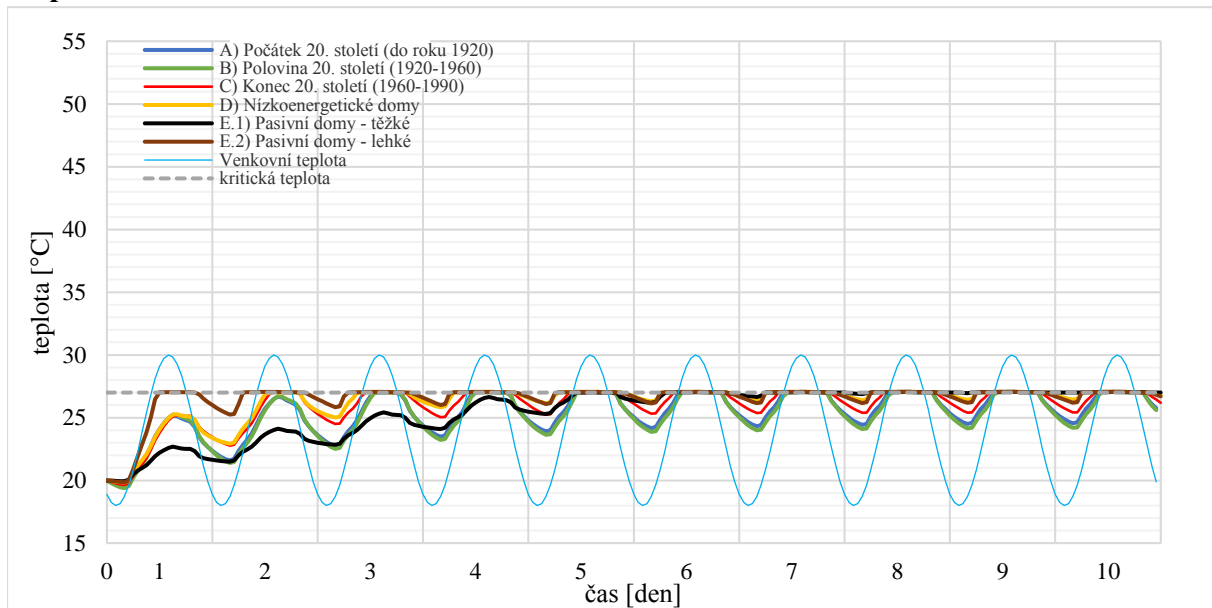


Graf 63: Rozkmit teplot v 10 dní – opatření 5

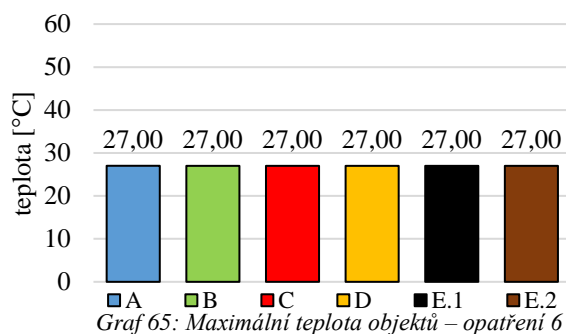
V letní modelové situaci s 80 % odcloněním solární zátěže a nočním větráním nedojde k přehřátí žádného modelového objektu. Největší amplituda v denním cyklu je u objektu E.2. Nejmenší rozkmit teplot má těžký pasivní dům. Průměrná teplota se od počátečních 20 °C zvýší maximálně o 2,9 °C. Nejméně se průměrná teplota zvýší v těžkém pasivním domě – o 1,2 °C.

4.3.2. Chlazení objektů

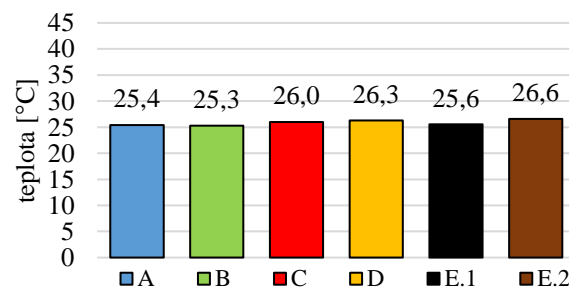
Opatření 6 - chlazení



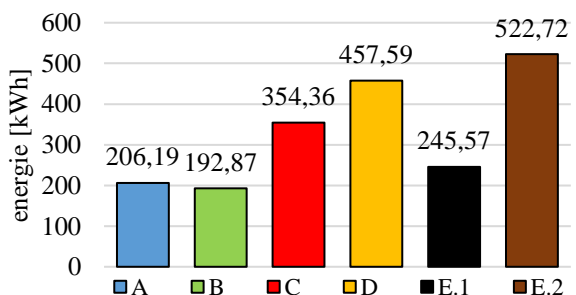
Graf 64: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 6



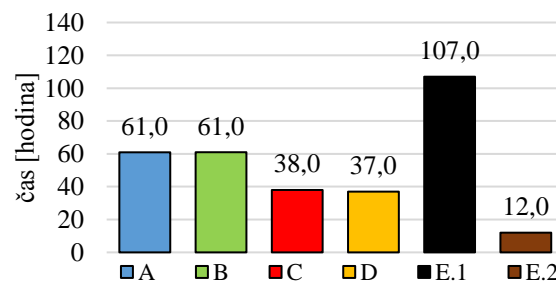
Graf 65: Maximální teplota objektů – opatření 6



Graf 66: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 6



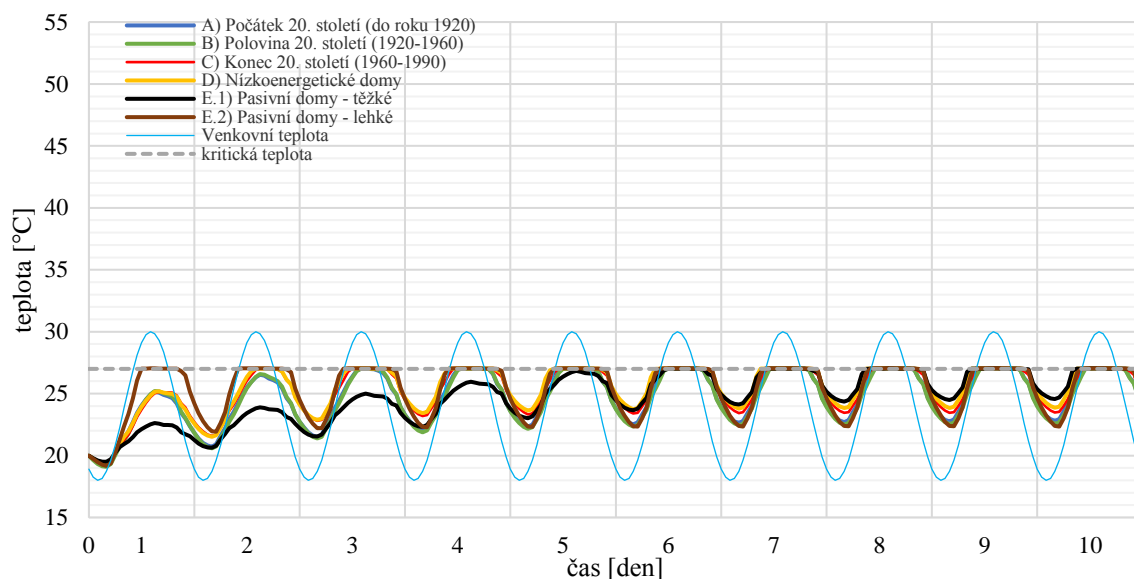
Graf 67: Celková energie potřebná pro chlazení 10 dní – opatření 6



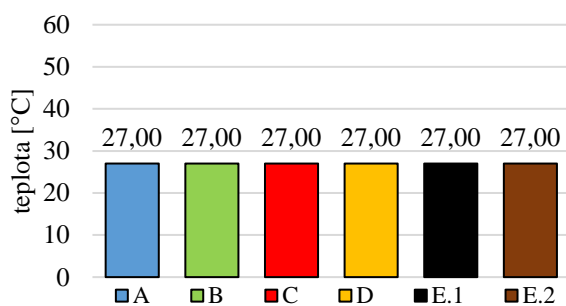
Graf 68: Začátek chlazení – opatření 6

V letní modelové situaci s aktivním chlazením je ve všech modelových objektech udržována teplota 27 °C. Objekty A a B v noci vychladnou pod 25 °C. Teplota v pasivních domech v noci klesne maximálně o 0,5 °C. Průměrná teplota v objektu B je 25,3 °C, zatímco v objektu E.2 je 26,6 °C. Nejvíce energie na chlazení během sledovaných deseti dní potřebuje lehký pasivní dům. Nejméně energie potřebuje objekt B. Lehký pasivní dům potřebuje na chlazení ve zvoleném období 2x více energie než těžký pasivní dům. V lehkém pasivním domě je chlazení spuštěno během prvního dne. V těžkém pasivní domě se chlazení aktivuje pátý den.

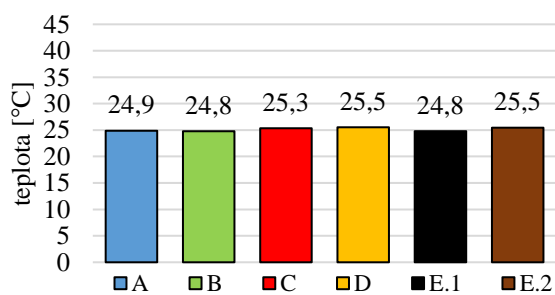
Opatření 7 - chlazení, noční větrání



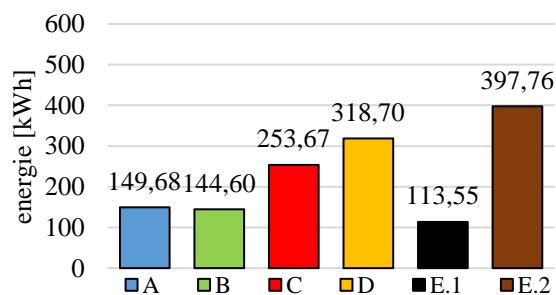
Graf 69: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 7



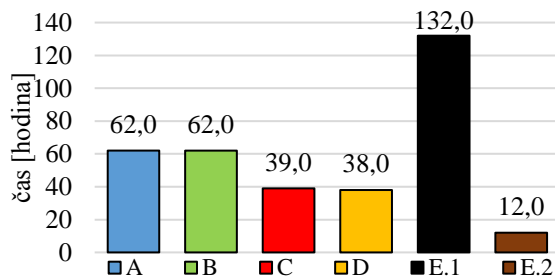
Graf 70: Maximální teplota objektů – opatření 7



Graf 71: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 7



Graf 72: Celková energie potřebná pro chlazení 10 dní – opatření 7

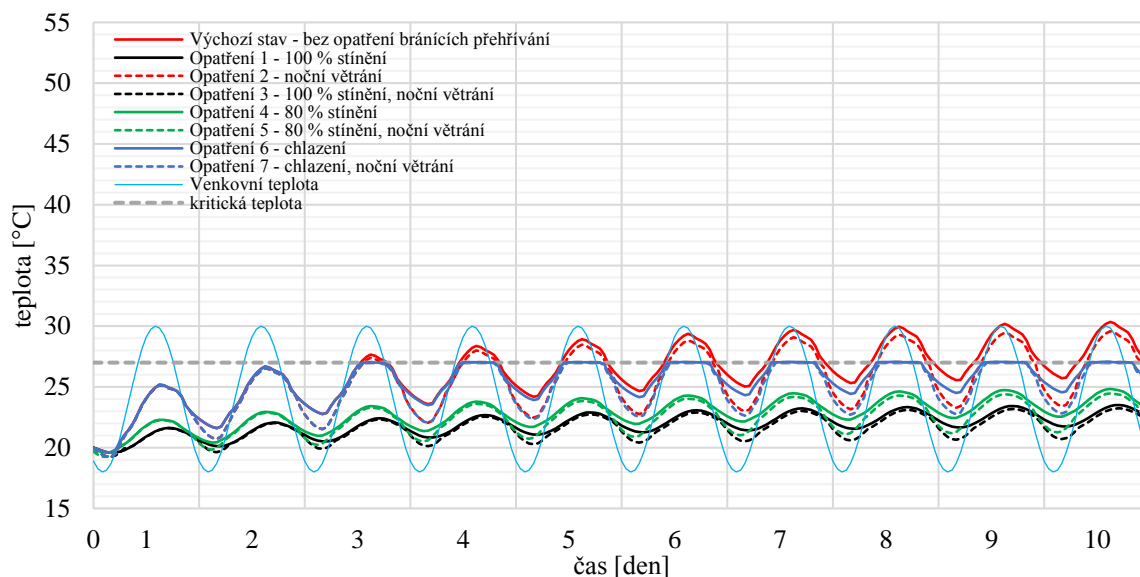


Graf 73: Začátek chlazení – opatření 7

V letní modelové situaci s aktivním chlazením a nočním větráním je ve všech modelových objektech udržována teplota 27 °C. Objekty A, B a E.2 v noci vychladnou pod 23 °C. Průměrná teplota je ve všech objektech blízka 25 °C. Nejvíce energie na chlazení během sledovaných deseti dnů potřebuje lehký pasivní dům. Nejméně energie potřebuje objekt E.1. Lehký pasivní dům potřebuje na chlazení ve zvoleném období 3,5x více energie než těžký pasivní dům. V lehkém pasivním domě je chlazení spuštěno během prvního dne. V těžkém pasivní domě se chlazení aktivuje šestý den.

4.3.3. Vliv opatření na jednotlivé modelové objekty

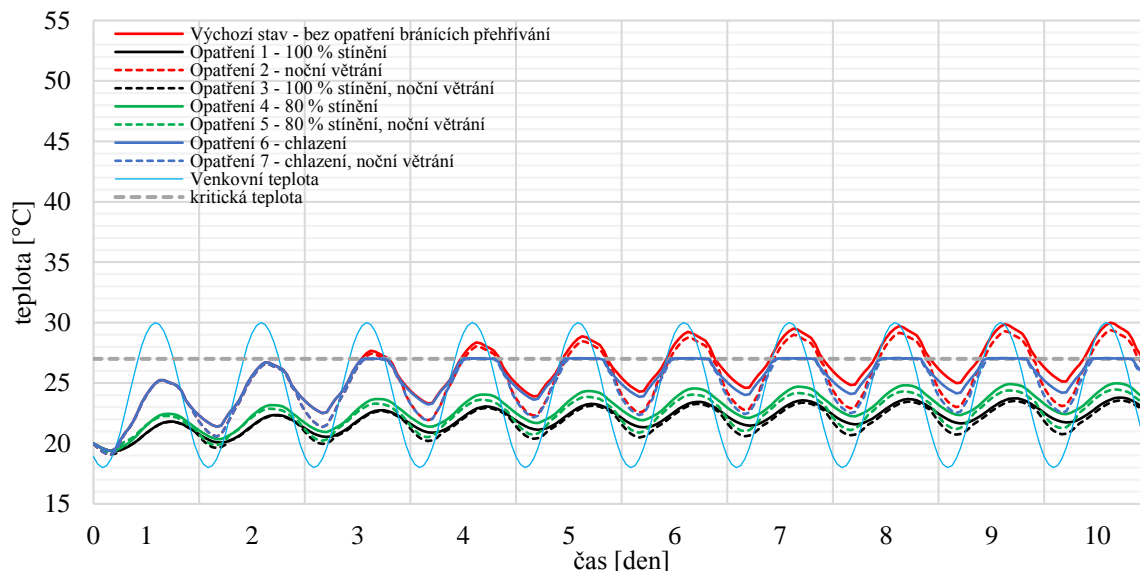
A) Počátek 20. století (do roku 1920)



Graf 74: Vliv opatření na modelový objekt A

Modelový objekt A dosahuje nejnižších teplot při 100 % stínění, kdy teplota vystoupá maximálně na 23,5 °C. Nejmenší vliv na bránění přehřívání má noční větrání. Nejvyšší teplota, která v objektu A nastane, je 30,4 °C. Maximální teplota v situaci pouze s nočním větráním je oproti výchozímu stavu nižší o 0,8 °C. Kritická teplota je překonána pouze v modelových situacích bez stínění.

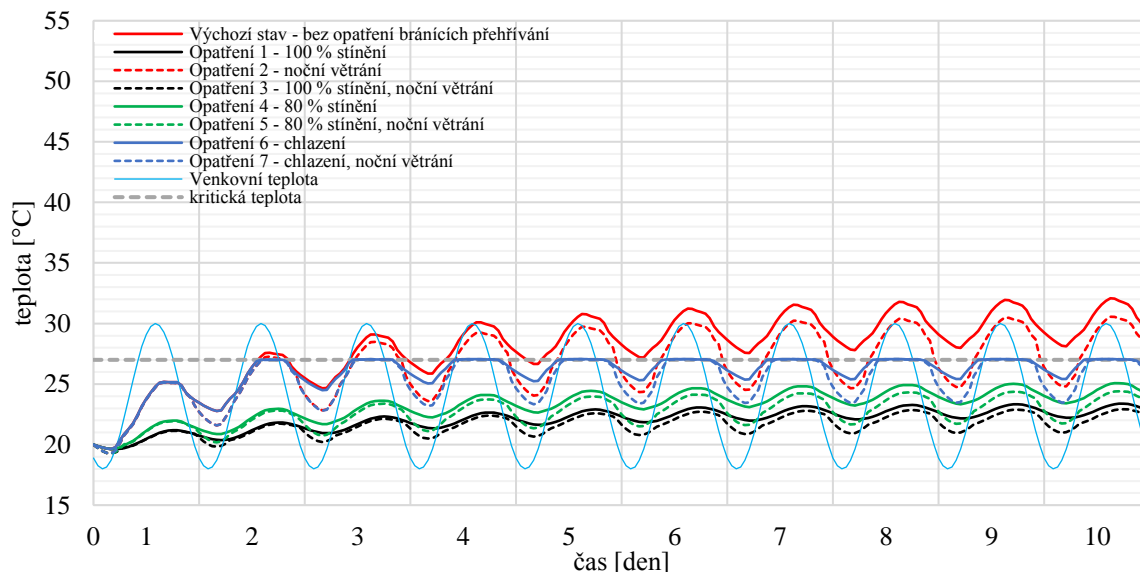
B) Polovina 20. století (1920-1960)



Graf 75: Vliv opatření na modelový objekt B

Modelový objekt B dosahuje nejnižších teplot při 100 % stínění, kdy teplota vystoupá maximálně na 23,8 °C. Nejmenší vliv na bránění přehřívání má noční větrání. Nejvyšší teplota, která v objektu B nastane, je 30,0 °C. Maximální teplota v situaci pouze s nočním větráním je oproti výchozímu stavu nižší o 0,6 °C. Kritická teplota je překonána pouze v modelových situacích bez stínění.

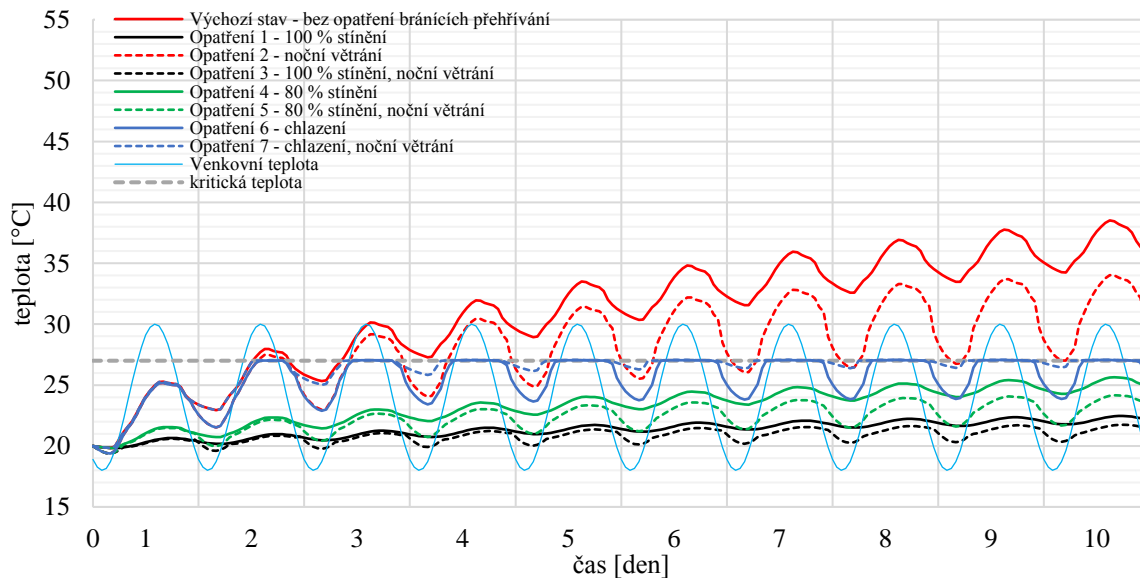
C) Konec 20. století (1960-1994)



Graf 76: Vliv opatření na modelový objekt C

Modelový objekt C dosahuje nejnižších teplot při 100 % stínění, kdy teplota vystoupá maximálně na 23,4 °C. Nejmenší vliv na bránění přehřívání má noční větrání. Nejvyšší teplota, která v objektu C nastane, je 32,0 °C. Maximální teplota v situaci pouze s nočním větráním je oproti výchozímu stavu nižší o 1,5 °C. Kritická teplota je překonána pouze v modelových situacích bez stínění.

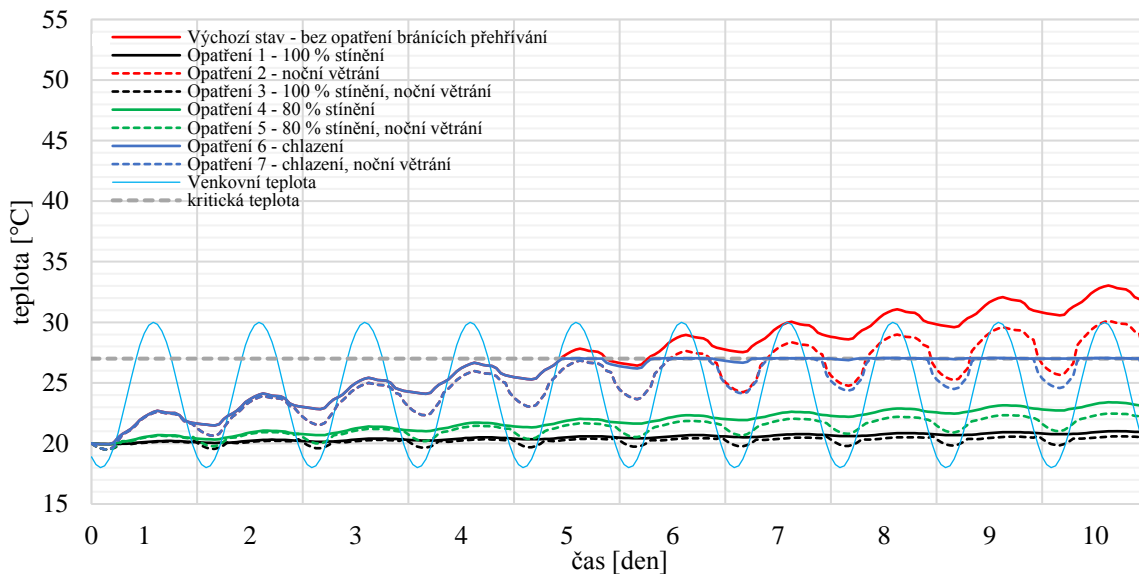
D) Nízkoenergetické domy



Graf 77: Vliv opatření na modelový objekt D

Modelový objekt D dosahuje nejnižších teplot při 100 % stínění, kdy teplota vystoupá maximálně na 22,5 °C. Nejmenší vliv na bránění přehřívání má noční větrání. Nejvyšší teplota, která v objektu D nastane, je 38,5 °C. Maximální teplota v situaci pouze s nočním větráním je oproti výchozímu stavu nižší o 4,5 °C. Kritická teplota je překonána pouze v modelových situacích bez stínění.

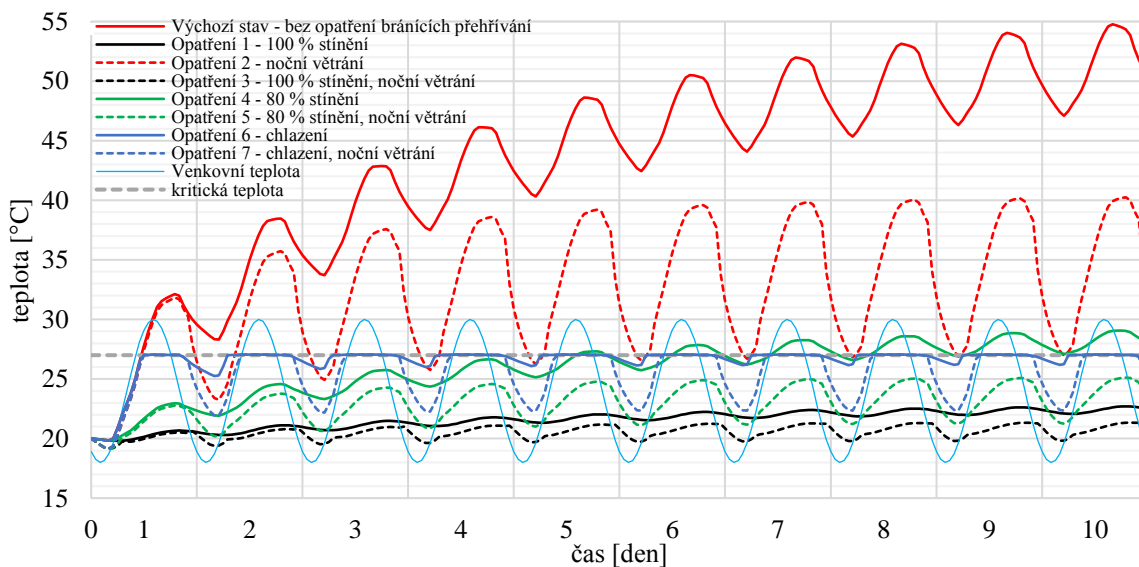
E.1) Pasivní domy – těžké



Graf 78: Vliv opatření na modelový objekt E.1

Modelový objekt E.1 dosahuje nejnižších teplot při 100 % stínění, kdy teplota vystoupá maximálně na 21,0 °C. Nejmenší vliv na bránění přehřívání má noční větrání. Nejvyšší teplota, která v objektu E.1 nastane, je 33,0 °C. Maximální teplota v situaci pouze s nočním větráním je oproti výchozímu stavu nižší o 2,9 °C. Kritická teplota je překonána pouze v modelových situacích bez stínění.

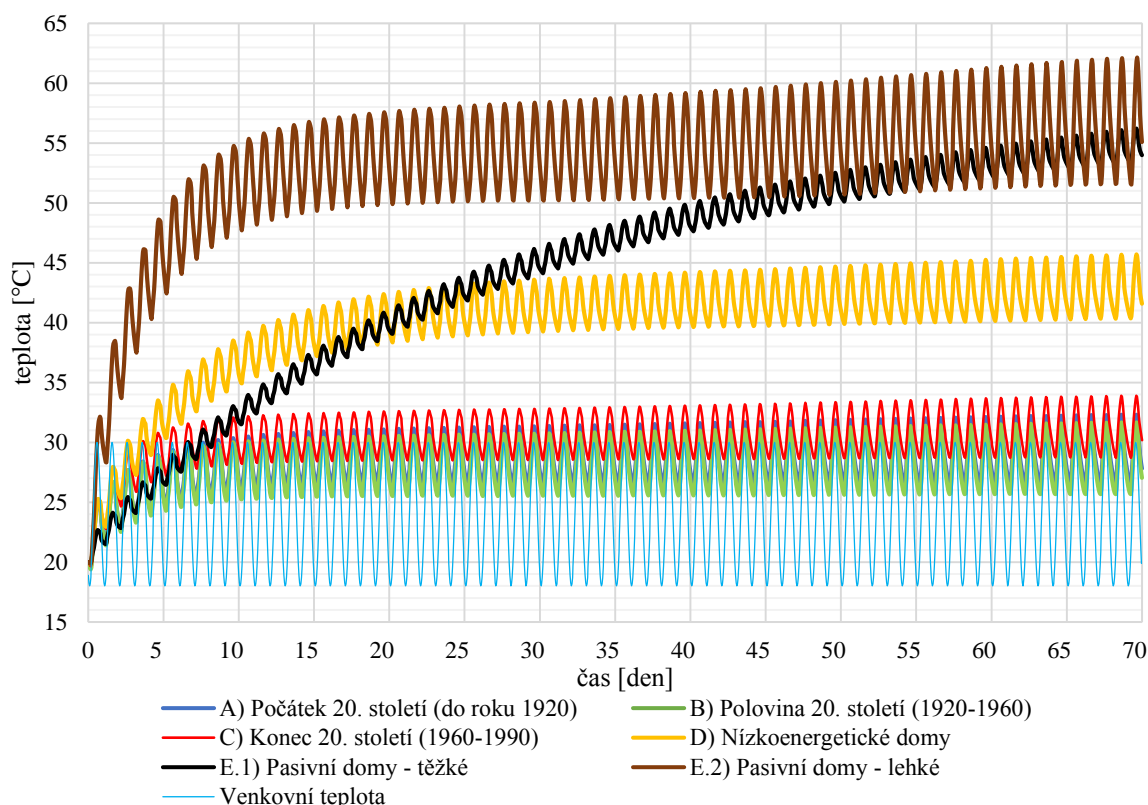
E.2) Pasivní domy – lehké



Graf 79: Vliv opatření na modelový objekt E.2

Modelový objekt E.2 dosahuje nejnižších teplot při 100 % stínění s nočním větráním, kdy teplota vystoupá maximálně na 21,4 °C. Nejvyšší teplota, která v objektu E.2 nastane, je 54,8 °C. Přestože noční větrání dokáže značně utlumit nárůst teploty, tak neudrží teploty pod kritickými 27 °C. Maximální teplota v situaci pouze s nočním větráním je oproti výchozímu stavu nižší o 14,5 °C. Kritická teplota je překonána v modelových situacích bez stínění a v situaci s 80 % stíněním bez nočního větrání.

4.3.4. Doba potřebná k dosažení kvazistacionárního stavu



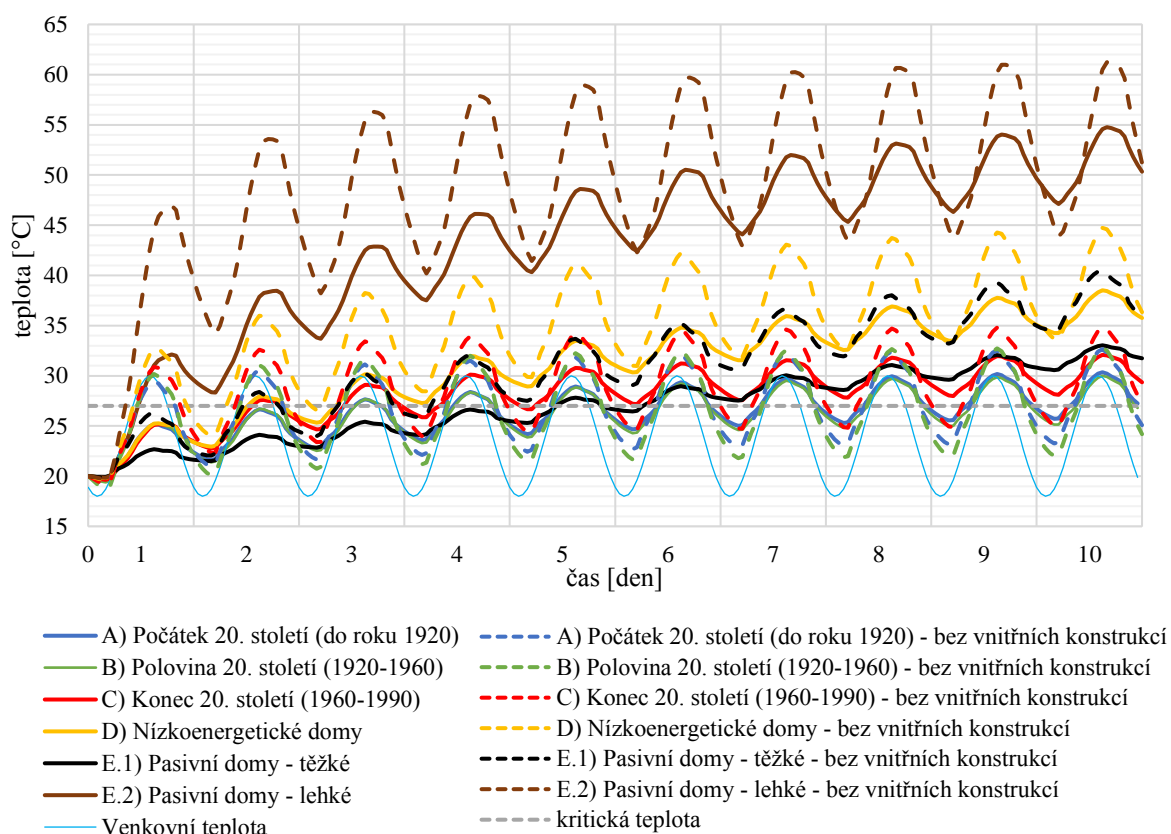
Graf 80: Kvazistacionární stav

Teploty ve všech modelových domech neustále rostou. V určitém čase se ale rychlost nárůstu teplot zpomalí. Nárůst teploty přes den je téměř vyrovnán s ochlazením v noci a teploty kmitají kolem střední hodnoty.

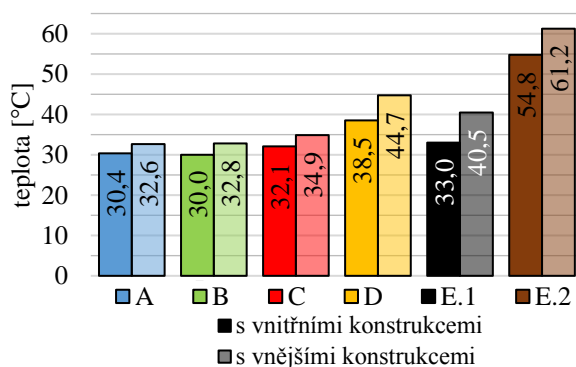
Objekty A, B a C dosáhnou kvazistacionárního stavu během deseti dnů. Teploty v objektech A a B kmitají kolem teploty 27 °C a v objektu C kolem teploty 30 °C. V nízkoenergetickém domě (D) se za 25 dní teplota pohybuje v kvazistacionárním stavu okolo 42 °C. Teplota v lehkém pasivním domě (E.2) od patnáctého dne kolísá okolo 55 °C. V těžkém pasivním domě (E.1) se teplota vyšplhá stejně jako v objektu E.2 k 55 °C, ale kvazistacionární stav nastává až po 70 dnech.

Největší rozkmit teplot je v objektu E.2. Nejmenší teplotní rozkmit je v objektu E.1. Objekty s nejkvalitnější tepelně izolační obálkou se ustalují okolo nejvyšších teplot.

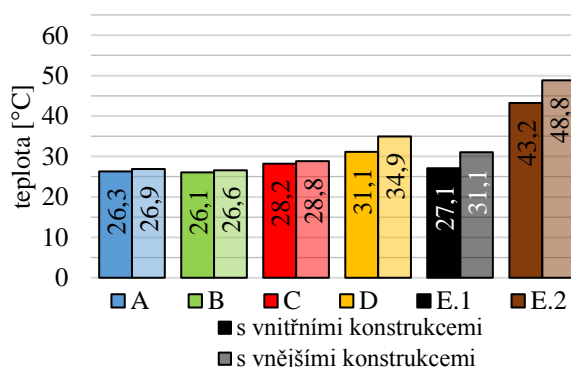
4.3.5. Vliv vnitřních konstrukcí na letní přehřívání



Graf 81: Vliv vnitřních konstrukcí na letní přehřívání



Graf 82: Maximální teplota - vliv vnitřních konstrukcí



Graf 83: Průměrná teplota za 10 dní - vliv vnitřních konstrukcí

V objektech bez vnitřních konstrukcí dochází k většímu dennímu rozkmitu teplot. Největší rozkmit teplot je v lehkém pasivním domě (E.2). Nejmenší rozkmit teplot je v těžkém pasivním domě (E.1). Teploty v objektech bez vnitřních konstrukcí rostou rychleji. Kritická teplota 27 °C je v domech bez vnitřních stěn a stropů překročena dříve, než v domech se všemi vnitřními konstrukcemi.

Maximální teplota v těžkém pasivním domě (E.1) bez vnitřních konstrukcí je o 7,5 °C vyšší než když má vnitřní konstrukce. Maximální teplota v modelovém objektu A bez vnitřních konstrukcí je vyšší o 2,2 °C, než ve stejném domě se všemi konstrukcemi.

Průměrná teplota starých domů bez vnitřních konstrukcí (A, B a C) je oproti stejným domům s vnitřními konstrukcemi vyšší o 0,6 °C. Pokud by v lehkém pasivním domě (E.2) nebyly vnitřní konstrukce byla by v něm průměrná teplota za deset dní vyšší o 5,6 °C.

4.4. Vyhodnocení výsledků letních modelových situací

4.4.1. Přehřívání objektů

Přehřívání objektů, v modelových situacích bez vnitřních zisků, způsobují hlavně vysoké solární zisky prostupující do interiéru přes průsvitné části obálky. Pokud bychom do výpočtu navíc zahrnuli vnitřní zisky od osob a spotřebičů byly by interiérové teploty ještě vyšší. V letních modelových situacích bez stínění dochází k překročení kritické teploty 27 °C ve všech modelových objektech. Je třeba připomenout, že modelový dům má pro všechna časová období stejně velká okna, které velikostně odpovídají spíše dnešním zvyklostem. Budovy stavěné na počátku 20. století ale mají okna menší a k přehřívání v nich běžně nedochází. Toto je možné považovat za výpočtovou chybu, ale zvolený jednotný tvar modelového domu umožňuje lepší porovnatelnost objektů napříč stoletím. Jako další opatření bránící přehřívání by totiž mohlo být navrženo třeba zmenšení oken. To by ovšem mohlo být v rozporu s požadavky stavebníků a architektů, proto s touto variantou nebylo uvažováno.

Denní rozkmit teplot je závislý na více faktorech (tepelná kapacita, tepelné ztráty, průvzdušnost budovy a velikost tepelných zisků). Oba modelové pasivní doma mají stejné tepelné ztráty, stejnou průvzdušnost a stejné solární zisky. Výrazně odlišnou mají tepelnou kapacitu. Lehký pasivní dům má 3x nižší tepelnou kapacitu než těžký, a proto má teplotní rozkmit ve výchozím modelovém stavu 3x vyšší. Amplituda teploty v budovách s velkou tepelnou kapacitou je více tlumená než v lehkých domech.

Naproti tomu těžký pasivní dům a modelový objekt z poloviny 20. století (B) mají stejnou tepelnou kapacitu. Objekt B má ale ve výchozí modelové situaci rozkmit teploty 2x vyšší. Kvůli vyšší propustnosti solárního záření přes okna má objekt B větší solární zisky. Z důvodu vyšší průvzdušnosti obálky do něho proudí více teplého vzduchu z exteriéru. Proto v objektu B přes den roste teplota rychleji. Vyšší tepelné ztráty a intenzivnější výměna vzduchu vlivem netěsností naopak způsobují, při poklesu venkovní teploty, rychlejší chladnutí v noci. Pokud chceme tlumit kmitání teploty v budovách, tak musíme navrhovat objekty s vysoce kvalitní tepelně izolační obálkou a velkou tepelně akumulací hmotou uvnitř objektu.

Největší rozkmit teplot nastává v modelové situaci s nočním větráním. Toto opatření ukazuje možnost korigovat nárůst teplot v interiéru. Přehřátí interiéru však nedokáže úplně zabránit. Přes den totiž nárůstu teplot způsobeným vysokou solární intenzitou není nijak bráněno. Výraznější zpomalení růstu teplot by mohlo být možné zvýšením intenzity nočního větrání. Zvolená intenzita $n_{noc} = 3 \text{ h}^{-1}$ je nedostatečná, protože nedokáže zabránit přehřívání objektů. Vyšší intenzita nočního větrání by byla potřebná zejména v lehkém pasivním domě. Noční větrání je tak možné považovat pouze za doplňkové opatření, závislé na nejistých hodnotách intenzity větrání, teploty vzduchu v noci a na přítomnosti akumulací hmoty v interiéru.

Stínění oken se jeví jako neúčinnější opatření bránící přehřívání. Při odclonění solární zátěže rostou teploty v interiéru velmi pomalu. Rychlost růstu vnitřních teplot při úplném stínění závisí zejména na intenzitě výměny vzduchu vlivem průvzdušnosti obálky budovy a také na tepelné kapacitě. Teplota v těžkém pasivním domě s nízkou průvzdušností se téměř nemění. Lehký pasivní dům se stejnou průvzdušností se ohřívá rychleji, protože má malé

množství akumulční hmoty. Ještě rychleji roste teplota ve starých domech, které mají 10x průvzdušnější obálku než pasivní domy.

Stoprocentní stínění oken není se současnými výrobky příliš reálné. Vždy pravděpodobně určité procento solární zátěže do interiéru projde. Výpočet letní modelové situace s osmdesátiprocentním stíněním prokazuje, že pouhé stínění není pro lehké pasivní domy dostatečné. Proto je v určitých případech potřebné kombinovat stínění oken s dalším opatřením – například nočním větráním. Při použití těchto dvou opatření jsou udržovány teploty interiéru v komfortní hranici ve všech obytných domech.

4.4.2. Chlazení objektů

Uživatelé obytných budov mohou z jakéhokoli důvodu požadovat, aby okna nebyla stíněna. Nebo může dojít k poruše ovládacího mechanismu žaluzií. I v těchto případech je potřeba zamezit přehřívání budov v létě. Řešením, jak udržet ve vnitřním prostoru komfortní teplotu i bez zastínění oken, může být chlazení. Strojní chlazení je ale náročné na spotřebu energie. A to je v rozporu s udržitelnou výstavbou, která má za cíl spotřebu energie snižovat. Problematika chlazení se podle vypočtených výsledků týká hlavně lehkých pasivních domů. V nich se chlazení spustí již za 12 hodin a za deset sledovaných dní se spotřebuje 522 kWh chladicí energie. Potřeba velkého množství energie na chlazení v lehkém pasivním domě odpovídá malému množství akumulční hmoty, která není schopna tlumit nárůst teploty. V těžkém pasivním domě je k udržení přijatelné teploty 27 °C ve sledovaném období potřeba polovina energie než lehkém pasivním domě. Navíc se chlazení aktivuje až v průběhu pátého dne.

Z výsledků vypočítaných modelem s aktivním chlazením vyplývá potřeba chlazení starých domů z 1. poloviny 20. století. Z praktické zkušenosti ovšem víme, že tyto objekty nemají problém s přehříváním. Problémy s přehříváním mívají ve starých domech pouze vestavby do podkroví. Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, vypočítané přehřívání starých budov je dáno plochou oken. Ta je v modelovém domě větší než ve skutečných domech z počátku 20. století.

Snížení spotřeby energie na chlazení je možné docílit kombinací s dalšími opatřeními. Jednou možností je noční provětrávání. Z vypočítaných výsledků vyplývá, že při intenzitě větrání $n_{noc} = 3 \text{ h}^{-1}$ se v lehkém pasivním domě sníží spotřeba energie ve sledovaných deseti dnech o třetinu a v těžkém pasivním domě o polovinu. Ještě výraznějšího snížení spotřeby energie je možné docílit vyšší intenzitou nočního větrání. Další metodou chlazení budov může být například využití chladu ze zeminy a podzemní vody, nebo využití PCM materiálů.

4.4.3. Vliv opatření na jednotlivé budovy

Nejúčinnější obrana proti přehřívání ve všech modelových objektech je stínění. Pokud udržíme tepelnou zátěž způsobenou solárními zisky mimo budovu, pak se interiér nemůže přehřívát. Při úplném zastínění v žádném modelovém objektu není překročena teplota 24 °C. Při kombinaci zastínění s nočním větráním dokážeme maximální teplotu udržet ještě o několik desetin stupňů níže. Objekty s velkou tepelnou kapacitou dokáží odolat kritické teplotě i s reálnějším 80 % stíněním. Při stínění při kterém projde část solárních zisků do interiéru dojde k přehřátí pouze lehkého pasivního domu, průměrná denní teplota však překročí kritických 27 °C až sedmý sledovaný den.

Nejméně efektivní opatření proti přehřívání je samotné noční větrání. U objektů A, B a C je snížení teplot tímto opatřením velmi malé. Nejvíce noční větrání koriguje růst teploty u lehkého pasivního domu, přesto však neudrží teploty pod kritickými 27 °C. V těžkém pasivním domě během deseti sledovaných dní udrží noční větrání alespoň v noci komfortní teploty. Z vypočítaných výsledků je možné vyvodit závěr, že noční větrání je pouze doplňkové opatření pro bránění přehřívání. Aby nebyla překročena kritická teplota, tak je potřebné noční větrání kombinovat s dalším opatření - nejlépe stíněním.

Aktivní chlazení je velmi účinné a dokáže udržet teplotu interiéru na komfortní teplotě. Aktivní chlazení je však náročné na spotřebu energie, proto by mělo být využíváno pouze v krajních případech. Pokud můžou bránit přehřívání jiné způsoby, které nejsou náročné na spotřebu energie, tak by měly vždy dostat přednost.

4.4.4. Doba potřebná k dosažení kvazistacionárního stavu

Zatímco na konci sledovaného desetidenního období dosahuje teplota v lehkém pasivním domě teploty 55 °C, tak v těžkém pasivním domě je 33 °C. Při analýze delšího časového období se však teploty, v obou pasivních budovách v kvazistacionárním stavu, zastavují okolo 55 °C. Ve velmi kvalitně izolovaných objektech se přes den hromadí tepelná zátěž. Oproti neizolovaným domům se jí ale nedaří v noci odvést, a tak teploty stoupají velmi vysoko.

Lehký pasivní dům dosáhne kvazistacionárního stavu poměrně rychle – za 10 dní. Těžký pasivní dům by se do kvazistacionárního stavu dostal až za 70 dní. Tento fakt dokazuje význam tepelně akumulční hmoty. Objekty s vysokou tepelnou kapacitou déle odolávají vysokým teplotám. Velký prostor pro ukládání energie do akumulční hmoty napomáhá zpomalení nárůstu vysokých teplot. Střední teplota v kvazistacionárním stavu je závislá na tepelně izolačních vlastnostech obvodového pláště. Rychlost nárůstu teplot do kvazistacionárního stavu je však závislá na tepelné kapacitě.

Teploty v kvazistacionárním stavu, které zobrazuje *Graf 80*, neustále mírně rostou. Je to dáno tím, že se ve zvoleném modelovém období stále zvyšuje solární intenzita.

4.4.5. Vliv vnitřních konstrukcí na letní přehřívání

Při zvyšování teplot v interiéru začnou všechny konstrukce absorbovat teplo. Při nočním ochlazení se naopak část nakumulovaného tepla z konstrukcí uvolní a netěsnostmi je odvedena pryč z budovy. Vnitřní konstrukce tvoří v modelových domech až 52 % z celkové tepelné kapacity. Významně se proto podílejí na tlumení denního rozkmitu teplot. Pokud by budovy neměly vnitřní konstrukce, tak by uvnitř rychleji rostly teploty přes den. V noci by domy naopak rychleji chladly.

Význam vnitřních konstrukcí v letních horkách roste se zvyšující se kvalitou tepelně izolační obálky. Ve starých domech bez tepelné izolace se v modelové situaci bez vnitřních konstrukcí zvýší maximální teplota pouze o 2,2 °C. V těžkém pasivním domě s vysoce kvalitní izolační obálkou se v modelové situaci bez vnitřních konstrukcí zvýší maximální teplota až o 7,5 °C.

V pasivních domech se ve sledovaných deseti dnech kromě maximální teploty výrazně zvýší také průměrná teplota. Větší teplotní rozdíl u pasivních domů je dán také tím, že ve kvazistacionárním stavu dosahují kvalitně izolované domy výrazně vyšších teplot. Při odebrání vnitřních konstrukcí se budovy do kvazistacionárního stavu dostanou rychleji. Neizolované domy se již brzy ustalují a proto se průměrná teplota zvýší jen nepatrně.

Při návrhu obytných budov by mělo být přihlíženo k vlivu vnitřních konstrukcí. Cílem mají být vnitřní konstrukce s vysokou tepelnou kapacitou, které budou tlumit rychlost nárůstu teplot. Zvláštní důležitost má použití vnitřních konstrukcí ve kvalitně izolovaných objektech.

5. Závěr

Výstavba obytných budov od počátku 20. století doznala značných změn v oblasti snižování spotřeby energie. Výpočty ukazují, že se za posledních 100 let tepelný tok směrem do exteriéru snížil o více než 80 %. Nicméně největší slabinou zůstávají výplně okenních otvorů. Tepelná kapacita obytných budov se v průběhu století výrazně nezměnila. V České republice se tradičně staví objekty s vysokou akumulací schopností. Pokles tepelné kapacity zaznamenáváme s rozvojem objektů stavěných z dutinových tvárníc. Nejvýraznější pokles tepelné kapacity je však ve dřevostavbách.

Je potřeba připomenout, že dílčí výsledky v této diplomové práci jsou ovlivněny tvarem modelového domu. Je idealizována velikost oken, která ovlivňuje výsledky zejména v letních situacích. Modelové budovy z počátku 20. století mají větší okna než ve skutečnosti, a proto v nich dojde k přehřátí vnitřního vzduchu. Idealizován je také tvar střešní konstrukce.

Rychlost chladnutí modelových budov závisí na hodnotě časové konstanty budovy. V neizolovaných domech dochází k rychlému ochlazení vzduchu. Při krátkodobé otopné přestávce o rychlosti chladnutí rozhoduje kvalita tepelně izolační obálky. Touto prací však je upozorněno na významný vliv tepelné kapacity při chladnutí budov. Lehké pasivní domy při dlouhodobém zimním přerušení dodávky tepla chladnou velmi rychle, i když mají velmi kvalitní izolační obálku. Domy s malou akumulací hmotou si nevytvářejí zásobu tepelné energie a nemohou tak mírnit následky havárie jakou je dlouhodobý výpadek dodávky tepla. Rychlost chladnutí lehkého pasivního domu je proto srovnatelná s rychlostí chladnutí neizolovaných domů. Proto je důležité si uvědomit, že tepelný komfort bude při havárii nejdéle zajištěn v masivních a kvalitně izolovaných domech. Proti rychlému vychladnutí budov však zůstává nejlepším opatřením kvalitní tepelně izolační obálka s vysokou neprůvzdušností.

Při návrhu tepelného zdroje v pasivních objektech je potřeba přihlížet k množství tepelně akumulací hmoty. Běžně se i do těžkých pasivních domů navrhuje kotle s malým výkonem, a proto je doba vytopení těžkého pasivního domu výrazně delší než doba vytopení starých neizolovaných domů. V rychlém vytopení s malou spotřebou energie ale dominují kvalitně izolované budovy s nízkou tepelnou kapacitou.

Lehké pasivní domy naopak vykazují nejhorší výsledky z hlediska letního přehřívání. Kvalitně izolované domy obecně mají nevýhodu v letním horku. Přes den se v nich hromadí tepelná zátěž. Oproti neizolovaným domům se jí ale nedaří v noci odvést, a tak teploty stoupají velmi vysoko. Z pasivních domů jsou však v letním období výhodnější ty s vysokou tepelnou kapacitou – déle odolávají vysokým teplotám a rozkmit vnitřních teplot je více tlumený než v lehkých domech.

V letním horku je tepelný komfort v obytných budovách zajištěn pouze pokud je odražena solární zátěž. Nejúčinnějším opatřením proti přehřívání budov tak je stínění. Zvláště při návrhu velmi dobře tepelně izolovaných staveb je účelné se pečlivě věnovat technickému návrhu stínících prvků. Noční větrání je dle výsledků možné považovat pouze za doplňkové opatření. Bylo by ovšem přínosné v další analýze ověřit, jestli může být noční větrání považováno za dostatečné, když se zvýší intenzita výměny vzduchu. Zvolená intenzita $n_{noc} = 3 \text{ h}^{-1}$ je nedostatečná. Letnímu přehřívání může být úspěšně bráněno také aktivním chlazením. Strojní chlazení je však náročné na spotřebu energie a je v rozporu s navrhováním energeticky

úsporných staveb. Při návrhu budov je potřeba mít na paměti, že pokud je možné bránit přehřívání jinými způsoby než strojním chlazením, tak by měly vždy dostat přednost.

Při návrhu obytných budov by mělo být přihlíženo k vlivu vnitřních konstrukcí. Příčky, podlahy a strop totiž výrazně ovlivňují časový průběh teplot v interiéru. Cílem mají být vnitřní konstrukce s vysokou tepelnou kapacitou, které budou zpomalovat pokles teplot v zimě a tlumit nárůst teplot v létě. V zimě se význam vnitřních konstrukcí s vysokou tepelnou kapacitou projeví nejvíce v lehkých objektech. V kvalitně izolovaných objektech zase mají vnitřní konstrukce největší význam v letním období.

Z výsledků této diplomové práce je zjevné, že chladnutí a přehřívání budov souvisí kromě tepelně izolačních vlastností obvodových konstrukcí také s množstvím akumulární hmoty. Pokud chceme, aby budovy v zimě pomalu chladly a v létě více tlumily rozkmit teplot, tak musíme navrhovat objekty s velmi kvalitní tepelně izolační obálkou a velkým množstvím tepelně akumulární hmoty. Pokud mají mít kvalitně izolované budovy zajištěn tepelný komfort i v létě, tak musí být vybaveny systémem stínění.

Seznam grafů

Graf 1: Přehled součinitele prostupu tepla	26
Graf 2: Přehled účinné tepelné kapacity modelové budovy	27
Graf 3: Přehled objemové tepelné kapacity	27
Graf 4: Rozdělení tepelné kapacity na vnitřní a vnější	27
Graf 5: Procentuální podíl vnitřní a vnější tepelné kapacity	27
Graf 6: Přehled měrného tepelného toku modelové budovy	27
Graf 7: Přehled celkové tepelné charakteristiky	27
Graf 8: Přehled celkové tepelné charakteristiky	28
Graf 9: Návrhový výkon tepelného zdroje	36
Graf 10: Průběh teplot v letní modelové situaci - denní cyklus	37
Graf 11: Globální solární ozáření	37
Graf 12: Solární zisky – sledované období	40
Graf 13: Solární zisky – den	40
Graf 14: Solární zisky vztahované k podlahové ploše – den	40
Graf 15: Noční větrání	40
Graf 16: Chladnutí objektu A	43
Graf 17: Chladnutí objektu B	43
Graf 18: Chladnutí objektu C	43
Graf 19: Chladnutí objektu D	43
Graf 20: Chladnutí objektu E.1	43
Graf 21: Chladnutí objektu E.2	43
Graf 22: Teplota v ustáleném stavu	44
Graf 23: Doba vychladnutí objektů pod kritickou teplotu	44
Graf 24: Závislost chladnutí pod kritickou teplotu a časové konstanty	44
Graf 25: Teplota po 10 dnech chladnutí	45
Graf 26: Závislost teploty po 10 dnech chladnutí a časové konstanty	45
Graf 27: Vytápění objektů z teploty po 10 dnech chladnutí	45
Graf 28: Doba vytopení objektů z teploty po 10 dnech chladnutí	46
Graf 29: Celková energie potřebná k vytopení	46
Graf 30: Chladnutí objektů s vnitřními konstrukcemi	46
Graf 31: Chladnutí objektů bez vnitřních konstrukcí	46
Graf 32: Vliv vnitřních konstrukcí na chladnutí	47
Graf 33: Maximální pokles teplot	47
Graf 34: Průběh teplot v letní modelové situaci – výchozí stav	50
Graf 35: Maximální teplota objektů – výchozí stav	50
Graf 36: Průměrná teplota za 10 dní – výchozí stav	50
Graf 37: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – výchozí stav	50
Graf 38: Rozkmit teplot v 10 dní – výchozí stav	50
Graf 39: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 1	51
Graf 40: Maximální teplota objektů – opatření 1	51

Graf 41: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 1	51
Graf 42: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – opatření 1	51
Graf 43: Rozkmit teplot v 10 dní – opatření 1	51
Graf 44: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 2	52
Graf 45: Maximální teplota objektů – opatření 2	52
Graf 46: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 2	52
Graf 47: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – opatření 2	52
Graf 48: Rozkmit teplot v 10 dní – opatření 2	52
Graf 49: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 3	53
Graf 50: Maximální teplota objektů – opatření 3	53
Graf 51: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 3	53
Graf 52: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – opatření 3	53
Graf 53: Rozkmit teplot v 10 dní – opatření 3	53
Graf 54: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 4	54
Graf 55: Maximální teplota objektů – opatření 4	54
Graf 56: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 4	54
Graf 57: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – opatření 4	54
Graf 58: Rozkmit teplot v 10 dní – opatření 4	54
Graf 59: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 5	55
Graf 60: Maximální teplota objektů – opatření 5	55
Graf 61: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 5	55
Graf 62: Den ve kterém průměrná teplota překročí 27 °C – opatření 5	55
Graf 63: Rozkmit teplot v 10 dní – opatření 5	55
Graf 64: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 6	56
Graf 65: Maximální teplota objektů – opatření 6	56
Graf 66: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 6	56
Graf 67: Celková energie potřebná pro chlazení 10 dní – opatření 6	56
Graf 68: Začátek chlazení – opatření 6	56
Graf 69: Průběh teplot v letní modelové situaci – opatření 7	57
Graf 70: Maximální teplota objektů – opatření 7	57
Graf 71: Průměrná teplota za 10 dní – opatření 7	57
Graf 72: Celková energie potřebná pro chlazení 10 dní – opatření 7	57
Graf 73: Začátek chlazení – opatření 7	57
Graf 74: Vliv opatření na modelový objekt A	58
Graf 75: Vliv opatření na modelový objekt B	58
Graf 76: Vliv opatření na modelový objekt C	59
Graf 77: Vliv opatření na modelový objekt D	59
Graf 78: Vliv opatření na modelový objekt E.1	60
Graf 79: Vliv opatření na modelový objekt E.2	60
Graf 80: Kvazistacionární stav	61
Graf 81: Vliv vnitřních konstrukcí na letní přehřívání	62
Graf 82: Maximální teplota - vliv vnitřních konstrukcí	62
Graf 83: Průměrná teplota za 10 dní - vliv vnitřních konstrukcí	62

Seznam obrázků

Obrázek 1: Časová osa s rozdělením výstavby do časových období	13
Obrázek 2: Rozměry modelového domu	21
Obrázek 3: Dispozice modelového domu.....	22
Obrázek 4: Tloušťka pro výpočet tepelné kapacity (100 mm).....	24
Obrázek 5: Tloušťka pro výpočet tepelné kapacity (střed)	24
Obrázek 6: Zimní modelové situace	30
Obrázek 7: Letní modelové situace	31
Obrázek 8: Tepelná bilance objektu	32
Obrázek 9: Elektrická analogie tepelné bilance budovy	33
Obrázek 10: Struktura simulačního modelu [14]	34
Obrázek 11: Schéma zimních okrajových podmínek	35
Obrázek 12: Výchozí stav pro letní přehřívání.....	37
Obrázek 13: Opatření 1 - 100 % stínění	37
Obrázek 14: Opatření 2 - noční větrání	38
Obrázek 15: Opatření 3 -100 % stínění, noční větrání	38
Obrázek 16: Opatření 4 - 80 % stínění	38
Obrázek 17: Opatření 5 - 80 % stínění, noční větrání	38
Obrázek 18: Opatření 6 - chlazení.....	38
Obrázek 19: Opatření 7 - chlazení, noční větrání.....	38
Obrázek 20 - Schéma letních okrajových podmínek.....	39
Obrázek 21: Princip výpočtu počáteční teploty ve 2. uzlu objektů A, B, C.....	41
Obrázek 22: Princip výpočtu počáteční teploty ve 2. uzlu objektu D	41
Obrázek 23: Princip výpočtu počáteční teploty ve 2. uzlu objektů E.1 a E.2	41

Seznam tabulek

Tabulka 1: A) Počátek 20. stolní (do roku 1920) - obvodové konstrukce.....	14
Tabulka 2: A) Počátek 20. stolní (do roku 1920) - vnitřní konstrukce.....	14
Tabulka 3: B) Polovina 20. stolní (1920-1960) - obvodové konstrukce	15
Tabulka 4: B) Polovina 20. stolní (1920-1960) - vnitřní konstrukce	15
Tabulka 5: C) Konec 20. stolní (1960-1990) - obvodové konstrukce	16
Tabulka 6: C) Konec 20. stolní (1960-1990) - vnitřní konstrukce	16
Tabulka 7: D) Nízkoenergetické domy - obvodové konstrukce.....	17
Tabulka 8: D) Nízkoenergetické domy - vnitřní konstrukce.....	17
Tabulka 9: E.1) Pasivní domy - těžké - obvodové konstrukce.....	18
Tabulka 10: E.1) Pasivní domy - těžké - vnitřní konstrukce.....	18
Tabulka 11: E.2) Pasivní domy – lehké - obvodové konstrukce.....	19
Tabulka 12: E.2) Pasivní domy – lehké - vnitřní konstrukce 1/2	19
Tabulka 13: E.2) Pasivní domy – lehké - vnitřní konstrukce 2/2	20
Tabulka 14: Rozměry oken.....	22
Tabulka 15: Přehled okrajových podmínek pro zimní modelové situace	35
Tabulka 16: Přírážka na tepelné vazby.....	36
Tabulka 17: Násobnost výměny vzduchu n_{50}	36
Tabulka 18: Přehled okrajových podmínek pro letní modelové situace	39
Tabulka 19: Celkový činitel propustnosti solárního záření v kolmém směru g	39
Tabulka 20: Přehled počátečních podmínek pro zimní modelové situace	42
Tabulka 21: Přehled počátečních podmínek pro letní modelové situace	42

Literatura

- [1] KOPECKÝ, Pavel. *Stavební tepelná technika: Šíření tepla, vzduchu a vlhkosti v budovách a stavebních prvcích*, OPPA. Praha, 2014.
- [2] ČSN 73 0540-1. *Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie*. Praha: ČNI, 2005.
- [3] VAVERKA, Jiří. *Stavební tepelná technika a energetika budov*. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-2910-0.
- [4] ČSN EN ISO 13789 *Tepelné chování budov – Měrné tepelné toky prostupem tepla a větráním – Výpočtová metoda*, 2009.
- [5] STANĚK, Kamil. SPJ1 – Podklady pro cvičení: Potřeba tepla na vytápění budovy. In: *Katedra konstrukcí pozemních staveb, Katedra konstrukcí pozemních staveb: Specializovaný projekt 1* [online]. [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: <http://kps.fsv.cvut.cz/index.php?lmut=cz&part=vyuka&sub=obor&type=o-b&kod=124SPB1>
- [6] TYWONIAK, Jan. *Nízkoenergetické domy 2: principy a příklady*. Praha: Grada, 2008. Stavitel. ISBN 978-80-247-2061-6.
- [7] ČSN 73 0540-2 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [8] TYWONIAK, Jan. Stavební tepelná technika 1. In: *Inteligentní budovy, ČVUT* [online]. Praha, 2011 [cit. 2017-11-2]. Dostupné z: <https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijnimaterialy/ST1/ST1%20text%20Tywoniak%202011.pdf>
- [9] Příručka typologií obytných budov: s příklady opatření ke snížení jejich energetické náročnosti. In: *Episcope: Building Typology* [online]. Praha: STÚ-K, 2014 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: http://episcope.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/CZ_TABULA_TypologyBrochure_STU-K.pdf
- [10] ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: ČNI, 2005.
- [11] Český hydrometeorologický ústav. *Územní teploty* [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data>
- [12] PANOVEC, Vladan. Teplotní pole v zemině pod podlahou – teorie a skutečnost. *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/10182-teplotni-pole-v-zemine-pod-podlahou-teorie-a-skutecnost>
- [13] CHYBÍK, Josef. Pasivní domy a tepelná stabilita v zimním období. *TZB-info* [online]. 2006 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3627-pasivni-domy-a-tepelna-stabilita-v-zimnim-obdobi>
- [14] KOPECKÝ, Pavel. *Comparative testing of simplified lumped parameter building thermal models*.
- [15] *Matlab* [počítačový program] R 2014a. studentská licence, www.mathworks.com