

Doc. Ing. Dalibor VYTLAČIL, CSc.
 ČVUT v Praze, Fakulta stavební,
 Katedra inženýrské informatiky

Výpočet výkonu chladicího zdroje tepelnými uzlovými modely

Calculation of Cooling Source Output by Heat Nodal Models

Recenzent
 Ing. Zdeněk Lerl

Popis metody způsobu výpočtu časového průběhu chladicího výkonu v závislosti na požadovaném průběhu teploty vnitřního vzduchu. Základem řešení je syntéza zátěžové veličiny v dynamickém modelu. Tepelný uzlový model zahrnuje relevantní tepelné kapacity a odpory. Příklad uvádí výpočet chladicího výkonu v klimatizované místnosti budovy s lehkým obvodovým pláštěm. Uvedený postup vede k určení maximálního výkonu i spotřebované energie. Příklad je doplněn o grafy znázorňující závislost maximálního výkonu zdroje na různých hodnotách tepelných kapacit zahrnutých v modelu.

Klíčová slova: počítačová simulace, tepelný uzlový model, syntéza, chladicí výkon zdroje, spotřeba energie

Description of a method of time course calculation of a cooling capacity in dependence on required indoor air temperature. The principle of the solution is a synthesis of a load quantity in the dynamic model. A heat nodal model comprehends relevant heat capacities and resistances. An example of a cooling capacity calculation in an air-conditioned room in a building with light siding is given. Described approach yields to the maximum capacity and energy consumption determination. The example is replenished with figures demonstrating the maximum source output dependence on different values of heat capacities included in the model.

Keywords: computer simulation, heat nodal model, synthesis, cooling source output, energy consumption

ÚVOD

Použití počítačových simulací při navrhování stavebních konstrukcí a systémů TZB nabývá na významu. Realizovaná budova je unikátním dílem a z této skutečnosti vyplývá nutnost bezchybného projektu i procesu výstavby. Dodatečné změny jsou obtížné a zejména finančně náročné. Možnost vyzkoušet chování stavební konstrukce a vytápěcího, případně chladicího systému ve virtuálním světě, je obrovskou příležitostí pro zkvalitnění návrhu.

Používané metody a programy jsou zaměřeny na analýzu navrhovaného systému, kdy pro zadanou zátěž z vnějšího a vnitřního prostředí je určen průběh sledované veličiny, obvykle vnitřní teploty vzduchu, ale i teploty na povrchu vybrané konstrukce [1], [2]. Pokud hodnoty sledovaného parametru nevyhoví, je třeba výpočet zopakovat pro změněné parametry konstrukce.

Jiným přístupem je syntéza návrhu, kdy je výsledkem simulace nalezení hodnot parametrů systému, které zajišťují dosažení požadovaných zadaných hodnot teploty vzduchu nebo alespoň nepřekročení mezní hodnoty. Příkladem je použití teorie tolerancí [3] v dynamických modelech. Další skupinou úloh je syntéza zátěžové veličiny, tedy nalezení časového průběhu veličiny, která způsobila definované změny v určitém místě systému. Konkrétním příkladem je nalezení průběhu vytápěcího výkonu při přerušovaném vytápění [4]. Podobným, ale komplikovanějším případem je nalezení chladicího výkonu pro zajištění požadované teploty vzduchu v místnosti. Oba případy spojuje zapojení tepelných kapacit na straně stavební konstrukce i systému TZB. Modely pro řešení popsaných problémů integrují oba uvedené podsystémy do jednoho celku.

METODA ŘEŠENÍ

Použité dynamické modely jsou navrženy jako uzlové sítě sestavené z tepelných odporů, kapacit a zdrojů tepelného toku. K popisu těžkých obvodových konstrukcí lze použít i rozprostřené parametry, které v jednom prvku spojují vlastnosti odporu i kapacity. Systémy TZB lze zadat pro případ vytápění i chlazení a mohou být automaticky regulované v závislosti na změnách v definovaném uzlu nebo jsou ovládané manuálně. Takovéto

prvky lze použít pro popis vnější tepelné zátěže, například slunečního záření, které lze zadat podle orientace a sklonu konstrukce kam záření dopadá.

Popsané modely lze využít pro analýzu chování konstrukce a následnou optimalizaci parametrů. Pro rychlé určení výsledků lze použít dále popsanou metodu syntézy. Schéma výpočtu je uvedeno na obr. 1. Po analýze je zjištěn průběh vnitřní teploty vzduchu a s uvažováním požadovaných hodnot je definován požadavek na změnu. Pro tento časový průběh je vypočtena hodnota veličiny, která způsobí požadované změny. Konkrétně to může být průběh toku jak pro případ vytápění, tak i chlazení.

Odezva systému v uzlu k na změny v uzlu 1 je definována rovnicí

$$T_k(j\omega_i) = H(j\omega_i) \cdot T_1(j\omega_i) \quad (1)$$

kde

$H(j\omega_i)$ je matice popisující strukturu systému a zahrnuje stavební konstrukci i systém TZB,

$T_1(j\omega_i)$ je zátěžová veličina působící ve vstupním uzlu 1 modelu,

$T_k(j\omega_i)$ je výsledná veličina – teplota v uzlu k .

Proměnné lze definovat ve frekvenční oblasti

$$T_1(j\omega_i) = \sum_{i=1}^n |M_i| \cdot e^{j\varphi_i} \quad (2)$$

kde

M_i, φ_i jsou moduly a argumenty vstupní veličiny,

$$H(j\omega_i) = \sum_{i=1}^n |H_i| \cdot e^{j\varphi'_i} \quad (3)$$

kde

H_i, φ'_i jsou moduly a argumenty systému.

Rovnice 1 je základem pro metodu analýzy. V syntéze je třeba řešit následující rovnici, kdy jsou pro požadované hodnoty v uzlu k vypočteny hodnoty v uzlu 1 .

$$T_k = T_m + \sum_{i=1}^n M_i \cdot H_i \cdot \sin(i \cdot t + \varphi_i + \varphi'_i) \quad (4)$$

kde
 T_m je střední hodnota veličiny T_k v uzlu k .

Pro výpočet byl vytvořen autorem program k analýze i syntéze problému. Program umožňuje sestavení libovolné struktury tvořené odpory, kapacitami, rozprostřenými parametry i zdroji.

PŘÍKLAD

Metoda je použita pro výpočet chladicího výkonu v letním období pro jednu místnost budovy s lehkým obvodovým pláštěm bez vnějších clonících prvků. Výstupem ze simulace bude průběh chladicího výkonu během dne s cílem zjištění maximálního potřebného výkonu pro zajištění chlazení. Standardní metoda je stanovení tepelných toků pronikajících do interiéru z vnějšího prostředí. Tento přístup uvažuje zjednodušeně vliv prvků, přes které proniká tepelný tok do interiéru a nepracuje se zpožděním způsobeným vlivem všech tepelných kapacit v systému.

Modely použité pro výpočet jsou uvedeny na obr. 2. Modely pracují pouze se soustředěnými parametry, protože se jedná tepelně-technicky o lehkou konstrukci, kdy oddělené prvky pro popis obvodové konstrukce vyhovují s potřebnou přesností.

Model A slouží k výpočtu změny teploty vnitřního vzduchu v závislosti na změnách slunečního záření během letního dne (konec června). Model používá dva zdroje tepelného toku, které reprezentují dopadající tepelný tok na neprůhlednou část konstrukce a na okno. Odpor připojený k uzlu 5 popisuje ztrátu tepla ochlazením povrchu neprůhledných konstrukcí konvekcí [5]. Na uzlu 1 je zadán celkový tepelný tok, který dopadá na fasádu a následně se tento tok dělí na oba tepelné zdroje. Množství tepelného toku připadající na jednotlivé zdroje je popsán činitelem regulace G_o a G_w . V tomto případě, na rozdíl od běžného použití, parametr zahrnuje geometrické rozměry prvků a v případě okna i propustnost slunečního záření (0,81 [-]). U neprůhledné části obvodového pláště je započítána pohltivost povrchu fasády (0,36 [-]).

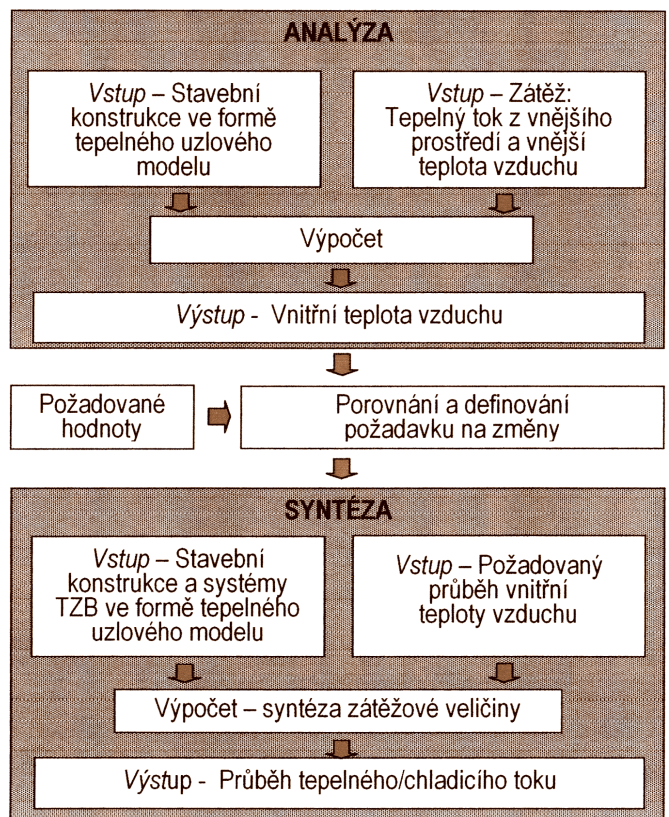
Model B je využit pro výpočet změn teploty vnitřního vzduchu v závislosti na změnách teploty vnějšího vzduchu. Výsledná teplota vnitřního vzduchu je stanovena s uvažováním obou vlivů.

Následně je použit model C, který vypočte pro požadované změny teploty vnitřního vzduchu požadovaný průběh výkonu chladicího zařízení. Hodnota G_T je rovna 1 což ve výpočtu znamená odvod tepla z místnosti. Změny jsou definovány pro uzel teploty vnitřního vzduchu (uzel 3) a výsledky jsou získány pro uzel systému TZB (uzel 1). Jedná se zde tedy o syntézu zátěžové veličiny.

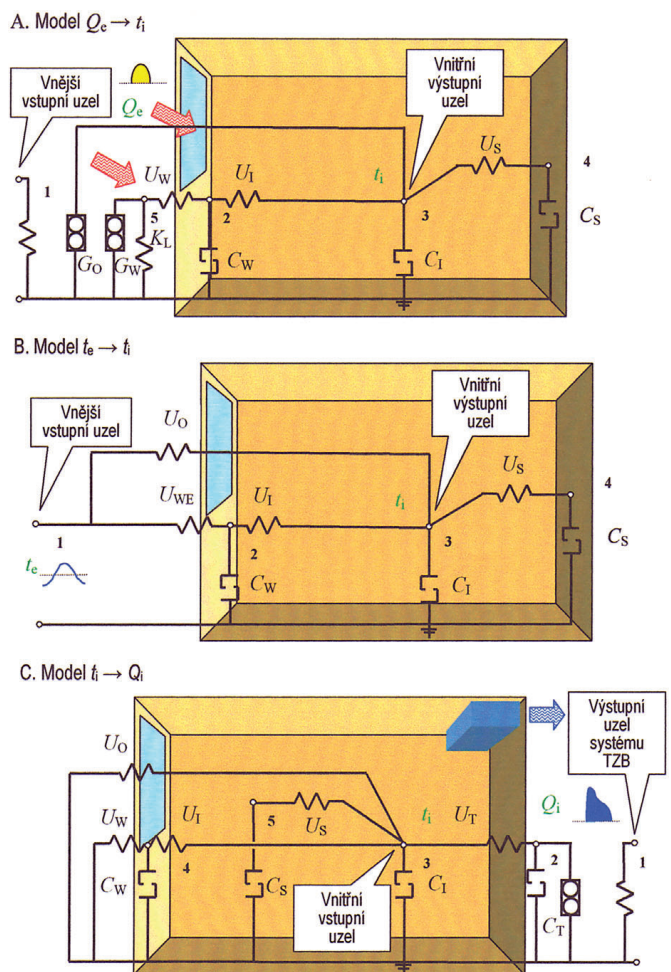
VÝSLEDKY

Na obr. 3 jsou zobrazeny vnější zátěžové veličiny a v tabulce 1 jsou hodnoty parametrů modelu. Vodivosti jsou stanoveny na základě hodnot součinitele prostupu, případně přestupu a geometrických rozměrů konstrukce. Podobně jsou vypočteny tepelné kapacity z hodnot měrné hmotnosti a měrné tepelné kapacity upravené ve vztahu k zadávané časové jednotce při výpočtu, v tomto případě to jsou hodiny. Činitele regulace definují tepelný tok na základě změny potenciálové veličiny v řídicím uzlu. V modelech A a C je to uzel 1.

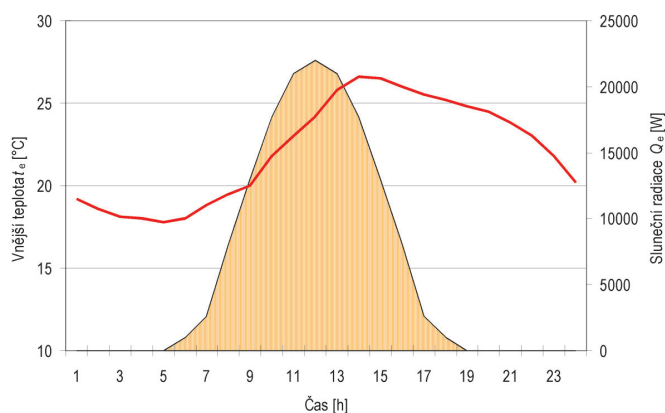
Výsledná vnitřní teplota vzduchu působením tepelných zátěží je uvedena na obr. 4. Maximální teplota je $t_i = 33\text{ }^\circ\text{C}$. Pro definování změn teploty je třeba vymezit interval, ve kterém teplota překračuje dovolenou hodnotu a interval, ve kterém je místnost v provozu. Nevyužívání místnosti v části dne je další komplikací výpočtu. Jde ovšem o běžný stav, který je třeba



Obr. 1 Proces výpočtu tepelného/chladicího toku pro dosažení požadovaného průběhu vnitřní teploty vzduchu



Obr. 2 Tepelné modely pro analýzu a syntézu

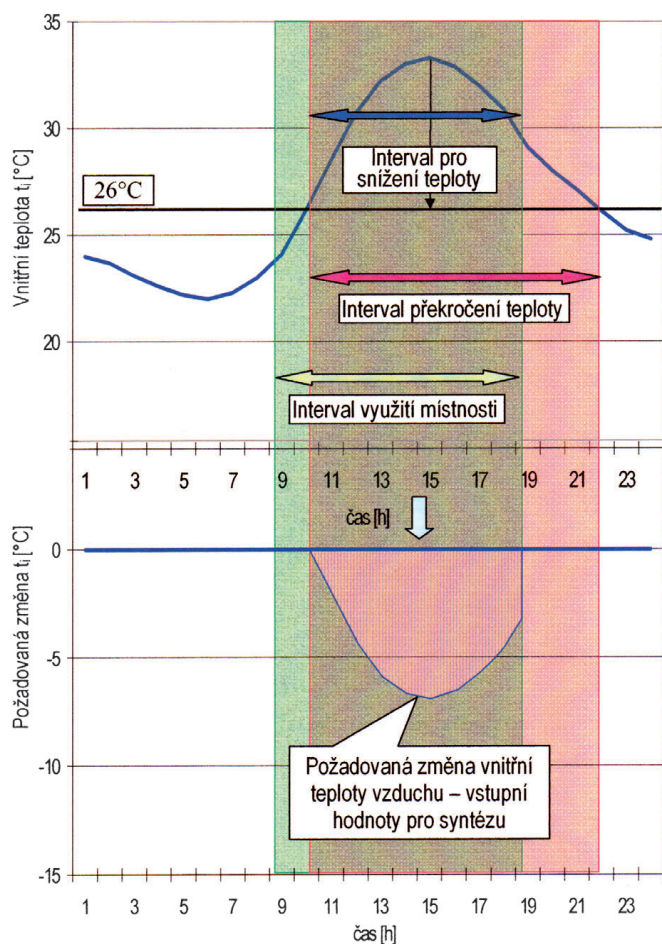


Obr. 3 Časový průběh vnější zátěže

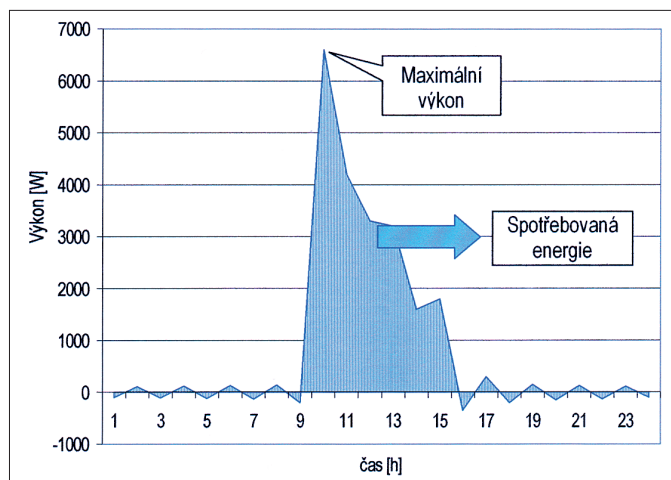
Tab. 1 Hodnoty parametrů pro všechny modely

U_W	U_{WE}	U_i	U_s	U_o	U_T	K_L
[W/K]						
3,8	3,7	111,1	180,2	53,2	255,0	181,7
C_W	C_i	C_s	C_T	G_o	G_W	G_T
[Wh/ K]				[W/K]		
413	1194	5902	186	-0,210	-0,127	1,000

zohlednit. Pro požadovanou přípustnou hodnotu $t_i = 26\text{ °C}$ je stanoven požadavek na změnu teploty a ten je zadán pro výpočet chladicího výkonu. Výsledný průběh je zobrazen na obr. 5. Z vypočtených hodnot nebo z grafu lze stanovit maximální výkon a potřebnou energii.



Obr. 4 Časový průběh vnitřní teploty vzduchu

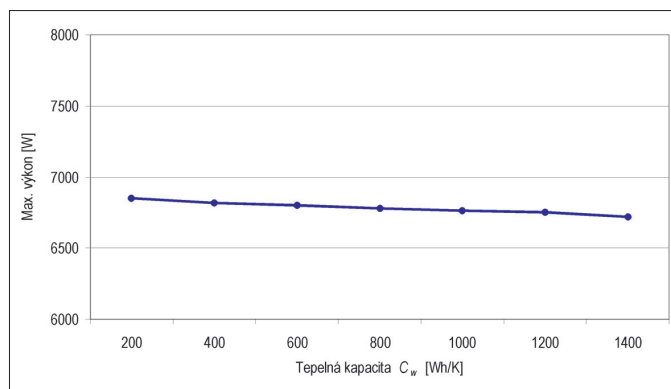


Obr. 5 Časový průběh chladicího výkonu

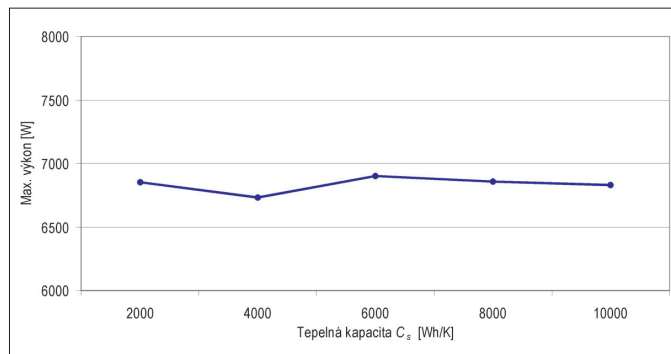
V příkladu se pracuje s modelem popisujícím dynamické chování systému, a proto je zajímavé zjistit vliv jednotlivých kapacit na maximální výkon chladicího zařízení. Výsledky jsou uvedeny na obr. 6 až 9. Maximální hodnota je stanovena pro určitý rozsah měnících se hodnot tepelných kapacit. Ostatní tepelné kapacity byly konstantní. Z výsledků je pozorovatelný malý vliv kapacity obvodové konstrukce stěny. Podstatný je vliv kapacity chladicího zařízení (zdroj a distribuční prvky) a kapacity interiéru (zařízení). Málo významný je v tomto příkladu i vliv vnitřních stavebních konstrukcí. Na základě výpočtů jiných budov lze konstatovat, že při rozsáhlejších použití těžších konstrukcí mají i tyto prvky podstatný vliv.

ZÁVĚR

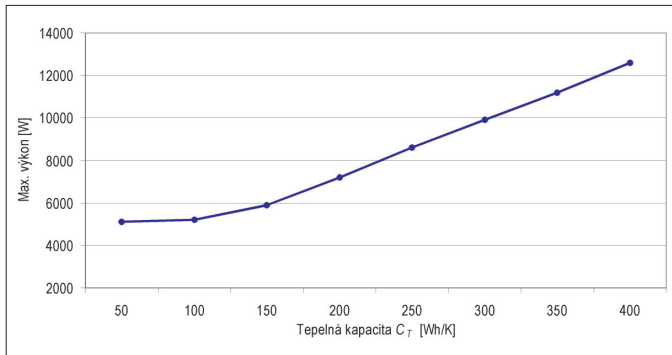
Metoda dokáže velmi přesně stanovit průběh chladicího výkonu v místnosti. Při využití výpočetní techniky není výpočet obtížný, přesto lze prak-



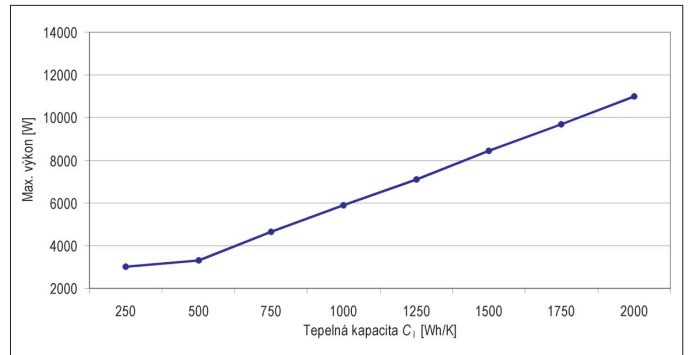
Obr. 6 Maximální výkon v závislosti na tepelné kapacitě obvodové stěny



Obr. 7 Maximální výkon v závislosti na tepelné kapacitě vnitřních stavebních konstrukcí



Obr. 8 Maximální výkon v závislosti na tepelné kapacitě systému chlazení/vytápění



Obr. 9 Maximální výkon v závislosti na tepelné kapacitě interiéru

tické použití očekávat více při navrhování vzduchotechnických zařízení pro větší a významnější prostory, kde se vyplatí věnovat návrhu více pozornosti. Výhody metody lze shrnout:

- Integruje do jednoho modelu stavební konstrukci i systémy TZB.
- Pracuje s tepelnými kapacitami, které podstatně ovlivňují dynamické chování.
- Zvyšuje produktivitu práce na projektech náročných staveb nebo významných vnitřních prostor.

Důležitým výstupem použití simulačních metod je i pochopení chování dynamických systémů. Přispívá tedy k růstu znalostí pracovníků, které se dají uplatnit při zpracování dalších projektů.

Použité veličiny

$U_W = S_W / R_W$	– tepelná vodivost obvodové stěny	[W/K]
$U_{WE} = S_W / (R_e + R_W)$	– tepelná vodivost obvodové stěny a na vnějším povrchu stěny	[W/K]
$U_I = S_W / R_i$	– tepelná vodivost na vnitřním povrchu obvodové stěny	[W/K]
$U_S = S_S / R_i$	– tepelná vodivost na povrchu vnitřních stavebních konstrukcí	[W/K]
$U_O = S_O / R_O$	– tepelná vodivost okna	[W/K]
$U_T = S_T / R_T$	– tepelná vodivost na povrchu chladicího systému	[W/K]
$C_W = c_W \cdot M_W / 3600$	– tepelná kapacita obvodové stěny	[Wh/K]
$C_I = c_I \cdot M_I / 3600$	– tepelná kapacita interiéru	[Wh/K]
$C_S = c_S \cdot M_S / 3600$	– tepelná kapacita vnitřních stavebních konstrukcí	[Wh/K]
$C_T = c_T \cdot M_T / 3600$	– tepelná kapacita chladicího systému	[Wh/K]
G_O	– činitel regulace pro okno	[W/K]
G_W	– činitel regulace pro obvodovou stěnu	[W/K]
G_T	– činitel regulace chladicího systému	[W/K]

R	– tepelný odpor	[m ² K/W]
S	– plocha	[m ²]
c	– měrná tepelná kapacita	[J/(kg K)]
M	– hmotnost	[kg]
ρ	– objemová hmotnost	[kg/m ³]
d	– tloušťka konstrukce	[m]

Poznámka:

Tepelné kapacity se dělí 3600 s/h, protože ve výpočtu se čas zadává v hodinách.

Poděkování

Příspěvek vznikl s podporou grantu MŠMT 6840770006.

Kontakt na autora: vytlacil@fsv.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] Athienitis, A. K., Sullivan, H. F. Hollands, K. G. T. Discrete Fourier series models for building auxiliary energy loads based on network formulation techniques. *Solar energy*. 1987. Vol. 39, 203–210
- [2] Hong, T., Chou S.K., Bong, T.Y. Building simulation: an overview of developments and information sources. *Building and Environment*. 2000. Vol. 35, No. 4, 347–361
- [3] Vytlačil, D. Design of building parameters by means of theory of tolerances. Proceedings of 8th International IBPSA conference Building Simulation 2003. Vol.3, IBPSA, 1333–1337
- [4] Vytlačil, D. Time-dependent load determination in thermal dynamic models. Proceedings of CIB World Building Congress, 2004
- [5] Kreith, F., Kreider, J.F., Principles of solar engineering, McGraw-Hill, 1987. ■