

Využití počítačové simulace při návrhu klimatizace nové galerie v objektu Sovových mlýnů

Simulation in engineering the ventilation and air-conditioning of a new art gallery in Sovovy mlýny

Ing. Miloš LAIN*,
Ing. Martin BARTÁK*,
Prof. Ing. František DRKAL, CSc.*,
Doc. Dr. Ir. Jan. L. M. HENSEN**

Recenzent
Ing. Zdeněk Lerl

Článek popisuje využití počítačového modelování a simulace při návrhu větrání a klimatizace nové galerie vzniklé v objektu Sovových mlýnů. Jednou z nevýhod standardního návrhu klimatizačního zařízení je podhodnocení akumulace objektu, což u masivních staveb vede ke značnému předimenzování klimatizačního zařízení. Prezentovaná studie vedla nejen k výraznému snížení provozních a investičních nákladů, ale i k minimalizaci zásahů do cenné budovy.

Klíčová slova: počítačová simulace, akumulace tepla, parametry prostředí

The paper elaborates the modelling and simulation work that was carried out to support the design team of the ventilation and air-conditioning system in the future gallery situated in the Sovovy Mlýny. One of the main disadvantages of the traditional engineering design methods for HVAC systems is the underestimation of the impact of thermal accumulation in the building structure. This often leads to oversized heating and cooling system components, particularly in the case of historical buildings usually with very heavy constructions. The current study helped not only to lower the investment costs to a significant extent but most of all to minimize the possible changes in construction and appearance of a valuable historical building.

Key words: computer simulation, heat accumulation, environment parameters

Objekt Sovových mlýnů byl postaven ve 14. století a během stovek let své existence prošel řadou stavebních úprav a rekonstrukcí. Poslední z nich proběhla v roce 2000 až 2001, kdy byl tento velmi cenný objekt, stojící přímo v srdci Prahy na Kampě, rekonstruován na kulturní a společenské centrum, jehož součástí je i galerie. Předběžný projekt klimatizace vycházel ze standardních postupů výpočtu tepelné zátěže a předpokládal chladicí výkon 100 kW. Instalace zařízení o tomto výkonu by však byla krajně obtížná a představovala by rozsáhlé zásahy do stavebních konstrukcí historického objektu. Praktické zkušenosti s mikroklimatem v masivních stavbách podobného typu však ukazují na možnosti dodržení požadovaných parametrů i bez nuceného větrání a klimatizace. Pro posouzení těchto eventualit byla zvolena metoda počítačové simulace, která měla prokázat varianty provozování galerie bez klimatizace a určit potřebné chladicí výkony v případě nutnosti nucené úpravy parametrů prostředí.



Obr. 1 Pohled na Sovovy mlýny před rekonstrukcí

INTEGROVANÁ POČÍTAČOVÁ SIMULACE

Počítačová simulace je jednou z nejnáročnějších metod pro posouzení chování budov a systémů techniky prostředí, kterou lze uplatnit při projektování klimatizačních zařízení.

* ČVUT v Praze, FSI, Ústav techniky prostředí, e-mail: lain@fsid.cvut.cz

** Knowledge Center Building & Systems TNO – TU/e, Technische Universiteit Eindhoven

Od standardních návrhových postupů se liší především kompletním zahrnutím dynamiky chování budovy a systému a to je i důvod proč je vhodná pro řešení systémů s vysokou akumulací.

Hlavní nevýhodou počítačových simulací jsou výrazně vyšší nároky při sestavování modelu a zpracování vlastní simulace.

Nároky jsou kladeny jak na vstupní informace a použitou výpočetní techniku, tak na odbornou způsobilost osob řešících daný problém. Na druhé straně

však simulace umožňují velmi detailní analýzu a porovnání několika variant řešení.

Integrovaná simulace nepracuje pouze s budovou, ale zahrnuje i chování systémů s budovou spojených (vytápění větrání a klimatizace), zdrojů energie a navíc zohledňuje i změny vnitřních i venkovních podmínek.

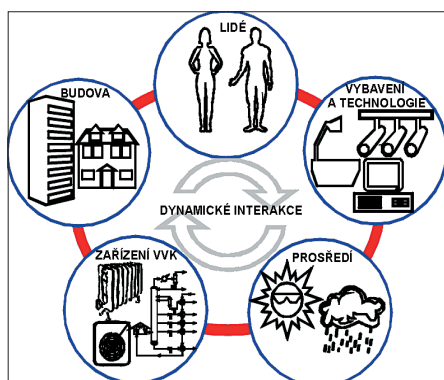
Vzhledem k tomu, že výsledky počítačové simulace jsou velmi podrobné, lze je často použít i k vyhodnocení dalších parametrů (například parametrů tepelného komfortu).

ESP-r

Pro integrovanou počítačovou simulaci bylo použito simulační prostředí ESP-r. Tento program byl vyvinut na University of Strathclyde v Glasgow a představuje komplexní nástroj pro počítačové simulace budov a systémů techniky prostředí. Program ESP-r byl vybrán jako evropský referenční model pro simulace energetických bilancí budov.

Program ESP-r je založen na komplexním numerickém řešení všech energetických toků v budově a systému.

Prostředí programu je graficky orientované a obsahuje i podklady o klimatu a stavebních konstrukcích. Výpočty zahrnují stínění, spektrální a úhlové zohlednění optických vlastností oken, určení parametrů komfortu, modelování proudění vzduchu a jiné vlivy (viz [1], [2], [8]). Simulace vychází z ho-



Obr. 2 Schéma integrované počítačové simulace

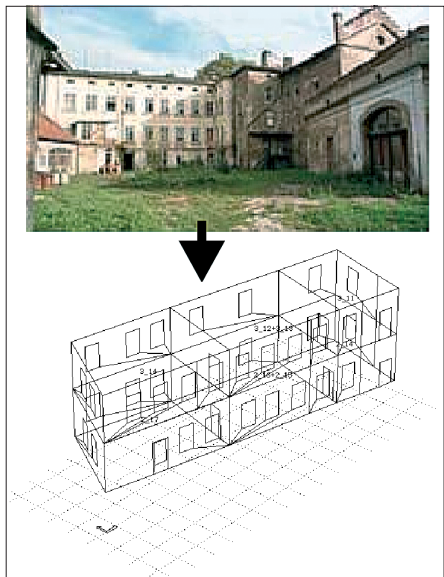
dinových klimatických dat, a to buď z vybraného časového období nebo se využívá referenční rok pro dané místo (viz [3]).

Při počítačové simulaci galerie byly využity klimatické údaje letních měsíců roku 1997, která lze považovat za extrémní. Objekt má velkou akumulaci, a proto jsou dlouhodobě vysoké teploty a intenzity radiace z roku 1997 pro simulace velmi vhodné.

Výsledky simulace jsou prezentovány ve vybraném týdnu 21. 8. až 27. 8. 1997, kdy bylo dosahováno nejvyšších teplot.

POPIS BUDOVY A MODELU

Model simulace znázorňuje 6 zón, které odpovídají členění místností galerie v druhém a třetím podlaží. Budova je velmi masivní, obvodové stěny jsou ze smíšeného cihlového zdiva o tloušťce asi 800 mm s výklenky pro okna. Model předpokládá použití špaletových oken s vnějšími křídly osazenými dvojsklem diatherm a vnitřním jednoduchým sklem (stav po rekonstrukci). Stávající vnitřní dřevěné okenice budou zachovány. Model zahrnuje jak geometrii vy-



Obr. 3 Pohled na budovu a ESP-r model řešené části

braných prostor a složení jednotlivých stěn, tak optické vlastnosti oken.

V podkroví budovy nad galerií je navržen klimatizovaný depozitář (24 °C), v přízemí pod galerií bude vybudována restaurace bez klimatizace.

Dvorní část fasády je orientována jižním směrem. V modelu bylo současně respektováno i zastínění sousedními budovami.

Parametry prostředí bez klimatizace

Počítačovou simulaci byly stanoveny parametry prostředí v galerii bez chlazení. Posuzován byl vliv intenzity větrání venkovním vzduchem, počtu osob v galerii a osvětlení galerie. Vzhledem k rozsahu příspěvku jsou prezentovány pouze průběhy průměrů teplot ze všech šesti místností galerie.

Z obr. 4 je patrný vliv **intenzity větrání** venkovním neupraveným vzduchem (0,1 až 1,5 1/h) pro galerii bez přítomnosti osob a s otevřenými okenicemi. Vzhledem k tomu, že teploty v galerii bez klimatizace jsou vyšší než teploty venkovního vzduchu, teploty s rostoucí intenzitou větrání klesají.

Na obr. 5 je znázorněn vliv **počtu osob** na vnitřní teploty v neklimatizované galerii. Tato simulace slouží pro analýzu citlivosti mikroklimatu místností na počet návštěvníků. Simulace ukázala, že při intenzitě větrání 0,5 1/h a otevřených okenicích vzroste při vyšší návštěvnosti teplota vzduchu o cca 3 K oproti stavu bez přítomnosti osob.

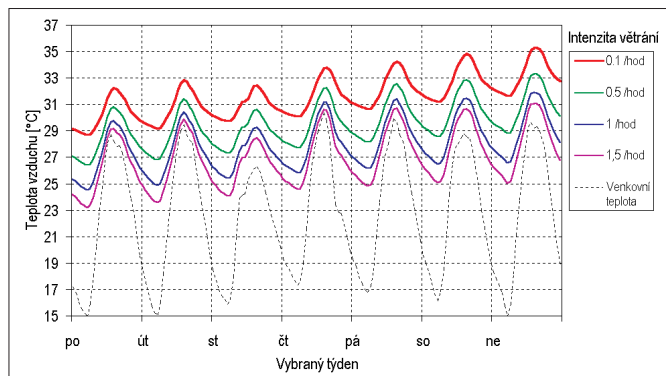
Obr. 6 dokumentuje vliv **uzavření dřevěných okenic**, kterými jsou opatřena všechna okna v galerii. Při provozu galerie s uzavřenými okenicemi byl v jedné variantě předpokládán vý-

kon umělého osvětlení 45 W/m². V této variantě jsou však teploty výrazně vyšší oproti stavu kdy nebylo předpokládáno umělé osvětlení.

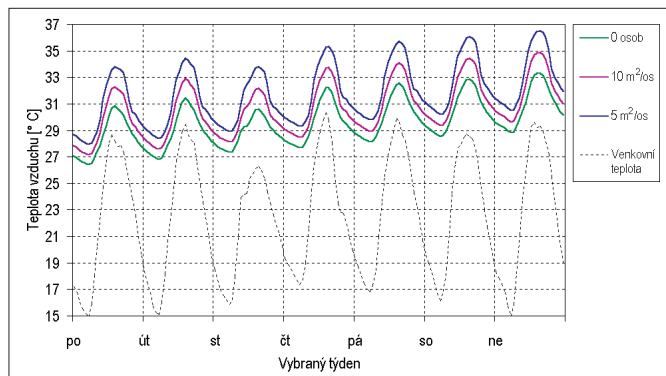
Z výsledků počítačové simulace galerie bez klimatizace vyplynulo, že přijatelné teploty (průměr 26 °C a maxima 28 °C) budou dodrženy pouze při zavřených okenicích bez umělého osvětlení. Takové podmínky však nejsou při provozu galerie možné. Proto je třeba prostory klimatizovat.

Měření teplot

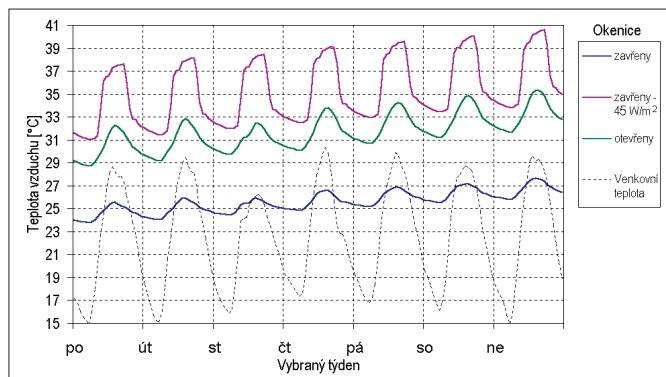
V rámci řešení problému byly měřeny teploty vzduchu v prostorách galerie již před realizací rekon-



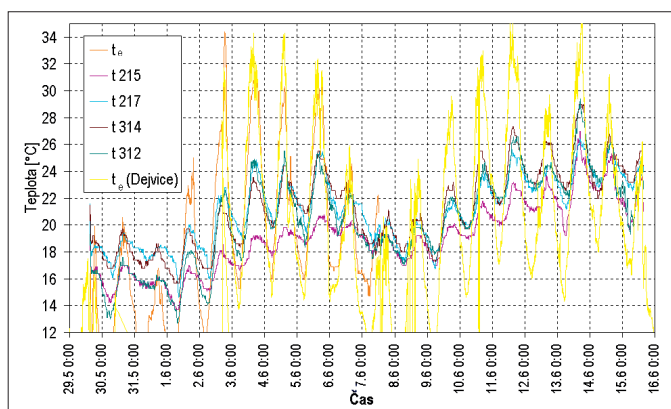
Obr. 4 Průměrná teplota vzduchu pro různé intenzity větrání, při otevřených okenicích a bez přítomnosti osob v galerii



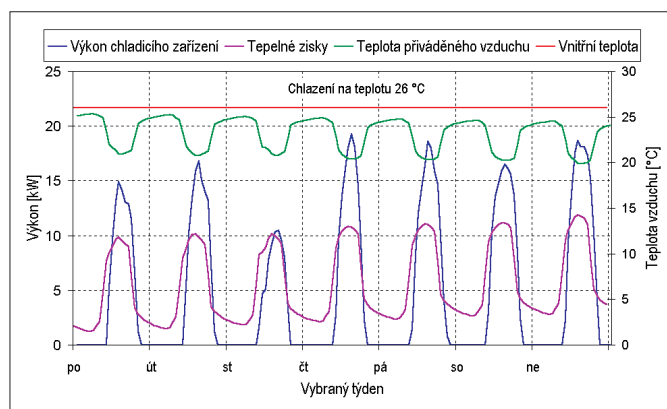
Obr. 5 Průměrná teplota vzduchu pro různý počet osob v galerii, při otevřených okenicích a intenzitě větrání 0,5 1/h



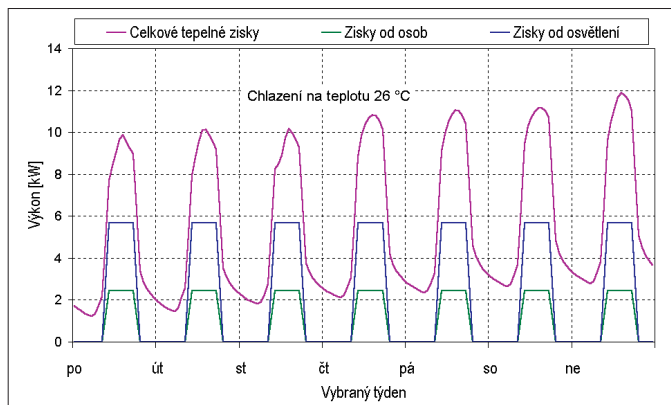
Obr. 6 Průměrná teplota vzduchu pro různé varianty osvětlení prostor, při intenzitě větrání 0,5 1/h a bez přítomnosti osob v galerii



Obr. 7 Teploty vzduchu naměřené v objektu



Obr. 9 Průběh potřebných chladicích výkonů



Obr. 8 Průběh a rozložení tepelných zisků galerie

strukce. Měření probíhalo v období mezi 29. 5. a 16. 6. 2000, kdy dosahovaly teploty vzduchu extrémních hodnot (obr. 7). Nicméně, vzhledem k vysoké tepelné akumulaci objektu, lze očekávat ještě vyšší teploty vzduchu uvnitř prostor při podobných podmínkách na konci léta (viz simulovaný případ). Během měření nebylo možné zajistit režim provozu místností (probíhající rekonstrukce), proto nemohly být výsledky měření použity přímo ke kalibraci modelu.

Naměřené teploty vzduchu (až 29 °C) však potvrdily potřebu chlazení.

Potřeba chladu pro klimatizaci galerie

Potřebný chladicí výkon klimatizačního zařízení byl simulací stanoven pro podmínku dodržení konkrétní teploty 26 °C.

Byl zvolen režim s uzavřenými okenicemi pouze na jižní straně a s umělým osvětlením jedné třetiny plochy galerie.

Na základě výsledků simulace (obr. 8 a 9) byly navrženy systémy větrání a klimatizace a rovněž byly vypočteny teploty přiváděného vzduchu a potřebný citelný výkon chladicího zařízení.

Při přívodu 6 000 m³/h venkovního vzduchu a požadované vnitřní teplotě 26 °C je maximální potřebný výkon pouze 19 kW.

ZÁVĚR

Počítačovou simulací galerie v objektu Sovových mlýnů bylo prokázáno, že provoz galerie není možný bez chlazení. Hodnota potřebného chladicího výkonu byla určena na 19 kW, což představuje výrazné snížení oproti hodnotám předběžně určeným standardním výpočtem.

Skutečný potřebný výkon určený simulací je díky zahrnutí akumulace masivní stavby pouhou pětinou původního předpokladu.

Na základě výsledků počítačové simulace bylo navrženo a realizováno klimatizační zařízení nejen výrazně jednodušší a méně nákladné, ale především s minimálními zásahy do historicky cenného objektu.

Prezentovaný příklad ukazuje možnosti uplatnění počítačových simulací při dimenzování zařízení větrání, vytápění a klimatizace a při analýzách chování budovy.

V České republice však stále ještě nejsou plně využívány široké možnosti které počítačové simulace nabízejí, a to především v počátečních stádiích vzniku projektu.

U nově stavěných budov lze simulace využívat zejména při koncepčním řešení budovy. A to nejen pro optimalizaci zařízení techniky prostředí, ale i stavebních prvků a složení konstrukcí s ohledem na úspory energie a vhodné využití dostupných zdrojů.

Literatura:

- [1] CLARKE, J. A. 1985. „Energy Simulation for Building Design“. Adam Hilger Ltd., Bristol
- [2] HENSEN, J. L. M. 1991. „On the Thermal Interaction of Building Structure and Heating and Ventilation



Obr. 10 Budova s galerií po rekonstrukci



Obr. 11 Sovovy mlýny po rekonstrukci

System“. PhD thesis. Technische Universiteit Eindhoven

- [3] BARTÁK, M., HENSEN, J. L. M., LAIN, M., PAULO-VIC, L. 2000. „Nová solární data v klimatické databázi TRY Praha“. Sborník Simulace budov 2000. IBPSA-CZ, Praha
- [5] BARTÁK, M., DRKAL, F., HENSEN, J. L. M., LAIN, M. 2000. „Analýza tepelného stavu prostředí galerie v objektu Sovových mlýnů“. Výzkumná zpráva. ČVUT v Praze, Praha
- [6] BUNN, R. 2001. „Specifying on the Net“. Building Services Journal. No. 2, 49–50. CIBSE, London
- [7] DRKAL, F. 2000. „Simulační techniky v technice prostředí budov a úloha IBPSA-CZ“. Sborník Simulace budov 2000. IBPSA-CZ, Praha
- [8] ESP-r (Environmental Systems Performance – research) software; www.esr.strath.ac.uk
- [9] LUKES, Z. 1999. „Soutěž na Sovovy mlýny v Praze“, Neviditelný pes, <http://pes.internet.cz>.

Komentář projektanta ke článku „Využití počítačové simulace při návrhu klimatizace nové galerie v objektu Sovových mlýnů“

Projekčně naše firma získala zakázku na zajištění mikroklimatu ve výstavních sálah galeriie Nadace Jana a Medy Mládkových na jaře 1999. Ačkoli byl již zpracován projekt pro stavební povolení, byla naše firma požádána o technicko-ekonomickou analýzu, neboť odhady nákladů jak investičních, tak i provozních výsoce převyšovaly možnosti investora (Magistrát hl. města Prahy) a provozovatele (Nadace Jana a Medy Mládkových).

Při této analýze vyplynuly následující skutečnosti:

- ❑ při zadání projektu byly velmi přísně, až téměř nesmyslně, stanoveny základní parametry mikroklimatu (velmi úzké toleranční pole),
- ❑ při zpracování projektu bylo důsledně použito ČSN 73 0548 „Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostor“, která nezahrnuje akumulaci tepla a zvláště chladu do stavby, což u této stavby, jejíž charakteristiku lze stanovit jako středně těžkou až těžkou, je možné s výhodou využít,
- ❑ nebyly v projektové dokumentaci vzaty v úvahu i ostatní provozní technické aspekty galerie např. nutnost zastínění oken (či zavření okenic) z důvodu zabránění dopadu přímých slunečních paprsků na obrazy. Z tohoto důvodu je možná i určitá redukce výpočtu tepelných zisků od radiace.

Na základě předchozí spolupráce s ČVUT – FSI, katedrou techniky prostředí na obdobných zakázkách se naše projekční firma rozhodla i v tomto případě pro obdobnou spolupráci, jejímž výsledkem by byl návrh klimatizačního zařízení méně náročného jak z hlediska investic, tak i z hlediska provozu.

Návrh řešení vycházel i z požadavku zástupce provozovatele, aby se v prostoru galerie minimálně vyskytovala tlaková voda a aby nevznikala kondenzace (jak v kondenzátních vanách jednotek typu fan-coil, dále jen FCU z důvodu možnosti šíření bakterií, tak i náhodně porušením parotěsných izolací na rozvodech chlazené vody).

Po zvážení všech možných variant jak z hlediska technického, stavebních možností i investičních možností, byl vybrán systém s konstantním průtokem tepelně upraveného čerstvého vzduchu přiváděného do všech výstavních sálů.

Tento systém, nazývaný též jako TOP – COOLING, využívá v maximální možné míře možnosti stavby, průniku tepla a chladu do obvodových a vnitřních konstrukcí (včetně vnitřního vybavení), a tím i zbrždění okamžitého vzrůstu teploty v daném prostoru při dopadu slunečního záření na prosklené plochy.

Dále ekonomicky využívá kolísání venkovních teplot v průběhu dne systémem automatické regulace k ekonomickému nočnímu předchlazení prostor studeným vzduchem. Tato výhoda je v tomto případě vyzdvížena polohou Sovových mlýnů Na Kampě, v parku, v těsné blízkosti Vltavy, kde teplota nasávaného vzduchu pro klimatizaci není zatížena akumulací tepla do městské zástavby.

Jak je uvedeno v článku, byla ověřena správnost návrhu klimatizačního zařízení pro dosažení mikroklimatu v předem stanovených tolerančních polích spoluprací s katedrou techniky prostředí ve dvou krocích:

- ❑ změření teploty a vlhkosti vzduchu ve stávajícím objektu využívající faktu existence této stavby jako ověření tepelně technických vlastností budovy bez vnitřního vybavení a návštěvníků;
- ❑ využití počítačové simulace daného problému a ověření dosažených výsledků měření.

Postup měření i výsledky v obou případech jsou uvedeny v citovaném článku, nicméně bych chtěl uvést pozitivní dopady jak z investičního, tak i z provozního hlediska.

- ❑ Byl podstatně snížen nárok na výrobu chladu i distribuci chladu.
- ❑ V praxi toto znamenalo, v energetických profesích, snížení investičních nákladů o cca 6 až 7 mil. Kč, ve stavebních profesích o 2 mil. Kč (řešení dle projektu pro stavební povolení předpokládalo vybudování nové strojovny chlazení v suterénu, což vyžadovalo nové statické zajištění budov).
- ❑ Byly podstatně sníženy provozní náklady energetického rázu, tj. snížila se spotřeba elektrické energie na výrobu chladu.
- ❑ Jako pozitivní lze označit, i z důvodu ekonomického provozu, poměrně rovnoměrné rozložení výroby chladu po celý den a dále možnost ochlazování vzduchu budovy volným chlazením venkovním vzduchem – „free coolingem“ v nočních hodinách.
- ❑ Byly odstraněny v maximální míře i provozní omezení využívání galerie z důvodu požadavků na obsluhu a údržbu FCU.
- ❑ Z důvodu snížení počtu akčních částí systému (FCU, ventily apod.) se také zvýšil provozní spolehlivost a náklady na náhradní díly klimatizačních zařízení.

Projekční řešení z hlediska techniky prostředí bylo velmi obtížné a výsledné řešení je značným kompromisem vzhledem k architektonickému řešení, které je v daném objektu bráno jako dominantní.

Hlavním článkem klimatizačního zařízení v prostorech Sovových mlýnů je strojovna vzduchotechniky a chlazení v suterénu objektu A v těsné blízkosti plynové kotelny.

Ve strojovně jsou umístěny dvě klimatizační a vzduchotechnické jednotky, jednak pro vlastní výstavní sály ($6\,000\text{ m}^3\text{h}^{-1}$) a pro restauraci a přízemí ($6\,500\text{ m}^3\text{h}^{-1}$). Vzduch je nasáván přes nasávací žaluzii na úrovni přízemí na severní fasádě objektu nad zatravněnou plochou. Přírodní jednotka vzduchu filtruje (třída G4, F7), ohřívá (popř. chladí), eventuálně zvlhčuje parním zvlhčovačem napojeným na elektrický vyvíječ. Zařízení vzduch částečně cirkuluje. Přebytný vzduch je vyfukován mimo objekt. Před a za jednotkou jsou do potrubí umístěny tlumiče hluku.

Vzduch je dopravován standardním vzduchotechnickým přírubovým potrubím z ocelového pozinkovaného plechu s tepelnou izolací, vedeným převážně ve stavebních nikách. Vzduchu je distribuován v exponovaných výstavních sálech objektu A především atypickými stojacími velkoplošnými výustěními, v ostatních objektech standardními distribučními prvky.

Systémy pro větrání a klimatizaci nejsou vybaveny zpětným získáváním tepla, jednak z důvodu dodržení určitého stálého přetlaku, jednak z prostorových důvodů i neekonomičností jeho využívání. Kromě tohoto centrálního systému klimatizace výstavních sálů jsou v prostorech Sovových mlýnů dále rozmístěna další vzduchotechnická a klimatizační zařízení doplňující tento centrální systém. Především jde o již citované větrání restaurace, klimatizace depozitářů obrazů a badatelný, které se nacházejí v podkrovní objektu A (jednotkami přesné klimatizace).

Dále jsou instalována menší zařízení pro odvětrání hygienických zařízení, zajištění požární bezpečnosti i bezpečného a spolehlivého chodu zde umístěných technologií.

Jako zdroje chladu je zde použito chladicí jednotky s odděleným kondenzátorem. Chladicí jednotka je umístěna ve strojovně vzduchotechniky v suterénu, kondenzátor je situován nad hlavním schodištěm do prostoru krovu, kde je prostor pro kondenzátor exteriérově upraven, aby nehyzdil celkový dojem nově rekonstruované budovy. Celkový chladicí výkon $34,5\text{ kW}$ je chladicí vodou dopravován do výměníků klimatizačních jednotek.

Ing. Jiří Petlach