

# Historie skloubená s moderní technikou

Národní divadlo (ND) je stále významným symbolem, který spojuje obyvatele České republiky. Stále širší různorodost v nabídce kulturních zážitků a aktivit pro volný čas divadlu ubraly trochu jeho výjimečnosti a tento fakt se projevuje i v oblasti ekonomické. Doba, kdy rekonstrukce Národního divadla a výstavba jeho nové scény byla prioritním státním úkolem, je již pryč. Vedení divadla musí velmi pozorně sledovat veškeré investiční a nákladové položky. To byl též jeden z hlavních důvodů, proč se modernizace energetického hospodářství souboru budov divadla stala jednou ze základních otázek jeho budoucnosti. Jedná se o technicky a přístupem k využití energií zajímavý projekt, a proto jsem požádal o rozhovor a technické podklady řadu odborníků, kteří se na ní podíleli. Seznam těch, kteří měli k modernizaci nejvíce co říci na základě své práce najdete na konci článku. Článek je zpracován volnou formou rozhovoru, do kterého jsou vloženy údaje z technické zprávy a jiných dokumentů.

**Josef Hodboď**

*Slavořínek:*

První konkrétní kroky, na jejichž konci je současný stav, lze datovat přibližně do roku 2005, kdy si technický úsek pod vedením Miroslava Růžičky nechal zpracovat analýzu systémů vytápění, klimatizace a všech spotřebičů energie s cílem navrhnout, co by bylo vhodné zmodernizovat. V roce 2006 proběhlo výběrové řízení na dodavatele modernizace formou EPC, tedy zjednodušeně řečeno financováním z budoucích úspor. Smlouva byla podepsána v prosinci. Bezprostředně poté začala příprava projektové dokumentace. Hlavní objem prací byl dodán v době divadelních prázdnin červen – červenec a dokončovací práce proběhly v listopadu a prosinci. Nové technologie byly uvedeny do provozu letos v lednu. Náklady modernizace včetně energetického managementu, který zajišťujeme, plně pokryjí úspory za dobu 10 let. Celková investice stála okolo 25 mil. Kč. Naše společnost zajistila veškeré krátkodobé i dlouhodobé financování projektu. Je nutné říci, že jde o projekt realizovaný ve sdružení společností ENESA a.s. a EVČ s.r.o., Pardubice. EVČ s.r.o. přinesla především projekční a dodavatelské kapacity. Z mého pohledu projekt proběhl velice dobře a velký podíl na tom má již zmíněný Miroslav Růžička z ND, člověk s hlubokou znalostí technických potřeb divadla, použitých technologií a jejich možnostech, nejrůznějších druhů provozů a vzájemných kombinací.

*Hodboď:*

Na jméno Miroslava Růžičky jsem si vzpomněl, neboť před řadou let jsme v Topenářství instalace popisovali jeden z prvních projektů realizovaných formou EPC. Tehdy šlo o modernizaci kotelny bytového domu pod správou Národního divadla, při které byl instalován plynový kotel s kondenzačním dochlazovačem spalin. Z tohoto faktu se dá usoudit, že tehdy zvolená forma financování EPC byla úspěšná, a proto byla vedením divadla příznivě přijata i tentokrát.

*Slavořínek:*

Nechtěl bych, aby to vypadalo nějak nadneseně, ale pro přiblížení situace čtenářům Topenářství instalace je dobré uvést, že během projektu v průběhu let 2005 až 2007 se v Národním divadle vystřídali tři ředitelé. Snahou každého ředitele je pochopitelně finanční stabilita, takže náš společný projekt s EVČ s.r.o. vlastně prošel trojím přezkoumáním.

*Avramov:*

Projekt modernizace energetického hospodářství Národního divadla je pro nás nejen podnikatelskou, ale i technickou výzvou, neboť kombinuje klasické zdroje tepla a chladu s moderními, včetně rekuperace energie a využití obnovitelných zdrojů energie. Kotelna je ve třetím podzemním podlaží (3. PP), strojovna chladu v 5. PP. Zdrojem tepla byly 3 kotle klasické koncepce ČKD typu OMNIMAT 11 – PGV 300 o jednotkovém výkonu 3120 kW s dvoupalivovými hořáky plyn/topný olej. Vedle teplovodní kotelny je umístěna středotlaká parní kotelna, kde byly původně dva parní rychlovyvíječe s kapacitou 1 a 2 t/h. Pára je dodávána do strojoven vzduchotechniky a slouží pro vlhčení vzduchu. Ve strojovně chladu byly tři kompresorové chladicí stroje a pokud to přírodní podmínky umožňovaly, jako zdroj chladu se přes výměník využívala voda z Vltavy.

Po podepsání smlouvy jsme během doby před divadelními prázdninami v létě 2007 demontovali jeden z kotlů, nepoužívaný vyvíječ páry a jeden chladicí stroj. Demontáž chladicího stroje z roku 1983 odůvodnilo i používání neekologického chladiva. Stavebně byl objekt našimi předchůdci na demontáž připraven a vybaven prostupem stropy a portálovým jeřábem. Modernizace zahrnovala 6 provozních souborů.

## Základní systémové parametry:

Venkovní výpočtová teplota	- 12 °C
Průměrná teplota v topném období	+ 4 °C
Dnů s průměrnou teplotou pod 12 °C	216 dnů
Celkové klimatické číslo 3240	
Teplota od kotlů do strojovny ÚT (zimní období)	100 °C / 45 °C
Teplota od chladicí jednotky	45 °C / 55 °C
(jak v zimním tak i v letním období)	
Počet provozních hodin zdrojů	8 500 h/rok

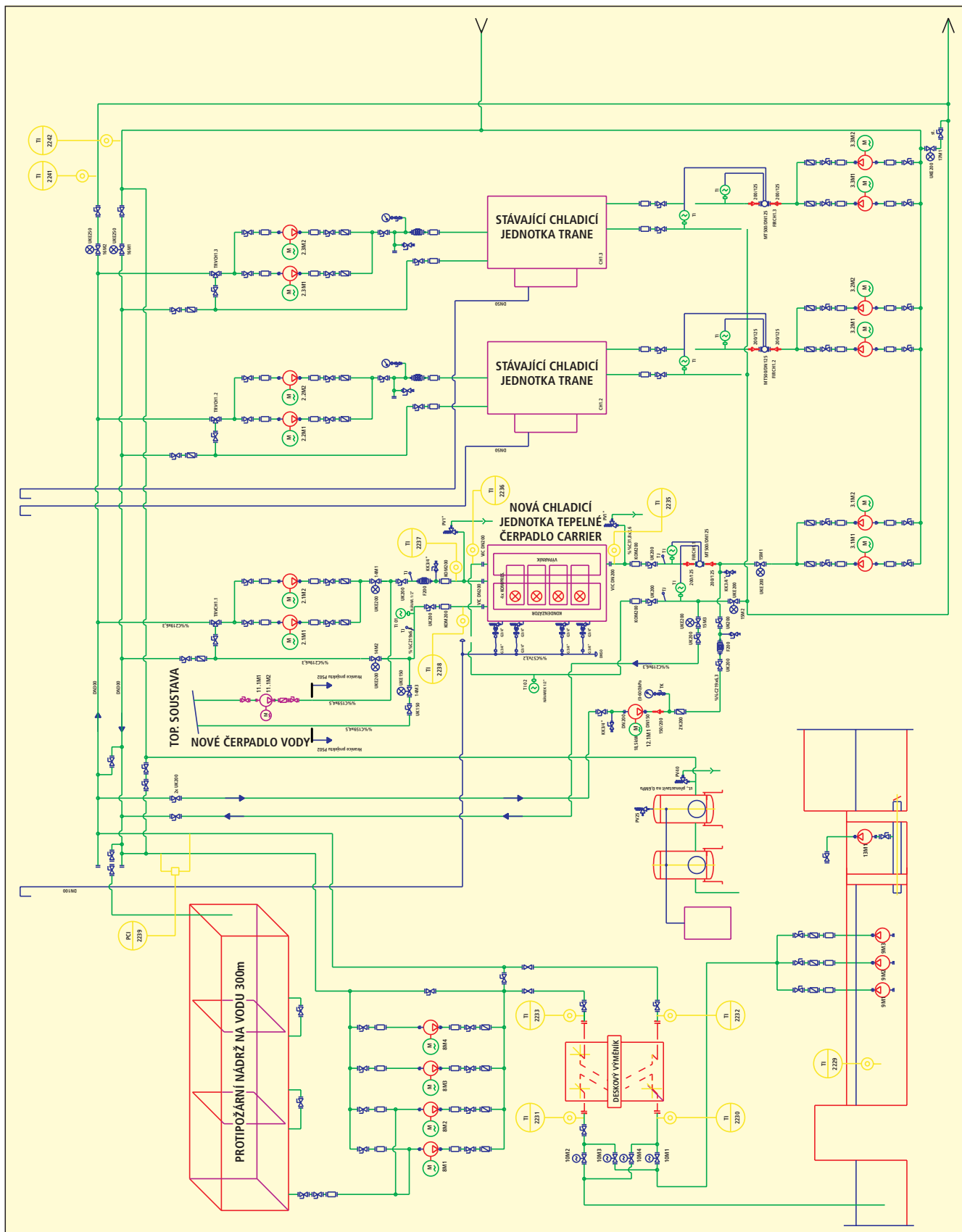
## Zdroj tepla

K ponechaným dvěma kotlům jsme doinstalovali dva zdvojené kondenzační kotle HOVAL UltraGAS 1440D. Jeden je na místě odstraněného kotle. Pro druhý vzniklo místo odstraněním starého vyvíječe páry.

Oba kondenzační kotle využívají průduch po odstranění kotle. Přetlakové kouřovody mezi kotli a průduchem komína

Místo po kotli „Bonifác“, vedle „Pankráce a Serváce“, jak si modré kotle ČKD pojmenovala předchozí generace projektantů, zaujalo kondenzační dvojce Hoval





Technologické schéma chlazení (část) s přípojkou od reverzibilního chladicího stroje do otopné soustavy

jsou z polypropylenu PPS star (Brilon) pro maximální teplotu spalin 120 °C a s trvalou kondenzací. Spotřebiče jsou na plastové potrubí připojeny tzv. po vodě atypickým dílem upraveným pro hrdlo spotřebiče. Za ním je osazen díl pro měření spalin a kontrolu účinnosti. Vzhledem k netěsnosti nerezové vložky v komínu byl původně přetlakový provoz změněn na podtlakový instalací odtahového spalinového ventilátoru Exhausto na hlavu komína, který v průduchu

udržuje trvalý podtlak 10 až 15 Pa. K tomu je výkon ventilátoru plynule řízen elektronickou regulací jeho otáček. Kondenzát z kotlů i paty komína je sveden do neutralizačních boxů. S úpravami zdrojové části souvisela i změna principu regulace. Původně volně průtočný kotlový okruh s napojeným rozdělovačem a sběračem, který vyhovoval klasickým kotlům požadujícím teplou zpátečku, musel být na rozhraní mezi rozdělovačem a sběračem přerušen vložím řízeného ventilu.







Odvod spalin od kondenzačního kotle (šedý, šikmo vzhůru); vzadu za ním je ponechaný vyvíječ páry Loos



Bilance přívodu spalovacího vzduchu a jeho předehřevu je přebytková následkem snížení celkového instalovaného výkonu; rozvod byl rozdělen na přívod do místnosti ke kotlům (na obrázku) a do místnosti s parním vyvíječem a kondenzačním kotlem

Toto řešení umožnilo nastavit vhodné průtočné podmínky pro režim tepla. Bylo nutné upravit například i distribuční uzly vzduchotechniky, které byly původně regulovány přepouštěním s třicestnými ventily.

Regulace tlakové diference v soustavě je řešena pomocí frekvenčních měničů na oběhových čerpadlech jednotlivých kotlů a chladicích jednotky. Na rozdělovači a sběrači ve strojně je snímán tlak, podle vyhodnocené diference a průtoku jednotlivými kotli budou řízena oběhová čerpadla kotlů v provozu a chladicí jednotky v případě, že je v provozu.

## Rekonstrukce centrálního chlazení

Všechny tři chladicí stroje byly původně chlazeny vltavskou vodou, kterou tři ponorná čerpadla proháněla přes výměník. Pokud její teplota nepřesáhla 10 °C, chladicí stroje se však nezapínaly a chladilo se jen odváděním tepla ze sekundárního okruhu s napojenou vzduchotechnikou do primárního s vltavskou vodou. Pokud byla teplota vltavské vody nad 10 °C, tak se zapínaly chladicí stroje. Často i v zimě, neboť provozní budova je celá prosklená s velkým ziskem tepla ze slunečního záření.

Technické vedení divadla se rozhodlo pro výměnu ekologicky nevyhovujícího nejstaršího chladicího stroje s tím, že když už se bude měnit, tak se vymění za reverzibilní stroj. Po-

užit byl Carrier, který je zdrojem chladu nebo po reverzi do chodu tepelného čerpadla zdrojem tepla. V případě výroby chladu je tento stroj zapínán jako první před ostatními stroji. Jeho teplovodní část s výkonem až 1400 kW je zapojena do systému topení.

V projektu jsme počítali, že reverzibilní stroj bude tepelnou energii odebírat z Vltavy nebo z chladicích uzlů v divadle. Proti úvodnímu projektu jsme však navrhli poměrně složitý provoz, kdy stroj odebírá teplo jak z Vltavy, tak z budovy současně. Řízení tohoto procesu závisí na mnoha parametrech a konkrétních druzích provozu v divadla a externích podmínkách. Nastavení a volba správného scénáře je proto nyní za provozu ověřována a vyhodnocována.

Jedinou nevýhodou stroje při provozu pro vytápění je značné průtočné množství otopné vody a výstupní teplota 55 °C. K těmto podmínkám jsme museli přizpůsobit ostatní části, tedy jak provoz kotlů, tak rozvod tepla. Zvolili jsme zapojení stroje do kaskády s kotli, s prioritou pro reverzibilní stroj v režimu tepelného čerpadla. Pokud neběží, tak se priorita přesune na kondenzační kotle a eventuálně i na klasické kotle, i když s jejich provozem se počítá jen v omezeném případě, spíše zálohově s možností spalování plynu nebo extralehkého topného oleje.



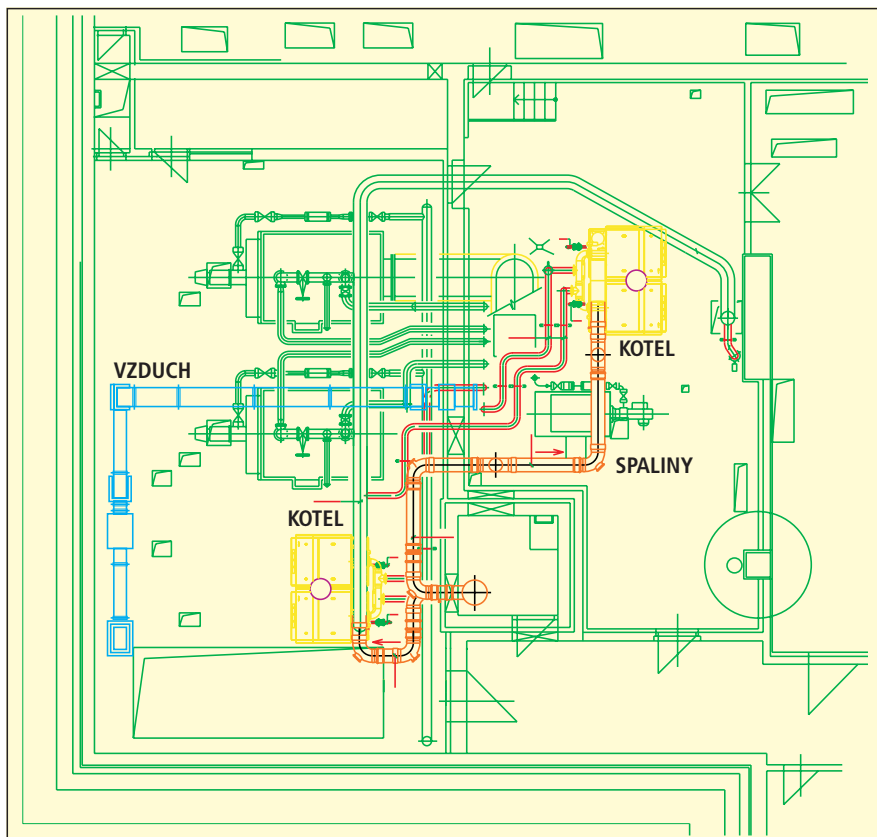
Vysloužilý chladicí stroj uvolňuje místo

## Využití tepelné energie hydraulického oleje

Zvedání pódii, požární opony, tahu opony atp. je ovládáno hydraulicky. Hydraulický olej se přitom zahřívá na 26 až 38 °C, a proto bylo původně navrženo jeho chlazení vltavskou vodou přes výměník. Vzhledem k zanášení výměníku se přešlo na chlazení vodou pitnou. Abychom volně odcházející tepelnou energii využili a ušetřili spotřebu vody, vložili jsme do chladicího okruhu další dva výměníky olej voda pro malé tepelné čerpadlo s výkonem 25 kW chlad / 36 kW teplo. Čerpadlem předehříváme dva zásobníky teplé vody, každý umístěný v jiném tlakovém pásmu, protože soubor budov má celkem 5 podzemních podlaží a 7 nadzemních. Propojení nových výměníků tepla s tepelným čerpadlem je provedeno z plastovým trubek a vedeno kolektorem spojujícím starou a novou budovu až do kotelny. Varianta přímého chlazení vodou byla ponechána jako záložní.

## Rekuperace tepla od vzduchotechniky

Odpadnímu vzduchu odebíráme teplo ve dvou místech. V půdním prostoru historické budovy, v tzv. kapličky a ve výdechové šachtě v prostoru Divadelní ulice. V půdním prostoru je umístěno 8 chladicích kapalinných výměníků ECOTERM o rozměrech 1300 × 670 × 500 mm a teplotním spádem vody -5,6/11,2 °C zapo-



**Kotelna – půdorys.** V levé části dva klasické kotle a jeden dvojitý kondenzační (žlutě). V pravé části vyvíječ páry a druhý dvojitý kondenzační (žlutě). Odvod spalin (oranžově) od nových kotlů vede do společného podtlakového průduchu v kominovém tělese se čtyřmi průduchy. Mezi zaústěními je výškový rozdíl. Modře je vyznačen přívod spalovacího vzduchu.

jených do Tichelmannova okruhu. Na druhém místě jich je 5 s rozměry 1900 × 970 × 500 mm a teplotním spádem vody -2,7/12,4 °C, rovněž zapojeny do Tichelmannova okruhu. Teplo ve výměnících přechází do nezamrzající směsi voda/glykol. Směs ze střechy do 2. PP bylo nutné vést poměrně komplikovanou cestou. Plastové potrubí s lepenými spoji prochází například i portálem jeviště. Z důvodu ochrany Hynaisovy opony aj. při eventuální netěsnosti potrubí a také aby nebylo vidět, jsme museli obě trubky zakrýt do společného obalu a ten natřít matnou černou barvou. Prostupy mezi různými požárními úseky jsou opatřeny protipožárními manžetami. Montáž probíhala i ve výškách a vyloučeno bylo použití otevřeného ohně. Ve 2. PP historické budovy je nasávání vzduchu z náplavky od Vltavy a do něho byl vložen předehřev

Reverzibilní chladicí stroj Carrier přepínatelný do provozu tepelného čerpadla je osazený 4 šroubovými kompresory



systemem vyměněny. Původních asi 1000 datových bodů bylo při modernizaci téměř zdvojnásobeno.

Regulace a měření musí řešit složité vztahy, které vyplývají z toku energií a vlastností technologických zařízení.

Provozní stavy kotelny a chladicího zdroje jsou úzce svázány s těmito hodnotami:

- venkovní teplota,
- teplota vody ve Vltavě,
- okamžitá potřeba tepla pro vytápění,
- okamžitá potřeba chladu pro chlazení,
- zajištění požadavku minimálního průtoku topné vody chladicí jednotkou v souvislosti s odběrem tepla v soustavě,
- prioritní požadavek na využití tepla z chladicího stroje a z kondenzačních kotlů.

Dva nové výměníky olej/voda pro TČ; pod nimi jeden původní



rekuperovaným teplem. V provozu zůstal axiální ventilátor Woods s natáčivými lopatami, jehož regulace musí zajistit, aby nebyl rozdíl tlaku vzduchu mezi jevištěm a hledištěm. Požadavek vyplývá například z potřeby nehybnosti opony a různých látkových dekorací.

Celý systém lze vypustit a zase napustit z plastové nádrže o objemu 3 000 litrů pro potřebu pravidelné údržby, výměnu nemrznoucí kapaliny. Vypuštění v případě havárie, například prasklého potrubí, zajistí elektromagnetický ventil.

### Frekvenční měniče

Nevýhodu velké spotřeby elektrické energie velkých čerpadel pro nasávání vltavské vody používané ke chlazení jsme omezili dodatečnou instalací frekvenčních měničů otáček pohonů čerpadel, které udržují konstantní diferenční tlak. Jednalo se o čtyři čerpadla s příkonem po 18,5 kW a tři po 22 kW. Frekvenční měniče jsou ovládány z nadřazeného řídicího systému, případně pomocí ovládacího panelu měniče.

### System měření a regulace

Stávající řídicí systém Sauter z osmdesátých let byl inovován na systém EY-3600 pro řízení stávající a nově upravené technologie. Některé části byly vzhledem k nekompatibilitě s novým

systemem vyměněny. Původních asi 1000 datových bodů bylo při modernizaci téměř zdvojnásobeno.

Regulace a měření musí řešit složité vztahy, které vyplývají z toku energií a vlastností technologických zařízení.

Provozní stavy kotelny a chladicího zdroje jsou úzce svázány s těmito hodnotami:

- venkovní teplota,
- teplota vody ve Vltavě,
- okamžitá potřeba tepla pro vytápění,
- okamžitá potřeba chladu pro chlazení,
- zajištění požadavku minimálního průtoku topné vody chladicí jednotkou v souvislosti s odběrem tepla v soustavě,
- prioritní požadavek na využití tepla z chladicího stroje a z kondenzačních kotlů.



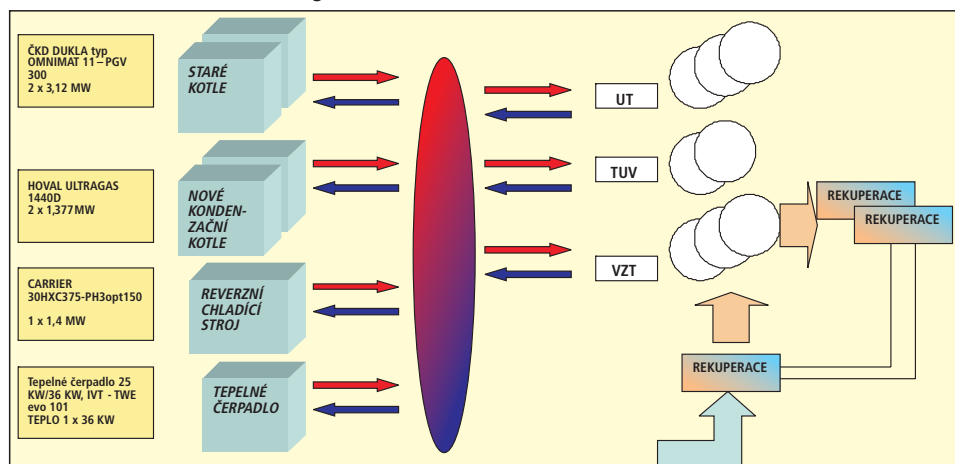


Trasa potrubí mezi strojovnou hydrauliky a kotelnou s tepelným čerpadlem je velmi dlouhá. Potrubí je vedeno mezi stávajícími rozvody na konzolách. Je kompenzováno v přirozených lomech, případně osovými kompenzátory a vzhledem ke změnám směru i výšky opatřeno na potřebných místech odvodu vzdušným.

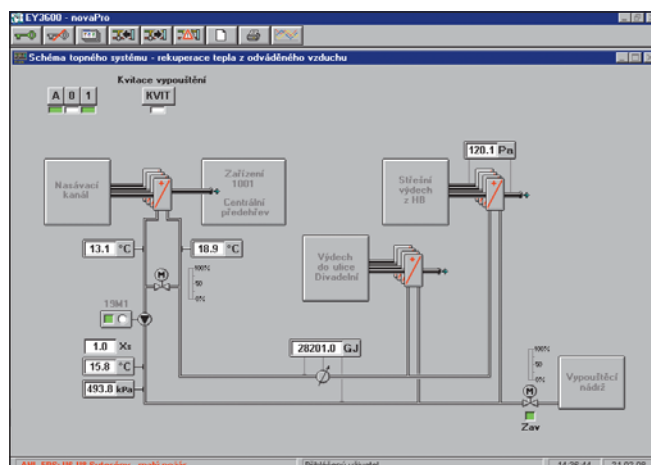
Představu o různorodosti provozu si lze udělat z přehledu postupů najždění zdrojů výroby tepla:

- STAV 0: provoz tepelného čerpadla 25 kW bude řešen nezávisle na ostatních zdrojích podle potřeb olejové technologie tlakové stanice.
- STAV 1, léto: samostatná příprava teplé vody bude zajištěna odpadním teplem z chladicí jednotky nastavené na minimální výkonový stupeň s otevřeným řízeným zkratem mezi rozdělovačem a sběračem (jednotka bude provozována s výkonem 250 kW, zkrat zajistí min. průtok 8 l/s).
- STAV 2, období květen, červen, září: provoz chladicí jednotky v regulačním rozsahu, v případě vyšších potřeb tepla najetí jednoho kondenzačního kotle, vysoké potřeby chlazení budou splněny stávajícími chladicími stroji.
- STAV 3, období březen, duben, říjen, listopad: provoz chladicí jednotky v plném výkonu a obou kondenzačních kotlů, další potřeby chlazení budou splněny stávajícími chladicími stroji.
- STAV 4, období prosinec až únor: provoz obou kondenzačních kotlů v plném výkonu a v nejvyšších potřebách i kotlů bez kondenzace vše bez chladicí jednotky, potřeby chlazení budou splněny bez chladicích strojů chlazením říční vltavskou vodou přes výměník.
- STAV CH 1, teplota vltavské vody nad 20 °C: nelze vltavskou vodou přímo chladit, je prováděno strojní chlazení vnitřních prostor s odvodem zbytkového tepla do Vltavy s přednostním (částečným) využitím pro přípravu TV.

Ideové schéma toků energie



- STAV CH 2, teplota vltavské vody nad 10–12 °C: je prováděno strojní chlazení vnitřních prostor s odvodem zbytkového tepla do Vltavy nebo do otopné soustavy.
- STAV CH 3, teplota vltavské vody do 10–12°C: dvojitý režim využití odpadního tepla – je prováděno chlazení vnitřních prostor vltavskou vodou a strojní chlazení vnitřních prostor s odvodem zbytkového tepla do topného systému, případně přímé chlazení vltavskou vodou. V případě že není požadavek na chlad, pak je odváděna ochlazená voda do Vltavy a teplo z ní je předáváno do topného systému.
- STAV CH 4, teplota vltavské vody pod 7 °C: není prováděno strojní chlazení vnitřních prostor, případné chlazení je řešeno přímo vltavskou vodou. Tepelné čerpadlo nelze provozovat vzhledem k nebezpečí zamrznutí.
- STAV CH 5: pro chladicí stroj je prioritou výroba tepla (stroj je regulován na základě kondenzátorových parametrů), na výparnickové straně CHL stroje je produkován chlad, požadavek VZT jednotek je VYŠŠÍ než produkce chladu CHL strojem a parametry vltavské vody se pohybují v rozmezí (mezi 10 °C a 15 °C), dojde k souběhu chlazení vltavskou vodou a CHL strojem.
- STAV CH 6: pro chladicí stroj je prioritou výroba tepla (stroj je regulován na základě kondenzátorových parametrů), na výparnickové straně CHL stroje je produkován chlad, požadavek VZT jednotek je NIŽŠÍ než produkce chladu CHL strojem. Bude docházet ke střídavému odvádění chladu do soustavy VZT a Vltavy.



Jedna z vizualizací regulačního a řídicího systému Sauter EY-3600 zachycuje zpětné získávání tepla z výdechů spotřebovaného vzduchu, transport tepla prostřednictvím směsi voda/glykol a předávání tepla do nasávaného čerstvého vzduchu

Na projektu spolupracovali:

- Miroslav Růžička, Národní divadlo, provozní podklady, toky energií
  - Bertold Kaupa, Národní divadlo
  - Ing. Ivo Slavotínek, Enesa a.s., smluvní záležitosti, financování
  - Ing. Valentýn Avramov, EVČ s.r.o., později Enesa a.s., hlavní inženýr projektu
  - Ing. Tomáš Klíma, Enesa a.s., návrh techn. řešení pro nabídku,
  - Ing. Jakub Slavíček, Enesa a.s., výpočet úspor a ekonomický model financování
  - Jiří Bartoň, EVČ s.r.o., hlavní technolog
  - Josef Kamenický, EVČ s.r.o., hlavní stavbyvedoucí
  - Ing. Radek Vanko, Ph.D., návrh komína a kouřovodů
- Za pomoc při zpracování článků děkuji především ing. Valentýnovi Avramovi, který zajistil technické podklady

□ JH