

Orloje – HI-TECH 14. století

ZDISLAV ŠÍMA

*Astronomický ústav AV ČR, Boční II 1401, 141 31 Praha 4, ČR
e-mail: sima@ig.cas.cz*

Podle přednášky ze dne 16. 6. 2000
přednesené na konferenci Academia Europaea
12th Annual Scientific Meeting „Concepts of Time“, 15. – 17. června 2000, Praha.

V článku jsou zdůrazněny ty části konstrukce hodin a zvláště pak pražského orloje, kde se jedná o nejvyspělejší techniku té doby. Jsou popsány části, pro diváka většinou zcela skryté, které mají i po staletích mimořádné kouzlo pro milovníky matematiky a přesné techniky.

Stručně

Historie se v oblasti přírodních věd netěší příliš dobré pověsti. Ono je totiž pro současnou vědu většinou jedno, zda nějaká vesnička patřila v historii panu Vomáčkovi, nebo Vopičkovi, či zda se šarvátky a ta a udála tehdy a tehdy, nebo o měsíc dřív. Bohužel tento přístup se občas promítá i do dějin vědy. Přitom je pro nás dnes tím nejdůležitějším nalézt v těchto dějinách poučení pro současnou dobu a vyvodit si z nich závěry pro náš budoucí vývoj. Jinak řečeno, díky znalosti historie bychom se měli pokusit vyvarovat chyb, kterých se při proslapávání cestičky vědění dopustili naši předchůdci. Na druhé straně bychom si měli vzít co nejlepší příklad z jejich největších úspěchů a pokusit se nalézt okolnosti, které k nim vedly.

Díky této péči je známo mnoho milníků ve vědě – tedy objevů i životopisů vědců – od doby antiky přes renesanci, technickou revoluci až po dnešek. Doba gotiky nám ale dost ustupuje do tmy. Často se o ní hovoří jako o „temném středověku“. Myslím, že je to trochu neprávem, a pokusím se vám předvést na příkladu středověkých časoměrných zařízení, především orlojů a konkrétně toho pražského, že lidstvo na své cestě za poznáním nestálo v té době nehybně na místě.

Mechanické hodiny – tlak na přesnou mechaniku

Již říše starověku, ale i celá evropská antika, se pokoušely co nejlépe měřit čas. Snažily se o to tím nejprůprirozejším způsobem, totiž měřit čas pohybem Slunce. Bylo vyvinuto více způsobů jak určovat polohu Slunce na obloze a jak z této polohy odvodit čas. Nutno přiznat, že se to těmto dávným odborníkům po-

dařilo celkem dost úspěšně a celkem i dost přesně. Slunečními hodinami se ale zabývat nebudeme.

Problém samozřejmě vznikál tehdy, když Slunce nebylo vidět – v noci a taktéž vždy při špatném počasí. Obecně se dá říci, že požadavky byly proto větší v Evropě než v severní Africe, či na Blízkém východě. Evropa si ale musela na svou dobu ještě počkat. Vznikala nejrůznější časoměrná zařízení, ale jejich přesnost byla dost špatná. V této staré době patřily k těm lepším jen přesýpací hodiny a vodní hodiny. Jejich znalost se předpokládá už u starých Egyptanů kolem 1500 př.n.l. a v Číně kolem 1200 př.n.l. Kvalitnější přesýpací hodiny lahvéového tvaru zmiňuje Archimédés ze Syrakus (Sicílie, 287 – 212 př.n.l.). Vodní hodiny – klepsydry, zmiňuje už 422 př.n.l. Empedoklés z Akragantu (Akragás, dnešní Agrigento, Sicílie, asi 493 – 433 př.n.l.).

Přesto stavba těchto hodin ještě nevyvolala žádný větší tlak na přesnou strojírenskou konstrukci. Zlom nastal až později.

Podle dosavadních znalostí se předpokládá, že první mechanické – tím se myslí kolečkové hodiny – sestrojili v Číně v roce 725 Liang Liang-san a I Hsing. Nicméně tato konstrukce Evropu nejspíš neovlivnila a ani v Číně nezakořenila. Navíc se autor necítí být kompetentní k rozhodnutí, o jaké hodiny tenkrát vůbec šlo. Jejich objev se spíš pokládá do Evropy.

Vznik prvních kolečkových hodin v Evropě je dost nejasný. Snad to byl Pacificus, kněz z italské Verony, který kolem roku 850 prý sestavil první mechanické kolečkové hodiny poháněné závažím. Jiní tento vynález přisuzují papeži Silvestru II. (narozen kolem 950, na stolci 999 – 1003), který se předtím jako mnich Gerbert (či Gilbert) z Aurillacu věnoval studiu především vodních hodin.



Obr. 1. Astronomický číselník pražského orloje. (Foto Z. Šíma.)

Jako hnací síla bylo tedy použito závaží. K němu pak byl vynalezen mechanismus, kterému se říká krok a který udržuje hodinový stroj v rovnoměrném chodu. Vynálezce tohoto mechanismu není znám. Regulátorem prvních hodin byl lihýř, laicky často řečený vahadlo, na jehož koncích byla závaží. Osa lihýře byla svislá. Lihýř pohánělo stupní, dnes říkáme krokové, kolo s vodorovnou osou. Krok byl vřetenový.

Nicméně rozšíření kolečkových hodin lze tušit až ve 13. století. Ostatně, píše o nich už Dante Alighieri

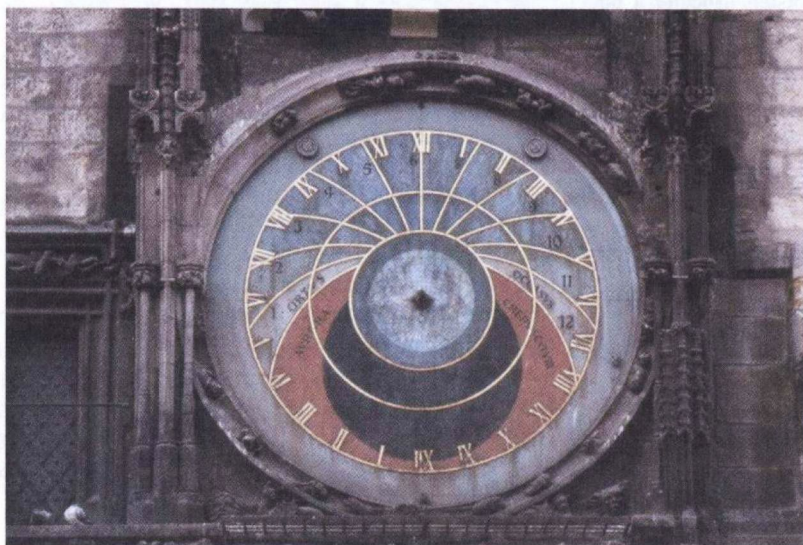
(Westminster Hall) 1288, další v Canterbury 1292, ve Florencii 1300, v Caen 1314, v Modeně 1344 atd. V Praze je v době Karla IV. (1316 – 1378) připomínán císařův hodinář Martin. Za Václava IV. (1361 – 1419) už hodinářů přibývá. Je znám orlojník Jan, po něm Albert, který byl v letech 1405 – 1415 správcem hodin na Staroměstské radniční věži. Kniha staroměstských poplatníků z roku 1429 zaznamenává už dvacet jedna druhů řemesel, ve kterých se pracovalo s kovy, včetně hodinářství. V té době tedy muselo jít o přímo

(1265 – 1321) ve své Božské komedii. Byly to mohutné železné stroje poháněné kamennými závažími s lihýřovým regulátorem, které neměly číselník ani ručičky, a které pouze odbíjely hodiny. Jejich konstrukce byla dílem těch nejlepších kovářů a zámečníků.

Od konce 13. století začíná výroba železných věžních hodin. Číselník měl jen jednu ručičku – hodinovou – a ta se otáčela jen jednou dokola za jeden den. Poledne bylo nahoře a půlnoc dole. Svým způsobem zobrazovala pohyb Slunce, i když nesmírně neobratně. První hodiny byly snad v Londýně

explozivní nárůst počtu lidí zabývajících se přesnějším zpracováním kovů a současně o značný růst přesnosti tohoto opracování. A zde se už dá vystopovat přímá cesta ke Staroměstskému orloji. Ten sestrojil po mechanické stránce Mikuláš z Kadaně, když návrh astronomického, čili hlavního číselníku udělal Jan Šindel * kolem 1375, ☼ mezi léty 1455 až 1458, od r. 1409 profesor astronomie na UK Praha, 1410 rektor UK po Janu Husovi.

Dlouho se předpokládalo, že pražský orloj byl postaven až roku 1490 Janem Růžou, kterému se říkalo Mistr Hanuš. Je velkou zá-



Obr. 2. Základní číselník pražského orloje bez pohyblivých částí. Je to zjednodušený tympanon astrolábu. (Foto J. Adamec.)

sluhou dr. Zdeňka Horského (1929 – 1988), že sladil dohromady čtyři různé důkazy pro vznik orloje v době předhusitské, a datoval orloj k roku 1410. Roku 1490 byl orloj Janem Růžou pouze doplněn (např. o kalendářní desku) a některé části byly předělány. Šlo přesto o největší zásah do orloje během celé jeho existence.

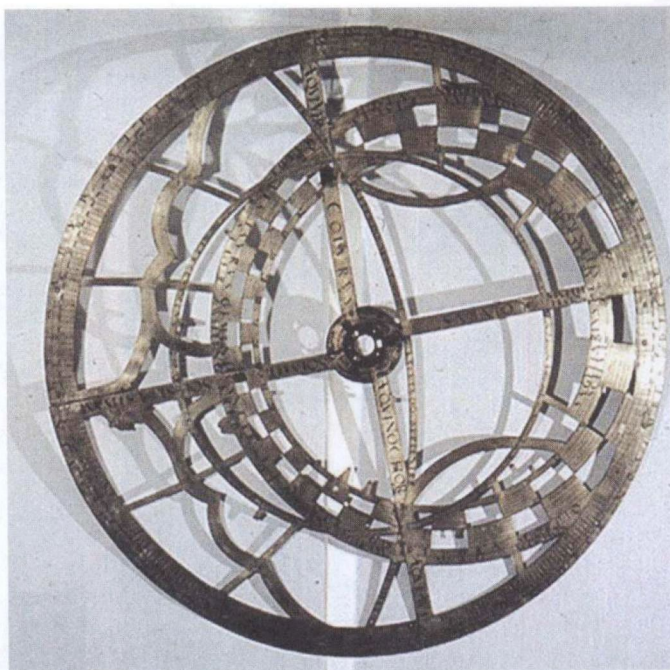
Číselník orloje

Zatímco věžní hodiny zpočátku číselník ani neměly, základem orlojů byl právě číselník. A právě astronomický číselník dělá z orloje orloj.

Nejstarší orloj byl v italské Padově, který v roce 1344 postavil Jacopo de Dondi. Orloj byl ale koncem 14. století již zničen. Znovu byl postaven podle původních výkresů mezi léty 1427 až 1437. Jeho číselník byl a dodnes je ovšem jiného typu, než máme v Praze. Je to tak zvaný italský koncentrický typ. Země je uprostřed, kolem ní po kruhových drahách obíhají Měsíc, Slunce a hvězdy.

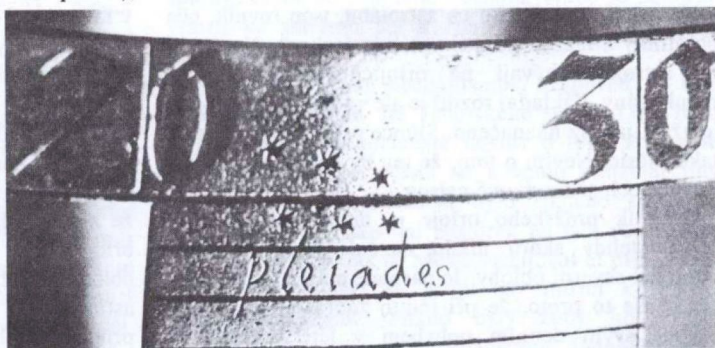
Jaký je tedy číselník v Praze? Je to vlastně obraz nebe. Pro mapování zemského povrchu i nebeské sféry je nutno promítnout kouli do roviny. V případě pražského orloje se jedná o stereografickou projekci ze severního pólu na jižní oblohu, takže bodem, odkud se promítá, je severní pól. Znamená to tedy, že se dobře zobrazí okolí jižního světového pólu, hůř se zobrazí oblast kolem rovníku a velmi špatně severní obloha. Severní pól je potom bodem singulárním – viz obr. 1 a 2. (Jeho obraz je ve všech směrech v nekonečnu.)

Stereografickou projekci znali už staří Řekové. Objevil ji snad Hipparchos z Nikaie (190 – 125 př.n.l.), používal ji též Klaudios Ptolemaios (asi 90 až 100 – 160 či 178?). Je to projekce pozoruhodná, protože jakýkoli kruh na kouli, tedy i jakákoli vedlejší kružnice, se zobrazí do roviny opět jako kružnice. Lze proto při konstrukci obrazu nebeské sféry v rovině bezproblémově používat kružítko. Tato projekce se používala při konstrukci astrolábů, velice starých astronomických přístrojů s nejrůznějším využitím. Nejdůležitější jejich funkce byla ta, že to byly více méně otáčivé mapy hvězdné oblohy (obr. 1 a 2).

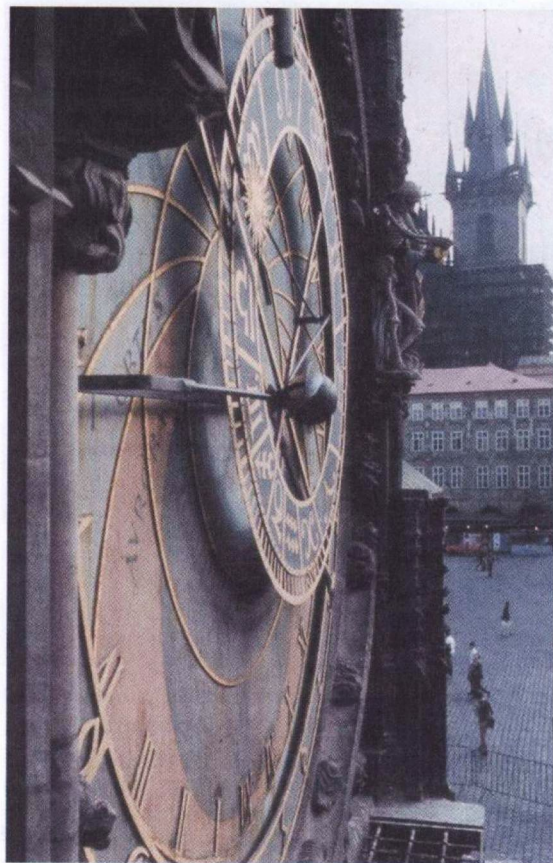


Obr. 3. Fabriciovo planesterium olomouckého orloje z r. 1573 – 5. Je to zjednodušená síť (rete) astrolábu. (Muzeum umění Olomouc.)

Ciferník pražského orloje je tedy v podstatě mechanicky poháněná mapa hvězdné oblohy. Obraz Slunce, který je na okraji ekliptiky, je prodloužen na obvod ciferníku k časovým údajům malou pozlacenou rukou, čili doslova a do písmene „ručičkou“. Stejně jako na obloze se i na orloji otočí Slunce jednou dokola za 24 hodin a ne jako malá ručička na našich hodinkách dvakrát za den. Poloha Slunce na orloji je obrazem jeho skutečné polohy na nebi, a proto je mírou času (konkrétně pravého slunečního). Navíc z této polohy můžeme třeba i zjistit, zda je Slunce nad obzorem, či pod ním, a to dokonce jak hluboko, takže



Obr. 4. Hvězdokupa Plejády (detatil z obr. 3). (Z. Horský „Pražský orloj.“)



Obr. 5. Měsíc na astronomickém číselníku orloje. V popředí prodloužená tyč, určující jeho polohu. Po ní Měsíc klouže.
(Foto Z. Šíma.)



Obr. 6. Detail Měsíce. Zprava k němu přichází tyčka, vymezující jeho polohu na obvodu zvířetníku.
(Foto Z. Šíma.)

se dá dobře zjistit, zda či kdy nastává astronomická noc (Slunce pod obzorem víc než 18°).

Je tedy zřejmé, že ciferníky používající stereografickou projekci poskytují proti italským koncentrickým typům mnohem více informace, kde „polohopis“ chybí.

Na orloji, stejně jako na astrolábu, jsou rovníky, oba obratníky a také ekliptika, čili zvířokruh. Na rozdíl od astrolábu bývají na orlojích hvězdy značně redukovány. Základní rozdíl je ale v tom, že na orlojích je vždy, jak již naznačeno, Slunce pro určování času a také Měsíc. Nevím o tom, že ten by někde chyběl. Na astrolábech samozřejmě nejsou.

Ciferník pražského orloje je mapa jižní oblohy, kterou tehdy skoro nikdo neznal. Není to mapa viditelné severní oblohy. Je nasnadě otázka, proč tomu tak je. Je to proto, že při tomto zobrazení vykonává Slunce svým denním pohybem v létě velký kruh a v zimě malý, čili opisuje na orloji obdobnou dráhu jako v přírodě. To, že ve středu orloje je zóna, která je ze severní polokoule, a tedy i od nás, nepozorovatelná,

tehdejšími lidmi nevadilo. Stejně se na orloji v té době žádné hvězdy nezobrazovaly.

Toto uspořádání je typické pro starší orloje a víme, že Praha mezi nimi není nejstarší. Tuto projekci má už orloj v Lundu (1380), ve Stralsundu a v Doberanu (oba 1394), ve Wismaru (asi 1390), Villingenu (1401), či v Lübecku (1405). (Je pozoruhodné, kolik orlojů tohoto typu a té doby vzniklo v oblasti Baltského moře.) Praha je při datování orloje k roku 1410 na konci tohoto seznamu.

Astroláb, který byl původně exkluzivním přístrojem, se začal postupně rozšiřovat. V době, která pak následovala, začala převládat obliba astrolábů natolik, že koncem 15. a v průběhu 16. století se už dělaly orloje pouze s projekcemi z jižního pólu na severní oblohu. Tehdy šlo už doslova o mechanicky poháněné astroláby se Sluncem a Měsícem navíc. Krásným příkladem tohoto typu orloje pak může být Fabriciovo planisférium z renesanční přestavby orloje v Olomouci v letech 1573 – 1575. Byla to otáčející se síť astrolábu včetně zobrazení mnohých hvězd a ne jen ekliptiky, jak

bývalo běžným zvykem. Je to unikátní příklad skvělého číselníku v celosvětovém měřítku (obr. 3, 4). Škoda, že je dnes uložen a téměř zapomenut ve Vlastivědném muzeu v Olomouci, zatímco současný olomoucký orloj má se skutečnými orloji společného už jen pramálo.

U těchto číselníků (projekcí z jižního pólu) si každý potom mohl porovnat bez nejmenších problémů svůj astroláb s orlojem, čímž získal ihned obraz celého nebe v daný okamžik nad sebou. Muselo se ale oželeť to, že Slunce opisovalo na těchto cifernících v zimě velký kruh a v létě malý, což bylo proti duchu přírody.

Lze tu ještě delší dobu hovořit o tom, co všechno ciferníky obou typů, obou těchto projekcí ukazují. Je toho o mnoho víc, než co můžeme vyčíst i z těch nejchytřejších dnešních hodinek. Přesto toto není smyslem mého článku. Ciferník byl po astronomické stránce, čili z hlediska sférické astronomie opravdu na výši, ale byla to tehdy už celkem běžná věc. Představoval velmi vysokou kvalitu, ne však průkopnickou práci.

Přesto existuje na číselníku jedna věc, která je ve světě nebývalá. Jde o Měsíc (obr. 5, 6). Je představován kuličkou, která je z jedné poloviny černá, matná a z druhé je postříbřená, lesklá. Tím, jak se kulička natáčí, ukazuje, v jaké fázi Měsíc právě je. Při úplňku je tedy k divákovi obrácena celá lesklá stříbřitá polokoule, při novu matná, černá.

Až potud je tato věc na orlojích zcela běžná. Co není běžné, je to, že není vidět, a to ani po podrobné prohlídce zblízka, žádný mechanismus, který by kuličku natáčel. Jednu dobu z toho vzniklo pro orlojníky skoro mystérium. Kdo pootáčí touto kuličkou? Na všech jiných orlojích lze tento mechanismus vystopovat.

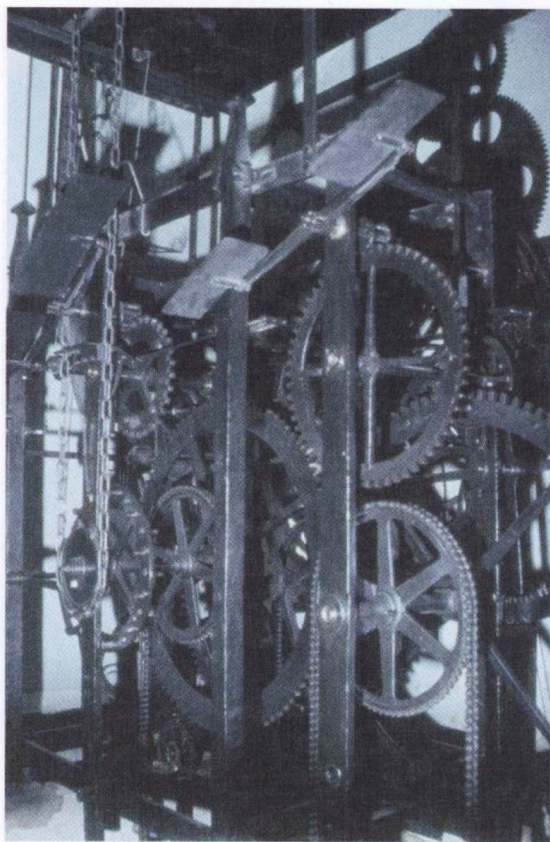
Rozřešení se našlo až po nějaké době, když se orloj v letech 1864 – 65 opravoval. Veškerý mechanismus k pootáčení kuličky je totiž skryt uvnitř ní. Je to systém závažíček a zubů, které jsou v kouličce uvnitř po jejím obvodu. Jak se orloj denním pohybem otáčí, a Měsíc se otáčí zhruba za jeden den také, závažíčko uvnitř kouličky využije tento pohyb a za jednu otočku Měsíce o 360° na ciferníku posune kouličku po obvodu



Obr. 7. Titulní strana Tábořského zprávy s jeho autoportrétem.
(Z. Horský „Pražský orloj“.)

o dva zuby. Zubů po obvodu kouličky je celkem 57. Velice prosté, ale nesmírně důvtipné. A navíc přesné. Pokud by mechanismus pracoval bez poruch, nastala by citelná chyba až po čtyřech letech! Je pozoruhodné, že při oné opravě 1864 – 65 chtěli tuto chybu odstranit, takže počet zubů v kouličce změnili. Výsledek byl špatný, chyba se o mnoho zvětšila, takže se pokorně vrátili ke starému počtu zubů. Minulé století bylo domýšlivé.

Jak starý je tento mechanismus? Odpověď na tuto otázku není snadná. Již Tábořského zpráva [3] z roku 1570 (obr. 7) jednoznačně hovoří o tom, že Měsíc ukazoval své fáze. Jenže se k tomu používal jiný mechanismus. Se Sluncem bylo spojeno korunové kolo, do kterého zapadal pastorek na tyči vedoucí ke kouličce Měsíce. Jak se Měsíc vzdaloval či přibližoval ke Slunci, natáčel se podél osy mířící k tomuto korunovému kolu. Pokud byly zuby kol dobře spočítány, nemohl mít mechanismus žádnou chybu. Jeho nevýhodou bylo ale to, že byl „do očí bijící“, čili zdaleka vidět, a tím kazil vzhled číselníku. Takového



Obr. 8. Pohled na stroj orloje – vpravo za strojem je astronomický číselník orloje. (Foto Z. Šíma.)

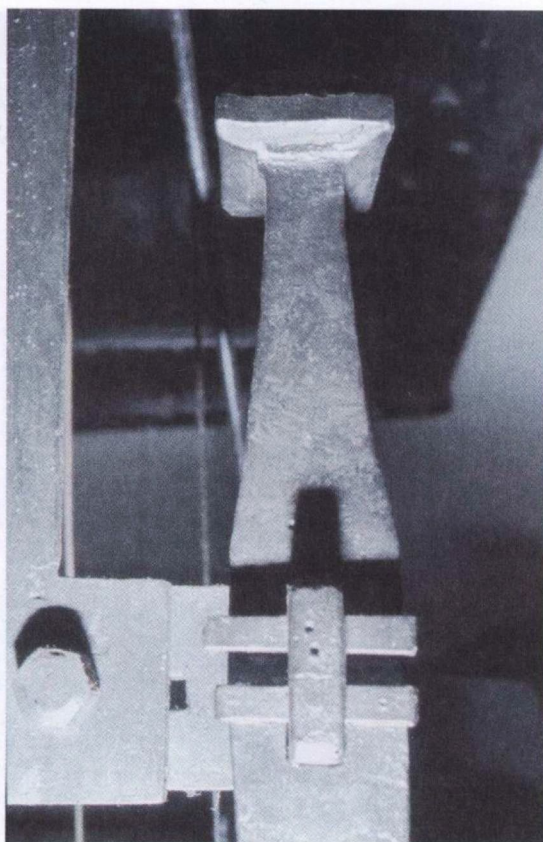
mechanismy jsou dodnes k vidění na orlojích spíše kabinetní povahy. Tábořského zpráva ale znamená, že orloj ukazoval fáze Měsíce nejspíš už od svého vzniku, nejpozději pak od své přestavby r. 1490.

O přestavbě tohoto mechanismu na dnešní nemáme žádných zpráv (a tím tedy ani o jeho konstruktérovi). Nejspíš tento světově ojedinělý mechanismus pochází z jedné z přestaveb v letech 1629 či 1659. Je to tedy opravdu hi-tech, ne však století čtrnáctého, ale sedmnáctého. „Tajuplné konstrukce“ se pak výrazněji rozšířily, ale až ve století osmnáctém. I zde představoval náš orloj průkopnickou konstrukci.

Hlavní kola orloje

Většině lidí, ať už jsou to pouzí turisté, či zasvěcenější znalci, zcela uniká znalost mechanismu orloje. Je to dost neprávem a je to hlavně proto, že stroj orloje není vidět. Stroj je však duše celého orloje. Jeho vytvoření představovalo tu nejlepší mechanickou práci té doby.

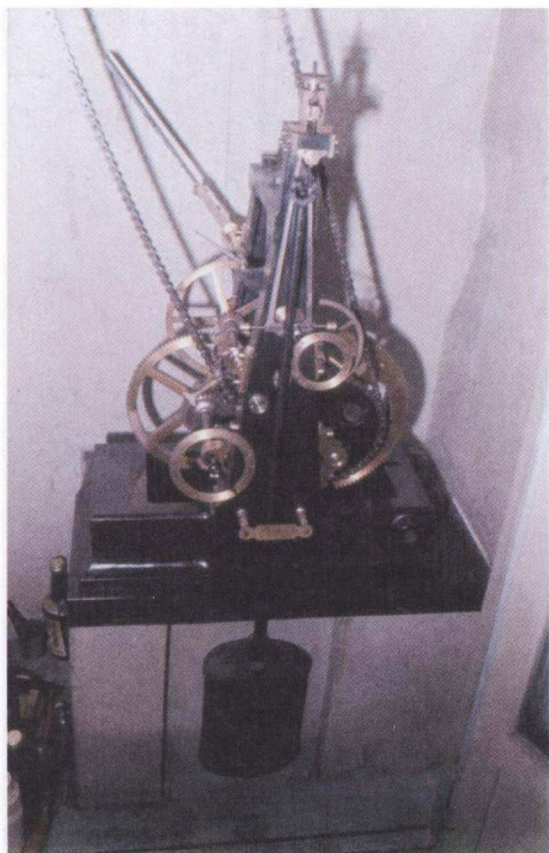
Celý stroj orloje se dělí podle funkce do několika „strojů“. Toto dělení není na první pohled ihned patrné,



Obr. 9. Detail nárožního sloupku orloje (Foto Z. Šíma.)

protože všechny stroje tvoří dohromady jednu velkou konstrukci. Základní, čili hlavní stroj orloje (někdy se též říká „jící“ stroj – obr. 8) má svoji hlavní kostru (rám) v podobě nárožních sloupků s vykovávanými hlavicemi, které jsou většinou ještě původní, čili z roku 1410 (obr. 9). Vodorovné pásnice, které jsou do sloupků uklínovány, jsou nejspíš také ještě původní. Můžeme dále předpokládat, že i některá kola hlavního stroje jsou z téže doby. Tento stroj obsahoval vřetenový krok s lihýřem, základní časoměrný prvek. Dnes je tento mechanismus nahrazen vnějšími kyvadlovými hodinami, které sestrojil roku 1866 Romuald Božek (obr. 10). Tyto hodiny s tepelnou kompenzací kyvadla rtutí dávají každou minutu dva impulzy orloji. Ten při nich vždy poposkočí o malý kus dopředu. Díky přiřazení Božkových hodin k orloji se zachoval hlavní stroj orloje v činnosti, nebylo ho třeba zcela odstavit a přitom se současně splnily i dost vysoké nároky na přesnost chodu orloje. Pohyb ven na číselník orloje se vždy vyváděl právě z hlavního stroje orloje.

Dalším strojem orloje byl stroj zvonící. Na konci každé hodiny zabezpečil 24 zvonkových (malých,



Obr. 10. Kyvadlové hodiny Romualda Božka z r. 1866 dodnes určují přesnost chodu orloje. Krok těchto hodin je kopií Big Benu v Londýně. (Foto Z. Šíma.)

trojitých) úderů. Dnes tento stroj obstarává pohyb apoštolů. Jde v podstatě o upozornění, že bude následovat odbíjení hodin, které obstarává bicí stroj. Počet úderů tohoto stroje se rovnal počtu hodin. Údery orloje byly srozumitelné každému, tedy i těm, kteří nerozuměli, nebo se nevyznali v dost složitém astronomickém číselníku. A platí to dodnes, i když dnes už každý ví, kolik je hodin a po procházce apoštolů většinou odchází, aniž by musel čekat na vlastní odbíjení orloje.

Dalším strojem byl stroj pro vypouštění kalendářní desky (obr. 11), která je na

orloji umístěna dole pod hlavním ciferníkem. Kalendářní deska, dnes dílo malíře Josefa Mánesa z roku 1866, má na svém okraji 365 políček. V každém políčku je nadepsáno, o který den se jedná. O půlnoci každého dne tento zmíněný stroj posune kalendářní desku o jedno políčko vpřed, takže se deska otočí jednou dokola ze jeden kalendářní rok.

Posledním strojem orloje je mechanismus pro pohyb čtyřladvacetníku (obr. 12). Jedná se o to, že na vnějším okraji astronomického ciferníku jsou čísla od jedné do dvaceti čtyř. Ty reprezentují staročeský čas, který vypadal tak, že dvacet čtyři hodin bylo právě v okamžiku západu Slunce.

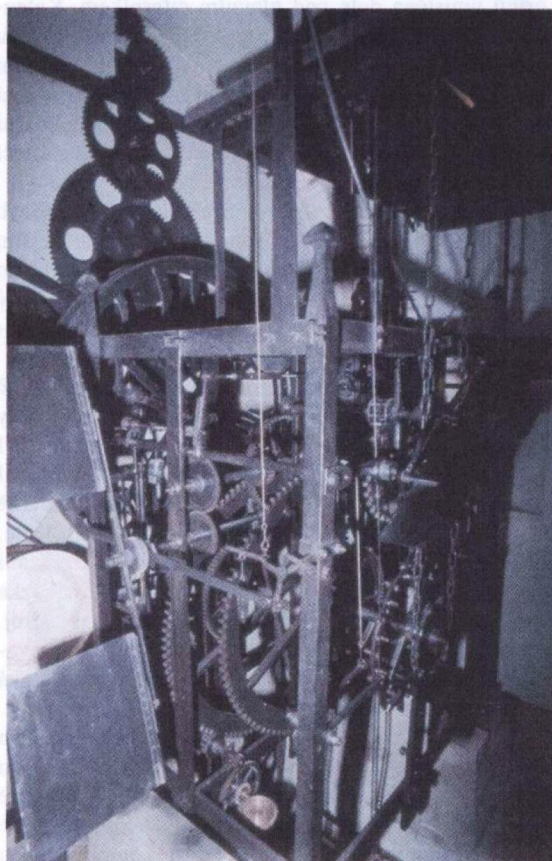
Protože tento okamžik se během roku dost výrazně posouvá proti běžnému času, musí se i tento pás s čísly posouvat. Nejprve se to provádělo ručně. Později byl připojen stroj, který posunutí tohoto pásu odvozoval z pohybu kalendářní desky. Jednalo se o poměrně jednoduchý mechanismus, který však měl menší chybu. Po požáru orloje v květnu 1945 se při jeho restaurování sestrojil nový stroj. Autory byl doc. E. Procházka a dr. Z. Horský (viz [1]). Je to velmi složitý stroj, prakticky další neustále jdoucí hodiny s komplikovaným výstupem. Jeho výhodou je ovšem téměř nulová chyba.

Napočítali jsme, že orloj má pět různých a navzájem poměrně dost nezávislých strojů, které si mezi sebou občas vyměňují impulzy. Kdybychom připočítali ještě Božkovy hodiny, měl by orloj strojů šest. Vidíme, že již od svého vzniku měl orloj dost komplikovanou strukturu, která se při jeho rozšíření r. 1490 a pak i při dalších úpravách stala dále ještě složitější. Jedna ze starých českých pověstí má tedy po odborné stránce dost realistický základ.

Vše pominěme a podívejme se podrobněji na pohánění



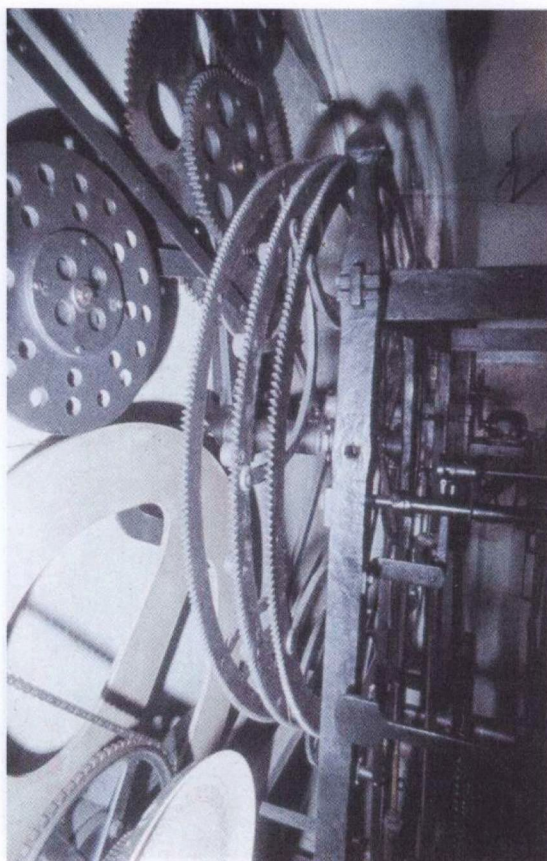
Obr. 11. Pohled na kalendářní desku. (Foto Z. Šíma.)



Obr. 12. Stroj orloje. Vlevo nahoře součásti mechanismu pro posun čtyřladvacetiúku. Umístěny jsou z vnitřní strany astronomického ciferníku. Uprostřed obrázku je tenké svislé táhlo zprostředkující přenos informace od hodin Romualda Božka. Vlevo vzduchová brzda (dvě plechové desky) chodu orloje. Uprostřed je sloupek, který je v detailu na obr. 9.

ciferníku hlavním strojem orloje. Myslím, že do tohoto prvku se soustředil opravdu nebývalý um tehdejších lidí. Pohyb hlavního stroje byl vyveden na jeden delší pastorek, do kterého zapadala tři ozubená kola stejného průměru, přičemž každé kolo mělo o trochu jiný počet zubů (obr. 13). To je z dnešního hlediska věc zcela nemyslitelná, protože tvar zubů v jednom kole musí přesně odpovídat tvaru zubů v druhém, takže z průměru kola plyne už počet jeho zubů a naopak. Tenkrát to bylo možno proto, že zuby byly trojúhelníkové a nesplňovaly přísné požadavky evolvent, podle kterých se dnes ozubená kola konstruují (obr. 14).

Jsou tu tedy tři kola (obr. 15) – kolo pro pohyb ekliptiky s 365 zuby, kolo pro pohyb Slunce s 366 zuby a kolo pro pohyb Měsíce s 379 zuby. Je samozřejmé, že takto vysoký počet zubů vyžadoval i náležitý průměr kol. Vnější průměr kol (tzv. „hlavový průměr



Obr. 13. Tři hlavní kola orloje, vlevo ciferník a části mechanismu pro posun čtyřladvacetiúku.

(Oba obrázky foto Z.Šíma)

kol“) je 1 170 mm. Pastorek, měl 24 zubů, se točil tak (15,25 otáčky za den), že kolo pro Slunce se otočilo jednou dokola přesně za jeden střední sluneční den. Ostatní kola se přitom proti Slunci o trochu posunula. Podívejme se na chyby, jakých se tehdejší konstruktéři při tom dopustili.

Poměr mezi pohybem Slunce a ekliptikou – jedná se tedy o pohyb Slunce vůči hvězdám, přesněji řečeno o pohyb Slunce vůči jarnímu bodu – je dán poměrem počtu zubů

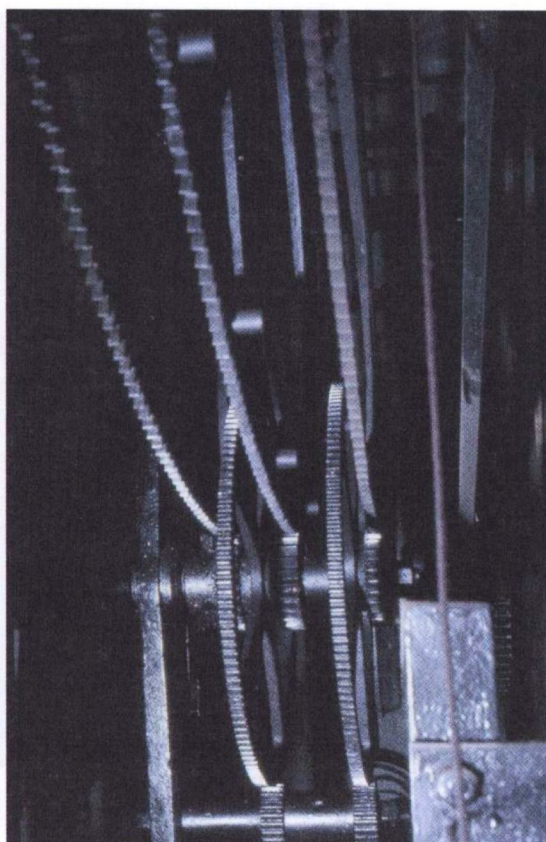
$$366 / 365 = 1,002\,739\,726$$

Poměr při skutečném pohybu Slunce vůči ekliptice je dán průměrnou délkou tropického roku, čili poměrem

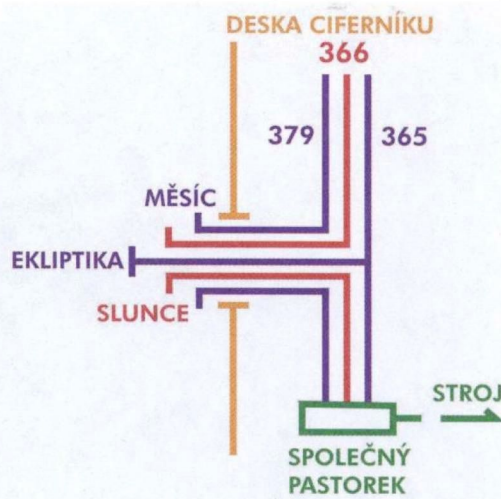
$$366,2421\,988 / 365,2421\,988 = 1,002\,737\,909.$$

Chyba je 0,000 001 8, což v praxi znamená, že za rok se Slunce proti ekliptice rozjede o čtvrt (0,24°) stupně.

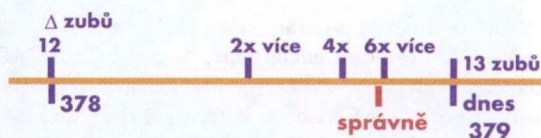
O této chybě není třeba vůbec uvažovat, protože díky elipticitě dráhy Země okolo Slunce odchylky od správné polohy Slunce vzhledem k ekliptice během



Obr. 14. Detail tří hlavních kol orloje. Dnes je původní společný pastorek nahrazen redukčním mechanismem pro pohyb Měsíce z r. 1866. (Foto Z. Šíma.)



Obr. 15. Schema funkce tří hlavních kol orloje



Obr. 16. Chyba pohybu Měsíce v závislosti na počtu zubů hlavních kol.

roku tuto chybu často značně převyšují. Orloj je proto nutno seřizovat minimálně dvakrát až čtyřikrát do roka.

Polohu Slunce a ekliptiky dokázali tedy naši gotičtí předchůdci vystihnout mimořádně dobře. Trochu horší situaci jim připravila příroda u Měsíce. Podívejme se na problém podrobněji.

Rychlost pohybu daného kola je nepřímo úměrná počtu jeho zubů. Zde se jedná o poměr zubů na kolech pro Měsíc (379 zubů) a pro Slunce (366 zubů). Při tomto rozdílu zubů ($\Delta = 13$) je rychlost pohybu Měsíce na orloji (čili po ciferníku) dána poměrem mezi rychlostí pastorku a počtem zubů hlavního kola

$$\frac{15,25 \cdot 24}{379} \cdot 360^\circ = 0,965699208 \cdot 360^\circ = 347,651715^\circ \text{ za den.}$$

Měsíc se tedy proti Slunci opozdí o

$$\frac{13}{379} 360^\circ = 12,348285^\circ \text{ za den,}$$

takže se s ním potká (což znamená, že na orloji bude opět „novoluní“ za 29,153846 dne.

Jenže v přírodě je rychlost Měsíce na obloze dána délkou synodického Měsíce (od novoluní do novoluní, čili od konjunkce se Sluncem ke konjunkci), která je 29,530588 dne. To je současná střední délka Měsíce, která se s časem maličko zkracuje (o pětinu poslední platné cifry za sto let). V době konstrukce orloje tedy bylo na konci ..589. Nicméně, dá se předpokládat téměř s jistotou, že v době konstrukce orloje tato veličina byla známa s mnohem menší přesností. Rychlost opožďování Měsíce proti Slunci je (v přírodě) $12,190749^\circ$ za den. Chyba v okamžiku novoluní na orloji tedy je $9^h 2^m 30,51^s$. V úhlech to představuje $0,157536^\circ$ za den; $4,72608^\circ$ za 30 dní; $57,5388^\circ$ za tropický rok. A to je už hodnota velmi citelná. Měsíc na orloji je příliš pomalý (opožďování Měsíce je příliš velké), takže orlojní synodický měsíc je příliš krátký.



Obr. 17. Vyvedení hlavních kol dutými osami na ciferník orloje. Stav při opravách při sejmutí pohyblivých částí orloje. (Foto Z. Šíma.)

Vznikne-li někde takováto velká chyba, je naší první otázkou, zda to nešlo udělat lépe. A to je to, co je na problému kol právě zajímavé. Představme si, že by rozdíl v počtu zubů na obou kolech nebyl 13, ale jen 12. Pak by se Měsíc na orloji opožďoval proti Slunci o

$$\frac{12}{379} \cdot 360^\circ = 11,398417^\circ \text{ za den,}$$

tedy příliš málo. To představuje chybu $0,792332^\circ$ za den, $289,393^\circ$ za tropický rok. Měsíc je tentokrát příliš rychlý, (opožďování Měsíce je příliš malé), chyba je tedy na druhou stranu proti předchozímu případu, ale absolutní hodnota chyby je pětikrát větší.

V rámci daných chyb byl tedy zvolen rozdíl v počtu zubů na orloji správně. Při daných kolech se tedy nelze přírodě už lépe přiblížit. Můžeme ovšem požadovat, abychom se přírodě přiblížili přece jen lépe. Jak na to? Musíme volit větší počty zubů na kolech, abychom situaci vystihli lépe. Zkusme počty zubů zdvojnásobit. Starému poměru zubů by odpovídalo dělení $730 : 732 : 758$ (poslední číslo se vztahuje k měsíčnímu kolu). Zkusme změnit 758 na 757. Chyba bude $0,301713^\circ$ za den, čili dvakrát horší než dnes. Při dvojnásobném počtu zubů si tedy nepomůžeme, museli bychom ponechat starý poměr.

Zkusme dnešní počet zubů vynásobit čtyřmi. Poměr odpovídá poměru dělení $1460 : 1464 : 1516$. Změníme-li poslední číslo na 1515, dostaneme chybu $0,071937^\circ$ za den, což je jen 2,2 krát lepší než dnes. Za toto malé zlepšení jsme ovšem zaplatili obrovskou cenou – koly s více než tisícem zubů každé.

Pokud bychom se ale chtěli „trefit“ výrazně lépe, museli bychom dnešní počet zubů násobit šesti. V tomto případě odpovídá poměr dnešního dělení kol dělení $2190 : 2196 : 2274$. Když u měsíčního kola změníme 2274 na 2273, ($\Delta = 77$) pak opožďování kola bude

$$\frac{77}{2273} \cdot 360^\circ = 12,195337^\circ$$

za den,

takže chyba u Měsíce poklesne na $0,004588^\circ$ den, čili $1,6756^\circ$ za tropický rok. To je výsledek 34,3krát lepší než dnes a představuje radikální zlepšení.

Celý tento myšlenkový experiment je dobře patrný z obr. 16. Samozřejmě, že

se vkrádá otázka: Jednalo se tenkrát o tu nejvyspělejší tehdejší vědu. Mohli tenkrát volit počty zubů takto, nebo bylo nutno přijmout chybu, kterou jsme rozebrali nahore?

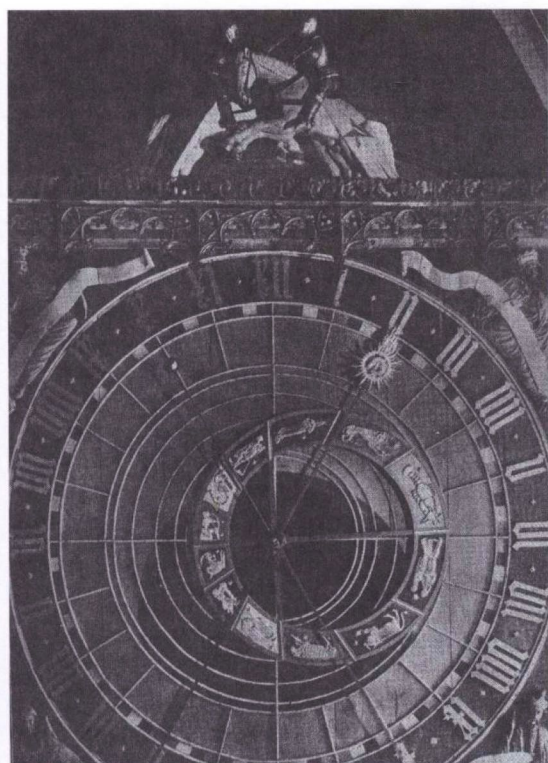
Odpověď je prostá. Zkusme vyrobit ručně bez dělicích strojů a pouze pilníkem tři kola s více než dvěma tisíci zubů každé, která by spolehlivě zapadala do stejného pastorku. Určitě se vám to nepodaří. Znamená to totiž vyrobit kola se zoubky o velikosti jedné šestiny proti dnešním, pokud chceme zachovat dnešní průměr kol, který je už beztak veliký. Kdyby se nám to i podařilo, orloj by vůbec nebyl spolehlivý, protože by zoubky v pastorku občas přeskočily, brzy by se ochodily a pak by přeskakovaly ještě víc, takže o žádném zlepšení by nemohla být ani řeč.

Druhou cestou by bylo neúměrně zvětšit průměr kol. To ovšem také není možné, protože se celý stroj musí vejít za kalendářní desku orloje.

Autor tohoto článku si není jistý, zda konstruktéři o posledně jmenovaném dělení kol věděli, ale jistě je, že v rámci daných technických možností byla kola volena naprosto optimálně.

Dlužno říci, že toto původní řešení na orloji dnes už není. Pro zpřesnění chodu měsíčku byl při přestavbě orloje v roce 1866 dán do provozu redukční mechanismus (výrobek pana Kolbena, majitele strojní továrny v Praze), který nepřesnost chodu snižuje. Velká kola byla zachována, ale pastorek už ne.

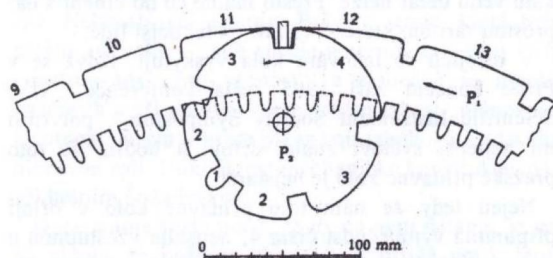
V orloji je s těmito koly svázána ještě jedna věc, která byla v té době mimořádně obtížná. Je to vyvedení diskutovaných pohybů, tedy Slunce, hvězd a Měsíce,



Obr. 18. Horní část orloje s číselníkem ve švédském Lundu (vlevo), celkový pohled na orloj (vpravo).

od těchto kol na ciferník. Nebyla jiná možnost, než to provést třemi nezávislými sousými pohyby. Znamenalo to, že dvě osy, pro Měsíc a Slunce, byly duté a jimi vedla osa pro zvěrokruh. Je proto nejdelší. Po mechanické stránce to v té době znamenalo naprostou špičku. Protože ale tento problém nelze vyřešit jinak, nalezneme tyto sousé pohyby na všech tehdejších orlojích.

Přesto má Praha v této otázce jeden drobný primát. Je jím pořadí os. Na obdobných orlojích z té doby – ve Stralsundu z r. 1394 (severní Německo) a v Lundu z r. 1380 (Švédsko), je pořadí os prohozeno. Kolo ekliptiky



Obr. 19. Spojení dvou kol, určující počet úderů při odbíjení.

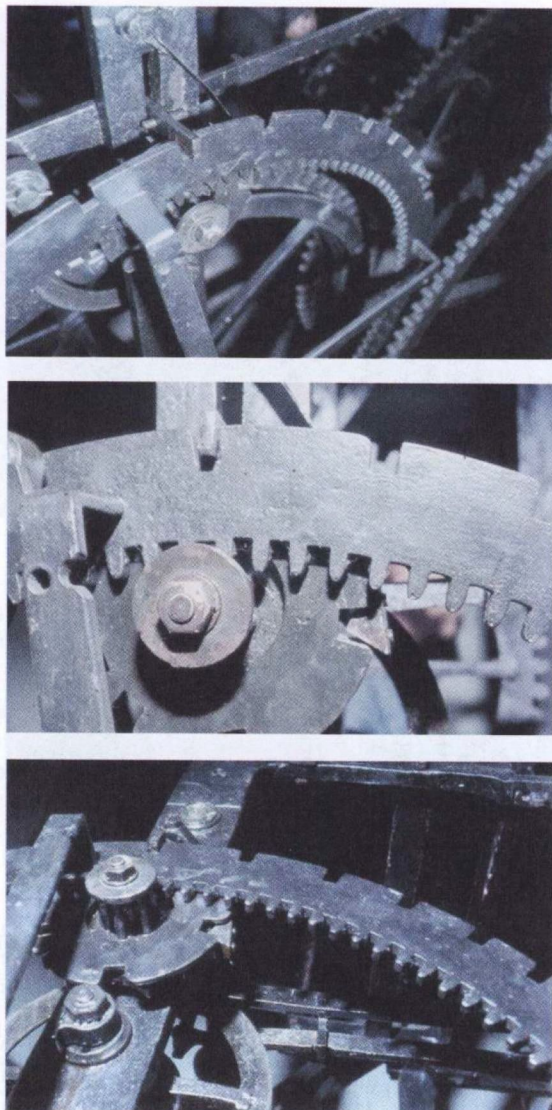


je duté a nejkratší, takže poloha Slunce a Měsíce byla dána pouze jejich rafijemi. Jejich skutečnou polohu ve zvěrokruhu pak bylo nutno vydedukovat na průsečíku jejich rafíjí s okrajem ekliptiky.

Tím, že v Praze je pořadí os prohozeno, je možno do středu ekliptiky umístit pomocnou osku a na ni dát distanční tyčky, takže Slunce a Měsíc se pohybují přímo po obvodu zvěrokruhu. Jsou tedy tam, kde jsou i na obloze.

Přídavné kolo v odbíjecím mechanismu

Orloj každou celou hodinu odbíjí počet hodin. Počet úderů při odbíjení je tedy 1, 2, ..., 23, 24. Za chvíli uvidíme, že už ve středověku orloj odbíjel od jednoho do dvacetičtyř úderů a ne dvakrát do dvanácti, jak by se mohlo zdát a jak je běžné u všech bicích hodin dnes. Technicky je odbíjení realizováno velkým kolem a západkou (obr. 19). Pokud je západka zvednuta, kolo se pod západkou protáhne a orloj mezitím odbíjí. Při zapadnutí západky do kola se odbíjení ukončí. Délka jednotlivých lamel na kole tedy určuje počet úderů. Do orloje je však přidáno ještě další malé kolo, do kterého zapa-



Zde pro přesnost musíme říci, že tato odbíjecí část orloje nebyla původní součástí starého stroje. Je to zřejmě na první pohled, protože je ke starému stroji dodělána z boku. Přesto je stará. Již původní orloj odbíjel, jenže tato část byla v té době ve věži, tedy úplně jinde, než byl hlavní stroj orloje. O tom svědčí i Tábořského zpráva o orloji [3] z roku 1570, což je nejobsáhlejší zpráva o původní podobě orloje. Je možné, že tento mechanismus patřil ke zvonu na radniční věži. Věž radnice je z let 1364 či 5, 4.8.1381 byla vysvěcena kaple radnice – dnes opět přístupná, je na východní straně radnice. K roku 1402 máme na radniční věži doloženy hodiny a k roku 1409 zvon. Takže je i možné, že odbíjecí mechanismus dnešního orloje je starší než sám orloj. Ostatně list Mikulášovi z Kadaně říká, že „k tomu udělal i nová kola k velikému orloji v straně bicí ...“. Znamená to tedy, že stará kola v bicím mechanismu byla už opotřebována. Skutečný vznik hodin a zvonu může být samozřejmě starší, než je jejich písemné doložení, protože po osmi letech by kola asi nebyla ještě tak opotřebovaná, aby se musela dělat nová. Samozřejmě, že bicí mechanismus je ale mladší než věž.

Orloj byl opravován v roce 1629 a v roce 1659. Při jedné z těchto oprav byl bicí mechanismus snesen dolů k hlavnímu stroji a s ním pevně spojen. Tím se dosáhlo i jeho větší spolehlivosti. To, že byl tento mechanismus přimontován k boku orloje dodatečně, rozhodně neznamená, že původně v orloji chyběl, čili, že je mladší než orloj.

Poučení

Bez několika let je orloj starý už 600 let. Přitom stále funguje jeho mechanismus, který je v jádru ještě původní. To je na mechanické zařízení neuvěřitelný výkon. Vzniká otázka, proč tomu tak je, když naproti tomu o současných mechanických zařízeních jaksi automaticky předpokládáme, že mohou fungovat maximálně tak asi sto let – a to se týká opravdu jen málokterých.

Orloje byly ve své době výkvětem tehdejšího hodinářství. Byly dělány s rozmyslem, v klidu, beze spěchu, s touhou po dokonalosti. Ne rychle rychle, na čas. Nehonily se termíny. Byly to stroje, které byly dělány na věky – „sub specie aeternitatis.“ Byly tedy konstruovány „pro věčnost“, a skutečně se mnohé značných stáří dožily. Přece jenom jakási „plánovaná životnost“ hrála a hraje při vývoji jakéhokoli lidského díla svou roli. Důkladnost mechanické konstrukce byla základním požadavkem.

Dnes máme často pocit, že to, co nyní děláme, je jen na chvíli, že každým okamžikem přijde nová, lepší technologie, a proto se většina věcí (včetně vědeckých

článků) „stíhá“ od boku. Takové věci pak asi dlouhého života nemají.

Další bod, a to velice důležitý pro dlouhověkost a kvalitu strojů, byla jejich promyšlenost, jakási „druhoplánovitost“. V orloji při lepším rozboru nalézáme mnohem více věcí, než které jsou patrné na první pohled. Teprve jejich další podrobné studium nám odhalí dosud skryté věci. Tento fakt, totiž postupné odhalování dalších „lahůdek“, dělá z orloje mistrovské dílo.

Tento závěr asi platí obecněji. Pokud u některé věci ani při podrobnějším studiu nelze odhalit další skrytosti (promyšlenosti, krásy), je to příznakem toho, že se většinou nejedná o nijak mimořádně cennou věc. Právě tato druhoplánovitost dává lidskému dílu punc nejvyšší kvality. To platí obecně od malířství přes dramatiky až po orloje.

Konstrukteři orloje měli neuvěřitelnou snahu vložit do konstrukce maximum svého umu, dovednosti, dokonalosti, byť se mohlo jednat o věc už jaksi nadbytečnou, která pro vlastní fungování orloje už nebyla nutná.

Opakem tohoto přístupu je dnešní funkcionalistické a utilitární pojetí. Nechává se jen to, co slouží, a zbytek je opomenut. Pokud je ovšem do vlastní konstrukce, která po takovém přístupu zbude, vložen veškerý um tvůrce, pak se jistě jedná také o velmi cenná řešení.

Tento přístup vytvořil z orlojů mimořádná díla lidského ducha, která i po staletích mohou oslovit nejen prosté lidi, ale i odbornou veřejnost. Tím se naplňuje mýtus o orloji, který byl tak hezky podán A. Jiráskem ve Starých pověstech českých: „A již jim vykládal, že ten orloj je všem učeným lidem a zvláště astronomům divný a vzácný bez těch tatramanů, neboť se ukazuje, jak slunce svým během od západu k východu po zodiaku jde nebo postupuje a na kterém znamení, na kolikém stupni každý den z roku do roka stojí, ... že ten nový staroměstský orloj jest ne jako jiný orloj, ale že je tak divný a znamenitý, že jistě je nad jiné všechny orloje na světě.“

Dnes jsme skromnější. Pražský orloj zřejmě není nejdokonalější ze všech orlojů na světě natolik, aby mu rovného nebylo. Každý orloj byl unikátním výtvozem, měl svá specifika, lišil se od jiných. Přesto můžeme říci, že ten pražský má v sobě jisté prvky, které byly ve své době nejspíš novým celosvětovým přínosem.

Literatura.

- [1] Zdeněk Horský a Emanuel Procházka Pražský orloj; Acta rerum naturalium nec non technicarum – Nakladatelství ČSAV, Praha 1964, str. 83 – 146.
- [2] Zdeněk Horský: Pražský orloj. Panorama, Praha 1988. 160 stran.
- [3] Jan Tábořský z Klokotské Hory: Zpráva o orloji pražském. Praha 1570. (Jen jako rukopis, tiskem nevydáno.)