

# Inspiromat pro výuku a Tecomat: co v učebnici automatizace nebylo

## (část 3 – řízení tepelných soustav – od varné konvice k budovám, 1. díl)

Dosavadní náplň seriálu bylo měření na tepelných soustavách s využitím programovatelného automatu (PLC) Tecomat Foxtrot a zobrazení časových průběhů. V první části to bylo měření teploty lidského těla, která je po dobu měření stálá. Výsledky měření byly současně příležitostí k pochopení dynamiky senzoru, který lze považovat za soustavu prvního řádu. Její dynamika byla ilustrována i na příkladech obdobných soustav z oboru elektrotechniky a hydrauliky. Druhá část se zabývala měřením teploty soustav, která se pomalu mění vlivem okolního prostředí (spontánním ochlazením nebo ohřevem). Spolu s dynamikou senzoru lze měřenou soustavu považovat za soustavu alespoň druhého řádu se dvěma vstupy. Následovalo měření teploty vody ve varné konvici. Tu lze považovat za soustavu druhého nebo vyššího řádu se dvěma vstupy – a navíc je astatická (integrační). Je možné ji považovat za model tepelných soustav v technice budov. Varnou konvici se budeme zabývat i nadále, ale nyní z pohledu jejího řízení a regulace teploty. Ilustrováno bude řízení výkonu metodou pulzně šířkové modulace (PWM) a možností řešení nespojitého regulátoru (termostatu).

### Varná konvice a budovy?

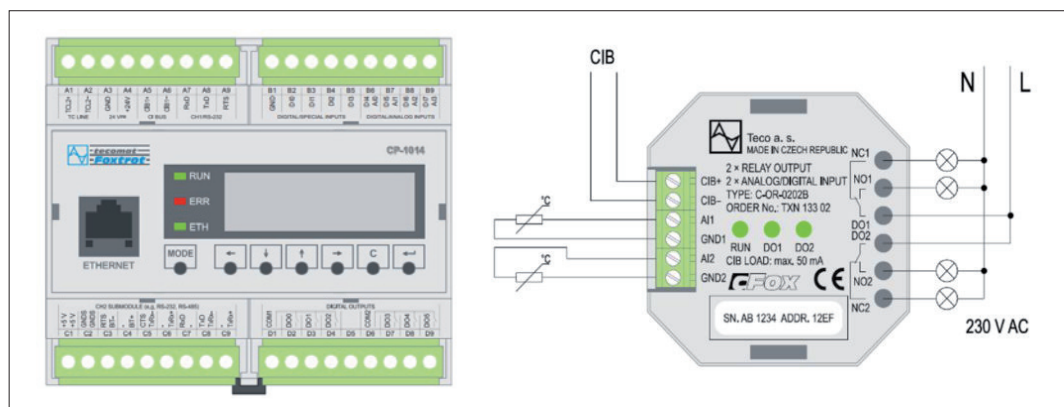
Elektrická rychlovarná konvice (dále jen varná konvice) je nejenom vhodná k rychlému uvaření vody na čaj nebo kávu, ale může být použita také jako laboratorní učební pomůcka k experimentování s programovatelnými automaty. Je jednoduchá a snadno dostupná. Grafická prezentace výsledků je názorná. Významná je ale skutečnost, že může sloužit jako zjednodušený a zrychlený fyzikální model tepelných procesů v budovách při vytápění v zimním období nebo při chlazení (kli-

peľného zdroje). Ten je ovšem jednopolaritní – topení může být buď zapnuto (popř. s proměnným výkonem), nebo vypnuto. V terminologii teorie regulace lze situaci charakterizovat jako „razantní omezení akční veličiny“, která může mít jen kladné znaménko, a akční veličina opačné hodnoty není dostupná. Vědomě vylučujeme možnost, kdy bychom přetopenou místnost chladili, např. systémem fan-coil (je-li instalován) nebo třeba otevřením okna, což by bylo z energetického hlediska nesmyslné. Za druhý vstup lze považovat ztráty – spontánní vyrovnávání tep-

budovy. Nově postavené a renovované budovy se vyznačují minimálními tepelnými ztrátami („zateplení“ bývá hlavním důvodem renovace budovy). Tepelné ztráty budovy se tím minimalizují, u „nulových domů“ se blíží k nule. Je to sice pozitivní jev, ale vyžaduje změnu přístupu k řízení procesu vytápění – případně přehřátí („přetopení“) prostoru se tak stává dlouhodobým a zhoršuje pocit tepelné pohody obyvatel. Neuvažujeme-li dodatečné chlazení prostoru, je třeba proces vytápění řídit tak, aby nedocházelo k výraznému přehřívání. Dynamice tepelných procesů je účelné přizpůsobit i časový program budovy (předstih začátku a konce vytápění). Jestliže např. známe (nebo umíme změřit) dobu, za jakou po vypnutí klesne teplota v místnosti pod tolerovanou hodnotu, můžeme vytápění ukončit přiměřeně dříve. Podobně je možné optimalizovat dobu začátku vytápění. Vědomě zde pomíjíme důsledky zateplení budovy pro kvalitu vnitřního prostředí (vlhkost a znečištění vzduchu, koncentrace CO<sub>2</sub>) a možnosti řešení (např. nucená ventilace s rekuperací).

Podobnou dynamiku vykazuje i varná konvice, ovšem s jinými časovými měřítky. Ilustrují ji příklady 5 a 6 v závěru předchozí části seriálu (Automa 2018, č. 5, str. 16 až 19).

Tam uvedený obr. 6 znázorňuje průběh teploty vody při zapnutí a vypnutí konvice a obr. 10 průběh teploty při přerušovaném zapínání a vypínání konvice. Na obr. 7 a obr. 8 je schéma elektrického a hydraulického obvodu, jako hrubě zjednodušeného modelu procesu soustavy se dvěma vstupy. Na obr. 13 a obr. 14 jsou uvedena doplněná schémata, která respektují tepelnou kapacitu topného tělíska. Schémata na obr. 15 a obr. 16 navíc respektují i tepelnou kapacitu pláště konvice. Obdobnou dyna-



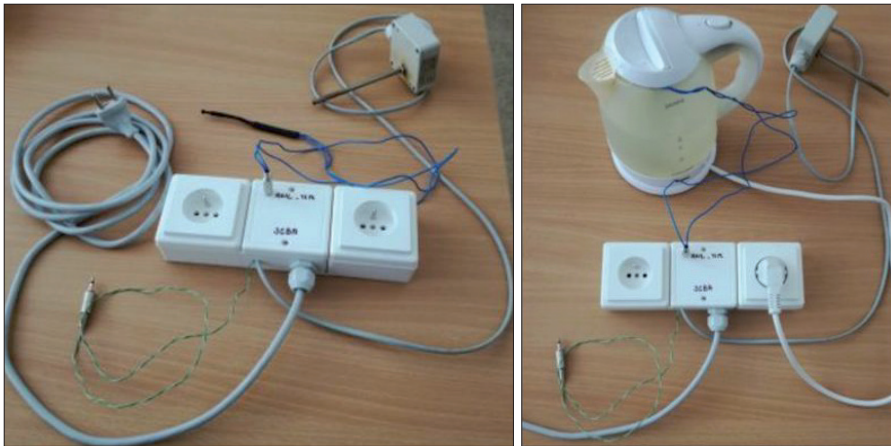
Obr. 1. K experimentům s varnou konvicí byl použit programovatelný automat Tecomat Foxtrot s centrální jednotkou CP1014 (vlevo) a periferní modul C-OR-0202B připojený na sběrnici CIB (vpravo)

matizaci) v letním období (což je podobný proces, jen s opačnými znaménky). Oba typy objektů lze považovat za soustavy se dvěma vstupy, v podstatě lineární. Obdobnou dynamiku vykazují i jiné (nejenom tepelné) soustavy v domácnosti nebo v průmyslu.

Pro jednoduchost uvažujme vytápění místnosti. Prvním vstupem řízené soustavy je tok tepelné energie (tepelný tok) z topidla (te-

loty v místnosti s teplotou vnějšího prostředí. Tepelné ztráty se uplatňují trvale – jak v průběhu aktivního topení, tak při jeho vypnutí. Intenzita tepelných ztrát se zvyšuje s rozdílem teplot uvnitř a vně místnosti a závisí na kvalitě izolace pláště budovy (tepelné propustnosti zdíva a oken, popř. na „tepelných můstcích“). Dynamika tepelných ztrát je určována schopností akumulace tepla v plášti

miku, ovšem s jinými časovými konstantami, vykazuje i místnost vytápěná elektrickým přímotopným zdrojem tepla. Podobně se chovají i jiné tepelné soustavy v domácnosti, např. elektrické podlahové topení, elektrický nebo plynový kotel, bojler, průtokový ohřivač vody nebo plynová pečící trouba, varná deska nebo ploténka, plynový hořák, ale i ohřev vody v pračce a jiných tepelných

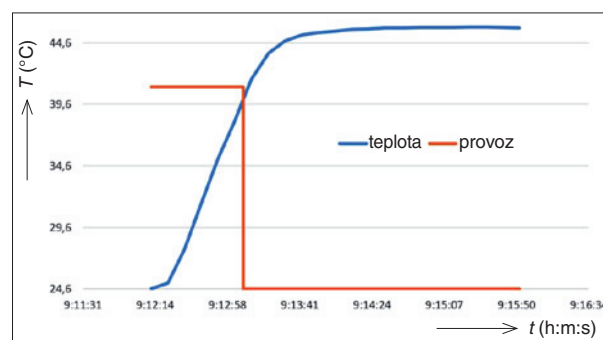


Obr. 2. Vlevo sestava přípravku pro řízení varné konvice s polovodičovým senzorem NTC12K (nahore uprostřed), odporovým snímačem Pt1000 (vpravo nahore) s linkou sběrnice CIB pro připojení k systému Foxtrot, vpravo přípravek s varnou konvicí

spotřebičích. Pro většinu uvedených soustav platí, že z tepelného zdroje proudí neměnný tepelný tok. Kdyby neexistovaly tepelné ztráty, narůstala by teplota v soustavě (teoreticky) lineárně a až do nekonečna. V důsledku tepelných ztrát (které nelze nikdy vyloučit) teplo ze soustavy uniká (většinou úměrně s rostoucím rozdílem teplot), až se teplota ustálí v rovnovážném stavu, kdy je vyrovnán tepelný tok ze zdroje a tepelný tok ztrát – např. u vláknové žárovky. U většiny tepelných soustav nedochází k takto nekontrolovanému ohřevu. Například u varné konvice se růst teploty zastaví při varu vody (jestliže se všechna voda nevypaří – pak ohřev zastaví bezpečnostní pojistka). Často je ohřev cyklicky přerušován a spouštěn termostatem při regulaci teploty (např. v pečicí troubě, automatické pračce, zavařovacím hrnci). Téměř vždy je tepelný zdroj nebo spotřebič vybaven bezpečnostní pojistkou, která zabrání překročení teploty nad nastavenou hodnotu. Někdy je ohřev ovládnán ručně obsluhou, např. při přípravě jídel. Selhání bezpečnostní pojistky má fatální následky, obvykle destrukci přístroje, požár nebo jinou havarijní situaci.

Jiná situace nastává v místnostech s kapalinovým vytápěním nebo chlazením. Zde má teplosměnné médium (nejčastěji voda) dlouhodobě stálou teplotu a tepelný tok je úměrný rozdílu teplot vody a vytápěného prostoru. Patrně nejrozšířenější je teplovodní vytápění s otopnými tělesy (radiátory). Rovněž zde se lze setkat s tepelnou soustavou se dvěma vstupy. Prvním vstupem soustavy je otopné těleso, které zprostředkuje předávání teploty z topné vody do vzduchu v prostoru vytápěné místnosti. I ten působí jednosměrně – buď je zapnut (popř. s regulovaným průtokem), nebo je vypnut. Druhým vstupem jsou zase tepelné ztráty, které působí v podstatě trvale a nezávisle na stavu topného tělesa – při jeho zapnutí i vypnutí. Oproti předchozímu případu s přímotopným topidlem zde jde o statickou soustavu. Teplota vzduchu v místnosti nemůže být vyšší, než je teplota topného tělesa (neuvážujeme-li jiné zdroje tepla). Kdybychom

(teoreticky) vyloučili tepelné ztráty, ustálila by se teplota ve vytápěném prostoru na teplotě topné vody. Působením druhého vstupu (ztrát) je ovšem teplota v prostoru jiná – v závislosti na venkovní teplotě (tepelných ztrátách nebo tepelných ziscích). Zjednodušeným modelem takové soustavy v oboru elektrotechniky může být elektrický obvod podle obr. 7, obr. 16 a obr. 15 – stále se odkazujeme na minulý díl seriálu – upravený tak, že zdroj proudu v levé části schématu ( $i_k$ ) nahradíme zdrojem konstantního napětí. Obdobně v hydraulické analogii podle obr. 8, obr. 14 a obr. 16 by v levé části schématu bylo třeba přívod s konstantním průtokem nahradit přívodem z velké nádrže (zdroje konstantního tlaku). Ve virtuálním modelu je úprava snadná, fyzikální model by byl nesrovnatelně komplikovanější (konstrukčně pracnější a v provozu méně spolehlivý) oproti připojení varné konvice – proto u ní raději zůstanme.



Obr. 3. Průběh teploty ve varné konvici (modře) a její aktivity (oranžově)

Při tradičním centrálním vytápěním s otopnými tělesy je pro celý objekt topná voda ohřívána na stálou teplotu (obvykle v rozmezí +40 až +80 °C) ze společného regulovaného kotle nebo z předávací stanice. Průtok vody do jednotlivých radiátorů je ovládnán jejich regulačními ventily (dvoustavovými nebo spouště řízenými). Při lokálním (etážovém) vytápění bývají ventily pevně nastaveny a podle potřeby se ovládá aktivita kotle. Při kapali-

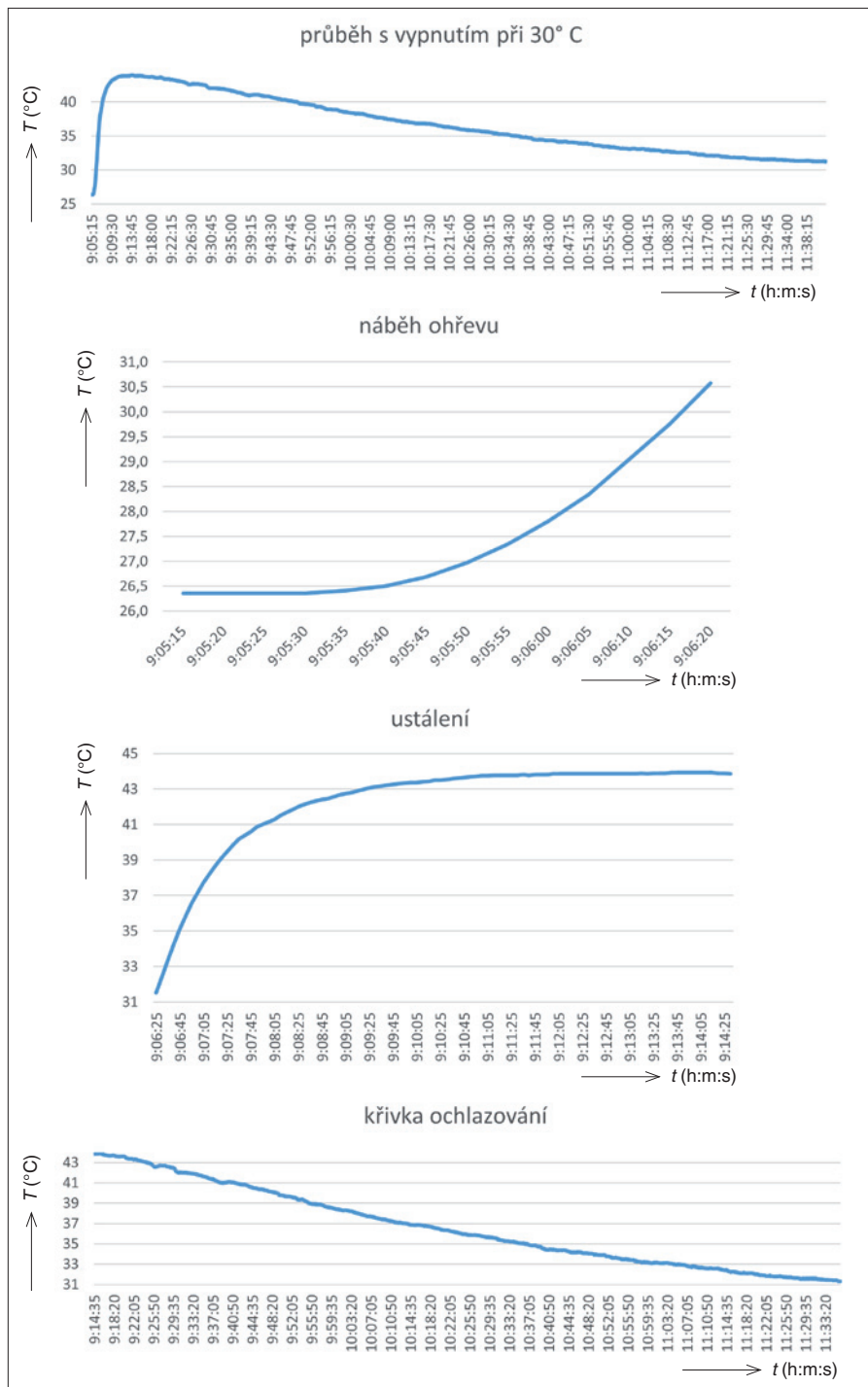
novém podlahovém vytápění protéká otopné médium (obvykle voda) meandrem z trubek v hmotě podlahy a touto cestou ohřívá vzduch ve vytápěné místnosti. Teplota vody bývá jen kolem +30 °C – bylo by nepříjemné mít „horkou půdu pod nohama“. Na podobném principu (ovšem v opačném směru) působí stropní chlazení. Obdobně pracují i jiné tekutinové systémy topení a chlazení v budovách (např. klimatizace, fan-coil, stěnové vytápění apod.), ale i v technologických procesech (např. při ohřevu nebo chlazení chemických reaktorů nebo v potravinářských zařízeních). Obdobné procesy se uplatňují i v činnosti chladniček, mrazniček a tepelných čerpadel, ale i ve velkých chladírnách a mrazárnách při výrobě, dopravě a prodeji potravin, v kuchyních restaurací a výrobnách potravin.

Obrázky obr. 8, obr. 14 a obr. 16 s hydraulickými schémata byly do textu zařazeny především pro názornost výkladu – snáze si lze představit plnění nebo vyprazdňování nádrží a tok kapaliny než „přelévání tepla a elektrického náboje“. Podobná problematika se objevuje i u reálných hydraulických soustav v technologických a biologických procesech, v rybníkářství a vodním hospodářství, vodárenství a lodní dopravě – např. při řízení plavebních komor. V malém měřítku se lze s dynamikou hydraulické soustavy setkat např. při vypouštění umyvadla, vany, bazénu nebo při splachování WC.

## Hrátky s varnou konvicí ve Zlíně

Dále popsané experimenty s varnou konvicí byly realizovány v laboratoři SPŠ Zlín. Při vysvětlování pojmu „regulovaná soustava“ je vhodné uvést konkrétní příklady, se kterými se žáci již setkali nebo setkávají v běžném životě, např. elektrický bojler, ploténka elektrického sporáku, vytápění místnosti nebo splachovadlo. Tyto soustavy ale nelze umístit do laboratoře, a proto nejsou vhodné jako názorné ukázky. Varná konvice se používá snad v každé domácnosti. Má tedy smysl vyzkoušet ohřev a regulaci teploty vody pomocí tohoto běžného kuchyňského zařízení. K pokusům byla použita varná konvice o příkonu 2 000 W s topným tělískem zabudovaným do dna. Při experimentech

byla vždy naplněna 1 l vody. K jejímu řízení byl použit programovatelný automat Tecomat Foxtrot, který je v laboratořích SPŠ Zlín tradičně využíván. Centrální jednotkou byl modul CP1014 s modulem C-OR-0202B připojeným na sběrnici CIB (obr. 1). Centrální jednotka CP1014 je vybavena osmi různě nastavitelnými vstupy a šesticí reléových výstupů. Obsahuje uživatelský displej 4 × 20 znaků. Prostřednictvím systémové



Obr. 4. Průběh ohřevu s vypnutím teploty +30 °C: celkový průběh, počáteční úsek, kulminace po vypnutí a počátek chladnutí, detail v okolí vrcholu, ochlazování

sběrnice TCL2 lze připojit další moduly vstupů a výstupů. Na sběrnici CIB je možné připojit další moduly ze sortimentu stavebnice elektroinstalačních prvků CFox – v popisovaném případě již zmíněný modul C-OR-0202B (www.tecomat.cz). Je navržen pro umístění do instalační krabice a osazený dvojicí reléových vstupů s prepínacími kontakty. Trvalý proud každým výstupem může být až 16 A. Modul je zároveň opatřen dvěma univerzálními vstupy. Na každý lze připojit odporový teploměr (po vhodné volbě konfigurace). Pro laboratorní experimenty byl použit polovo-

dičový teploměr NTC12K a odporový teploměr Pt1000. Modul C-OR-0202B byl zabudován do ploché elektroinstalační krabice na omítku. Výstupy relé byly propojeny se dvěma zásuvkami (obr. 2). Pravá zásuvka je vyvedená jako spínací a levá jako rozpínací. K modulu je pevně ve svorkovnici připojen teploměr Pt1000, druhý se připojuje zásuvkou Jack umístěnou v krytu krabice. Toto řešení dovoluje snadno připojit různé typy odporových teploměrů a ověřit jejich funkci. Druhým konektorem Jack je připojena kroucená dvoulinka sběrnice CIB pro připojení k PLC.

### Přechodný děj při zapnutí a vypnutí

Při prvním měření byla z bezpečnostních důvodů voda v konvici ohřívána jen na +40 °C. Cílem bylo zjistit časový průběh teploty během vypnutí konvice a po následném vypnutí konvice. Zásuvka s konvicí byla řízena jednoduchým programem (v podstatě jen příkazem volání funkčního bloku) zapsaným v jazyce strukturovaného textu (ST, *Structured Text*), který se při výuce běžně používá:

```
RS_konev(S := (teplota_2 < 40),R1 := (teplota_2 > 40),Q1 => ohrev_1);
```

Jde o funkční blok pro klopný obvod typu RS. Konvice je zapnutá, je-li teplota vody nižší než +40 °C, a vypnutá při teplotě vyšší než +40 °C (při teplotě rovné 40 °C se stav nemění). Příkaz realizuje algoritmus dvoustavového regulátoru bez hystereze. K zobrazení časových průběhů byla využita funkce Data Logger systému Tecomat Fox-trot. Ten ve zvoleném intervalu (zde po 3 s) ukládá do paměti hodnoty vybraných proměnných. Výsledný blok dat lze ve formátu MS Excel přenést do počítače a tam dále zpracovávat.

Časový průběh teploty vody v konvici je na obr. 3. Časové údaje na vodorovné ose (zde a v dalších příkladech) jsou ve formátu h:m:s (hodiny:minuty:sekundy). Modře je zobrazen průběh teploty, oranžově aktivity zásuvky s konvicí. Oproti obrázkům z minulých částí seriálu má zde graf poměrně hladký průběh, bez „schůdků“ a krátkých impulzů („chlupů“), způsobených kvantovacím šumem. Důvodem je delší interval vzorkování. Rovněž je zde patrná doba průtahu – doba, než se ohřeje dno konvice a začíná ohřev vody (asi 10 s zhruba v době 9:12:12 až 9:12:22). Následuje strmý a téměř lineární nárůst teploty. Při 40 °C ohřev vypne, ale teplota ještě několik sekund strmě roste, což je způsobeno rozehřátým dnem, které předává akumulované teplo a ohřívá vodu až na 45,89 °C (zhruba v čase 9:15:22), kdy průběh kulminuje, a v čase 9:15:42 teplota začíná zvolna klesat. Průběh dokumentuje setrvačnou dynamiku konvice, která je zjevně soustavou druhého nebo vyššího řádu. Pro samotné topné těleso s hmotou dna lze odhadnout dynamiku alespoň druhého řádu. Po vylití horké vody a při novém plnění si lze všimnout, že dno ve styku s vodou zasyčí, což dokazuje, že teplota samotného dna je vyšší než teplota vroucí vody. Teplo akumulované ve hmotě dna se ještě delší čas po vypnutí předává vodě v konvici. Důsledkem je „tepelná setrvačnost“ – skutečnost, že po vypnutí vzroste teplota ještě zhruba o dalších 6 °C. Skutečnost lze interpretovat i opačně: abychom vodu ohřáli na hodnotu v tolerančním pásmu v okolí hodnoty 46 °C, je třeba konvici vypnout již v předstihu při teplotě 40 °C. Této teploty bude dosaženo za dobu asi 2 min. Tyto údaje mohou být inspirací pro návrh „in-

teligentního termostatu“ – nejenom pro řízení konvice, ale i pro vytápění či chlazení místnosti. Časový údaj o trvání náběhu může být využit ke korigování časového programu pro řízení klimatu v místnosti. Situace je ale komplikovanější – hodnota překmitu i doba potřebného předstihu závisí na dalších vlivech, zejména na žádané hodnotě teploty, na intenzitě a dynamice ochlazování (např. na teplotě okolí, intenzitě ochlazování a na akumulaci schopnosti pláště, na proudění vody v konvici a proudu vzduchu v okolí). Proto by skutečně „inteligentní“ termostat měl mít schopnost tyto hodnoty průběžně zjišťovat (adaptovat se na měnící se podmínky).

### Kontrolní otázky

1. Je teplota varu skutečně 100 °C vždy a všude?

2. Při jaké teplotě vře voda v obvyklých nadmořských výškách, na vrcholcích Alp a v Himálaji?
3. Jaké teploty lze dosáhnout v tlakovém hrnci?

### Úlohy:

1. Vyřešte program pro co nepřesnější regulaci teploty v konvici na hodnoty 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C tak, že ohřev přerušíte s odpovídajícím předstihem.
2. Navrhněte algoritmus a program PLC pro automatické nalezení teploty, při níž se po vypnutí zastaví její růst (teplotu kulminace), a odpovídající doby od zapnutí.
3. Navrhněte algoritmus a program PLC pro automatické změření doby, kdy růst teploty kulminuje – pro různé hodnoty teploty, např. pro 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C.

4. Navrhněte algoritmus a program PLC, který zajistí zapnutí konvice tak, aby teplota kulminovala ve zvoleném čase – pro různé hodnoty teploty, např. pro 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C.
5. Navrhněte jinou variantu tepelné soustavy pro laboratorní experimenty, která bude mít obdobné vlastnosti jako konvice, ale bude vykazovat výrazně rychlejší dynamiku.
6. Podle náběžné části časových průběhů teploty z obr. 3, obr. 4 a podle postupů z učebnic proveďte identifikaci soustav. Jak byste postupovali při identifikaci procesu ochlazování (tepelných ztrát) podle sestupné části průběhů?

(dokončení v příštím čísle)

Ing. Ladislav Šmejkal, CSc., Teco, a. s.,  
a externí redaktor Automa,

Ing. Josef Kovář a Ing. Zuzana Prokopová,  
učitelé automatizace na SPŠ Zlín



## Tecomat Foxtrot

Platforma pro automatizaci a komunikaci strojů, procesů, budov a dopravy



www.tecomat.cz

IEC-61131 | IoT | Smart House | Smart City | Industry 4.0

www.tecoacademy.cz

## Čtyři v jednom ve Vídni

V druhé polovině května se ve Vídni konaly veletrhy SMART Automation, C41, zaměřené na řízení kvality, a veletrh obrábění a zpracování kovů Intertool. V kongresových sálech vídeňského výstaviště zároveň probíhala konference IoT FORUM CE. Návštěvník si tedy mohl v jeden čas a na jednom místě udělat ucelenou představu o situaci na trhu u našich rakouských sousedů.

Podle závěrečné zprávy se na veletrzích představilo přes 450 vystavovatelů a navštívilo je více než 22 000 návštěvníků. Velkou výhodou těchto veletrhů je uspořádání výstaviště, kde návštěvník od vstupu prochází ukázkou výrobního procesu. Od softwarového návrhu produktu přes vývojové prostředí řízení a automatizace, měření a regulaci, řízení kvality až po vlastní výrobu na strojích, včetně využití robotů ve výrobě. Mnoho vystavujících společností se ztotožnilo s ideou: „Od chytrých myšlenek k chytrým produktům“.

Ve dnech 16. a 17. května se v kongresovém sále konala konference IoT Forum 2018. Dvoudenní akce představila názory více než 60 řečníků. Diskutovala se dnes všeobecně vnímaná témata vlastnictví dat a personalizace jejich využití a otázky odpovědnosti za nezpracovaná – surová data



Obr. 1. Místo konání veletrhů: výstaviště Messe Wien (foto: Reed Messe Wien)

a za výsledky z nich zpracované. Nikdo ze zúčastněných nerozporoval skutečnost, že digitalizace určuje naši budoucnost. Pozornost se spíše obracela k tématům, která lze zahrnout do posunu od úvah, jak budeme žít zítra, k úvahám, jak zítra žít chceme.

Velká pozornost byla věnována současným koncepcím, kde digitální dvojče v cloudu umožňuje vývoj produktu, návrh výrobní linky pro jeho výrobu včetně testování a následného sledování dynamiky a optimalizace

výroby po vazbu na administraci, obchod a řízení vztahu se zákazníky. K stále častějším tématům patří *smart cities* a *smart farming*. Využití rozšířené reality a blockchainů bylo předvedeno nejen v prezentacích, ale také v mnoha stáncích. Jde o věci, které si cestu do průmyslu již našly.

Příští ročník Smart Automation se uskuteční od 14. do 16. května 2019 v Design Centre v Linci.

Radim Adam