

JEDNODUCHÉ ROZHRAŇÍ PRO POČÍTAČEM PODPOROVANÉ ŽÁKOVSKÉ EXPERIMENTY

Simple Interface for Computer-aided Pupils' Experiments

Štěpánka Kubínová, Ivana Škraňková, Jan Šlégr, Univerzita Hradec Králové,
Přírodovědecká fakulta stepanka.kubinova@uhk.cz

Abstract

A wide range of computer-aided experimental sets is available on the market, whether it is the Czech iSES system, which has been developing and constantly improving by assoc. prof. Lustig from the Faculty of mathematics and physics of the Charles University, or various foreign systems (Vernier, Pasco, IP Coach, etc.).

This article aims to familiarize the public with the possibilities that exist in this area and to show that there is no need to fear the construction of such experimental sets. This article describes the fundamentals of computer measurement (AD conversion) and the properties of Arduino card, which can be the basis of an inexpensive measurement device, whether with or without the computer. At the end, the measurement of CO₂ production by plants is described.

Klíčová slova

Počítačem podporované měření, didaktické pomůcky, školní experimenty

Keywords

Computer-aided measurement, teaching aids, school experiments

Úvod

Vzhledem k systému financování českého školství je možnost zakoupení většího počtu sad pro experimenty s počítačem vázána na zpracovávání rozličných projektů, a i tehdy se musí učitelé rozmyšlet, zda raději zakoupí sestavu pro počítačem podporované experimenty, nebo zda raději doplní a nahradí stav např. demonstračních pomůcek. Velmi sympatická je proto

snaha konstruovat rozhraní pro počítačem podporovaná měření podstatně levněji. Je pak na zvážení každé školy, zda oželí luxus toho, že profesionální přístroje stačí vybalit z krabice a většinou je možné rovnou začít měřit. V případě vlastní konstrukce je toto nepohodlí vyváženo podstatně nižší cenou zhotovených sestav. Pokud na škole působí přírodovědný či technický kroužek nebo Klub AMAVET, je naprosto ideální konstruovat tato zařízení přímo s žáky.

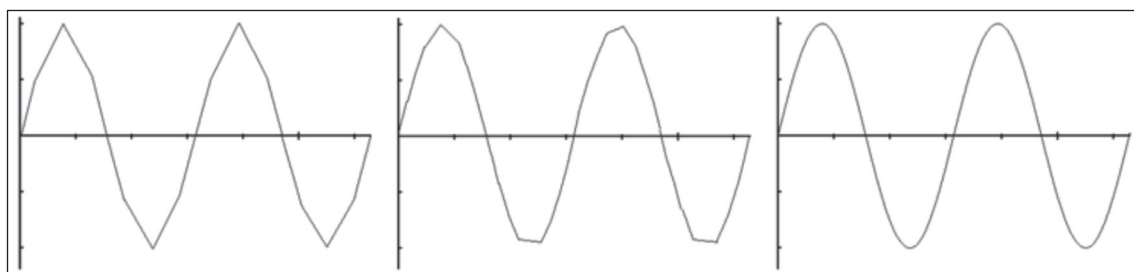
Měření s počítačem, AD konverze

V současné době je možné na trhu běžně pořídit dva druhy senzorů: s digitálním výstupem, u nichž je hodnota měřené veličiny přenášena digitálně přes (nejčastěji) sériové rozhraní, a s výstupem analogovým. V druhém případě je výstupem napětí, které je přímo úměrné měřené veličině. Měření napětí pak probíhá stejně jako u digitálních multimetrů, metodou analogově-digitální konverze. Analogově-digitální převodník (častěji AD převodník nebo anglickou zkratkou ADC) převádí spojité, analogový signál na signál digitální, reprezentovaný dvojkovým číslem. V případě AD převodníků jsou kromě maximální měřitelné hodnoty (tedy rozsahu měření, jak jej známe i z analogových měřících přístrojů) důležitými faktory vzorkovací frekvence a rozlišení.

Vzorkovací frekvence udává, kolikrát za sekundu probíhá měření. Při měření pomalých dějů (například závislost osvětlení na čase během dne) není vzorkovací frekvence rozhodující. Stačilo by například jedno měření za minutu, ale pokud by měření probíhalo každou sekundu, není to zásadní

problém a hodnoty by bylo možné průměrovat, aby se eliminovaly krátkodobé výkyvy. Pokud ale bude měřený děj rychlý (například hodnota střídavého napětí v síti, které má frekvenci 50 Hz), je potřeba volit vzorkovací frekvenci, která je několikanásobkem frekvence měřené veličiny (Obr. 1).

Rozlišení AD převodníku udává, na kolik „dílků“ je rozdělen měřící rozsah. Dále popsaná karta Arduino má šest AD převodníků s rozsahem 5 voltů a rozlišením 10 bitů. To znamená, že těchto pět voltů je rozděleno na $2^{10} = 1024$ dílků, tedy nejmenší měřitelný rozdíl napětí je $5/1024 = 4,8828\dots$ mV. Je-li měření napětí mezi nulou a 4,88 mV, uloží se do paměti dvojkové číslo 000000000. Bude-li měřené napětí mezi 4,88 a 9,76 mV, uloží se číslo 000000001, pro napětí mezi 9,76 mV a 14,6 mV číslo 000000010 a tak dále. Digitální měření spojitých veličin je tedy vždy spojeno se ztrátou spojitosti, což však při dostatečném rozlišení není kritické. V praxi se používají dvanácti- i čtrnáctibitové převodníky, což na pěti voltech dává rozlišení 1,2 resp. 0,3 mV.



a) Vzorkovací frekvence 8 Hz

b) Vzorkovací frekvence 16 Hz

c) Vzorkovací frekvence 128 Hz

Obr. 1 Vliv vzorkovací frekvence na záznam sinusového napětí o frekvenci 50 Hz

Karta Arduino

Arduino je v poslední době velmi populární zařízení obsahující mikroprocesor ATmega s celou řadou rozhraní. Procesor lze programovat pomocí velmi jednoduchého programovacího jazyka Wiring. V současné době se vyrábí celá řada typů, které se liší výkonem procesoru a velikostí paměti (některé z těchto karet mají výkon srovnatelný s dnešními mobilními telefony, tedy výkon, jaký před několika lety měly osobní počítače), stejně jako počtem vstupů a výstupů. Bližší informace je možné najít na webové stránce Co je to Arduino (2012), didaktické aplikace popisuje Kubínová (2015).

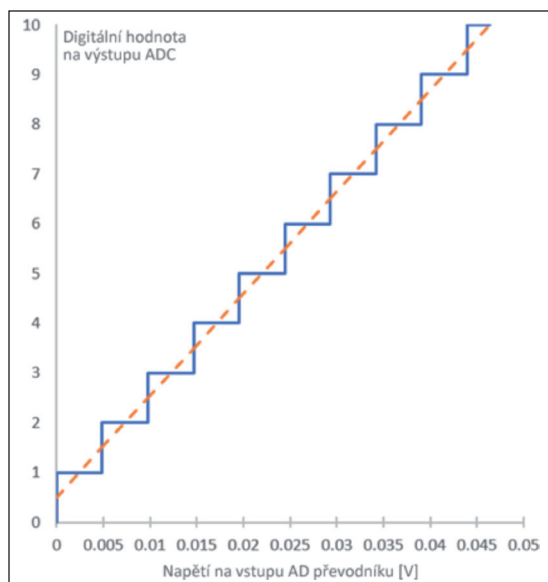
Díky popularitě mezi nadšenci je cena těchto desek poměrně nízká, což je pro školní použití značná výhoda. Zároveň je dostupná celá řada vstupních a výstupních zařízení. Analogové vstupy desky mohou zpracovávat signály z čidel, jejichž výstupní veličinou je napětí (např. čidla teploty LM36, čidlo tlaku MPX4115). Digitální vstupy zpracovávají data z digitálních čidel (např. zesilovač pro termočlánek s digitálním výstupem, pH metr nebo akcelerometr). Na digitální výstup karty může být pro demonstrační účely připojen LED displej s velkými číslicemi, pro frontální použití LCD displej, rovněž může být použit záznam na SD kartu. Naměřená data lze posílat do PC přes USB port.

Analogové vstupy nejrozšířenějších karet Arduino Duemilanove a Arduino Leonardo využívají desetibitové ADC s rozsahem pět voltů. Rozsah je možné zvětšit pomocí děliče napětí. Vstupy karty jsou chráněny diodami, takže krátkodobé přepólování napětí kartu neohrozí. Podobně je možné ke kartě připojit analogové senzory, které mají jako výstupní veličinu napětí, které je přímo úměrné např. teplotě (např. teploměr LM36). Program

v kartě pak přepočte napětí na teplotu, kterou následně zobrazí na displeji nebo odešle do PC.

V dnešní době existuje celá řada digitálních senzorů pro měření rozličných fyzikálních veličin. Velmi levně lze pořídit takzvané *break-out boards*, což jsou malé destičky plošných spojů, které na sobě mají senzor, případně další obvody (zesilovač signálu, AD převodník). Výstupem senzorů tak může být napětí přímo úměrné měřené veličině, které je pak zpracováno AD převodníkem na analogových vstupech A0 až A5. Pokud senzor obsahuje vlastní logiku, připojuje se pak k digitálním vstupům karty Arduino a komunikuje přes některé z jednoduchých digitálních sběrnic. Protože datový tok nebývá nijak závratný, používá se např. dvouvodičová sběrnice I2C, kdy jedním vodičem (SDA) procházejí data a druhým vodičem (SCL) tzv. hodinový signál (clock), který přenos dat časuje jako tikající metronom a dává přijímači vědět, kdy má číst hodnoty z datového vodiče SDA. Novější karty Arduino mají tyto dva vstupy vyvedeny separátně, u starších desek jsou na pinech A4 a A5.

Obsluhu těchto digitálních senzorů usnadňuje to, že jejich výrobci a dodavatelé často vytvářejí takzvané *knihovny*, které stačí přidat do programu a které řeší komunikaci s break-out-boardem na hardwarové úrovni. Obvykle pak stačí zavolat jednoduchou funkci, která vrátí naměřenou hodnotu.



Napětí [V]	Binární číslo
0.0000	0000000000
0.0049	0000000001
0.0098	0000000010
0.0146	0000000011
0.0195	0000000100
0.0244	0000000101
0.0293	0000000110
0.0342	0000000111
0.0391	0000001000
0.0439	0000001001
0.0488	0000001010

Obr. 2 K rozlišení AD převodníku.

Přenos dat do PC

Pro mnoho začátečníků je velkým problémem získat z měřicího zařízení srozumitelná data, která by bylo možné zpracovávat v tabulkových kalkulátorech, jako je např. Microsoft Excel. Karta Arduino je k počítači připojena přes rozhraní USB, které emuluje sériové rozhraní. Práce se sériovou linkou je velmi jednoduchá a data lze v tomto případě zobrazovat pomocí doplňku do Excelu, který lze stáhnout ze stránek PLX-DAQ (2014) a který po propojení doplňuje naměřené hodnoty přímo do buněk v otevřeném sešitu. Zpracování dat a vykreslování grafů je pak dílem okamžiku.

Při instalaci ovladačů pro kartu Arduino je vytvořen virtuální sériový port, jehož číslo systém Windows ohlásí hned při instalaci nebo jej lze kdykoliv později zjistit ve Správci zařízení (patrně nejkratší cesta je přes Start → Spustit → devmgmt.msc) v oddílu „Porty (COM a LPT)“. Na obrázku 3a) karta Arduino Leonardo emuluje sériový port číslo

13. Toto číslo portu je zapotřebí nastavit v doplňku PLX-DAQ, stejně jako rychlost přenosu dat (9 600 baud, viz Obr. 3b), která je definována v programu pro desku Arduino. Po stisknutí tlačítka Connect začne skript vypisovat přijatá data do buněk.

K tomu je zapotřebí do desky Arduino nahrát kód, který data odesílá. Programování probíhá ve vývojovém prostředí (Arduino IDE), které je v poslední verzi dostupné na webu Arduino IDE (2017) schopné automaticky detekovat typ připojené karty a její sériový port. Pak stačí jen vložit do vývojového prostředí kód, který je elektronickou přílohou tohoto článku, a stisknout tlačítko „Nahrát“. Detaily včetně obrázku je možné najít v souboru s doplňujícími informacemi, který je přílohou tohoto článku.

Jednoduchý program pro měření napětí na vstupu A0 by vypadal takto (řádky začínající dvojicí lomítek jsou komentáře a vývojové prostředí je ignoruje):

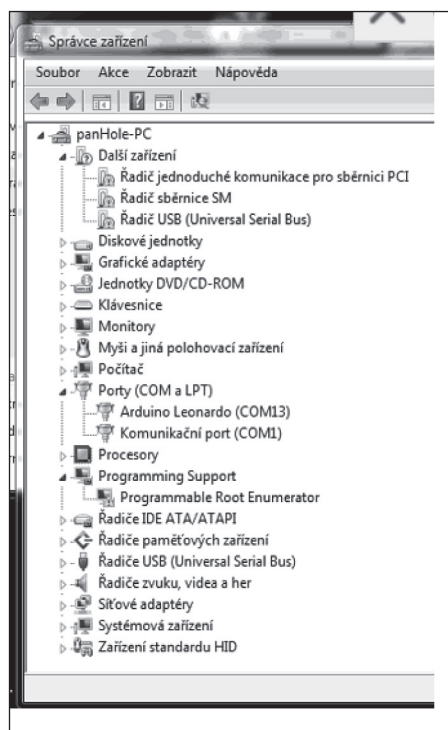
```
// Podprogram setup proběhne při připojení
karty k počítači
void setup() {
    // Nastavení sériové komunikace rychlostí
    9600 baudů:
    Serial.begin(9600);
}

// Podprogram loop se opakuje, dokud je
karta připojena
void loop() {
    // Přechtení hodnoty napětí na vstupu A0
    pomocí funkce analogRead:
    int hodnota = analogRead(A0);
    // Přepoččet dvojkové hodnoty na číslo
    (hodnota 1023 = 5 voltů)
    float napeti = hodnota * (5.0 / 1023.0);
    // Odeslání hodnoty přes sériový port:
    Serial.println(napeti);
}
```

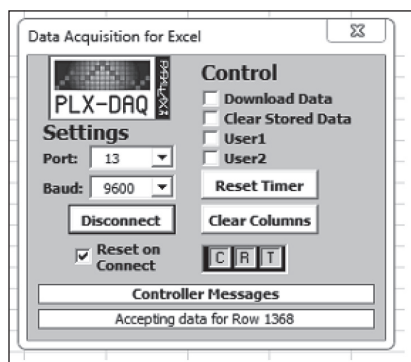
Měření v biologii – produkce CO₂

Klasickým experimentem, který může být prováděn v hodinách biologie nebo v biologickém semináři, je demonstrace faktorů, které ovlivňují průběh fotosyntézy. Je možné měřit teplotu, vlhkost vzduchu, osvětlení a hladinu CO₂. Na tomto příkladu si ukážeme připojení digitálního i analogového senzoru. Je zapotřebí karta Arduino, např. typu Duemilanova, Uno nebo Leonardo, a senzory MQ135, TSL2561 a DHT22, případně jiné, jim podobné. V tomto článku sice neuvádíme přímé odkazy na výrobce, protože by se jednalo o reklamu, ale po zadání označení těchto součástek do vyhledávače zájemce jistě nalezne celou řadu prodejců. U těchto prodejců je ještě nutné zakoupit propojovací desku (tzv. *breadboard*) a sadu propojovacích vodičů (viz dále). Celkové náklady na tento experiment jsou přibližně tisíc korun s tím, že desku Arduino lze použít i při dalších pokusech.

Protože senzory hladiny CO₂ jsou velmi drahé (v případě systémů pro měření s počítačem jde o částky kolem 15 000 Kč, nejlevnější digitální senzor, který lze připojit ke kartě Arduino, vyjde na cca 600 Kč a je zapotřebí jej objednat v zahraničí), byl pro jednoduchost zvolen senzor MQ135 dostupný i v České republice za přibližně sto korun. Tento senzor měří koncentraci několika různých plynů (NH₃, CO₂, NO_x, alkoholové a benzenové páry a další), ale nedokáže mezi nimi rozlišit. Oxid uhličitý je v koncentraci přibližně 400 ppm čtvrtým nejvíce zastoupeným plynem ve vzduchu (po dusíku, kyslíku a argonu). Pokud v uzavřené soustavě nebudou vznikat žádné další plyny, můžeme prohlásit, že senzor MQ-135 měří hladinu CO₂.



Obr. 3a Zjištění čísla sériového portu



Obr. 3b Nastavení doplňku PLX-DAQ

Jedná se o analogový senzor, jehož výstupem je napětí. Senzor využívá vrstvu SnO_2 , jejíž vodivost se mění vlivem redukujících a oxidujících plynů. Na stejném principu pracují detektory alkoholu v dechu – v jejich případě je etylalkohol při průchodu topným elementem oxidován na kyselinu octovou, která proniká do vrstvy oxidu zinečnatého, čímž klesá jeho vodivost. Vrstva SnO_2 je zapojena v sérii s externím rezistorem, takže se změnou odporu této vrstvy mění napětí na rezistoru, což lze snadno změřit.

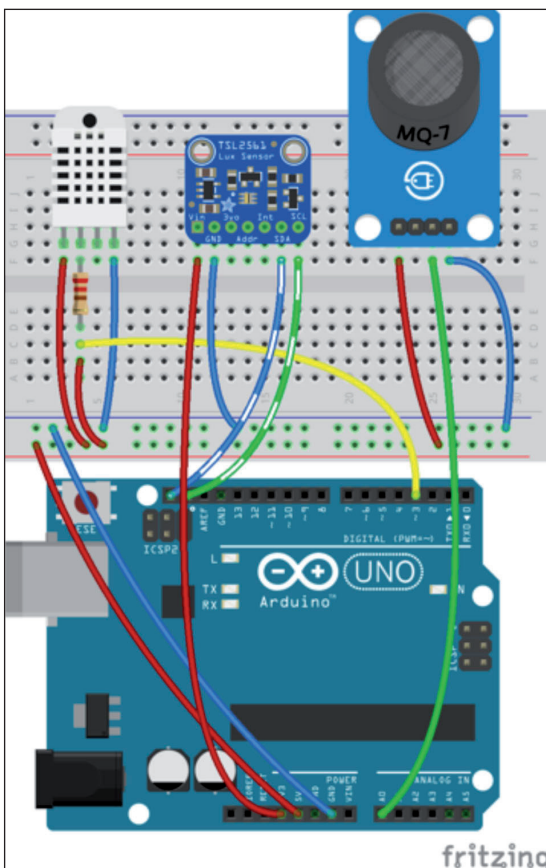
Samotné připojení probíhá tak, že nožičky senzoru zapíchneme do breadboardu (viz Obr. 4b) a pomocí propojovacích vodičů připojíme senzor k desce Arduino. Jednotlivé otvory v jednom sloupci breadboardu (sloupce jsou označeny čísly) jsou navzájem propojené, takže lze senzor v breadboardu připojit propojovacím vodičem zapíchnutým jedním koncem do otvoru ve stejném sloupci (Obr. 4b) a druhým koncem do příslušného vstupu karty Arduino (čísla vstupů jsou na desce rovněž vyznačena). V našem případě je výstup senzoru MQ135 připojen ke vstupu A0. Napájení je na desce Arduino vyvedeno na piny GND (země) a +5 V. Protože napájení potřebují všechny tři senzory, je vhodné tyto dva piny propojit s bočními řadami na breadboardu, označenými červenou (plus) a modrou

(mínus) barvou, odkud je možné napájení napětí připojit k senzorům.

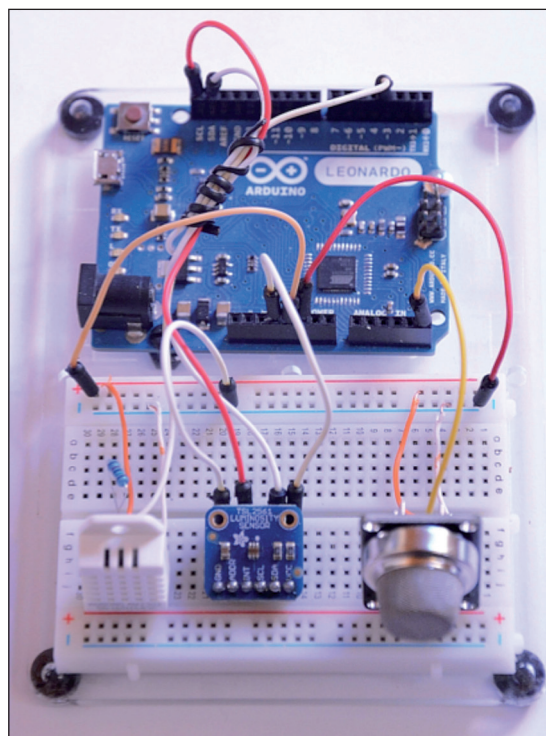
V případě měření osvětlení se setkáme hlavně s digitálními senzory – v tomto případě byl zvolen snímač TSL2561, který měří osvětlení v rozsahu 0,1 až 40 000 lx. Rozsah pěti řádů je v tomto případě nutný, neboť lidské oko má obrovský dynamický rozsah – tyčinky se ve tmě dokáží chemicky adaptovat takovým způsobem, že reagují na jednotlivé fotony (skotopické vidění, Baylor (1979)), kdežto za jasného letního dne do oka dopadá řádově 10^{15} fotonů (Schnapf (1987), Hecht (1942)). Těmto situacím odpovídá osvětlení řádově 10^{-5} a 10^5 luxů.

Senzor TSL2561 je tvořen dvěma fotodiodami na jednom čipu, přičemž jedna je citlivá na celé viditelné spektrum spolu s infračerveným zářením a jedna pouze na infračervené záření. Kombinací výstupů obou fotodiód je získán výstup odpovídající citlivosti lidskému oku.

Pro měření teploty a vlhkosti vnitřního prostředí byl použit kombinovaný senzor DHT22, který umožňuje měřit teplotu v rozsahu -40 až $+80$ °C s přesností $\pm 0,5$ °C a relativní vlhkost vzduchu v rozsahu 0 až 100 % s přesností ± 2 %. Komunikuje přes velmi jednoduché One-Wire rozhraní, takže se připojuje pouze třemi vodiči – kromě kladného a záporného pólu napájení je zapotřebí jeden datový vodič, propojený rezistorem kolem 10 k Ω s kladným pólem (viz Obr. 4). Měření teploty je realizováno termistorem, polovodičovou součástí, jejíž elektrický odpor je definovanou funkcí teploty. Fyzikálně zajímavější je měření vlhkosti vzduchu – dvě ploché elektrody kondenzátoru jsou odděleny tenkou porézní vrstvou, do které může pronikat vzdušná vlhkost, čímž se podstatně zvyšuje kapacita kondenzátoru. Protože je relativní vlhkost vzduchu i funkcí teploty, používá se výsledek měření teploty k výpočtu vlhkosti přímo v senzoru. Výsledek je pak odeslán přes One-Wire rozhraní.



Obr. 4a Fotografie připojení senzorů



Obr. 4b Schéma připojení senzorů

Schéma zapojení jednotlivých senzorů je na obrázku 4a, fotografie zapojení na univerzální desce na obrázku 4b. Ideální je zapojovat senzory postupně a konstruovat výsledný program z částí, které pracují s jednotlivými senzory. Tak je možné hned odhalit problémy v zapojení i ve zdrojovém kódu programu. Zdrojové kódy jednotlivých částí i celého programu jsou elektronickou přílohou článku.

Experiment byl proveden s odkvetlou vánoční hvězdou (pryšec nádherný, *Euphorbia pulcherrima*), na které už podle názoru autorů nebylo co

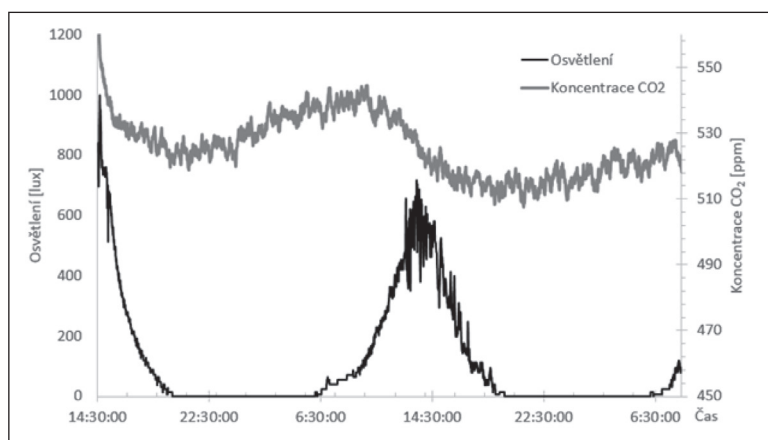
zkazit. Rostlina byla spolu se senzory umístěna do utěsněné dřevěné krabice s prosklenou přední částí. Z krabice vedl pouze USB kabel a hadice pro zalévání rostliny. Soustava by sice vzhledem k měření množství CO_2 měla být uzavřená, ale při delším měření bez závlaky může dojít k odumření rostliny, které je provázáno zvýšeným výdejem CO_2 .

Na obrázku 5 jsou výsledky dvoudenního měření koncentrace CO_2 (šedá) a osvětlení (černá křivka). Ze záznamu je zřejmé, že v nočních hodinách v uzavřeném prostoru koncentrace CO_2 roste, během dne, kdy probíhá fotosyntéza a rost-

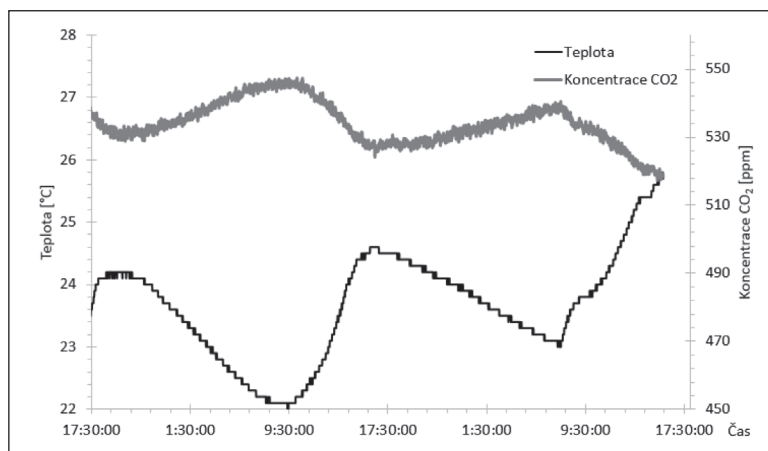
lina CO_2 spotřebovává, koncentrace klesá. Pokles koncentrace je patrný hned po východu Slunce a prvním osvětlení listů.

Lze sledovat i další jevy – například jak se během dne a noci mění teplota a vlhkost či jak teplota vzduchu ovlivňuje průběh fotosyntézy. Z obrázku 6 je zřejmé, jak se teplota během dne mění (a rovněž to, že se zde uplatňuje digitální konverze analogové veličiny – teploty, viz Obr. 2). Během časných ran-

ních hodin druhého dne měření se sepnul kotel vytápějící učebnu, takže došlo k ohřátí experimentální soustavy nejen vlivem skleníkového jevu při východu Slunce, ale velmi podstatně i zvýšením teploty vzduchu v učebně. Z grafu je zřejmé, že koncentrace CO_2 začala klesat mnohem větším tempem. Lze tedy učinit závěr, že jak se teplota soustavy blíží optimální teplotě pro fotosyntézu, pokles hladiny CO_2 se zrychluje. Po překročení této teploty by došlo opět ke zpomalení celého děje.



Obr. 5 Závislost naměřené koncentrace CO_2 a osvětlení na čase



Obr. 6 Závislost naměřené koncentrace CO_2 a teploty na čase

Závěr

Hlavním záměrem tohoto článku bylo poskytnout čtenářům základní vhled do problematiky měření s počítačem, včetně návrhu jednoduchého experimentu s použitím dostupného open source jedno-

deskového počítače Arduino. Autoři prosí čtenáře, aby neváhali kontaktovat redakci časopisu se svými zkušenostmi s konstrukcí podobných zařízení, případně s náměty, jaké experimenty by bylo zajímavé realizovat.

Literatura

- [1] Co je to Arduino (2012). Získáno z <http://czechduino.cz/?co-je-to-arduino,29>
- [2] Kubínová Štěpánka, Šlégr Jan, Hradec Králové: *PhysDuino – cenově dostupný systém pro školní fyzikální měření*. In Sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky 19, Západočeská univerzita v Plzni 2015.
- [3] Arduino IDE (2017). Získáno z <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- [4] PLX-DAQ (2014). Získáno z <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>
- [5] D. A. Baylor, T. D. Lamb, K. W. Yau, „Response of retinal rods to single photons.“ *Journal of Physiology*, Lond. 288, 613-634 (1979)
- [6] Julie Schnapf, „How Photoreceptors Respond to Light“, *Scientific American*, April 1987 <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0487-40>
- [7] S. Hecht, S. Schlaer and M. H. Pirenne, „Energy, Quanta and vision.“ *Journal of the Optical Society of America*, 38, 196-208 (1942) <https://doi.org/10.1085/jgp.25.6.819>