funkční vzorek:

Šestikanálový USB teploměr pro měření teploty v průběhu tvrdnutí betonu

Jan Martinek[1], Libor Topolář, Luboš Pazdera

1 Úvod

V průběhu hydratace betonu dochází ke změnám jeho teploty. Pro stanovení závislosti teploty na čase byl vyroben elektronický obvod, který pomocí termistorů umožňuje měřit teplotu na šesti různých místech. Obvod se připojuje k řídícímu počítači prostřednictvím USB sběrnice, přes kterou se přenášejí řídící příkazy i naměřená data a současně slouží jako napájení.

2 Elektronická část

Hlavní součástí obvodu je jednočipový mikropočítač Atmel ATmega32-16PI. Obsahuje osmikanálový desetibitový A/D převodník, pomocí kterého lze digitalizovat napětí na libovolném termistoru. Z převodníku se využívá pouze jeden kanál, a ten je připojen ke všem termistorům současně. Při měření protéká proud právě jedním termistorem, zatímco zbývající mají jeden z vývodů na vysoké impedanci a proud jimi neprotéká. Pro kontrolu jsou součástí obvodu tři svítící diody, a ty signalizují, kterým termistorem právě protéká proud. Vzhledem k tomu, že procházející proud je konstantní, bude napětí na termistoru úměrné jeho odporu:

$$U = I_{\text{konst.}} R \qquad \Rightarrow \qquad U \approx R$$

Z důvodů přesnosti se nespoléhá na známou hodnotu procházejícího proudu, protože ta by se mohla pozvolna měnit s teplotou okolí. Proto je místo jednoho z termistorů zapojen pevný rezistor, který slouží jako referenční. Bezprostředně po sobě se měří napětí na termistoru a napětí na referenčním rezistoru a vypočítává se jejich poměr $U_{\text{termistor}}/U_{\text{ref}}$.

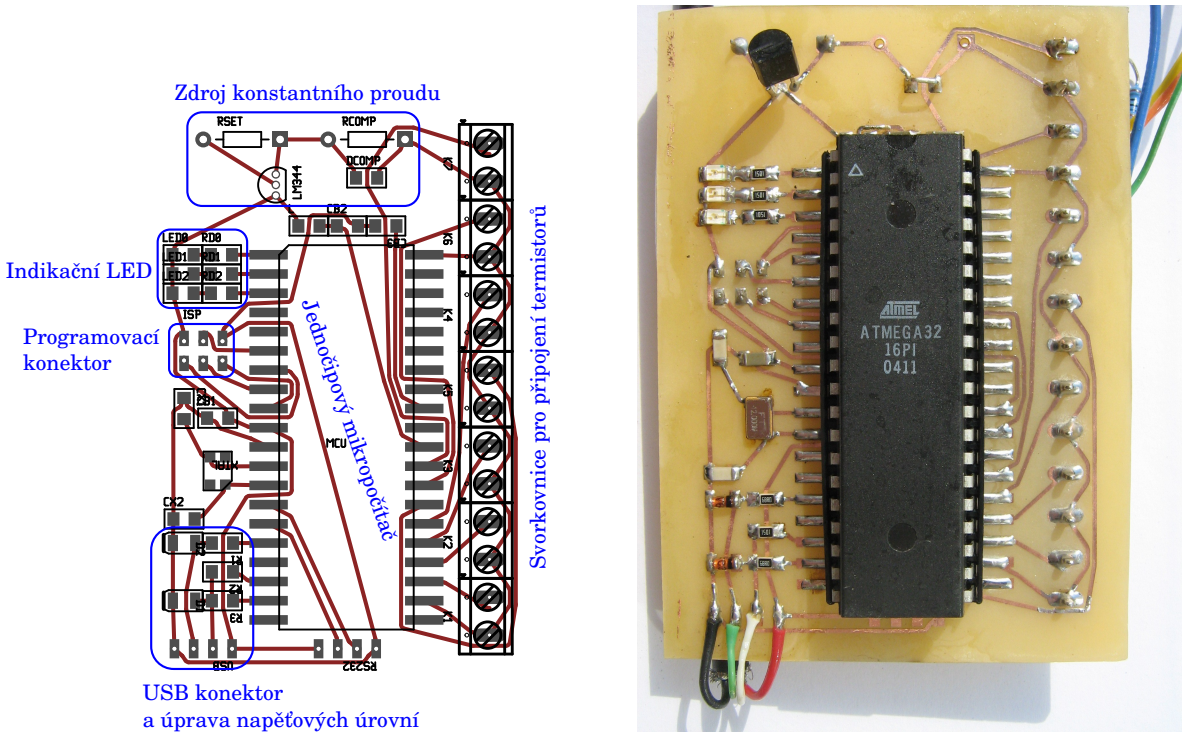
Obvod dále obsahuje pasivní součástky umožňující připojení k USB portu hostitelského počítače. Celý obvod je z USB sběrnice i napájen.

2.1 Firmware

Firmware je program pro jednočipový mikropočítač. Byl naprogramován v jazyce C a po zkompilování se binární soubor nakopíroval do FLASH paměti mikropočítače. Firmware zajišťuje několik funkcí:

- Komunikace prostřednictvím USB sběrnice – použitý mikrokontrolér neobsahuje hardwarovou podporu pro USB vrstvu, a tak byla použita softwarová implementace USB vrstvy. Ta je omezena pouze na standard USB 1.0, což však pro daný účel zcela vyhovuje.
- Zapnutí a vypnutí proudu protékajícím libovolným termistorem – po většinu času termistory neprotéká žádný proud. Ten se zapíná jen na krátkou dobu v okamžicích měření.
- Měření napětí – programovým povelem lze změřit napětí na libovolném termistoru. Samotné měření je interně zopakováno 1024 krát a řídícímu počítači se posílá aritmetický průměr.

[1]Jan Martinek, honza@dp.fce.vutbr.cz, Ústav fyziky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně



Obr. 1: Obrázek nalevo představuje přibližné rozmístění funkčních bloků, fotografie napravo je reálný výrobek.

3 Ovládací program

Ovládací program byl napsán v jazyce Python a pro komunikaci s USB sběrnicí byla použita knihovna `libusb`. V současné verzi program každých pět sekund přečte hodnoty ze všech termistorů i referenčního rezistoru a uloží je do souboru spolu s časovým údajem. Všechny softwarové prostředky – ovládací program, interpret jazyka i knihovna – jsou volně šiřitelné a jsou přenositelné mezi operačními systémy Linux a Windows.

4 Použité termistory a jejich kalibrace

Byly použity termistory K164NE470 s negativní teplotní charakteristikou (NTC), jejichž odpor dle výrobce představoval 470 Ω při teplotě 25°C. Termistory byly zality do tavného lepidla, které je chrání a izoluje proti vlhkosti.

Pro zvýšení přesnosti měřícího zařízení byla u každého termistoru individuálně naměřena teplotní charakteristika. Jako referenční teploměr při kalibraci sloužil laboratorní rtuťový teploměr. Bylo snahou udržovat teplotní nárůst dostatečně mírný, aby teploty bylo možno považovat za ustálené. Jako vhodný kopromis mezi přesností kalibrace a celkovou dobou měření se ukázala hodnota deset stupňů za hodinu, tj. v každém okamžiku byla teplotní derivace nejvýše 0,00277 $\mathrm{K\,s^{-1}}$.

Charakteristika byla pomocí metody nejmenších čtverců proložena Steinhart – Hartovou funkcí, která dobře vystihuje chování termistorů:

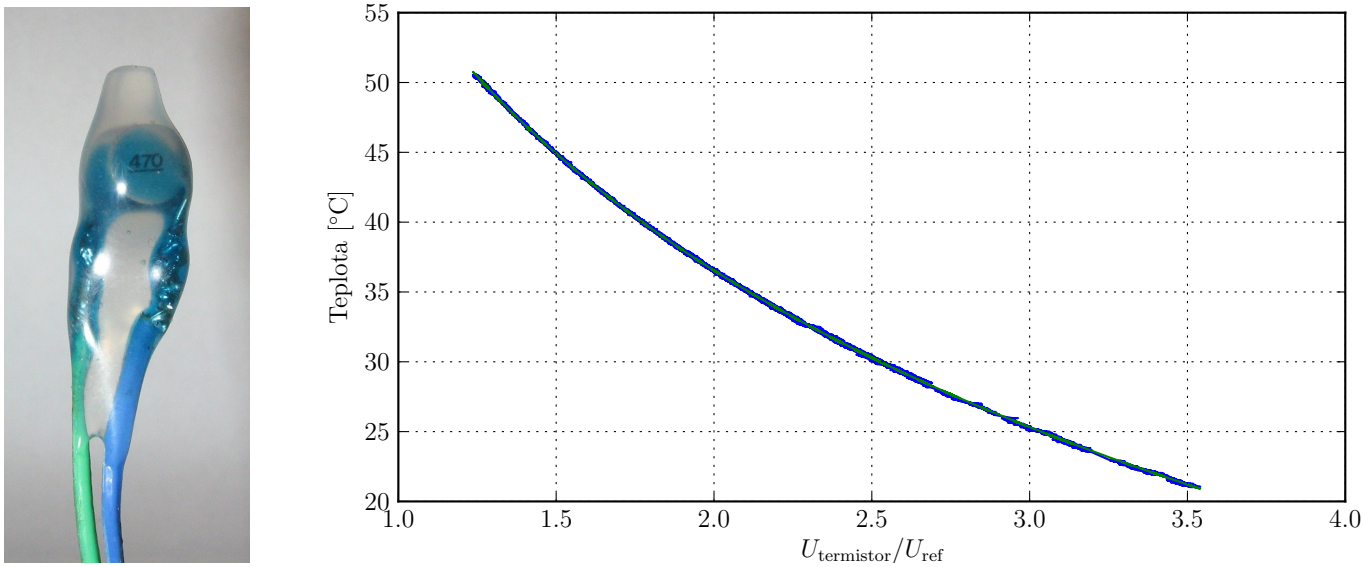
$$T = \frac{1}{a + b \ln R + c\,(\ln R)^3}$$

Pro každý použitý termistor byly vypočteny koeficienty a, b, c. Kalibrace umožňuje eliminovat mnoho vlivů, které by jiným způsobem bylo obtížné vyhodnotit. Mezi ně patří například

- odchylky v charakteristikách jednotlivých termistorů

- tolerance tří nastavovacích rezistorů (každý z nich 1%)
- nelinearita proudového zdroje
- nejistota referenčního napětí pro A/D převodník
- nelinearita a offset A/D převodníku

Odchylka naměřených hodnot od vypočtené funkce představovala nejvýše 0,4 °C. Po ukončení kalibrace se již termistory neodpojovaly a spolu s měřícím obvodem představovaly neměnný celek, pro který platí zjištěné kalibrační konstanty.



Obr. 2: Nalevo je fotografie termistoru zalitého v tavném lepidle. Graf napravo představuje kalibrační křivku jednoho z termistorů. Na ose x je vynesen poměr napětí na termistoru vůči napětí na referenčním rezistoru. Na ose y je teplota ve stupních Celsia. Naměřené hodnoty jsou proloženy funkcí v souladu se Steinhart – Hartovou aproximací.

5 Poděkování

Popsaný funkční vzorek vznikl při řešení projektu GAČR P104/10/0535 *Výzkum a vývoj vybraných metod měření a analýzy pro sledování chování stavebních směsí při tuhnutí.*