

Интелигентни индустријски трансмитери притиска и других процесних величина

Милош П. Франтловић, Владислав Ј. Јованов, Будимир Јб. Миљковић

Садржај — У овом раду је дат кратак преглед индустријских мерача (трансмитера) притиска и других процесних величина. Затим је приказан тзв. интелигентни трансмитер притиска са двосмерном дигиталном комуникацијом, нови производ развијен у Центру за микроелектронске технологије и монокристале Института за хемију, технологију и металургију. Представљена је коришћена технологија, укључујући софтверску компензацију утицаја температуре на мерење притиска. Коментарисане су перформансе и могућности примене развијене хардверско-софтверске платформе која је погодна и за реализацију бежичних сензора.

Кључне речи — сензор, трансмитер, микромашињство

I. Увод

У циљу мерења појединих физичких величина (најчешће температуре и притиска) у индустријским процесима, постоји посебна врста електронских мерних инструмената, чији је уобичајен тржишни назив „индустријски трансмитери”. Овај назив потиче од начина коришћења тих инструмената, јер се измерене вредности не очитавају на самом инструменту, већ их он емитује у облику електричног сигнала, који се каблом (или бежично) преноси до мерно-регулационе опреме, најчешће централизоване и удаљене од постројења. Према новијој терминологији, индустријски трансмитери се сврставају у електричне сензоре. Овде ће бити коришћен традиционални назив, јер је уобичајен у индустрији.

Осим што имају одговарајућа метролошка својства, индустријски трансмитери морају да задовоље и неке посебне конструкционе захтеве које намећу услови рада у индустријском окружењу. У постројењима су трансмитери често постављени на таква места где радна температура може бити у широком опсегу (-40°C до 85°C , тзв. индустријски температурски

опсег). Осим тога, могућа су механичка оптерећења (вибрације), трајно излагање атмосферским утицајима и присуство хемијски агресивних или запаљивих супстанци. Растојања између мерних места и командних соба, где се резултати мерења користе у циљу контроле или управљања, могу бити велика. Због тога се најчешће користе струјни сигнали, јер они трпе мању деградацију при преносу на веће удаљености.

Током више деценија развоја електричних сензора (укључујући и индустријске трансмитере), настало је више технолошких генерација тих производа [1].

У Центру за микроелектронске технологије и монокристале (ЦМТМ) Института за Хемију, технологију и металургију (ИХТМ) производе се силицијумски пиезоотпорни сензори притиска и индустријски трансмитери притиска и других величина. Користи се сопствена технологија израде сензора, чији развој је почео осамдесетих година прошлог века, а садржи поступке микромашињства.

II. КРАТАК ПРЕГЛЕД ИНДУСТРИЈСКИХ ТРАНСМИТЕРА

Аналогни трансмитери

Најзаступљенији начин преноса мерних резултата код индустријских трансмитера је аналогни струјни сигнал, чија је вредност у опсегу од 4 mA до 20 mA, при чему је зависност тог сигнала од вредности мерене величине линеарна. Овај систем је већ деценијама индустријски стандард. Са извором напајања и са другим уређајима трансмитер се повезује двожишно, чинећи тзв. струјну петљу, што значи да се иста два проводника користе за напајање трансмитера и за пренос сигнала. Трансмитер емитује струјни сигнал тако што мења сопствену потрошњу струје. Ова врста трансмитера има аналогну обраду сигнала и на свом излазу даје стандардизовани електрични сигнал, тако да се сврстава у трећу технолошку генерацију сензора [1]. Такви трансмитери се и даље производе и користе у индустрији. Типично се уграђују у старија постројења у којима не постоје модерни мерно-регулациони системи са дигиталном комуникацијом.

Паметни (smart) трансмитери

По начину уградње и коришћења, паметни трансмитери су слични аналогним, јер на свом излазу дају аналогни струјни сигнал у опсегу од 4 mA до 20 mA, који им служи и за напајање. Међутим, код ове врсте трансмитера се врши А/D конверзија сигнала са

Овај рад је резултат истраживања које је делимично финансирало Министарство науке и технолошког развоја Републике Србије, у оквиру пројекта ТР-11025.

М. П. Франтловић, Институт за хемију, технологију и металургију, Његошева 12, 11000 Београд, Србија (телефон: +381 11 2630757, факс: +381 11 2182995, e-mail: frant@nanosys.ihm.bg.ac.yu).

В. Ј. Јованов, Институт за хемију, технологију и металургију, Његошева 12, 11000 Београд, Србија (e-mail: tze@nanosys.ihm.bg.ac.yu).

Будимир Јб. Миљковић, Мерни инструменти Миљковић Будимир и други о.д. са п.о., Љубомира Стојановића 38, 11000 Београд, Србија (e-mail: per_buda@eunet.rs)

сензора, затим се обавља дигитална обрада сигнала помоћу микропроцесора, после чега се врши D/A конверзија, да би се добио аналогни сигнал на излазу. Овакав приступ има две важне предности: 1) омогућује добру корекцију нелинеарности сензора, 2) омогућује употребу секундарног сензора за компензацију утицаја секундарне физичке величине на примарни сензор.

Уграђени микропроцесор извршава програм (*firmware*) који на основу калибрационих параметара сензора врши израчунавања у циљу корекције и компензације сензора. Паметни трансмитер мерно-регулационом систему шаље линеаризован и коригован сигнал, који се даље може сматрати линеарном функцијом мерене величине, без обзира на тип сензора, модел трансмитера и остале факторе у вези са конкретним мерним местом.

Паметни трансмитери припадају трећој технолошкој генерацији [1].

Интелигентни трансмитери

Крајем 80-тих година, развојем дигиталних аквизиционих и управљачких система, настала је потреба за дигиталном двосмерном комуникацијом са индустријским трансмитерима, што је довело до настанка индустријских интерфејса. Обједињени назив за те интерфејсе је филдбас (*fieldbus*), а потиче од енглеских речи *field* (поље) и *bus* (магистрала). У индустрији се пољем назива део простора где се налази постројење. Магистрала је, у овом случају, медијум за пренос података, заједнички за већи број уређаја. Мерно-регулациони систем заснован на филдбасу има значајне предности у односу на старије системе: једноставнија аквизиција (трансмитер шаље измерене вредности у дигиталној форми), могућност даљинске идентификације трансмитера и читавања параметара (нпр. датум последње калибрације), даљинско подешавање (из командне собе, а не у постројењу), могућност промене мерног опсега без потребе за рекалибрацијом, могућност мерења више физичких величина помоћу једног трансмитера, уграђена дијагностика, умрежавање (више уређаја користи један комуникациони канал), мања мерна несигурност.

На тржишту је присутан већи број дигиталних индустријских интерфејса који имају различите могућности и међусобно су некомпатибилни. У литератури се врло често називају протоколима (нпр. *HART* протокол). Најзаступљенији такви системи су: *HART*, *Profibus* и *Foundation Fieldbus*. Трансммитери који имају дигиталну обраду сигнала и комуникацију посредством неког од индустријских интерфејса зову се интелигентни трансмитери. Они припадају четвртој технолошкој генерацији [1].

Бежични сензори

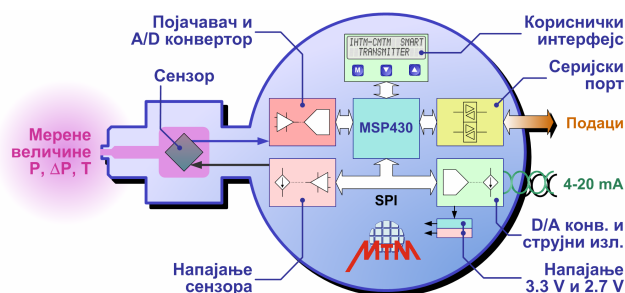
Алтернатива класичним индустријским трансмитерима су бежични сензори. Они су већ деценијама присутни на тржишту, али је њихов развој изузетно интензиван од почетка 21. века, пошто се одвија

истовремено са развојем бежичних рачунарских мрежа. Системи који садрже бежичне сензоре имају јединствене предности због којих налазе све већу примену. Најновија генерација бежичних сензора, чији је развој још у току, су тзв. сензорске мреже, које могу садржати чак хиљаде појединачних интелигентних сензора. Сензорске мреже су засноване на сложеним мрежним протоколима, па бежични сензори могу да формирају различите мрежне топологије. Типично раде у опсегу учестаности око 2.4 GHz (*ISM* опсег). Тренутно најактуелнији је *ZigBee* стандард (заснован на IEEE 802.15.4).

III. ИНТЕЛИГЕНТНИ ТРАНСМИТЕР

Блок шема

Блок шема једног интелигентног трансмитера притиска приказана је на Сл. 1. Она је, изузимајући сензор, сасвим слична и за трансмитере других физичких величина. Ова блок шема је донекле уопштена и на њој постоји аналогни струјни излаз, а такође и блок за дигитални пренос података. Код реалних интелигентних трансмитера струјни излаз постоји само код оних са *HART* протоколом. Код њих је дигитални сигнал суперпониран на аналогни струјни сигнал, који служи и за напајање трансмитера. Код трансмитера који раде са другим индустријским интерфејсима најчешће не постоји аналогни струјни излаз и код њих су напајање и комуникациони сигнали раздвојени.

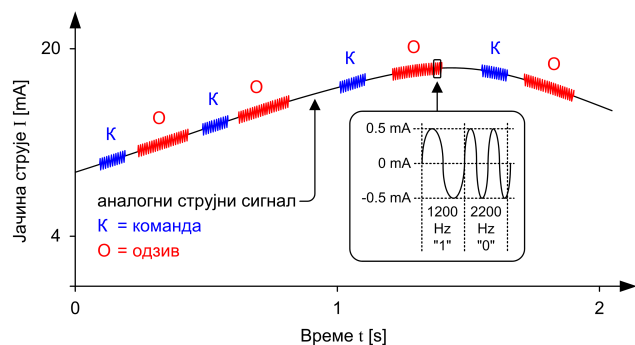


Сл. 1. Блок шема интелигентног индустријског трансмитера притиска (ИХТМ-ЦМТМ)

HART протокол

HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) је комуникациони интерфејс који омогућује двосмерну дигиталну комуникацију са интелигентним индустријским мерним и управљачким уређајима. Као рана имплементација филдбас концепције, *HART* је развијен од стране фирме *Rosemount* 80-тих година 20. века, а од 1986. је „отворен” протокол. Развија га и унапређује комуникациона фондација *HART* [2]. Заснован је на комуникационом интерфејсу *Bell 202*, што значи да користи бинарну фреквенцијску модулацију (*FSK*): 1200 Hz за логичку јединицу и 2200 Hz за логичку нулу, са континуалном фазом и бинарним протоком од 1200 бита у секунди. *HART* омогућује очување компатибилности са старијом индустријском мерном опремом на тај начин што је дигитални сигнал суперпониран на аналогни струјни

сигнал (4 до 20 mA), који је индустријски стандард. Сигнали су приказани на Сл. 2.



Сл. 2. Аналогни струјни сигнал са суперпонираним HART сигналом

HART је мастер/слејв протокол, што значи да слејв уређаји емитују поруке само као одзив на команде примљене од мастера. На једном комуникационом каналу може бити до 15 слејв уређаја и до два мастера, од којих је примарни мастер типично рачунар са HART модемом, а секундарни је најчешће ручни HART комуникатор, који се користи по потреби.

Аналогно/дигитални режим рада – Мастер и слејв уређај су повезани двожицим каблом. Дигитални сигнал је суперпониран на аналогни струјни сигнал (4 до 20 mA) који је пропорционалан мереном параметру индустријског процеса. У овом режиму једним каблом је могуће повезати само један слејв уређај.

„Мултидроп” режим рада – Користи се само дигитални сигнал. Аналогни струјни сигнал слејв уређаја се поставља на 4 mA, јер служи само за напајање. Могуће је имати до 15 слејв уређаја паралелно везаних на исти кабл.

Дигитална компензација утицаја температуре

Интелигентни трансмитер притиска развијен у ИХТМ-ЦМТМ садржи трансдјусер притиска заснован на силицијумском пиезоотпорном сензору. Код мерења притиска овом врстом сензора, неопходно је компензовати утицај температуре сензора на мерење, а то се код интелигентног трансмитера врши софтверски [3]. Неопходно је користити два сигнала са сензора: први је напон на излазу сензора, а други је напон између прикључака за напајање сензора константном струјом. Оба сигнала зависе и од притиска и од температуре, али је зависност првог од температуре слаба (примарни канал, служи за мерење притиска), а такође је и зависност другог од притиска слаба (секундарни канал, служи за мерење температуре).

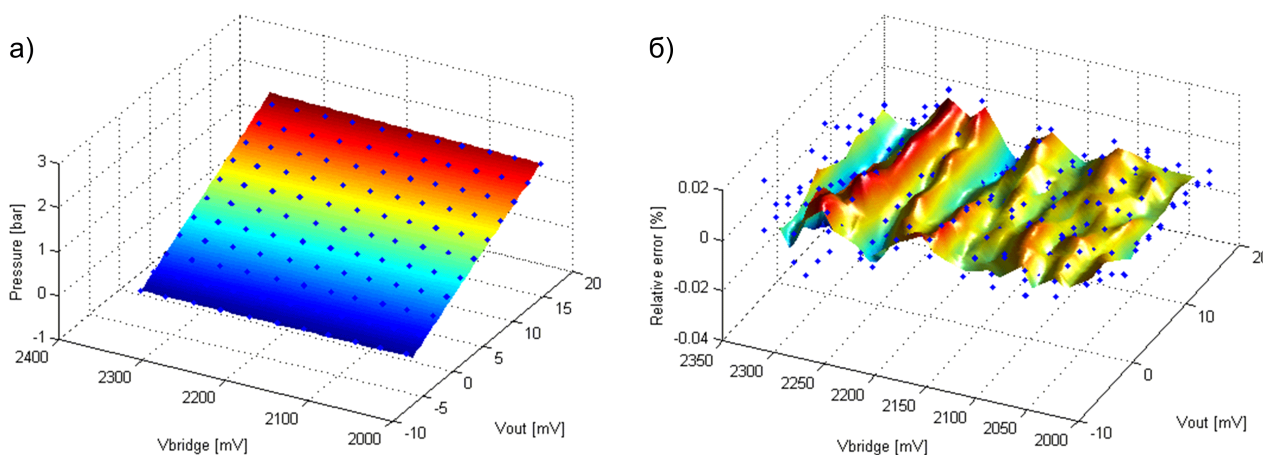
У циљу развоја алгоритма за компензацију утицаја температуре на мерење притиска, извршена је серија мерења у акредитованој лабораторији ИХТМ-ЦМТМ за калибрацију мерила притиска и температуре. За аквизицију сигнала са сензора притиска коришћен је модификовани хардвер бежичног мерача нивоа течности [4]. Веза тог уређаја са PC рачунаром је бежична (Bluetooth), чиме се остварује галванска изолација и тиме минимизују електричне сметње. За задавање притиска коришћен је рачунарски управљив калибратор притиска високе тачности (Mensor APC600). За задавање температуре коришћена је

температурска комора (Vötsch). Мерење температуре тела трансдјусера вршено је сензором Pt-100, који је прикључен на посебан аналогни улаз аквизиционог система. Овај сензор температуре се користи у процесу калибрације трансдјусера и не уграђује се у производ. Мерења су вршена на трансдјусерима који садрже ИХТМ сензор типа SP-9. За потребе мерења написани су одговарајући програми: за микроконтролер бежичног аквизиционог уређаја и за PC рачунар. Први служи за прикупљање података са сензора и њихово слање бежичном везом, а други служи за пријем података, приказивање на екрану рачунара и снимање у датотеку. Притисак је задаван у опсегу од 10 mbar до 2 bar, а температура у опсегу од -30°C до 70°C.

У циљу развоја рачунарског алгоритма за компензацију утицаја температуре на мерење притиска, анализирали су подаци који су прикупљени током мерења. Затим је написан програм који врши апроксимацију зависности притиска од два мерена параметра аналитичком функцијом две променљиве. На Сл. 3а је приказана таква апроксимирајућа површина, где су две независне променљиве измерени напони са сензора, а притисак је зависна променљива. На Сл. 3б је приказана израчуната релативна грешка апроксимације у процентима пуне скале (односи се на разлику између вредности притиска које су задаване калибратором и вредности притиска израчунатих коришћењем апроксимационе функције). У случају трансдјусера на који се односе дијаграми на Сл. 3, види се да је постигнута мала релативна грешка (мања од $\pm 0.025\%$ пуне скале). Написан је програм за микроконтролер трансмитера притиска који, имајући израчунате параметре одабране апроксимационе функције, у реалном времену израчунава вредност притиска на основу измерених вредности сигнала са сензора. На тај начин је извршена софтверска компензација утицаја температуре сензора на мерење притиска. Нажалост, реално није могуће постићи горе наведену (веома малу) вредност релативне грешке, пре свега због тога што трансдјусери притиска немају идеалну поновљивост. Затим, постоји температурски дрефт појединих компоненти трансмитера. Најзад, ако се користи аналогни сигнал (4-20 mA), постоје грешке његовог задавања (у трансмитеру) и његовог мерења (ван трансмитера). Међутим, ако се не користи аналогни сигнал, већ се резултати мерења очитавају посредством дигиталне комуникације, тада грешке задавања и мерења струјног сигнала немају никакав утицај.

Реализација уређаја

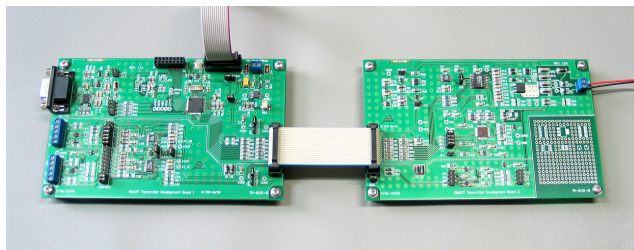
У циљу увођења нове генерације индустријских трансмитера у производни програм, у ИХТМ-ЦМТМ је развијена универзална платформа интелигентног трансмитера, која омогућује реализацију већег броја различитих уређаја. У односу на блок шему на Сл. 1 пројекат је проширен тако да могу истовремено да се користе два сензора притиска или температуре. Модуларна конструкција омогућује коришћење различитих излазних кола и интерфејса (укључујући и радио модуле), а могући су и различити начини напајања.



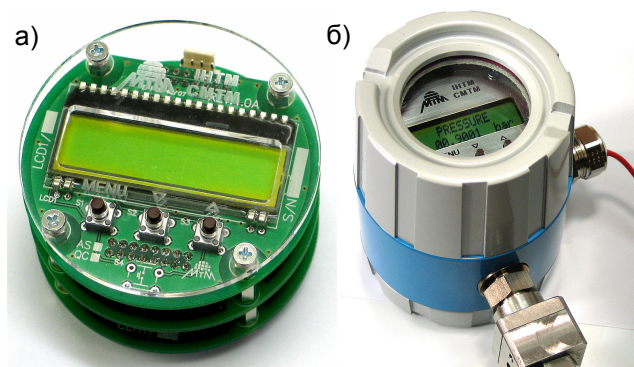
Сл. 3. а) Апроксимирајућа површина (зависност притиска од два мерена напона)

б) Релативна грешка апроксимације [%FS] у зависности од два мерена напона

Прво је реализован лабораторијски, а затим и индустријски прототип трансмитера притиска (Сл. 4 и 5).



Сл. 4. Лабораторијски прототип трансмитера притиска



Сл. 5. а) Електронски склоп интелигентног трансмитера притиска, б) Састављени трансмитер

Уређај садржи два делта-сигма А/Д конвертора резолуције 24 бита, са програмабилним појачавачем и мултиплексером диференцијалних улаза. Ефективна резолуција са типичним сензором притиска је 18 бита, са 16.7 резултата у секунди. D/A конвертор за струјни излаз је резолуције 16 бита. Микроконтролер је *Texas Instruments MSP430*, који у активном режиму на 3.3 V и са тактом од 1 MHz има потрошњу струје мању од 550 μ A. Укупна потрошња електронског склопа трансмитера притиска мања је од 2.5 mA. Укупна релативна грешка мерења (после калибрације аналогног струјног излаза) мања је од ± 0.1 % пуне скале.

IV. ЗАКЉУЧАК

Представљени интелигентни трансмитер притиска је, по сазнању аутора, једини домаћи производ те врсте. Тестирања и мерења која су вршена у лабораторији

ИХТМ-ЦМТМ показују да он испуњава све постављене електричне, механичке и метролошке захтеве. Хардверско-софтверска платформа на којој је заснован омогућује развој нових производа, а планирана је реализација трансмитера диференцијалног притиска, протока и нивоа течности, трансмитера температуре и бежичних сензора притиска. Један пример употребе ове платформе је бежични мерач нивоа течности са *Bluetooth* комуникацијом [4]. Планира се развој бежичних сензора у складу са *ZigBee* спецификацијом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Драган К. Станковић, „Физичко техничка мерења: сензори”, Завод за графичку технику Технолошко-металуршког факултета, Београд, 1997.
- [2] HART Communication Foundation, www.hartcomm.org
- [3] В. Јованов, М. Франтловић, „Оптимизација процеса мерења за дигиталну компензацију пиезоотпорног сензора притиска производње ИХТМ-ЦМТМ”, Зборник радова 51. конференције за ЕТРАН, Херцег Нови, јун 2007, том IV
- [4] М. Frantlović, I. Jokić, D. Nešić, "A wireless system for liquid level measurement", 8th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, 26-28 September 2007, Niš, Serbia

ABSTRACT

In this paper an overview is given of industrial transmitters of pressure and other process parameters. It is followed by a short description of the technology used in the current generation of intelligent transmitters featuring two-way digital communication. A recently developed product of the IHTM – Institute of microelectronic technologies and Single Crystals, the intelligent pressure transmitter is presented, including a short description of the software temperature compensation method for the used IHTM pressure sensor. Features and application possibilities of the developed hardware-software platform are discussed, as well as its suitability for the realization of wireless sensors.

INTELLIGENT INDUSTRIAL TRANSMITTERS OF PRESSURE AND OTHER PROCESS PARAMETERS

Miloš Frantlović, Vladislav Jovanov, Budimir Miljković