

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Друмски саобраћај

Предмет: Испитивање моторних возила и мотора

Број индекса: 67/2010

Немања Б. Мићовић

**Примена термопарова у испитивању
моторних возила и мотора
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Доц. др Данијела Милорадовић -ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- изложи основне физичке принципе на којима је заснован рад термопарова,
- прикаже класификацију, техничке карактеристике и област употребе термопарова,
- илуструје и анализира примену термопарова у техници испитивања различитих елемената и система моторних возила и мотора.

Препоручена литература:

- [1] Тодоровић, Ј.: „Испитивање моторних возила“; Машински факултет Београд, 1985.
- [2] Поповић, М.: „Сензори и мерења“, Завод за уџбенике и наставна средства, Српско Сарајево, 2004.
- [3] Polak, T.A., Pande, C.: “Engineering Measurements - Methods and Intrinsic Errors”, Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St Edmunds, UK, 1999
- [4] U.S. Department of Energy: “DOE fundamentals handbook - Instrumentation and control”, Volume 1 of 2, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., 1992
- [5] Childs, P.: “Temperature measurement”, Chapter in “Handbook of measurement in science and engineering”, Wiley, 2013
- [6] Boyes, W. ed.: “Instrumentation Reference Book”, Butterworth-Heinemann, Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo, 2010
- [7] Morris, A. S., Langari, R.: “Measurement and Instrumentation – Theory and Application”, Academic Press, 2016

Крагујевац, октобар 2016. год.

Ментор:
др Данијела Милорадовић, доцент

РЕЗИМЕ

У оквиру завршног рада приказани су физички принципи рада термопарова, као врсте отпорних давача температуре. Наведени су начини класификације термопарова, описане њихове основне техничке карактеристике и области у којима се могу применити термопарови као давачи. На крају је приказан преглед примера употребе термопарова у техници испитивања моторних возила и мотора, са одговарајућим закључцима у вези погодности њихове употребе.

Кључне речи: термопарови, испитивање, моторна возила

ABSTRACT

Physical principles of operation of thermocouples as a type of resistive temperature sensors are presented within this final paper. Types of thermocouples classification are stated and their basic technical properties and fields in which they find their use are described in the paper. Finally, a review of examples of using the thermocouples in testing of motor vehicles and motors is presented and corresponding conclusions on their convenience of use are drawn.

Keywords: thermocouples, testing, motor vehicles

Садржај:

1. Увод.....	2
2. Физички принцип рада термопарова	3
2.1. Мерење температуре – метролошке основе	3
2.2. Физички принцип рада термоелемената – термопарова	6
2.2.1. Проблеми који се јављају код врућег споја	9
2.2.2. Решења проблема врућег споја.....	9
3. Класификација, техничке карактеристике и област употребе термопарова	15
3.1 Класификација термопарова	15
3.2 Техничке карактеристике термопарова	18
3.2.1 Калибрација термопарова	24
3.3 Област употребе термопарова, предности и недостаци	25
4. Примери примене термопарова у испитивању моторних возила и мотора	28
4.1 Мерење температуре мотора СУС термопаром.....	28
4.2 Мерење температуре уља у мотору СУС термопаром	33
4.3 Термопар за мерење температуре акумулатора моторних возила	34
4.4 Термопар за мерење температуре у систему за снабдевање горивом.....	34
4.5 Мерење температуре на прстену лежаја точка термопаром	35
4.6 Термопар за мерење температуре диск кочнице.....	38
4.7 Мерење температуре у унутрашњости моторних возила применом термопара.....	39
5. Закључак	42
6. Литература.....	43

1. Увод

Термоелемент, односно **термопар** представља температурни сензор, а састоји се од две жице одразличитих метала или легура, спојене на једном крају. Термопарови свој принцип рада заснивају на тзв. „термоелектричном ефекту“, који је открио Томас Зебек (*Thomas Johann Seebeck*) 1821. године, па се још назива и „Зебеков ефекат“. Тако се појава напона при излагању проводника (нпр. метала) температурном градијенту назива је термоелектрични ефекат. Закључак овог научника био је да се магнетно поље мења услед промене температуре.

Зебеков ефекат је један од три термоелектрична феномена и први који је био истраживан. Исто као „Пелтијефевекат“, и „Томсонов ефекат“, ствара напон услед настале температурне разлике. Пошто се спој два метала на термопаровима изложи температурном градијенту, доћи ће до разлике потенцијала на отвореном крају кола.

Када је у питању индустријска примена термопарова, углавном се употребљавају у виду одређених комбинација метала, највише због поузданости мерења, мањих трошкова, стабилности рада, итд.

Термопарови су најчешће коришћена врста мерача температуре у већини производних процеса, углавном какошироких опсега температура које покривају различити типови, тако и због сразмерно ниске цене. Као што је познато, термопар чине два проводника од којих је једна позитивна, док је други негативна термоелектрода термопара. Код мерног система термопара, термоелектроде су спојене, те на једном свом крају формирају мерни спој термопара, а међусобно су подужно електроично изоловане.

Термопарови су у виду компензационих водова, дужине од неколико десетина до неколико стотина метара. Мерни напонски сигнал термопара доводисе до претварача, односно показног уређаја за читавање температуре. Показни уређај може бити аналогни или дигитални (све чешће примењивани), који поседују посебне процесне јединице за компензацију температуре амбијента и конверзију напонског сигнала термопара у одговарајућу температуру.

Данас се производи велики број различитих типова термопарова зависно од материјала који се употребљавају за термоелектроде. Ипак, према својим карактеристикама и осетљивости, стабилности и репродуктивности, тек одређени типови термопарова су стандардизовани на међународном нивоу.

Кроз рад ће бити анализиран принцип рада термопарова и њихова структура, као и техничке карактеристике и област њихове примене. У делу рада пажња ће бити посвећена примени термопарова у испитивању моторних возила, као и њихове карактеристике и начин употребе.

2. Физички принцип рада термопарова

Термопарови се најчешће користе као давачи за мерење температуре, нарочито изнад 1000°C. У односу на свој физички принцип рада, термопар је термометар, а мерење температуре се врши једном страном термопара која се назива „врућ спој“. Термопарови могу бити различите тачности (5 mK ÷ 10 K), а способни су за мерење температуре у опсегу од – 270°C ÷ 2100°C.

2.1. Мерење температуре – метролошке основе

Температура је физичка величина која представља степен загрејаности тела. Повезана је са термичким кретањем молекула или атома, односно термодинамичким стањем тела и његовом унутрашњом енергијом. Иначе, разлика термичког кретања зависи од агрегатног стања тела (гасовито или у течним кристалима). Према кинетичкој теорији гасова, апсолутна температура, T , дефинише се као мера средње енергије трансляционог кретања молекула гаса [1]:

$$\overline{E_k} = \frac{m \cdot \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad [2.1]$$

где су:

m – маса молекула гаса,

$\overline{v}$ – средња брзина гаса,

k – Болцманова константа.

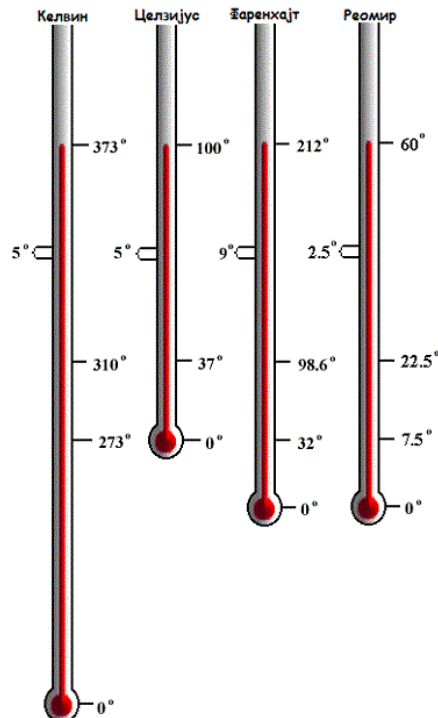
Интензитет температуре зависи, пре свега, од физичких величина као што су: маса, дужина, притисак и др. Ове величине се означавају као екстензивне или параметарске, јер се са повећањем објекта, повећава и њихова вредност. За разлику од ових величина, температура је интензивна или активна величина. Интензивност се огледа у томе што ће приликом поделе неког тела, сваки део тела задржати температуру тог тела.

Температура је најчешће мерена величина у технолошким процесима и обухвата око 60% свих мерења. Сматра се да је први термометар на принципу ширења гасова користио Галилеј 1592. године, а температура је мерена помоћу алкохола у цевчици, слика 2.1. Овај први термометар под називом термоскоп, давао је слабу идентификацију температуре будући да је ниво зависио од атмосферског притиска, а на цевчици није постојала скала. Научник Фаренхајт је 1711. године употребио живу и дефинисао термометарску скалу. Целзијус је 1742. године дефинисао фиксне тачке и обележио их је од 100° до 0°, да би тек 1845. године скала била обрнута, те је тако настала центиградна скала. 1948. године ова скала добија назив Целзијусова скала. Откриће модерних сензора везано је за Зебеково откриће термоелектрицитета [2].



Слика 2.1. Галилејев термоскоп [3]

Температурна скала представља функционалну везу између температуре и неке термометријске величине. Овом дефиницијом је могуће успоставити произвољан број различитих температурних скала, слика 2.2. Све оне имају условни карактер, па се и њихови подеоци означавају условним степенима. Поред тога, свака физичка величина је нелинеарна функција температуре и подложна утицају других величина.



Слика 2.2. Различите температурне скале [3]

Прве температуре дефинисане су на основу зависности температуре, T , и запремине течности, V , као термометријског својства које је дато релацијом:

$$T = a + b \cdot V \quad [2.2]$$

где су: a и b – константе.

При фиксним реперним тачкама T_1 и T_2 , запремина течности у термометру је V_1 и V_2 , на основу чега се могу одредити и коефицијенти a и b . На овај начин се добија општа једначина [2]:

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{V_2 - V_1} (V - V_1) \quad [2.3]$$

Проблем независности температурне скале од термометријског својства радног медијума решио је физичар Келвин 1848. године. Он је предложио апсолутну температурну скалу, а њена основа налази се у Другом закону термодинамике. У складу са тим законом, коефицијент корисног дејства, η , не зависи од особине радног медијума (Карноов циклус) већ искључиво од температуре топлог тела, T_t од којег машина прима количину топлоте, Q_t , и температуре хладног тела, T_h , коме машина враћа количину топлоте, Q_h , односно [2]:

$$\eta = \frac{T_t - T_h}{T_t} = \frac{Q_t - Q_h}{Q_t} \quad [2.4]$$

Како би апсолутна температура имала неку вредност, прихваћено је да између термодинамичке температуре кључања воде, T_{kv} , и термодинамичке температуре топљења леда, T_{tl} , буде разлика 100. Према једначини 2.4 и прихваћеној разлици температура: $T_{kv} - T_{tl} = 100$, добија се једначина центиградне термодинамичке температурне скале:

$$T = \frac{Q}{Q_{kv} - Q_{tl}} \cdot 100 \quad [2.5]$$

где је: Q_{kv} – количина топлоте коју топлотна машина радећи по обратном Карновом циклусу узима од топлог тела (кључала вода), а Q_{tl} – количина топлоте коју машина предаје хладном телу (отапајући лед). Термодинамичка температура T линеарна је са количином топлоте Q , која се добија од радног медијума и независна је од његових термометријских особина.

Ако се анализира једначина 2.4, долази се до закључка да се максимални коефицијент корисног дејства, $\eta = 1$, добија када је $T_h = 0$. Ова температура означава се Келвиновом **апсолутном нулом**.

Знајући да је термодинамичка скала (2.5) линеарна, она се може дефинисати само помоћу једне вредности температуре. Препоручено је да се реперна тачка за

дефинисање термодинамичке скале узима тројна тачка воде – равнотежно стање три фазе воде. Температура ове тачке је $T_h = 273,16 \text{ K}$, односно $t = 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$, а релативно лако се може реализовати. Термодинамичка температура, $T, [\text{K}]$, може се дефинисати релацијом [2]:

$$T = t + 273,15 \quad [2.6]$$

Термодинамичка температурна скала има велики теоријски и принципијелни значај. Ипак, реализација термометара као идеалне топлотне машине која ради по обратном Карноовом циклус није могућа. Из тог разлога је неопходно успоставити везу између термодинамичке скале и реалних термометара. Термодинамичка скала реализује се применом једначине гасног стања: $pV = RT$, односно помоћу гасног термометра. У великом температурном опсегу ($3 \div 3000 \text{ K}$) добијена температурна скала разликује се од термодинамичке за $0,003 \div 0,02 \text{ K}$.

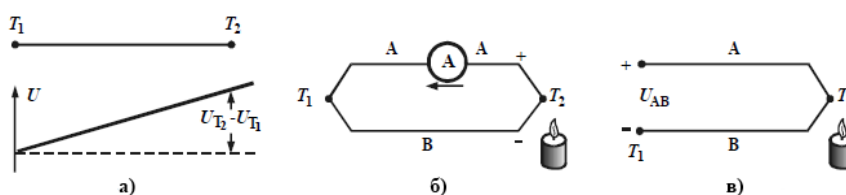
Интернационална практична температурна скала се састоји од 13 основних и 31 секундарне реперне тачке, а које одговарају гасним прелазима неких чистих материјала. Ове тачке су репродуцибилне и проверене еталонским термометрима. Интернационална скала је допуњавана у више наврата, а највећа одступања термодинамичких температура су у области примене термоелемената Pt – Rh (10%)/Pt као интерполационог елемента.

2.2. Физички принцип рада термоелемената – термопарова

Почетна намена термоелемената – термопарова била је мерење високих температура у опсегу $500^\circ\text{C} \div 1000^\circ\text{C}$. Данас се они примењују за мерење температура од 1 K до 4000°C . Због својих предности, имају широку примену у мерењу и регулацији температуре.

Термоелектрични потенцијал који се јавља код термоелемената настаје када су крајеви проводника на различитим температурама $T_2 > T_1$, између њих настаје топлотни ток од топлијег према хладнијем (слика 2.3). Пренос топлоте је према квантној теорији повезан са кретањем слободних електрона. Њихова концентрација и припадни потенцијал неравномерно су распоређени дуж проводника, па се јавља електрична струја [2]:

$$I_e = -K_e \frac{dU}{dx} \quad [2.7]$$



Слика 2.3. Термоелектрични ефекат: а) настанак термоелектричног потенцијала, б) затворено термоелектрично коло, в) отворено термоелектрично коло[2]

Истовремено се јавља и електрична струја због температурног градијента [2]:

$$I_T = -K_T \frac{dT}{dx} \quad [2.8]$$

Коефицијенти K_T и K_e означавају пропорционалност струја I_T и I_e са градијентом потенцијала, тј. са градијентом температуре. Знак минус указује на негативан прираштај потенцијала и температуре са позитивним прирастом растојања дуж проводника. Будући да није затворено никакво спољашње електрично коло, укупна струја кроз проводник једнака је нули, па следи да је [2]:

$$dU = -\left(\frac{K_T}{K_e}\right) dT \quad [2.9]$$

Напон који настаје као резултат температурне разлике $T_2 - T_1$ између крајева проводника назива се **термоелектрични напон**, а његова вредност добија се интеграцијом једначине [2]:

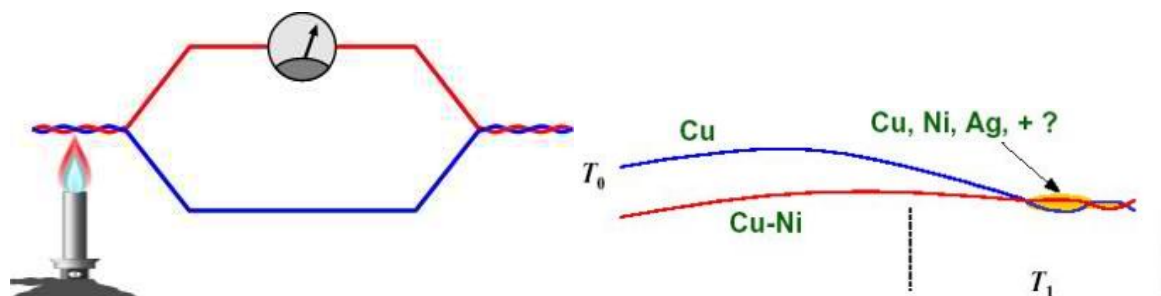
$$U_{T2} - U_{T1} = \int_{T_1}^{T_2} K dT \quad [2.10]$$

Термоелектрични коефицијент $K = -\left(\frac{K_T}{K_e}\right)$ зависи од материјала који је примењен у изради проводника. За мале промене температуре може се сматрати да је:

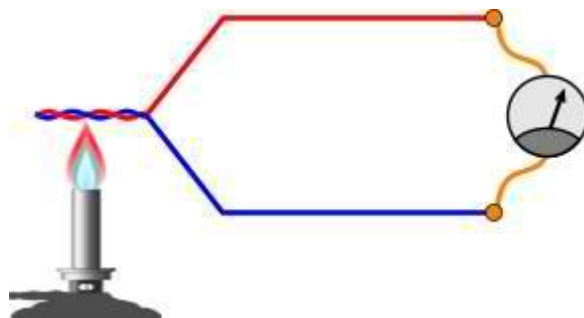
$$U_{T2} - U_{T1} = K(T_2 - T_1) \quad [2.11]$$

Као што је већ познато, „Зебеков ефекат“ се јавља увек, када два различита метала, образују спој – термопар. Познато је још да постоје поједини парови метала који имају предвидљив напон у зависности од температуре, а такође имају и веће температурне градијенте.

На слици 2.4, приказан је термопар, код кога је леви чвор загрејан, а десни је на собној температури, па кроз овај спој протиче струја. Као што је познато из закона физике, ако десни чвор не постоји, разлика напона ће се створити на крајевима проводника, што је приказано на слици 2.5.



Слика 2.4. Илустрација термопара [5, 6]



Слика 2.5. Термопар са једним чвором [5]

Позната су три термоелектрична закона на основу којих се заснива рад термопарова, а то су: *закон хомогених материјала*, *закон сукцесивних материјала*, *закон сукцесивних температура*[5].

I. Закон хомогених материјала:

Проводник код кога су физичка и хемијска својства једнака дуж целог проводника назива се хомогени проводник. По закону хомогених материјала, термопар који је сачињен од хомогених проводника неће генерисати напон и када се налази на различитим температурама. Односно, термопар мора бити састављен од минимум два различита материјала, како би се генерисао напон. Када дође до промене проводника или промене у температури, неће се јавити напон [5].

II. Закон сукцесивних материјала:

У колу термопара који чине два или више различитих метала, збир напона једнак је нули, под условом да је цело коло изложено истој температури. Ово значи да додавање различитих метала колу неће утицати на напон који генерише коло. Спојеви коју су додати, морају бити на истој температури, као и други спојеви у колу. На пример, трећи метал, као што је бакар, може се додати како би се олакшало мерење. Због ове чињенице, термопарови се могу користити нпр. код дигиталних мултиметара [4].

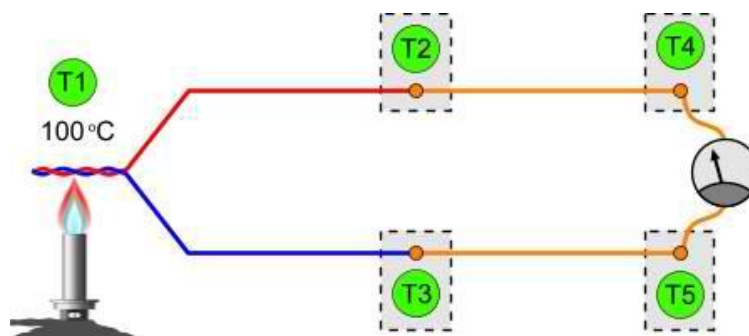
III. Закон сукцесивних температура:

Ако два различита хомогена материјала створе напон E_1 када су им спојеви на температурама T_1 и T_2 и створе напон E_2 када су им спојеви на температурама T_2 и T_3 , онда је резултујући напон када су им спојевина температурама T_1 и T_3 једнак $E_1 + E_2$. Овај закон дозвољава термопару који је калибрисан при референтној температури, да буде коришћен при другој референтној температури. Такође, дозвољава да додатни проводници са истим термоелектричним карактеристикама буду додати колу без утицаја на укупан генерисани напон [5].

2.2.1. Проблеми који се јављају код врућег споја

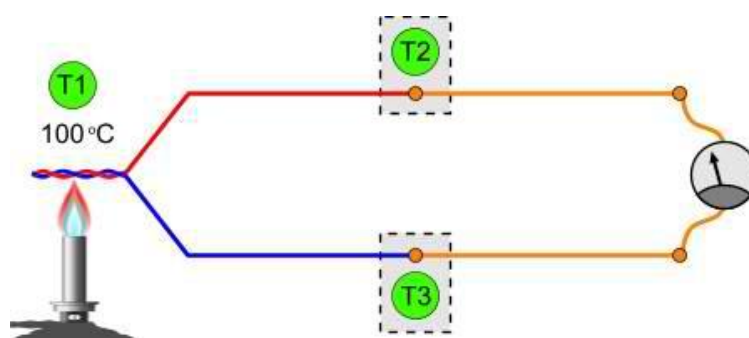
Кратко ће бити описани проблеми који настају приликом споја два различита метала.

Нека је на располагању К тип термопара, код кога је потребно повезати оба проводника термопара бакарним проводницима, како би се они продужили и термопар повезао са мултиметром. Јавиће се везе које ће створити нове термопарове (слика 2.6).



Слика 2.6. Проблем стварања нових термопарова [5]

Као што је приказано на слици 2.6, црвени и плави проводник сачињавају термопар, док су наранџасти проводници бакарни проводници. По првом термоелектричном закону, на местима T_4 и T_5 се неће образовати термопарови, јер се ту спајају проводници истог метала. На тај начин добија се ситуација приказана на слици 2.7.



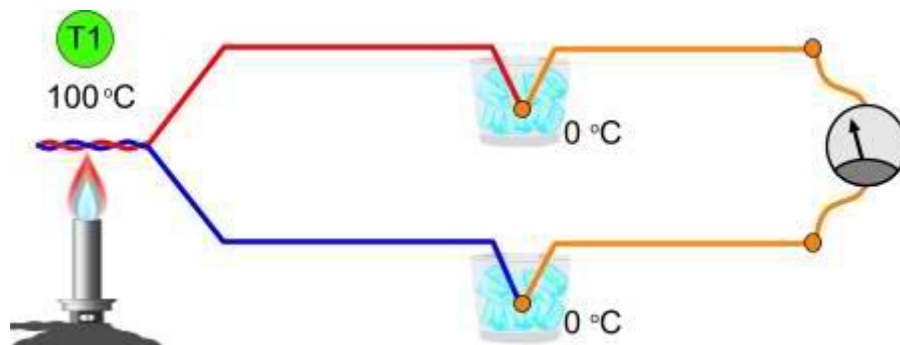
Слика 2.7. Стварање термопара по термоелектричном закону [5]

Проблем се јавља када у тачкама T_2 и T_3 , где су проводници термопара повезани са бакарним проводницима, стварају два нова термопара. У овом случају настаје електромоторна сила (ЕМС) у колу и на тај начин ће проводници утицати на мерење температуре.

2.2.2. Решења проблема врућег споја

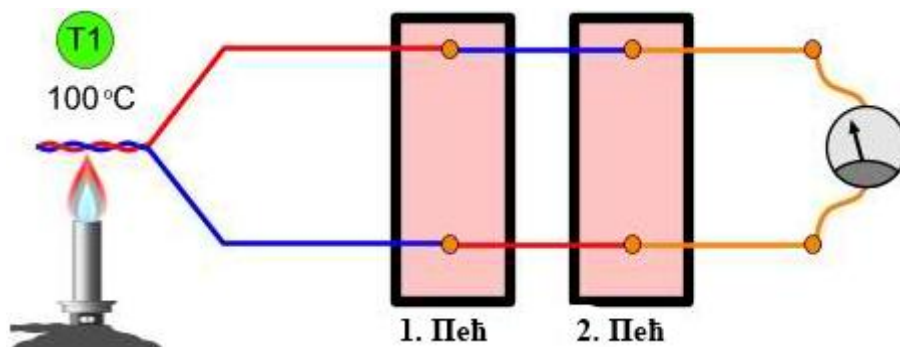
Решења овог проблема су могућа и постоји више метода за њихово решавање, а то су, између осталог: *употреба хладног купатила*, *употреба двоструких пећи*, *употреба изотермалних блокова* и др. [5].

Употреба „хладног купатила“. Код овог начина решавања проблема термопара, узима се у обзир да сваки термопар при 0°C , неће генерисати ЕМС, односно, повезивањем проводника унутар „хладног купатила“, неће доћи до грешке при читавању (слика 2.8).



Слика 2.8. Употреба „хладног купатила“ [5]

Двоструке пећи. Користе се као симулација за референтну нулту тачку (0°C), што је илустровано сликом 2.9. Примењују се проводници термопара који су спојени са обрнутим поларитетом унутар једне пећи, а затим су повезани са бакарним проводницима у другој пећи. Референтна нулта тачка симулира се са различитим температурама унутар пећи.



Слика 2.9. Употреба „двоструке пећи“ [5]

Изотермални блок. Претходне методе су задовољавајуће по питању решавања проблема који се јављају код термопарова. Мана им је што су тешко изводљиве у реалним условима (ван лабораторије). Ако за пример узмемо аутоматизовану машину у којој је потребно мерити температуру помоћу термопара, у том случају би било неопходно за претходне две методе имати термопар, дисплеј, замрзивач или две пећи. Из тог разлога су реализоване друге методе, како би се компензовала референтна температура.

У радним условима, где температура може варирати од места до места, постоји могућност да конектори мерне опреме не буду на истој температури, иако су удаљени свега пар сантиметара. Односно, морају се осигурати како би оба споја била изложена истој температури, па се користе изотермални блокови.

Изотермални блокови једноставније конструкције су поклопци направљени од специјалних материјала, углавном смештени у пластично кућиште. Унутар њих се налазе везе проводника термопара са бакарним проводницима. Специјални материјал обезбеђује да оба споја буду на истој температури. Савременији и напреднији изотермални блокови имају могућност прикључивања више термопара, и са додатним аналогним сигнаlima који носе информацију о референтној температури чворова, који се користе при софтверској компензацији (о којој ће бити више речи касније) [3, 5].

На слици 2.10, приказан један термопар који је повезан са бакарним проводницима унутар изотермалног блока.



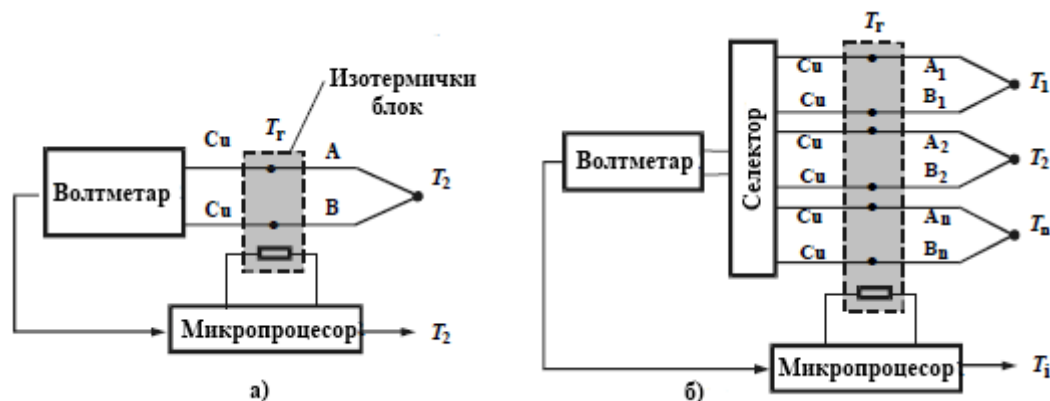
Слика 2.10. Изотермални блок код термопара К типа за мерење температуре помоћу мултиметра [5]

Савременије методе решавања проблема приликом спајања два различита метала су: **софтверска компензација и хардверска компензација.**

Софтверска компензација. Код ове методе, рачунаће се температура спојева, праћењем температуре унутар изотермалног блока. Термистор се поставља унутар блока, а његов сигнал се директно преноси до контролера (PLC, микро-контролер, рачунар, итд.). Контролер даље сигнал конвертује у напон генерисан на споју при температури унутар блока. Напон ће бити додат измереном напону са термопара, одакле се израчунава температура помоћу табеле зависности напона од температуре. Може се рећи да је веома једноставан начин повезивања термопара са контролерима, а потребан је само један термистор за више веза термопара унутар истог изотермалног блока. Ипак, код ове методе брзина читавања температуре је смањена.

Код хардверске и софтверске компензације, поставља се питање коришћења термопара, пошто се већ користе термистори, који се користе у уском температурном опсегу, обично испод $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, док термопарови могу мерити температуре између $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

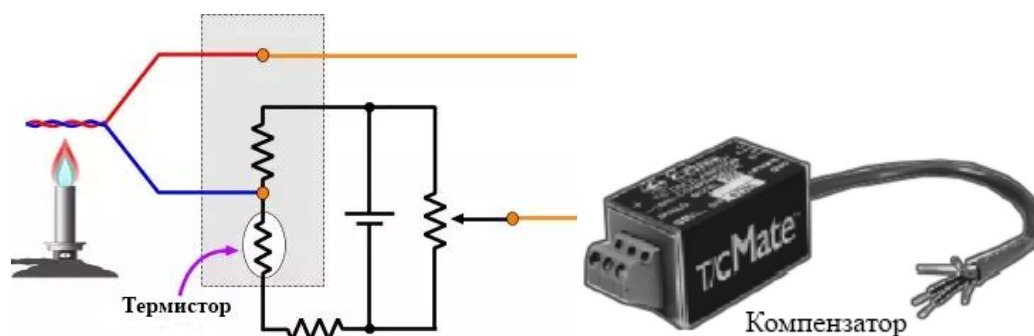
Софтверска компензација је поступак код кога се температура T_r мери помоћу термистора (слика 2.11а), а затим се на основу отпорности термистора у микропроцесору рачунара актуелна температура T_r и одговарајући контактни напон додаје се напон измерен на крајевима термоелемента. Због велике брзине микропроцесора, могуће је довести више различитих термоелемената на изотермички блок са температуром T_r , а помоћу селектора одабрани термоелемент прикључити на водеве према микропроцесору (слика 2.11б).



Слика 2.11. Софтверски метод компензације хладног краја: а) основна шема, б) шема са селектором [2]

Хардверска компензација. Представља често примењиван метод компензације температуре на споју термопара са бакарним проводницима, који се назива „електронска нулта референца“. Код ове методе термистор је постављен унутар изотермалног блока. Отпорност термистора ће се променити услед промене температуре унутар изотермалног блока. Коришћењем DC (једносмерног) напона и пар отпорника, коло ће додати напон потребан за специфичну температуру унутар блока.

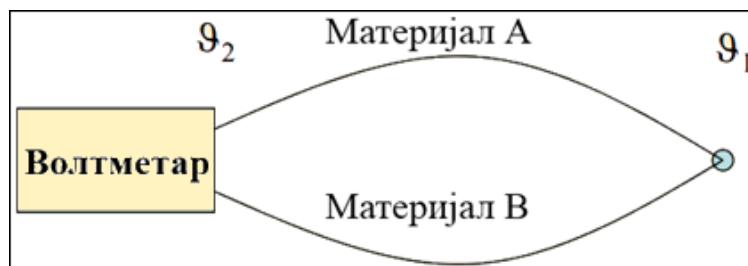
Један од разлога честе примене овог метода је чињеница да је изотермални блок веома јефтин, и уштеди сена времену за израчунавање температуре. На пример, на овај начин, PLC може вршити више читавања са више различитих места. Но, постоји и недостатак, а то је да се за сваки термопар мора користити другачија хардверска компензација, што повећава габарите уређаја, па је потребан већи простор, а тиме се повећава и цена система [5]. На слици 2.12, приказано је једно коло за хардверску компензацију.



Слика 2.12. Хардверска компензација [2, 5]

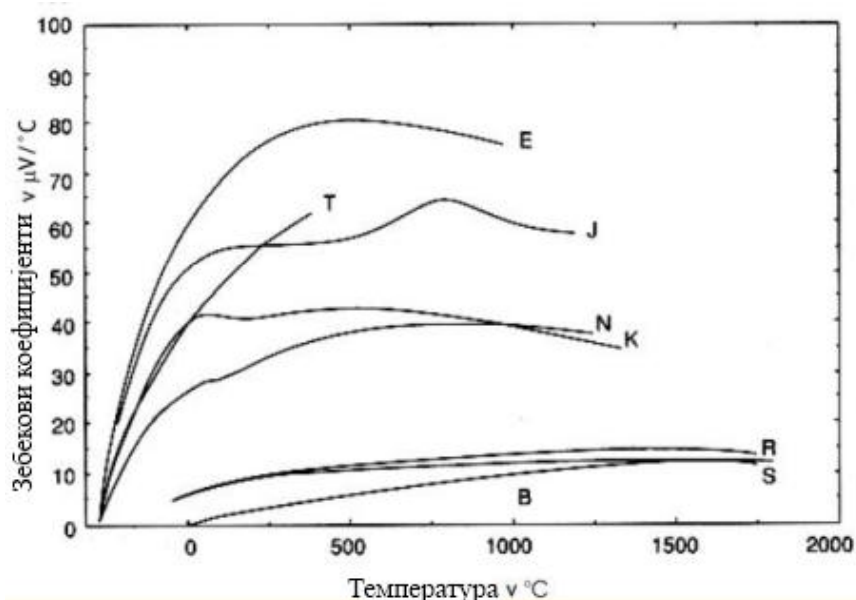
Способност проводника, да произведе термонапон (слика 2.13) се изражава преко Зебековог коефицијента, S_e , што је дато једначином 2.1 за два различита материјала [6]:

$$U = S_{eA} + S_{eB} \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2) = S_e \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2) \quad [2.12]$$



Слика 2.13. Шема мерења термонапона [6]

На слици 2.14, приказан је дијаграм Зебековог коефицијента осетљивости за различите типове термопарова.



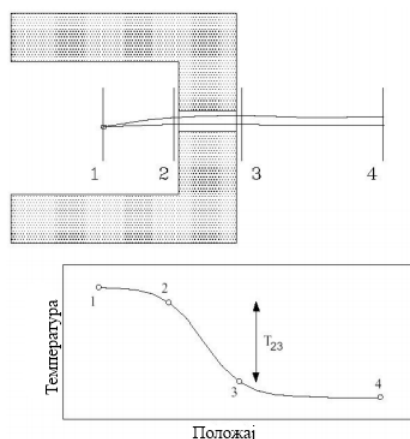
Слика 2.14. Зебекови коефицијенти у зависности од температуре за различите типове термопарова [6]

У зависности од објекта и места мерења термонапона (слика 2.15), његове вредности се разликују. Како би се добила тачна вредност температуре, њихове вредности се сабирају [6]:

$$U_{12} = S_{12} \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2) - \text{мали напон} \quad [2.13]$$

$$U_{23} = S_{23} \cdot (\vartheta_2 + \vartheta_3) - \text{велики напон} \quad [2.14]$$

$$U_{34} = S_{34} \cdot (\vartheta_3 + \vartheta_4) - \text{мали напон} \quad [2.15]$$



Слика 2.15. Зависност температуре од положаја термопарова [6]

При малим променама температуре, у обзир се може узети да је промена Зебековог напона линеарно пропорционална промени температуре [5]:

$$\Delta_{eAB} = \alpha \cdot \Delta T \quad [2.16]$$

Код већих промена температуре, користи се полином n - тог реда за прерачунавање измереног напона у температуру [5]:

$$T = a_0 + a_1 \cdot U + a_2 \cdot U^2 + a_3 \cdot U^3 + \dots + a_n \cdot U^n \quad [2.17]$$

где су:

$T[^\circ\text{C}]$ – температура,

$U[\text{V}]$ – напон,

$a_i, i = 1, 2, \dots, n$ – коефицијенти полинома који су јединствени за сваки тип термопара,

n – ред полинома (у табели 2.1, дати су коефицијенти до 9. реда).

Табела 2.1. Коефицијенти n – реда полинома са термопарове E, J, K [2]			
	хромел (10% Ni) (+) константан (-)	гвожђе (+) константан (-)	хромел (10% Ni) алумел (5% Ni)
	-100 °C ÷ 1000 °C ± 0,5 °C 9 – ти ред	0 °C ÷ 760 °C ± 0,1 °C 5 – ти ред	0 °C ÷ 1370 °C ± 0,7 °C 8 – ти ред
a_0	0,104967248	-0,048868252	0,226584602
a_1	17189, 45283	19873,14503	24152,10900
a_2	-282639,0850	-218614,5353	67233,4248
a_3	12695339,5	11569199,78	22103340,682
a_4	-448703084,6	-264917531,4	-086963914,9
a_5	1,10866 E + 10	2018441314	4,83506 E + 10
a_6	1,76807 E + 11		-1,18452 E + 12
a_7	1,71842 E + 12		1,38690 E + 13
a_8	-9,19278 E + 12		-6,33708 E + 13
a_9	2,06132 E + 13		

Сви термопарови подлежу стандарду ИЕС 584. Проблем термопарова је хомогеност приликом израде легура, као саставних елемената термопарова.

3. Класификација, техничке карактеристике и област употребе термопарова

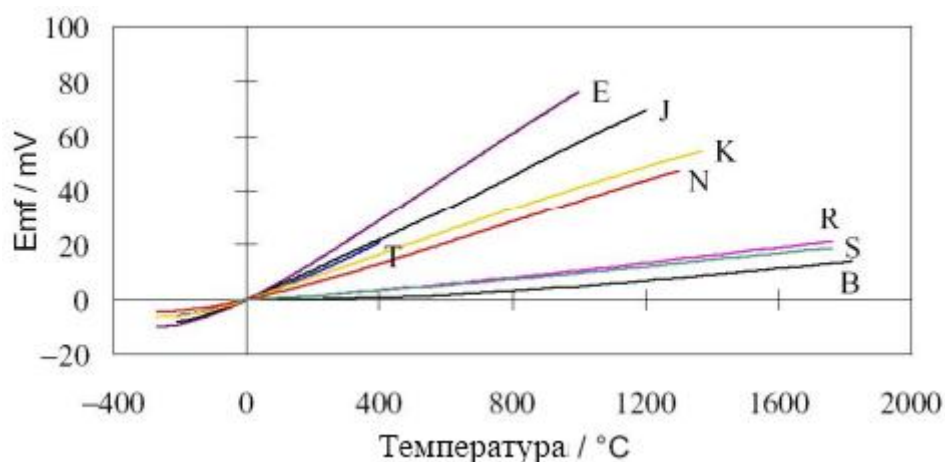
3.1 Класификација термопарова

Три су основне врсте термопарова:

- **Термопарови од племенитих метала:** тип В (Pt-30%Rh/Pt-6%Rh), тип R (Pt-13%Rh/Pt) и тип S (Pt-10%Rh/Pt). Представљају комбинацију платине и легуре родујма (Rh) у различитим процентима, те су хемијски инертни;
- **Термопарови од метала:** тип Т (Cu/Cu-Ni), тип J (Fe/Cu-Ni), тип K (Ni-Cr/Ni-Al), тип E (Ni-Cr/Cu-Ni) и тип N (nicrosil/nisil). У сваком типу се у одређеном проценту налази никл (Ni). Мана им је што релативно брзо оксидирају;
- **Нестандардни термопарови:** (Au/Pt, Pt/Pd, [6]).

Од комбинације метала зависи ознака термопарова, односно тип термопара. Постојећи термопарови се означавају ознакама: **E, J, K, N, R, SiT**. Зависно од апликације врши се избор термопара.

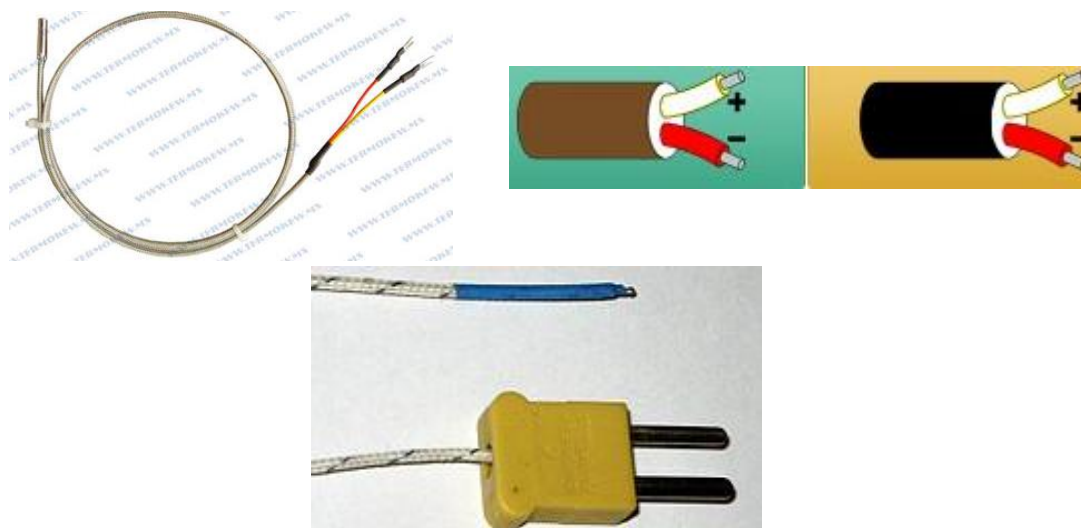
На слици 3.1, приказан је дијаграм зависности термонапона од температуре за различите типове термопарова.



Слика 3.1. Зависност термонапона од температуре за различите типове термопарова [6]

Карактеристике појединих типова термопарова су следеће [6]:

- Тип J (слика 3.2) (гвожђе/константан) има добру проводљивост и тачност $\pm 1\%$, али ограничени температурни опсег од $300 \div 850$ °C. Због своје тачности најчешће се примењују у соним, уљним и сличним купатилима, пећима за топљење метала, као и у индустрији пластике. Углавном се примењују на температурама око 600 °C.



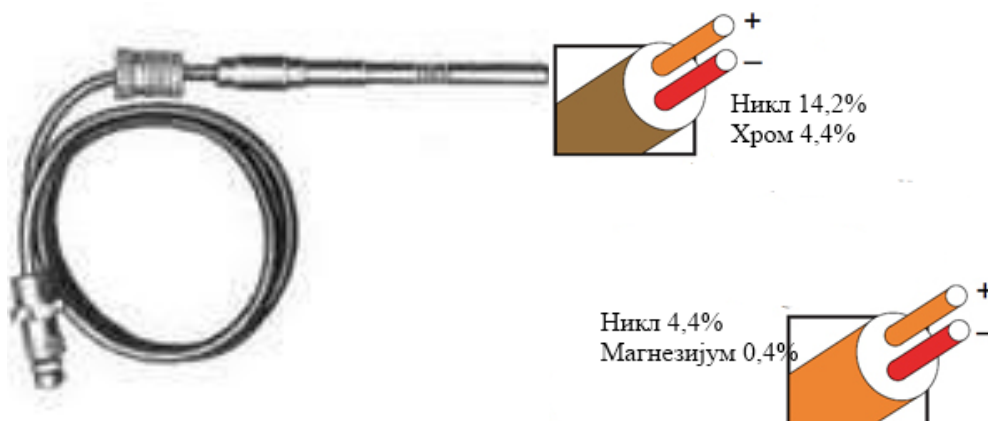
Слика 3.2 Термопар Ј типа [3, 7, 8]

- Тип **К** (слика 3.3) је примењив у многим областима индустрије. Овај тип термопара је направљен од легура никла, алуминијума и хрома: Ni + Al (Alumel) и NiCr + Cr (Chromel). Тачност овог типа је дефинисана стандардом BS1041-4, а налази се у опсегу од $\pm 3^\circ\text{C}$, при $0^\circ\text{C} \div +400^\circ\text{C}$, односно $\pm 0.75\%$ од $+400^\circ\text{C}$ до 1100°C . Честа је примена овог типа термопара и ван дефинисаног температурног опсега, нпр. до -200°C , али у том случају тачност не одговара датој у спецификацији, док преко 1100°C долази до одступања (нижа очитавања при порасту температуре и нешто виша очитавања при опадању температуре).



Слика 3.3. Термопар К типа [8]

- Тип **N** (слика 3.4) је термопар код кога се користе савременије легуре никла, нпр.: никл/хром/силицијум или никл/магнезијум/силицијум. Карактеристично за овај термопар је коришћење силицијума, који поседује добре особине, а између осталог продужава радни век проводника термопара. N тип се заснива на истој бази као K тип, али применом напреднијих материјала избегнути су проблеми са тзв. „дрифтом“ на доњем делу скале, а има поузданост до 1300°C .



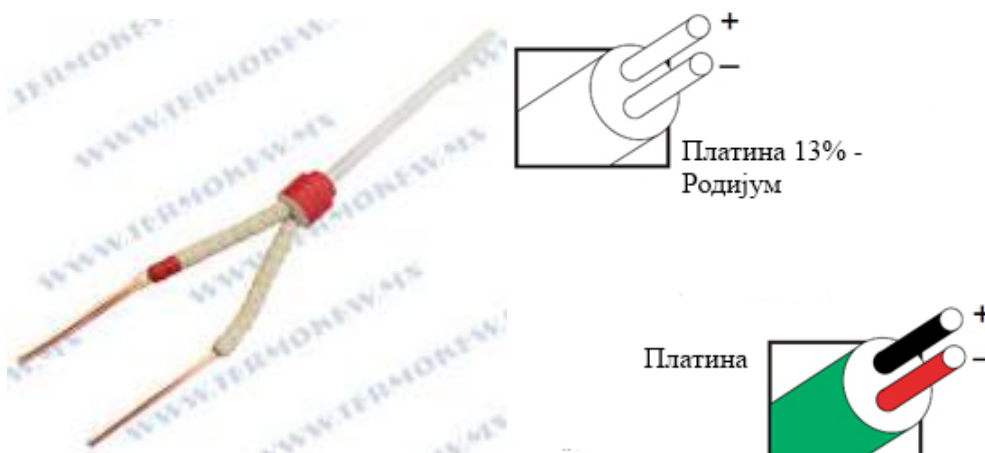
Слика 3.4. Термопар N типа [7, 8]

- Тип **T** (слика 3.5) је термопар који своју примену налази у прехранбеној индустрији, за регулацију температуре. Његова предност је висока тачност и поред ограниченог температурног опсега до $+400^{\circ}\text{C}$., од овог типа термопара се захтева тачност од $\pm 1^{\circ}\text{C}$ до температуре од 100°C , но на тржишту се могу наћи и термопарови **T** типа који према спецификацији имају тачност у опсегу од $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$.



Слика 3.5. Термопар T типа [7, 8]

- Тип **R** и **S** термопарова (слика 3.6) су израђени на бази племенитих метала, а карактерише их широк температурни опсег, као и поузданост када је у питању „дрифт“ карактеристика у читавом мерном опсегу. Термопар типа **R** се израђује од платине и родијума који се налазе у алуминизираним порцеланском кућишту, а одликује га тачност од $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (до 100°C) и $\pm 2^{\circ}\text{C}$ до максималне трајне температуре од 1350°C . Тип **R** се може користити за мерење температуре и изнад свог мерног опсега до 1700°C , уз тачност од $\pm 3^{\circ}\text{C}$ изнад 1400°C . Ипак, може се рећи да је недостатак ових термопарова њихова висока цена.



Слика 3.6. Термопар R типа [7, 8]

У табели 3.1 дат је попис свих међународно стандардизованих термопарова, који су прихваћени и у нашој земљи.

Табела 3.1. Стандардизовани термопарови [6]		
Тип термопара	Ознака термопара	Мерни опсег термопара
Платина – 13% родијума/платина	R	-50÷1600 °C
Платина – 10% родијума/платина	S	-50÷1600 °C
Платина – 30% родијума /платина – 6% родијума	B	0÷1820 °C
Гвожђе/бакар-никл	J	-40÷750 °C
Бакар/бакар-никл	T	-200÷370 °C
Никл-хром/бакар-никл	E	-200÷900 °C
Никл-хром/никл-алуминијум	K	-200÷1200 °C
Никл-хром-силицијум/никл-силицијум	N	-200÷1200 °C

3.2 Техничке карактеристике термопарова

Да би се извршило разврставање термопарова према типу и техничким карактеристикама, потребно је обележавање бојама помоћу којих се распознају термопарови. Ове боје нису стандардизоване, па свака земља има свој систем означавања и обележавања. У табели 3.2, дате су смернице за распознавање у техници мерења температура.

На основу својих карактеристика, а пре свега тачности и стабилности на високим температурама, посебно место заузимају термопарови на бази племенитих метала, тј. термопарови S, R и B типа. У индустрији су нарочито распрострањени термопарови K типа, а према својој цени спадају међу јефтиније. И поред тога, њихова примена је могућа само на местима где захтеви у погледу величине грешке нису сувише ригорозни.

Табела 3.2. Класе тачности термопарова [9]

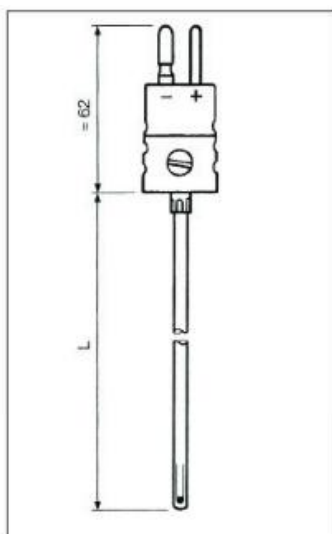
Тип термопара	Класа тачности I	Класа тачности II	Класа тачности III
Тип R, тип S			
Опсег температура	0 °C ÷ 1000 °C	0 °C ÷ 600 °C	-
Дозвољена грешка	±1 °C	±1,5 °C	-
Опсег температура	1100 °C ÷ 1600 °C	600 °C ÷ 1600 °C	-
Дозвољена грешка	±1 °C	±0,0025 t	-
Тип B			
Опсег температура	-	-	600 °C ÷ 800 °C
Дозвољена грешка	-	-	±4 °C
Опсег температура	-	600 °C ÷ 1700 °C	800 °C ÷ 1700 °C
Дозвољена грешка	-	±0,0025 t	±0,005 t
Тип J			
Опсег температура	-40 °C ÷ 375 °C	-40 °C ÷ 333 °C	-
Дозвољена грешка	±1,5 °C	±1 °C	-
Опсег температура	125 °C ÷ 750 °C	133 °C ÷ 900 °C	-
Дозвољена грешка	±0,004 t	±0,0075 t	-
Тип T			
Опсег температура	-40 °C ÷ 125 °C	-40 °C ÷ 133 °C	-40 °C ÷ 125 °C
Дозвољена грешка	±0,5 °C	±1 °C	±1 °C
Опсег температура	125 °C ÷ 350 °C	125 °C ÷ 350 °C	-200 °C ÷ -67 °C
Дозвољена грешка	±0,004 t	±0,0075 t	±0,015 t
Тип E			
Опсег температура	-40 °C ÷ 375 °C	-40 °C ÷ 333 °C	-167 °C ÷ 40 °C
Дозвољена грешка	±1,5 °C	±2,5 °C	±2,5 °C
Опсег температура	375 °C ÷ 800 °C	333 °C ÷ 900 °C	-200 °C ÷ -167 °C
Дозвољена грешка	±0,004 t	±0,0075 t	±0,015 t
Тип K, тип N			
Опсег температура	-40 °C ÷ 375 °C	-40 °C ÷ 333 °C	-167 °C ÷ 40 °C
Дозвољена грешка	±1,5 °C	±2,5 °C	±2,5 °C
Опсег температура	375 °C ÷ 1000 °C	333 °C ÷ 1200 °C	-200 °C ÷ -167 °C
Дозвољена грешка	±0,004 t	±0,0075 t	±0,015 t
t - Вредност температуре без узимања у обзир знака (+/-)			

Прецизност мерења термопарова који су обухваћени нормом DIN EN 60584-1 одређена је у норми DIN EN 60584-2. Вредности термонапона у зависности од температуре, за различите типове термопарова, у овом случају за тип K, табеларно су приказане на слици 3.7.

Термопар NiCr-Ni, тип K, према IEC 581-1 [mV]										
°C	0	- 10	- 20	- 30	- 40	- 50	- 60	- 70	- 80	- 90
- 100	- 3,553	- 3,852	- 4,138	- 4,410	- 4,669	- 4,912	- 5,141	- 5,354	- 5,550	- 5,730
0	0	- 0,392	- 0,777	- 1,156	- 1,527	- 1,889	- 2,243	- 2,586	- 2,920	- 3,242
°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0,397	0,798	1,203	1,611	2,022	2,436	2,850	3,266	3,681
100	4,095	4,508	4,919	5,327	5,733	6,137	6,539	6,939	7,338	7,737
200	8,137	8,537	8,938	9,341	9,745	10,151	10,560	10,969	11,381	11,793
300	12,207	12,623	13,039	13,456	13,874	14,292	14,712	15,132	15,552	15,974
400	16,395	16,818	17,241	17,664	18,088	18,513	18,938	19,363	19,788	20,214
500	20,640	21,066	21,493	21,919	22,346	22,772	23,196	23,624	24,050	24,476
600	24,902	25,327	25,751	26,176	26,599	27,022	27,445	27,867	28,288	28,709
700	29,128	29,547	29,965	30,383	30,799	31,214	31,629	32,042	32,455	32,866
800	33,277	33,686	34,095	34,502	34,909	35,314	35,718	36,121	36,524	36,925
900	37,325	37,724	38,122	38,519	38,915	39,310	39,703	40,096	40,488	40,879
1000	41,269	41,657	42,045	42,432	42,817	43,202	43,585	43,968	44,349	44,729
1100	45,108	45,486	45,863	46,238	46,612	46,985	47,356	47,726	48,095	48,462
1200	48,828	49,192	49,555	49,916	50,276	50,633	50,990	51,344	51,697	52,049
1300	52,398	52,747	53,093	53,439	53,782	54,125	54,466	54,807		

Слика 3.7. Вредности термонапона за термопар типа K [9]

У наставку су, као пример, дате техничке карактеристике термопарова типа K, који су специјално конструисани за примену на повишеним температурама, нпр. у разним индустријским пећима, за температуре до 1200°C. У термоелементје уграђен један термопар типа K (слика 3.8). Спољашње заштитне цеви могу бити од керамике KER 610 или металне.



Слика 3.8. Термопар типа K са правим конектором [1]

Термопарови могу бити:

- стандардне конструкције, при чему су смештени у керамичке изолаторе и металну заштитну цев и
- у мерном улошку, где је термопар смештен унутар металног плашта. Термоелектроде су изоловане међусобно подужно, као и од металног плашта. Мерни уложак је позициониран у металној заштитној цеви [9].

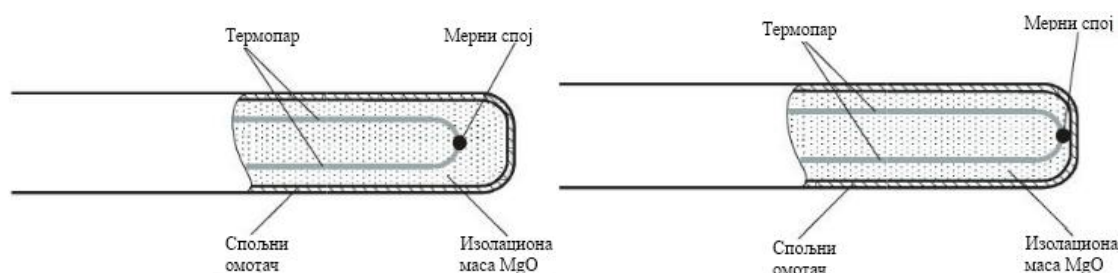
Металне заштитне цеви могу бити од следећих материјала са специфичним особинама:

- W.Nr. 1.4541 (AISI 321) – отпорност према корозији и температури,
- W. Nr. 1.4571 (AISI 316 TI) – отпорност према корозији и температури,
- W. Nr. 1.4841 (AISI 314/310 S) – отпорност према корозији и температури (ватро-отпорни челик),
- W.Nr. 2.4816; Инконел 600 – отпорност према корозији и температури (легура са доста никла) [10].

У додиру са медијумом налази се метална заштитна цев, а контакт се остварује преко прирубнице, која је покретна дуж заштитне цеви, чиме је регулисана уградна дужина термоелемента. Термопарови из ове групе могу имати алуминијумску прикључну главу, облик А или В (DIN 43729) или друге облике за монтажу термоелемента и применљиво је обоје (или керамичка плочица или слободни изводи који се повезују на трансмитер температуре), у циљу да се оствари различит тип излазног сигнала. У табели 3.3, приказане су неке техничке карактеристике термопара К типа.

Табела 3.3. Техничке карактеристике термопара типа К [10]	
Тип	К – са правим конектором (зелени за NiCr – NiAl)
Материјал омотача	За термопарове: Fe – CuNi: челик W.Nr. 1.4541 NiCr – NiAl: Инконел 600 (W.Nr. 2.4816)
Максимална температура	800°C за термопарове Fe – CuNi 1100°C за термопарове NiCr – NiAl
Пречник омотача	1,5/3/4.5/6 mm

Спољашњи пречник метала креће се у обиму од 0,15 mm до 0,8 mm. Термоелектроде термопарова су изоловане, најчешће магнезијум оксидом, смештене унутар танкозидне цеви направљене од ватро-отпорног и нерђајућег челика. Термоелектроде термопара су изоловане једна од друге и од омотача. Крајеви термоелектроде су заварени и формирају мерни спој, а омотач је на том крају затворен чепом, али може бити и заварен (слика 3.9).



Слика 3.9. Омотач термопара заварен и „изведен на масу“ [10]

У техници мерења температуре, примена минерално изолованих термопарова све више расте у индустријским процесима. Њихова различитост у односу на класичне термопарове је у мањој конструкцији, брзом одзиву и њиховој флексибилности. У табели 3.4, приказани су материјали који се примењују у изради омотача.

Табела 3.4. Материјали који се примењују у изради омотача термоелемената [10]		
Стандард	Термопар	Тип
DIN EN 60584	NiCr-Ni	K
	NiCrSi-NiSi	N
	Fe-CuNi	J
	Pt13%Rh-Pt	R
	Pt10%Rh-Pt	S
	Pt30%Rh-Pt6%Rh	B
	Cu-CuNi	T
	NiCr-CuNi	E
DIN EN 43710	Fe-CuNi	L
	Cu-CuNi	U

Технички детаљи мантел термопарова(минерално изолованих термопарова) наведени су у табели 3.5, док је у табели 3.6 дато време одзива мантел термопарова у секундама.

Табела 3.5. Технички детаљи мантел термоелемената [10]						
Спољашњи пречник омотача mm	Најмањи радијус савијања cca mm	Максимална производна дужина cca mm	Fe-CuNi, тип K према IEC 584-1			
			1 термопар		2 термопара	
			Пречник термоелектроде cca mm	Отпорност по једном термопару при 20°C cca Ω	Пречник термоелектроде cca mm	Отпорност по једном термопару при 20°C cca Ω
0,5	2,5	40	0,08	122,0	-	-
1,0	5,0	300	0,15	24,0	-	-
1,5	7,5	300	0,23	11,0	0,18	12,0
3,0	15,0	300	0,45	2,8	0,36	3,4
4,5	22,5	140	0,68	1,2	0,54	1,5
6,0	30,0	80	0,9	0,7	0,72	0,9
8,0	40,0	45	1,2	0,4	0,96	0,5

Табела 3.6. Време одзива за мантел термопарове у секундама [10]															
Време одзива у секундама															
Мерни услови	Интервал	Изоловани топли спој, пречник мантела у mm								Топли спој заварен за масу, пречник мантела у mm					
		0,50	1,00	1,50	3,00	4,50	6,00	8,00	0,50	1,00	1,50	3,00	4,50	6,00	8,00
Ваздух v = 2 m/s	0,5	1,80	3,00	8,00	23,0	37,0	60,0	100,0	1,80	3,00	8,00	23,0	33,0	55,0	97,0
	0,9	5,52	10,0	25,0	80,0	120,0	200,0	360,0	5,52	10,0	25,0	80,0	110,0	185,0	310,0
Ваздух v = 2 m/s	0,5	0,06	0,15	0,21	1,20	2,50	4,00	7,00	0,03	0,06	0,13	0,22	0,45	0,55	0,75
	0,9	0,13	0,50	0,60	2,90	5,90	9,60	17,0	0,10	0,18	0,40	0,75	1,60	2,60	4,60

0,5/0,9 – временски интервал је време потребно термо пару да индукује 50% или 90%промене температуре радне средине

Карактеристике термоелемента:

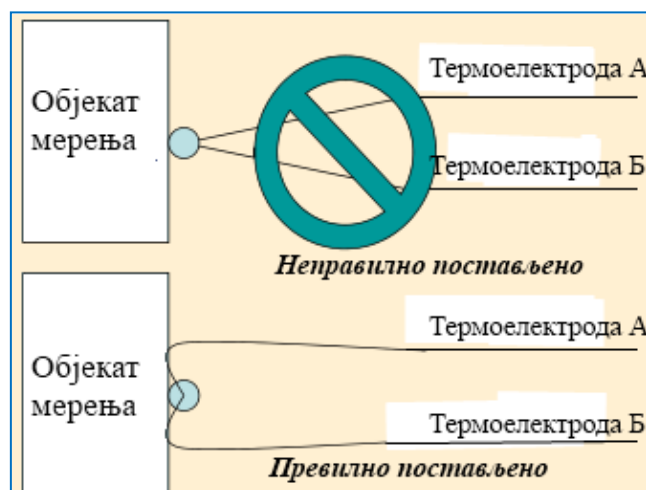
- уградна дужина по жељи корисника,
- могућност уградње унутрашње керамичке заштитне цеви,
- термопарови са термоелектродама различитих пречника,
- мерни улошци, отпорни на вибрације и контаминацију,
- уградња трансмитера,
- уградња два термопара,

- уградња мерног улошка са дуплим термопаром,
- уверење о одобрењу типа,
- узвештај о оверавању,
- протокол о испитивању [2].

Грешке мерења термопара дефинисане су стандардом DIN EN 60584, који одређује стандардне вредности и толеранције (дозвољене грешке) термопарова. Грешка трансмитера мора бити додата грешци термопара, укључујући и компензацију референтног споја. Отпорност изолације између електричних терминала на керамичкој плочици и спољашње заштитне мора бити гарантована процедуром производње. Термоелементи са мерним улошком, дефинисани су према стандарду IEC 1515, а вредности отпора изолације између терминала и заштитне цеви је:

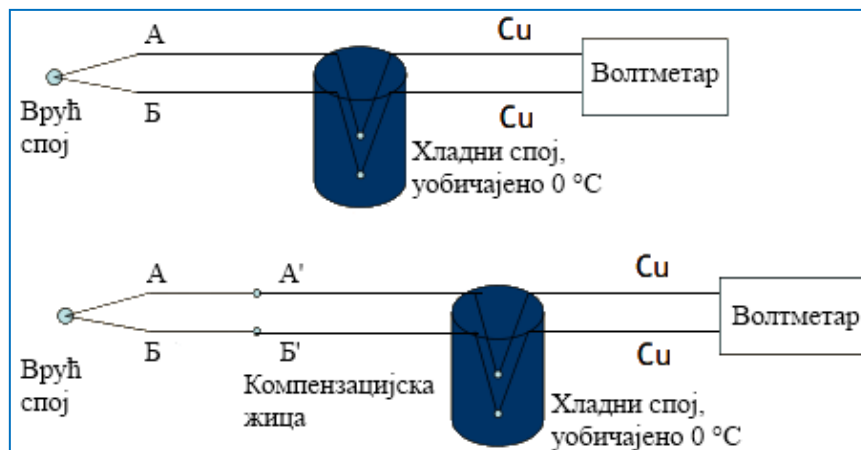
- на 25°C , испитивање на $500\text{ V}_{\text{dc}} > 1\text{ M}\Omega$,
- на 500°C , испитивање на $500\text{ V}_{\text{dc}} > 5\text{ M}\Omega$ [9].

Повезивање термопара са мерним објектом мора бити правилно, како би излазни термонапон одговарао стварним вредностима. На слици 3.10, шематски је приказано правилно, односно неправилно повезивање термопара са мерним објектом.



Слика 3.10. Постављање термопарова на мерни објекат [6]

Термопар се састоји од две термоелектроде од материјала различите проводљивости, које су спојене једна са другом, тако да чине једно електрично коло. Када је један спој на температури T_1 , а други на температури T_2 у колу се генерише електромоторна сила чија вредност зависи од коришћених материјала и вредности температура T_1 и T_2 . У једном индустријском термоелементу, један спој термопара је мерни спој (изложен температури који се мери), а други је референтни спој који је на познатој „референтној“ температури са којом се пореди мерена температура [6]. На слици 3.11, приказана је шема мерења температуре термопаровима.

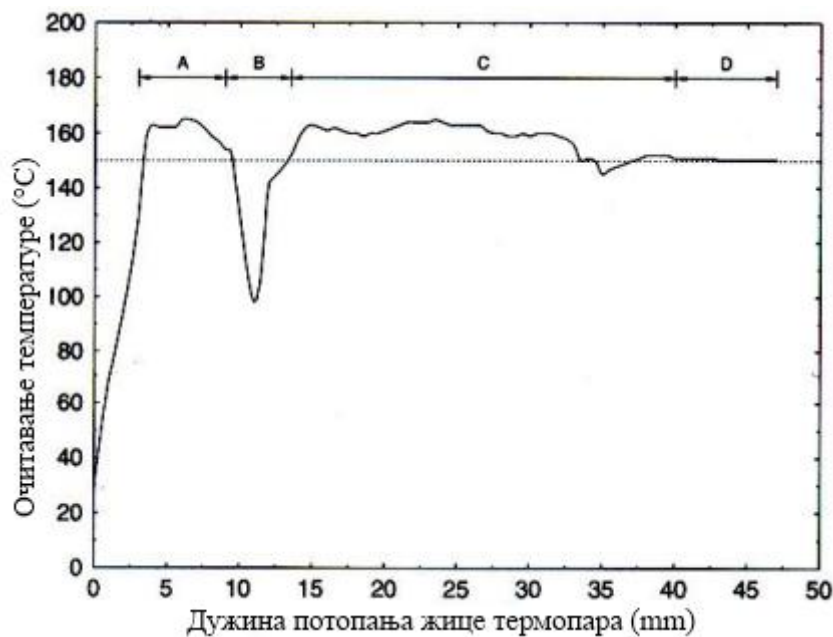


Слика 3.11. Принцип мерења са термопаром [6]

3.2.1 Калибрација термопарова

Калибрација термопарова врши се методом упоређивања са еталоном вишега реда, док термопарови од племенитих метала могу бити калибрисани и у фиксним тачкама. Калибрација термопарова мора бити изведена у довољном броју тачака, како би се поставила једначина која описује одређени термопар (стандардно 5 тачака).

Са слике 3.12, може се уочити нехомогеност термопара типа К на температури изнад 170 °C (зона В – одступање од приближно 30% због промена на жици, зона С – због термичких промена на жици одступање је реда величине 7%, зона D – оригинална жица).



Слика 3.12. Нехомогеност термопара К типа [6]

Калибрација термопарова врши на основу норми, захтева или прописа, па је неопходно осигурање усклађености са међународним прописима. Квалитативне норме и безбедносне норме складу DIN EN ISO 9000 захтевају да сва средства за мерење и контролу буду одговарајућег квалитета, што се тиче испуњења националних и међународних норми заснованих на SI мерним јединицама. Калибрација може бити неопходна у ситуацији када је потребна већа прецизност од прецизности према норми DIN EN 60751 или ради контроле дугорочног функционисања [11].

Калибрацијом се проверава већи ниво прецизности термопара од оне која се употребљава у радним условима. На тај начин се контролише одступање мерења дуж целе функционалне дужине термопара.

Калибрацијом је неопходно извршити одређивање два одступања мерења на сензору температуре или на мерном ланцу (сензор и трансформатор). У току калибрације се не спроводи промена испитиваног материјала. У уређајима за мерење у време спровођења мерења, одређује се разлика између температуре приказане уређајем за мерење и референтне вредности. Не врше се никакве промене на самом уређају за мерење, као што је на, пример, померање тачке која се сматра нулом.

Калибрација сензора температуре се врши на два начина: **калибрација у сталним тачкама мерења и калибрација по компаративној методи.**

3.3 Област употребе термопарова, предности и недостаци

Термопарови за мерење температуре појединих објеката могу се користити у:

- пећима/сушарама,
- у гасовитим и течним медијумима (вода, гас, ваздух, уље и др.),
- на површинама контејнера, цевовода, апаратура и машина,
- на лабораторијским и експерименталним уређајима,
- у срединама са високим и ниским притиском, са великом брзином струјања флуида и др [10].

Термоелементи са омотачем који је отпоран на корозију и високу температуру своју примену налазе у следећим ситуацијама:

- W.Nr. 1.4541 (AISI 321): у хемијским апаратурама, измењивачима топлоте, пећима, индустрији текстила и хартије, индустрији за прераду сирове нафте (петрохемији), хемијској индустрији, прехранбеној индустрији и др.
- W. Nr. 1.4571 (AISI 316 TI): код опреме за хемијску индустрију, за уградњу у пећима, код сумпорне и хемијске смеше, за опрему у текстилној, фото-хемијској и фармацеутској индустрији и др.
- W. Nr. 1.4841 (AISI 314/310 S): у областима где изузетна растућа отпорност и чврстоћа представљају предност, индустрији за прераду сирове нафте,

измењивачима топлоте и пећима, грејачима ваздуха, индустрији грађевинског материјала и др.

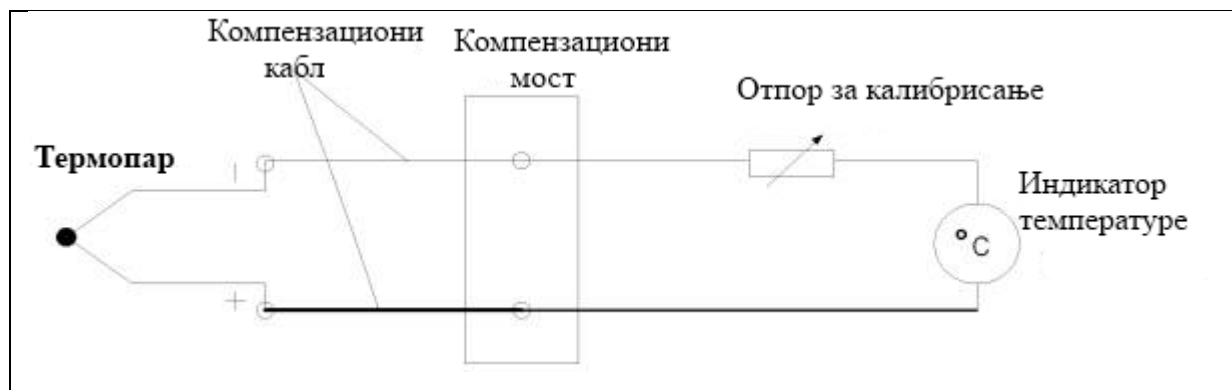
- W. Nr. 2.4816(Инконел 600): у високим пећима, хемијској индустрији, производњи синтетичког материјала, индустрији стакла, индустрији папира, прехрамбеној индустрији, истраживањима и развоју [10].

Термоелементи са заштитном цеви и термопаровима типа J, K, N, T, S, своју примену налазе у:

- индустрији цемента и цигланама,
- високим пећима,
- пећима за печење и термичку обраду,
- котловима на мазут, природни гас, био масу, електричну енергију.

Термоелементи групе T_2 са металним заштитним цевима налазе примену у индустрији цемента, третирању челика, у затвореним посудама у којима сагорева отпад, као и у срединама где је присутна сумпорна атмосфера (оксидациона или редукциона). Поред наведеног, своју примену налазе и у азотној атмосфери, где је присуство кисеоника веома мало, а максимална температура примене им је до 1250°C .

Код мерења температуре у индустријским постројењима, као и код моторних возила и мотора, неопходно је формирати мерни мост. Комплетан мерни мост састоји се од термопара, компензационог вода, евентуално компензационог моста, бакарног вода са отпором за калибрисање, индикатора температуре. Мерни мост је приказан на слици 3.13.



Слика 3.13. Мерни мост за мерење температуре са термопаром [9]

✓ Предности термопарова:

- цена (осим термопарова од племенитих метала),
- широко температурно подручје (-270°C до 1700°C),
- мали пречник (до $0,25\text{ mm}$),
- брз одзив и
- једноставна аутоматизација мерења [6].

✓ Недостаци термопарова:

- релативно мали сигнали на излазу, мала резолуција (од 1 mK до 1 K),
- проблеми када је већа удаљеност између мерног места и инструмента (додатно генерисани сигнали),
- при вишим температурама долази до хемијских и структурних промена, које као резултат имају слабију тачност (нарочито термопарови из обичних метала, N типа),
- рекалибрација појединих типова термопарова или термопарова који су употребљени за посебне апликације је тешка [6].

4. Примери примене термопарова у испитивању моторних возила и мотора

Када је у питању испитивање моторних возила, термопарови се углавном на местима где се јавља широк температурски опсег. У табели 4.1, дате су мерне тачке за мерење температуре на моторном возилу.

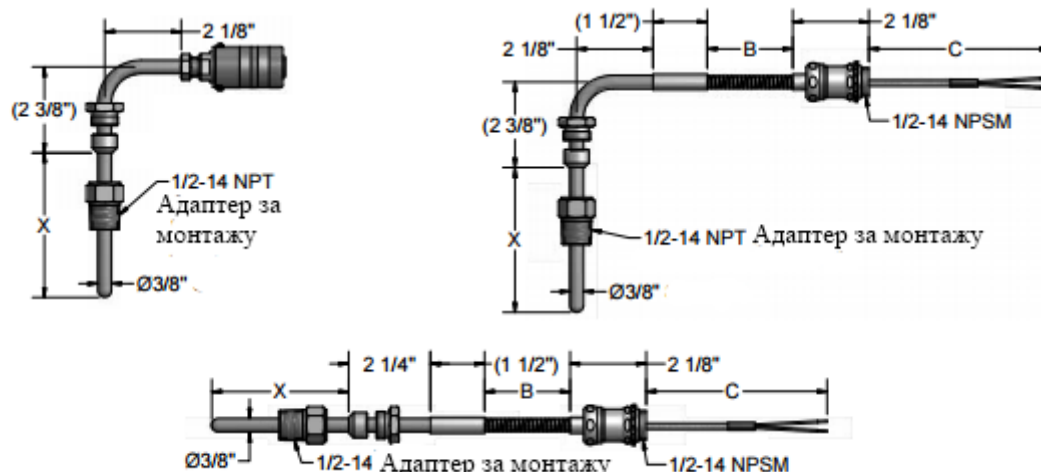
<i>Табела 4.1. Мерне тачке за мерење температуре на моторном возилу</i>	
<i>Мерне тачке на возилу</i>	<i>Опсег мерења температуре</i>
Температура ваздуха на уписном делу	-40°C÷170°C
Температура околине	-40°C÷60°C
Температура у унутрашњости возила	-20°C÷80°C
Температура ваздуха у издувном система/систему за грејање	-20°C÷60°C
Температура испаривача (систем за климатизацију)	-10°C÷50°C
Температура воде за хлађење	-40°C÷130°C
Температура моторног уља	-40°C÷170°C
Температура акумулатора	-40°C÷100°C
Температура горива	-40°C÷120°C
Температура ваздуха у пнеуматичима	-40°C÷120°C
Температура издувних гасова	100°C÷1000°C
Температура кљешта диск кочнице	-40°C÷2000°C

У наставку рада биће описани поједини случајеви примене термопарова у испитивању моторних возила, односно њихових делова и опреме.

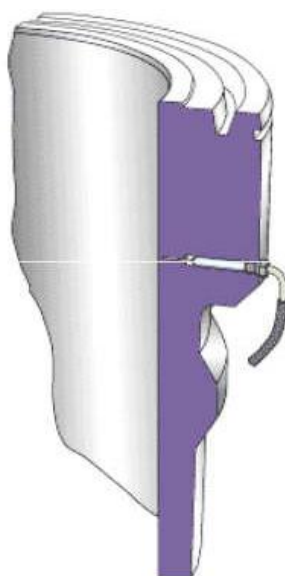
4.1 Мерење температуре мотора СУС термопаром

Термопар је, заправо, температурни сензор који може да се користи у нестабилном окружењу попут високе температуре, вибрација и др. На слици 4.1, приказан је сензор температуре – термопар који се примењује за мерење температуре у цилиндру дизел мотора. Овај тип сензора за мерење температуре поседује термопар Ј и К типа. Наменен је за тешке услове рада. Заштићен је омотачем од нерђајућег челика, а поседује и заштитне водове, додатке и низ опција.

У примени се сензори овог типа постављају у блок мотора или на лежач коленастиг вратила, слика 4.2. Термопар се поставља у заштитни џеп и навојем се причврсти на блок мотора, затим се термоелемент поставља унутар овог заштитног џепа.



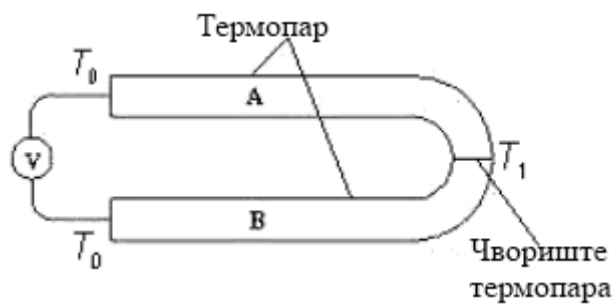
Слика 4.1. Термопар произвођача Product Guide за мерење температуре код дизел мотора [12]



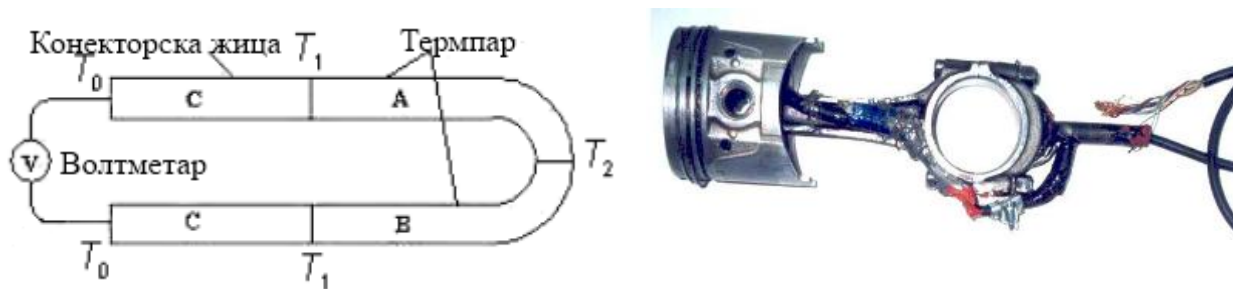
Слика 4.2. Постављање термопара у блок мотора [13]

Други начин мерења температуре у цилиндру мотора је постављање термопара унутар цилиндра, на клип. На овај начин је могуће мерити температуру у више тачака (у случају приказаном на слици 4.5, мерење температуре је вршено у 10 тачака).

Мерење је извршено на четвороцилиндричном бензинском мотору, а циљ испитивања је утврђивање ефикасности и емисије издувних гасова мотора. Мерење је вршено од хладног старта до стабилног рада мотора. За мерење температуре коришћен је термопар типа Т (бакар-константан). Као што је приказано на слици 4.3, термопар је повезан са волт-метром, па индуковани напон даје разлику између температура T_1 и T_0 , док је на слици 4.4 термопар повезан са „компензационом жицом“, а потом са волт-метром, па индуковани напон даје разлику између температура T_1 и T_2 . Коришћен је термопар типа Т, који има опсег мерења од 0°C – 370°C и грешку мерења од 0,4% или 1°C .

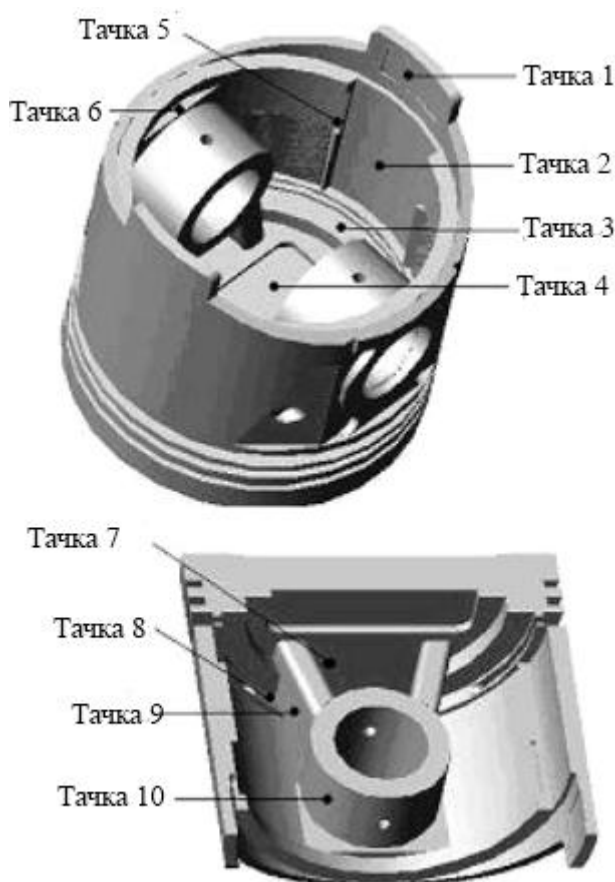


Слика 4.3. Термопар се повезан са волт-метром [14]



Слика 4.4. Термопар повезан са „компензационо жицом“ и волт-метром [14]

На слици 4.5 приказан је модел клипа са означеним тачкама где се мери температура.



Слика 4.5. Тачке у којима се мери температура на клипа [14]

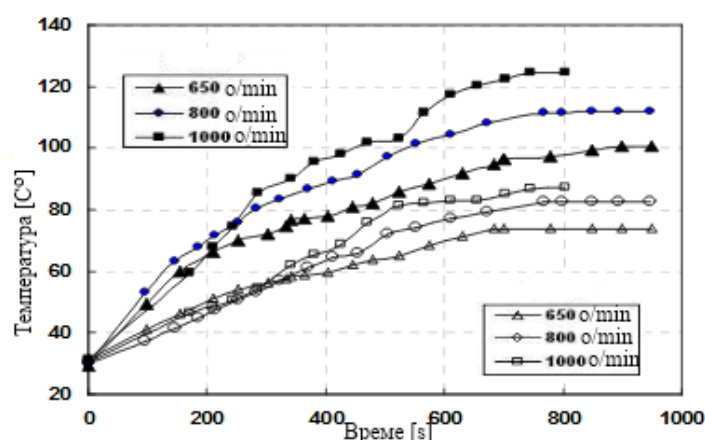
Пошто је мерење температуре вршено у одређеним тачкама на клипу, изабран је термопар типа Т. Помоћу једначине 4.1, индуковани напон се претвара у температуру, односно графички се приказује преко дијаграма температуре у зависности од времена и броја обртаја мотора, слика 4.6 [14].

$$T = a_0 + a_1 \cdot V + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot V^3 + a_4 \cdot V^4 + a_5 \cdot V^5 + a_6 \cdot V^6 + a_7 \cdot V^7 \quad [4.1]$$

где $\mathbf{c}_y$:

$$a_i, \quad i = \overline{0, 7} - \text{константе,}$$

V – напон.

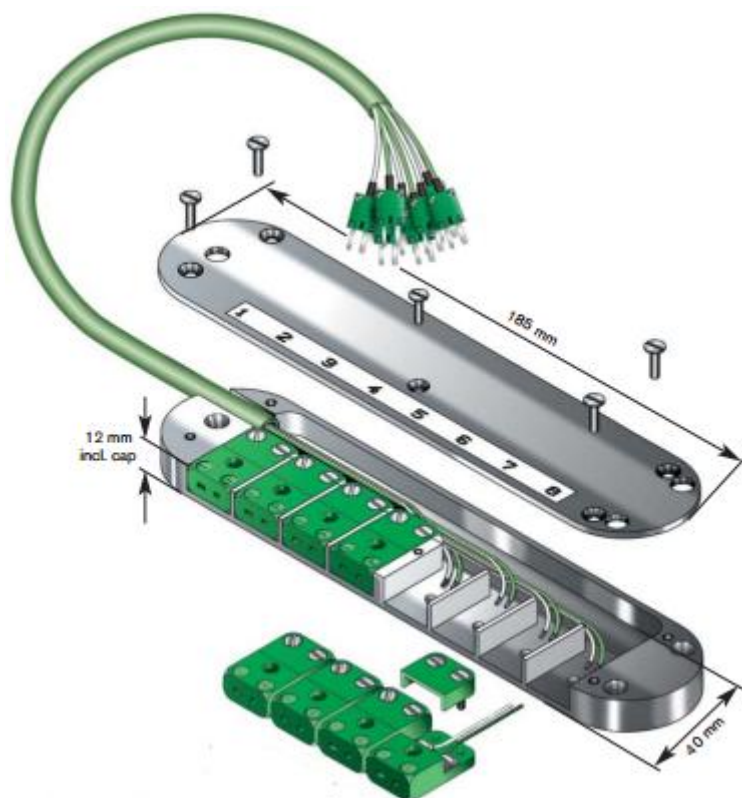


Слика 4.6. Варијација температуре клипа у зависности од времена и број обртаја мотора на празном ходу [14]

Термопар произвођача SAB, T065 (слика 4.7), користи се у испитивању моторних возила, на пример за испитивање мотора, код кога се захтева мерење температуре у више различитих тачака: на глави мотора, на систему за хлађење мотора, на месту упаљења смеше и др. Термоелемент се може лако повезати, а у случају отказа, неисправни елемент се може заменити релативно лако. Каблови који долазе из различитих мерних тачака могу се врло брзо прикључити на конектор, па је смањен напор током постављања инсталације. Уопштено, коришћење овог термоелемента има смисла тамо где постоје многе мерне тачке од интереса на којима треба мерити температуру. У табели 4.2. дате су техничке карактеристике термопара SAB T065.

Табела 4.2. Техничке карактеристике термонара SAB T065 [15]

Тип термопара	<i>J и K</i>
Тип кабла	<i>THL KX</i>
Стандард	<i>DIN EN 60584</i>
Пресек термопара	<i>0,22 mm²</i>
Број мерних места	<i>16</i>
Конекција	<i>Двopolне минијатурне утичнице K типа у кућишту од алуминијума</i>



Слика 4.7. Термопарови SAB T065 за мерење температуре на мотору возила на више мерних места [15]

Термопаром T207 произвођача SAB може се мерити температура на заптивном прстену свећице, слика 4.8. Поседује изолован термопар типа K, а може бити и са два кабла. Погодан је за употребу при мерењу температуре на местима која су тешко доступна, као и за мерење површинске температуре. На мерном месту се налази бакар на врху и може се лако препознати по боји [15]. У табели 4.3 дате су техничке карактеристике термопара SAB T207.



Слика 4.8. Термопар SAB T207 за испитивање температуре на прстену свећице (лево) и термопар SAB T207 за испитивање температуре са два кабла (десно) [15]

Табела 4.3. Техничке карактеристике термопара T207 [15]	
Тип термопара	1 или 2 x K
Граница одступања	1. класа
Стандард	DIN EN 60584
Мерни опсег	-40°C ÷ +400°C
Пречник	Прстен Ø 19 x 13.1 x 2.5 mm / месинг
Материјал бр.	1.4541
Номинална дужина	52 mm
Конекциони кабл	KX 19L 2 x 0,22 mm ²
Дужина кабла	0,3 m
Максимална температура прикључка	+ 200°C

4.2 Мерење температуре уља у мотору СУС термопаром

Мерење температуре уља код мотора моторних возила врши из различитих разлога, а основни су:

- заштите мотора и његове опреме од прегревања,
- управљање системом хлађења и
- регулација температуре мотора.

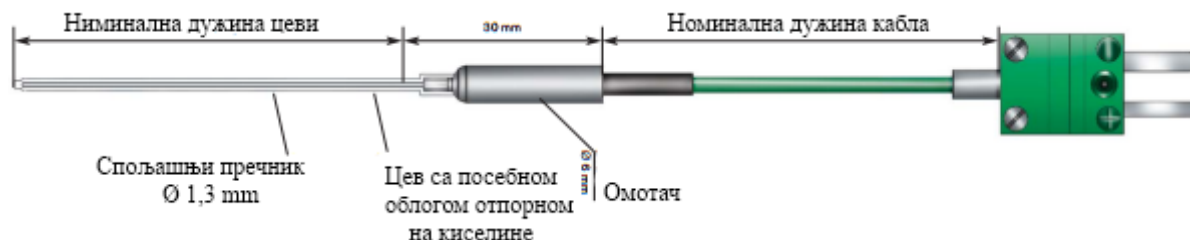
Мерење температуре уља врши се у циљу спречавања да температура пређе дозвољену вредност, како не би дошло до оштећења мотора и опреме возила. У овим случајевима не захтева се велика прецизност, нити линеарност сензора, већ се могу користити и сензори који су нелинеарни и они који само дају информацију да ли је мерена температура већа или мања од дозвољене вредности. У случају да температура пређе максималну дозвољену вредност, долази до реаговања температурне заштите и опрема се ставља ван функције, све док температура дође испод дозвољене вредности. Један од термопарова који се користе за ову сврху је Pt100 RTD, такође произвођача SAB (слика 4.9). Може извршити мерење температуре у опсегу од -200°C÷400°C, са грешком мерења од 0.1°C, а има и широк температурни опсег. Иако врши веома прецизно мерење, пошто се мерење температуре врши на површини, мора се узети у обзир разлика између унутрашње температуре мотора и спољашње температуре околине.



Слика 4.9. Термопар Pt100 RTD за мерење температуре уља мотора СУС [16]

4.3 Термопар за мерење температуре акумулатора моторних возила

SAB T841 (слика 4.10) је термопар намењен за мерење температура у акумулатору возила. Предност овог термопара је у томе што је отпоран на киселине из акумулатора, па се може примењивати за њихово испитивање. Овај тип термопара омогућава мерење температуре директно у киселини акумулатора, без оштећења самог термопара, јер је заштићен специјалном облогом.



Слика 4.10. Термопар SAB T841 за испитивање температуре у акумулатору возила [15]

У табели 4.4 дате су техничке карактеристике термопара SAB T841.

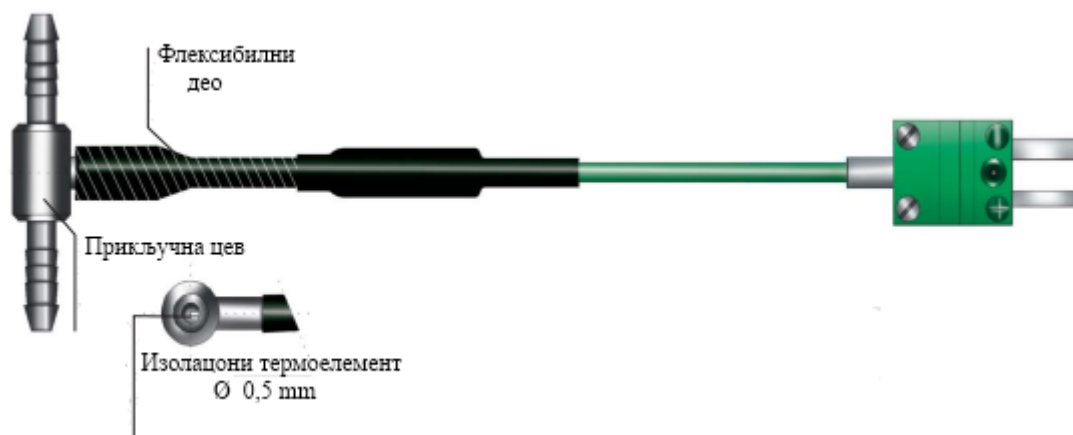
Табела 4.4. Техничке карактеристике термопара SAB T841 [15]	
Тип термопара	$I \times K$
Граница одступања	I . класа
Стандард	DIN EN 60584
Мерни опсег	$-40^{\circ}\text{C} \div +205^{\circ}\text{C}$
Пречник цеви	$\varnothing 0,5 \text{ mm}$
Максимална температура прикључка	$+ 200^{\circ}\text{C}$
Материјал бр.	2.4816 / Inconel 600
Конекциони кабл	THL KX 19L $2 \times 0,22 \text{ mm}^2$
Номинална дужина кабла	3 m
Номинална дужина цеви	100 mm

4.4 Термопар за мерење температуре у систему за снабдевање горивом

Код мерења температуре протока горива кроз систем за снабдевање, користи се аутоматска температурна компензација, која осигурава да се гориво истаче у истој запремини без обзира на температуру. Према универзалном правилу, чим је резервоар хладнији, тим више горива губи, јер се гориво скупља на нижој температури, а шири на вишој. Многе европске земље, посебно на истоку и на северозападу, имају релативно ниску просечну температуру, па се применом неког уређаја за мерење температуре, између осталог и термопара, може контролисати температура горива од резервоара, преко система за снабдевање.

Термопар SAB MTE207 (слика 4.11) примењује се за мерење температуре у систему протока горива. На средини термоелемента са термопаром налази се конектор Т профила малог пречника, који има релативно брзо време одзива. Предност му је мали

пречник изолације термоелемента, тако да се не омета ни брзина протока ни количина протока горива. Изолација кабла нуди истовремено механичку заштиту, као и заштиту од електромагнетних сметњи.



Слика 4.11. Термопар MTE 207 за испитивање температуре у линији протока горива [15]

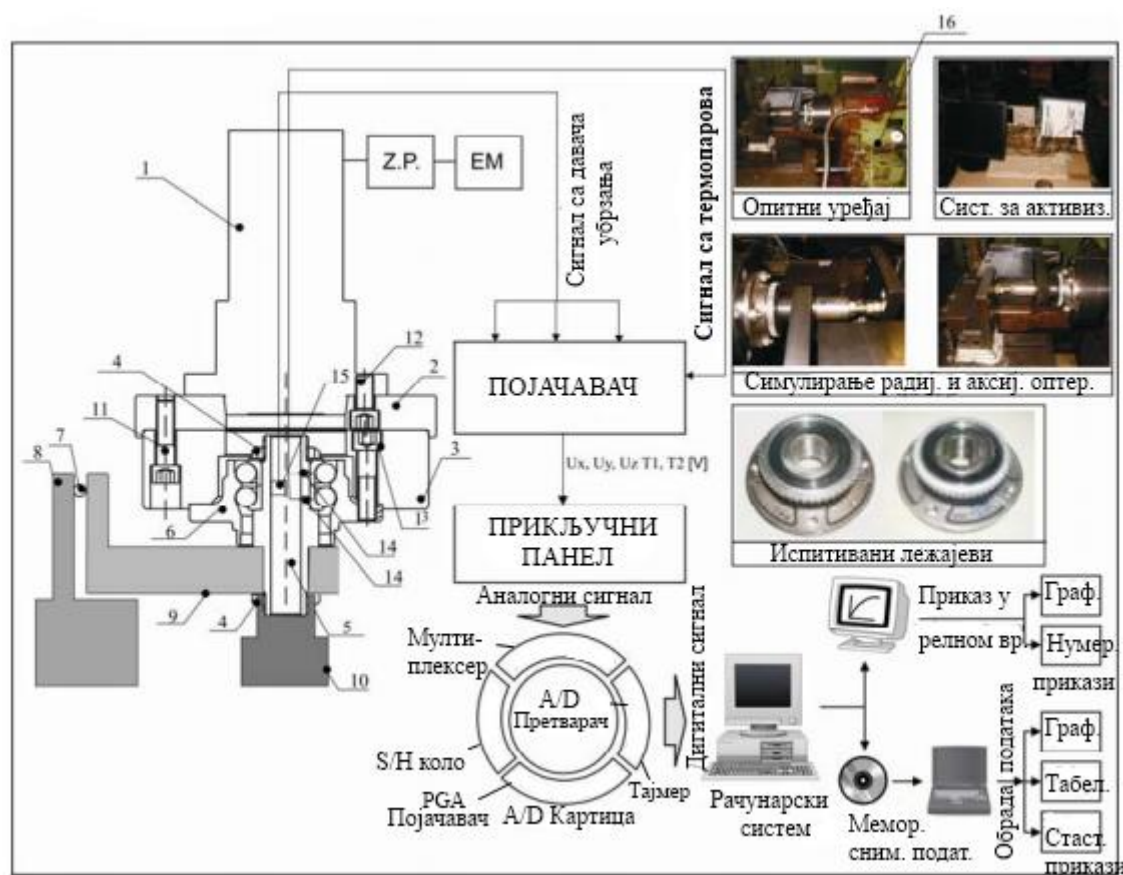
У табели 4.5 дате су техничке карактеристике термопара SAB MTE 207.

Табела 4.5. Техничке карактеристике термопара SAB MTE207 [15]	
Тип термопара	$I \times K$
Граница одступања	1. класа
Стандард	DIN EN 60584
Мерни опсег	$-40^{\circ}\text{C} \div +110^{\circ}\text{C}$
Пречник Т цеви	$\varnothing 0,5 \text{ mm}$, ојачање цеви 3 mm
Максимална температура прикључка	$+ 200^{\circ}\text{C}$
Флексибилни део	цеви (месинг), цеви (синтетички материјал) $\varnothing 4/6/8/10/12 \text{ mm}$
Конекциони кабл	$L / 6Y / F / C / 6Y 2 \times 0,22 \text{ mm}^2$

4.5 Мерење температуре на прстену лежаја точка термопаром

У оквиру лабораторијских испитивања (на Факултету техничких наука у Новом Саду), извршено је мерење температуре на прстену лежаја точка. Ово мерење је извршено са циљем да се добију резултати који указују на радни век интегрисаног лежаја точка. Како би се симулирали услови експлоатације лежаја, унутрашњи прстен је оптерећен радијалном силом одговарајућег интензитета и по дефинисаном временском дијаграму радијалном и аксијалном силом.

Код овог испитивања примењен је опитни уређај, приказан на слици 4.12. Овај мерни систем пројектован је за одређивање радног века интегрисаног лежаја на точку моторног возила.



Слика 4.12. Опитна инсталација за одређивање века интегрисаног лежаја точка [16]

Према шеми инсталације (слика 4.12), електромотор преко зупчастих преносника преноси обртни момент на вратило (1) на којем се преко плоче (2) и прирубнице (3) поставља лежај за испитивање (6) на стационарну осовину (5). Плоча (2) је везана за вратило помоћу завртњева (11), док је прирубница на коју се монтира испитивани лежај преко спољашњег прстена везан за плочу (2) помоћу завртњева (12). Лежај се монтира на осовину (6) са преклопом и стеже се помоћу навртки (4) преко унутрашњег прстена који је стационаран. У осовини су уграђени давач убрзања (15) и термопарови (14). Зупчасти преносници врше редукцију броја обртаја вратила, тако да је број обртаја вратила $n=1000$ o/min, односно његова кружна фреквенција је $\omega=104,6$ Hz [16].

Оптерећење, радијално и аксијално, остварује се преко полуа (9), (10) хидрауличким путем помоћу хидроцилиндара. Спољашње оптерећење се преноси на унутрашње прстене лежача преко осовине (5). Помоћу давача притиска (16) прати се интензитет оптерећења, док се величине прате на екрану управљачког система. Такође, врши се праћење понашања лежача (вибрација и температуре), а врши се помоћу енкодера убрзања (15) и термопарова (14). Резултати мерења се преносе до система за аквизицију, где се врши обрада, меморисање и приказивање резултата испитивања на монитору. Кориснички интерфејс виртуелног инструмента (LabView) омогућава интерактиван рад са системом за аквизицију. Помоћу корисничког интерфејса потребно је пре почетка аквизиције података, одабрати канале у којој ће се подаци записивати, формирати графички изглед екрана. Графички прозор омогућава праћење

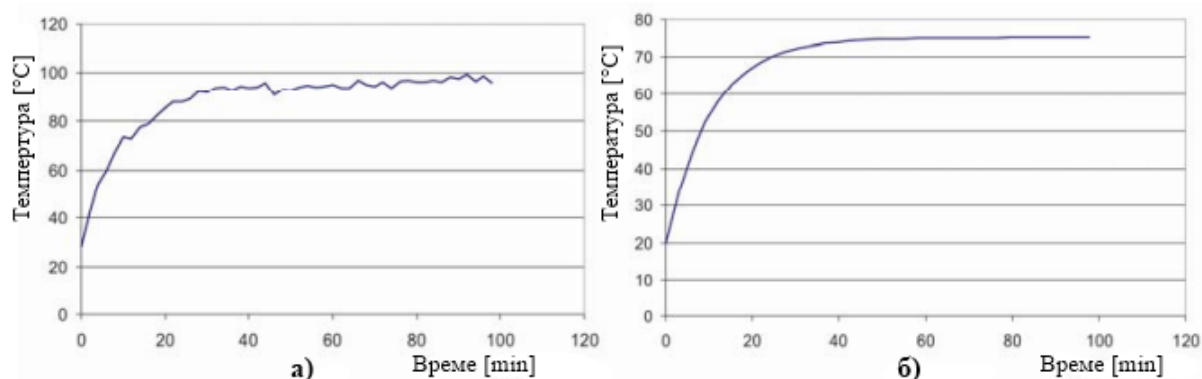
промене сигнала осцилација у зависности од времена и оптерећења у сва три мерена правца, промену температуре у зависности од времена и оптерећења, као и број обртаја. На графичком прозору је обезбеђено показивање нивоа задатог оптерећења на испитиваном лежају, као и задавање истог. Тренутак отказа лежаја одређује се наглим порастом температуре унутрашњег прстена или појавом вибрација лежаја [16].

За ово испитивање коришћени су термопарови NiCr-Ni, тип K, који су повезани преко одговарајућих трансмитера на систем за прикупљање података. Како би термопарови уградили у осовину, у осовини су избушени отвори одговарајућег пречника на месту унутрашњих прстенова лежаја. Ту су, у припремљене отворе на осовини, постављени термопарови тако да својим врхом налажу на унутрашњи прстен лежаја (слика 4.13).



Слика 4.13. Шематски приказ термопарова при мерењу температуре на унутрашњем прстену лежаја точка [16]

Како би се термопарови задржали у току обртања лежаја у истом положају, односно како би се уједно извршила изолација жица термопара, на споју су постављене керамичке цевчице са PVC изолацијом, комплетан део је причвршћен за спољашњу површину осовине. На слици 4.14, приказани су дијаграми промене температуре на унутрашњем прстену лежаја у зависности од времена.



Слика 4.14. Промена температуре у зависности од времена на унутрашњем прстену лежаја: а) при деловању комбинованог оптерећења, б) при деловању радијалног оптерећења [16]

4.6 Термопар за мерење температуре диск кочнице

Елементи система за кочења возила морају задовољити високе механичке захтеве процеса кочења. Из тог разлога врше се различита испитивања кочноног система, између осталих и мерење температуре кочница. Код овог испитивања користе се и термопарови, најчешће типа К, а мерење температуре се врши на површини диска кочнице или на плочици (слика 4.15).



Слика 4.15. Мерење температуре диск кочнице термопаром типа К [17]

Термопар произвођача SAB T895 (слика 4.16), намењен је за брзо мерење температуре на равним ротационим површинама као што су дискови кочница. Овај термопар може изврши мерење температуре до 800°C. У табели 4.6, дате су техничке карактеристике термопара SAB T895.



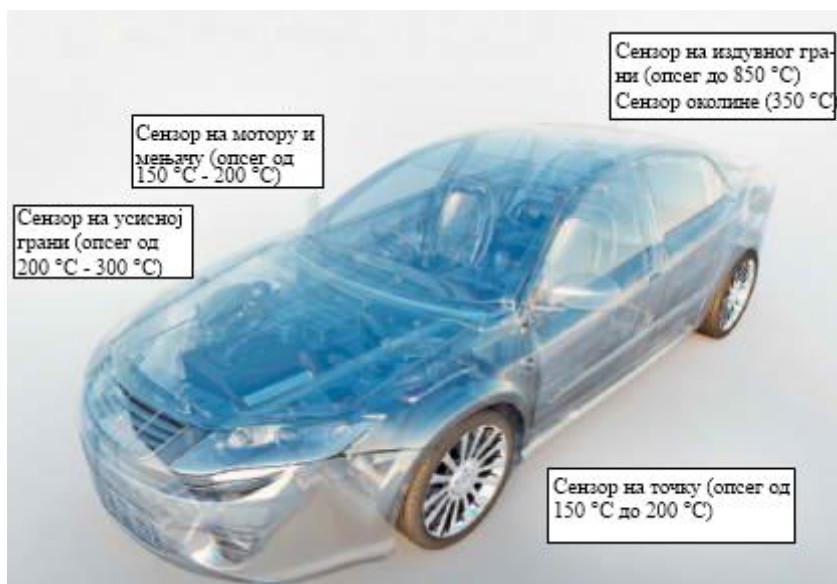
Слика 4.15. Термопар SAB T895 за мерење температуре на површини диска кочнице [15]

Табела 4.6. Техничке карактеристике термопара SAB T895 [15]	
Тип термопара	I x K или I x J
Граница одступања	I. класа
Стандард	DIN EN 60584
Мерни опсег	-40°C ÷ 800 °C
Пречник Т цеви	Ø 0,5 mm
Максимална температура прикључка	до 800°C
Номинална дужина кабла	2m
Конекциони кабл	KX 19L 2 x 0,22 mm ²

4.7 Мерење температуре у унутрашњости моторних возила применом термопарова

Мерење температуре у унутрашњости моторног возила се заснива на промени отпорности услед промене температуре са *позитивним* (PTC) или *негативним* (NTC) температурним коефицијентом. Да би се извело претварање температурне промене у аналогни напонски сигнал врши се додавање отпорника, како би се формирао делитељ напона (има линеаризујући ефекат). Све је присутније и безконтактно (пирометријско) мерење температуре. Углавном се користи за заштиту путника у возилу (праћење позиције путника у возилу због активирања ваздушних јастука), као и за комфор и удобност путника (клима у комбинацији са мерењем температуре коже и др.) [19].

Савремена моторна возила поседују сензоре за лоцирање топлоте, код својих електро-механичких, мехатроничких или хидрауличких система. Праћење промене температуре захтева позиционирање сензора близу извора топлоте, па се термопарови намећу као погодни за овај вид испитивања. Максимална температура и време изложености делова топлотном зрачењу варира у зависности од типа возила и локацији електронике на возилу (слика 4.17). На пример, већа је интеграција сензора топлоте, између осталог и термопарова, са електро-механичким системима ради контроле преноса топлоте кроз возило. Применом интегрисаних система може поједноставити производња, тестирање и одржавање моторних возила, као и контрола код електричних возила и хибридних возила. Контрола мотора, конвертора и температура батерија код хибридних возила, такође може бити од великог значаја, јер се ту јављају највеће температурне разлике.



Слика 4.17. Постављање сензора температуре – термопарова на аутомобилу на местима где се емитује велика топлота [19]

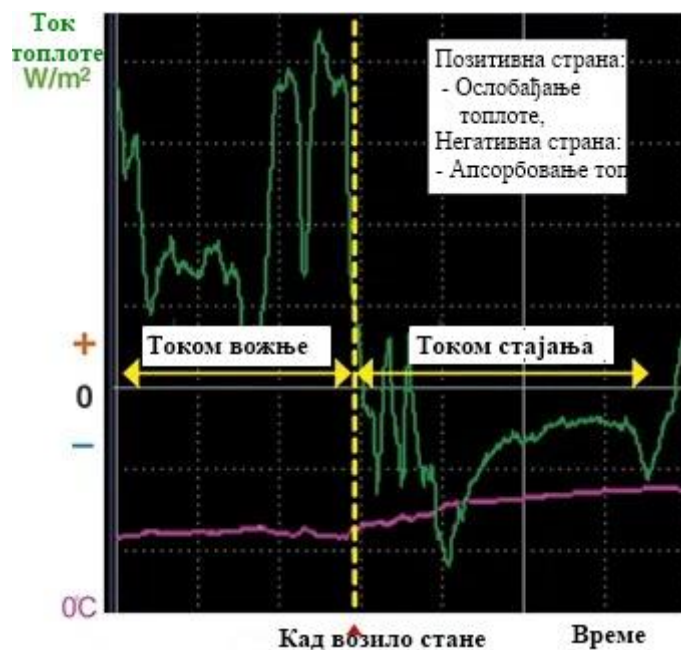
Применом мерила, попут термопарова, врши се мерење протока топлоте кроз возило. Један од уређаја у који је интегрисан термопар је и Hioki LR8432 писач протока

топлоте који може утврдити да ли аутомобилски делови ослобађају или апсорбују топлоту. Hioki LR8432 остварује нови приступ мерењу, коришћењем термопарова уз додатне сензоре протока топлоте [20]. Добијањем информација о узроку раста температуре, могу се дизајнирати оптималне карактеристике изолације и одвођења топлоте из возила (слика 4.18). Досадашњи конвенционални приступ мерењу ослањао се на термопарове чијом се употребом мерила температура делова у моторном одељку возила.



Слика 4.18. Проток топлоте кроз аутомобил [20]

Ако се анализира дијаграм на слици 4.19, може се уочити кретање криве из позитивног у негативно поље када возило стане. На основу тога, може се извести закључак да се током вожње ослобађа топлота, а током стајања долази до апсорпције топлоте. На основу информације да ли се топлота ослобађа или апсорбује, могу се имплементирати оптималне термалне контра-мере. Током вожње потребно је смањивање температуре одвођењем топлоте, док се током стајања температура може смањити изолацијом.



Слика 4.19. Дијаграм промене протока топлоте кроз возило током вожње и током стајања [20]

Термоелемент са конектором типа T302/T303, произвођача SAB, је погодан за мерење температуре у унутрашњости возила (слика 4.20). Тип термоелемента T301 има и кабловске крајеве. Овај термоелемент поседује 1 до 2 термопара типа J и K, чији су пречници: 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm, 4,5 mm и 6 mm. Примењује се за испитивање карактеристика клима уређаја, а углавном се поставља на возачко или сувозачко место. Технички подаци термопара SAB T302/T303 датису у табели 4.7.



Слика 4.20. Термопар SAB T302/T303 за испитивање температуре у унутрашњости возила [15]

Табела 4.7. Техничке карактеристике термопара T302/T303 [15]	
Тип термопара	1 или 2 x J или K
Граница одступања	1. класа
Стандард	DIN EN 60584
Мерни елемент	Минијатурни термопар
Максимална температура прикључка	+ 200°C
Мерни опсег	-40°C ÷ +1000°C
Пречник	Ø 1,5 mm
Материјал	2.4816 / Inconel 600
Номинална дужина	150 mm

5. Закључак

Термoeлементи – термopарови су једни од најзаступљенијих сензора за мерење температуре. Иако су по својим димензијама прилично велики, ипак налазе широку примену у индустрији, као и у испитивању моторних возила. Данас се термopарови у испитивању моторних возила користе као термoeлементи или у виду мерних кругова дужине од неколико метара.

Примена термopарова предност налази у њиховом широком температурском опсегу, једноставности конструкције, као и релативно ниској цени. Ипак, може се рећи да је један од битнијих недостатака термopарова, по питању испитивања моторних возила, тешка рекалибрација, што је током испитивања више пута потребно.

Производи се велики број различитих типова термopарова, зависно од материјала који се употребљавају за испитивање температура у различитим опсезима. Зато се могу применити у скоро сваком испитивању на возилу, где се испитује утицај температуре.

Зависно од карактеристика, осетљивости и стабилности, одређени типови термopарова су стандардизовани на међународном нивоу, а намењени су искључиво за испитивање моторних возила. Према анализираним примерима, може се закључити да су у испитивању моторних возила нарочито распрострањени термopарови типа J, K и T. Ови типови термopарова према својој цени спадају међу јефтиније. Примењују се у случајевима где захтеви у погледу висине грешке нису тако ригорозни. Иначе, термopарови овог типа који се примењују у испитивању моторних возила су прве и друге класе.

На основу анализираног, може се закључити да се у испитивању моторних возила, термopарови углавном примењују на местима где се јавља широк температурски опсег. Предност примене термopарова у испитивању моторних возила јесте што је термopар заправо температурни сензор који може да се користи у нестабилном окружењу какво је висока температура.

Поред тога што се све више у употреби налази велики број сензора и термометара за мерење температуре у зависности од мерног места, може се рећи да термoeлементи са термopаровима и даље имају примат. Што се тиче испитивање моторних возила, може се очекивати дуг период њихове примене, нарочито на местима широког температурног опсега, као што су мотор СУС или издувни систем возила.

6. Литература

- [1] Тодоровић, Ј.: „Испитивање моторних возила“; Машински факултет Београд, 1985.
- [2] Поповић, М.: „Сензори и мерења“, Завод за уџбенике и наставна средства, Српско Сарајево, 2004.
- [3] Милорадовић Д., Испитивање МВМ, предавања и вежбе, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, школска 2015/2016.
- [4] Morris, A. S., Langari, R.: “Measurement and Instrumentation – Theory and Application”, Academic Press, 2016
- [5] Термопарови – инжењерски портал Балкана: „Термопарови“, приступљено 28.10.2016., доступно на: <http://www.automatika.rs/baza-znanja/senzori/termoparovi.html>
- [6] Бојковски, Ј.: „Основи савремене термометрије“, Скрипта са предавања, Факултет за електротехнику Универзитета у Љубљани, приступљено 28.10.2016., доступно на: <http://www.etfbl.net/~aleksej/em/termometrija.pdf>
- [7] Termokew: „Termopares“, приступљено 2.11.2016., доступно на: <http://www.termokew.mx/termopares.php>
- [8] Thermometrics: Thermocouple, приступљено 29.12.2015., доступно на: <http://www.thermometricscorp.com/thermocouple.html>
- [9] Термотехна: Опште – Принцип мерења температуре термопаром, приступљено 19.11.2016., доступно на: <http://termotehna.rs/?p=418>
- [10] Термотехна: Ментал термоелементи и отпорни термоелементи, приступљено 20.11.2016., доступно на: <http://termotehna.rs/wp-content/uploads/2016/04/T9-Mantel-termoelementi-i-otporni-termometri-vi%C5%A1e-informacija.pdf>
- [11] Gunther Temperaturmesstechnik: Калибрација – основна концепција, приступљено 21.11.2016., доступно на: <https://www.guenther.eu/6c785a74-7b87-f460-8236-3565337e6178?Edition=hr>
- [12] Pyromation: Diesel Engine Thermocouples, приступљено 23.11.2016., доступно на: <http://www.pyromation.com/Lit/DE-01-0212.pdf>
- [13] Electrical Engineering Blog: Industrial thermocouple temperature sensor in practical application, приступљено 23.11.2016., доступно на: <http://eblogbd.com/thermocouple-temperature-sensor-images/>
- [14] Hamzehi M., Rashidi M.: Determination of Piston and Cylinder Head Temperature Distribution in a 4-Cylinder Gasoline Engine at Actual Process, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, IRAN, 2006., приступљено 23.11.2016., доступно на: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2006elounda2/papers/538-115.pdf>

- [15] SAB Brockskes: Thermocouples automotive industry, приступљено 23.11.2016.,
доступно на: <http://www.sab-cable.com/cables-wires-harnessing-temperature-measurement/products/showprocategories/temperature-measurement/thermocouples-automotive-industry/>
- [16] Auber Instruments: Oil/Water Temperature Sensor, High Precision, приступљено
24.11.2016., доступно на: <http://auberins.com/images/Manual/PT100A-NPT.pdf>
- [17] М. Зељковић, Љ. Бољојев, С. Табаковић, А. Живковић, М. Родић, М.
Мијушковић: Техничко решење – Опитни уређај за одређивање века
интегрисаног лежаја точка, Факултет техничких наука Универзитета у Новом
Саду, приступљено 24.11.2106., доступно
на: www.ftn.uns.ac.rs/%2Fn779218734%2Fopitni-uredjaj-za-odredjivanje-veka-integrisanog-lezaja-tocka&usg=AFQjCNH5yZkr8QVw2xYhDXUADWCgwtqmYA
- [18] TKSensors: Rubbing, Contact or Embedded Thermocouples, приступљено
24.11.2106., доступно на: <http://www.tksensors.co.uk/#horizontalTab7>
- [19] J. Watson, G. Castro: High-Temperature Electronics Pose Design and Reliability
Challenges, Analog Dialogue, приступљено 24.11.2016., доступно
на: http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/46-04/high_temp_electronics.html,
- [20] Мехатроника - стручни часопис, Визуелизација скривених узрока
температурних промена у ауто индустрији и грађевинарству - Примена у
аутомобилској индустрији, приступљено 24.11.2016. доступно на:
<http://mehatronika.gomodesign.rs/vizualizacija-skrivenih-uzroka-temperaturnih-promena-u-auto-industriji-i-gradevinarstvu/>