

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Моторна возила и мотори

Предмет: Испитивање моторних возила и мотора

Број индекса: 31/2011

Никола Б. Сретеновић

Примена мерних трака у испитивању моторних возила и мотора

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

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

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- изложи принцип рада мерних трака као давача,
- прикаже примере примене мерних трака у техници испитивања моторних возила и мотора,
- опише методологију мерења напона савијања помоћу мерних трака на једноставном лабораторијском моделу и
- прикаже и анализира резултате експерименталних мерења на лабораторијском моделу.

Препоручена литература:

- [1] Тодоровић, Ј.: „Испитивање моторних возила“, Машински факултет Београд, 1979.
- [2] Поповић, М.: „Сензори и мерења“, Завод за уџбенике и наставна средства, Српско Сарајево, 2004.
- [3] Симић, Д.: „Теорија и примена мерних трака“, Машински факултет Крагујевац, 1972.

Крагујевац, октобар 2016. год.

Ментор:

Доц. др Данијела Милорадовић

РЕЗИМЕ

У оквиру завршног рада објашњени су физички принципи на којима се заснива рад мерних трака. Примена мерних трака у техници испитивања моторних возила и мотора је илустрована преко већег броја конкретних решења примењених на возилу. Извршен је експеримент мерења напона савијања помоћу мерних трака на једноставном лабораторијском моделу. Приказани су и анализирани резултати мерења.

Кључне речи: мерне траке, моторна возила , испитивање

ABSTRACT

Physical principles on which operation of strain gauges is based are explained in the final paper. A number of real solutions applied on vehicles illustrate application of strain gauges in testing of motor vehicles and motors. An experimental measurement of bending stress was conducted using strain gauges on a simple laboratory stand. The results of measurements are shown and analyzed.

Keywords: strain gauges, motor vehicle, testing

Садржај

Увод.....	1
1. Принцип рада, карактеристике и примена мерних трака	2
1.1. Принцип рада и извођења мерних трака	3
1.2. Техничке карактеристике мерних трака	13
1.3. Област примене мерних трака	23
1.4. Постављање мерних трака и одређивање мерних места	27
2. Примери примене мерних трака код испитивања моторних возила	29
2.1. Мерење радних оптерећења система за управљање моторних возила применом мерних трака	31
2.2. Мерење оптерећења на носећој структури моторних возила применом мерних трака	35
2.3. Мерење радних оптерећења система еластичног ослањања моторних возила мерним тракама	37
2.4. Мерење оптерећења погонских полувратила и точкова моторних возила применом мерних трака	38
2.5. Примена мерних трака при мерењу масе терета и оптерећења преносника снаге код теретних моторних возила	40
3. Мерење напона савијања на лабораторијском моделу помоћу мерних трака	42
4. Приказ и анализа резултата мерења напона савијања помоћу мерних трака	45
Закључак	47
Литература	48

Увод

Мерне траке су отпорни давачи за мерење силе, масе, момента или притиска. Користе се при детектовању деформација неког еластичног тела које настају услед оптерећења и посредном одређивању оптерећења.

Применамерних трака започела је 1938. године, а коришћене су у сеизмолошке сврхе. Применио их је професор инжењерске сеизмологије са *MIT-a (Massachusetts Institute of Technology)*, Артур Клод Руж (*Arthur Claude Rouge*). Њиховом применом мерено је напрезање које настаје услед симулираног земљотреса на моделу резервоара за воду, како бисе пронашло решење отпорно на земљотрес. Тачније, меренасу динамичка напрезања на платформи торња који вибрира. Иначе, инструменти за мерење издужења, у то време, нису били примењиви на танкозидним моделима. Код ових мерних трака добијена је линеарна зависност промене отпора жице за комплетан мерни опсег код истезања и сабијања, као и добра стабилност „нуле“, односно стабилност почетне вредности отпора приликом лепљења траке за конзолу. На тај начин седошло до електро-отпорних мерних трака са носећим слојем, чији се принцип рада и данас примењује.

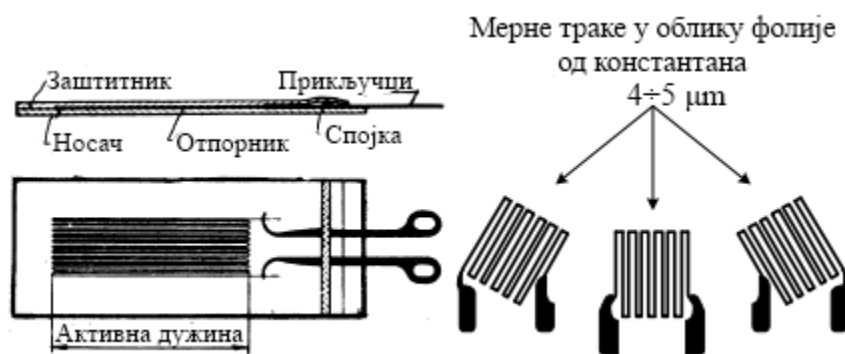
Област примене мерних трака код експерименталних испитивања може се поделити на: анализу механичких напона, анализу унутрашњих (заосталих) напона, и одређивање термичких напона. Због својих могућности, мерне траке своју примену налазе у авио индустрији, аутомобилској индустрији, железници, као и у хирургији, код оптимизације спортске опреме, кућних апарата и мониторинга грађевинских структура.

Када су у питању моторна возила, мерне траке се могу употребити за испитивање механичких и термичких напрезања, нпр. на погонским осовинама и блоку мотора, као и за испитивање притиска у цевоводима и резервоару за гориво. Поред наведеног, мерне траке могу да се примене и за мерење: силе улежиштења котрљајног лежaja, оптерећења на педалама возила, силе на завојним опругама, оптерећења пнеуматика и сила оптерећења шасије возила, момента на точку управљача, као и за многа друга испитивања.

У наставку рада биће приказане изведбе мерних трака и анализиран њихов принцип рада, техничке карактеристике и њихова примена. Посебан осврт биће на примени мерних трака, при испитивању моторних воила и мотора, где ће бити описани поступци испитивања појединих делова и склопова на моторном возилу. Такође, у раду ће бити описан поступак испитивања деформације, применом мерних трака, са анализом добијених резултата, мерење је извршено у лабораторији за моторна возила и моторе на факултету инжењерских наука.

1. Принцип рада, карактеристике и примена мерних трака

Мерна трака се изводи са једном отпорном жицом велике дужине, савијеном на малом простору и везаном за посебан носач, а специјалним лепком се причвршћују на мерни објекат. На тај начин се омогућава да се све деформације са површине мерног објекта, на месту где је залепљена мерна трака, преносе на отпорну жицу. Шематски приказ структуре мерне траке дат је на слици 1.1.



Слика 1.1 Структура мерне траке: Мерна трака у облику отпорне жице (лево) и мерна трака у облику фолије од константана(десно) [1], [2]

На слици 1.2 приказани су примери извођења мерних трака која зависе од области употребе мерних трака.



Слика 1.2 Примери извођења мерних трака [2]

1.1. Принцип рада и извођења мерних трака

Мерне траке су, у принципу, еластични отпорници. Релативна промена отпорности код мерних трака је у првој апроксимацији линеарно сразмерна напрезању [3]:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \frac{\Delta l}{l} \quad (1.1)$$

где су:

R_0 – почетни електрични отпор,

k – осетљивост мерних трака (за метале од $2 \div 6$),

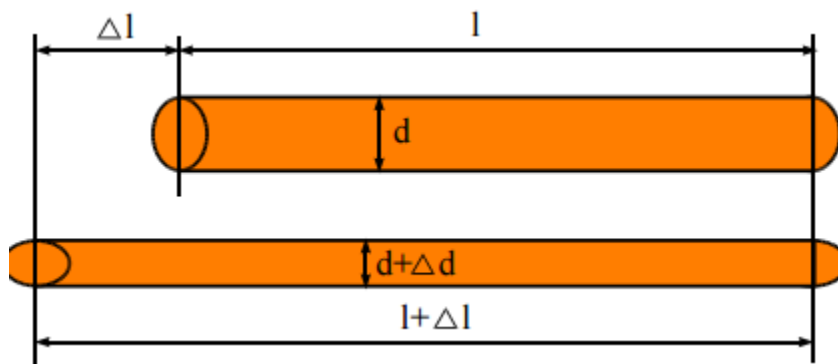
$\frac{\Delta R}{R_0}$ – релативна промена дужине проводника,

l – активна дужина проводника.

Номинална отпорност мерних трака најчешће је око 100 Ω . Пожељно је да термички коефицијент ширења материјала на који су залепљене мерне траке и коефицијент ширења мерних трака буду приближно исти.

Мерне траке се најчешће повезују у мерни мост, а углавном је то Винстонов мерни мост. Даље се излазни сигнал са Винстоновог моста шаље ка мерно-појачавачком мосту. Код мерних трака пожељно је да поседују што већу дужину и што мањи попречни пресек, како би осетљивост била већа.

У принципу, мерна трака је проводник дефинисане отпорности који је причвршћен на површини мерног објекта. При деформацији мерног објекта услед његовог оптерећења, изазива се одговарајућа деформација мерне траке, што све заједно омогућује мерење промене отпора мерне траке (слика 1.3).



Слика 1.3 Деформација мерног објекта [3]

Електрична отпорност мерне траке при неоптерећеном стању је R_0 . Потенцијална електрична отпорност при оптерећеном стању је $R = R_0 + \Delta R$.

За пример приказан на слици 2.3, израз за електричну отпорност, R_0 , је следећи [3]:

$$R_0 = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{\rho \cdot l \cdot 4}{\pi \cdot d^2} = \frac{\rho \cdot l^2}{V} \quad (1.2)$$

где су:

A – површина попречног пресека,

V – запремина отпорника,

$\frac{\Delta l}{l}$ – релативна деформација, често означавана са ε ,

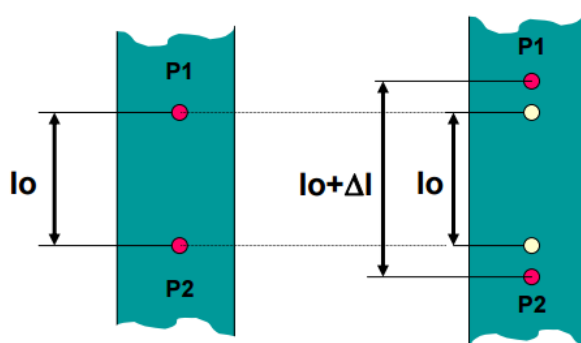
ρ – специфична отпорност и

l – активна дужина.

Промена отпора услед деформације и промена у микроструктури је дата као [3]:

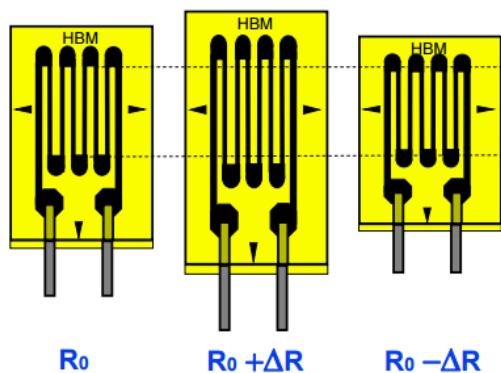
$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + \mu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1.3)$$

Релативно издужење мерне траке, ε , описује транслаторну промену облика материје (слика 1.4). Разлози транслаторне промене облика материје су: механичко оптерећење, температурне промене, као и заостали ослобођени напони.



Слика 1.4 Транслаторна промена облика материје[3]

На слици 1.5, шематски је приказана дилатациона промена код НВМ – ових мерних трака.



Слика 1.5 Шематски приказ дилатационе промене код HBM – ових мерних трака [3]

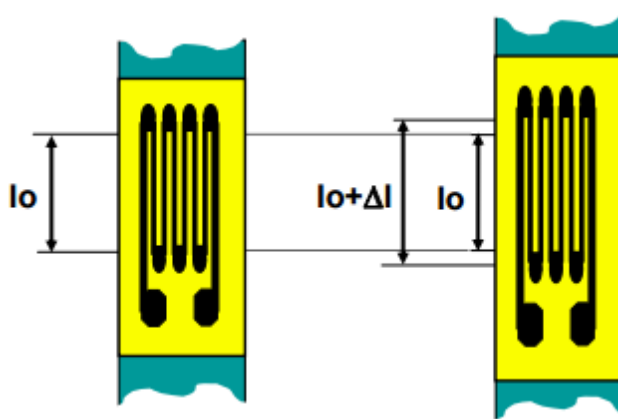
Релативно издужење (дилатација) се може изразити следећим изразом [3]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.4)$$

Најчешће се као мерна јединица дилатационе промене користе: %, mm/m, $\mu\text{m}/\text{m}$.

Дилатација се може одредити и као количник промене дужине проводника при оптерећењу и осетљивости мерне траке (слика 1.6) [3]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/R_0}{k} \quad (1.5)$$



Слика 1.6 Промена дужине проводника мерне траке при оптерећењу [3]

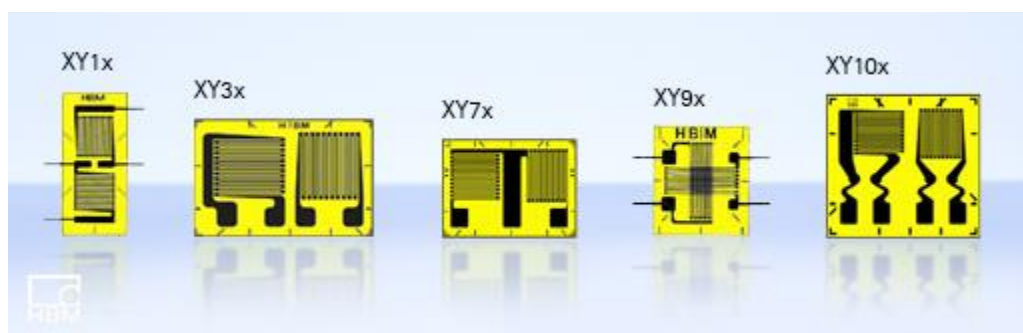
Промена дужине проводника може се одредити и као збир специфичне промене отпорности услед промене запремине и специфичне промене отпорности услед промене геометрије [3]:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A_0} \quad (1.6)$$

Мерне траке се могу поделити на:

- механичке,
- оптичке,
- капацитивне (примена код високих температура),
- пиезоелектричне и
- напарене – танкослојне мерне траке [3].

Механичке (отпорничке или тензометарске) мерне траке. Овај тип мерних трака је најчешће у примени, када се врши испитивање механичких деформација. За мерење се највише примјењују мерне траке које се лепе на објект мерења. Користе се за мерење деформација, притиска, обртног момента и др. Када говоримо о претварању механичких величина као што су сила, обртни моменат и притисак у електричне величине, технологија мерних трака нуди предност изузетног споја перформанси трошкова. Све су примењеније мерне траке које нуде могућност компензације пузања материјала од кога је сачињен давач, специјално намењене за произвођаче сензора. На слици 1.7, приказане су механичке ХУ мерне траке за експерименталну анализу са два мерна влакна за двоосно напосно стање познатог правца. Носећи слој је од полиамида, а отпор ових мерних трака је 120, 350, 700 или 1000 Ω .



Слика 1.7 Механичке мерне траке ХУ типа, произвођача НВМ [5]

Оптичке мерне траке. Лако се уграђују као и класичне (отпорничке) мерне траке, нису подложне електромагнетним сметњама и могу да се користе у експлозивним срединама. Њихов рад се заснива на принцип рада Брегу решетке. Брегова решетка се састоји од многих рефлектујућих површина које одбијају одређену таласну дужину светлости. Брегова решетка се формира јаким „UV“ зрачењем. Растојања између рефлектујућих површина у влакну су еквидистантна, а таласна дужина која се поклапа са растојањем између површина се рефлектује. Остале таласне дужине пролазе кроз рефлектујуће површине. Када се мења растојање између рефлектујућих површина (услед деформације), долази до промене таласне дужине која је пропорционална дилатацији. На слици 1.8, приказана је оптичка мерна трака у

облику розете, а примењује се за мерење правца и интензитета главних напона. Поред тога оптичке мерне траке могу се користити и за одређивање деформација у познатом правцу, одређивање правца и интензитета главних напона, мерење деформација и температуре у композитима и др.



Слика 1.8 Оптичке мерне розета базирана на Браговој оптичкој решетки (K-OR) за одређивање правца и интензитета главних напона [6]

Оптичка мерна трака садржи Брегову решетку, која је заштићена посебним омотачем. Оптичке мерне траке од се аплицирају, као и отпорничке, тако да нема проблема са руковањем са танким влакнима. Још једна предност је да се лако мере и негативне дилатације и нема потребе за преднапрезањем влакна. Ово карактеристика је својствена за НВМ-ове траке. Оптичке мерне траке имају активну дужину влакна, као и отпорничке, а имају дужину од 30 mm. Брегова решетка је заливана у пластику која води влакно, а сигнал дилатације који долази до инструмента је осредњена вредност свих дилатација на површини где је постављена трака.

Предност оптичке технологије је могућност интеграције више сензора у једно влакно, али је важно да сензори који се упарују имају решетку различите таласне дужине и та разлика мора бити толика да не дође до мешања сигнала са разним решеткама. Препорука је користити до 13 решетки у једном влакну. Тако је на 4-канални инструмент могуће повезати са 52 сензора.

Пиезоелектричне мерне траке. Постоје бројне изведбе пиезоелектричних мерних трака, где се мерења врше у квази-статичким условима, иако је то у сваком случају домен технологије класичних мерних трака. Начин на који се користе мерни елементи је веома различит, код примене сензора силе на бази мерних трака и код пиезоелектричних сензора силе. На слици 1.9, приказан је пиезоелектрични сензор силе, односно начин настанка напона услед дејства силе на пиезоелектрични сензор.



Слика 1.9 Пиезоелектрични сензор силе на принципу мерних трака [7]

Величина набоја зависи искључиво од величине оптерећења, али не и од брзине његовог остварења:

$$Q = F \cdot q_{11} \cdot n \quad (1.7)$$

где је:

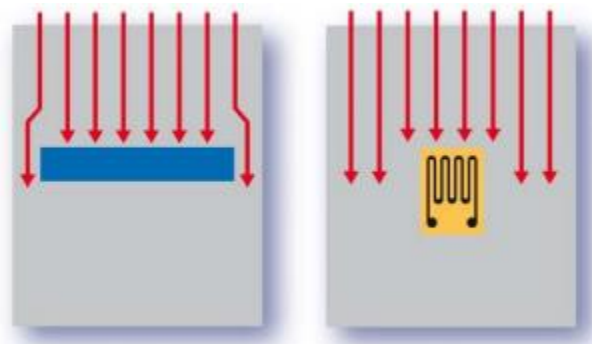
Q – електрични набој,

F – сила оптерећења,

q_{11} – пиезоелектрична константа (-4.3 pC/N),

n – број кварцних елемената повезаних у серији.

Мерне траке се инсталирају на мерна тела која се деформишу када се изложе сили, тако целокупно оптерећење пролази кроз тело, а само део кроз мерне траке (слика 1.10). Због крутости кристала, пиезо технологија је заснована је на чињеници да комплетна сила пролази кроз сам сензор, те тако имамо мехатронички елемент. Висока стабилност монокристала омогућава да пиезо сензори буду веома компактни.

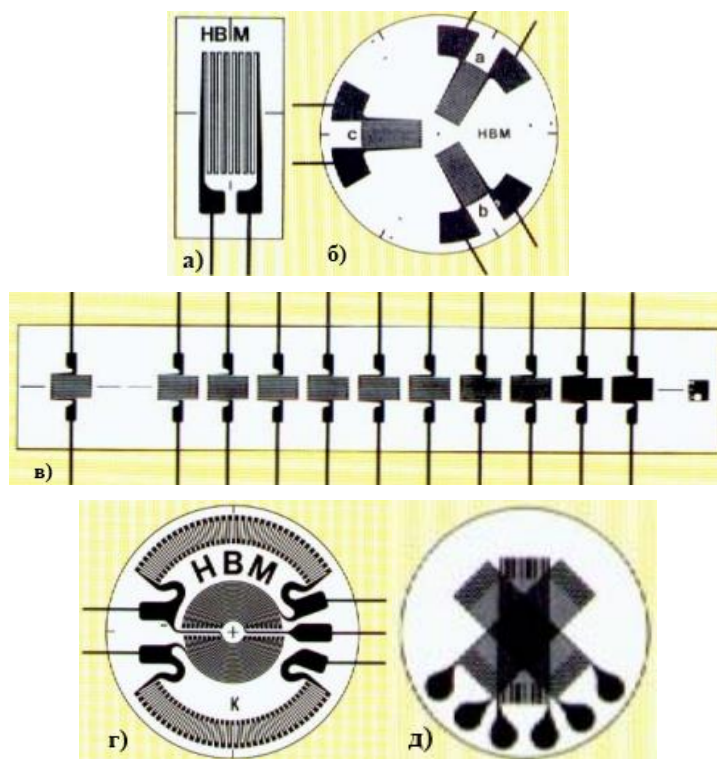


Слика 1.10 Простирање оптерећења кроз мерне траке засноване на пиезо ефекту (лево) и стандардне мерне траке (десно) [7]

Осетљивост пиезоелектричних сензора не зависи од мерног опсега. Ова чињеница обезбеђује основу за прецизна и поуздана мерења у широком мерном опсегу, преко неколико подопсега (декада). У пракси то значи да 5 kN може бити измерено исто прецизно са 140 kN сензором као и са 5 kN сензором. Међутим када дође до удара машине или када се сензори уграђују, номинална сила може бити вишеструко премашена. Пиезоелектрични сензори са капацитетом од 1 kN се могу се користити без проблема за апликацију 0÷20 N, како би избегли случајно преоптерећење. Предности пиезо принципа су очигледна: поуздан рад може бити загарантован са константном високом осетљивошћу [7].

Према облику и величини, мерне траке могу бити (слика 1.11):

- линеарне мерне траке (мерење деформација у једном правцу),
- розете (мерење деформације у два или три правца),
- ланац мерних трака (за одређивање градијената напона),
- мембранске розете (за мерење напона у мембранама),
- резидуалне напонске розете (за одређивање резидуалних - заосталих напона).



Слика 1.11 Облици мерних трака: а) линеране мерне траке, б) розете, в) ланац мерних трака, г) мембранске розете, д) резидуалне напонске розете [3]

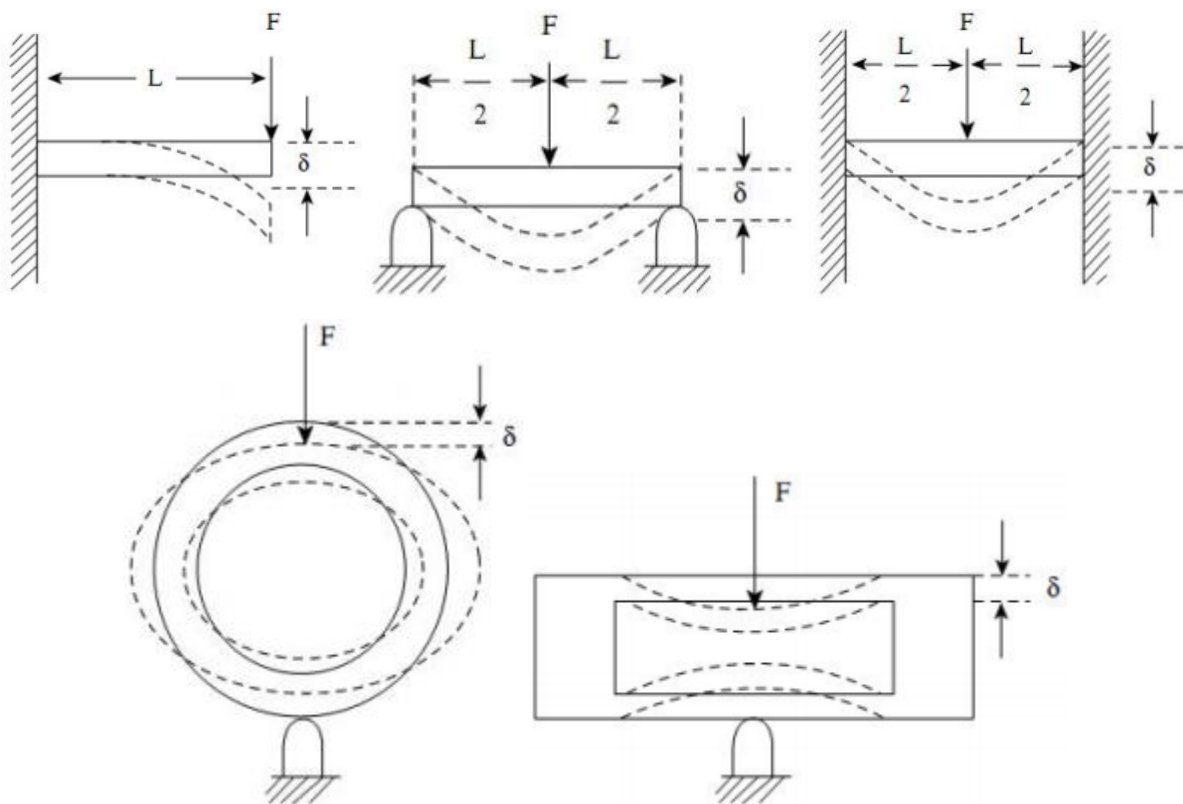
Неке од конструкција линеарних мерних трака су:

- мерна трака са жицом, слика 1.12 а),
- мерна трака са фолијом, слика 1.12 б) и
- полупроводничка мерна трака, слика 1.12 в).



Слика 1.12 Изведбе мерних трака: а) са жицом, б) са фолијом, в) полупроводничка (а – прикључци, б – отпорник, жица или фолија, с – носач) [3]

Мерна ћелија (Load Cell) је конзола на коју се лепе мерне траке. Пожељно је да њена деформација буде линеарна са примењеном силом, како би и деформација самих мерних трака била линеарна са променом силе (слика 1.13).



Слика 1.13 Изведбе мерних ћелија (конзола): F – сила, δ – деформација, L – дужина [2]

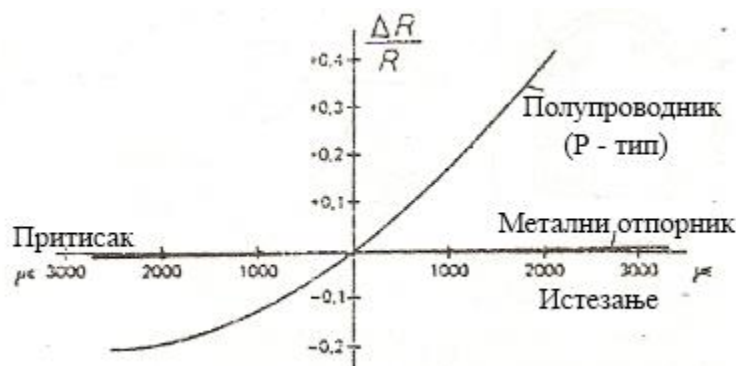
Мерне траке намењене за израду давача су већ интегрисане у мерну ћелију у току производње (слика 1.14). Максимална дозвољена сила која се може измерити не зависи од мерних трака, већ од карактеристика мерне ћелије (долази до пластичне деформације или пуцања мерне ћелије).



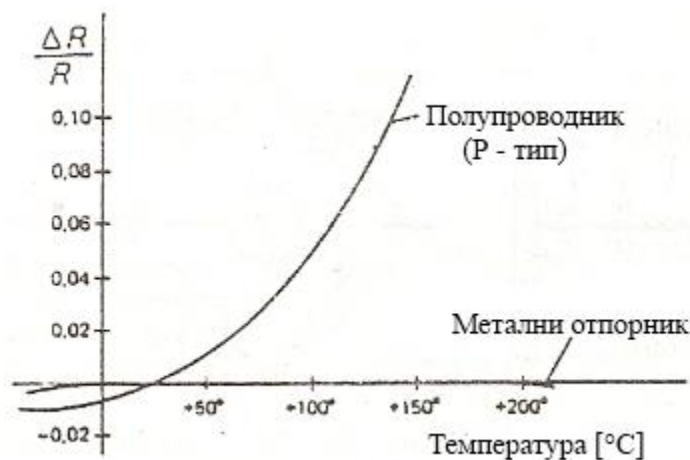
Слика 1.14 Мерне ћелије [2]

Посебну врсту мерних трака представљају полупроводничке мерне траке са отпорничким елементом (отпорнички давачи). Код полупроводничких мерних трака, отпорнички елемент је механички или фото-хемијски, исечен из компактног силикона или германијума, који има високи пиезо-отпорни ефекат. Електрична проводљивост ових кристала зависи од оптерећења, односно изазваног механичког напона. Зато су ове траке знатно осетљивије од мерних трака са металним елементом, са k – фактором на нивоу $100 \div 200$ (и до 100 пута више него код мерних трака са металним елементом). Погодне су за мерење врло малих деформација, односно тако изазваних напона (без појачања у мерном мосту). Недостаци полупроводничких мерних трака су осетљивост на промене температуре, као и промене карактеристика током времена.

Примери зависности релативне промене отпора металних и полупроводничких мерних трака од релативне деформације и радне температуре приказане су на сликама 1.15 и 1.16, респективно. Криве релативне промене отпора које се односе на мерне траке са металним отпорним елементом су на оба дијаграма знатно повољне. Приказана зависност промене отпора од механичког напона односи се на P – тип полупроводника, односно траку која има k – фактор.



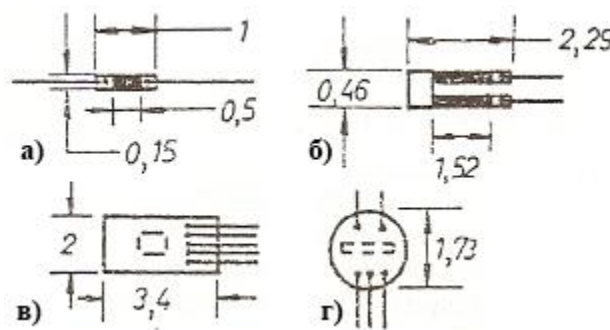
Слика 1.15 Релативна промена отпора у зависности од деформације [1]



Слика 1.16 Релативна промена отпора у зависности од температуре [1]

Дијаграми указују на осетљивост примене полупроводничких мерних трака и потребу да се детаљно анализира могућност евентуалног извора грешке. Мора се имати у виду велика осетљивост овог типа мерних трака током постављања на мерни објекат, односно лепљење, јер је оно компликованије него код металних отпорних елемената.

Полупроводничке мерне траке могу се конструкцијски различито решавати, а најчешће су у примени полупроводничке мерне траке код којих је отпорнички елемент изведен у виду жице или танког штапа (слика 1.17а). Постоје и конструкције код којих је отпорнички елемент U – облика (слика 1.17б) или решења са плочицама и мембранама (слика 1.17в и 1.17г).



Слика 1.17 Полупроводничке мерне траке: а) са жицом, б) U – облика, в) са плочицом, г) са мембраном [1]

1.2. Техничке карактеристике мерних трака

Зависност промене отпора мерних трака у функцији од деформације, зависно од примењеног материјала мерне траке, приказана је на дијаграму 1.18. Величина s са дијаграма 1.14 представља следећи однос (1.8):

$$s = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (1.8)$$

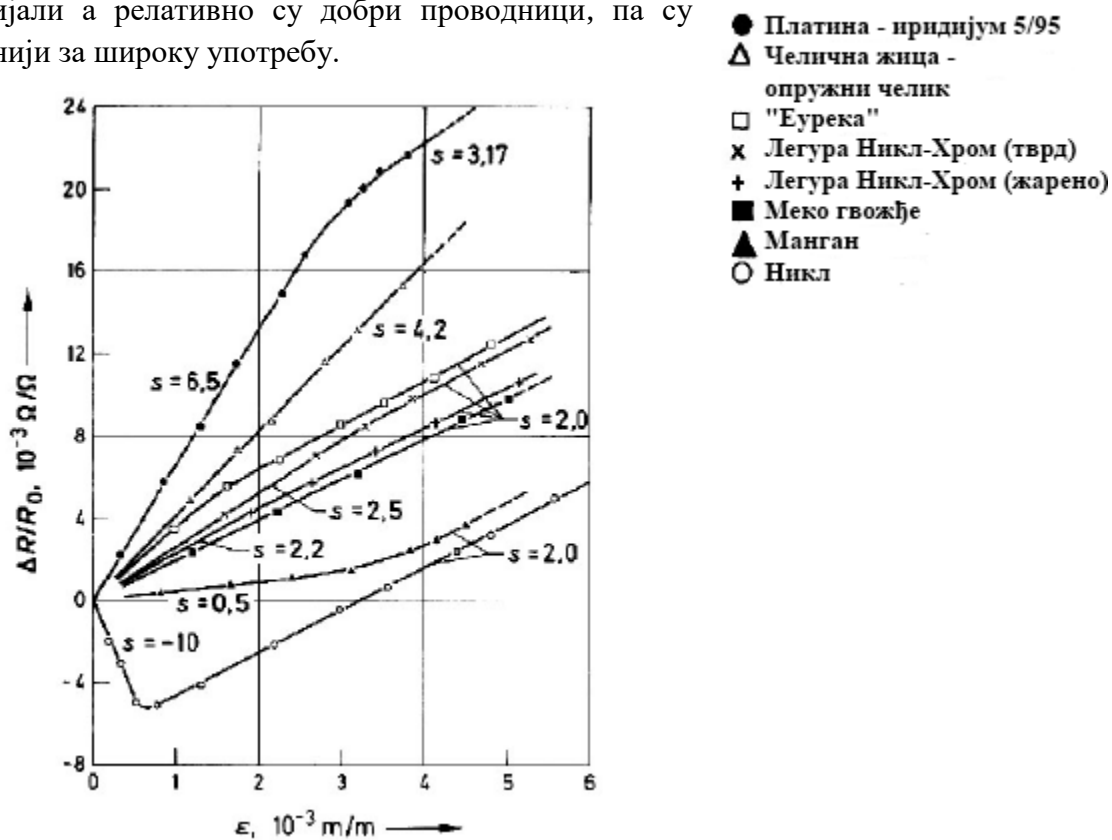
Осетљивост мерне траке, k , израчунава се на основу једначине (1.8) и назива се k – фактор мерне траке [3]:

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (1.9)$$

Величина k , односно k – фактор мерне траке мора се познавати за сваки случај појединачно, тј. мора се означити посебно на свакој мерној траци. Вредност k – фактора зависи, првенствено, од врсте материјала мерне траке, а у знатној мери се разликује код

различитих врста легура. У табели 1.1, дат је преглед често коришћених материјала отпорника мерне траке и одговарајућих просечних вредности k – фактора.

Отпорност неког материјала зависи од његове структуре и његове температуре. Отпорност се повећава са повећањем температуре. Бакар и алуминијум су јефтинији материјали а релативно су добри проводници, па су погоднији за широку употребу.

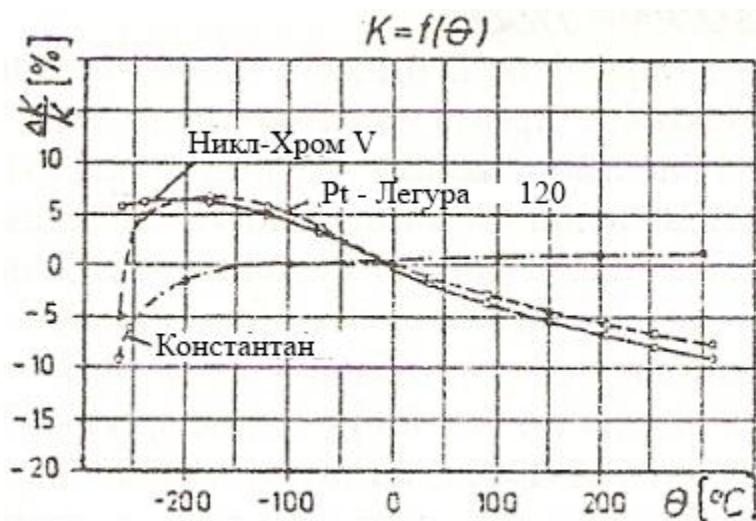


Слика 1.18 Осетљивост материјала мерних трака [3]

Табела 1.1 Карактеристике материјала мерних трака [1], [3]

Материјал	Састав (%)	k (-)	ρ ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)
Константан	60 Cu, 40 Ni, 55 Cu, 45 Ni	2,0	0,48
Хромел	65 Ni, 20 Fe, 15 Cr	2,5	0,45
Никл-хром V	80 Ni, 20 Cr	2,0	1,3
Карма	74 Ni, 20 Cr, 3 Fe, 3 Al	2,0	1,6
Платина-волфрам	92 Pt, 8 W	4	-

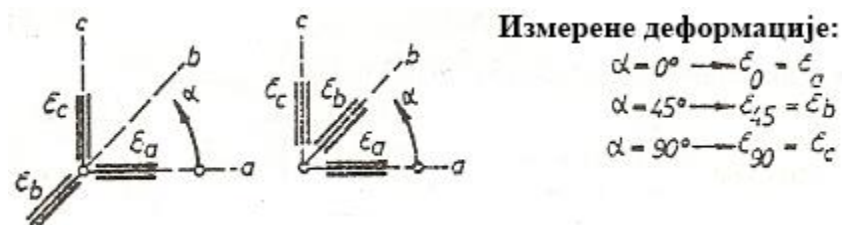
k – фактор има пресудан утицај на тачност мерења мерних трака. Зато се тежи да се он током мерења што мање мења. Ипак, при промени температуре, мења се и k – фактор, нарочито код одређених материјала (слика 1.19), тако да се тај феномен мора узети у обзир при обради резултата мерења. Повезивање мерних трака омогућава компензацију утицаја температуре. Најчешће се врши повезивање у Винстонов мост, о чему ће више речи бити касније.



Слика 1.19 Релативна промена k – фактора при промени температуре [1]

Опсег мерења мерних трака условљен је низом чинилаца попут: еластичности отпорног елемента, еластичности носеће фолије, лепка и залепљене везе, конструкције и геометрије мерне траке, радне температуре и др. Знатно већи опсег мерења имају мерне траке код којих је отпорник изведен од мерне фолије ($\varepsilon_{max} = 2 \div 4\%$, уместо $1 \div 2\%$ за мерну траку са жицом), док се највеће вредности постижу са специјалним конструкцијама мерних трака - до нивоа од 10% релативне деформације.

Помоћу мерних трака мере се деформације у правцу у коме је трака постављена. Грешке настале услед постојања деформација и у правцу попречном на подужну осу релативно су мале (код трака са жицом око 0,5%, док су код мерних трака са металном отпорном фолијом нешто веће). Из тог разлога се мерне траке постављају у правцу у коме делују главни напони. Код мерења тангенцијалних напона, нпр. момента увијања, мерне траке се постављају под углом од 45° у односу на подужну осу вратила, а при мерењу напонских стања на површинама на којима правац напона није познат, користе се мерне траке под углом $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ (слика 1.20) или $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ - розете (слика 1.21).

Слика 1.20 Мерне траке под углом $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ [1]

За розете код којих су мерне траке постављене под углом $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ (слика 1.20), деформације у правцу главних напона су [1]:

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_c)^2 + (2\epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c)^2} \quad (1.10)$$

Правци главних напона (правац „1“ под углом α према оси a_1 , правац „2“ управно на правац „1“ су [1]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c}{\epsilon_a - \epsilon_c} \quad (1.11)$$

За траке под углом $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ максимални и минимални нормални напони износе [1]:

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left(\frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{1 - \mu} \pm \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_c)^2 + [2 \cdot \epsilon_b - (\epsilon_a + \epsilon_c)]^2} \right), \quad (1.12)$$

док максимални тангенцијални напон износи [1]:

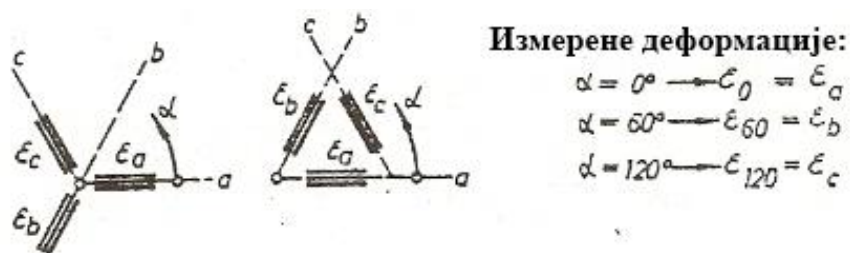
$$\tau_{max} = \frac{E}{2(1 + \mu)} \left(\sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_c)^2 + [2 \cdot \epsilon_b - (\epsilon_a + \epsilon_c)]^2} \right) \quad (1.13)$$

Оријентација угла α у изразу (1.11) зависи од предзнака имениоца и бројиоца [1]. У овим случајевима, величина деформација у правцу главних напона, угао који заклапају главни напони и величина главних напона одређује се према табели 1.2.

Табела 1.2 Углови које заклапају главни напони и величине главних напона [1]				
Именилац	≥ 0	> 0	≤ 0	< 0
Бројилац	> 0	≤ 0	< 0	≥ 0
α	A	$90^\circ - A$	$90^\circ + A$	$180^\circ - A$
	$0 \leq \alpha < 45^\circ$	$45^\circ \leq \alpha < 90^\circ$	$90^\circ \leq \alpha < 135^\circ$	$135^\circ \leq \alpha < 180^\circ$

За розете код којих су мерне траке постављене под углом $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ (слика 1.21), деформације у правцу главних напона су [1]:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad (1.14)$$



Слика 1.17 Мерне траке под углом $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ [1]

Правци главних напона (правац „1“ под углом α према оси a_1 , правац „2“ управно на правац „1“) су [1]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{\sqrt{3} \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2 \cdot \varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \quad (1.15)$$

За траке под углом $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ максимални и минимални нормални напони износе [1]:

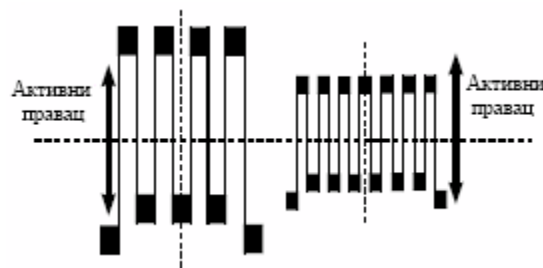
$$\sigma_{1,2} = E \cdot \left[\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3 \cdot (1 - \mu)} \pm \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3} \right)^2 + \frac{1}{3} (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \right], \quad (1.16)$$

док максимални тангенцијални напон [1]:

$$\tau_{max} = \frac{E}{(1 + \mu)} \cdot \sqrt{\left(\varepsilon_a - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_b - \varepsilon_c}{\sqrt{3}} \right)^2}. \quad (1.17)$$

Када је у питању избор материјала за мерне траке, посебни се захтеви постављају премаотпорним жицама, али и према материјалу фолије на коју се жица поставља, као и према материјалу од кога се производи лепак. Материјал фолије мора бити добар изолатор, а углавном се користе синтетички материјали. Највећу примену имају лепкови са хемијским отврдњавањем, који могу бити на бази фенол-формалдехида, акринитрила или вештачких смола. Лепкови који се данас примењују омогућавају отврдњавање за кратко време. За рад на високим температурама користе се керамички лепкови који отврдну на високим температурама. Важно је да лепак буде усклађен са материјалом фолије. Такође, пажњу треба посветити припреми површине објекта на коме се врши мерење, односно месту где се наноси лепак. Површина мора бити чиста, одмашћена и благо храпава (после припреме брусним папиром) [1].

Мерна трака треба да мења отпор само услед напрезања у активном правцу (слика 1.22), односно у правцу у коме се врши мерење. Овај се ефекат редукује променом фолијских мерних трака са попречним ојачањима мреже. У зависности од типа мерне траке и дужине мреже мерне траке, попречна осетљивост мерних трака износи $q < 0,01 \div 0,02$.



Слика 1.22 Истезање мерне траке у активном правцу [3]

Ако је мерна трака оптерећена дуж активног правца, тада је и k – фактормерне траке дефинисан као [3]:

$$k_l = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon_l}. \quad (1.18)$$

Ако је мерна трака оптерећена у попречном правцу, тада је одговарајући k – фактор дефинисан као [3]:

$$k_t = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_t}. \quad (1.19)$$

Из израза (1.18) и (1.19) следи израз за попречну осетљивост мерних трака, q [3]:

$$q = \frac{k_t}{k_l}. \quad (1.20)$$

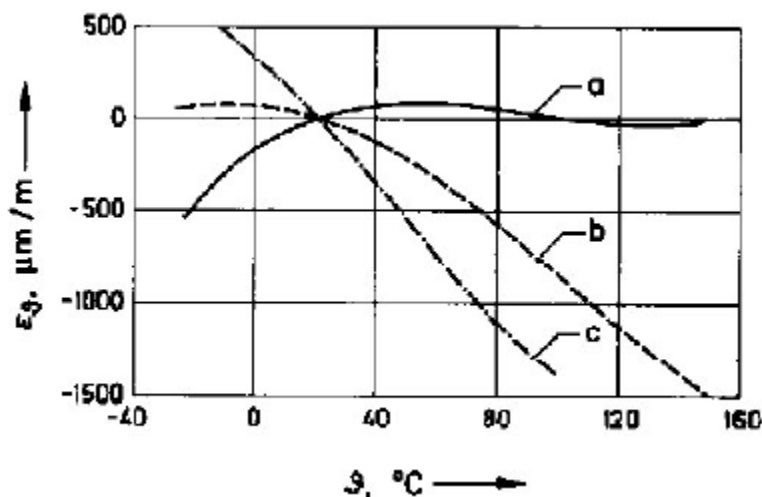
Температурни одзив мерне траке, ε_θ , се рачуна као [1]:

$$\varepsilon_\theta = \left(\frac{\alpha_R}{k} + \alpha_c - \alpha_M \right) \cdot \Delta\theta. \quad (1.21)$$

Као што се може видети, фактори који утичу на температурни одзив мерне траке, ε_θ , су:

- термичко ширење материјала објекта, α_c ,
- термичко ширење самог влакна мерне траке, α_M ,
- температурна промена електричног отпора материјала влакна мерне траке, α_R [3].

Ако су мерне траке са идентичним параметрима постављене на мерне објекте који имају различито термичко ширење, α_c , тада се добијају различите криве ε_θ (слика 1.23). Термичко ширење појединих материјала са дијаграма 1.23 је: алуминијум $\alpha_c = 23 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, челик $\alpha_c = 12 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ и кварц $\alpha_c = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ [1]. Применом специјалних технологија, могуће је мењати температурни коефицијент електричне отпорности материјала жице мерне траке.



Слика 1.23 Температурни одзив мерних трака: алуминијум (a), челик (b), кварц (c) [3]

Мерне траке показују одличне карактеристике при различитим динамичким мерењима:

- имају веома малу масу (непостојање инерцијалних сила),
- не утичу на објекат испитивања и
- у погледу горње граничне фреквенције не постоје ограничења, што значи да мерне траке, када су исправно постављене, прате све динамичке промене на објекту испитивања [3].

Мерне траке су се показале као веома погодне за дуготрајна, динамичка испитивања код великог броја циклуса. Вибрације доприносе повећању електричне отпорности мерне траке, што је познато као динамичко „дрифтовања“ нуле.

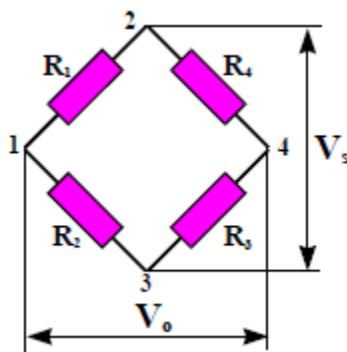
Мерна трака дужине 6 mm, чија мрежа има електрични отпор 120 Ω икоја је прикљученасиметрично мосно коло, даје струју од 20.8 mA. Ова струја, услед екстремно малог попречног пресека мерне траке, производи електрично поље густине 46 A/mm² [3]. Ове појаве доводе до samozагревања мерне траке, а настала топлотна енергија даље се преноси на окружење мерне траке. Одређени параметри имају највећи утицај на рад мерних трака:

- напајање моста,
- електрични отпор мреже мерне траке,
- величина и геометрија мреже мерне траке,
- температура окружења,
- топлотна проводљивост материјала мерног објекта и
- топлотни капацитет материјала мерног објекта [3].

При мерењу електричног отпора најчешће се врши повезивање мерних трака у Витстонов (*Wheatston*) мерни мост, и то:

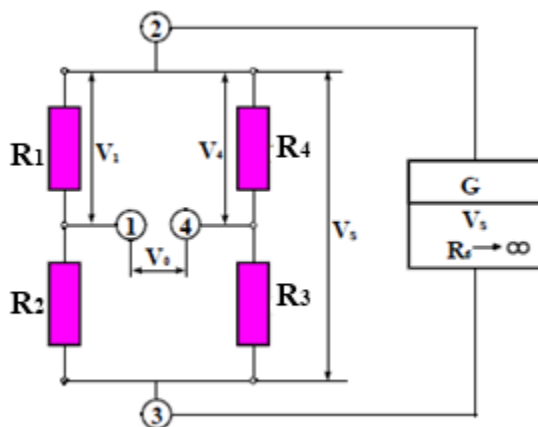
- за мерење апсолутног износа отпора, упоређивањем са већ познатим отпором и
- за мерење релативне промене електричног отпора [3].

Витстонов мерни мост омогућава мерење промене отпора у границама $10^{-4} \div 10^{-7} \Omega/\Omega$ са одличном тачношћу. Формирају се четири гране моста од отпорника R_1 до R_4 (слика 1.24). У тачкама 2 и 3 се спајају гране за напајање моста једносмерним или наизменичним напоном, V_s , док се у тачкама 1 и 4 мери излазни напон, V_o , који представља мерни сигнал.



Слика 1.24 Витстонов (Wheatston) мерни мост [3]

Претпоставља се да је отпоризвора напона занемарљив и да је унутрашњи отпор инструмената за мерење излазног напона веома велики (слика 1.25).



Слика 1.25 Повезивање Витстоновог моста са извором напона и излазним инструментом [3]

Разлика напона на отпорницима R_1 и R_4 представља излазни напон V_o . Изрази за израчунавање напона V_1 и V_4 су следећи [3]:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_s; \quad V_4 = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \cdot V_s. \quad (1.22)$$

Из израза (1.22) може се извести израз за разлику напона [3]:

$$V_o = V_s \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) = V_s \cdot (V_1 - V_4). \quad (1.23)$$

Ако је неизбалансираност мерног моста дефинисана као релативни излазни напон, $\frac{V_o}{V_s}$, добија се [3]:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3}. \quad (1.24)$$

Постоје два случаја када важи да је $V_o = 0$, и то:

1. отпори отпорника у мосту су једнаки: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ и
2. однос отпора у две половине моста је исти: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$.

У оба претходна случаја је $\frac{V_o}{V_s} = 0$ и мост је „избалансиран“.

Ако отпори у мосту мењају своје вредности за одговарајуће ΔR , мост је у неравнотежи и јавља се одговарајући излазни напон, V_o [3]:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_4} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_4 + \Delta R_4 + R_3 + \Delta R_4} \right). \quad (1.25)$$

Због чињенице да је $\Delta R_i \ll R_i$, може се написати следећи израз [3]:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (1.26)$$

Применом израза $\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$, следи [3]:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (1.27)$$

Дакле, излазни сигнал из моста, напон V_o , је функција:

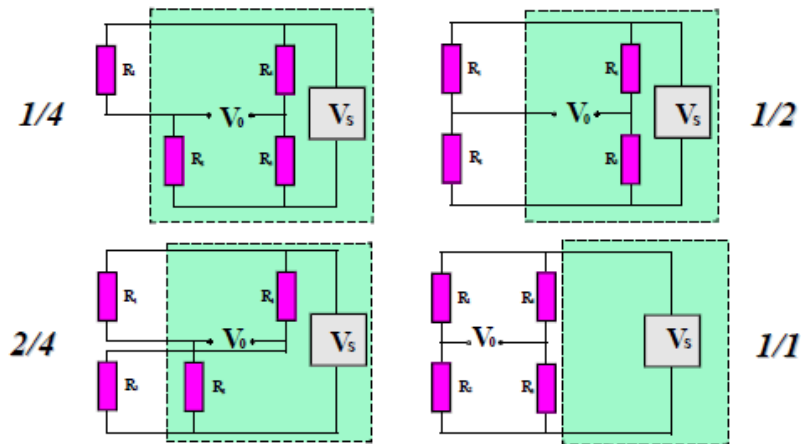
- напона напајања моста, V_s ,
- k – фактора мерне траке и
- релативних деформација мерних трака или промена напона у гранама моста [3].

Ако су деформације у суседним гранама истог знака, оне се одузимају, односно ако су супротног знака, тада се сабирају. Захваљујући томе, постављањем мерних трака у одговарајуће гране моста врши се елиминација разних утицаја.

Да би се од мерних трака направио Витстонов мерни мост користе се:

- активне мерне траке аплициране на објекат испитивања или у оквиру мерног претварача,
- компензационе мерне траке (пасивни елементи који служе за компензацију утицаја температуре или других ефеката) и
- метални (фолијски) отпорници велике тачности и стабилности [3].

Код примене Витстоновог моста за експерименталну анализу напонског стања, само поједине гране моста садрже активне траке (слика 1.26). Остале траке служе за комплетирање мерног моста.



Слика 1.26 Витстонов мост код кога су активне само поједине траке [3]

1.3. Област примене мерних трака

Мерне траке се примењују у изради мерних претварача, као и у експерименталној анализи механичких напона.

Мерни претварачи на бази мерних трака се користе за мерење следећих механичких величина:

- мерење дилатација и напона,
- мерење силе и масе,
- мерење обртног момента,
- мерење притиска,
- мерење померања и
- мерење вибрација [3].

Примена мерних трака код експерименталних испитивања је другачије природе, а користе се за:

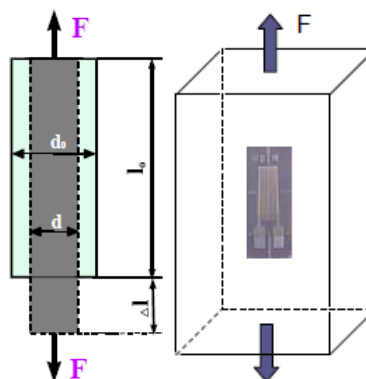
- **Експерименталну анализу механичких напона.** Врши се како би се дошло до информација о механичком оптерећењу, на основу података измерених дилатација на површини структура и компонената, уз податке о карактеристикама материјала. Углавном се одређују главни напони, σ_1 и σ_2 , који представљају екстремне вредности нормалног напона у раванском напонском стању. Они се јављају у правцима који су међусобно управни, а зову се правци главних напона у раванском напонском стању. Циљ мерења је везан за проверу исправности математичких прорачуна модела (нпр. статички прорачуни или метода коначних елемената).

- **Анализа заосталих напона.** Представља мерење напона унутар структуре или компоненте који се јављају без дејства спољашњих сила или момената. Да би се одредили заостали напони применом мерне траке, потребно је променити постојеће напонско стање. Ово је могуће извести бушењем рупе или укопавањем прстена око мерне траке, када долази до локалне релаксације која се мери.
- **Тестови издржљивости, анализа критичне тачке и анализа оптерећења.** Представљају испитивање разних делова и структура, од делова аутомобила преко комплетне носеће конструкције авиона, до преса за обликовање материјала. Не постоји „типична“ апликација ове врсте испитивања, али је јасна област примене мерних трака.
- **Одређивање термичких оптерећења.** Услед слободног температурног ширења које је ограничено, делимично или потпуно, долази до појаве термичког напрезања у материјалу услед промене температуре. Слично као и код заосталих напона, овакви процеси могу довести до оштећења компоненте и смањења носивости према спољашњим оптерећењима. Применом мерних трака могуће је одредити термичка оптерећења [4].

Са аспекта анализе чврстоће, врста напрезања је независна од узрока који до тога доводи. Са аспекта правца деловања, разликујемо следећа напонска стања:

- једноосно (x) $\rightarrow$,
- двоосно (раванско) (x,y) $\rightarrow$,
- троосно (просторно) (x,y,z) $\rightarrow$.

Пример примене мерних трака код мерења једноосног напона приказан је на слици 1.27. У питању је штап оптерећен на истезање-притисак.



Слика 1.27 Пример мерења једноосног напона на штапу:

F – сила, d – активни пречник штапа, d_0 – пречник штапа пре дејства силе ,
 l_0 – дужина штапа, Δl – дилатација [3]

Нормални напон, σ_n , представља количник силе и активне површине [3]:

$$\sigma_n = \frac{F}{A}. \quad (1.28)$$

Релативна деформација се може одредити изразом (2.4), док се попречна релативна деформација може одредити изразом (1.29) [3]:

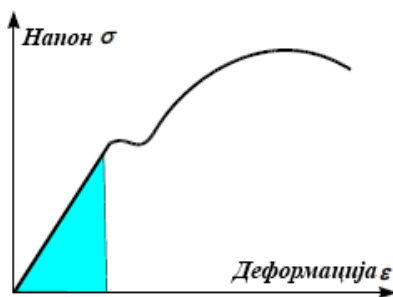
$$\varepsilon_p = \frac{d-d_o}{d_o}. \quad (1.29)$$

Поасонов (*Poisson*) коефицијент представља однос уздужне и попречне релативне деформације [3]:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_n}. \quad (1.30)$$

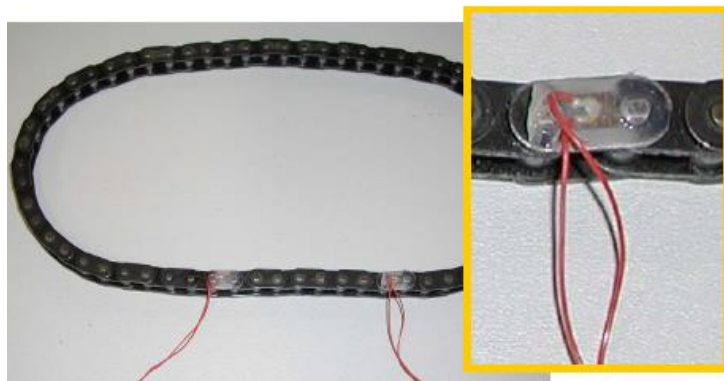
Нормални напон може одредити и преко модула еластичности, E , и Хуковог законаеластичности (слика 1.28) [3]:

$$\sigma_n = E \cdot \varepsilon_n. \quad (1.31)$$



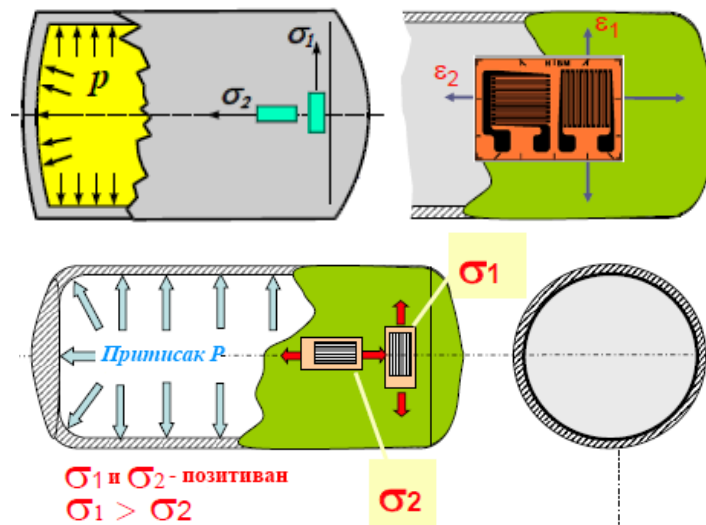
Слика 1.28 Дијаграм затезне чврстоће материјала [3]

Пример примене мерних трака при анализи једноосног стања напрезања је при испитивањукарике ланца на истезање (слика 1.29).



Слика 1.29 Примена мерних трака при испитивању ланца на истезање [3]

Када је упитању мерење двоосног оптерећења, најбољи пример примене мерних трака је код мерења напрезања судова под притиском (слика 1.30), код којих влада раванско напонско стање.



Слика 1.30 Пример мерења двоосног напона на суду под притиском [4]

Код овог мерења, познатису двоосно стање напрезања и правци главних напона, док су непознате вредности σ_1 и σ_2 . Ефекат попречне деформације се рачуна применом проширене верзије Хуковог закона, према једначини (1.32) [3].

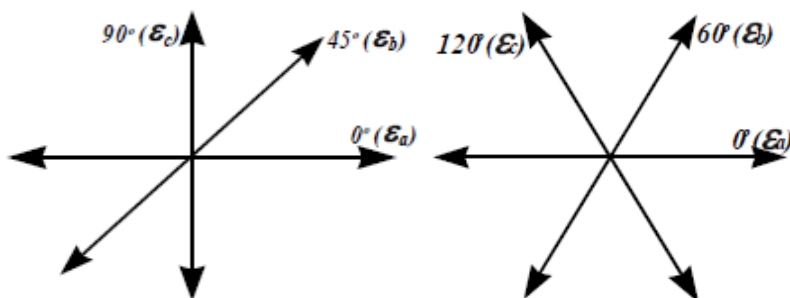
$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\epsilon_1 + \mu\epsilon_2), \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\epsilon_2 + \mu\epsilon_1).\end{aligned}\tag{1.32}$$

Пример розетеза мерење двоосног стања напрезања, када је познат правац главних напона, приказан је на слици 1.31. У питању је $0^\circ/90^\circ$ Т – розета НВМ ХV91.



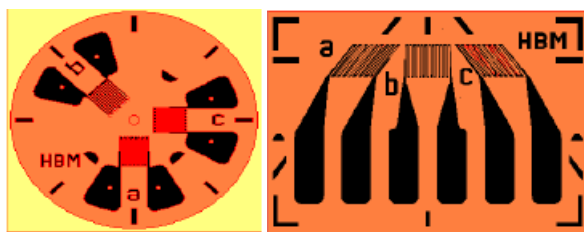
Слика 1.31 Т-розета НВМ ХV91 за мерење двоосног напрезања [3]

У случају да објекат испитивања има комплексну геометрију или оптерећење, мерење деформација се врши у три различита правца, за сваку мерну тачку ($\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$) (слика 1.32). Ово се изводи коришћењем специјалних мерних трака у облику розета.



Слика 1.32 Мерење оптерећења у различитим правцима мерним тракама ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$ и $0^\circ/60^\circ/120^\circ$) [3]

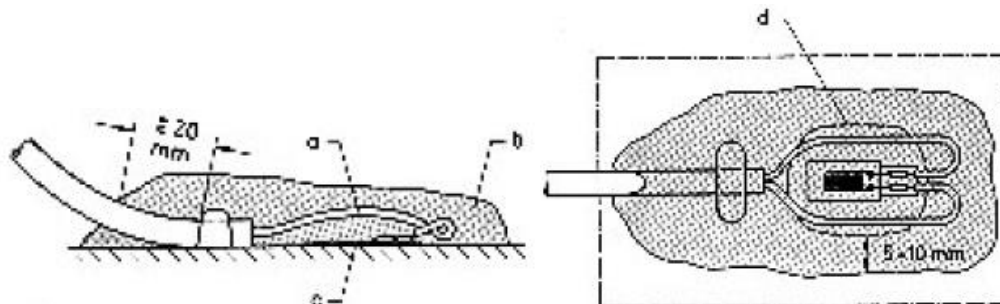
На слици 1.33 приказане су мерне траке – розете произвођача НВМ (серије Y). Користе се за мерења код непознатих главних праваца (правца деловања главних напона).



Слика 1.33 Розете фирме НВМ: лево – розета са три мерне траке RY3x-3/120, десно – минијатурна розета RY81-0,6/120 [3]

1.4 Постављање мерних трака и одређивање мерних места

Везивање мерних трака на мерни објекат се врши лепљењем, уз употребу различитих везивних материјала и захтева велику пажњу. На слици 1.34 приказан је пример постављања мерних трака на мерно место.



Слика 1.34 Постављање мерних трака на мерни објекат: *a* – мерна трака, *b* – восак, *c* – мерни објекат, *d* – лепак [3]

Мерна места се одређују у зонама мерног објекта, где се очекују максимални напони. Зоне максималног напона одређују се на основу искуства или претходног прорачуна (прорачун се не врши код рутинских мерења, са више понављања). Да би се добио дијаграм расподеле напона, неопходно је расподелити више мерних трака дуж мерног елемента.

Материјали који се користе за лепљење мерних трака могу бити:

- хладно везујући лепкови,
- лепкови који се везују на топлотом,
- керамички гит,
- везивање тачкастим заваривањем [3].

Процес постављања мерних трака укључује:

- чишћење (механичко, хемијско),
- везивање (различитим лепковима),
- лемљење (контрола температуре помоћу терминала за лемљење),
- проверу (визуелну, отпора изолације) и
- заштиту (механичко-хемијску) [3].

Пре приступања лепљењу мерне траке, мерна површина се мора одмастити. За ту сврху примењују се ацетон, бензол или тетрачлор-угљеник. Место на коме се поставља мерна трака мора бити и детаљно механички очишћено (грубим и финим брусним папиром). Као средство за лепљење примењују се лепкови на бази целулозе и вештачких смола. За њихово сушење неопходно је најмање 24 h, уз постепено повећање напрезања. За лепкове од вештачких смола довољно је неколико сати за сушење на температури околине.

Лепак се мора наносити у танком слоју на површину или мерну траку или на обе површине. Затим се мерна трака поставља на мерно место и притисне папиром за упијање и покупи вишак лепка притиском на траку. Врхом прста се врши потискивање мерне траке ка њеним крајевима. Сушење се врши у времену које је прописао произвођач и према врсти примењеног лепка.

Залепљене мерне траке повезују се према усвојеној шеми, у зависности од тога да ли је примењен пун мост или полу-мост. Након тога се место где је лепљена мерна трака налива воском, одређеном врстом смоле или прекрива траком, како би се мерна трака заштитила од утицаја влаге. Зависно од врсте испитивања, мерне траке могу бити заштићене и од механичких оштећења.

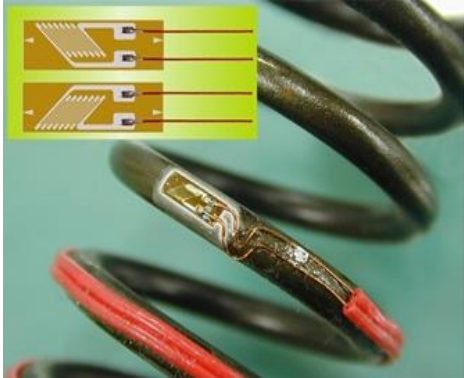
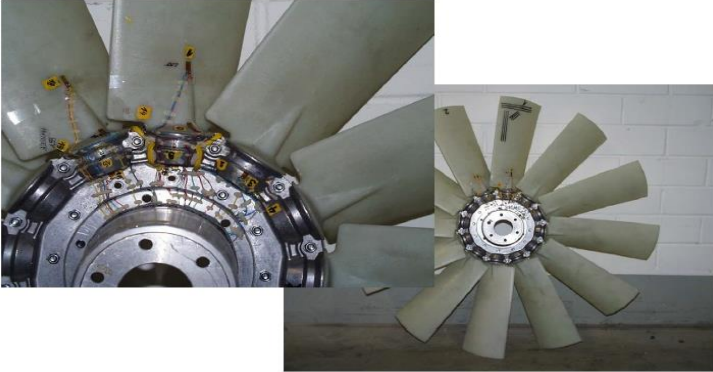
2. Примери примене мерних трака код испитивања моторних возила

Мерне траке су нашле велику примену и у испитивању моторних возила. Између осталог, користе се за испитивање многих делова и склопова возила, што је илустровано у табели 2.1.

Табела 2.1 Примена мерних трака у испитивању моторних возила [8]

Мерење силе улежиштења код котрљајног лежаја	
Мерење оптерећења на педали кочнице возила	
Мерење напона на наплатку точка	

Табела 2.1 Примена мерних трака у испитивању моторних возила [8]

Мерење оптерећења на завојној опрузи система еластичног ослањања	
Мерење сила у елементима система ослањања возила	
Мерење оптерећења у унутрашњости пнеуматика	
Постављање мерних трака на вентилатору теретног возила	

У наставку рада биће описано коришћење мерних трака на конкретним примерима испитивања елемената и система моторних возила.

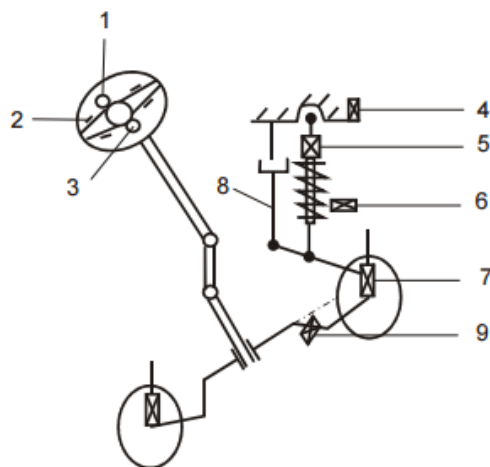
2.1. Мерење радних оптерећења система за управљање моторних возила применом мерних трака

Величине које карактеришу радна оптерећења система за управљање су:

- обртни момент на вратилу точка управљача,
- силе у спонама,
- углови заокретања точка управљача (управљачких точкова),
- обртни момент који делује на око осовинице рукавца точка (односно момент савијања полуга за заокретање точкова) и
- момент савијања рукавца точка [9].

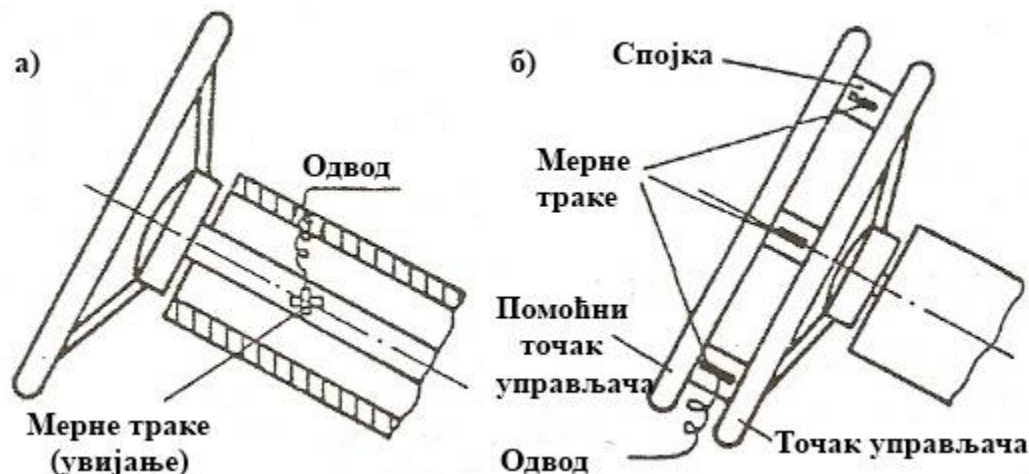
Када се у систему за управљање налази и неки појачавач силе (хидраулично или неко друго серво-појачало), као мерне величине радних оптерећења треба узети у обзир и радни притисак и радну температуру флуида, као и радно време погонског елемента (пумпа или компресор, а код савремених уређаја и електро-појачивач). Код ових елемената треба познавати оптерећење, учестаност укључивања (зависно од врсте система), а по потреби и температуру флуида на излазу погонског елемента и др.

При идентификацији радних оптерећења система за управљање користе се разни типови мерних трака, у зависности од врсте оптерећења и мерног места. Експериментални систем за истовремено испитивање неких радних оптерећења система за управљање и система еластичног ослањања моторног возила приказан је на слици 2.1.



Слика 2.1 Експериментални систем за испитивање радних оптерећења система за управљање и система еластичног ослањања са давачима на бази мерних трака: 2 – давач момента заокретања точка управљача, 5 – давач силе на клипњачи амортизера, 6 – давач силе у опрузи ослањања и 9 – давач силе на спони система за управљање [9]

Мерење обртног момента на вратилу точка управљача се може вршити на више начина и релативно једноставно. Препоручује се да се мерном инсталацијом не утиче на управљање, тј. држање точка управљача (слика 2.2 а). Ипак, због лакше уградње, понекад се употребљавају и адаптациони уређаји (слика 2.2 б).



Слика 2.2 Мерење обртног момента на вратилу точка управљача: а) без адаптационих уређаја, б) са адаптационим уређајима [9]

Динамометарски точак управљача Лабораторије за моторна возила Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу садржи (слика 2.3):

- епрувете са мерним тракама за мерење момента заокретања точка управљача (четири активне траке које мере момент савијања епрувете) и
- обртни потенциометар PVG 100 за мерење угла заокретања точка управљача [6].



Слика 2.3 Динамометарски точак управљача (лево) и детаљи динамометарског точка управљача (десно): а – зупчаник на вратилу потенциометра за мерење угла заокретања точка управљача и, б – епрувете са мерним тракама за мерење момента заокретања точка управљача [9]

Мерне траке за мерење момента заокретања точка управљача постављене су на мерној епрувети динамометарског точка управљача (слика 2.3 лево – позиција b). Четири мерне траке (по две са обе стране стуба управљача) повезане су у пун Витстонов мост и прикључене на мерно-појачавачки мост. Мерне траке мере напон савијања епрувете који представља меру напрезања стуба управљача на увијање при заокретању точка управљача.

При мерењу сила и момената који делују на рукавац точка, полуге за заокретање и споне (код независног система ослањања и оптерећења греде предњег моста, тј. механизма за вођење точкова), најпогодније је коришћење мерних трака.

У случају мерења оптерећења на спонама система за управљање могу се користити мерне траке у виду розета. На слици 2.4 приказана је спона путничког возила на коју су постављене две розете (1 – активна, 2 – компензациона). Розете су залепљене на мерним местима у складу са правилима за припрему мерних површина и лепљење мерних трака. Након лепљења, розете су заштићене од механичких утицаја (слика 2.4 десно), применом изолационе траке.



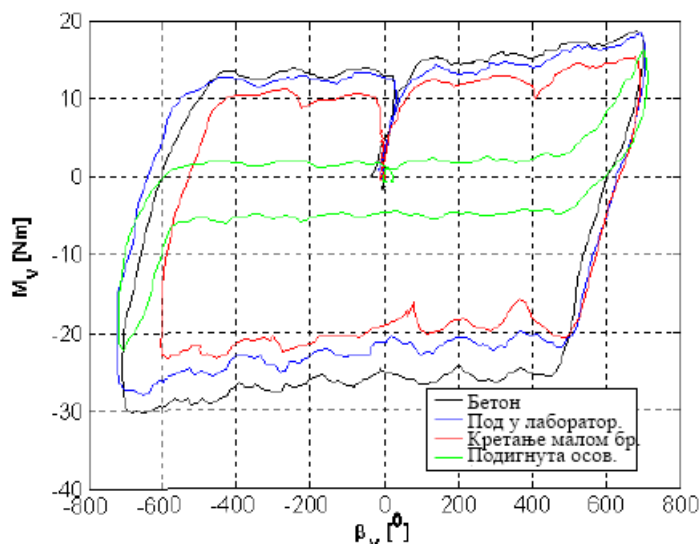
Слика 2.4 Спона возила са мерним тракама: лево - 1 – активна розета, 2 – компензациона розета, десно – заштита розете од спољашњих утицаја [9]

По једна активна и једна компензациона мерна трака са розета везују се у Витстонов полу-мост и формирају један канал мерно-појачавачког моста. Дакле, информације о напрезању споне добијају се преко три полу-моста, односно са три канала мерно-појачавачког моста. Применом одговарајућих образаца, добијају се вредности главних нормалних напона σ_1 , σ_2 и тангенцијалног напона, τ_{xy} , у произвољном правцу x под углом α у односу на главни правац, на месту лепљења активне розете [9]:

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2}, \quad (2.1)$$

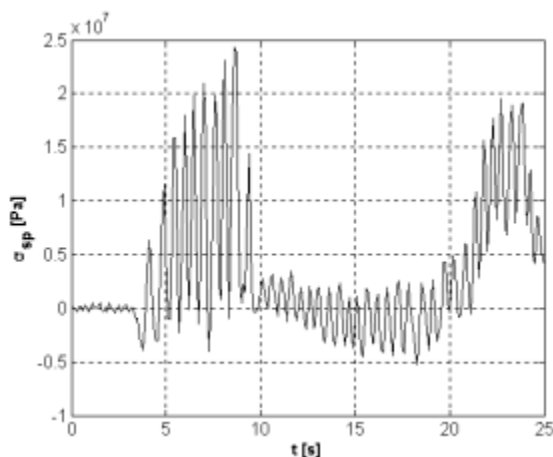
$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin 2\alpha. \quad (2.2)$$

На слици 2.5, приказан је дијаграм са карактеристичним записима момента заокретања у функцији угла заокретања точка управљача у режиму заокретања точка управљача „неутралан положај – пун леви заокрет – пун десни заокрет – неутрални положај“. На дијаграму су приказани резултати мерења на више различитих подлога, као и са подигнутим предњим управљачким точковима, када се мери момент потребан за савладавање трења у систему за управљање.



Слика 2.5 Дијаграм зависности момента заокретања од угла заокретања точка управљача [9]

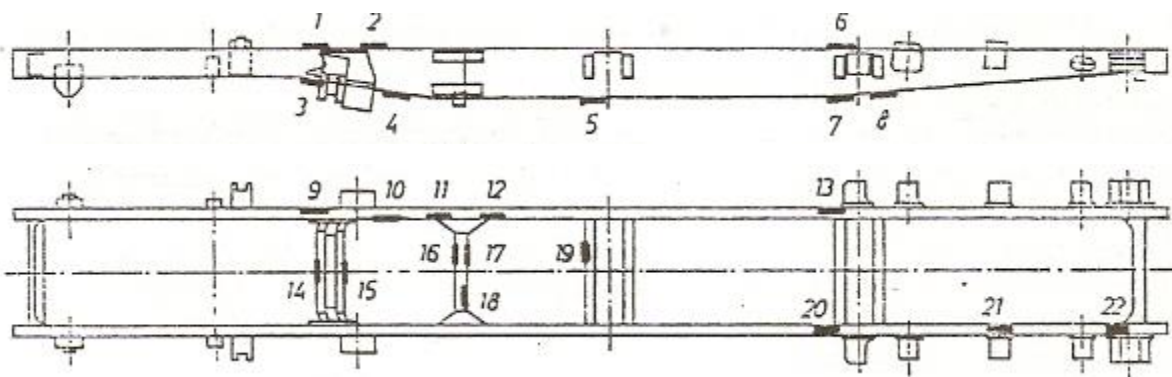
Слика 2.6 приказује се истовремено снимљен нормални напон у спони, измерен при истом режиму заокретања точка управљача.



Слика 2.6 Дијаграм зависности нормалног напона у попречном пресеку споне [9]

2.2. Мерење оптерећења на носећој структуримоторних возила применом мерних трака

Оптерећења носећих структура, каросерије и кабине возила, могу бити по свом карактеру веома сложена при експлоатационим условима. Основни проблем приликом њиховог мерења представља избор мерног места. Неопходно је одабрати место где се јављају максимални напони. Како би се добили поуздани резултати, неопходно је изабрати одређеном методом главне правце напона на карактеристичним местима. Примена премаза од крутог лака или метода фотоеластичности могу дати добре и прихватљиве резултате. Сама мерења радних оптерећења могу се вршити применом мерних трака, најчешће розета. На слици 2.7 шематски је приказано мерење радних оптерећења на оквиру – шасији теретног возила.



Слика 2.7 Постављање мерних трака приликом мерења оптерећења на шасији возила [1]

Ради познавања оптерећења носеће конструкције возила, није довољно само непосредно мерити напон, већ је неопходно и мерење сила које се преносе преко еластичних ослонаца и других делова. Зато је потребно ова испитивања повезати са испитивањима других система и склопова возила (система еластичног ослањања, точкова и пнеуматика и др.). Поред тога, потребно је познавати и масе погонског агрегата и других елемената који се везују за носећу конструкцију, као и одговарајуће динамичке силе које изазивају оптерећења. Још је неопходно мерити и убрзања појединих агрегата у односу на прикључна места на носећој конструкцији. Иначе, оваква мерења су прилично сложена и захтевају примену великог броја давача, као и велику пажњу при обради резултата.

На слици 2.8, приказана је мерна инсталација за мерење угла увијања шасије теретног моторног возила уз помоћ мерних трака. Као што је приказано, мерење увијања шасије се посредно обавља мерењем напрезања на увијање подужног штапа, чија су оба краја везана за подужне носаче шасије.



Слика 2.8 Мерна инсталација при мерењу угла увијања шасије теретног моторног возила [1]

На слици 2.9 приказана је мерна инсталација за мерење напрезања на торзију каросерије путничког возила развијена на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Методологија мерења еластичне торзионе деформације каросерије заснива се на мерењу угаоног заокретања предњег дела возила у односу на задњи део и укључује примену давача торзионих деформација са мерним тракама постављеног на крову каросерије.



Слика 2.9 Мерна инсталација за мерење торзије каросерије са мерним тракама [9]

Давач торзионих деформација састоји се од два попречно постављена носача (причвршћени стегама за олук крова). На средини торзионог штапа залепљене су мерне траке по углом од 45° у односу на осу штапа и повезане су полу-мост. Излази из мерних трака повезани су на мерно-појачавачки мост НВМ KWS/6T-5, који се повезују са А/Д конвертором и рачунаром. При настанку еластичне деформације настаје одговарајућа угаона деформација торзионог штапа. Торзиона напрезања, настала увијањем штапа преносе се на мерне траке, а читају се на појачавачу или снимају на датотеке на рачунару.

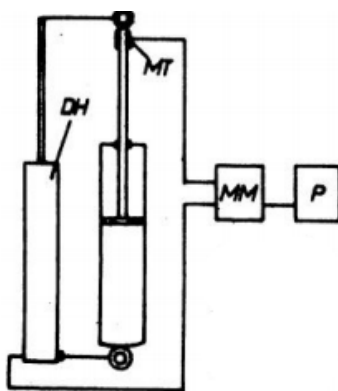
2.3. Мерење радних оптерећења система еластичног ослањања моторних возила мерним тракама

При мерењу радних оптерећења система еластичног ослањања, испитују се следеће карактеристичне мерне величине:

- реактивна сила нормална на раван пута коју прима еластични ослонац,
- ход еластичног ослонца,
- ход пригушивача (амортизера),
- сила пригушивања (зависно од брзине осциловања),
- укупан рад силе пригушења,
- подужне и бочне реактивне силе које примају еластични ослонци – гибњеви или механизам за вођење точкова,
- силе и ходови стабилизатора, итд. [9]

Применом мерних трака, мерење силе у металном еластичном ослонцу и стабилизатору, може се остварити релативно лако. Исто важи и за мерење свих других реактивних сила и њихових момената. Код пнеуматичких и хидро-пнеуматичких ослонаца, погодно је користити индуктивни давач притиска. Мерење силе коју примају ослонци најлакше је остварити посредно, мерењем силе или момента савијања на вођици преко које се сила преноси на ослонац.

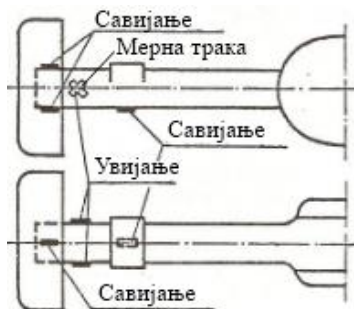
Радијално оптерећење амортизера је сложено, а посебно сложено је мерење рада које изврши пригушивач, што представља једну од најзначајнијих величина која карактерише његово радно оптерећење. На слици 2.10, шематски је приказано мерење силе на клипњачи амортизера помоћу мерних трака, као и његовог хода. Рад пригушивача се накнадно рачуна на основу добијених записа. На основу промене хода током времена одређује се брзина осциловања. За ово је најприкладније користити одговарајућу рачунарску јединицу, јер је обрада резултата испитивања врло сложена и захтева доста времена.



Слика 2.10 Одређивање радних оптерећења амортизера: *P* – писач, *MT* – мерне траке, *MM* – мерни мост, *DH* – давач хода [1]

2.4. Мерење оптерећења погонских полувратила и точкова моторних возила применом мерних трака

Код погонских полувратила важно је познавати торзиона и нормална оптерећења. Ако се ради о растерећеним системима, корисно је вршити мерење и различитих напонских стања на кућишту погонског моста. На слици 2.11 шематски је приказано једно од решења у склопу мерења торзионих и нормалних оптерећења погонског моста.

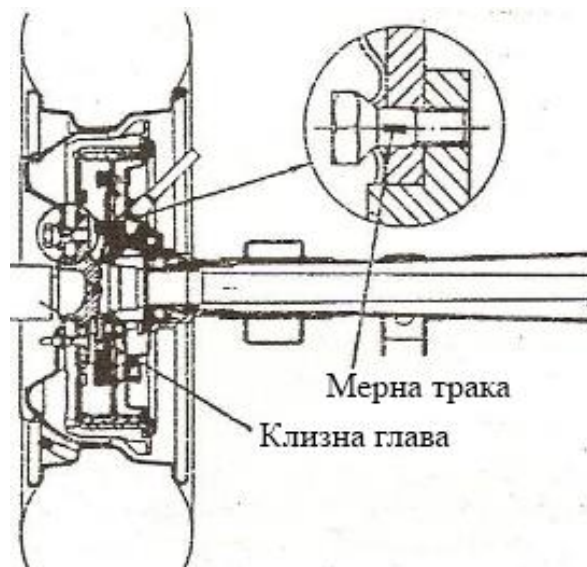


Слика 2.11 Шематски приказ мерења торзионих и нормалних оптерећења на погонском мосту [1]

Поред наведених мерних величина, ради испитивања оптерећења система за пренос снаге понекад се врши мерење сила на систему за промену степена преноса – мењачком преноснику. На пример, испитује се разлика бројева обртаја вратила која се укључују променом степена преноса (оптерећење синхро-спојница и других механизма ове врсте). У случају да се на возилу налази систем са аутоматском променом степена преноса, мерењем треба да се обухвате и друге величине, као што су радни притисци флуида и његова температура.

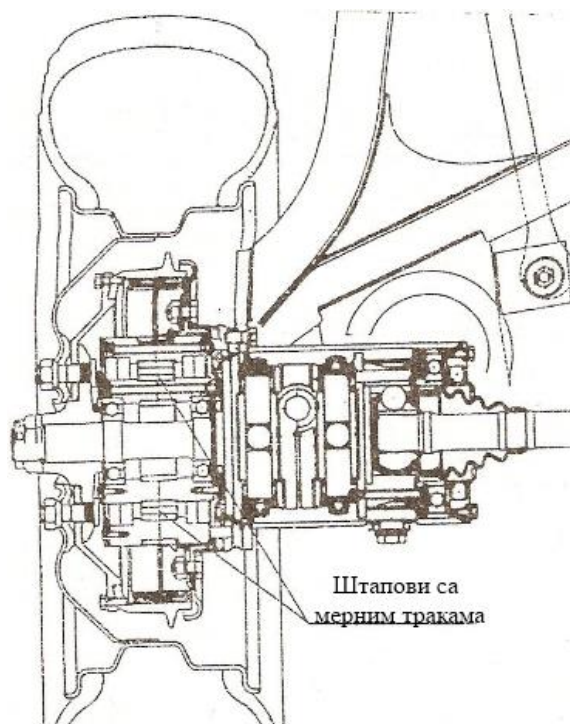
Током експлоатације, радна оптерећења точкова и пнеуматика су веома сложена. Потичу од сила и момената који се јављају у контакту точак – подлога. Мерење утицајних величина је сложеније, уколико је обухваћен већи број ситуација. Оптерећење точкова може се одредити мерењем следећих величина: радијалне и бочне деформације пнеуматика, напонских стања на површинама диска точка, силе у завртњевима које везују точак и главчину и температуре пнеуматика.

Мерење деформације пнеуматика је релативно сложен проблем, а врши се применом посебних давача. На једноставан начин могу да се мере напонска стања на диску точка (мерним тракама – розетама), као и силе у завртњевима, помоћу мерних трака (слика 2.12).



Слика 2.12 Мерење силе у завртњевима које везују точак и главчину [1]

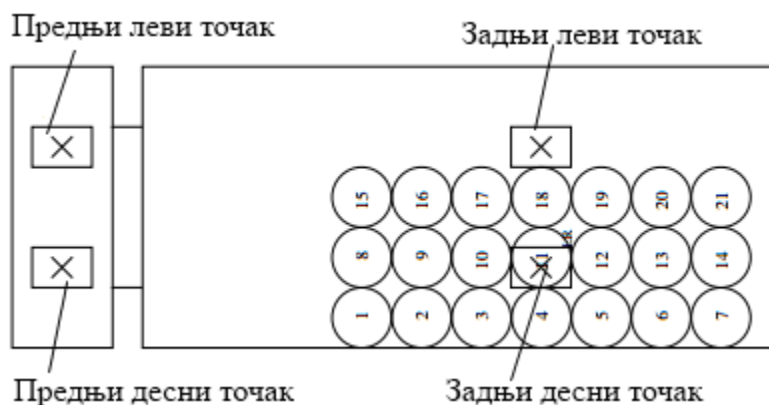
Комплетна слика оптерећења која делују на точак и пнеуматик може се добити применом посебних адаптационих уређаја. На слици 2.13, приказана је једна оваква инсталација.



Слика 2.13 Мерење силе у завртњевима које везују точак и главчину применом посебних адаптационих уређаја [1]

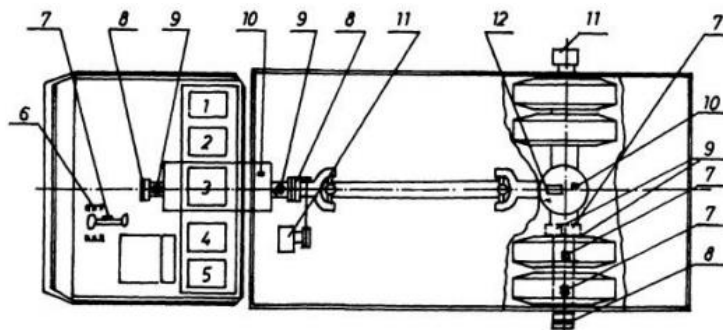
2.5. Примена мерних трака при мерењу масе терета и оптерећења преносника снаге код теретних моторних возила

Највећи проблем код теретних моторних возила је преоптерећење, што за последицу има тешко и дуго кочење. Зато се врши аутоматско мерење терета применом мерних трака. На тај начин, возачи и контролори могу пратити терет возила, као и оптерећење током експлоатације. Мерне траке се постављају на елементе система, тако да се на основу излазних резултата измерених на сваком месту појединачно израчунава максимална носивост возила. Овај систем мерења одликује једноставна инсталација, висока прецизност и ниска цена, а као извршни елемент примењују се мерне траке које се постављају на лиснату опругу сваког точка појединачно. На слици 2.14 приказана је шема теретног моторног возила, код кога је оптерећена само једна страна возила (задњи леви точак), односно места постављања мерних трака.



Слика 2.14 Позиције мерних трака на систему ослањања теретног возила [10]

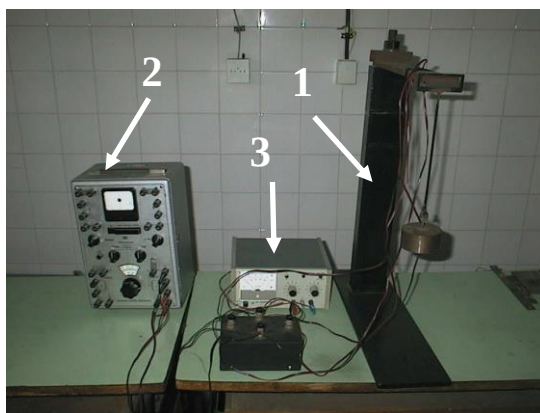
На слици 2.15, приказана је шема опитне инсталација за испитивање експлоатационих услова режима оптерећења преносника снаге теретног моторног возила, која садржи и мерне траке као даваче. Мерне инсталације путничких и теретних моторних возила разликују се само у односу на мерна места. Код теретног возила, део инсталације се поставља на товарни сандук, а део у кабину. У неким случајевима, погодније је код теретних возила све инструменте поставити у посебну кабину на товарном сандуку.



Слика 2.15 Шема путне опитне инсталације за мерење радних оптерећења преносника снаге код теретних моторних возила: 1 – термо-компензациони мост, 2 – импулно бројило, 3 – класификатор, 4 – писач, 5 – појачала, 6 – давачи импулса (степен преноса), 7 – мерне траке за савијање, 8 – клизне главе, 9 – мерне траке за момент, 10 – термопарови, 11 – тахогенератори, 12 – мерења времена рада диференцијала [9]

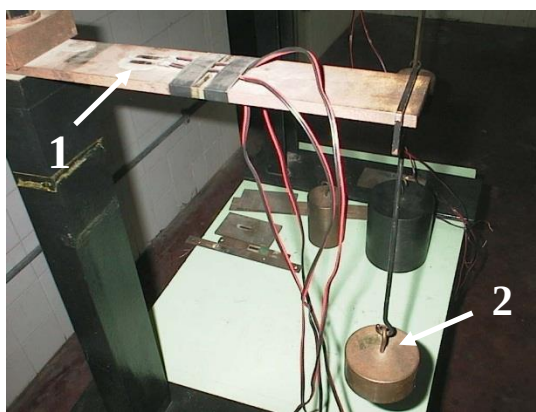
3. Мерење напона савијања на лабораторијском моделу помоћу мерних трака

Лабораторија за моторна возила Факултета инжењерских наука поседује једноставан лабораторијски модел за мерење напона савијања уз помоћ мерних трака и одговарајући мерни ланац, слика 3.1. Као уређај за мерење релативних напрезања мерних трака користи се мануелни компензатор НВМ МК (позиција 2 на слици 3.1). Алтернативно се може користити и мерно-појачавачки мост НВМ UPM60. Мануелни компензатор се напаја једносмерном струјом напона 9V, коју обезбеђује претварач наизменичног, мрежног напона у једносмерни напон (позиција 3 на слици 3.1).



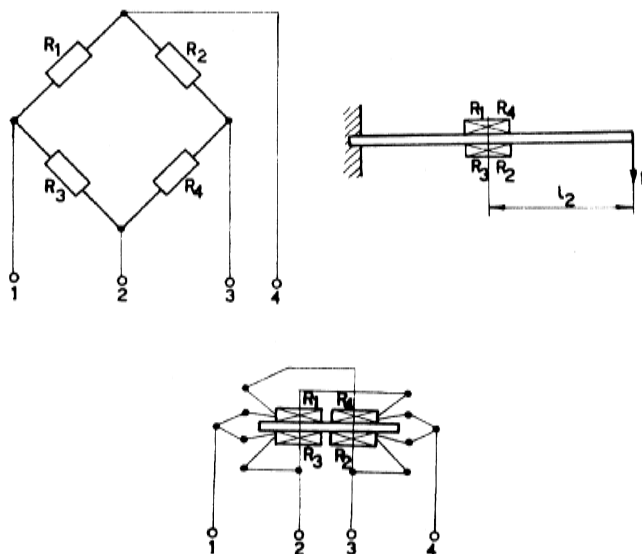
Слика 3.1 Лабораторијски уређај за мерење напона савијања и одговарајући мерни ланац:
1 – лабораторијски уређај са мерним тракама, 2 – мануелни компензатор НВМ МК за мерење релативних деформација, 3 – претварач наизменичног у једносмерни напон од 9 V

На конзолу израђену од челика, налепљене су 4 активне мерне траке (позиција 1 на слици 3.2). Оптерећење од момента савијања се остварује деловањем тежине тега (позиција 2 на слици 3.2).



Слика 3.2 Детаљ постављања мерних трака и обезбеђења оптерећења на лабораторијском уређају за мерење напона савијања

Мерне траке R1 и R4 су налепљене са горње стране конзоле и изложене су током мерења напрезању услед истезања, а мерне траке R2 и R3 са доње стране конзоле и изложене напрезању од сабијања. Све четири траке суповезане у пун Витстонов мост према распореду приказаном на слици 3.3. Као што се може видети, мерне траке изложене истој врсти напрезања (истезање, сабијање) повезане су у супротне гране Витстоновог моста. Ако се овај распоред не би испоштовао и мерне траке изложене истој врсти напрезања повезале у суседне гране моста, очитавања са моста не би постојала.



Слика 3.3 Повезивање мерних трака у пун Витстонов мост [11]

Тежина тега масе, m , представља силу, $F = mg$, која оптерећује мерне траке на мерном месту, моментом савијања, M_f :

$$M_f = Fl_2 \quad (3.1)$$

где је l_2 - крак дејства силе F . Напон савијања у попречном пресеку конзоле на месту залепљених мерних трака пропорционалан је сили износи:

$$\sigma_{teor} = \frac{M_f}{W_x} = \frac{F \cdot l_2}{\frac{b \cdot h^3}{6}} = \frac{6 \cdot l_2}{b \cdot h^3} \cdot F \quad (3.2)$$

где су: $W_x = \frac{b \cdot h^3}{6}$ – отпорни момент правоугаоног попречног пресека конзоле, ширине, b , и висине, h .

Са друге стране, нормални напон услед савијања који се мери уз помоћ мерних трака, одређује се на основу Хуковог закона и израза:

$$\sigma_{MT} = \frac{1}{n} E |\varepsilon_1 - \varepsilon_0|, \quad (3.3)$$

где су: n – број активних мерних трака, $E = 2.1 \cdot 10^{11} \frac{N}{m^2}$ – модул еластичности, ε_1 – очитана релативна деформација после оптерећења конзоле тегом и ε_0 – почетна вредност релативне деформације очитана на компаратору када конзола није оптерећена на свом крају теговима.

Релативна грешка мерења нормалног напона у односу на теоријски прорачунате вредности може се израчунати на основу израза:

$$\delta_\sigma = \frac{|\sigma_{teor} - \sigma_{MT}|}{\sigma_{teor}} \cdot 100, \% \quad (3.4)$$

Планом експеримента је предвиђено да се изврше три мерења, за три вредности масе тегова: 2 kg, 3 kg и 10 kg. Такође, предвиђено је да се подаци, резултати мерења и одговарајућих прорачуна прикажу табеларно и дијаграмски. Образац табеле за попуњавање је дат у Табели 3.1:

Табела 3.1 Образац табеле за попуњавање података са мерења			
m , kg	2	3	10
$F = mg$, N			
ε_1 , $\mu m/m$			
$\sigma_{MT} = \frac{1}{n} E \varepsilon_1 - \varepsilon_0 $, Pa			
$\sigma_{teor} = \frac{M_f}{W_x}$, Pa			
$\delta_\sigma = \frac{ \sigma_{teor} - \sigma_{MT} }{\sigma_{teor}} \cdot 100 \%$			

4. Приказ и анализа резултата мерења напона савијања помоћу мерних трака

Непосредно пре почетка мерења, одређене су и измерене величине потребне за теоријски прорачун вредности напона савијања на лабораторијском моделу:

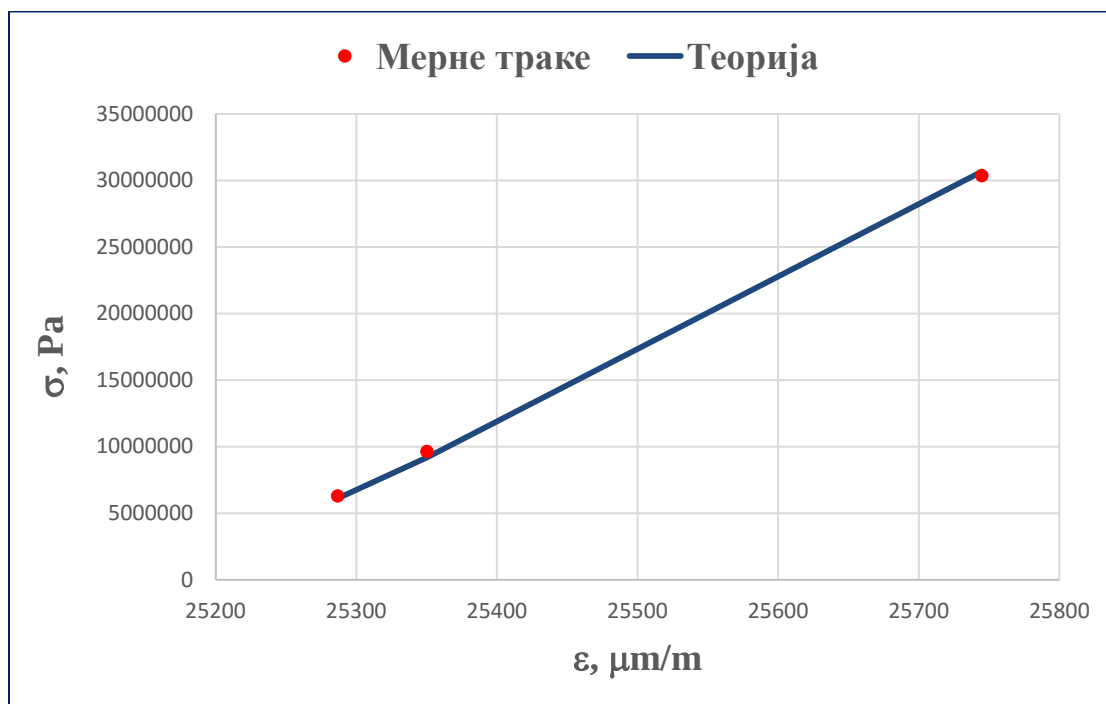
- Број активних мерних трака: $n = 4$
- Почетно читавање мануелног компензатора: $\varepsilon_0 = 25167 \mu m/m$
- Ширина попречног пресека конзоле: $b = 60 mm$
- Висина попречног пресека конзоле: $h = 8 mm$
- Крак на коме делује тежина тега: $l_2 = 200 mm$

У Табели 4.1 су приказане израчунате вредности сила, вредности измерених релативних деформација, израчунате вредности напона савијања, као и израчунате релативне грешке мерења у односу на теоријске вредности.

Табела 4.1 Табеларне вредности резултата мерења и прорачуна			
m , kg	2	3	10
$F = mg$, N	19.62	29.43	98.1
$\varepsilon_1, \mu m/m$	25287	25350.5	25745
$\sigma_{MT} = \frac{1}{n} E \varepsilon_1 - \varepsilon_0 $, Pa	$6.3 \cdot 10^6$	$9.63375 \cdot 10^6$	$30.345 \cdot 10^6$
$\sigma_{teor} = \frac{M_f}{W_x}$, Pa	$6.13125 \cdot 10^6$	$9.196875 \cdot 10^6$	$30.65625 \cdot 10^6$
$\delta_\sigma = \frac{ \sigma_{teor} - \sigma_{MT} }{\sigma_{teor}} \cdot 100 \%$	2.75	4.75	1.01

Упоредни приказ измерених напона савијања уз помоћ мерних трака и теоријских напона савијања конзоле дат је у оквиру дијаграма на слици 4.1.

Израчунате вредности релативних грешака мерења напона савијања конзоле уз помоћ мерних трака су мање од 5% за све случајеве оптерећења, што значи да је постигнута довољна тачност мерења при употреби конкретног лабораторијског модела.



Слика 4.1 Поређење резултата мерења напона савијања конзоле са теоријским вредностима

Закључак

Примена мерних трака у савременим испитивањима је готово незаобилазна, а обухвата области од аутомобилске индустрије, авио-индустрије, преко разних технолошких поступака, па све до медицине. Најчешће се употребљавају при мерењу оптерећења, односно мерењу дилатација. Оно што их одликује јесте једноставност, релативно лака примена, не толико сложена мерна инсталација, као и добра поузданост.

Као што је изложено у раду, када су у питању испитивања моторних возила, мерне траке, такође, имају веома широку примену. Између осталог, користе се при мерењу физичких величина на деловима и склоповима возила, као што су: каросерија, носећа структура – шасија, систем управљања, систем преноса снаге, систем еластичног ослањања, точкови и др.

Код савремених мерења, све се чешће мерне траке користе за прављење давача, како би детектовали деформацију специјалног опружног тела која настаје услед оптерећења. Настало оптерећење може бити маса, сила, момент или притисак. Мерни опсег давача тежине, односно мерне ћелије може бити од неколико грама до неколико стотина тона. Иначе, мерни опсег давача на бази мерних трака није условљен самом мерном траком, већ дизајном и крутошћу тела давача.

Од техничких карактеристика мерних трака зависи и област њихове примене, односно место и услови њихове примене. У зависности од физичке величине која се мери и утицајних фактора зависи и који ће тип мерне траке бити примењен. Када објекат мерења има комплексну геометрију, мерење деформација се врши у три различита правца за сваку мерну тачку. Тада се примењују специјална извођења мерних трака тзв. розете.

Поред мерења оптерећења, мерне траке се још примењују и при испитивању термичких оптерећења, заосталих напона, при спровођењу тестова издржљивости одређених елемената и др.

При мерењу напона савијања, момента и других оптерећења, неопходно је извршити њихово повезивање са мерно-појачавачким уређајем. То повезивање је у виду Витстоновог мерног моста, а повезивање се врши у $\frac{1}{4}$ моста, $\frac{1}{2}$ моста или пун мост.

При постављању мерних трака, треба поштовати процедуру и очистити површину на коју се поставља мерна трака, како би се оне што боље залепиле, а затим сачекати да лепак осуши и мерну траку налити воском како би се заштитила од спољних утицаја. Тек када се испоштује целокупна процедура припреме мерног места и лепљења мерних трака, може се приступити мерењу. При анализи резултата мерења треба узети у обзир и евентуалне грешке мерења.

Литература

1. Тодоровић, Ј.: „Испитивање моторних возила“; Машински факултет, Београд, 1979.
2. Барјактаровић, М.: „Физичко-техничка мерења: Мерење силе, напрезања и момента“, скрипта у електронском облику, Електротехнички факултет у Београду – Одсек за физичку електронику, 2008., доступно на: <http://nobel.etf.bg.ac.rs/studiranje/kursevi/of3ftm/> приступљено 25.1.2016.
3. Личен, Х.: „Мерење механичких величина – примена мерних трака“, презентација у електронском облику, преузето са: http://www.pomacom.unze.ba/pdf/02_merne%20trake%20%20eksp.anal.nap.stanja/01_Merne%20trake_PPT.pdf, приступљено 26.1.2016.
4. Личен, Х., „Историја и области примене мерних трака“, 14.12.2009., преузето са: <http://mehatronika.gomodesign.rs/istorija-i-oblasti-primene-mernih-traka/>, приступљено 31.1.2016.
5. TRCpro, техничко развојни центар, *Мерне траке*, преузето са: <http://www.trcpro.rs/proizvodi/merne-trake-i-pribor/merne-trake.html>, приступљено 21.3.2016.
6. HBM, measure and predict with confidence, *Strain gauges or piezoelectric sensors*, преузето са: <http://www.hbm.com/en/3215/strain-gauges-or-piezoelectric-sensors/>, приступљено 21.3.2016.
7. Пиезо ефекат и његова примена, преузето са: <http://www.trcpro.rs/dokumentacija/PDF/clanci/PiezoTehnologija.pdf>, 21.3.2016.
8. Милорадовић, Д., Радоњић, Р.: „Испитивање МВМ“, скрипта у електронском облику, Факултет инжењерских наука, школска 2015/2016., Крагујевац, 2015.
9. Милорадовић Д., Радоњић, Р., Тарановић, Д.: „Испитивање МВМ 2“ скрипта у електронском облику, , Факултет инжењерских наука, школска 2015/2016., доступно на www.moodle.mfkg.rs, Крагујевац, 2015.
10. Yang S.K., Liu T.S., Cheng Y. C.: “Automatic measurement of payload for heavy vehicles using strain gages”, *Measurement*, Vol. 41, No. 5, pp. 491–502, 2008
11. Симић, Д.: „Теорија и примена мерних трака“, Машински факултет, Крагујевац, 1972.