

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: 141/2013

Милан С. Младеновић

**Примена капацитивних давача 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 капацитивних давача,
- прикаже класификацију и област употребе капацитивних давача,
- илуструје и анализира примену капацитивних давача 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] Ристић, С.: „Електронске компоненте“, Електронски факултет Ниш, 2011.

Крагујевац, јун 2016. год.

Ментор:
др Данијела Милорадовић, доцент

РЕЗИМЕ

Испитивање има дубоке корене, не само у аутомобилској индустрији већ уопште у индустрији. Свака машина или уређај који се произведе мора бити подвргнут испитивању како би се утврдио квалитет израде али и карактеристике функционисања саме машине, па се и возила из тог разлога испитују. Данас је то испитивање много лакше због великог броја елемената и уређаја који помажу у испитивању. Један такав уређај је описан у овом раду. У овом раду је описан начин рада капацитивних давача, њихова конструкција и класификација. Такође, наведени су примери неких капацитивних давача који се користе приликом испитивања возила, као и њихове карактеристике.

Кључне речи: испитивање, аутомобил, капацитивни, давач

ABSTRACT

Testing has deep roots not only in the automotive industry for the industry in general. Each machine or device that is produced must be investigated in order to determine the build quality and features of the functioning of the machine itself, so the vehicles are examined for this reason also. Today it is much easier to conduct testing because of the large number of elements and devices that assist in the tests. One such element is described in this paper. The paper describes the operation of capacitive sensor, their construction and classification. Also, examples of some of the capacitive sensors that are used in vehicles testing and their characteristics are described.

Keywords: testing, automobile, capacitive, sensor

УВОД	1
1. ПРИНЦИП РАДА КАПАЦИТИВНИХ ДАВАЧА	3
1.1 Келвинов капацитивни давач	3
1.2 Електростатика	5
1.3 Максвелов кондензатор	8
1.4 Индуктивност и отпор капацитивних давача	9
2. ПОДЕЛА КАПАЦИТИВНИХ ДАВАЧА	11
2.1 Капацитивни давачи са променом растојања између плоча	11
2.2 Капацитивни сензори са променом површине	12
2.3 Капацитивни давач са променљивим диелектриком	16
2.4 Подела капацитивних давача према облику електроде	21
3. ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ КАПАЦИТИВНИХ ДАВАЧА У ИСПИТИВАЊУ МОТОРНИХ ВОЗИЛА И МОТОРА	24
3.1 Капацитивни давач линеарног помераја	25
3.2 Капацитивни давач притиска	27
3.3 Капацитивни давач нивоа	30
3.4 Капацитивни давач убрзања - акцелерометар	33
3.5 Капацитивни давач близине	35
3.6 Капацитивни фонометар	37
Закључак	39
Литература	41

УВОД

Испитивање моторних возила и мотора датира још од првих аутомобила код којих су се испитивања углавном сводила на испитивање функционисања самог пројектованог возила. Испитивања су се углавном изводила на путу у реалним, експлоатационим условима. Данас, како је техника знатно напредовала испитивања се односе на безбедност, економичност и утицај возила на окружење односно животну средину, док се само испитивање може вршити у великом броју различитих услова и на велики број начина спровођења самог поступка испитивања.

Испитивање представља методологију објективног утврђивања квалитета испитиваног објекта, односно својства испитиване појаве. База испитивања представља мерење одговарајућих величина на основу које се одређују својства посматране појаве [1]. Сложена мерења такође представљају неки вид испитивања [2]. У суштини, испитивање представља мерење одговарајуће величине.

Због великог броја захтева које возило мора да испуни, што повлачи и већи број испитивања, неопходно је извршити одговарајућу категоризацију испитивања односно извршити одговарајућу поделу. Испитивања се деле према фази животног возила, према законској регулативи, према циљу који треба да се постигне и према месту испитивања. Разликујемо четири фазе животног века возила и то: развој, производња, експлоатација и, на крају, рециклажа. Према законској регулативи, постоје испитивања ради атестирања или хомологације возила. Што се тиче циља, тада се испитивања врше у зависности која је експлоатационо-техничка карактеристика најважнија тј. на коју од тих карактеристика треба обратити највише пажње па у складу са тим одрадити одговарајућа испитивања. Према месту испитивања разликујемо испитивања у лабораторији, на полигону, теренска, пољска, путна као и комбинована испитивања.

Како испитивање возила представља мерење одређених величина, онда су неопходни одговарајући инструменти. Раније су се користили физички уређаји, а данас су све чешће у употреби електрични уређаји. Коришћење електричних уређаја за мерење механичких величина има своје предности, а то су:

- већа осетљивост,
- већи фреквенцијски опсег мерења,
- могућност мерења на већој удаљености,
- могућност мерења више величина истим уређајем,
- лакша обрада података (самим тим и бржа),
- аутоматизован процес мерења.

Давачи су електрични уређаји. Они су саставни део мерног ланца и раде захваљујући вези између механичких и електричних величина. Они се деле према врсти мерне величине и према мерном принципу.

Према врсти мерне величине деле се на:

- давачи померања,
- давачи убрзања,
- давачи брзине,
- давачи силе,
- давачи притиска,
- давачи напрезања.

Према мерном принципу, давачи се деле на:

- активне даваче и
- пасивне даваче.

Активни давачи током мерења генеришу струју која је потребна за њихов рад, док пасивни користе спољну електричну енергију. Од пасивних давача разликујемо индуктивне, капацитивне, отпорне и са мерним тракама, док су активни: тахогенератори, пиезоелектрични давачи и термогенератори.

Давачи се превасходно разликују према физичкој појави која се користи за њихов рад, па су тако добијени и називи. Тако, отпорни давачи користе промену отпорности, индуктивни давачи раде на принципу појаве индуктивности у намотају, док капацитивни давачи користе појаву промене капацитета ради одређивања промене мерене механичке величине. У овом завршном раду, биће дат приказ капацитивних давача, њихова класификацији, физички принципи које користе за свој рад, области примене и на крају примера коришћења капацитивних давача током испитивања моторних возила и мотора.

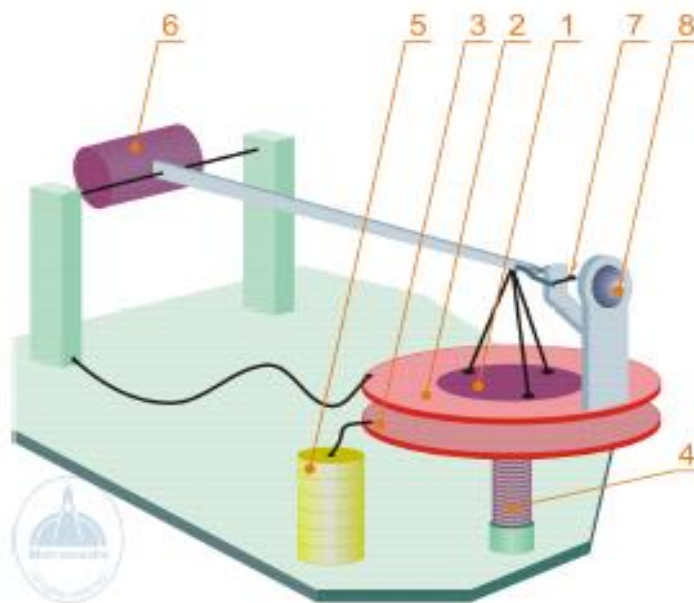
1. ПРИНЦИП РАДА КАПАЦИТИВНИХ ДАВАЧА

Капацитивни давачи раде на принципу промене капацитивности са променом одговарајуће величине као што су промена растојања, површине или промена изолатора. Капацитет је у ствари могућност тела да прими одређени електрични напон и дефинише се као однос електричног напона и разлике електричног потенцијала који се при томе ствара. Ови сензори су једни од сензора који се највише користе у индустрији. Добре особине ових давача су: велика резолуција, линеарна и логаритамска непромењивост карактеристика, висока тачност и већи пропусни опсег у односу отпорне даваче. Одликују их такође једноставност и висока осетљивост. Лоша особина је високи унутрашњи отпор који захтева још већи улазни отпор.

Сваки кондензатор има називну капацитивност која је означена на самом кондензатору и важи у нормалним радним условима, при чему се вредности називне капацитивности дају табеларно заједно са толеранцијама. Капацитивност се изражава у фарадима, F , али пошто је то превелика величина, углавном се даје у $\mu F, nF, pF$. Вредности капацитивности кондензатора као и сва дозвољена одступања исписују се на кондензатору када год је то могуће, а ако због величине кондензатора то није могуће, користи се систем словног означавања где се, на пример, F односи на толеранцију $\pm 1\%$. Дозвољена одступања од називне капацитивности се изражавају у процентима и могу бити симетрична ($\pm 20\%, \pm 10\%$) и несиметрична ($-10\%, +30\%$). Кондензатори се могу означавати и различитим бојама које се наносе у облику траке или тачке, али то ипак није стандардизовано [6].

1.1 Келвинов капацитивни давач

Принципи капацитивног мерења се користе за безконтактно мерење помераја, малих деформација као и присуство предмета. Ова метода се користи одавно. Још давних 1860-тих година, научник Келвин се бавио тиме. Развио је инструмент (слика 1.) који му је много помогао у истраживању и који је представљао почетни корак ка капацитивном мерењу. Инструмент се састоји из три електроде. Заштитна електрода (2) је причвршћена за базу и испуњава средњу электроду (1) која је монтирана изнад ваге. Њихова електрична веза се остварује преко механизма скале, док трећа (3) заједничка електрода може да се подиже и спушта помоћу шрафа (4). Заједничка електрода (3) је повезана са Лејденовом боцом, помоћу ње се остварује разлика потенцијала између електрода 1 и 2 са електродом 3. Тада сила која делује на средњу электроду може да се подешава преко тега (6) или променом растојања између електрода преко завртња. Преко сочива (8) се посматра померање навоја (7) који показује равнотежу скалаљке [4].



Слика 1. – Шема инструмента Лорда Келвина

Помоћу приказаног инструмента Келвин је показао да важи једначина (1.1) у којој се рачуна сила која делује на електроде поменутог кондензатора између којих се јавља хомогено електрично поље.

$$F = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{2d^2} U^2 \quad (1.1)$$

где су:

F – сила која делује на електроде,

S – преклапање површине електрода,

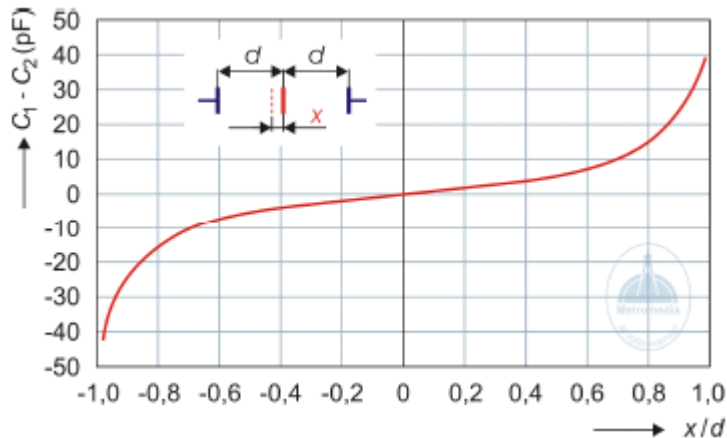
d – растојање између електрода,

ϵ_0 – диелектрична константа вакуума,

ϵ_1 – релативна диелектрична константа материје која се налази између електрода и

U – напон.

Пошто су две плоче паралелне, између њих долази до промене капацитивности и на основу те промене долази до мерења одговарајуће механичке величине. Очитавање резултата се ради компјутерски, самим тим неопходно је претворити механичку величину у неку коју је могуће компјутерски обрадити. Углавном се очитава као напон, струја или фреквенција. Све примењене функције показују јаку нелинеарност, осим када имамо мале промене. Карактеристика капацитивног давача приказана је на слици 2.



Слика 2. – Карактеристика капацитивног давача

На излазу из давача добијамо струју или напон који су пропорционални капацитивности. На основу тога, закључује се да је код давача који ради на принципу преклапања површине, капацитивност линеарно пропорционална површини преклапања и диелектричној константи. То се математички приказује следећом формулом:

$$U = K_u C = \frac{K_u \varepsilon_0 \varepsilon_1}{d} S \quad (1.2)$$

где су:

K_u – константа претварача,

C – капацитивност плоча,

S – површина преклапања електрода.

Излазна фреквенција је пропорционална растојању електрода, d :

$$f = \frac{K_f}{C} = \frac{K_f}{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S} d \quad (1.3)$$

где је K_f – константа претварача.

Идеални капацитивни давач је реализован као линеарни давач са напоном, струјом или фреквенцијом на излазу [4].

1.2 Електростатика

До сада је говорено о капацитивним давачима који раде на принципу промене растојања између електрода и промена површине које се преклапају. Поред њих, постоје и капацитивни давачи који ради са померањем диелектрика.

Како се електростатика између осталог бави и диелектрицима, њени закони су неопходни приликом конструисања овог типа давача.

Капацитивност кондензатора као и карактеристике зависе умногоме од диелектрика. Основна подела диелектрика је на поларне и неполарне. Поред ове поделе постоји и следећа:

- Лискун, стакло и керамика са малим губицима; користе се за кондензаторе чије се капацитивност креће од неколико pF до неколико стотина pF;
- Керамика са великом вредношћу диелектричне константе користи се за кондензаторе капацитивности у распону од неколико стотина до неколико pF;
- Папир и метализирани папири су за кондензаторе од неколико хиљада pF до неколико μF ;
- Оксидни слојеви користе се за електролитске кондензаторе од неколико μF и већих капацитета;
- Диелектрици у облику фолија (стирофлекс, полиестер, поликарбонат, итд.) користе се за кондензаторе капацитивности од неколико стотина pF до неколико μF [3].

Капацитивни давачи у суштини користе електрично пуњење, полупроводничке површине и наизменичну струју, тако да је за њихову тачну анализу неопходно да се користе Максвелове једначине које се односе на електрична и магнетна поља, густину струје и пуњења, али се могу користити и упрошћења (апроксимације) по којима се занемарује магнетно поље уз безначајне грешке у тачности. Максвелова једначина се односи на феномен електромагнетног таласа који се јавља или у кратком временском периоду или при високим фреквенцијама и може се описати скраћеним верзијама Максвелове једначине примењене на релативно дугачким интервалима и ниским фреквенцијама. На основу тога, систем који се састоји из савршених проводника и празног простора је електро квази-статични ако електромагнетни талас пропада кроз типичан систем у времену краћем од времена које је посматрано [5].

Како су давачи мали и спори за ова мерења, а проводници имају довољну проводљивост тако да је њихова временска константа краћа него потребно време за одговор, користи се упрошћена верзија Максвелове једначине:

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -\frac{\partial}{\partial t} \mu_0 H \approx 0 \\ \nabla \times H &= \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_0 E + J \approx 0 \\ \nabla \times \varepsilon_0 E &= \rho \\ \nabla \times \mu_0 H &= 0\end{aligned}\tag{1.4}$$

где су:

E – интензитет електричног поља,

H – интензитет магнетног поља,

J – густина струје,

ρ – густина пуњења,

ϵ_0 – диелектрична константа вакуума,

μ_0 – пермеабилност вакуума.

Дата расподела густине напајања производи одговарајући интензитет електричног поља, док је густина магнетног поља једнака 0. На основу ових скраћених једначина, електростатичка анализа своди се на откриће електричног поља насталог од стране расподеле напајања у систему који се направљен од материјала различитих диелектричних константи.

Напајања и струја код давача описује се преко више закона. Један од њих је Кулонов закон. Кулонов закон каже да је интензитет силе директно пропорционалан производу наелектрисања и обрнуто пропорционалан квадрату растојања између њих. Израз за силу између два наелектрисања Q_1 и Q_2 , која се налазе на међусобном растојању r гласи:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2} \quad (1.5)$$

Да би се одредила сила између наелектрисања, потребна је константа пропорционалности. Та константа једнака је $1/(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)$, где је ϵ_0 - пермитивност вакуума, а ϵ_r – релативна пермитивност.

Сила делује дуж линије која покушава спојити крајеве уколико су супротног знака. То напајања се транспортује брзином 1А струје за 1 секунду и има напајање од 6×10^{18} електрона при чему је напајање електрона 1.6020×10^{-19} . Сила која се јавља између два пуњења од по 1C на растојању од 1mm износи 9×10^{15} N што је слично сили од 30 тежина Земље. У пракси је напајање често мало тако да долази до занемаривања електростатичке силе. Довођењем V напона на паралелне тањирасте кондензаторе површине A у m^2 и на растојању d у метрима, енергија у кондензатору дата је једначином (1.6):

$$E = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} V^2 \quad (1.6)$$

док је сила дата преко једначине(1.7):

$$F = \frac{\partial E}{\partial d} = \frac{1}{2} \frac{C}{d} V^2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2} \frac{A}{d^2} V^2 = -4.427 \times 10^{-12} \epsilon_r A \frac{V^2}{d^2} \quad (1.7)$$

где су:

V – напон,

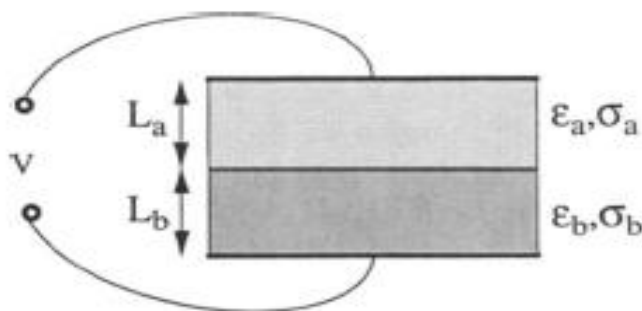
A – површина кондензатора,

d – растојање између електрода,

Код простих геометријских облика, попречна сила је тако мала да постаје безначајна код преклапања површина, док је код неких интегрисаних структура врло значајна и може се израчунати преко делова добијене енергије са попречним кретањем. За велике кондензаторе са ваздушним диелектриком који имају пуњење једносмерном струјом напона 1 V и који садрже две плоче површине 1 m^2 на растојању 1 mm , сила привлачења износи $4,427 \times 10^{-6}\text{ N}$.

1.3 Максвелов кондензатор

Како је Максвел проучавао капацитивност, направио је кондензатор који се састоји из две паралелне плоче истих површина, A , између којих су постављена два делимично проводљива диелектрика дебљине, L , диелектричне константе, ϵ , и проводности, σ (слика 3) [5].

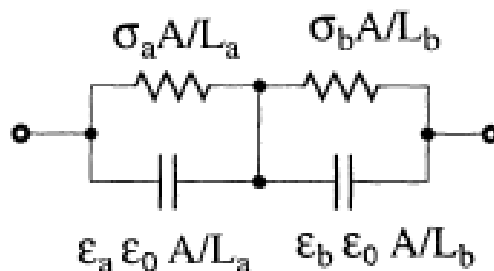


Слика 3. – Максвелов кондензатор

Термичко понашање као и понашање електричног поља се може објаснити преко Лапласове трансформације која важи за правоугли координатни систем:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial}{\partial x^2} V + \frac{\partial}{\partial y^2} V + \frac{\partial}{\partial z^2} V \quad (1.8)$$

Два дела су пропорционално раздвојена услед дебљине дела, L , и различите диелектричне константе, ϵ . Променом напона унутар кондензатора долази до промене, односно до стварања електричног поља између тако подељених делова и спојити их. Услед ограничене проводљивости, временом ће се поново раздвојити у одговарајућој пропорцији. Максвел је приметио да је гранична површина диелектрика еквипотенцијална површина и може се заменити проводником и да се тако од једног кондензатора могу направити два капацитивности $\epsilon_a \epsilon_0 A/L_a$ и $\epsilon_b \epsilon_0 A/L_b$. Одатле следи шема (слика 4.) која се лако решава на основу теорије о елементарним колима.



Слика 4. – Шема Максвеловог кондензатора

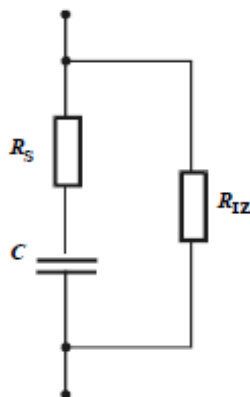
Кондензатор граде две плоче између којих се налази диелектрични материјал, при чему је његова капацитивност:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (1.9)$$

Из једначине се закључује да капацитивност зависи од диелектричних константи, површина плоча и растојања између плоча. Деловањем било које неелектричне величине долази до њихове промене и промене капацитивности. У зависности од тога на коју од наведених величина се утиче зависи и конструкција самог давача.

1.4 Индуктивност и отпор капацитивних давача

Капацитивни давачи, поред капацитивности, имају и извесну индуктивност и отпор, с тим што је индуктивност мала и занемарљива, док отпор може бити велики. Ове особине се приказују одговарајућом шемом, слика 5 [6].



Слика 5. – Еквивалентна шема капацитивног сензора

Отпор R_s је активни отпор реалног кондензатора због којег долази до разбацавања енергије у диелектрику. Означава се као отпор губитак у диелектрику или отпор самог кондензатора. На шеми је приказан у серијској вези са кондензатором где је $R_s \ll \frac{1}{\omega C}$.

Може бити и у паралелној вези, при чему је $R_p \ll \frac{1}{\omega C}$ и $R_p = (\frac{1}{\omega C})^2 / R_s$. Губици енергије изражавају се преко тангенса угла (1.10), који зависи од кружне фреквенције, ω , наизменичног напона, U , прикаченог на крајевима кондензатора:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_{R_s}}{U_c} = \frac{I R_s}{I \frac{1}{\omega C}} = R_s \omega C \quad (1.10)$$

где су:

R_s – реални губитци,

U_{R_s} – напон отпора,

U_c – напон кондензатора,

ω – електрични отпор.

Капацитивност кондензатора такође може бити дата преко количине наелектрисања, Q , и напона, U , на облогама кондензатора:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1.11)$$

2. ПОДЕЛА КАПАЦИТИВНИХ ДАВАЧА

Основна подела капацитивних давача је према начину рада. Деле се на капацитивне даваче са:

- променом растојања између плоча;
- променом површине;
- са променом диелектрика.

Подела капацитивних давача врши се и према облику плоча односно електрода самог давача, њиховом међусобном положају као и диелектрику који се користи [1].

2.1 Капацитивни давачи са променом растојања између плоча

Ови давачи имају нелинеарну статичку карактеристику са великом осетљивошћу. Углавном су прости, плочасти сензори једно-капацитивног типа и сложенији плочасти сензори дво-капацитивног типа (полу-диференцијални и диференцијални). Предност дво-капацитивних сензора у односу на једно-капацитивне је мања осетљивост на сметње, већа стабилност и шира примена [6].

Прости плочасти капацитивни сензор има негативну осетљивост што значи да са порастом растојања између плоча долази до опадања капацитивности и обрнуто, са смањењем растојања повећава се капацитивност. Приликом избора сензора треба имати на уму да једно-капацитивни сензори увек мере са грешком. То се дешава зато што, поред мерене величине и друге величине утичу на капацитивност.

Диференцијални капацитивни сензор (слика 6.) састоји се из три електроде, с тим што се средња електрода једина креће, док су друге две фиксиране. Средња електрода се креће под дејством мерене величине. Сензор се састоји од два кондензатора капацитивности (2.1), (2.2):

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{bl}{d_o - x} = C_{max} \frac{1}{1 - x/d_o} \quad (2.1)$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{bl}{d_o - x} = C_{max} \frac{1}{1 - x/d_o} \quad (2.2)$$

где су:

C_1, C_2 - капацитивност плоча,

l – ширина,

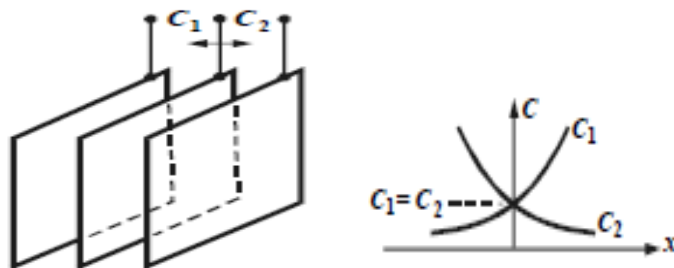
b – дужина,

x – преклапајућа површина,

d_o – почетно растојање између плоча

Уколико се као излаз узима са оба кондензатора статичка карактеристика је квадратна и у том случају је мерни опсег дупло већи него код простог плочастог сензора (2.3). Карактеристика је линеарна уколико је $\frac{x}{d_0} \ll 1$:

$$\frac{x}{d_0} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.3)$$

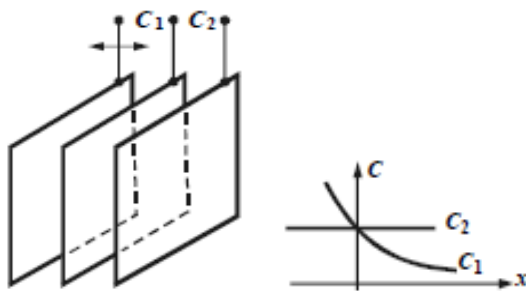


Слика 6. - Диференцијални капацитивни сензор

Полу-диференцијални капацитивни сензор (слика 7.) има покретну спољну електроду. Присутна су два излазна електрична параметра:

- капацитет C_1 – мења се променом мерне величине;
- капацитет C_2 – на коју не утиче промена мерне величине.

Ова карактеристика се користи при градњи сензора две физичке величине од којих је једна фиксна. Статичка карактеристика је линеарна само у случају $\Delta d \ll d$.



Слика 7. – Полу-диференцијални капацитивни сензори

2.2 Капацитивни сензори са променом површине

Чешће се примењују од сензора са променом растојања, промена капацитивности се остварује померањем једне површине у односу на другу у облику (2.4):

$$\frac{C}{C'} = \frac{l}{l'} \quad (2.4)$$

C' - промена капацитивности,

l' - душина на којој се преклапају плоче.

Као и код давача са променом растојања и овде постоји прости плочасти давач. Код овог типа сензора једна плоча је фиксна док се друга креће тако да површина преклапања одређује капацитет:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{xb}{d} \quad (2.5)$$

У случају када је $l=x$ добија се једначина у односу на максималну капацитивност:

$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{x}{l} \quad (2.6)$$

Иако је остварена линеарна карактеристика, ивице електростатичког поља утичу на капацитивност. Проблем код овог сензора је и то што је врло тешко одржавати правац кретања како не би дошло до бочног кретања односно до промене растојања између плоча, јер у том случају карактеристика постаје нелинеарна и манифестује се као вишеструка грешка:

$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{x}{l} \frac{1}{1 - (\Delta d/d)} \quad (2.7)$$

где су:

Δd – промена растојања,

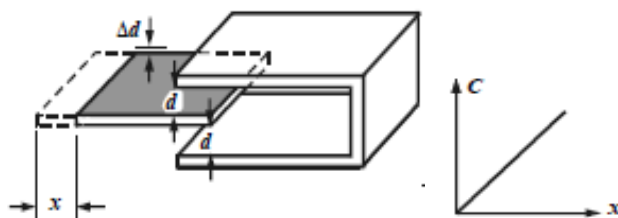
C_{max} – максимална капацитивност.

Како је $\Delta d/d \ll 1$ линеаризацијом се добија:

$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{x}{l} \left(1 + \frac{\Delta d}{d}\right) \quad (2.8)$$

Због бочног кретања, развијен је побољшани плочасти капацитивни сензор (слика 8). Мање је осетљив на попречно кретање, а капацитивност се даје једначином:

$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{x}{l} \frac{1}{1 - (\Delta d/d)^2} \quad (2.9)$$



Слика 8. – Побољшани плочасти кондензатор

Код побољшаног сензора се такође јављају вишеструке грешке, али су оне знатно мање него код простог капацитивног сензора:

$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{x}{l} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right] \quad (2.10)$$

Диференцијални сензор (слика 9.) је сличан као код првог типа сензора, састоји се из три плоче од којих се једна креће. Има два радна кондензатора где се приликом кретања плоче капацитет једног кондензатора повећава, док се другог смањује:

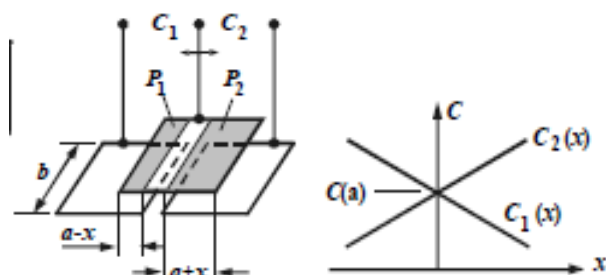
$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{b(a+x)}{d} \quad (2.11)$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{b(a-x)}{d} \quad (2.12)$$

где је:

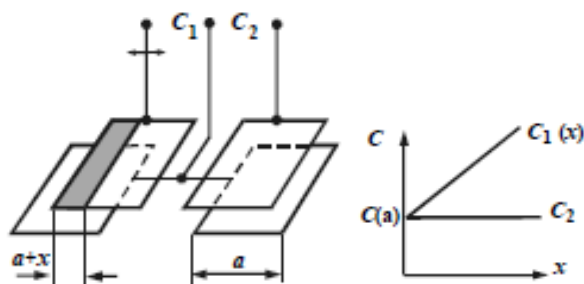
a – ширина непокретне плоче

Праћење промене оба кондензатора омогућено је уградњом диференцијалног капацитивног сензора у мосни спој. Овим типом сензора давач задржава линеарну карактеристику, повећава тачност мерења и проширује свој мерни опсег.



Слика 9. – Диференцијални сензор са променом површине

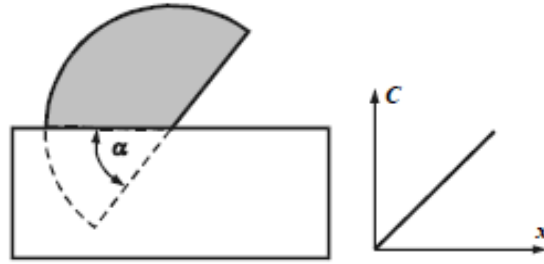
Полу-диференцијални капацитивни сензор (слика 10.) се састоји од два сензора од којих је један фиксни, а други редни, има линеарну статичку карактеристику и цела се налази у првом квадранту.



Слика 10. – Полу-диференцијални капацитивни сензор

$$\begin{aligned} C_1 &= \varepsilon_0 \varepsilon \frac{b(a+x)}{d} \\ C_2 &= \varepsilon_0 \varepsilon \frac{ba'}{d} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Код угаоног капацитивног сензора (слика 11.), као што сам назив говори, плоче су изведене као код угаоног кондензатора, где је статорска плоча фиксна док се роторска окреће за угао α , при чему је роторски момент веома мали.

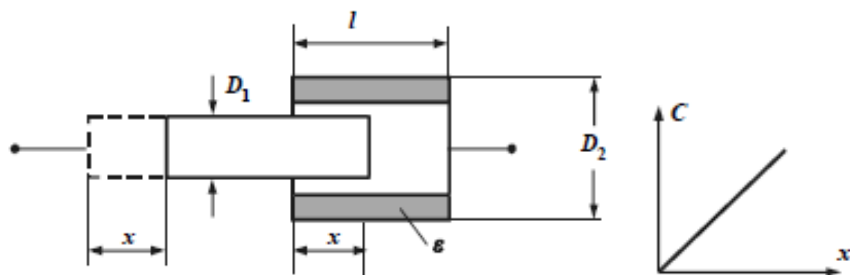


Слика 11. – Угаони капацитивни сензор

Статичка карактеристика је дата једначином (2.6) односно модификована (2.14). Све оно што се односи на плочасте капацитивне сензоре важи и за ове.

$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{\alpha}{180^\circ} \quad (2.14)$$

Цилиндрични капацитивни сензор (слика 12.) је веома погодан за практичне примене. Има цилиндрични кондензатор. Металне плоче су цилиндричног облика полупречника r_1, r_2 , док се између њих налази диелектрик одређене диелектричке константе, ε .



Слика 12. – Цилиндрични капацитивни сензор

Капацитивност ових давача се одређује преко формуле (2.15) при чему је максимална вредност за $x=1$.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{2\pi x}{\ln(r_1/r_2)} \quad (2.15)$$

Уколико је попречно одступање при кретању цилиндра $(\Delta d/d) \ll 1$, статичка карактеристика је:

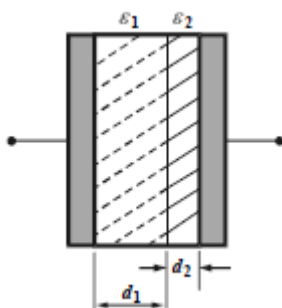
$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{x}{l} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right] \quad (2.16)$$

Вишеструке грешке, код цилиндричних давача су много мање него код побољшаних плочастих сензора.

2.3 Капацитивни давач са променљивим диелектриком

Капацитет је линеарно завијан од диелектричне константе изолатора. То омогућава градњу давача за директно праћење нивоа течности, нивоа ситних материјала као што је песак, влажност тврђих и ситних материјала, дебљине и других величина које могу утицати на промену диелектричне константе. Диелектрик не сме бити проводник.

Као и код претходних типова сензора, основна верзија овог типа сензора је плочасти сензор, где се диелектрик, у већини случајева вишеслојни. Поставља се или паралелно (слика 13.) или вертикално (слика 15.) у односу на електроде.



Слика 13. – Диелектрик паралелан са електродама

Када је диелектрик паралелан са електродама, онда се шема сензора поставља као два редно везана кондензатора са посебним диелектрицима (слика 14.) и тада капацитет износи :

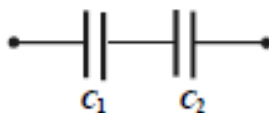
$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \epsilon_0 \frac{S}{d_1/\epsilon_1 + d_2/\epsilon_2} \quad (2.17)$$

где су:

d_1, d_2 – дебљина слојева материјала између електрода (изолатора),

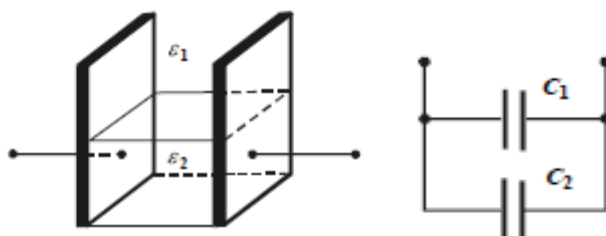
ϵ_1, ϵ_2 – диелектричне константе.

Статистичка карактеристика је нелинеарна и осетљивост константна уколико се једна од диелектричних константи мења, али без промене дебљине. Само у случају мале промене диелектричне константе се сматра да је статистичка константа остала линеарна. Овај тип капацитивног давача погодан је за праћење карактеристика неелектричних материјала у облику траке.



Слика 14. – Шема редно везаних кондензатора

Када је диелектрик вертикалан (слика 15.) у односу на електроде, шема сензора садржи два кондензатора, паралелно везана.



Слика 15. – Диелектрик вертикално постављен у односу на електроде и електрична шема

Укупни капацитет је линеарна функција висине, x , доњег кондензатора:

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{b(l-x)}{d} + \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{bx}{d} = k_0 + k_1 x \quad (2.18)$$

Друга верзија је цилиндрични капацитивни давач. Димензије диелектрика се мењају вертикално уз електроде. Еквивалентни капацитивни сензор је исти као и код плочастог сензора са померљивим диелектриком, где је диелектрик вертикалан у односу на електроде тј. два кондензатора паралелно везана и на основу њих се одређује статичка карактеристика. Овај тип давача се користи за мерење нивоа течности или ситних материјала.

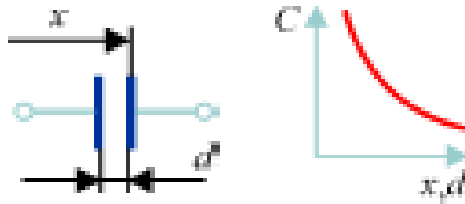
Слична подела дата је у раду [4]. Поред формула за прорачун капацитивности, за сваки тип сензора дат је и графички приказ карактеристике сензора :

- Давач са променљивим растојањем између плоча и његова карактеристика (слика 16.); основни тип чија се капацитивност израчунава преко следећих формула:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d(x)} \quad (2.19)$$

и

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{C}{d} \left(1 - \frac{\Delta d}{d}\right) \quad (2.20)$$



Слика 16. – Шема давача са променљивим растојањем између плоча и његова карактеристика

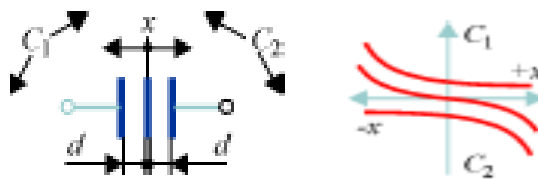
- Диференцијални плочасти давач са променљивим растојањем (слика 17.); прорачун се ради преко следеће три формуле:

$$C_1 = \varepsilon \frac{S}{d(x)} \quad (2.20),$$

$$C_2 = \varepsilon \frac{S}{d(x)} \quad (2.21)$$

и

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{C}{d} \left[1 + 2\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right] \quad (2.22)$$



Слика 17. - Диференцијална плоча са променљивим растојањем

- Плочасти давач са слојем диелектрика и променом растојања (слика 18.). Код овог типа важе такође три формуле:

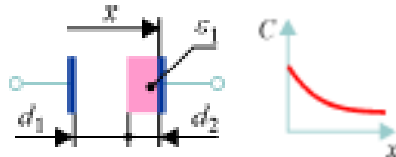
$$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_1(x) + \frac{d_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \quad (2.23),$$

$$C = \frac{\varepsilon_1 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2} \quad (2.24)$$

и

$$\frac{\Delta C}{C} \cong - \frac{\Delta d}{d_1 + d_2} \frac{1}{1/N - \Delta d_1 / d_1 + d_2} \quad (2.25)$$

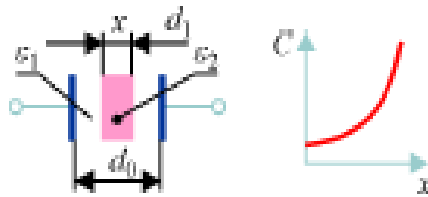
ΔC – промена капацитивности



Слика 18. - Плоча са слојем диелектрика и променом растојања

- Плочасти давач са променљивом дебљином диелектрика (слика 19.). У овом случају се користи једна формула:

$$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_0 - d_1(x) \left(1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)} \quad (2.26)$$



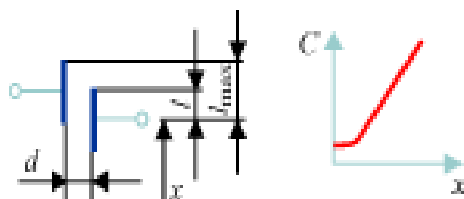
Слика 19. - Плоча са променљивом дебљином диелектрика

- Плочасти давач са променљивом површином преклапања (слика 20.). Другачији принцип рада од претходних давача. Спада у другу групу основних типова. За прорачун се користе две формуле:

$$C = \varepsilon \frac{S(x)}{d} \quad (2.27)$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta l} = - \frac{C_{max}}{l_{max}} \left(1 + \frac{\Delta d}{d}\right) \quad (2.28)$$

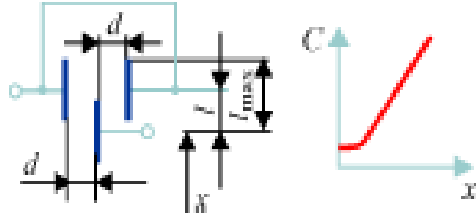
l_{max} – максимална преклапајућа дужина плоча



Слика 20. - Плоча са променљивом површином преклапања

- Диференцијални плочасти давач са променљивом површином преклапања (слика 21.):

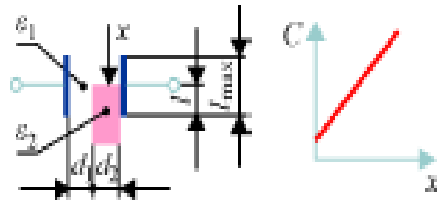
$$C = \varepsilon \frac{S(x)}{d} \quad (24) \quad \frac{\Delta C}{\Delta l} \cong - \frac{C_{max}}{l_{max}} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right] \quad (2.29)$$



Слика 21. - Диференцијалне плоче са променљивом површином преклапања

- Плочасти давач са променљивом површином преклапања и диелектриком између плоча (слика 22.):

$$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_1 + d_2} \left[1 + \frac{l(x) + 1 - \varepsilon_1 / \varepsilon_2}{l_{max} d_1 / d_2 + \varepsilon_1 / \varepsilon_2} \right] \quad (2.30)$$



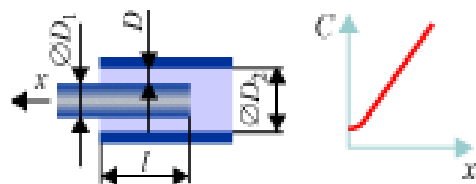
Слика 22. - Плоча са променљивом површином преклапања и диелектриком између плоча

- Давач у облику цеви са променљивом, преклапајућом површином (слика 23.):

$$C = \varepsilon \frac{2\pi - l(x)}{\ln D_1 / D_2} \quad (2.31)$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta l} \cong - \frac{C_{max}}{l_{max}} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right] \quad (2.32)$$

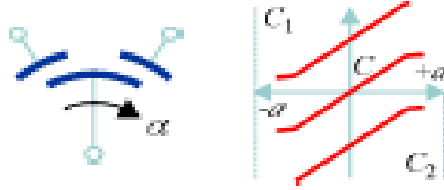
D_1, D_2 – пречници цеви



Слика 23. - Давач у облику цеви са променљивом, преклапајућом површином

- Диференцијални давач са преклапајућим површинама (слика 24.):

$$C = \varepsilon \frac{S(d)}{d} \quad (2.33)$$



Слика 24. - Диференцијални давач са преклапајућим површинама

2.4 Подела капацитивних давача према облику електроде

Постоје и различити облици самих плоча и прорачун капацитивности према облику дат је у књизи [5]:

- Најпростији облик је плоча односно две паралелне плоче и о израчунавању капацитета овог типа давача помињано је већ у тексту;
- Диск плоча. Такође простог облика и одређеног пречника, d . Има дефинисану капацитивност:

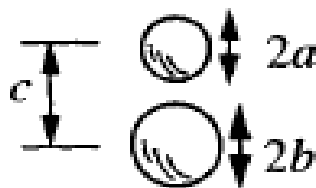
$$C = 35.4 \times 10^{-12} \varepsilon_r \times d \quad (2.34)$$

- Сфера има сличну капацитивност као диск:

$$C = 55.6 \times 10^{-12} \varepsilon_r \times d \quad (2.35)$$

- Две сфере (слика 25.). Капацитивност зависи од пречника сфера (a , b) и растојања између њих (c). За прорачун се користи једначина (2.36) која важи само у случају када су a и b много мање од $2c$:

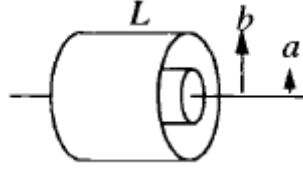
$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\frac{1}{a+b} + \frac{1}{ab} - \frac{1}{c}} \quad (2.36)$$



Слика 25. – Две сфере

- Концентрични цилиндри (слика 26.). Њихова капацитивност зависи од дужине цилиндра, L , и њихових полупречника, a , b :

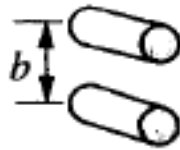
$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(b/a)} L \quad (2.37)$$



Слика 26. - Концентрични цилиндри

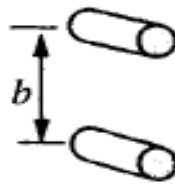
- Паралелни цилиндри истих пречника, капацитивност зависи од њиховог растојања и дужине цилиндра и ту имамо два случаја. Први (слика 27.) када растојање између цилиндара није много веће од њихових пречника (2.38) и други (слика 28.), када је растојање много веће од њихових пречника (2.39);

$$C = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(b + \sqrt{b^2 + 4a^2}/2a)} L \quad (2.38)$$



Слика 27. – Паралелни цилиндри истих пречника са мањим растојањем

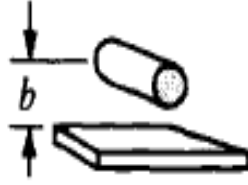
$$C \approx \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(b/a)} L \quad (2.39)$$



Слика 28. – Паралелни цилиндри истих пречника са већим растојањем

- Паралелни цилиндар и плоча (слика 29.). Цилиндар дужине, L , и полупречника, a , постављен је изнад плоче на растојању, b :

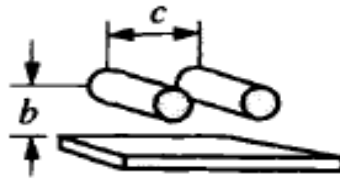
$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(b + \sqrt{b^2 + a^2}/a)} L = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{a \cosh(b/a)} L \quad (2.4)$$



Слика 29. – Паралелни цилиндар и плоча

- Два цилиндра и плоча (слика 30.). Капацитивност између два цилиндра дужине, L , и радијуса, a , смањује се за растојање од плоче:

$$C_m \approx \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r L \cdot \ln[1 + 2b/c]}{[\ln(2b/a)]^2} \quad (2.41)$$

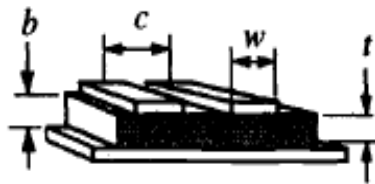


Слика 30. – Два цилиндра и плоча

Ова једначина одговара једино када је дупло растојање између плоче и цилиндра много веће од полупречника цилиндра.

- Две траке и плоча (слика 31.). Капацитивност кондензатора дужине, L , ширине, w , дебљине, t , и простора, s , преко бесконачно дугачке плоче прекривене диелектриком дебљине, t , и диелектричном константом, ε_r :

$$C_m \approx \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_{r(eff)} L}{[\ln(\pi(c-w)/(w+t+1))]^2} \quad (2.42)$$



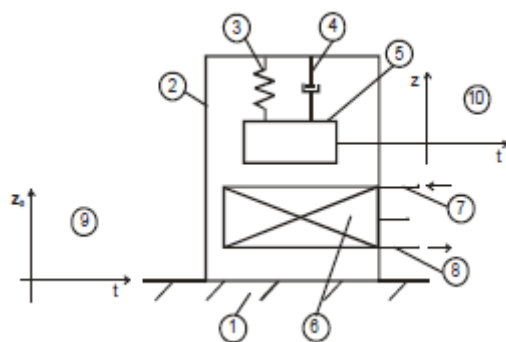
Слика 31. – Две траке и плоча

Ефективна диелектрична константа, $\varepsilon_{r(eff)}$, износи 1 уколико је $c \gg b$ или $c \approx b$, $\varepsilon_{r(eff)} \approx \frac{(1+\varepsilon_r)}{2}$. Када су ширине трака различите (w_1 и w_2) једначина има облик:

$$C_m \approx \frac{55.6 \varepsilon_{r(eff)} L}{\ln[\pi^2 c^2 (1/w_1 + t)(1/w_2 + t)]} \quad (2.43)$$

3. ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ КАПАЦИТИВНИХ ДАВАЧА У ИСПИТИВАЊУ МОТОРНИХ ВОЗИЛА И МОТОРА

Сваки давач, па и капацитивни, састоји се из механичког и електричног дела који су повезани преко интерфејса који може бити контактни или бесконтактни. Механички део је дат на слици 32. [2].

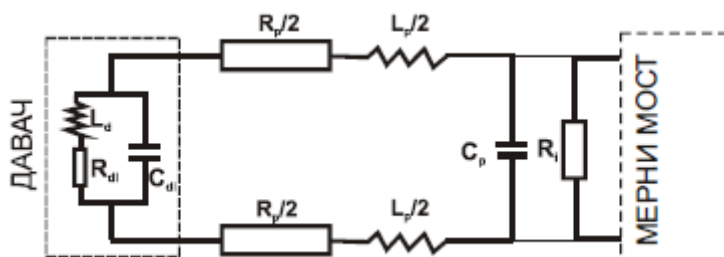


Слика 32. – Механички део давача

Позиције на слици су:

1. – мерни објекат;
2. – кућиште;
3. – опруга;
4. – пригушивач;
5. – сеизмичка маса;
6. – црна кутија која је посебна за сваку врсту давача;
7. – довод енергије (код пасивних давача);
8. – одвод електричног сигнала.

Шема електричног дела давача дата је на слици 33. Састоји се од блока давача у коме се налазе индуктивност, отпор и капацитивност и повезан је са мерним мостом са кабловима.



Слика 33. – Шема електричног дела давача

На слици 34. је илустрован пресек једног капацитивног давача са изолатором, где су илустроване и металне плоче, односно електроде.



Слика 34. – Илустрација пресека капацитивног давача

Капацитивни сензори имају широки спектар примене. Основни њихов задатак је мерење линеарног и угаоног померања, вибрација, притиска, праћење нивоа течности, па се могу користити у разним индустријама, па и у аутоиндустрији.

3.1 Капацитивни давач линеарног помераја

Када је у питању мерење линеарног померања, може да се користи много различитих врста давача, а један од њих је и капацитивни давач. Ова врста давача омогућава мерење великом резолуцијом - до $1 \mu\text{m}$ и са великом тачношћу $\pm 0,01\%$. Постоје такође и специјални сензори за мерење изузетно малих помераја, чак $0,1 \text{ nm}$, али и великих помераја, реда величине метар. Капацитивни давач помераја производи се као саставни део оригиналне опреме, а ретко као сензорска јединица која се може накнадно уградити у опрему. Врло су корисни при истраживањима на научно-истраживачким пројектима.

Као и сваки уређај, и капацитивни давач за мерење помераја има своје добре и лоше особине. Добре особине су мала осетљивост на спољне утицаје као што су корозија, температура и радијација, али и дуговечност, одсуство покретних контаката и трења. Недостатак је што има високу излазну импедансу, односно подложен је сметњама у току рада. Овај проблем се може врло лако решити правим избором дужине, али и положаја прикључних каблова. Како би се одвео и прикупио паразитски напон, око активних електрода постављају се уземљене електроде. Уређај за мерење капацитета давача треба да има високи импедансни улаз.

Како би се повећала линеарност статичке карактеристике, капацитивни сензор се поставља у повратну грану операционог појачавача. Када је потребно повећање

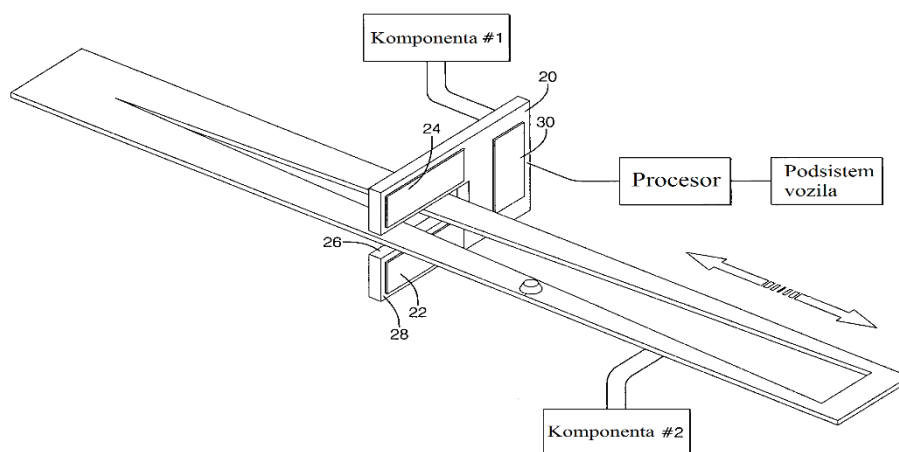
осетљивости приликом мерења, врши се претварање капацитета у фреквенцију. Промена фреквенције мери се фреквенцметром.

Микропроцесорски фреквенцметар може да обави читав низ корисних операција: линеаризацију, подешавање нуле, опсега и друго [6].

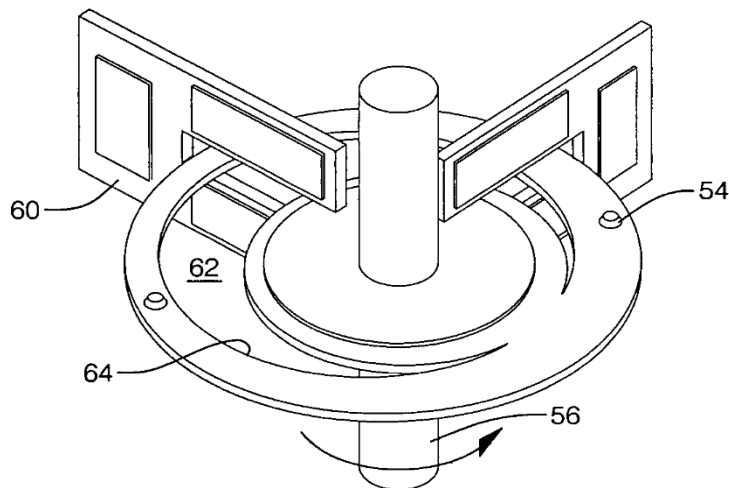
Један такав капацитивни давач је патентиран баш за испитивање или праћење понашање возила у току експлоатације. Користи се за праћење линеарне и угаоне позиције односно кретања. Велики број подсистема возила се могу испитивати овом методом. Један део давача се постави на део возила који се креће, док се други постави на део који је стационаран. Као диелектрик се користи ваздух односно простор између плоча.

Користе се код система за ослањање за праћење померања шасије у односу на амортизер, где се променом капацитивности која се претвара у електрични сигнал одређује промена положаја (слика 35.). Тако постављени сензор се повезује са електронском контролном јединицом и врши се константно праћење понашање возила и по потреби врши се контрола стабилности возила. Такође се овај тип сензора може користити и за праћење кретање педала гаса или кочнице.

Када је у питању угаоно померање, може се пратити, на пример, угао заокретања точка управљача или радилице (слика 36.). Давач се поставља по истом принципу као и код мерења линеарног померања [7].



Слика 35. – Капацитивни давач за мерење линеарног померања
(20 – електрода која је везана за прву компоненту, 22, 24 – правоугаоне електроде,
26 – празан простор, 28 – површина подлоге)

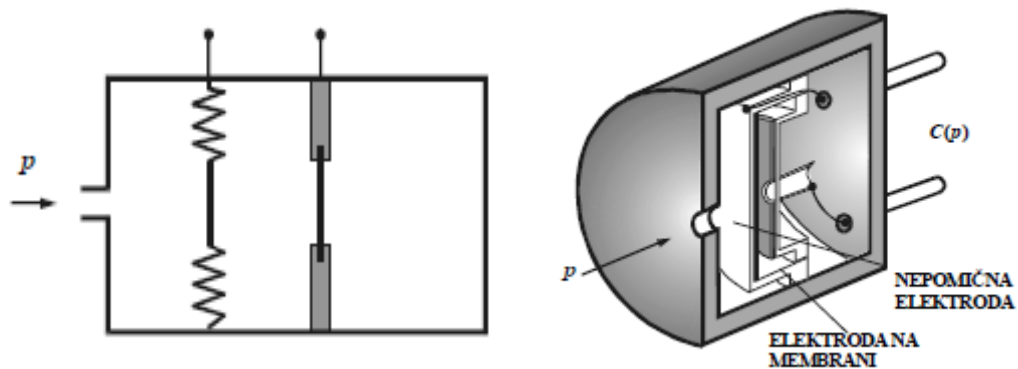


*Слика 36. – Капацитивни давач за мерење угаоног померања
(56 – компонента која се ротира у смеру стрелице, 60 – једна или више електрода,
62 – простор, 64 – спирална спољна ивица)*

3.2 Капацитивни давач притиска

Поред капацитивних давача помераја, постоје и капацитивни давачи притиска који су најбољи за мерење када је у питању мали опсег до 100 Ра, али, такође могу да се мере и већи притисци до 10^8 Ра са тачношћу од $\pm 0,25\%$ до $0,05\%$. Разликујемо даваче апсолутног (слика 37.) и диференцијалног (релативног) притиска (слика 38.). Добре особине су висока фреквентна пропустљивост, једноставност израде (самим тим и приступачнија цена), стабилност, линеарност и поновљивост, као и могућност мерења статичких и динамичких промена, минимална маса мембране, али и мала запремина. Лоше особине су: осетљивост на температуру, неопходна заштита спољних каблова, капацитет утиче на облик излазног сигнала, али и недостаци као и код давача помераја тј. висока излазна импеданса и положај и померање каблова утичу на излазни сигнал. Код давача притиска се висока импеданса може решити активно или реактивно [7].

Код давача апсолутног притиска, са једне стране се налази прикључак за мерни притисак док је са друге изолована комора са референтним вакуумом.



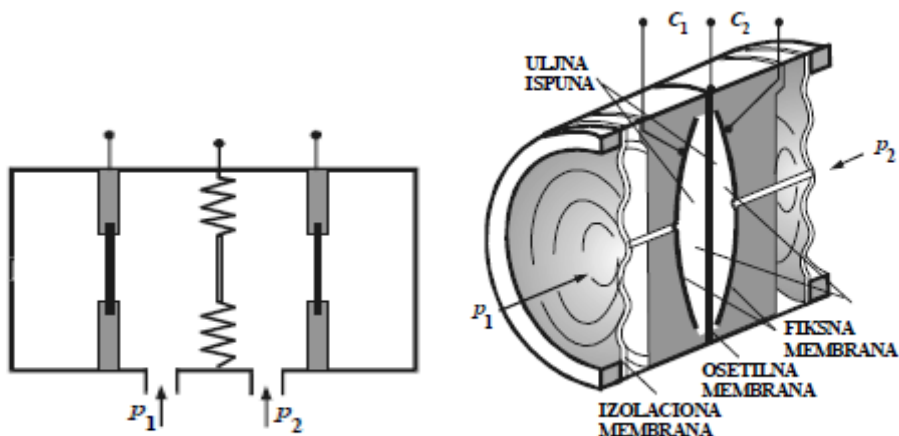
Слика 37. – Шема и илустрација капацитивног давача апсолутног притиска

Код сензора диференцијалног притиска постоји по један прикључак са обе стране. Промена капацитета се детектује помоћу моста који даје амплитудно-модулисани излазни сигнал, па је неопходна демодулација како би се обавила температурна компензација и добио једносмерни сигнал. Такође се врши подешавање нуле и појачања. Већа резолуција мерења се добија повезивањем на капацитивни осцилатор RL или LC.

Приликом мерења притиска може доћи до појаве вибрација које могу имати лош утицај, тачније могу утицати на то да дође до погрешног мерења. Услед вибрација долази до неконстантног мерења, а уколико вибрације буду превелике, може доћи до оштећења мембране. Вибрације се могу појавити од различитих извора, али најопасније су оне мале, дуготрајне вибрације.

Поред вибрација, ту је и температура која на два начина може да утиче на мерење. Један је тај да може доћи до запреминске експанзије паре (код неких система је то већ урачунато). Друга грешка је мање приметна. Температура која је изван опсега сензора може створити грешке при мерењу.

Такође, на давач утиче и састав гаса или течности чији се притисак мери. Углавном се зна тачан састав, али је неопходно да материјал буде „чист“ нарочито ако се користе давач диференцијалног притиска. Већа густина од нормалне може изазвати већа динамичка читавања, што зависи од места где је постављен давач, као и од начина како се користи. Густина паре али и ваздуха може утицати на читавања статичког притиска [9].



Слика 38. - Шема и илустрација капацитивног давача диференцијалног (релативног) притиска

Постоје произвођачи који су специјализовани за сензоре притиска. Један такав произвођач је “Kavalico” који у својој понуди има широки спектар давача притиска. Што се тиче капацитивних давача притиска, најпопуларнији су најновији керамички сензори који се могу користити и у тешким условима рада. Један такав давач који се може користити за мерења притиска горива или уља на возилима је PE2000 (слика 39.). Овај сензор има могућност рада на температурама у опсегу од -40°C до 125°C [8].



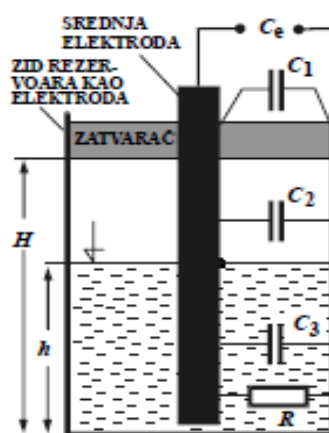
Слика 39. – Керамички капацитивни давач притиска PE2000

Један крај давача има навој како би се давач могао причврстити за шасију возила док се други крај повезује са системом протока на пример уља и врши мерења притиска у уљу као што је већ описано у претходном делу текста.

3.3 Капацитивни давач нивоа

Још један задатак који могу да решавају капацитивни давач је контрола нивоа течности у неком суду. Они спадају у електричне сензоре за мерење нивоа. Користе се као цилиндрични или плочасти давачи. Могу мерити ниво и непровидне (слика 40.) и провидне течности (слика 41.), с тим што непровидне течности имају специфичну електричну проводност. Металне електроде капацитивне сонде су фиксиране помоћу заптивача од изолаторског материјала. Потопљене су до висине h док је остатак простора између електрода испуњен гасном фазом. Сонда је углавном коаксијална, при чему спољна електрода може да послужи као зид резервоара.

Тачност ових давача је $\pm 0,5\%$ до $2,5\%$ док је опсег 0 до 0,4 m и 0 до 20 m. Могу радити у тешким условима где влада притисак до 10 МПа и температура до 300°C . Пожељно је да сонда буде одрађена тако да има што већу промену капацитета у задатом мерном опсегу. Као мера добре конструкције сензора узима се однос између максималне промене капацитета сонде, ΔC , и капацитета када је резервоар празан, C_0 . Однос се креће у границама $0,25 < \frac{\Delta C}{C_0} < 4$. Недостатак је што се осетљивост давача смањује због капацитета изолатора у облику заптивача и капацитета прикључних водова.



Слика 40. – Цилиндрични сензор нивоа непровидне течности

За непровидне течности отпор између електрода је бесконачан па је еквивалентни капацитет:

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.1)$$

Овде су:

C_1 – капацитет између електрода на месту где је између њих изолатор затварача;

C_2 – капацитет у гасној фази;

C_3 – капацитет између електрода у течној фази.

На основу капацитета кондензатора, добија се еквивалентни капацитет пропорционалан са мерним нивоом, h :

$$C_e = C_1 + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_t h}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_g(H-h)}{\ln(D/d)} \quad (3.2)$$

Овде су:

ϵ_t – диелектрична константа течности,

ϵ_g – диелектрична константа гаса,

h – ниво течности,

H – висина давача,

D – пречник давача,

d – пречник електроде.

У једначини се узима да је C_1 константа док је ϵ_g - диелектричка константа гаса или паре.

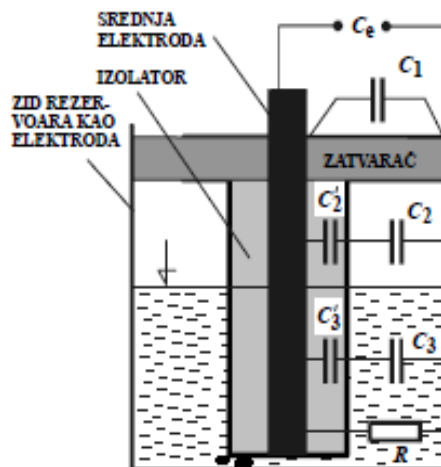
Што се тиче мерења нивоа провидних течности, унутрашња електрода се пресвлачи слојем квалитетног чврстог изолационог материјала (пластика или тефлон). Због изолације, отпор течности нема утицај на мерење и таква сонда је применљива како за провидне тако и за непровидне течности. Еквивалентни капацитет пропорционалан је измереном нивоу:

$$C_e = C_1 + \frac{C_1 C'_2}{C_1 + C'_2} + \frac{C_1 C'_3}{C_1 + C'_3} = k_3 + k_4 h \quad (3.3)$$

Овде су:

C'_2 – капацитет унутар изолационог материјала електроде у гасној фази,

C'_3 – капацитет унутар изолационог материјала електроде у течној фази.



Слика 41. - Цилиндрични сензор нивоа провидне течности

Проблем се јавља када се наталоже прљавштине на облогу унутрашње електроде. Приликом опадања нивоа течности, влажни део електроде спаја се на масу, па однос остаје пропорционалан старом, а не новом нивоу течности. Уземљење може да се оствари и без продора водене паре на место где је прикључен кабл или због кондензације.

Поред одређивања нивоа течности, капацитивни давачи су добри за одређивање детекцију контактне површине између две течности или између течности и гасова као и између чврстих материјала и течности. Код таквих давача се већ поменута сонда поставља хоризонтално, а не вертикално као у претходна два случаја. Оваквим положајем сонде се обезбеђује већа промена капацитета приликом мањих промена нивоа.

Давач може радити у прекидачком режиму, у коме се електроде постављају близу једна другој и раде са великом тачношћу од ± 10 mm. Када је потребно континуално праћење помераја контактне површине, једна електрода се фиксира у хоризонталном положају, док је друга електрода у ствари површина нивоа течности који се мери. Услов је да материјал мора да буде провидан. Под провидним материјалном се сматрају сви материјали који имају садржај влаге већи од 15%.

Овај тип давача може да се користи приликом одређивања нивоа горива у резервоару возила, али је цена мало већа у односу на остале даваче, а и сложеније је конструкције.

Савременије капацитивне даваче нивоа течности производи фирма из Пекинга, Dingtek један од таквих давача је и давач типа F300-4-700 (слика 42.) који се прави од нерђајућег челика и може се користити за мерење нивоа било које течности, па се тако користи у резервоарима возила.

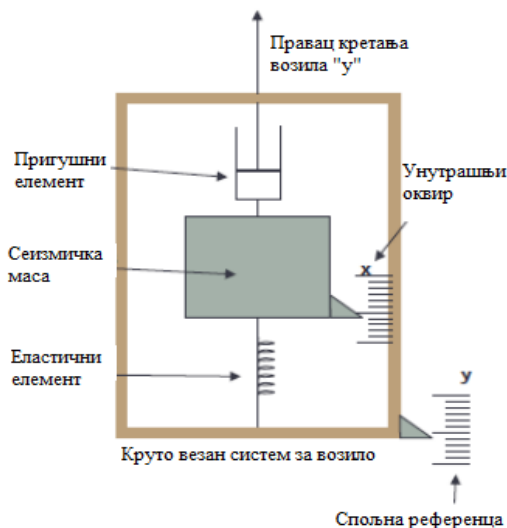


Слика 42. – Капацитивни давач нивоа фирме Dingtek тип F300-4-700[16]

3.4 Капацитивни давач убрзања - акцелерометар

Акцелерометар (слика 43.) или давач убрзања је у ствари компонента која открива покрете односно промену брзине и убрзања. Акцелерометри су углавном оптички или ласерски, али постоје и капацитивни акцелерометри. На основу силе се одређује брзина.

Ранији акцелерометри мерили су померање масе. Проблем код старих акцелерометра су присуство резонантног врха и потешкоће при добијању доброг динамичког опсега. Поред тога је потребна пажљива калибрација силе и помераја. Однос сила омогућава маси да се помера само микроскопски, да региструје и појача померање и врши повратак силе како се вратио на стари положај. Са јаким појачивачем, маса је скоро стационарна док је линеарност одређена на основу линеарности и прецизности претварача који врши претварање силе у напон. Предности капацитивног у односу на пиезоелектрични акцелерометар су: већи температурни опсег, мањи температурски коефицијент, већа осетљивост, коришћење наизменичног напона и, то што, услед удара, неће доћи до померања нуле [6].



Слика 43. – Акцелерометар [10]

Један од акцелометара (Слика 44.) који се користе приликом испитивања возила је MEMS capacitive accelerometer типа ASC3411LN фирме ASC. MEMS (*енгл. micro-electro-mechanical system*) је, иначе, технологија микро-електрично-механичких система која је врло распрострањена међу давачима. MEMS технологија омогућава овом давачу рад са врло ниским фреквенцијама. Фабрични је калибрисан и користи се, пре свега, за мерење вибрација. Унутар алуминијумске кутије се налази сеизмичка маса која је повезана са плочама. Због постојања излаза који има четири жице, могуће је повезати овај давач на било који читач. Претварање у аналогни сигнал се врши преко ASIC технологије (*енгл. Application Specific Integrated Circuit*). Користи се приликом испитивања комфора и квалитета вожње, осцилација на возилу, али и приликом испитивања кочница [14].



Слика 44. - MEMS ASC3411LN капацитивни давач фирме ASC

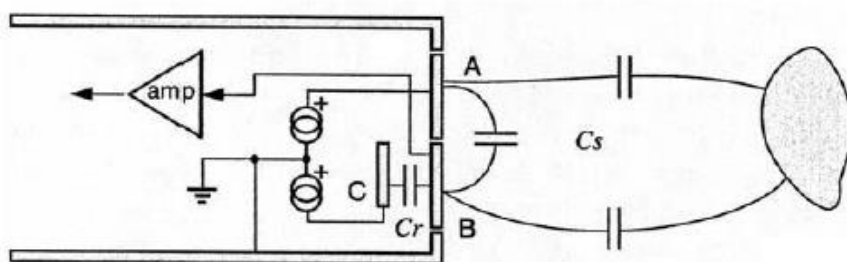
Такође, постоји и акцелерометар фирме Jewell instruments типа JMA-100/200/300 (слика 45.) који може бити једноосни, двоосни или троосни. Такође користи MEMS технологију и користи се како за испитивање аутомобила тако и за испитивање шинских возила [15].



Слика 45. - Jewell instruments типа JMA-100/200/300

3.5 Капацитивни давач близине

Из самог начина функционисања капацитивних давача произилази начин коришћења давача као сензора близине. Овај сензор ради на принципу препознавања близине неког предмета, металне или неметалне природе. Израђује се са једном плочом (електродом), где се аутоматски намеће да је предмет који је потребно детектовати друга плоча и тако се прави класичан облик капацитивног давача. Углавном имају добар домет за детектовање предмета иако су прилично малих димензија. Шема конструкције је приказана на слици 46.



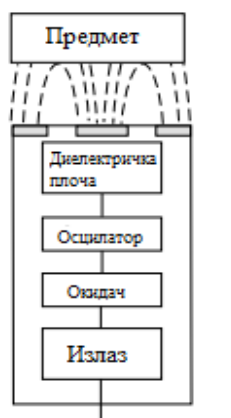
Слика 46. – Шема конструкције сензора близине

(C_s капацитивност предмета који се детектује, C_r - капацитивност плоче која се налази у самом сензору) [4]

Када су у питању новије верзије капацитивних давача, оне користе две електроде које стварају електростатичко поље. У суштини, капацитивни давачи близине се не разликују много од индуктивних давача близине. Разлика је у томе што капацитивни давачи стварају електростатичко, а не електромагнетно поље како би регистровали предмет. Када се предмет приближи и уђе у електростатичко поље давача које стварају електроде, долази до регистровања у осцилатору и као резултат се добија осциловање. Окидач читава амплитуду осцилатора и, како се предмет приближава, амплитуда је већа и обрнуто, како се предмет удаљава, тако се амплитуда смањује [11]. Приказ очитавања осцилација дат је на слици 47., док је на слици 48. приказана блок шема давача.



Слика 47. – Приказ сигнала регистравања предмета

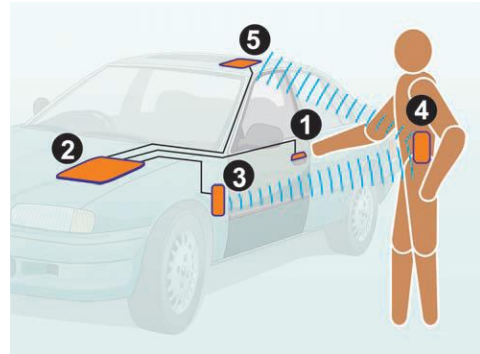


Слика 48. – Блок шема капацитивног сензора близине

Као давачи, израђују се у различитим димензијама, од различитог материјала и користе различити напон и имају различите опсеге. Могу користити и једносмерни и наизменични напон. Данас су једна од највише примењиваних врста давача. Користе се како за компјутере, тако и за таблете и мобилне телефоне, али и за покретна врата, као и за камере са могућношћу ноћног снимања. Самим тим, користе се и у ауто-индустрији, најчешће приликом испитивања осцилација возила или неког дела на возилу.

Како на себи имају навој, омогућено је да се помоћу носача поставе на возило, затим повежу са мерно-појачавачким мостом. Након тога је неопходно конвертовање у дигитални запис преко А/D конвертора и тек се онда врши читавање на рачунару. Давач се углавном поставља на рам возила.

Поред тога, користе се и приликом свакодневног коришћења возила, на пример приликом приласка возилу односно приближавању руке брави (слика 49.), приликом преласка преко давача за унутрашње светло, али и као давачи за паркирање [12].



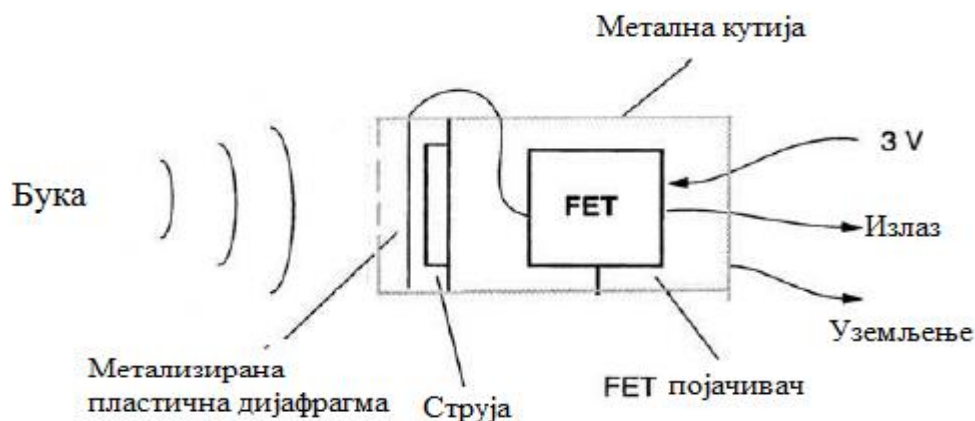
Слика 49.. – Сензор близине на брави аутомобила

На слици 49 приказана је употреба давача близине у систему врата возила. Давач се налази унутар ручице врата возила (1) и осећа приближавање руке корисника. Када се детектује прилазак објекта, главна јединица (2) шаље сигнал преко антене (3) који активира трансмитер кључа (4). Трансмитер кључа размењује информације са RFID пријемником (5) и, ако се кодови поклопе са кодом главне контролне јединице (5), брава се откључава. Цео процес траје део секунде, што значи да када рука повуче ручицу врата, она су већ откључана.

3.6 Капацитивни фонометар

У прошлости је постојао проблем код фонометара што су имали високу излазну импедансу и нису могли да региструју буку ниске фреквенције. Данас је то исправљено.

На слици 50. приказана је блок шема фонометра. Метализирани пластични граничник је врло танак, чак $20 \mu\text{m}$. Отвори омогућавају несметано кретање граничника, док отвори на задњем делу кутије омогућавају кретање ваздуха, али тако да не омета нискофреквентни одговор. Коефицијент температуре осетљивости није као код других фонометра, зато што се диелектрична константа мења.



Слика 50. – Блок шема капацитивног фонометра

Што се тиче примене фонометра у аутомобилској индустрији и саобраћају, користи се за мерење буке или комплетног саобраћаја или возила у целини или неког дела на возилу, као што је, на пример, мотор који ствара највећу буку због начина рада. Бука возила представља утицај возила на околину тако да се током провере техничке исправности возила проверава. Бука у возилу али и самом саобраћају омета возача, утиче на умор и повећава стрес током вожње, што самим тим значи да долази до угрожавања безбедности вожње.

Један капацитивни фонометар је фонометар произвођача Brüel & Kjær 2270 (слика 51.). То је један од најмодернијих фонометра који омогућава повезивање са штампачем, али и са андроид телефонима, где се помоћу одговарајуће апликације могу погледати резултати мерења. На себи има дисплеј на коме се приказују тренутни резултати мерења у децибелима. Такође, има улаз за два канала, региструје фреквенцију у опсегу од 4,2 Hz до 22,4 Hz, односно буку у опсегу од 16,6 dB до 140 dB и то захваљујући микрофону типа 4189. Користи једносмерни напон и има екстерни окидач. За рад користи литијумску батерију и поседује USB 2.0 улаз којим се може повезати на рачунар, штампач или модем и има могућност коришћења меморијске картице, али и слушалица [12].



Слика 51. – Фонометар произвођача Brüel & Kjær 2270

Закључак

Пред модерним возилима се поставља велики број захтева који морају бити задовољени. Да бисмо утврдили да ли одређено возило испуњава све захтеве мора бити подвргнуто испитивању. Некада се то испитивање вршило субјективно и у реалним условима, док је данас то мало другачије. Услед великог напретка у техници и електроници постоје елементи мерних инсталација који олакшавају испитивање, али је због њих испитивање и квалитетније. Капацитивни давачи припадају тој групи елемената.

Капацитивни давачи спадају у групу пасивних давача. Појава која дефинише рад ових давача јесте промена капацитивности. Капацитивност зависи од димензија самог уређаја односно елемената унутар давача, али и од диелектричне константе. Ове даваче одликују једноставност израде, висока резолуција, белика осетљивост и линеарна карактеристика. Прву верзију капацитивног давача направио је научник Келвин. Због могућности коришћења диелектрика приликом израде капацитивног давача, неопходно је познавање електростатике. Научник Максвел је први направио капацитивни давач који у себи има слојеве диелектрика.

Основна подела капацитивних давача је према начину рада и то на: капацитивне даваче са променом растојања између електрода, променом површине или променом диелектрика. Сам назив типа давача говори о његовом принципу рада. Када су у питању давачи са променом растојања, постоје: прости давачи, диференцијални и полу-диференцијални давачи.

Капацитивни давачи се одликују нелинеарном статичком карактеристиком и великом осетљивошћу. Диференцијални давачи су мање осетљиви на сметње и имају већу стабилност и ширу примену. Када су у питању давачи са променом површине имамо просте, полу-диференцијалне, диференцијалне, цилиндричне и угаоне даваче. Код давача са променом диелектрика, капацитет зависи од диелектричне константе изолатора. Разликујемо два типа - са вертикално или хоризонтално постављеним електродама.

Друга подела капацитивних давача је према облику електрода. Најчешће коришћени облик је облик са две паралелне плоче. Поред тога, електроде давача могу бити у више различитих облика. Капацитивност свих ових давача зависи од димензија и растојања електрода.

Капацитивни давачи линеарног помераја, могу мерити веома мале помераје - до $1\mu\text{m}$. Погодни су за употребу су јер имају велику тачност и малу осетљивост на спољашње утицаје. Користе се за испитивање помераја шасије возила у односу на под или помераје клипа амортизера.

Поред тога, у техници испитивања моторних возила користе се: капацитивни давачи притиска, капацитивни давачи нивоа (који се могу користити приликом контролисања нивоа у резервоарима), капацитивни давачи за мерење нивоа провидне и непровидне течности, капацитивни давачи убрзања (који се могу користити и за одређивање осциловања возила), капацитивни давач близине, фонометар са капацитивним микрофоном за одређивање буке на возилу, односно утицаја на околину.

Литература

- [1] Тодоровић, Ј.: „Испитивање моторних возила“, Машински факултет, Београд, 1986.
- [2] Шилић, Ђ.: „Испитивање моторних возила“, Универзитет Велика Горица, 2010.
- [3] Ристић, С.: „Електронске компоненте“, Електронски факултет, Ниш. 2011.
- [4] Regtien, P., Chudy, V., Halaj, M.: „Physical principles of sensors“, Measurement in Technology, Vienna University of Technology, Vienna, Austria, pp. 80-151
- [5] Baxter, K. L.: „Capacitive sensors design and applications“, The Institute of electrical and electronics engineers, New York, 1997
- [6] Поповић, М.: „Сензори и мерења“, Завод за уџбенике и наставна средства Српско Сарајево, 2004.
- [7] Urquidi C. A.: “Capacitive sensor for determining linear or angular position”, US 7049828 B1 Patent, доступно на: <https://www.google.com/patents/US7049828>, приступљено: августа 2016.
- [8] Sensata Germany GmbH: Kavlico Pressure Sensors - PE2000 Ceramic Capacitive OEM Pressure Sensor Datasheet”, доступно на: <http://www.kavlico.com/kavlico-pressure/pressure-products/ceramic-capacitive-pressure-sensors/pe2000#grid>, приступљено: августа 2016.
- [9] CNSC: “Basic Instrumentation Measuring Devices and Basic PID Control“, CNSC training course, CNSC Tehnical treining group, 2003
- [10] Nistico, A.: „Working principle of a capacitive accelometer“, University of Roma Tor Vergata, 2013, доступно на: <https://www.rairarubiabooks.com/related-pdf-principle-of-acceleration-sensors.html> , приступљено: августа 2016.
- [11] SOFTNOZE: „Capacitive proximity sensor theory of operation“ доступно на: www.softnoze.com/downloads/Sensor%20Basics%203.pdf
- [12] Hristoc, L.: „Capacitive proximity detection in the automotive industry“, Atmel Corporation, 2010
- [13] Bruel&Kjaer: “Sound Level Meter - Type 2270 - Overview”, доступно на: <http://www.bksv.com/Products/handheld-instruments/sound-level-meters/sound-level-meters/type-2270#D75EC304B5B64DFD8AC423E558795AAB>, приступљено: августа 2016.
- [14] ASC – Advanced Sensor Calibration: “MEMS Capacitive Accelerometer – Type ASC 3411LN”, доступно на: www.asc-sensors.de , приступљено августа 2016.
- [15] Jewell instruments: „MEMS Accelerometers JMA-100/200/300 series“, доступно на: <http://www.jewellinstruments.com/sensors-and-controls-2/mems-accelerometers/> , приступљено августа 2016.
- [16] Dingtёk: „Fuel level sensor – type F300-4-700“, доступно на: <http://www.dingtёk.com/index.php/iot-sensor/capacitance-level-sensor/level-sensor-f300-4-700.html>, приступљено: септембра 2016.