

ЕКВИВАЛЕНТНО ЕЛЕКТРИЧНО КОЛО ПИЕЗООТПОРНОГ ТРАНСДЈУСЕРА ПРТИСКА

Милош Франтловић, Милољуб Смиљанић, Владислав Јованов

ИХТМ – Центар за микроелектронске технологије и монокристале, Његошева 12, 11000 Београд

Садржај – Изведени су изрази на основу којих је успостављена аналогија између механичких (акустичких) и хидрауличких склопова са једне стране и електричних кола са друге стране. На основу њих је формирано еквивалентно електрично коло трансдјусера притиска са силицијумским пиезоотпорним сензором (производња ИХТМ-ЦМТМ). Резултати рачунарске симулације одзива овог еквивалентног кола у великој се мери слажу са експерименталним резултатима.

1. УВОД

У Центру за микроелектронске технологије и монокристале се већ дуго ради на развоју нових и усавршавању постојећих силицијумских сензора притиска на бази MEMS технологије. Такође постоји и устаљена производња мерача притиска различитих типова и намена, у којима се користе силицијумски пиезоотпорни сензори притиска.

Назив "трансдјусер притиска" означава сензор притиска постављен у посебан механичко-хидраулички склоп. Тај склоп омогућује довођење притиска до сензора, уз остварење одговарајућих радних параметара. Састоји се од низа отвора и канала, који могу бити испуњени флуидом чији се притисак мери (за примене где тај флуид не омета рад сензора). За остале примене, шупљине трансдјусера су испуњене силиконским уљем и тада постоји сепарациона мембрана која раздваја уље и флуид чији се притисак мери.

Динамичке карактеристике трансдјусера притиска зависе од његове конструкције, тј. од механичких и хидрауличких параметара, као што су дужина и ширина канала, дебљина и крутост сепарационе мембране итд. Оптимизација тих параметара је сложен, дуготрајан и скуп процес који обухвата израду комплетног трансдјусера и његово испитивање (више итерација). За анализу динамичких карактеристика (укључујући и испитивање издржљивости на брза преоптерећења) потребно је познавање зависности притиска од времена на месту сензора и (ако је могуће) на месту процесног прикључка трансдјусера, као и утицај механичких и хидрауличких параметара трансдјусера на те зависности. Међутим, анализа чак и једноставних хидрауличких структура (нпр. цилиндрична цев кроз коју протиче флуид) веома је сложена, јер захтева решавање система парцијалних нелинеарних диференцијалних једначина [1,2]. Сложени систем, као што је трансдјусер притиска са мембранама, каналима и коморама неправилног облика, практично није могуће решавати на тај начин. Због тога се приступило формирању еквивалентног електричног кола трансдјусера притиска, пошто су за

решавање електричних кола на располагању ефикасне методе, а за симулацију постоје одговарајући рачунарски програми.

2. ОПИС ПОСТУПКА

Између хидрауличких система и електричних кола успостављене су аналогије, полазећи од тога да су притиску и брзини протицања флуида аналогне електричне величине напон и јачина струје, респективно. Елементима трансдјусера притиска одговарају еквивалентни електрични елементи: отпорност R , индуктивност L и капацитивност C . Дефинисани су начини израчунавања еквивалентних вредности R , L и C за већи број структура које су од интереса. Израз за хидрауличну отпорност, R , коју цев кружног попречног пресека пружа протоку флуида у режиму ламинарног кретања (стационарни случај) [2] је:

$$R = \frac{\delta p}{Q} = \frac{128 \cdot \mu \cdot l}{\pi \cdot D^4} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^4 \cdot \text{s}} \right], \quad \mu = \rho \cdot \nu,$$

где је δp релативна промена притиска, Q је проток, ν динамичка вискозност флуида, ρ густина флуида, l дужина цеви, а D пречник цеви.

Еквивалентна индуктивност, L , је дата као [2]:

$$L = \rho \cdot \frac{l}{D^2 \cdot \pi} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \right]$$

и заправо представља инерцијалност флуида.

Еквивалентна капацитивност, C , представља промену запремине са притиском. Ако се запремина мења услед стишљивости флуида, онда је капацитивност [2]:

$$C_v = -\frac{V}{E} \left[\frac{\text{m}^4}{\text{kg}} \text{s}^2 \right],$$

где је E модул еластичности флуида, а V запремина коморе.

Запремина се може мењати са притиском и због угиба мембране, сензорске или сепарационе. Код сензора SP-9 сензорска мембрана је квадратна, па је капацитивност [2]:

$$C_s = \frac{3 \cdot L^6}{8 \cdot \pi^4 \cdot E \cdot d^3} (1 - \nu^2),$$

где је L дужина странице мембране, d дебљина мембране, а ν Поасонов коефицијент.

Табела 1. Неколико примера хидраулично-електричних аналогија

Електроника					
Хидраулика					

Сепарациона метална мембрана је кружног облика, па је одговарајућа капацитивност [2]:

$$C_m = \frac{\pi \cdot r_0^6}{16 \cdot E \cdot d^3} (1 - \nu^2),$$

где је r_0 полупречник мембране.

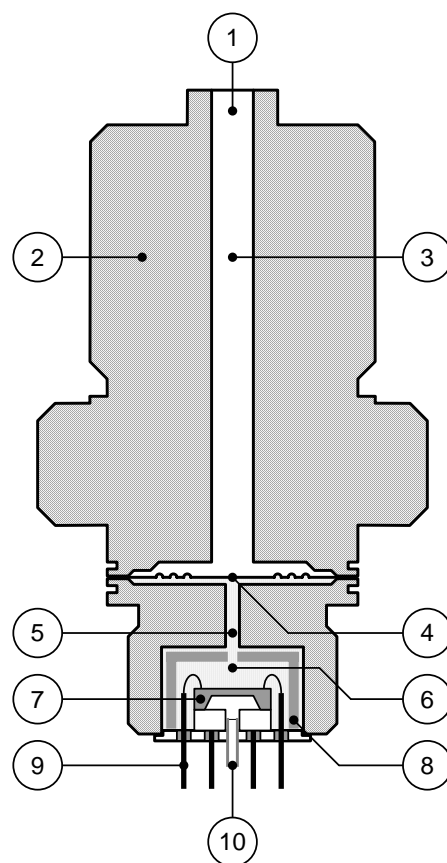
Горњи изрази за еквивалентне елементе R , L и C су наведени да би се могло видети какве су њихове зависности од димензија појединих елемената трансдјусера (укључујући и сензор). Види се да отпорност и индуктивност имају веома јаку зависност од попречног пресека канала. Капацитивност услед стишљивости флуида зависи од запремине флуида, а капацитивност мембране јако зависи од површине и дебљине мембране. У Табели 1 је дато неколико примера хидраулично-електричних аналогија (деталнија табела се налази у [2]).

При формирању еквивалентног електричног кола трансдјусера притиска коришћена су бројна поједностављења. Структура трансдјусера је апроксимирана правилним геометријским облицима, а сматрало се да сваки канал има довољно велику дужину и довољно мали пречник да би кретање флуида у њему било ламинарно. Усвојено електрично коло узима у обзир најважније физичке параметре и појаве у типичном ИХТМ трансдјусеру притиска са пиезоотпорним сензором.

На Сл. 1 је приказан цртеж попречног пресека трансдјусера релативног притиска ИХТМ ТР_р-110а, са означеним најважнијим елементима. Еквивалентно електрично коло тог трансдјусера је приказана на Сл. 2. Вредности елемената одговарају реалним параметрима трансдјусера, а вредности ρ , E и ν се узимају за реалне материјале и флуиде. Коефицијент μ зависи и од механичке обраде канала, па има извесне несигурности у вези са том вредношћу.

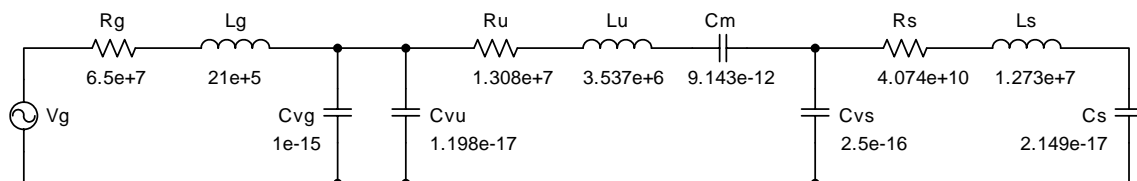
Написан је рачунарски програм који, на основу датих физичких параметара (дужине и ширине канала, димензија и крутости мембрана, вискозности флуида итд.), коришћењем израза датих у овом одељку,

израчунава вредности еквивалентних електричних елемената у колу.



Сл. 1. Пресек трансдјусера релативног притиска:

1. Процесни прикључак
2. Метално кућиште трансдјусера
3. Улазни канал
4. Метална мембрана
5. Канал сензора
6. Уљна испуна
7. Сензор притиска
8. Тефлонска капица
9. Електрични изводи
10. Уводник референтног притиска



Сл. 2. Еквивалентно коло трансдјусера релативног притиска

V_g = Еквивалентни генератор

R_g, L_g = Еквивалентна отпорност и индуктивност канала до трансдјусера притиска

C_{vg} = Еквивалентна капацитивност услед стишљивости флуида у каналу до трансдјусера притиска

C_{vu} = Еквивалентна капацитивност услед стишљивости флуида у улазном каналу трансдјусера

R_u, L_u = Еквивалентна отпорност и индуктивност улазног канала трансдјусера

C_m = Еквивалентна капацитивност металне мембране

C_{vs} = Еквивалентна капацитивност услед стишљивости флуида у комори сензора

R_s, L_s = Еквивалентна отпорност и индуктивност коморе сензора

C_s = Еквивалентна капацитивност мембране пиезорезистивног сензора притиска

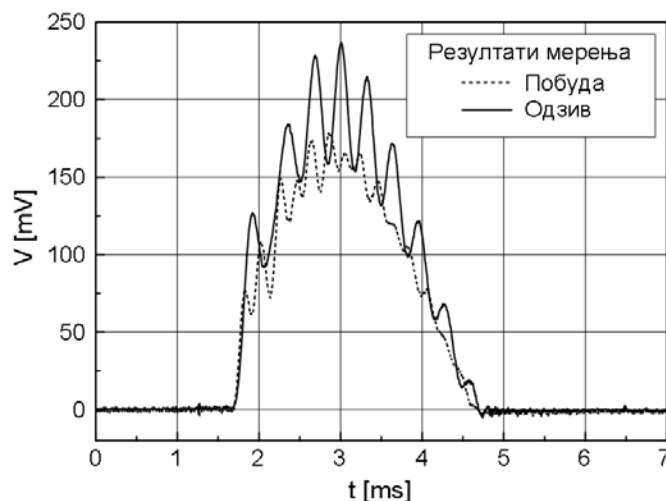
По завршетку програма, покреће се симулација одзива еквивалентне електричне мреже трансдјусера притиска на еквивалентну електричну побуду чији је облик могуће мењати по потреби. Симулација се врши програмом SPICE.

3. РЕЗУЛТАТИ

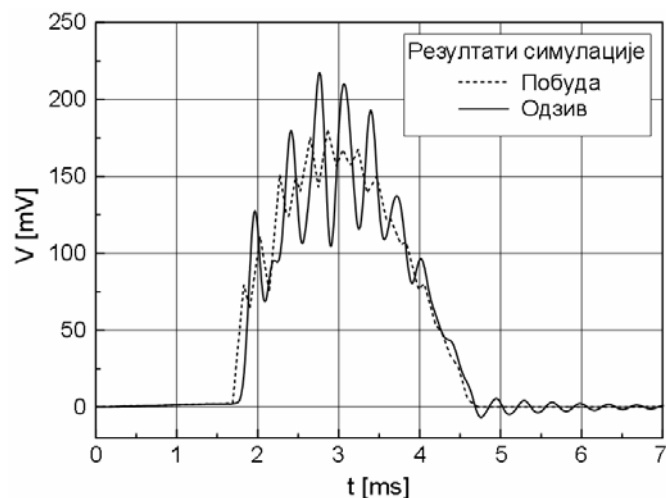
Паралелно са радом на еквивалентном електричном колу, усавршена је апаратура за генерисање импулса притиска променљивог интензитета и снимање одзива сензора, трансдјусера и трансмитера [3]. Тиме је омогућено поређење резултата добијених снимањем одзива реалног трансдјусера притиска и резултата рачунарске симулације одзива еквивалентне електричне мреже на електрични импулс приближно једнаког таласног облика. То поређење је једини начин за верификацију и усавршавање еквивалентног електричног кола, пошто су почетне вредности еквивалентних електричних елемената добијене прорачуном, уз извесне апроксимације и поједностављења. Проблем, који је значајно утицао на одступање почетних резултата симулације од измерених резултата, био је непознавање тачног таласног облика импулса притиска на процесном прикључку испитиваног трансдјусера. Међутим, искуства стечена у раду са генератором импулса притиска довела су до закључка да референтни сензор притиска, који се користи у апаратури, има довољно брз одзив да се може користити за снимање таласног облика побуде. Један такав таласни облик приказан је на Сл. 3 (испрекидана линија). Он одговара импулсу притиска који се генерише у апаратури. На дијаграму се види да овај таласни облик има осцилаторну компоненту. На истом дијаграму (Сл. 3) приказан је и снимљени одзив испитиваног трансдјусера релативног притиска (пуна линија).

При рачунарској симулацији одзива еквивалентне електричне мреже, као побуда је коришћена апроксимација поменутог таласног облика импулса са референтног сензора притиска. На Сл. 4 је приказан дијаграм на којем је испрекиданом линијом

представљена побуда, а пуном линијом одзив еквивалентне електричне мреже.



Сл. 3. Експеримент: снимљени сигнали побуде и одзива за трансмитер чији су подаци дати на Сл. 2



Сл. 4. Симулација: апроксимација побуде и одзива за трансмитер чији су подаци дати на Сл. 2

Поређењем дијаграма на Сл. 3 и Сл. 4 закључује се да постоји велика сличност таласног облика одзива реалног

трансдјусера притиска и одговарајуће еквивалентне електричне мреже. Нпр. карактеристични недостатак другог локалног максимума суперпонираних осцилација постоји и у симулираном одзиву.

4. ЗАКЉУЧАК

Проблем формирања еквивалентног електричног кола трансдјусера притиска сложенији је него што се претпостављало. Резултати до којих се дошло до тренутка писања овог рада су охрабрујући, јер је постигнуто задовољавајуће слагање резултата симулације и експеримента. Међутим, сматрамо да је ово тек почетак рада на моделовању пиезоотпорних трансдјусера притиска.

Неке од могућих будућих активности у оквиру овог истраживања су:

- Испитивање утицаја сваког појединачног елемента трансдјусера: димензија мембрана, дужине и пречника канала, запремине флуида итд. (видети Сл. 1). Део ових активности започет је у раду [3].
- Формирање еквивалентног кола трансдјусера диференцијалног притиска.
- Усавршавање апаратуре за генерисање импулса притиска и усавршавање софтверског решења за прорачун вредности еквивалентних елемената, симулацију и обраду резултата. Апаратуру би требало побољшати тако да се референтни сензор притиска постави што ближе процесном прикључку испитиваног трансдјусера, чиме би се омогућило тачније снимање таласног облика побуде. Такође би било корисно задавање другачијих таласних облика побуде.

Очекујемо да ће резултати који су приказани у овом раду, као и будући резултати, довести до рутинске

употребе симулација у процесу испитивања и оптимизације карактеристика пиезоотпорних трансдјусера притиска.

НАПОМЕНА

Овај рад је делимично финансирано Министарство науке и заштите животне средине Републике Србије, у оквиру пројекта ТР-6101Б.

РЕФЕРЕНЦЕ

- [1] А. Tijsseling, Fluid-Structure Interaction in Liquid-Filled Pipe Systems: a Review, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 10, 109-146, 1996.
- [2] М. Смиљанић, М. Воркапић, Д. Танасковић, *Хидраулично-електричне аналогии код система са дискретним елементима*, студија у оквиру пројекта ИТ.1.04.0063.Б (2002.)
- [3] В. Јованов, М. Смиљанић, М. Франтловић, М. Воркапић, Утицај трансдјусерског кућишта на динамички одзив сензора притиска са заштитним улошком, *XLIX конференција ЕТРАН*, Будва, Црна Гора, 5-10. јун 2005.

Abstract – Analogies between mechanical (hydraulic, acoustic) systems and electrical circuits are established using expressions that we derived. Based on the analogies, the equivalent electrical circuit of the ИТМ piezoresistive transducer is made. A computer simulated response of this circuit matches well our experimental results.

EQUIVALENT ELECTRICAL CIRCUIT OF A PIEZORESISTIVE PRESSURE TRANSDUCER

Miloljub Smiljanić, Miloš Frantlović, Vladislav Jovanov