

**НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУН ПРОТОЧНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ РЕГУЛАЦИОНОГ ВЕНТИЛА****NUMERICAL CALCULATION OF A CONTROL VALVE FLOW CHARACTERISTIC**

Марко Вукић, Факултет техничких наука, Нови Сад

**Област – МАШИНСТВО**

**Кратак садржај** – У овом раду извршено је поређење проточне карактеристике вентила, добијене применом рачунарске динамике флуида, у програму „SimFlow“, са карактеристикама вентила добијених применом познатих аналитичких израза из литературе.

**Кључне речи:** Регулациони вентил, рачунарска динамика флуида, нумерички прорачун, карактеристика вентила, параметар протока

**Abstract** – In this paper, a comparison was made of the valve flow characteristic obtained using computational fluid dynamics, in the "SimFlow" software, with the results obtained using known analytical formulae taken from literature.

**Keywords:** Regulating valve, Computational fluid dynamics, Numerical calculation, Valve characteristic, Flow coefficient

**1. УВОД**

Рачунарска динамика флуида је моћан инжењерски алат који се користи за симулацију и анализу феномена везаних за динамику флуида кроз нумеричко решавање тзв. основних једначина. Коришћењем математичких метода и рачунарских алгоритама, рачунарска динамика флуида омогућава инжењерима и истраживачима да стекну увид у сложена понашања флуида, предвиде перформансе и оптимизују конструкције различитих машина и апарата у широком спектру апликација.

Регулација протока и притиска је кључан аспект у бројним индустријама, од нафте и гаса, до третмана воде и шире. У области регулације система концепти параметра протока и проточне карактеристике вентила су од фундаменталног значаја. Параметар протока вентила представља запремински проток флуида који пролази кроз вентил под одређеним условима, обично при паду притиска од 1 bar. Функција која представља промену параметра протока у зависности од отворености вентила назива се проточна карактеристика вентила.

У овом раду урађено је поређење нумерички израчунате проточне карактеристике вентила, у функцији

отворености вентила, са карактеристикама израчунатих помоћу познатих аналитичких израза преузетих из литературе. Анализиран је регулациони вентил компаније „Термовент СЦ“, називног пречника DN 100, називног притиска PN 16, параметра протока при максималној отворености од 160 m<sup>3</sup>/h и хода од 52 mm. Регулационо тело овог вентила је обликовано (према произвођачу) тако да вентил има линеарну карактеристику, међутим, карактеристика овог вентила никада заправо није испитана. Параметар протока нумерички је израчунат применом рачунарске динамике флуида, методом коначних запремина у програму „SimFlow“.

**2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД**

Параметар протока, који зависи од отворености вентила  $\bar{h}$  [%], једнак је протоку кроз вентил ( $Q$  [m<sup>3</sup>/h]) при паду притиска на вентилу од 1 bar, односно

$$K_v(\bar{h}) = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}}, \quad (1)$$

при чему су:

$Q$  [m<sup>3</sup>/h] – проток кроз вентил, и

$\Delta p$  [bar] – пад притиска кроз вентил.

Произвођачи вентила често у својим каталозима дају дијаграме који приказују зависност параметра протока од отворености вентила. Ова зависност може да буде: линеарна, равнопроцентна (истопроцентна), брзоотварајућа, итд. Карактеристике вентила у функцији отворености вентила могу се израчунати аналитички, тако да за линеарну, равнопроцентну, параболичну и брзоотварајућу карактеристику важе следеће формула, респективно, [1, 2]:

$$K_v(\bar{h}) = (R^{-1} + (1 - R^{-1}) \cdot \bar{h}_{lin}) K_{vs}, \quad (2)$$

$$K_v(\bar{h}) = (R^{-1} e^{\bar{h}_{par} \cdot \ln R}) K_{vs}, \quad (3)$$

$$K_v(\bar{h}) = (R^{-1} + (1 - R^{-1}) \cdot \bar{h}_{par}^2) K_{vs} \quad \text{и} \quad (4)$$

$$K_v(\bar{h}) = \sqrt{\bar{h}_{bo}} K_{vs}, \quad (5)$$

при чему су:

**НАПОМЕНА:**

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Слободан Ташин, ванр. проф.

$K_{vs}$  [ $m^3/h$ ] – параметар протока при отворености вентила од 100% (потпуно отворен вентил), и

$R$  [-] – регулациони однос вентила, тј. однос максималног и минималног протока кроз вентил.

Карактеристика вентила зависи, као што је речено, од отворености вентила, док је тип зависности условљен обликом самог регулационог тела. Различити облици регулационог тела приказани су на слици 1.

За манипулацију 3Д модела вентила коришћен је програм „Inventor Professional“ компаније „Autodesk“, док је за нумеричку симулацију коришћен је програм „SimFlow“ који је развила компанија „SIMFLOW Technologies“.

У програму „Inventor Professional“ направљено је 10 верзија регулационог вентила, са цевном деоницом дужине 1 m испред и иза вентила, које се разликују само по положају регулационог тела. Прва верзија направљена је тако да регулационо тело буде на 10% отворености, док је свака наредна верзија имала већу отвореност, са кораком по 10%. Самим тим, у последњој верзији отвореност вентила 100%. Свака верзија модела сачувана је посебно у .stp формату, како би касније могла да се отвори у програму „SimFlow“.

У програму „SimFlow“ учитан је један од претходно креираних 3Д модела. Применом генератора мреже који је уграђен у „SimFlow“, генерисана је мрежа која представља запремину флуида унутар регулационог вентила. За тип домена изабран је квадар (енг. Box). Димензије овог квадрата су такве да је дуж  $x$ -осе маргинално краћи од крајева цеви, како би их препознао као почетак, односно крај домена, док дуж осталих оса таквих димензија да обухвата читаву геометрију модела.

Број подела домена је 18 дуж  $x$ -осе, између 17 и 18 дуж  $y$ -осе, и између 15 и 16 дуж  $z$ -осе, у зависности од варијанте отворености вентила. Границе су адекватно дефинисане, како би програм препознао улаз, односно излаз из домена, а материјална тачка је постављена унутар геометрије како би програм препознао да се ради о унутрашњем струјању. Због ограничења

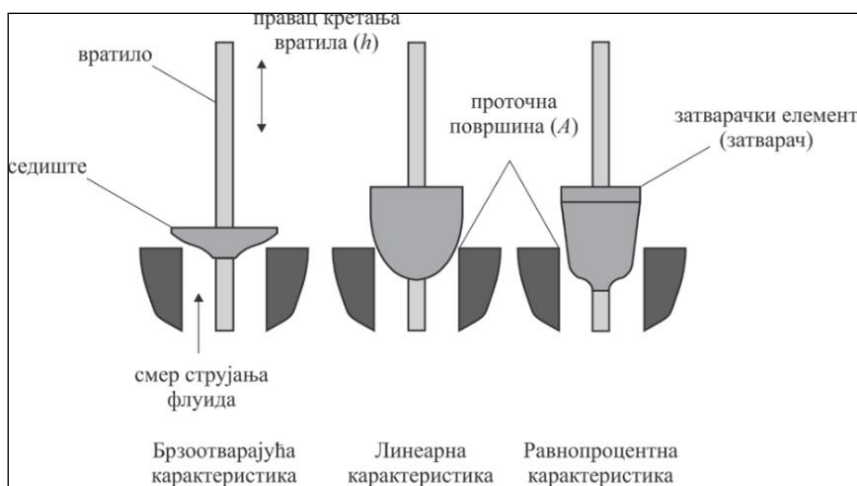
лиценце, број ћелија који је генерисан износи између 100 и 109 хиљада, у зависности од варијанте отворености вентила. Да би мрежа имала адекватан квалитет (у смислу облика ћелија), ћелије граничног слоја нису генерисане, те су све расположиве ћелије „потрошене“ на основну мрежу. Програм „SimFlow“ садржи 50 различитих решавача. За проблем струјања воде кроз регулациони вентил, као решавач одабран је SIMPLE.

Решавач SIMPLE погодан је управо за случајеве стационарног, некомп्रेसибилног струјања једнофазног флуида. У програму „SimFlow“ постоји могућност одабира групе модела турбуленције, односно изостављања истог. За овај случај изабран је RANS приступ моделирању турбуленције, односно у оквиру њега одабран је модел турбуленције  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport – срп. пренос тангенцијалног напона). С обзиром да се ради о стационарном струјању, дискретизација по времену није потребна. Због своје стабилности при раду са мрежама лошијег квалитета, за шему дискретизације брзине, кинетичке енергије турбуленције, и брзине дисипације кинетичке енергије изабрана је Uрwind шема дискретизације. 3

а градијенте је примењена линеарна Грин-Гаусова метода дискретизације, и изабран је метод линеарне интерполације за рачунање вредности кроз цео домен. У зависности од изабраног решавача, програм даје могућност промене само оних термофизичких величина које су релевантне за изабрани решавач и изабрани модел флуида (у овом случају изабран је Њутновски модел флуида, пошто се ради о води).

За посматрани проблем, једина релевантна величина јесте кинематска вискозност. Програм „SimFlow“ садржи библиотеку, односно каталог најчешће коришћених материјала (под материјалом се подразумевају флуиди) са њиховим термофизичким величинама, тако да корисник не мора да их памти, или тражи из литературе.

За тражену кинематску вискозност узета је кинематска вискозност воде, која је у програму преддефинисана као  $10^{-6} m^2/s$ .



Слика 1. Различити облици регулационог тела [1]

На улазу у цевовод (*енг. Inlet*) гранични услов дефинисан је као „Pressure Inlet“ (*срп. притисак на улазу*), и унето је да тотални притисак износи  $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , из разлога што је притисак за нестишљиве флуиде у програму „SimFlow“ увек изражен као кинематски притисак, односно притисак подељен са густином. Пошто је густина воде  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ , то значи да је притисак на почетку цевовода заправо дефинисан као  $10^5 \text{ Pa}$ , односно  $1 \text{ bar}$ . На излазу из цевовода (*енг. Outlet*) дефинисан је гранични услов „Pressure Outlet“ (*срп. притисак на излазу*) и притисак је унет као  $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Самим тим, пошто разлика између притисака на почетку и крају цевовода износи  $1 \text{ bar}$ , проток који се добије биће заправо једнак параметру протока  $K_v$ . Брзина, турбулентна кинетичка енергија, као и специфична брзина дисипације аутоматски су дефинисане у програму и те вредности нису мењане. Пошто програм „SimFlow“ нема могућност праћења протока у току итерација, дефинисано је да се прати брзина на улазу у цевовод. Урађено је по 500 итерација за свих 10 варијанти отворености вентила.

Пошто је познат унутрашњи пречник цевовода ( $107,1 \text{ mm}$ ), може се израчунати проток на улазу

$$Q_{num} = \frac{4 \cdot u_{num}}{d^2 \pi} \quad (6)$$

при чему су:

$u$  [m/s] – брзина струјања, и

$d$  [m] – унутрашњи пречник цевовода.

Иста вредност, јасно је, добила би се и коришћењем брзине на излазу, пошто због једначине континуитета проток мора бити једнак и на улазу и на излазу у цевовод. Као што је објашњено, пошто је у питању струјање воде при константном паду притиска од  $1 \text{ bar}$

$$K_{vnum} = Q_{num} \quad (7)$$

Проверена је релативна грешка добијене нумеричке вредности у односу на аналитички израчунату вредност за линеарну карактеристику (која је израчуната према једначини (2)), као и за равнопроцентну, параболичну и брзоотварајућу карактеристику (према једначинама (3), (4), и (5), респективно):

$$\varepsilon_{lin} = \frac{K_{vnum} - K_{vlin}}{K_{vlin}} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{rp} = \frac{K_{vnum} - K_{vvp}}{K_{vvp}} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{par} = \frac{K_{vnum} - K_{vpar}}{K_{vpar}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{bo} = \frac{K_{vnum} - K_{vbo}}{K_{vbo}} \quad (11)$$

Регулациони однос вентила који фигурише у аналитичким једначинама за параметар протока усвојен је према препорукама из литературе [3]. Он представља однос максималног и минималног протока при којем вентил задржава регулациону карактеристику. Конкретно, за линеарну карактеристику усвојен је регулациони однос 33, за брзоотварајућу 20, док је за равнопроцентну и параболичну карактеристику усвојен регулациони однос 50.

### 3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Резултати урађених нумеричких симулација, аналитички резултати, као и релативне грешке, дати су у табели 1. На слици 2. су графички приказани аналитички и нумерички добијени параметри протока.

Као што се може видети, карактеристика вентила добијена нумеричком симулацијом не изгледа у потпуности као аналитички добијена линеарна карактеристика. Види се да не изгледа ни као аналитички добијена равнопроцентна, параболична или брзоотварајућа карактеристика.

Међутим, као што је речено, карактеристика овог вентила никада није проверена од стране произвођача, тако да се не може искључити могућност да су резултати симулације исправни, а да карактеристика вентила није заправо линеарна као што произвођач очекује да буде.

Оно што се такође да приметити јесте да нумерички добијен параметар протока при максималној отворености вентила  $K_{vs}$  не износи очекиваних  $160 \text{ m}^3/\text{h}$ , већ  $128,77 \text{ m}^3/\text{h}$ , што значи да релативна грешка износи  $19,52\%$ , што није уопште занемарљиво. Гледајући резултате уопштено, може се приметити да највеће одступање у односу на линеарну карактеристику настаје при отворености мањој од  $30\%$ , и већој од  $80\%$ .

Један од могућих разлога добијеног одступања нумеричких вредности од аналитичких јесте што мали број ћелија који је генерисан (услед ограничења лиценце) потенцијално не даје довољно прецизне резултате. Због релативно малог броја генерисаних ћелија, исте су у одређеним деловима мреже веома неправилних облика, што свакако неповољно утиче на поузданост симулације. Такође, приликом генерисања мреже нису генерисане ћелије које представљају гранични слој (такође услед ограничења лиценце), што такође има утицај на резултате, с обзиром да је утицај граничног слоја битан, поготово када се ради о веома малим удаљеностима између зидова (као што је нпр. удаљеност између регулационог тела и зида вентила, посебно при нижим вредностима отворености вентила).

Битно је такође нагласити да је ова анализа ограничена релативно уским опсегом параметара: симулације су урађене само у једном програму, разматран је само један вентил, један модел турбуленције, као и само једна од могућих варијанти граничних услова.

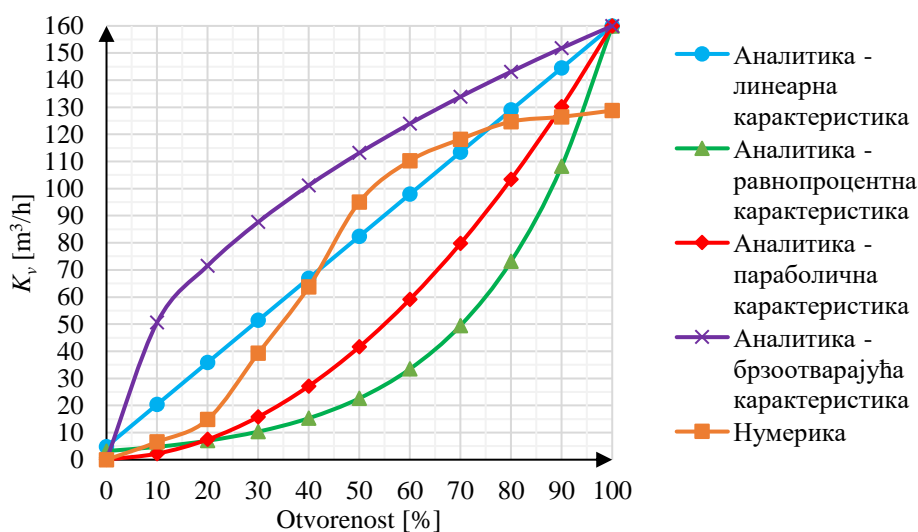
#### 4. ЗАКЉУЧАК

Све наведено указује на потребу даљег развоја овакве нумеричке симулације (у неком другом програму за РДФ, уз повећање броја ћелија, за различите величине вентила, уз различите моделе турбуленције, различите граничне услове, итд.). Пре свега, требало би заправо

испитати карактеристику вентила, али свакако би требало и поновити ову нумеричку симулацију за параметре наведене у овом раду али уз генерисање далеко већег броја ћелија, након чега треба размотрити добијене резултате, како би се могло одлучити о даљем поступку.

Табела 1. Резултати нумеричке симулације и поређење са аналитичким резултатима

$\bar{h}$ [%]	$u_{num}$ [m/s]	$Q_{num}$ [m <sup>3</sup> /s]	$K_{vnum}$ [m <sup>3</sup> /h]	$K_{vlin}$ [m <sup>3</sup> /h]	$K_{vvp}$ [m <sup>3</sup> /h]	$K_{vpar}$ [m <sup>3</sup> /h]	$K_{vbo}$ [m <sup>3</sup> /h]	$\varepsilon_{lin}$ [%]	$\varepsilon_{vp}$ [%]	$\varepsilon_{par}$ [%]	$\varepsilon_{bo}$ [%]
0	0	0	0	0	0	0	0	–	–	–	–
10	0,201	0,00181	6,52	20,36	4,73	2.23	50.6	67,98	-37,84	-192.38	87.11
20	0,457	0,00412	14,83	35,88	7	7.46	71.55	58,67	-111,86	-98.79	79.27
30	1,21	0,0109	39,24	51,39	10,35	15.78	87.64	23,64	-279,13	-148.67	55.23
40	1,96	0,01766	63,74	66,91	15,3	27.16	101.19	4,74	-316,6	-134.68	37.01
50	2,93	0,0264	95,04	82,42	22,63	41.62	113.14	-15,31	-319,97	-128.35	16
60	3,4	0,03063	110,27	97,94	33,46	59.15	123.94	-12,59	-229,56	-86.42	11.03
70	3,65	0,03288	118,21	113,45	49,48	79.75	133.87	-4,2	-138,9	-48.23	11.7
80	3,85	0,03468	124,69	128,97	73,17	103.43	143.11	3,32	-70,41	-20.55	12.87
90	3,9	0,03513	126,47	144,48	108,2	130.18	151.79	12,47	-16,89	2.85	16.68
100	3,97	0,03577	128,77	160	160	160	160	19,52	19,52	19.52	19.52



Слика 2. Поређење аналитичких карактеристика вентила са нумеричком

#### 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] [https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/control-hardware-electric-pneumatic-actuation/control-valve-characteristics?sc\\_lang=en-GB](https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/control-hardware-electric-pneumatic-actuation/control-valve-characteristics?sc_lang=en-GB) (приступљено у марту 2024.)
- [2] Д. Узелац, Пумпне и компресорске станице, ФТН скрипта, 2014
- [3] <https://www.flocontrol.ltd.uk/what-is-rangeability-and-turndown-ratio-and-why-is-it-important/> (приступљено у марту 2024.)

#### Кратка биографија:



**Марко Вукић** рођен је у Новом Саду 2000. год. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области машинства – енергетике и процесне технике одбранио је у јулу 2023. У новембру 2023. год. изабран је у звање сарадника у настави за ужу научну област механика флуида, хидропнеуматска, гасна и нафтна техника, на Катедри за механику флуида и хидропнеуматске системе, у оквиру Департамана за енергетику и процесну технику.

контакт: marko.vukic@uns.ac.rs