



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централа: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАџМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН ОД:



РАЗВОЈ МЕТОДЕ МЕРЕЊА ПРОТОКА ВАЗДУХА ПОМОЋУ РЕГУЛАЦИОНЕ ЖАЛУЗИНЕ

Ментор:
Проф. др Душан Узелац

Кандидат:
мр Сениша Бикић

Нови Сад
2013.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ● ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :	--	
Идентификациони број, ИБР :	--	
Тип документације, ТД :	Монографска публикација	
Тип записа, ТЗ :	Текстуални штампани материјал	
Врста рада, ВР :	Докторска дисертација	
Аутор, АУ :	Мр Синиша Бикић	
Ментор, МН :	Проф. др Душан Узелац	
Наслов рада, НР :	Развој методе мерења протока ваздуха помоћу регулационе жалужине	
Језик публикације, ЈП :	Српски	
Језик извода, ЈИ :	Српски/енглески	
Земља публикавања, ЗП :	Република Србија	
Уже географско подручје, УГП :	Аутономна Покрајина Војводина	
Година, ГО :	2013	
Издавач, ИЗ :	Ауторски репринт	
Место и адреса, МА :	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6	
Физички опис рада, ФО : (поглавља/страница/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	9/245/267/35/106/276/0	
Научна област, НО :	Техничко – технолошке науке	
Научна дисциплина, НД :	Механика флуида	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	АТР жалужина, механика флуида, динамика флуида, рачунарска динамика флуида	
УДК	--	
Чува се, ЧУ :	У библиотеци Факултета техничких наука у Новом Саду	
Важна напомена, ВН :	--	
Извод, ИЗ :	Предмет истраживања у оквиру докторске дисертације је развој методе и мерила запреминског протока ваздуха. Запремински проток ваздуха мерен је квадратном регулационом АТР (Air Torque Position) жалужином на посредан начин, мерењем момента којим ваздушна струја делује на лопатицу и положаја лопатице жалужине. Циљ истраживања је у потпуности реализован при чему је развијена АТР жалужина за мерење запреминског протока ваздуха са лопатицама које не формирају решетку и за њу је на основу експерименталних података формиран и верификован адекватан математички модел. Потврђена је основна хипотеза докторске дисертације да дефинисани математички модел може успешно да се користи за тачно и поуздано мерење запреминског протока ваздуха. Разлика између измерене и моделске брзине је +/-10 % од тренутно измерене брзине струјања.	
Датум прихватања теме, ДП :	10.01.2010.г.	
Датум одбране, ДО :	--	
Чланови комисије, КО :	Председник:	др Срђан Колаковић, редовни професор
	Члан:	др Слободан Савић, ванредни професор
	Члан:	др Мирко Бабић, редовни професор
	Члан:	др Маша Букуров, ванредни професор
	Члан, ментор:	др Душан Узелац, редовни професор
		Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Образац Q2.НА.04-05 - Издање 1

Accession number, ANO :	--	
Identification number, INO :	--	
Document type, DT :	Monographic publication	
Type of record, TR :	Textual printed material	
Contents code, CC :	Ph.D. Thesis	
Author, AU :	Siniša Bikić, MSc	
Mentor, MN :	Professor Dušan Uzelac, Ph.D.	
Title, TI :	Development of method for air flow measuring with control damper	
Language of text, LT :	Serbian	
Language of abstract, LA :	Serbian/English	
Country of publication, CP :	Republic of Serbia	
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina	
Publication year, PY :	2013	
Publisher, PB :	Author's reprint	
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6	
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9/245/267/35/106/276/0	
Scientific field, SF :	Technical and Technological Sciences	
Scientific discipline, SD :	Fluid Mechanics	
Subject/Key words, S/KW :	ATP Damper, Fluid Mechanics, Fluid Dynamics, CFD	
UC	--	
Holding data, HD :	In the Library of the Faculty of Technical Sciences Novi Sad	
Note, N :	--	
Abstract, AB :	The object of the research in the dissertation was development of method and equipment for air flow rate measuring. Volumetric air flow rate was measured by square shaped control ATP (Air Torque Position) damper. Air flow rate was indirectly determined by measuring of the moment of air flow acting on the blade and the blade damper position. The aim of the research was fully realized with the developed ATP damper for measuring of volumetric air flow rate, where blades of damper did not form a lattice. Based on the experimental data has been developed and verified an adequate mathematical model. The difference between the measured and the model's velocity is + / -10% of the current measured air flow velocity. Mathematical model can be successfully used for accurate and reliable measurement of the air flow rate. In this way was confirmed the basic hypothesis of dissertation.	
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	10.01.2010.	
Defended on, DE :		
Defended Board, DB :	President:	Dr Srđan Kolaković, professor
	Member:	Dr Slobodan Savić, associate professor
	Member:	Dr Mirko Babić, professor
	Member:	Dr Maša Bukurov, associate professor
	Member, Mentor:	Dr Dušan Uzelac, professor

Menthor's sign

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. ПРЕГЛЕД РАЗВОЈА МЕТОДА МЕРЕЊА И РЕГУЛАЦИЈЕ ПРОТОКА ВАЗДУХА У HVAC СИСТЕМИМА	5
2.1 Увод	5
2.2 Методе мерења и регулације протока ваздуха у VAV системима	8
2.2.1 Биланс масе угљен – диоксида CO ₂	9
2.2.2 Биланс енталпије ваздуха економијзера	9
2.2.3 Регулација протока свежег ваздуха потисним и повратним вентилаторима	12
2.2.4 Одржавање константног притиска коморе за мешање	12
2.2.5 Одржавање константног динамичког притиска ОА жалюзине	13
2.2.6 Мерење протока свежег ваздуха у цеви за довод свежег ваздуха	14
2.2.7 Мерење протока ваздуха моделом вентилатора	21
2.2.8. Мерење протока ваздуха регулацијским сигнаlima	23
2.2.9 Регулација количине свежег ваздуха релацијом између сигнала потисног вентилатора и ОА жалюзине	24
2.2.10 Инјектовање свежег ваздуха вентилатором	25
2.2.11 Регулација протока ваздуха терминал боксом	25
2.2.12 Регулација минималне количине свежег ваздуха бокс терминалом	28
2.3 Развој жалюзина за потребе мерења и регулације протока ваздуха у HVAC системима	28
2.3.1 Утицај локације жалюзине на мерење протока ваздуха	28
2.3.2 Утицај ауторитета жалюзине на мерење и регулацију протока ваздуха	31
2.3.3 Линеаризација регулацијског сигнала жалюзине	32
2.3.4 Хистерезис регулационе жалюзине	34
2.3.5 Испитивање различитих типова регулационих жалюзина – остали утицајни фактори	36
2.3.6 Поузданост мерења и регулације протока ваздуха жалузинама	39
2.4 Мерење протока ваздуха АТР жалузином	42
2.5 Закључна разматрања	46
3. ЛАБОРАТОРИЈСКИ ПРОТОТИП АТР ЖАЛУЗИНЕ	47
3.1 Увод	47
3.2 Регулационе клапне и жалюзине	47
3.3 Формирање лабораторијског прототипа АТР жалюзине	49
3.3.1 Измештање осе обраћања лопатице клапне	49
3.3.2 Формирање угламера за одређивање положаја лопатице АТР жалюзине	52
3.3.3 Смањење мртвог момента мерне лопатице АТР жалюзине	56
3.3.4 Смањење угиба лопатице АТР жалюзине	57
3.3.5 Технички опис и принцип рада лабораторијског прототипа АТР жалюзине	63

3.3.6	Избор мерне полуге и сензора за мерење масе АТР жалузине	65
3.3.7	Калибрисање мерила момента АТР жалузине	68
3.3.8	Калибрисање ротационог потенциометра	70
3.4	Закључна разматрања	72
4.	РАЗВОЈ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА И ПЛАН ИСТРАЖИВАЊА АТР ЖАЛУЗИНА	73
4.1	Увод	73
4.2	Развој математичког модела АТР жалузине	73
4.2.1	Аксијална сила којом ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалузине	76
4.2.2	Попречна сила којом ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалузине	78
4.2.3	Момент којим ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалузине	79
4.3	План истраживања АТР жалузине реализованих у прошлости	80
4.4	План истраживања АТР жалузине предвиђених докторском дисертацијом	81
4.4.1	Основна хипотеза докторске дисертације	81
4.4.2	Положај АТР жалузине на VAV систему	83
4.4.3	Утицај ауторитета АТР жалузине	84
4.4.4	Тип АТР жалузине	84
4.4.5	Пресек АТР жалузине	85
4.4.6	Мртви момент мерне лопатице АТР жалузине	85
4.4.7	Корекциони фактор момента АТР жалузине	86
4.4.8	Пад притиска кроз АТР жалузину	86
4.4.9	Потрошња енергије АТР жалузине	86
4.4.10	Коефицијент протока АТР жалузине	87
4.4.11	Нула АТР жалузине	87
4.4.12	Режим струјања ваздуха кроз АТР жалузине	88
4.4.13	Линеарност карактеристике АТР жалузине	88
4.4.14	Верификација математичког модела АТР жалузине	88
4.4.15	Утицај отпора испред и иза АТР жалузине	89
4.4.16	Утицај густине ваздуха	90
4.4.17	Неизвесност мерења брзине струјања АТР жалузином	91
4.4.18	Карактеристике преносне функције АТР жалузине	94
4.4.19	Радни век АТР жалузине	99
4.4.20	Нумеричке симулације рада АТР жалузине	99
4.5	Закључна разматрања	101
5.	ЛАБОРАТОРИЈСКО ПОСТРОЈЕЊЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ АТР ЖАЛУЗИНА	102
5.1	Увод	102
5.2	Поставке експеримента на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузине	102
5.2.1	Поставка експеримента за потребе верификације математичког модела АТР жалузине	103
5.2.2	Поставка експеримента за потребе верификације нумеричких модела АТР жалузине	117
5.2.3	Поставка експеримента за потребе континуалног мерења момента	

АТР жалузина	119
5.3 Закључна разматрања	122
6. НЕИЗВЕСНОСТ МЕРЕЊА БРЗИНЕ СТРУЈАЊА ВАЗДУХА АТР ЖАЛУЗИНОМ	123
6.1 Увод	123
6.2 Неизвесност мерења непосредно мерене физичке величине	123
6.2.1 Основни термини теорије грешака	123
6.2.2 Стандардно одступање	124
6.2.3 Неизвесност средње аритметичке вредности	125
6.2.4 Примена студендове расподеле	128
6.2.5 Расподела χ^2 (Chi квадрат)	128
6.2.6 Критеријум Шовенеа (Chauvennet)	129
6.3 Неизвесност мерења посредно мерене физичке величине	131
6.3.1 Непоузданост посредно мерене физичке величине	132
6.3.2 Систематска грешка посредно мерене физичке величине	134
6.4 Неизвесност мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузеном	134
6.4.1 Непоузданост мерења брзине струјања АТР жалузеном	134
6.4.2 Систематска грешка мерења брзине струјања АТР жалузеном	136
6.5 Закључна разматрања	136
7. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА И АНАЛИЗА ПОДАТАКА	137
7.1 Увод	137
7.2 Мртви момент мерне лопатице АТР жалузине	137
7.3 Корекциони фактор АТР жалузине	137
7.4 Пад притиска кроз АТР жалузину	138
7.5 Губитак снаге на АТР жалузине	140
7.6 Снага вентилатора неопходна за рад АТР жалузине	142
7.7 Коефицијент протока АТР жалузине	144
7.8 Нула АТР жалузине	145
7.9 Режим струјања ваздуха кроз АТР жалузине	147
7.10 Линеарност АТР жалузине	148
7.11 Верификација математичког модела АТР жалузине	148
7.11.1 Корелацијска функција математичког модела АТР жалузине	148
7.11.2 Верификација математичког модела не узимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине	149
7.11.3 Верификација математичког модела узимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине	153
7.12 Утицај локалног отпора на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузеном	157
7.12.1 Утицај локалног отпора не узимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине	157
7.12.2 Утицај локалног отпора узимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине	162
7.13 Утицај густине на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања АТР жалузеном	167

7.13.1 Утицај натпритиска ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузином	167
7.13.2 Утицај атмосферског притиска на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузином	170
7.13.3 Утицај температуре ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузином	173
7.14 Утицај ауторитета на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузином	177
7.15 Расипање мерних резултата АТР жалузине	178
7.16 Неизвесност мерења брзине струјања АТР жалузином	186
7.17 Карактеристике преносне функције АТР жалузине	189
7.18 Радни век АТР жалузине	191
7.19 Закључна разматрања	192
8. ПРИМЕНА РАЧУНАРСКЕ ДИНАМИКЕ ФЛУИДА У РАЗВОЈУ АТР ЖАЛУЗИНЕ	193
8.1 Увод	193
8.2 Сакупљање података о сличним физичким моделима	194
8.3 Дефинисање геометријског модела домена	194
8.4 Избор математичког модела	195
8.5 Дискретизација простора	197
8.6 Дискретизација једначина	201
8.7 Гранични услови	202
8.8 Модели турбуленције	203
8.9 Итеративно решавање нумеричке шеме	206
8.10 Анализа резултата са аспекта стабилности и тачности	206
8.10.1 Критеријум конвергенције	206
8.10.2 Вредност решење физичке величине од интереса	207
8.10 Постпроцесирање	208
8.11 Експериментална верификација решења нумеричке симулације	209
8.12 Резултати експерименталне верификације нумеричке симулације	210
8.12.1 Провера профила брзине струјања иза лопатице АТР жалузине	210
8.12.2 Математичко моделирање решењима нумеричке симулације	212
8.13 Закључна разматрања	214
9. ЗАКЉУЧАК	215
ОЗНАКЕ	219
ЛИТЕРАТУРА	240

1. УВОД

Предмет истраживања у оквиру докторске дисертације је развој методе и мерила запреминског протока ваздуха. Запремински проток ваздуха мерен је квадратном регулационом жалузинуом на посредан начин, мерењем момента којим ваздушна струја делује на лопатицу и положаја лопатице жалузине. При опструјавању лопатице ваздух делује аеродинамичким силама. Величине аеродинамичких сила зависе од геометрије и орјентације лопатице. Аеродинамичке силе производе аеродинамички момент на лопатици који је у вези са брзином струјања испред лопатице и положајем лопатице.

На основу измерених вредности брзине струјања ваздуха, положаја лопатице и момента којим ваздушна струја делује на лопатицу жалузине урађено је математичко моделирање и верификација математичког модела. Коришћењем добијеног математичког модела брзина струјања ваздуха одређује се посредно мерењем положаја лопатице и момента којим ваздушна струја делује на лопатицу жалузине. Запремински проток ваздуха Q производ је измерене брзине струјања ваздуха v и површине попречног пресека испред регулационе жалузине A :

$$Q = v \cdot A. \quad (1.1)$$

Мерење запреминског протока ваздуха реализовано је конструкцијским изменама у односу на комерцијалне квадратне регулационе жалузине. Конструкционе измене: измештена је оса обртања лопатице из осе лопатице, формиран је механизам за пренос момента ваздушне струје кочењем лопатице мерилом момента, формиран је угломер за дефинисање положаја лопатице и оптимизована је геометрија лопатице.

Измештањем осе обртања лопатице из осе лопатице регулациона жалузина постала је довољно осетљива да може да мери момент ваздушне струје. Кочењем лопатице мерилом момента омогућено је да се момент којим ваздушна струја делује на лопатицу пренесе и мери на мерилу момента. Геометрија лопатице је оптимизована, а механизам преноса момента тако изведен да су знатно смањени момент трења и момент савијања лопатице (“паразитни” моменти који смањују тачност мерења). На овај начин је постигнуто да је момент којим ваздушна струја делује на лопатицу знатно већи од збира “паразитних” момената у преносном механизму.

Моментна карактеристика регулационе арматуре била је предмет ранијих истраживања. Сарфкаја (Sарfкаја, 1959, 1961) је уз претпоставку невртложног и нестишљивог струјања флуида, развио теоријски модел који се показао као веома тачан у предвиђању моментне карактеристике лептир вентила са танким зидом. Огава и др. (Ogawa et al., 1995) анализирали су моментну карактеристику лептир вентила комбинујући теорију слободног струјања и експерименте. Аутори су дошли до једначина које предвиђају моментну карактеристику лептир вентила које су кориговане узимањем у обзир утицаја зидова цеви и дебљине лептира. Хазенфлуг (Hasenpflug, 1998) редефинисао је Сарфкајин модел користећи теорију слободне струјнице, где је визуелно приказао неколико решења потенцијалног струјања ваздуха кроз лептирасти затварач. Модел моментне карактеристике лептирастог затварача који узима у обзир стишљивост флуида развили су Морис и др. (Morris et al., 1989).

Федершпил (Federspiel, 2004a, 2004b) прилагодио је модел моментне карактеристике лептирастог вентила који је предложио Хазенфлуг (Hasenpflug, 1998) за једну лопатицу регулационе жалузине квадратног пресека. Услед везе између брзине

струјања ваздуха, момента којим ваздушна струја делује на лопатицу и положаја лопатице, Федершпил је мерни уређај назвао АТР¹ (Air Torque Position) жалузина. Математички модел који је развио Федершпил могао би да има универзални карактер и да се користи за различите пресеке, облике лопатица, број лопатица и начин вођења лопатица. Међутим, аутор је испитивање методе и верификацију математичког модела урадио само за АТР жалузину следећих карактеристика:

- квадратног пресека 0,61 m x 0,61 m;
- која испред себе нема праву деоницу (уграђена на улазу у цевовод);
- у виду решетке, са четири лопатице;
- са једним типом равне лопатице и
- са супротносмерним вођењем лопатица.

Установио је да је АТР жалузина мерило запреминског протока ваздуха код кога је разлика измерене и моделске брзине у границама $\pm 10\%$ од тренутно измерене вредности брзине струјања или $\pm 5\%$ од пуне мерне скале брзине (узимао је ширу границу).

У оквиру докторске дисертације урађена су истраживања којима се аутори нису бавили у прошлости. Испитана је АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку, што је веома чест случај код регулационих жалузина на системима. За АТР жалузине чије лопатице не формирају решетку урађено је математичко моделирање, где је испитан утицај хистерезиса, локалних отпора (испред и иза жалузине), присуства праве деонице иза жалузине и малих вредности брзина струјања на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха. Испитивањем су одређене и следеће карактеристике АТР жалузине: корекциони фактор момента, нула мерила, режим струјања, линеарност, пад притиска, губитак енергије, коефицијент протока, статичка осетљивост и временска константа мерила. Ради се о веома важним карактеристикама којима се употпуњује слика о мерилу протока, а којима се нису бавили аутори у прошлости.

За потребе истраживања коришћене су следеће основне научне методе:

- дескриптивна метода;
- анализа и синтеза;
- експериментална метода;
- статистичка обрада података;
- аналитичко моделирање података и
- нумеричко моделирање применом методе коначних запремина.

Експериментално истраживање реализовано је у Лабораторији за механику флуида, Факултета техничких наука у Новом Саду. За потребе експерименталног истраживања коришћен је постојећи ваздушни тунел који је модификован у сврху испитивања АТР жалузина према препорукама стандарда (ANSI/AMCA 500 D, 2007). На овај начин је формирано лабораторијско постројење за испитивање АТР жалузина.

¹ АТР (Air Torque Position) - метода мерења протока ваздуха мерењем момента којим ваздушна струја делује на лопатицу и положаја лопатице жалузине

Направљена је лабораторијска АТР жалузина квадратног пресека (0,25 x 0,25 m) са изменљивим лопатицама, којом су испитана четири могућа типа АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку:

- А – једна лопатица;
- В – две унакрсно вођене лопатице;
- С – две паралелно вођене лопатице и
- D – две лопатице, где је једна лопатица мерна, док је друга лопатица укочена у хоризонталном положају.

Циљ истраживања био је да се развије АТР жалузина за мерење запреминског протока ваздуха чије лопатице не формирају решетку и да се за њу формира адекватан математички модел. Током прелиминарних истраживања хистерезис жалузине, локални отпори (испред и иза жалузине), права деоница иза жалузине и мале вредности брзине струјања маркирани су као потенцијални утицаји на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха.

АТР жалузина је механички мерни уређај код кога се очекује изванредан хистерезис. Хистерезис настаје услед присуства кугличних лежајева којима се води лопатица, механизма преноса момента ваздушне струје, мерила момента, потенциометра за мерење нападног угла лопатице и технике мерења параметара рада жалузине при моделирању и верификацији математичког модела. Идеја је била да се сагледа утицај присутног хистерезиса на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха. Познавањем утицаја хистерезиса дефинисао би се начин подешавања АТР жалузине. Такође, сагледала би се природа хистерезиса и донела одлука да ли хистерезис може софтверски да се елиминише.

Локални отпори испред и иза АТР жалузине уносе поремећај у струјно поље и могу да утичу на резултат мерења запреминског протока ваздуха. Идеја је била да се сагледа утицај присутног локалног отпора испред и иза АТР жалузине на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха. На овај начин би се утврдило да ли непосредно испред или иза жалузине сме да се нађе локални отпор. Ради се о веома важном податку како за пројектовање нових система, тако и при уградњи мерила протока на постојеће системе. У случају када на систему нема довољно места, а непосредно испред и иза мерила протока мора да се нађе локални отпор, тада се при избору мерила протока води рачуна да оно буде неосетљиво на утицај присутног локалног отпора.

Непостојање праве деонице иза жалузине потенцијално може да утиче на резултат мерења протока ваздуха АТР жалужином. Идеја је била да се сагледа утицај присуства праве деонице иза АТР жалузине на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха. На овај начин би се утврдило да ли иза АТР жалузине мора да постоји права деоница. Као и утицај локалног отпора и присуство праве деонице иза жалузине представља важан податак при пројектовању и извођењу система. Веома често мерило протока мора да се уграђује на крају система, када се мери проток ваздуха који се убацује у неки простор, где иза мерила протока нема праве деонице. У случају када мерило протока треба да се угради на крају система, тада се бира мерило протока које може тачно да мери и без присутне праве деонице иза мерила.

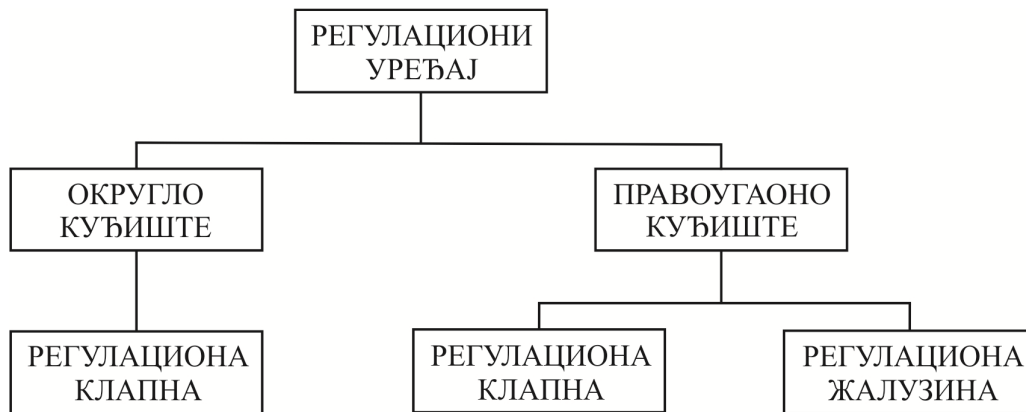
Један од највећих проблема при мерењу протока ваздуха је мерење протока ваздуха са брзинама струјања испод 4 m/s. Овако мале вредности брзина струјања већина постојећих метода или не могу да измере или мере са великом неизвесношћу (Schroeder et al., 2004). Приликом развоја АТР жалужине тежило се да се формира уређај који ће са задовољавајућом неизвесношћу мерити проток ваздуха управо при малим вредностима брзина струјања. Због тога је мерење брзине струјања ваздуха за потребе математичког моделирања и верификације математичког модела урађено са анемометром са топлом жицом, уређајем који са задовољавајућом неизвесношћу мери мале вредности брзине струјања ваздуха.

2. ПРЕГЛЕД РАЗВОЈА МЕТОДА МЕРЕЊА И РЕГУЛАЦИЈЕ ПРОТОКА ВАЗДУХА У HVAC СИСТЕМИМА

2.1 Увод

Мерење протока ваздуха неопходно је при регулацији протока ваздуха у системима грејања, вентилације и климатизације, чији је скраћени назив HVAC¹ (Heating, Ventilation и Air Conditioning). Проток ваздуха у HVAC системима регулише се клапнама и/или жалузинама. Ради се о уређајима у чијем се кућишту налази лопатица (клапна) или лопатице (жалузина), чијим се обртањем око сопствене осе мења струјни пресек. Променом струјног пресека мења се отпор струјању ваздуха, услед чега долази до промене протока ваздуха.

Подела уређаја за регулацију протока ваздуха у HVAC системима приказана је на *слици 1.1*, где су под групом регулационих уређаја са правоугаоним кућиштем сматрају и уређаји са квадратним кућиштем.



Слика 1.1 Подела уређаја за регулацију протока ваздуха у HVAC системима (Venko et al., 2012)

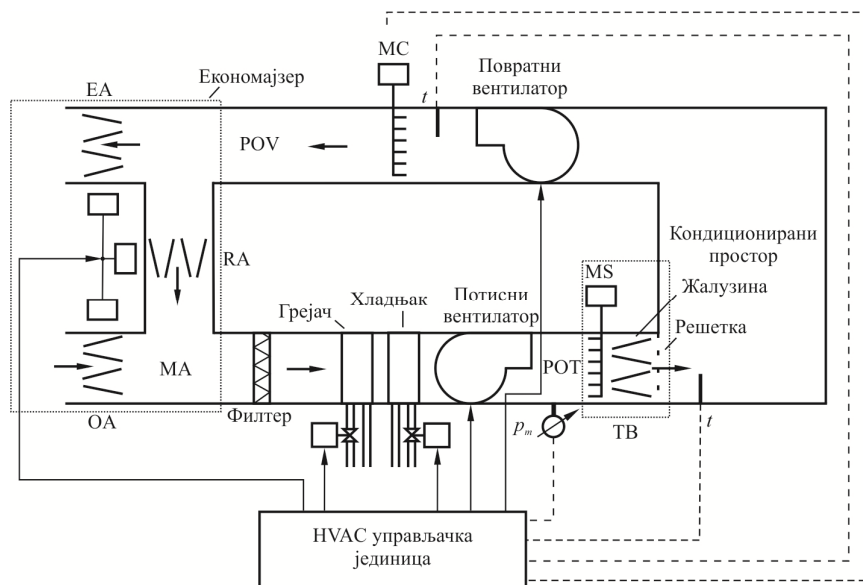
На *слици 1.2* дат је упрошћени, шематски приказ HVAC система. На HVAC системима проток ваздуха мери се на два места.

- Директно или индиректно мери се проток свежег ваздуха који се убацује у систем са циљем да се регулише минимално потребна количина свежег ваздуха у кондиционираном простору.
- Непосредно испред решетки за убацивање ваздуха у кондиционирани простор, где се мери проток ваздуха којим се снабдева кондиционирани простор како би се постигла задата температура простора.

Веома скупо решење би било да се иста количина свежег ваздуха која се убацује у HVAC систем и избацује из система. Свеж ваздух који долази из спољашњости мора да се очисти филтером, а затим и да се загреје грејачем или охлади хладњаком у зависности од периода године у којем систем ради. Најјекономичније би било да увек иста количина ваздуха циркулише кроз систем. Наравно, то није могуће јер се у ваздуху који се убацује у кондиционирани простор повећава концентрација CO₂ услед присуства људи. Са циљем да се смањи потрошња енергије у HVAC систему направљен је

¹ HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) – системи за грејање, вентилацију и климатизацију.

компромис, па се један део ваздуха враћа у систем, док се други део избацује у атмосферу. На овај начин у систем се убацује само минимално потребна количина свежег ваздуха. Економијазер је део HVAC система који садржи три регулационе жалюзине: жалюзину за регулацију количине свежег ваздуха која се убацује у систем OA^2 (Outside Air), жалюзину за регулацију рециркулисаног ваздуха RA^3 (Recirculation Air) и жалюзину за регулацију отпадног ваздуха EA^4 (Exhaust Air). Положаји жалюзина могу да се подесе тако да се оствари жељени удео свежег и рециркулисаног ваздуха у укупној количини ваздуха којом се снабдева кондиционирано пространство.



Слика 1.2 Шематски приказ HVAC система

Свеж и рециркулисани ваздух мешају се у комори за мешање (MA^5), пречишћавају, греју или хладе и потисним вентилатором потискују у дистрибутивни цевовод, а затим у кондиционирано пространство. Регулација целог система врши се преко задате вредности притиска у дистрибутивном цевоводу. Променом броја обртаја потисног вентилатора, фреквентном регулацијом, одржава се константна вредност притиска у дистрибутивном цевоводу. Количина ваздуха која се из дистрибутивног цевовода убацује у поједине просторије кондиционог простора регулише се преко терминал боксова (TB^6). Терминал боксови састоје се од мерне станице (Питова сонда, анемометар са топлом жицом, вртложно мерило, бленда итд.) која мери проток ваздуха, регулационе клапне/жалюзине и решетке.

² OA (Outside Air) – жалюзина економијазера којом се регулише количина свежег ваздуха убаченог у систем.

³ RA (Recirculation Air) – жалюзина економијазера којом се регулише количина рециркулисаног ваздуха у систему.

⁴ EA (Exhaust Air) – жалюзина економијазера којом се регулише количина отпадног ваздуха избаченог из система.

⁵ MA (Mixing Air) – комора на VAV системима у којој се мешају свеж и рециркулисани ваздух.

⁶ TB (Terminal Box) – терминал бокс је место на VAV систему на којем се мери и регулише количина ваздуха која се убацује у кондиционирано пространство.

Код техничког решења HVAC система чији је скраћени назив CAV⁷ (Constant Air Volume) мерење и одржавање минималне количине свежег ваздуха веома је једноставно. Пошто потисни вентилатор за снабдевање ваздуха даје константан проток ваздуха, подесе се положаји лопатица жалузина економајзера тако да систем увек убацује константну потребну количину свежег ваздуха. Такође, количина ваздуха која се убацује преко терминал боксова у поједине просторије кондиционираног простора је константна, а температура ваздуха у просторијама кондиционираног простора регулише се променом оптерећења на грејачу или хладњаку CAV система. Након почетног балансирања и подешавања, уз редовно одржавање нема потребе за даљом регулацијом.

Код техничког решења HVAC система чији је скраћени назив VAV⁸ (Variable Air Volume) температура просторија кондиционираног простора регулише се променом протока ваздуха који се убацује у простор преко терминал боксова, док је оптерећење грејача или хладњака константно. Променом количине ваздуха која се убацује у кондиционирани простор мења се и притисак ваздуха у дистрибутивном цевоводу. Да би се одржавао константан притисак у дистрибутивном цевоводу, фреквентним регулатором мења се проток ваздуха потисног вентилатора. Промена протока потисног вентилатора повлачи за собом и промену количине свежег ваздуха који се са подешене жалузине економајзера убацује у систем. Сада је потребно мерити и регулисати количину свежег ваздуха која се убацује у систем.

VAV системи представљају прави изазов за мерење и регулацију протока свежег ваздуха који се убацује у систем и ваздуха који се доводи кондиционираном простору. У исто време, VAV системи смањују потрошњу енергије у односу на CAV системе. Код CAV система убацује се увек иста количина свежег ваздуха у систем и ваздуха у кондиционирани простор, док се код VAV система количине свежег ваздуха који се убацују у систем и ваздуха који се убацује у кондиционирани простор мењају према потребама кондиционираног простора. Зато се CAV системи користе за мање објекте, док се за веће објекте, где је могуће уштедети већу количину енергије користе VAV системи (Singh, 2010).

Постојећи CAV систем могуће је прилагодити да буде VAV систем, регулацијом жалузина економајзера и фреквентном регулацијом вентилатора, где су инструкције за прилагођавање дали Ванг и др. (Wang et al., 2003). У последње време отишло се корак даље, у циљу смањења потрошње енергије комбинован је рад CAV и VAV система, где се температура простора који се кондиционира регулише комбиновано променом протока ваздуха који се доводи простору и променом оптерећења грејача или хладњака.

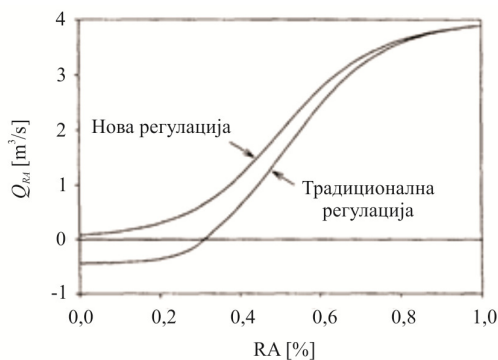
⁷ CAV (Constant Air Volume) – системи за грејање, вентилацију и климатизацију код којих је проток ваздуха константан, где се промена температуре ваздуха у кондиционраном простору остварује променом оптерећења грејача/хладњака.

⁸ VAV (Variable Air Volume) – системи за грејање, вентилацију и климатизацију код којих се температура ваздуха у кондиционираном простору регулише променом протока ваздуха, док оптерећење грејача/хладњака остаје константно.

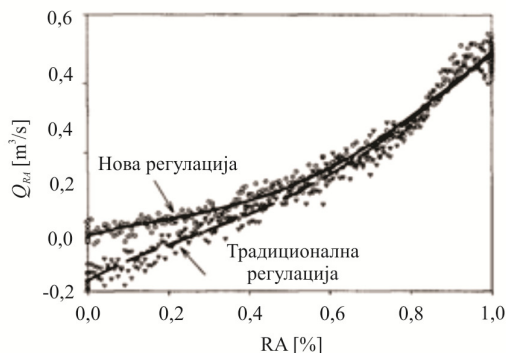
2.2 Методе мерења и регулације протока ваздуха у HVAC системима

Мерење протока је у функцији регулације протока ваздуха у HVAC системима, па је развој метода мерења протока уско повезан са развојем начина и стратегија регулације протока. Применом најтачније методе мерења протока уз лошу стратегију регулације могу да се добију веома лоши резултати и обрнуто. Развијено је више стратегија регулације протока ваздуха у HVAC системима, где свака метода регулације може да користи више метода мерења протока ваздуха.

Код традиционалног начина регулације VAV система OA, RA и EA жалужине су у вези, *слика 1.2*, где се дешава да кроз вод за избацивање отпадног ваздуха долази до уласка свежег, спољашњег ваздуха у систем, што није добро за рад система. Да би се то избегло Сим и др. (Seem, 1998) предложили су да се VAV систем регулише тако да RA и EA жалужина буду у вези, док би OA жалужина била скроз отворена. Резултати лабораторијских и експлоатацијских испитивања и симулације показали су да овакав начин регулације система спречава улазак свежег ваздуха кроз вод за избацивање отпадног ваздуха, чак и у екстремним ситуацијама *слике 2.1 и 2.2*. Међутим код лоше пројектованих и изведених система и при екстремним условима, нов начин регулације не може да спречи улазак свежег ваздуха, чак је количина свежег ваздуха која улази знатно већа од традиционалног начина регулације (Seem, 1998).



Слика 2.1 Резултати симулације новог и традиционалног начина регулације (Seem, 1998)



Слика 2.2 Резултати лабораторијског испитивања новог и традиционалног начина регулације (Seem, 1998)

Насиф и др (Nassif et al., 2008) представили су нову стратегију регулације економајзера VAV система, где се две од три жалужине економајзера држе отворене, док се једна затвара и отвара. Нова стратегија предвиђа да се OA жалужина стално држи скроз отвореном. На постојећем систему и путем симулација на основу познатих математичких модела VAV система, аутори су упоредили традиционалну стратегију управљања економајзером где се воде све три жалужине, стратегију са вођењем две жалужине и нову стратегију где се води само једна жалужина. Установили су да код нове стратегије управљања услед две скроз отворене жалужине долази до мањег пада притиска преко жалужина и до мањег губитка енергије у поређењу са традиционалним вођењем жалужина (12 %) и стратегијом вођења две жалужине (5 %). Такође, установљено је да када се притисак у VAV систему одржава променом броја обртаја вентилатора, тада код нове стратегије са две скроз отворене жалужине не долази до повратног струјања свежег ваздуха кроз вод за избацивање ваздуха (Nassif, et al., 2008). Чо и др. (Cho et al., 2008) унапредили су регулацију протока ваздуха на VAV бокс терминалима, деловима HVAC система који имају директан утицај на потрошњу

енергије и комфор простора који се третира. Унапређени алгоритам ефикасно подешава минималан протока ваздуха потребан за грејање за тренутне радне услове. Поређењем са конвенционалним начином регулације, унапређени начин регулације смањује потрошњу енергије и повећава термални комфор кондиционираног простора.

Убачена количина свежег ваздуха треба да буде компромис количине ваздуха са становишта здравља људи, комфора и енергетске уштеде. Фиск и др. (Fisk et al.; 2005) су инспекцијским надзором утврдили да већина објеката који су били предмет инспекције у САД нема могућност мерења убачене количине свежег ваздуха или се мало пажње посвећује регулацији количине убаченог свежег ваздуха. Уколико се мери количина убаченог свежег ваздуха неком од постојећих метода и систем се прописано користи, неизвесност мерења и регулације протока убаченог свежег ваздуха може да буде мања од 20 %.

2.2.1 Биланс масе угљен – диоксида CO₂

Проток свежег ваздуха који се убацује у VAV систем може да се одреди посредно коришћењем једначине биланса масе угљен – диоксида CO₂ за економајзер:

$$Q_{OA} = Q_{MA} \cdot \left(\frac{CO_{2RA} - CO_{2MA}}{CO_{2RA} - CO_{2OA}} \right) \quad (2.1)$$

где су:

Q_{MA} - запремински проток потисног ваздуха [m³/s];

CO_{2RA} - масено – запреминска концентрација угљен – диоксида у рециркулационом ваздуху [kg/m³];

CO_{2MA} - масено – запреминска концентрација угљен - диоксида у потисном ваздуху [kg/m³] и

CO_{2OA} - масено – запреминска концентрација угљен - диоксида у свежем ваздуху [kg/m³].

Недостатак методе је тај што је поред мерења концентрације угљен – диоксида свежег CO_{2OA}, рециркулисаног CO_{2RA} и потисног CO_{2MA} ваздуха, потребно мерити и проток потисног ваздуха Q_{MA} . Такође, недостатак методе је што при мањем присуству људи у кондиционираном простору настаје мала разлика између концентрације угљен – диоксида свежег и рециркулисаног ваздуха (CO_{2RA}- CO_{2OA}). Овај недостатак је веома често и разлог који у старту дисквалификује методу мерења (Schroeder et al., 2000).

2.2.2 Биланс енталпије ваздуха економајзера

Проток свежег ваздуха који се убацује у VAV систем може да се одреди посредно коришћењем једначине биланса енталпије за економајзер, уз претпоставку адијабатског мешања свежег и рециркулационог ваздуха:

$$Q_{OA} = Q_{MA} \frac{\rho_{MA}}{\rho_{OA}} \left(\frac{h_{RA} - h_{MA}}{h_{RA} - h_{OA}} \right), \quad (2.2)$$

где су:

ρ_{MA} - густина ваздуха у комори за мешање $[\text{kg/m}^3]$;

ρ_{OA} - густина свежег ваздуха $[\text{kg/m}^3]$;

h_{RA} - енталпија рециркулисаног ваздуха $[\text{J/kg}]$;

h_{MA} - енталпија ваздуха у комори за мешање $[\text{J/kg}]$ и

h_{OA} - енталпија свежег ваздуха $[\text{J/kg}]$.

Уколико се занемаре промене влажности и специфичне топлоте ваздуха, тада једначина биланса енталпије за економајзер гласи:

$$Q_{OA} = Q_{MA} \cdot \frac{T_{OA}}{T_{MA}} \cdot \left(\frac{T_{RA} - T_{MA}}{T_{RA} - T_{OA}} \right), \quad (2.3)$$

где су:

T_{RA} - температура рециркулисаног ваздуха $[\text{K}]$;

T_{MA} - температура ваздуха у комори за мешање $[\text{K}]$ и

T_{OA} - енталпија свежег ваздуха $[\text{K}]$.

Поред мерења температуре свежег ваздуха T_{OA} , температуре рециркулисаног T_{RA} и потисног T_{MA} ваздуха, потребно је мерити и проток потисног ваздуха Q_{MA} . Када је мала разлика температуре између рециркулисаног и свежег ваздуха ($T_{RA} - T_{MA}$), што се дешава у периоду пролећа и јесени, тада је услед велике грешке мерења метода практично неупотребљива. Да би метода била валидна минимална разлика температуре између рециркулисаног и свежег ваздуха мора да буде бар 10°C (Felker, 2002).

Недостатак методе огледа се и у томе што веома тешко може да се са задовољавајућом тачношћу мери температура ваздуха у комори за мешање услед велике стратификације температуре (Schroeder et al., 2000). Велики утицај који неуниформност брзине и температуре ваздуха у комори за мешање имају на квалитет мерења и регулације протока ваздуха показао је Робинсон (Robinson, 1998). Анализирао је рад постојеће коморе за мешање у САV систему, где су количине свежег и рециркулисаног ваздуха регулисане правоугаоним жалузинама са паралелним вођењем лопатица. У *табели 2.1* приказани су положаји лопатица ОА и РА жалузина при којима је мерено температурно поље иза коморе за мешање.

Табела 2.1 Положаји лопатица ОА и РА жалузина при којима је мерено температурно поље иза коморе за мешање (Robinson, 1998)

OA[%]	RA[%]	T_{RAsr} [K]	T_{OAsr} [K]	T_{MAmin} [K]	T_{MAsr} [K]	T_{MAmax} [K]
15	75	74,3	48,2	61	63,3	65
30	60	74	47,2	59	61,4	63
45	45	74	46,6	57	59,8	61
60	30	74,1	51	59	61,1	63
75	15	73,8	50,6	56	56,6	58

Из једначине (2.3) добијен је процентуални однос свежег и потисног ваздуха као:

$$OA = \frac{T_{RA} - T_{MA_{sr}}}{T_{RA} - T_{OA}}, \quad (2.4)$$

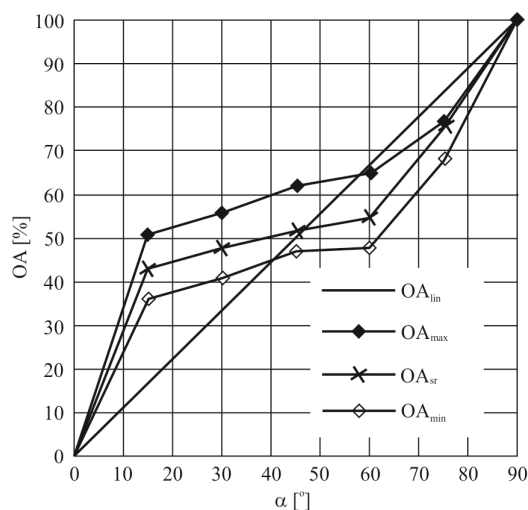
где су:

T_{RA} - температура рециркулисаног ваздуха [К];

T_{OA} - температура свежег ваздуха [К] и

$T_{MA_{sr}}$ - просечна температура потисног ваздуха у комори за мешање [К].

За три измерене вредности температуре у комори за мешање: минималну, средњу и максималну *табела 2.1*, из једначине (2.4) одређена је карактеристика ОА жалужине, *слика 2.3*. Жалужине са паралелним вођењем обезбеђују веома слабу регулацију количине свежег ваздуха који се убацује при ходовима лопатице од 0 ° до 15 ° и од 60 ° до 90 °. Током хода лопатице од 15 ° до 60 ° жалужине са паралелним вођењем обезбеђују веома фину регулацију убачене количине свежег ваздуха (Robinson, 1998).



Слика 2.3 Карактеристика ОА жалужине (Robinson, 1998)

Степен мешања свежег и рециркулисаног ваздуха на излазу коморе за мешање дефинисан је као:

$$MR = 1 - \frac{\Delta T}{T_{RA} - T_{OA}}, \quad (2.5)$$

где је ΔT - разлика у температурама ваздуха на излазу коморе за мешање [К].

Моделом степена мешања, једначина (2.5), установљено је да отвореност ОА жалужине има значајан утицај на мешање ваздуха у комори за мешање. Највећи степен мешања јавља се при нападном углу лопатице ОА жалужине од 75 °, док се најмањи јавља при нападном углу лопатице ОА жалужине од 15 °. Жалужина утиче на мешање ваздуха и стратификацију температуре у комори за мешање, али несумњиво и стратификација

температуре у комори за мешање има велики утицај на карактеристику ОА жалужине, а самим тим и на измерену количину свежег ваздуха који се убацује у систем.

2.2.3 Регулација протока свежег ваздуха потисним и повратним вентилаторима

Минимална количина свежег ваздуха која се убацује у VAV систем може да се регулише одржавајући константну разлику између протока потисног и протока повратног вентилатора *слика 2.4*. Проток потисног вентилатора мења се са циљем да се одржава задати притисак у дистрибутивном цевоводу. На мерним станицама иза потисног вентилатора ⁹MS - 1 и иза повратног вентилатора MS – 2 неком од постојећих метода мере се протоци ваздуха, а затим се фреквентним регулатором ¹⁰FR - 2 подешава проток повратног вентилатора тако да разлика између протока потисног и повратног вентилатора буде константна.

Тачност регулисања разлике протока потисног и повратног вентилатора је $\pm 5\%$. Проблем је што се регулисање количине свежег ваздуха ради преко индиректних величина, тако да тачност мерења протока свежег ваздуха за граничне вредности тачности регулисања протока потисног и повратног вентилатора може да буде до $\pm 50\%$ (Kettler, 1998).

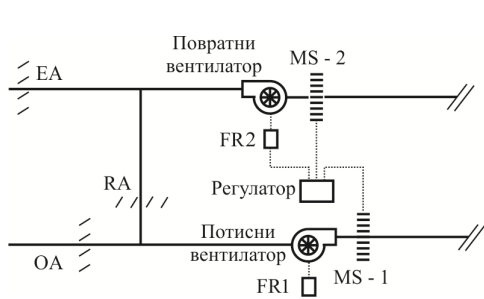
2.2.4 Одржавање константног притиска коморе за мешање

Веома често се минимална количина свежег ваздуха у систему регулише одржавањем константног притиска у комори за мешање, тј. одржавањем константног пада притиска преко ОА жалужине, *слика 2.5*. Могуће су две варијанте: прва варијанта са једном ОА жалужином и друга варијанта са две ОА жалужине. Код варијанте са две жалужине као на *слици 2.5*, једна је фиксна, док је друга модуларна за подешавање економизера (Falkner, 2002). ОА жалужина подеси се тако да је притисак у комори за мешање константан и довољно низак да увлачи константну количину свежег ваздуха од споља. Када се повећа број обртаја вентилатора за потребу регулације притиска у дистрибутивном цевоводу, а самим тим и проток ваздуха, тада се отвара РА жалужина, па се на овај начин одржава константан притисак у комори за мешање. Сада је ОА жалужина као фиксна бленда, где се пад притиска преко ње одржава променом положаја лопатица РА жалужине.

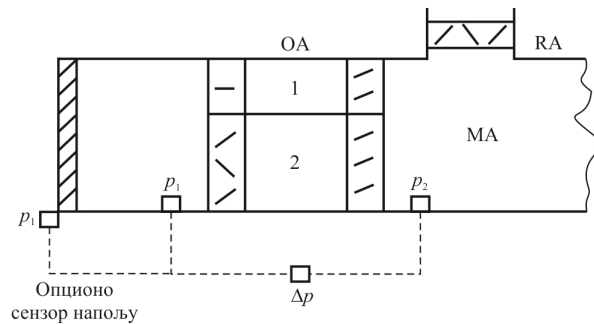
Сензор за мерење притиска може да се постави испред жалужине при чему треба да буде довољно удаљен од филтера, како филтер не би уносио поремећај и утицао на мерење притиска. Постоји и друга варијанта да се сензор за мерење статичког притиска постави споља, при чему у овој варијанти на тачност мерења притиска утичу ветар и решетка (Falkner, 2002).

⁹ MS (Measuring Station) – мерна станица је место на VAV систему на којем се неком од постојећих метода мери проток ваздуха.

¹⁰ FR (Frequency Regulation) – фреквентна регулација.



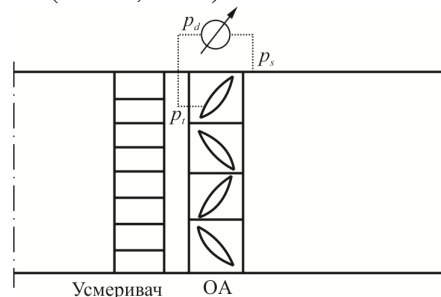
Слика 2.4 Регулација протока свежег ваздуха вентилаторима (Kettler, 1998)



Слика 2.5 Одржавање константног пада притиска преко ОА жалузине (Felker, 2002)

2.2.5 Одржавање константног динамичког притиска ОА жалузине

Код методе одржавања константног пада притиска преко ОА жалузине уједно се одржава и константан динамички притисак, тј. брзина струјања кроз ОА жалужину. Одржавање константног динамичког притисака преко ОА жалузине могуће је извести мерењем динамичког притиска на ОА жалужини и променом положаја лопатица РА жалузине. Сензор за мерење тоталног притиска постављен је на лопатицу ОА жалузине, док је сензор за мерење статичког притиска постављен иза лопатице ОА жалузине *слика 2.6*. Одржавањем константне вредности разлике тоталног и статичког притиска одржава се константним динамички притисак (2.6), тј. брзина струјања ваздуха кроз ОА жалужину. Ради се о једноставној и поузданој методи, која тачно мери и при мањим вредностима брзине струјања (Falker, 2002).



Слика 2.6 Одржавање константног динамичког притиска преко ОА жалузине (Felker, 2002)

Разлика између тоталног и статичког притиска ваздушне струје представља динамички притисак:

$$p_d = p_t - p_s = \rho \frac{v^2}{2}, \quad (2.6)$$

где су:

p_s - статички притисак ваздуха [Pa];

p_t - тотални притисак ваздуха [Pa];

ρ - густина ваздуха [kg/m^3] и

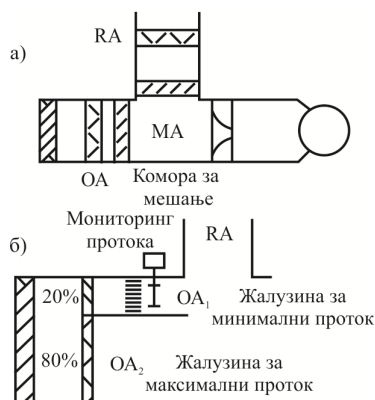
v - брзина ваздуха [m/s].

2.2.6 Мерење протока свежег ваздуха у цеви за довод свежег ваздуха

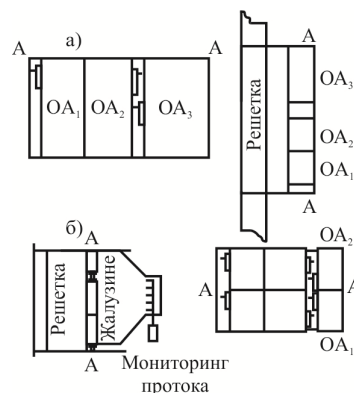
У цев за довод свежег ваздуха поставља се мерна станица којом се мери проток свежег ваздуха, а затим се на основу измерене вредности регулише положај лопатица ОА жалузине. На овај начин остварује се убацивање минимално потребне количине свежег ваздуха у систем. Предност методе је тачност регулације, јер се директно мери величина која се регулише.

Два су основна недостатка мерења протока у цеви за довод свежег ваздуха: појава вртлога који настаје услед присуства решетке и жалузине и мале брзине струјања у цеви за довод свежег ваздуха (Felker, 2002). Вртложно струјање које генеришу решетка и жалузина утиче на тачност мерења протока свежег ваздуха. На решетки цеви за убацивање свежег ваздуха мора да се оствари ниска брзина струјања ваздуха у систем да се не би увлачили киша и снег. Из тог разлога су цеви за убацивање свежег ваздуха већег пресека и имају мале брзине струјања ваздуха. Већином постојећих метода које се користе у мерним станицама за мерење протока свежег ваздуха није могуће тачно мерење протока при малим брзинама струјања ваздуха.

На *сликама 2.7 и 2.8* приказане су уобичајне конфигурације мерења и регулације минималне количине свежег ваздуха који се убацује у кондиционирани простор. Постоји веома велики број геометријских конфигурација па се са правом не може говорити о најбољој методи регулације. На *слици 2.7а* приказана је уобичајна конфигурација економајзера са једном ОА жалужином, док је на *слици 2.7б* приказан економајзер са две ОА жалузине, где мања ОА жалузина мери и регулише минималну количину свежег ваздуха. Мањом жалужином постижу се веће брзине струјања, па се на овај начин тачније мери проток свежег ваздуха.



Слика 2.7 Типичне геометријске конфигурације (Felker, 2002)

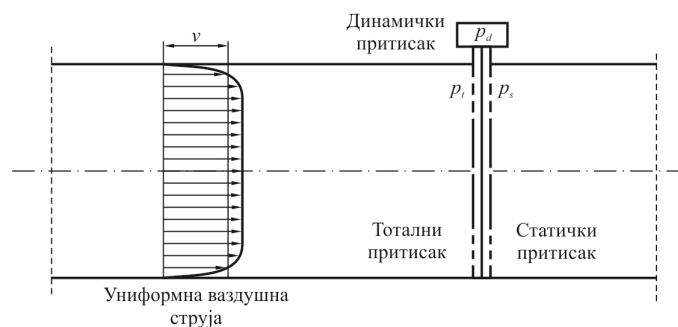


Слика 2.8 Типичне геометријске конфигурације (Felker, 2002)

На *слици 2.8а* прва жалузина има само два положаја, отворен и затворен, где се отвара жалузина само док вентилатор ради. Друга жалузина регулише минималну количину свежег ваздуха који се убацује у систем када се мења проток који остварује вентилатор. Трећа жалузина је редовна ОА жалузина економајзера. На *слици 2.8б* приказано је решење код кога се иза решетке и жалузине налази сужење које убрзава струју ваздуха како би се тачније измерила брзина струјања.

Прантлова сонда за мерење средње брзине струјања ваздуха. Прантлова сонда за мерење средње брзине струјања ваздуха ради на принципу класичне Прантлове сонде,

где се на предњим отворима сонде мери тотални притисак, док се на задњим отворима сонде мери статички притисак, *слика 2.9*. Динамички притисак добија се као разлика тоталног и статичког притиска ваздушне струје, једначина (2.6), (Klopfenstein, 1998).



Слика 2.9 Шематски приказ Прантлове сонде за мерење средње брзине струјања ваздуха

Средња брзина струјања ваздуха гласи:

$$v = C \sqrt{\frac{P_d}{\rho}}, \quad (2.7)$$

где је C - константа.

Густина ваздуха одређује се из једначине стања идеалног гаса:

$$\rho = \frac{P}{RT}, \quad (2.8)$$

где су:

p - апсолутни статички притисак у цеви [Pa];

R - специфична гасна константа [J/kgK] и

T - температура ваздуха [K].

Прантлове сонде нашле су велику примену код терминал боксова, где су пресеци мали, а веће брзине струјања. Поред тога што се малим брзинама струјања ваздуха спречава увођење кише и снега у систем, у цевима за увођење свежег ваздуха ограничавајући фактор је и филтер. Услед великог пада притиска кроз филтер не иде са са брзинама струјања већим од 2,5 m/s. Проблем је нарочито изражен када се проток у систему смањи са 100 % на минимални проток. При овако малим брзинама струјања није могуће тачно мерити разлику притиска на диференцијалном манометру. Диктирана тачношћу диференцијалног манометра, Прантлова сонда не може тачно да мери брзину струјања испод 4 m/s (Schroeder et al., 2000).

Једначина стања идеалног гаса (2.8) не узима у обзир утицај релативне влажности на густину ваздуха, што се одражава на додатну грешку мерења Прантловом сондом од 0,6 %. Грешка у одређивању брзине струјања настаје и услед нелинеарне зависности између брзине струјања и динамичког притиска (2.7). Проблем настаје и услед осредњавање брзине струјања, јер се отворима испред и иза Прантлове сонде мере средње вредности тоталног и статичког притиска, те постоји разлика у добијеној

средњој брзини струјања ваздуха у односу на тачну вредност средње брзине. Грешка постаје значајна када је ваздушна струја неуниформна. Зато се препоручује да испред Прантлове сонде буде права, равна деоница од 7,5 пречника цеви, а иза Прантлове сонде 3 пречника цеви (Schroeder et al., 2000).

Анемометар са топлом жицом. Анемометри са топлом жицом, топлим филмом и термистори су уређаји који могу тачно да мере и мале вредности брзине струјања ваздуха, реда величине од 0,0051 m/s до 0,051 m/s (Haines, 1994). Анемометри са топлом жицом су уређаји који имају скоро константну грешку мерења у односу на проценат брзине која се мери, за разлику од Прантлове сонде (Solberg et al., 1990). Такође, мерни сигнал је линеаран и електронски, те је веома лак за обраду и управљање (Solberg et al., 1990).

Принцип рада је једноставан, загрејана жица је електрични отпорник који губи топлоту у зависности од температуре и брзине ваздушне струје која је опструјава. Услед промене температуре електричног отпорника долази до промене електричне отпорности, а самим тим и електричног напона, те се брзина струјања доводи у везу са електричним напоном. Топла жица се везује у Винстонов мост како би се повећала осетљивост мерења, тј. да би се за малу промену брзине струјања на улазу добила већа промена електричног напона на излазу. Из тог разлога је анемометар са топлом жицом веома осетљив уређај, којим може да се мери турбулентна брзина струјања, па веома често садржи функцију временског осредњавања брзине. За моделирање анемометра са топлом жицом традиционално се користи Кингов закон:

$$U^2 = C + D\sqrt{\rho \cdot v}, \quad (2.9)$$

где су:

U - електрични напон на излазу [V];

C, D - константе;

v - брзина струјања [m/s] и

ρ - густина ваздуха [kg/m³].

Мерење брзине струјања анемометром са топлом жицом зависи од температуре ваздушне струје, где уређаји морају да имају и сензор за мерење температуре како би вршили корекцију измерене брзине струјања. Ограничени су на калибрациони опсег брзине струјања и температуре ваздуха, где је калибрација уређаја веома компликована (Drees et al., 1992). Услед честе промене карактеристике жицу је потребно периодично калибрисати. Топла жица је веома осетљив сензор, где услед запрљане средине или коришћења ван радног или опсега мерења може да дође до пуцања жице, па се често ради о непоузданом уређају (Schroeder et al., 2000).

Лопатични анемометар. Лопатични анемометар садржи коло са лопатицама које се обрће под дејством ваздушне струје, где се калибрацијом долази до релације између брзине струјања и броја обртаја лопатичног кола. Број обртаја кола региструје се механичким, електричним или електромагнетним путем. Мерна неизвесност лопатичног анемометра је од 2 % до 5 % за опсег брзина струјања од 0,51 m/s до 15,2 m/s. Како се ради о механичком уређају са лежајевима, временом долази до промене његове карактеристике, па уређаји морају периодично да се калибришу. Ради се о

мерним уређајима са тромим одзивом, где је сама конструкција мерног уређаја услед велике површине сензора ограничавајући фактор за примену у VAV системима (ASHRAE, 1988).

Вртложно мерило протока. Вртложно мерило протока састоји се од кућишта у којем је постављен предмет, који генерише вртлог (Карманов вртложни траг). Карманов вртложни траг изазива у тачки ваздушне струје флукуацију притиска. На крају кућишта постављен је пиезоелектрични претварач притиска, који мери флукуације притиска, при чему је предходно одређена релација између средње брзине струјања и фреквенције флукуација притиска. Вртложно мерило протока има високу тачност при вишим вредностима Рејнолдсових бројева (0,5 % при Рејнолдсовом броју $Re = 10^4$), док је при нижим вредностима Рејнолдсовог броја мерило практично неупотребљиво (Schroeder et al., 2000). Тачност уређаја диктирана је тачношћу мерења флукуација притиска пиезоелектричним претварачем. Вртложно мерило не може да мери брзине струјања испод 2,54 m/s (Schroeder et al., 2000).

Ласер Доплер анемометар (LDA¹¹). Два паралелна ласерска зрака истих таласних дужина преламају се кроз сочиво, где се на месту пресека иза сочива формира елипсоид са црно белим пругама. Предуслов мерења јесте да ваздух садржи честице прашине или да се у ваздух убаци нпр. распршено маслиново уље, дим и др. Направљена је апроксимација да је брзина струјања честице једнака брзини струјања флуида. Када ваздух са честицама прође кроз формиран елипсоид, честица пролази наизменично кроз црне и беле пруге, где долази до емитовања светлосних сигнала одређене фреквенције. Светлосни сигнал се фотомултипликатором преводи у електрични сигнал са фреквенцијом у функцији брзине струјања. Ради се о апсолутном мерилу брзине струјања чија је грешка мерења 1 % при брзини струјања од 0,076 m/s (Mease et al., 1992). Највећа мана LDA је његова и даље висока цена, па се користи само при калибрацији других мерила брзине (ASHRAE, 1997).

Анемометар са покретним крилом. У кућишту мерила налази се вођена лопатица, која се обрће око осе под дејством ваздушне струје. Померање лопатице је у вези са показивањем казаљке на калибрисаној скали. Могуће је калибрисати уређај за мерни опсег од 0,25 m/s до 50,8 m/s, са мерном неизвесношћу уређаја $\pm 10\%$ (ASHRAE, 1998).

Мерна бленда. Стандардом ASME Standard MFC – 3M (ASME, 2004) дефинисано је мерење протока ваздуха кроз цеви и пленуме користећи бленде, млазнице и Вентури метре. За практичне инжењерске потребе пад притиска рачуна се према једначини:

$$\Delta p = C_p \cdot p_d = C_p \cdot \rho \frac{v^2}{2}, \quad (2.10)$$

где су:

C_p - коефицијент притиска [–] и

p_d - динамички притисак [Pa].

Вредности коефицијента притиска у зависности од светле површине мерне бленде приказане су у *табели 2.2.*

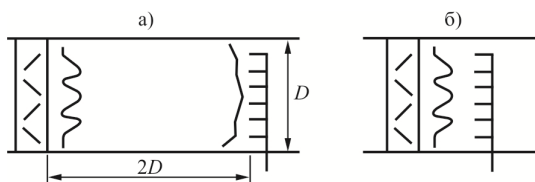
¹¹ LDA (Laser Dopler Anemometer) – ласер Доплер анемометар.

Табела 2.2 Вредности коефицијента притиска у зависности од светле површине мерне бленде (Felker, 2002)

$A [-]$	$C_p [-]$
$>0,7$	$1/A^2$
$0,7 > A > 0,5$	$1,5/A^2$
$0,5 > A > 0,2$	$2/A^2$
$A < 0,2$	$3/A^2$

Мерење протока ваздуха врши се мерењем пада притиска преко бленде, са мерном неизвесношћу $\pm 1\%$ за вредности Рејнолдсовог броја $Re > 500$. Недостатак мерне методе је тај што одређивање коефицијента притиска и тачност мерења зависе од услова у инсталацији (Schroeder et al., 2000).

Мерење протока свежег ваздуха улазном решетком. Генерални проблем методе мерења протока свежег ваздуха улазном решетком је неуниформност брзине струјања коју генерише ОА жалузина. На слици 2.10а приказано је минимално растојање од жалузине до места мерења брзине струјања. За неизвесност мерења протока $\pm 10\%$ ово растојање мора да буде минимално $2D$, док иза сензора за мерење брзине струјања мора да буде $1D$ (Felker, 2002). На слици 2.10б приказано је неправилно мерење брзине струјања, где се сензор за мерење брзине струјања налази у зони непосредно иза жалузине.



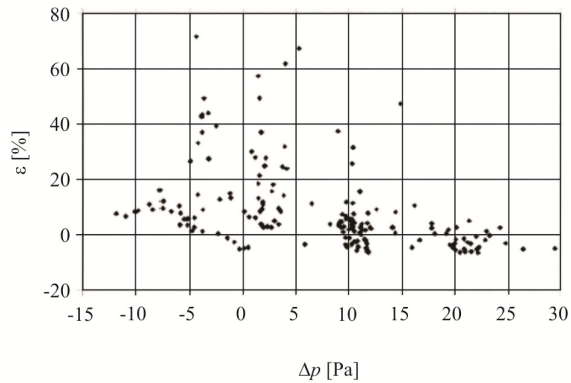
Слика 2.10 Поозиција сензора за мерење брзине струјања (Felker, 2002)

Фиск и др. (Fisk et al., 2006) потврдили су експерименталним путем основне изворе грешака мерења протока ОА жалузином. Извори мерних грешака ОА жалузине су: мала брзина струјања ваздуха, велика просторна разлика у интезитету и правцу струјања ваздуха услед које настају вртлози између улазне решетке и жалузине слика 2.11 и повратно струјање кроз доњи део ОА жалузине слика 2.11. На слици 2.13 приказана је зависност грешке мерења и пада притиска на ОА жалузини. На овај начин Фиск и др. (Fisk et al., 2005) графички су илустровали како је тачност мерења протока ОА жалузином диктирана тачношћу мерења пада притиска диференцијалним манометром.

Услед неравномерног профила брзине струјања и појаве вртлога испред жалузине, а самим тим и нетачног мерења и регулације убачене количине свежег ваздуха, поједини произвођача почели су да праве системе за мерење протока ваздуха на самој решетки за убацивање свежег ваздуха. Фиск и др. (Fisk et al., 2005) испитали су три технике мерења протока ваздуха на самој решетки за убацивање ваздуха.

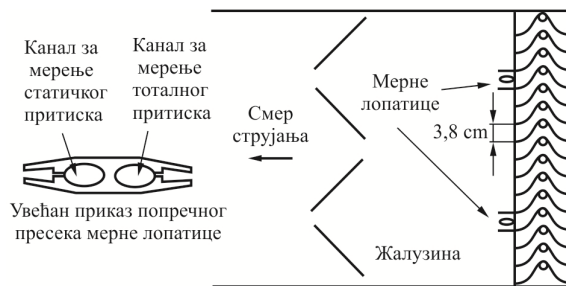


Слика 2.11 Илустрација струјне слике у простору између решетке и ОА жалузине (Fisk et al., 2005)

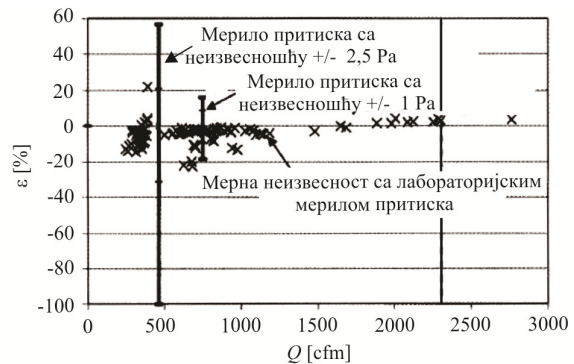


Слика 2.13 Грешка мерења протока ОА жалузином у зависности од пада притиска (Fisk et al., 2005)

На слици 2.14 дат је шематски приказ прве технике мерења количине убаченог свежег ваздуха улазном решетком (¹²MT1). Иза решетке за мерење протока, између лопатица постављен је сензор за мерење брзине струјања, који се састоји из цеви за мерење статичког и тоталног притиска и диференцијалног мерила притиска. Поређењем измерених вредности протока ваздуха на улазnoj решетки са тачнијим, референтним мерилом формиран је график грешке мерења слика 2.15, за опсег од 10 % до 100% ОА (опсег одговара вертикалним границама на графику).



Слика 2.14 Шематски приказ МТ1 за мерење протока ваздуха улазном решетком (Fisk et al., 2005)



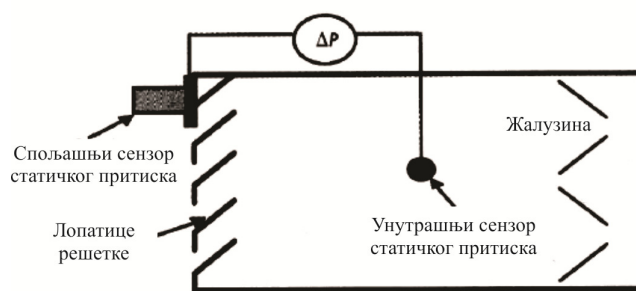
Слика 2.15 Грешка мерења МТ1 са различитим неизвесностима мерила притиска (Fisk et al., 2005)

Грешка мерења МТ1 зависи од брзине струјања ваздуха кроз улазну решетку и мерне неизвесности диференцијалног мерила притиска. Улаз у канал прави се већег попречног пресека у односу на канал, како би се смањила брзина струјања на самој решетки, да се не би увлачили снег и киша у систем. На слици 2.15 уочљиво је да повећањем брзине струјања ваздуха кроз решетку долази до драстичног смањења грешке мерења. Грешка мерења највећа је при малим брзинама струјања, блиским 10 % ОА. При неизвесности мерења притиска од $\pm 2,5$ Pa грешка мерења улазном решетком

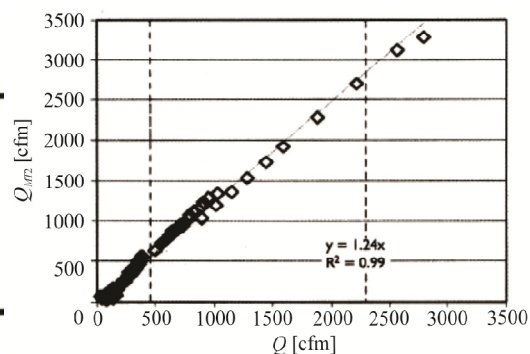
¹² MT (Measuring Technique) – Мерна техника.

креће се од – 100% до 20%, док се при неизвесности мерења притиска од ± 1 Pa грешка мерења улазном решетком креће од – 30% до 20%.

На *слици 2.16* дат је шематски приказ друге технике мерења (MT2). Испред улазне решетке и у простору између улазне решетке и ОА жалузине постављају се сензори за мерење статичког притиска. Мерењем статичких притисака мери се пад притиска на улазној решетки. Како пад притиска зависи од типа улазне решетке, MT2 мора да се калибрише у реалним условима. Аутори наводе податак произвођача да је грешка мерења MT2 $\pm 5\%$ од очитане вредности. На *слици 2.17* приказано је поређење протока измереног улазном решетком MT2 и референтним мерилом. Уочава се да је разлика између измерених протока већа при мањим вредностима брзине струјања, док се повећањем брзине струјања разлика измерених протока смањује.



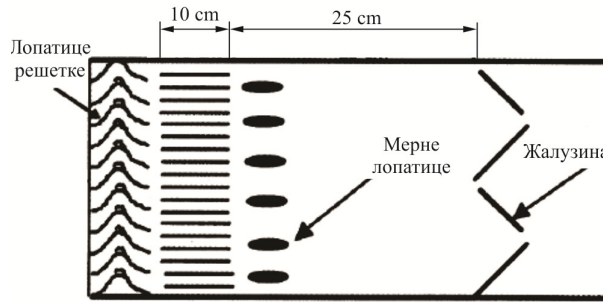
Слика 2.16 Шематски приказ MT2 (Fisk et al., 2005)



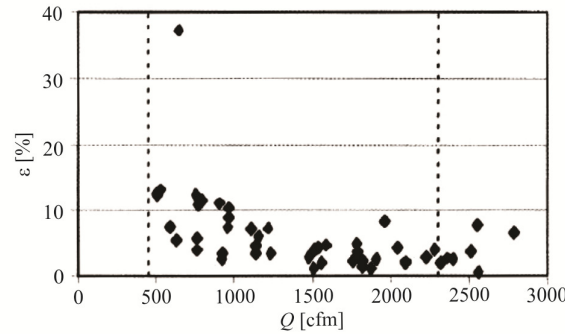
Слика 2.17 Поређење протока ваздуха измереног улазном решетком MT2 и референтним мерилом (Fisk et al., 2006)

На *слици 2.18* дат је шематски приказ треће мерне технике (MT3). Проток ваздуха на улазној решетки одређује се мерењем брзине струјања мерним лопатицама, као код приказане методе MT1, где је између улазне решетке и мерних лопатица постављен исправљач ваздушне струје. Исправљач ваздушне струје има улогу да разбије вртлоге, са циљем да се тачније мери брзина струјања на мерним лопатицама. Произвођачи наводе да се у лабораторијским условима добија мерна неизвесност од $\pm 3\%$. Аутори су лабораторијски испитали MT3, где су грешку мерења приказали на *слици 2.19*. Грешка мерења прелази 10 % при мањим вредностима брзине струјања, тј. за мерни сигнал притиска мањи од 2,5 Pa. У скоро целом опсегу мерења од 5 % ОА до 100 % ОА (границе приказане вертикалним испрекиданим линијама) грешка мерења не прелази 10 %.

Ни један од три приказана начина мерења протока улазном решетком не прави велики пад притиска који би захтевао повећање перформанси вентилатора. Мала вредност пада притиска је лимитирајући фактор тачности мерења протока приказаним техникама. Занимљиво је да ни интезитет нити правац ветра не утичу на тачност мерења презентованим техникама мерења протока ваздуха (Fisk et al., 2005).



Слика 2.18 Шематски приказ MT3
(Fisk et al., 2005)



Слика 2.19 Грешка мерења улазном
решетком MT3 (Fisk et al., 2005)

2.2.7 Мерење протока ваздуха моделом вентилатора

Насиф и др. (Nassifat et al., 2005) испитивали су и моделирали делове постојећег VAV система. Аутори су дошли до математичког модела вентилатора, који су користили за мерење протока потисног ваздуха. У реалним условима експлоатације упоредили су мерење протока потисног ваздуха моделом вентилатора и мерење протока ваздуха отвореном жалужином. Такође су у реалним условима експлоатације упоредили проток добијен ОА жалужином и енталпијском методом.

За мерење протока ваздуха вентилатором Насиф и др. (Nassifat et al., 2005) користили су значајне протока, притиска и снаге вратила вентилатора:

$$\Phi = \frac{Q}{n \cdot d^3}, \quad (2.11)$$

$$\Psi = \frac{P_{ven}}{\rho \cdot n^2 \cdot d^2}, \quad (2.12)$$

$$\eta_{ven} = \frac{Q \cdot P_{ven}}{P_{vrat}}, \quad (2.13)$$

где су:

Q - запремински проток вентилатора [m^3/s];

n - број обртаја вентилатора [o/min];

d - пречник радног кола вентилатора [m];

P_{ven} - статички притисак вентилатора [Pa];

ρ - густина ваздуха [kg/m^3] и

P_{vrat} - снага на вратилу вентилатора [W].

Користећи значајце (2.11), (2.12) и (2.13), регресионом анализом се на основу података произвођача долази до следећих зависности:

$$\Psi = a_0 + a_1\Phi + a_2\Phi^2 + a_3\Phi^3 + a_4\Phi^4, \quad (2.14)$$

$$\eta_{ven} = b_0 + b_1\Phi + b_2\Phi^2 + b_3\Phi^3 + b_4\Phi^4. \quad (2.15)$$

Снага вентилатора дефинише се као:

$$P_{ven} = \frac{P_{vrat}}{\eta_{ven}}. \quad (2.16)$$

Статички притисак вентилатора гласи:

$$p_{ven} = p_{MA} + p_{ven,i} + \Delta p_{gh}, \quad (2.17)$$

где су:

p_{MA} - статички притисак у комори за мешање [Pa];

$p_{ven,i}$ - статички притисак непосредно на излазу из вентилатора [Pa] и

Δp_{gh} - пад притиска на спољашњој страни грејача и хладњака [Pa].

Статички притисци у комори за мешање и на излазу из вентилатора се мере, док се до пада притиска на спољашњој страни грејача и хладњака долази из једначине:

$$\Delta p_{gh} = C_{gh} \cdot Q^2, \quad (2.18)$$

где је C_{gh} - величина која зависи од протока ваздуха, а до које може да се дође предходним мерењем или на основу података произвођача [kg/m^7].

Сада је довољно да се измере број обртаја вентилатора, статички притисак у комори за мешање и иза вентилатора и да се из горњих једначина дође до запреминског протока ваздуха вентилатора Q .

Математички модел жалужине гласи:

$$Q = C \cdot \Delta p^x, \quad (2.19)$$

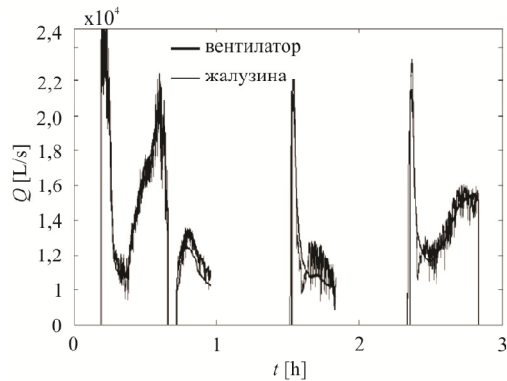
где су:

Δp - пад притиска на жалужини [Pa] и

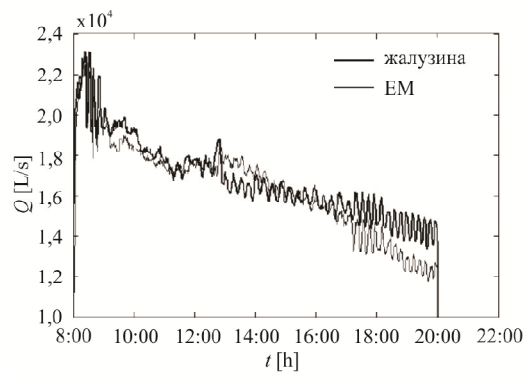
C, x – величине које зависе од нападаоног угла лопатице жалужине, а које су одређене на основу података произвођача.

На слици 2.20 приказани су резултати упоредног мерења протока ваздуха отвореном жалужином и вентилатором Насиф и др. (Nassifat et al., 2005). Може да се уочи да долази до поклапања вредности протока добијених моделом вентилатора и отвореном

жалузином. На *слици 2.21* приказани су резултати упоредног мерења протока свежег ваздуха ОА жалузином и енталпијском методом, где је коришћена валидна примена енталпијске методе када је температура свежег и рециркулисаног ваздуха довољно велика (Schroeder et al., 2000). Проток потисног вентилатора добијен моделом вентилатора коришћен је за одређивање протока свежег ваздуха енталпијском методом. Разлика у мерењу протока ОА жалузином и енталпијском методом је 4 – 5 %.



Слика 2.20 Поређење протока ваздуха измереног моделом вентилатора и отвореном жалузином (Nassifat et al., 2005)

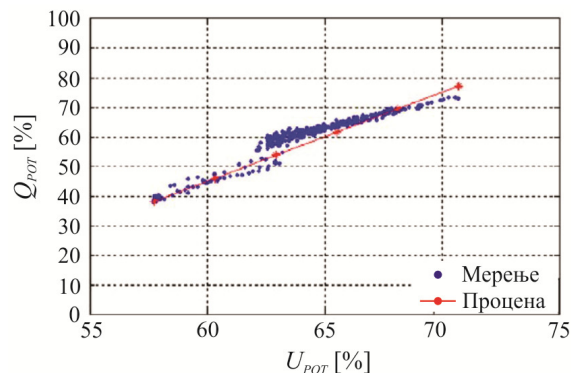


Слика 2.21 Поређење измереног протока свежег ваздуха помоћу жалузине и енталпијске методе (Nassifat et al., 2005)

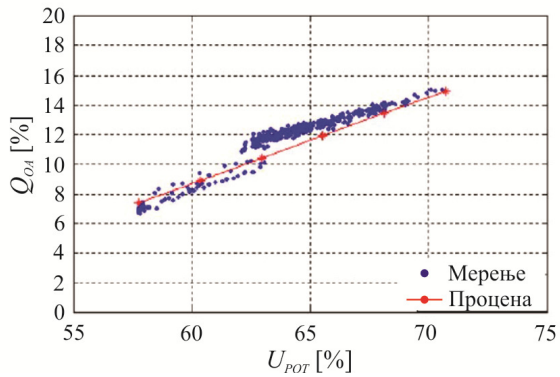
2.2.8. Мерење протока ваздуха регулацијским сигнаlima

Проток ваздуха могуће је проценити помоћу регулацијских сигнала. Тан и др. (Tan, 2006) истраживали су тачност процене протока ваздуха на основу регулацијских сигнала којим се управља радом вентилатора и жалузина у економијазеру.

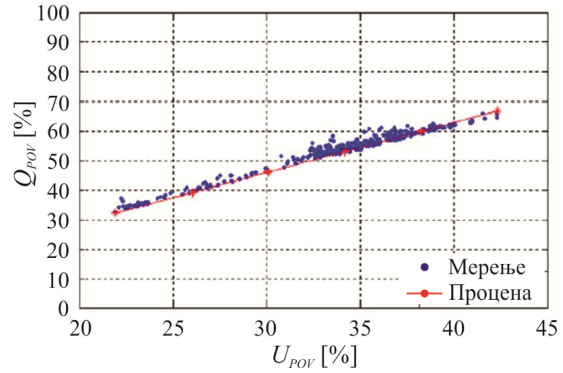
Аутори су мерили проток потисног, свежег и рециркулисаног ваздуха и упоређивали га са одговарајућим протоцима које су проценили регулацијским сигнаlima. Користили су линеаризоване регулацијске сигнале, где су установили да је разлика у процени и мерењу протока ваздуха мања од 8 %, *слике 2.22, 2.23 и 2.24*.



Слика 2.22 Поређење измерених и процењених вредности протока потисног ваздуха (Tan, 2006)



Слика 2.23 Поређење измерених и процењених вредности протока свежег ваздуха (Тан, 2006)

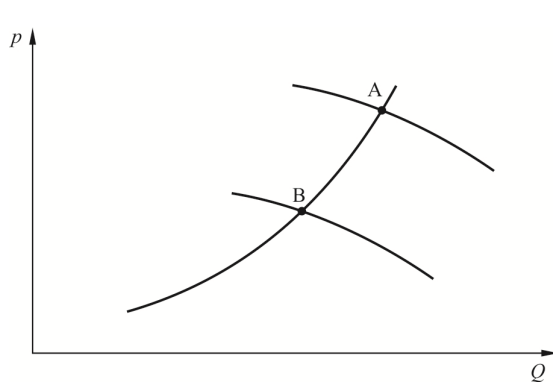


Слика 2.24 Поређење измерених и процењених вредности протока рециркулисаног ваздуха (Тан, 2006)

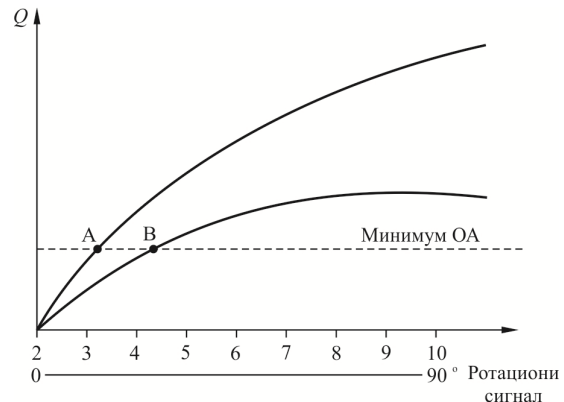
2.2.9 Регулација количине свежег ваздуха релацијом између сигнала потисног вентилатора и ОА жалюзине

При сваком протоку потисног ваздуха у систему постоји положај лопатице ОА жалюзине који омогућује убацивање минимално потребне количине свежег ваздуха у систем. Предходним мерењем долази се до везе између протока потисног ваздуха и положаја лопатица ОА жалюзине који омогућују убацивање минимално потребне количине свежег ваздуха у систем *слике 2.25 и 2.26*. Када се проток потисног ваздуха у систему смањује са циљем да се одржи константан притисак ваздуха у дистрибутивном цевоводу (од радне тачке система А до радне тачке система В), отвара се ОА жалюзина (од радне тачке А до радне тачке В) како би се омогућило убацивање минимално потребне количине свежег ваздуха.

Проблем методе је промена притиска у комори за мешање која настаје временом услед запрљаности филтера. Проблем може да се реши приликом пројектовања система, повећањем укупног пада притиска у односу на пад притиска на филтеру. Такође, проблем праве пнеуматски актуатори чија је тачност позиционирања $\pm 5\%$. Знатно су прецизнији електронски вођени актуатори чија је тачност позиционирања $\pm 1\%$, који имају мали хистерезис и нелинеарност, али су знатно скупљи од пнеуматских (Felker, 2002).



Слика 2.25 Карактеристика потисног вентилатора (Felker, 2002)

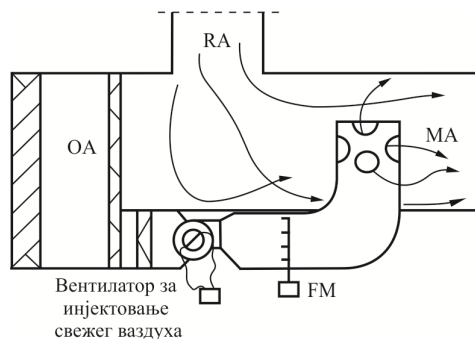


Слика 2.26 Карактеристика ОА жалюзине (Felker, 2002)

2.2.10 Инјектовање свежег ваздуха вентилатором

Решење са инјектовањем свежег ваздуха помоћу вентилатора приказано је на *слици 2.27*. Вентилатором се убацује свеж ваздух према потребној количини која се мери неким од сензора за мерење брзине струјања, *слика 2.27*. На овај начин смањује се стратификација температуре у комори за мешање ваздуха. Приказано решење одликује се малом потрошњом енергије. Жалузина са супротносмерним вођењем лопатица је тако подешена да смањује вртложење испред вентилатора. Притисак у комори за мешање не варира под утицајем ветра, улазне решетке и регулације VAV система (Felker, 2002).

Када дође до квара на вентилатору за инјектовање ваздуха, тада се отвара ОА жалузина да би се обезбедила довољна количина свежег ваздуха. Директно се мери величина која се регулише, где је тачност мерења уједно и тачност регулације $\pm 5\%$. Недостаци методе су додатни трошкови за вентилатор и додатно компликовање система са вентилатором. Као недостатак може да се наведе и то да је вентилатор веома често тешко инкорпорирати у постојеће системе.



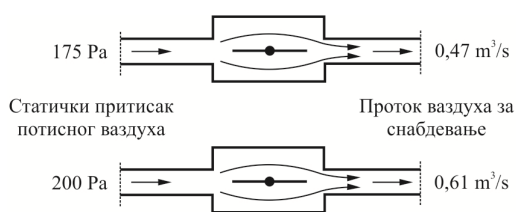
Слика 2.27 Инјектовање свежег ваздуха вентилатором (Felker, 2002)

2.2.11 Регулација протока ваздуха терминал боксом

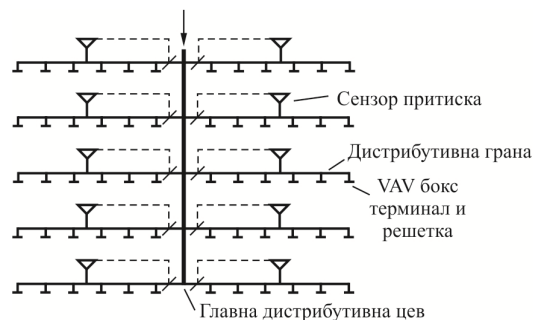
Регулација количине ваздуха која се из VAV система убацује у кондиционирани простор врши се терминал боксовима. Терминал бокс је моторна жалузина која променом положаја лопатица регулише проток ваздуха који се убацује у кондиционирани простор, тако да температура ваздуха у простору буде константна. Променом положаја лопатица жалужине мења се отпор у цевоводу, а самим тим и статички притисак у систему. На овај начин проток ваздуха кроз жалужину терминал бокса зависи од положаја лопатица и статичког притиска у систему. Када је статички притисак испред жалужине виши, тада кроз жалужину пролази већа количина ваздуха, *слика 2.28*.

Разликују се две врсте терминал боксова: зависни и независни од притиска. Код терминал боксова зависних од притиска, положај лопатица жалужина мења се директно према измереној температури ваздуха у просторији. Проток ваздуха који се преко терминал бокса убацује у кондиционирани простор зависи од статичког притиска на улазу у терминал бокса. Иако ће се према температури ваздуха у кондиционираном простору стално кориговати положај лопатица жалужина, регулација температуре ваздуха је врло спора, па долази до њене знатне варијације. Код терминал боксова независних од притиска ваздуха мери се проток ваздуха који струји кроз терминал бокс

неком од постојећих метода, а затим се директно према измереном протоку коригује положај лопатице жалужине тако да температура ваздуха у кондиционираном простору буде константна. Услед боље регулације температуре ваздуха кондиционираног простора, терминал боксови независни од притиска ваздуха су решење које је више заступљено у VAV системима.



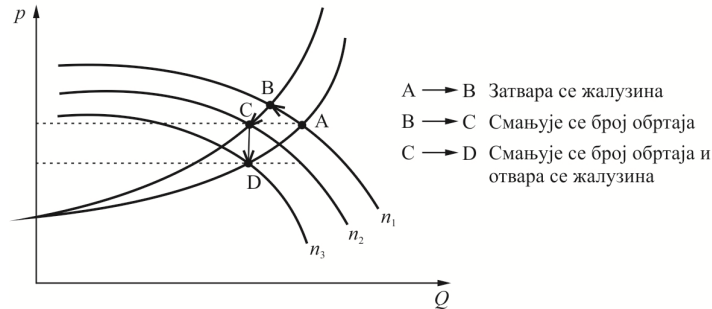
Слика 2.28 Утицај притиска на регулацију протока ваздуха (Air Conditioning Clinic, 2001)



Слика 2.29 Део VAV система за снабдевање ваздуха (Engdahl, 2003)

Када се на VAV системима за регулацију протока ваздуха који се убацује у кондициониран простор користе терминал боксови зависни од притиска, тада услед различитих притисака испред терминал боксова долази до неадекватне количине ваздуха која се убацује у кондициониране просторије. Проблем настаје у томе што је један сензор за мерење статичког притиска смештен на грани система на коме се налази више терминал боксова, па долази до пада притиска од места где се налази сензор за мерење притиска до терминал боксова *слика 2.29*. Решетке са могућношћу промене положаја лопатица, а самим тим и промене површине попречног пресека могу да се користе за балансирање VAV система тако да свака кондиционирана просторија добија потребну количину ваздуха. Енгдал и др. (Engdahl et al., 2003) дали су методологију прорачуна система и инструкције за постављање сензора за мерење статичког притиска, којим се смањује потрошња енергије и бука вентилатора.

Потисни вентилатор VAV система регулише статички притисак у дистрибутивном цевоводу према предходно задатој вредности статичког притиска. Задата вредност статичког притиска је константна вредност која је подешена према пројектованој радној карактеристици система и положају сензора за мерење статичког притиска (Engdahl et al., 2003). Статички притисак иза вентилатора једнак је збиру задатог статичког притиска и пада притиска од вентилатора до места где се мери статички притисак. Услед мањег оптерећења система, када је мање ваздуха потребно за кондиционирање простора, пад притиска је мањи. Сада би задата вредност статичког притиска могла да се смањи. У раду Лиуа и др. (Liu et al., 2010) приказан је утицај смањења задате вредности притиска на цурење ваздуха, потрошњу електричне енергије вентилатора и потрошњу топлотне енергије терминал боксова (зависних и независних од притиска). Аутори су установили да снижавање задате вредности статичког притиска може да се смањи цурење ваздуха са 15 % на 7 %, потрошња енергије током хлађења објекта може да се смањи за 10 % на годишњем нивоу, док потрошња енергије за загревање ваздуха у терминал боксовима може да се смањи и до 50 %. Веи и др. (Wei et al., 2004) комбиновали су смањење задате вредности притиска и отварање жалужине терминал бокса са циљем да се смањи потрошња енергије *слика 2.30*.



Слика 2.30 Промена радне тачке VAV система (Wei et al., 2004)

Терминал бокс поред жалузине, актуатора, уређаја за мерење брзине струјања ваздуха, филтера, регулатора и термометра може опционо да садржи и вентилатор (у серијском или паралелном режиму рада са жалузинима), грејач и/или хладњак (Air Conditioning Clinic, 2001). Све варијанте терминал бокса, било да се ради о концепту уређаја зависних или независних од статичког притиска у систему имају један заједнички недостак. Регулација температуре у кондиционираном простору ради се на основу мерења температуре ваздуха термометром који се налази у једној тачки кондиционираног простора, веома често далеко од дела простора где се налазе људи. Услед стратификације температуре у кондиционираном простору долази до грешке у регулацији температуре ваздуха.

Са циљем да повећају тачност у регулацији убачене количине ваздуха, а самим тим и тачност у регулацији температуре ваздуха кондиционираног простора, Сан и др. (Sun et al., 2009) анализирали су рад виртуелног температурног сензора. У вентилисану просторију постављена су два температурна сензора, један на месту реалног сензора на поврату ваздуха и други у дну собе, у делу у којем бораве људи (део просторије који се кондиционира). На основу мерења температуре ваздуха на ова два места, аутори су развили CFD¹³ (Computer Fluid Dynamics) модел који омогућава да се мерењем температуре реалним сензором дође до виртуелне температуре на месту који се кондиционира:

$$T_v = -1,509 \cdot Q^3 + 2,757 \cdot Q^2 - 1,684 \cdot Q + T_r + 0,478, \quad (2.20)$$

где су:

Q - проток ваздуха којим се снабдева кондиционирани простор [m^3/s];

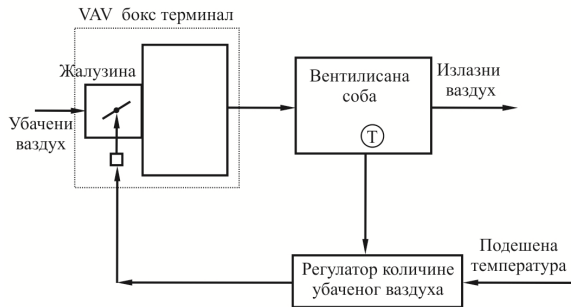
T_v - температура виртуелног сензора која се добија из CFD модела [K] и

T_r - реална температура која се мери [K].

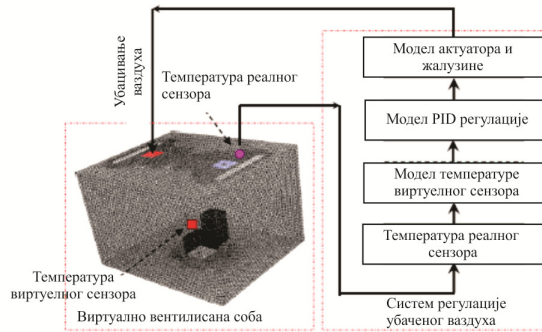
Једначина (2.20) добијена је за случај када један човек борави у кондиционираном простору. Користећи жалузину, актуатор, PID¹⁴ регулатор, реалан термометар и виртуелан термометар, аутори су формирали модел виртуелне регулације количине ваздуха којим се снабдева кондиционирани простор. Убачена количина ваздуха регулише се према температури виртуелног термометра *слике 2.31 и 2.32*.

¹³ CFD (Computer Fluid Dynamics) – рачунарска динамика флуида.

¹⁴ PID (Proportional Integral Derivative) – пропорционално, интегрално, диференцијални тип регулације.



Слика 2.31 Шематски приказ VAV бокс терминала (Sun et al., 2009)

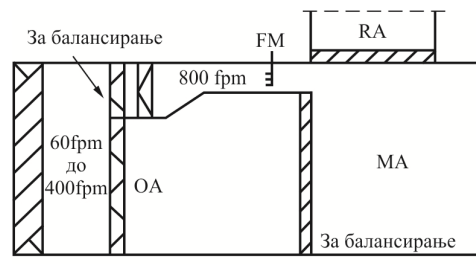


Слика 2.32 Конфигурација виртуелног система регулације убаченог ваздуха (Sun et al., 2009)

Аутори су закључили да виртуални систем CFD регулације температуре ваздуха у кондиционираном простору повећава тачност регулације убаченог ваздуха, али је начин регулације сувише спор уколико се реализује на персоналним рачунарима. Да би се формирани метод регулације применио мора се или упростити нумерички модел или користити моћнији рачунар (Sun et al., 2009).

2.2.12 Регулација минималне количине свежег ваздуха бокс терминалом

На улазној секцији за убацивање свежег ваздуха може да се угради терминал бокс, слика 2.33. Терминал бокс је комбинација жалузине и анемометра са топлом жицом, где се мери брзина струјања, а затим се померају лопатике жалузине тако да брзина струјања остаје константна. Анемометар са топлом жицом постављен је у сужену секцију са циљем да се повећа брзина струјања како би се тачније измерила брзине струјања. Одржавањем константне брзине струјања кроз ОА жалузину одржава се минимално потребна количина ваздуха која се убације у систем.



Слика 2.33 Регулација протока свежег ваздуха бокс терминалом (Felker, 2002)

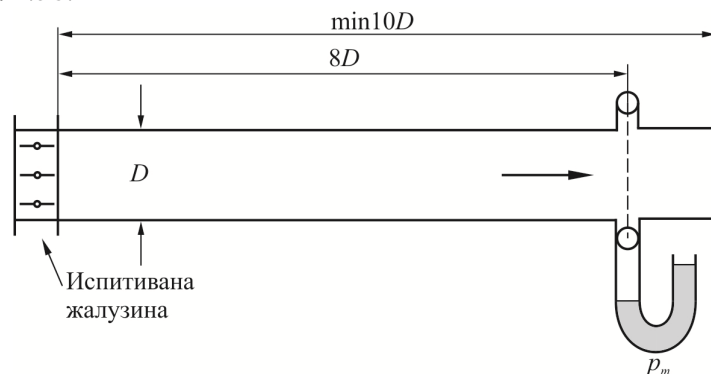
2.3 Развој жалузина за потребе мерења и регулације протока ваздуха у HVAC системима

2.3.1 Утицај локације жалузине на мерење протока ваздуха

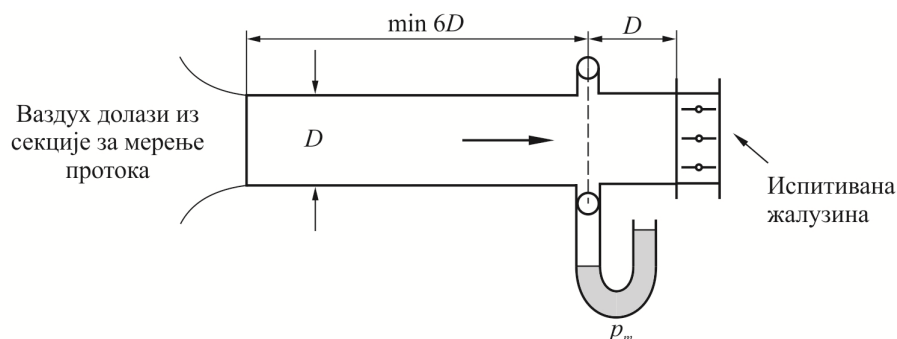
Пад притиска на жалузини зависи од локације на којој је на систему постављена жалузина, па самим тим локација жалузине утиче на мерење протока ваздуха. У том духу је и донет стандард којим се дефинише методологија за испитивање регулационих жалузина (ANSI/AMCA 500 D 2007). Бекелере (Becelaere, 1998a) је стручној и научној

јавности приближио и објаснио физику проблема која се дефинише стандардом (ANSI/AMCA 500 D 2007).

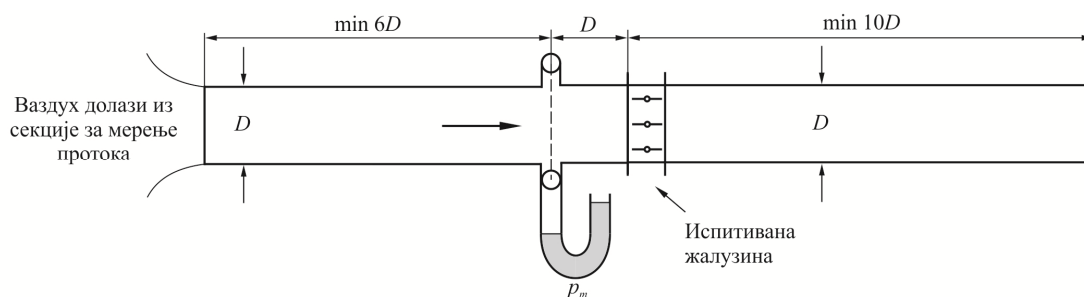
Стандардом је дефинисано пет различитих подешавања којим се испитују перформансе правоугаоних регулационих жалузина са становишта пада притиска. Код првог теста положај жалузине је на улазу у цевовод *слика 2.34*. Код другог теста положај жалузине је на крају цевовода *слика 2.35*. Трећи тест дефинише методологију испитивања са правом деоницом испред и иза жалузине *слика 2.36*. Код четвртог и петог теста испитују се жалужине инсталиране у пленуму, где је брзина струјања ваздуха испод 1,5 m/s, *слике 2.37 и 2.38*.



Слика 2.34 Први тест – жалужина на улазу у цевовод (ANSI/AMCA 500 D 2007)



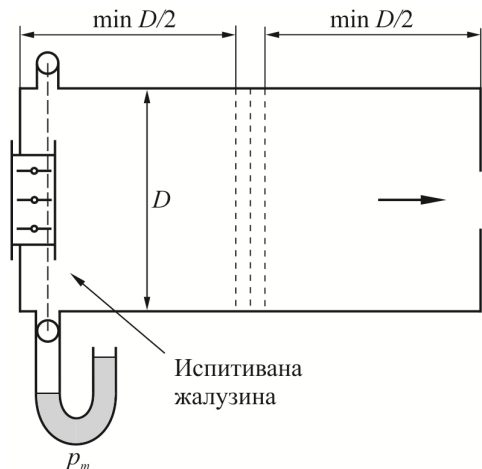
Слика 2.35 Други тест – жалужина на излазу из цевовода (ANSI/AMCA 500 D 2007)



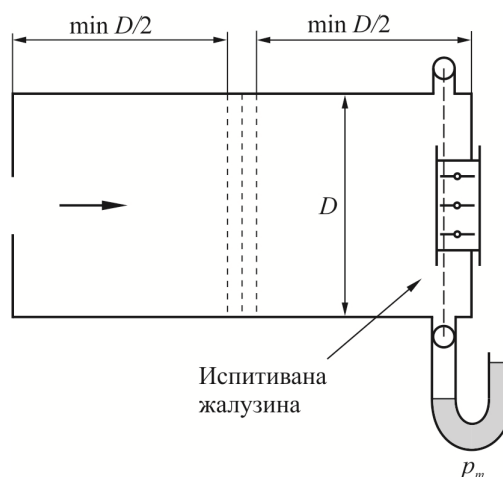
Слика 2.36 Трећи тест – праве деонице испред и иза жалузине (ANSI/AMCA 500 D 2007)

Поређењем перформанси исте регулационе жалузине која је испитана за пет различитих подешавања инсталације *слике од 2.34 до 2.38*, Бекелере је показао да систем има велики утицај на перформансе жалузине *слика 2.39* (Veselaere, 1998). Најмањи пад притиска на жалужини јавља се на трећем тесту *слика 2.36*, јер инсталација са правом деоницом испред и иза жалузине најмање утиче на перформансе жалузине.

Најправилније би било да се пад притиска жалузине одреди на следећи начин: прво да се измери пад притиска на деоници са жалужином, затим да се жалузина скине са инсталације и измери пад притиска на деоници без жалузине. Пад притиска на жалузину добија се када се од пада притиска на деоници са жалужином одузме пад притиска на деоници без жалузине.

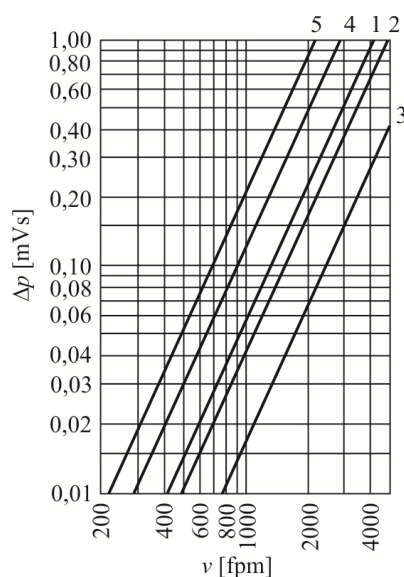


Слика 2.37 Жалузина инсталирана на улазу у плenum (ANSI/AMCA 500 D 2007)



Слика 2.38 Жалузина инсталирана на излазу из плenumа (ANSI/AMCA 500 D 2007)

Локални отпори могу знатно да утичу на пад притиска жалузине. Нпр. решетка са својим лопатицама која се налази испред регулационе жалузине има велики утицај на њен пад притиска. Овај ефекат је још израженији ако решетка и жалузина нису у линији, када се ствара неуниформно ваздушно струјање испред жалузине. Може да се види да систем на различите начине може знатно да утиче на пад притиска жалузине, па се предходно пројектом мора предвидети пад притиска на жалузину. Уколико се утицаји система игноришу систем може значајно да утиче на тачност мерења и регулацију протока ваздуха (Becelaere, 1998).



Слика 2.39 Утицај положаја на пад притиска правоугаоне регулационе жалузине (Becelaere, 1998)

2.3.2 Утицај ауторитета жалужине на мерење и регулацију протока ваздуха

Лизандорс и др. (Lizardos et al., 2000) написали су рад на тему избора жалужина са становишта ауторитета жалужине. У разматрање су узели две правоугаоне жалужине са четири лопатице: жалужину са паралелним вођењем и жалужину са супротносмерним вођењем лопатица *слика 2.40*.

Ауторитет жалужине дефинише се као:

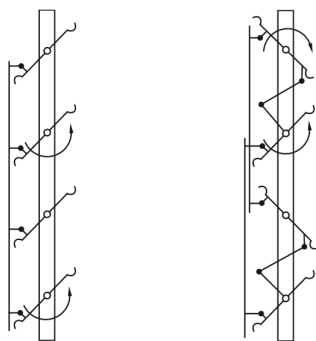
$$AD = \frac{\Delta p}{\Delta p_t} \cdot 100 \%, \quad (2.21)$$

где су:

Δp - пад притиска отворене жалужине [Pa] и

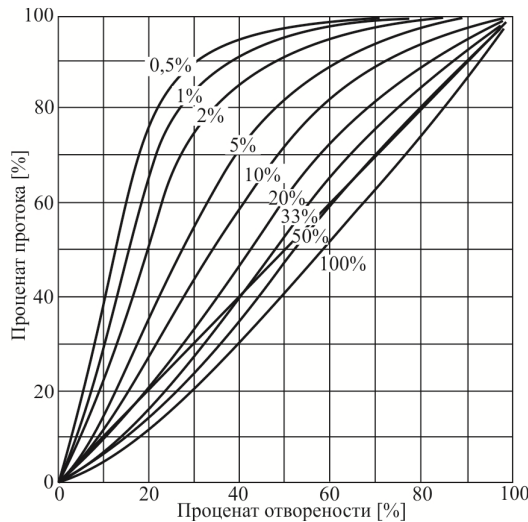
Δp_t - укупни пад притиска на делу на коме жалужина регулише проток без пада притиска жалужине [Pa].

Циљ рада био је да се дође до линеарне зависности између промене положаја лопатице и промене запреминског протока. Када ова промена није линеарна долази до нестабилног рада и нетачног мерења и регулације протока ваздуха.

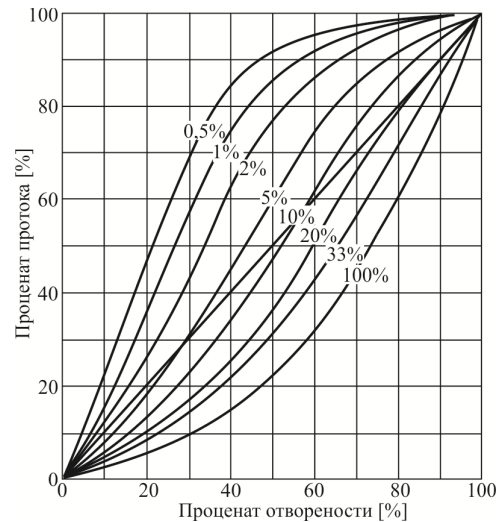


Слика 2.40 Шематски приказ жалужина са паралелним вођењем лопатица (лево) и са супротносмерним вођењем лопатица (десно), (Lizardos et al., 2000)

Аутори су користећи дефиницију ауторитета жалужине (2.21) дошли до вредности ауторитета жалужина при којима се добија линеарна зависност између промене положаја лопатице и промене протока ваздуха. Код жалужина са четири лопатице и паралелним вођењем лопатица пожељно је да ауторитет жалужине буде између 30 и 50 %, *слика 2.41*, док је код жалужина са четири лопатице и супротносмерним вођењем пожељно да ауторитет жалужине буде између 10 и 15 %, *слика 2.42*.



Слика 2.41 Ауторитет жалузине са паралелно вођеним лопатицама (Lizardos et al., 2000)



Слика 2.42 Ауторитет жалузине са супротносмерним вођеним лопатицама (Lizardos et al., 2000)

2.3.3 Линеаризација регулацијског сигнала жалузине

Количина уштеђене електричне енергије вентилатора за извлачење ваздуха зависи од регулацијског сигнала, где се линеарним регулацијским сигналом којим се управља жалузинама може уштедети и до 50 % енергије (Kraakow et al., 2000). Код система са линеарним карактеристикама жалузине вентилатор ће са мање варијација брзине да одржава константан притисак у дистрибутивном цевоводу (Kraakow et al., 2000). Моторизована жалузина је механички уређај који садржи лежајеве, преносни механизам, актуатор итд. Тешко је направити регулацијску жалужину са линеарном карактеристиком, мада се и такве жалужине могу наћи на тржишту. Знатно је лакше да се софтвером са пар редова кода уради линеаризација нелинеарне карактеристике жалузине (Kraakow et al., 2000).

Запремински проток ваздуха кроз жалужину дефинише се као:

$$Q = C_v \cdot \sqrt{\Delta p}, \quad (2.22)$$

где су:

Δp - пад притиска на жалужини [Pa] и

C_v - коефицијент протока [$m^3/Pa^{1/2} \cdot s$].

Коефицијент протока пропорционалан је површини попречног пресека:

$$C_v = c_v \cdot A_F, \quad (2.23)$$

где су:

c_v – константа пропорционалности између коефицијента протока и светле површине жалузине [$m/Pa^{0,5} \cdot s$] и

A_F – светла површина попречног пресека жалузине [m^2].

Према једначини (2.23) однос коефицијента протока за произвољно отворену и скроз отворену жалузину гласи:

$$\frac{C_v}{C_{vmax}} = \frac{A_F}{A_{Fmax}}. \quad (2.24)$$

где су:

C_{vmax} – коефицијент протока при максимално отвореној жалузини $[m^3/Pa^{1/2} \cdot s]$ и
 A_{Fmax} – површина попречног пресека максимално отворене жалузине $[m^2]$.

Слободна површина је функција регулацијског сигнала послатог на актуатор:

$$A_F = A_F(S), \quad (2.25)$$

па је самим тим и коефицијент протока у функцији регулацијског сигнала који се шаље на актуатор:

$$C_v = C_v(S). \quad (2.26)$$

Светла површина жалузине може да се представи у функцији регулацијског сигнала који се шаље актуатору као:

$$A_F = A_0 + A_1 \cdot S + A_1 \cdot S^2 + \dots + A_n \cdot S^n, \quad (2.27)$$

где су: A_0 до A_n константе полинома.

Захтева се да слободна површина буде линеарно зависна PI^{15} (Пропорционално интегралном) регулацијском сигналу:

$$A_F = B_0 + B_1 \cdot S_{PI}, \quad (2.28)$$

где су: B_0 до B_n константе полинома.

Да би се добио линеаран сигнал леве стране једнакости (2.27) и (2.28) морају да буду једнаке:

$$B_0 + B_1 \cdot S_{PI} = A_0 + A_1 \cdot S + A_1 \cdot S^2 + \dots + A_n \cdot S^n. \quad (2.29)$$

Решењем предходне једначине и прегуписавањем чланова, долази се до једначине:

$$S = C_0 + C_1 \cdot S_{PI} + C_2 \cdot S_{PI}^2 + \dots + C_n \cdot S_{PI}^n, \quad (2.30)$$

где су: C_0 до C_n константе полинома.

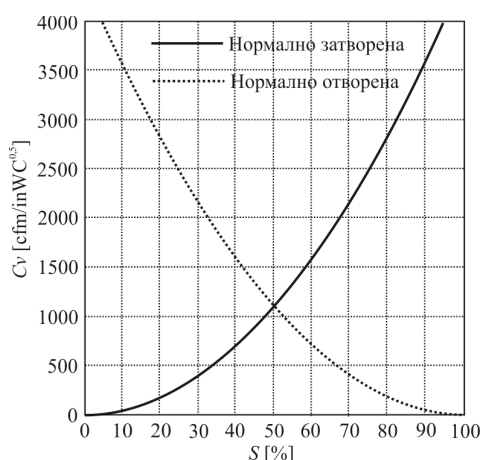
¹⁵ PI (Proportional Integral) – пропорционално, интегрални тип регулације.

Обично се решење и нормализује:

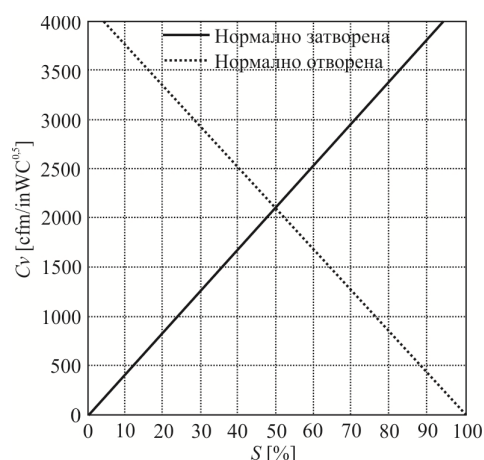
$$a = \frac{A_F}{A_{F \max}}, \quad (2.31)$$

$$s = \frac{S}{100}. \quad (2.32)$$

Према предходном поступку Краков и др. (Krakow et al., 2000) урадили су линеаризацију регулацијског сигнала жалужине. На *слици 2.43* приказана је нелинеарна карактеристика нормално затворене и нормално отворене жалужине, док је на *слици 2.44* приказана линеаризована карактеристика нормално затворене и нормално отворене жалужине.



Слика 2.43 Типична нелинеарна карактеристика жалужине (Krakow et al., 2000)



Слика 2.44 Линеаризована карактеристика жалужине (Krakow et al., 2000)

У свом раду Еловиц (Elovitz, 2009) је показао како је могуће стратегијом управљања економајзером помоћу одржавања константног притиска у комори за мешање добити скоро линеарну карактеристику жалужина у економајзеру. Нпр. повећањем протока потисног вентилатора повећава се проток ваздуха кроз жалужину за убацивање свежег ваздуха, што доводи до тога да се у комори за мешање снижава притисак. Сада се повећава проток повратног вентилатора тако да више рециркулисаног ваздуха долази у комору за мешање у којој се повиси притисак ваздуха.

2.3.4 Хистерезис регулационе жалужине

Хистерезис регулационе жалужине може да се смањи преправкама регулацијског уређаја (корекцијом преносног механизма, опруге или постављањем оптерећења) или софтверски. Занимљиво је истраживање Кракова (Krakow, 1998) који је дао модел за софтверско смањивање ефекта хистерезиса, где је показао да је могуће са свега пар редова кода смањити хистерезис регулационе жалужине, што је много лакше од преправке самог регулацијског уређаја.

Као главне изворе хистерезиса регулационе жалужине Краков (Krakow, 1998) је навео: мотор, проценат укупне ротације мотора, преносни механизам и слабу поновљивост експерименталних података при испитивању жалужине. Да би се смањио хистерезис сигнал који се шаље мотору компензован је као на *слици 2.45*.

Уколико је сигнал услед ефекта хистерезиса већи од оног који се шаље жалужини $S > S_{id}$, тада је компензовани сигнал који се шаље жалужини:

$$S_k = S + H \left(1 - \frac{S}{100} \right), \quad (2.33)$$

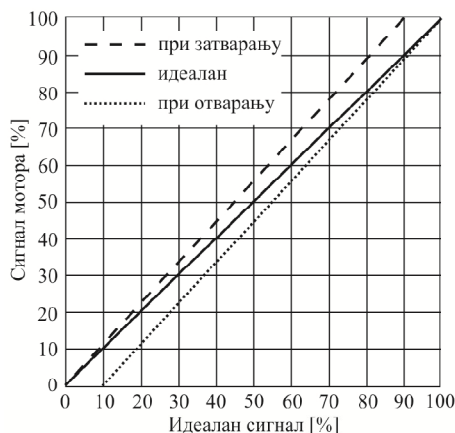
где је H - фактор који компензује хистерезис, а који се добија експерименталним путем.

Уколико је сигнал услед ефекта хистерезиса мањи од оног који се шаље жалужини $S < S_{id}$, тада је компензовани сигнал који се шаље жалужини:

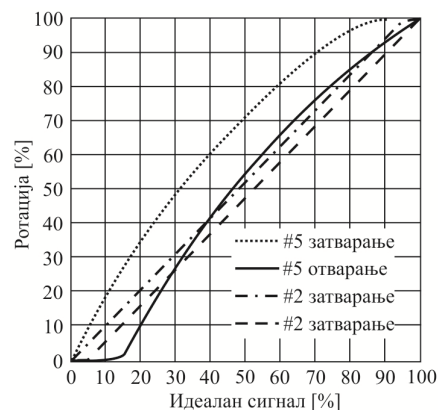
$$S_k = S - H \left(\frac{S}{100} \right). \quad (2.34)$$

Код пропорционално интегралне PI регулације подразумева се да постоји само једна вредност регулисане величине, а услед појаве хистерезиса то су заправо две регулисане величине. У случају постојања хистерезиса величина која се регулише може да осцилује око задате вредности. Проблем који хистерезис задаје приликом PI регулације такође може да се реши софтверски. Предходно мора да се експериментално одреди хистерезис и компензациони фактор. Коefицијенти компензације PI регулације морају да буду такви да смање осциловање регулисане око задате вредности.

Краков (Krakow, 1998) је упоредио ефекат хистерезиса две жалужине са мотором: жалужине са две и пет лопатица. Установио је да жалужина са пет лопатица има већи хистерезис у односу на жалужину са две лопатице, *слика 2.46*. Такође, хистерезис жалужине са пет лопатица је неуниформан, док је хистерезис жалужине са две лопатице прилично униформан. Краков је установио и да жалужина са мотором који има ограничену ротацију поседује већи хистерезис у односу на жалужину са мотором који има пуну ротацију (Krakow, 1998).



Слика 2.45 Компензација контролног сигнала (Krakow, 1998)

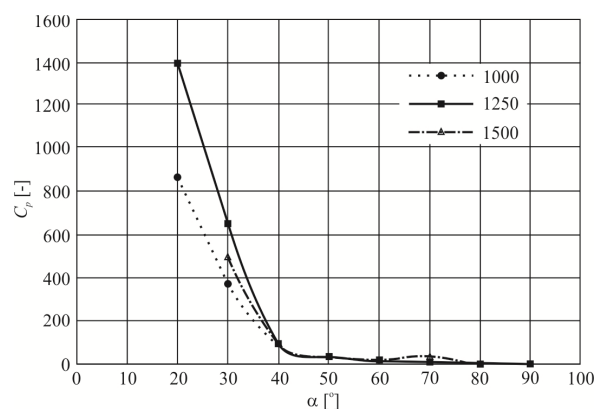


Слика 2.46 Хистерезис моторне жалужине са две и пет лопатица (Krakow, 1998)

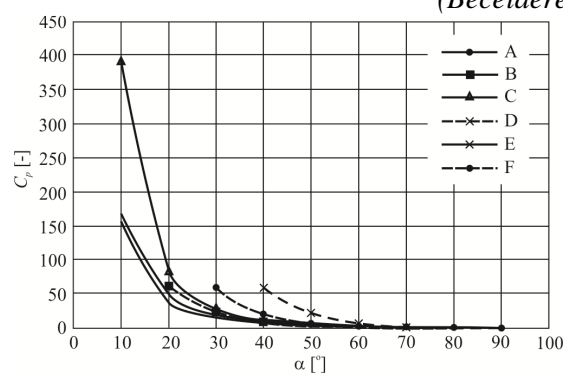
2.3.5 Испитивање различитих типова регулационих жалузина – остали утицајни фактори

Бекелери и др. (Becelaere et al., 2005) експериментално су испитали различите типове регулационих жалузина. Испитивања су реализовали на различитим типовима инсталација и под различитим условима. Извели су 368 тестова где је основни параметар за предвиђање протока кроз жалузину био коефицијент притиска, једначина (2.10). Променљиве у току испитивања биле су: тип жалузине, смер обртања лопатица, произвођач жалузине, тип инсталације, брзина струјања испред жалузине и пад притиска.

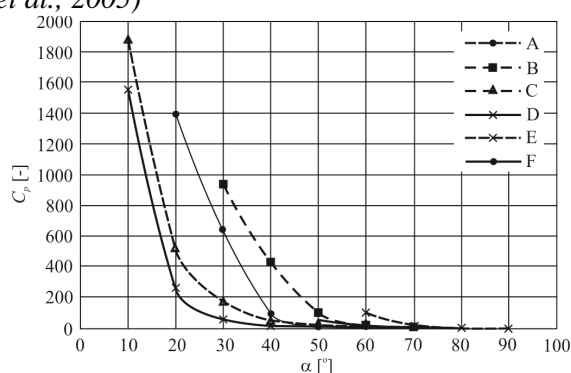
На слици 2.47 приказан је утицај улазне брзине струјања на перформансе правоугаоне жалузине са равним лопатицама димензија 36 x 48 x 5 in (0,91 x 1,21 x 0,127 cm). Лопатице жалузине окрећу се супротносмерно, а жалузина је испитана на инсталацији са равном, правом деоницом испред и иза жалузине. На слици 2.47 може да се уочи да је утицај улазне брзине знатно већи при затворенијој жалузини. Брзине струјања на слици 2.47 дате су у стопама по минути (fpm).



Слика 2.47 Утицај улазне брзине струјања на перформансе жалузине (Becelaere et al., 2005)



Слика 2.48 Утицај типа жалузине са паралелним вођењем лопатица (Becelaere et al., 2005)



Слика 2.49 Утицај типа жалузине са супротносмерним вођењем лопатица (Becelaere et al., 2005)

На слици 2.48 види се утицај типа жалузине са паралелним вођењем лопатица на перформансе жалузине. На слици 2.49 приказан је утицај типа жалузине са супротносмерним вођењем лопатица на перформансе жалузине. Код оба начина вођења

лопатица, тип жалужине има значајан утицај када је жалужина скоро затворена. Типови лопатица жалужина су: равне, V тип и аеропрофил, где су A, B и C жалужине једног произвођача, док су D, E и F жалужине другог произвођача.

Бекелери (Becelaere, 19986) испитао је две у раду спрегнуте жалужине. Ради се о жалужинама за убацивање свежег ваздуха и за рецикулацију ваздуха које су део економијера VAV система. Коришћене су жалужине различитих облика лопатица: једна жалужина била је са лопатицама са V жљебом, док су друге две жалужине биле са аеродинамички обликованим лопатицама. Испитивања су рађена са паралелним и супротносмерним вођењем лопатица за радни опсег нападних углова од 0 до 90°, где се жалужина за убацивање свежег ваздуха отвара, док се жалужина за рецикулацију ваздуха затвара.

Резултати испитивања показали су да различите жалужине са супротносмерним вођењем имају највиши притисак на неком међу положају лопатице, при нападном углу приближно 50°, што није случај са жалужинама са паралелним вођењем лопатица. Такође, на жалужина са супротносмерним вођењем лопатица јављају се виши притисци у односу на жалужине са паралелно вођењем лопатица, што указује да се код система са супротносмерним вођењем лопатица јављају мањи протоци ваздуха у VAV системима.

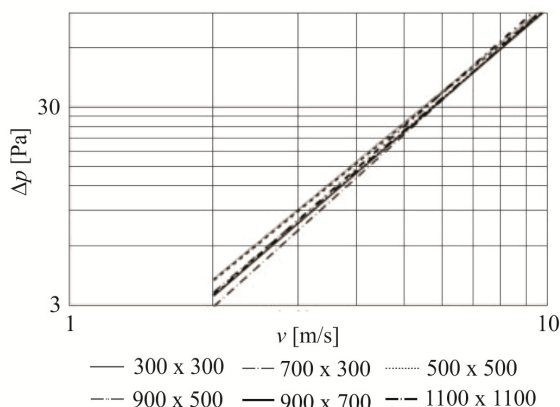
Венко и др. (Venko et al., 2012) приказали су резултате развоја правоугаоног VAV бокс терминала са концептом одвојеног мерења протока блендом и регулисања протока жалужином. За циљ су поставили смањење дужине у односу на постојеће уређаје, развој уређаја истих дужина и већу тачност регулације протока. Експериментално су испитивали различите величине правоугаоних VAV бокс терминала на ваздушном тунелу, уз варијацију положаја две паралелно постављене мерне бленде у односу на регулациону жалужину, за различите положаје лопатица жалужине.

На *сликама 2.50 и 2.51* приказан је део резултата истраживања који се односи на оптимални положај две паралелно постављене мерне бленде у односу на регулациону жалужину. Упоредне карактеристике мерне бленде са положајима лопатица регулационе жалужине од 90°, *слика 2.50* и од 30°, *слика 2.51*, показују да за оптималан положај мерне бленде у односу на регулациону жалужину долази до мале разлике у карактеристикама мерних бленди за VAV бокс терминале: од $B \times H = 200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ до $B \times H = 1200 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$.

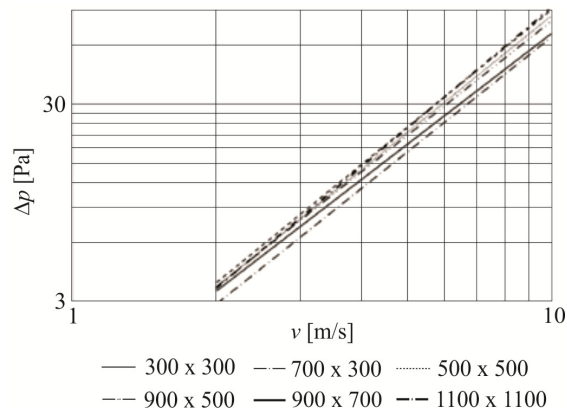
Хјуџис и др. (Hughes et al., 2008) испитивали су уређај за пасивну вентилацију, као алтернатива за присилну вентилацију и климатизацију. Уређај се поставља на врх крова и ради на принципу разлике притиска ваздуха у атмосфери и унутрашњости објекта. Брзина струјања ваздуха, тј. количина свежег ваздуха која се убацује у унутрашњост објекта регулисана је помоћу моторне жалужине. Рад је показао утицај положаја лопатица жалужине и разлике спољашњег и унутрашњег притиска ваздуха на количину убаченог свежег ваздуха у објекат.

Циљ рада био је да се дође до оптималног опсега рада моторне жалужине који би према спољашњим условима одржавао константан доток свежег ваздуха у унутрашњост објекта. У ту сврху урађена је нумеричка анализа комерцијалним CFD кодом, који користи метод коначних запремина. Формирано је 19 различитих CFD модела у области рада жалужине (опсег нападних углова лопатице од 0° до 90°), са кораком обртања лопатице жалужине од 5° и истим граничним условима. На основу добијених

поља брзине струјања и статичког притиска, дошло се до утицаја различитих углова лопатица жалюзине на количину свежег ваздуха која се доводи унутрашњости објекта. На слици 2.52 приказано је добијено поље брзине струјања за нападни угао лопатице жалюзине од 45° .



Слика 2.50 Упоредба карактеристика мерне бленде са положајем лопатица жалюзине од 90° (Venko et al., 2012)



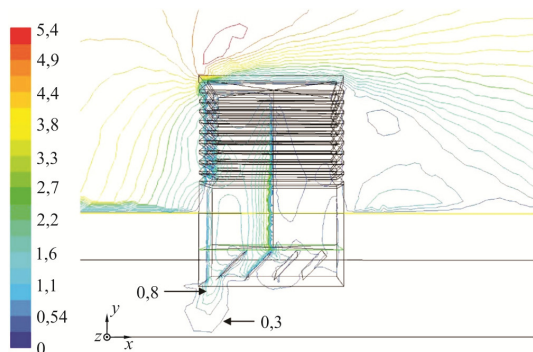
Слика 2.51 Упоредба карактеристика мерне бленде са положајем лопатица жалюзине од 30° (Venko et al., 2012)

Затварањем жалюзине расте разлика спољашњег и унутрашњег притиска ваздуха, док се смањује брзина струјања, тј. количина свежег ваздуха која се доводи у унутрашњост објекта. Нумеричким симулацијама 19 CFD модела, дошло се до зависности брзине струјања, разлике притиска спољашњег и унутрашњег ваздуха и нападног угла лопатица жалюзине, слика 2.53.

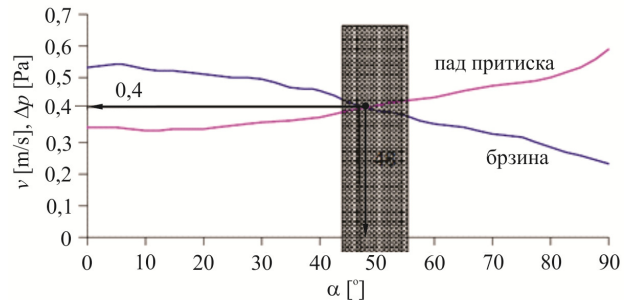
У пресеку криве разлике притиска и криве брзине струјања ваздуха кроз жалузину, добија се оптимална тачка рада жалюзине која се јавља при положају лопатице од 48° и разлици притиска од 0,4 Pa. Наравно, одржавање константне количине свежег ваздуха који се убацује у унутрашњост објекта није могуће са фиксним положајем лопатица жалюзине, због промене климатских услова, тј. брзине струјања ветра. Зато се сматра да је оптималан опсег рада жалюзине за област положаја лопатице од 45° до 55° , за просечну брзину струјања ваздуха у Великој Британији од 4,5 m/s. Оптималан опсег рада у комбинацији са макро климатским утицајима представља основу за доношење стратегије регулације количине убаченог свежег ваздуха.

Иако се не односи директно на мерење и регулацију протока ваздуха правоугаоном жалузином, рад Сонга и др. (Song et al., 2009) завређује да се помене. Аутори су урадили оптимизацију лептирастог затварача са становишта опструјања флуида око вентила и чврстоће вентила. За анализу опструјавања флуида око вентила користили су РДФ, док су за анализу чврстоће лептирастог затварача користили FEM¹⁶ (Finite Element Method). Успели су да задовоље два услова: да коефицијент притиска буде мањи од 0,8 и да фактор чврстоће буде већи од 1,5.

¹⁶ FEM (Finite Element Method) – метод коначних елемената.



Слика 2.52 Поље брзине струјања за положај лопатица жалужине од 45° (Hughesat et al., 2008)



Слика 2.53 Промена брзине струјања и разлике притиска ваздуха са променом нападног угла лопатице жалужине (Hughesat et al., 2008)

2.3.6 Поузданост мерења и регулације протока ваздуха жалужинама

Неисправан актуатор или систем за пренос снаге могу да онеспособе коришћење жалужине за мерење протока свежег ваздуха. Сензор за мерење температуре ваздуха услед квара може да изазове да се неадекватна количина ваздуха убацује у кондициониран простор. Генерално, квар на системима за мерење и регулацију протока ваздуха може да изазове нефункционалност целог VAV система и повећану потрошњу енергије. Зато је од изузетне важности да се сви системи за мерење и регулацију протока ваздуха адекватно користе, периодично контролишу и редовно одржавају.

Енгдал (Engdahl, 1998) је у свом раду писао о значају и ефектима инспекцијске контроле вентилационих система. Важно је да системи раде у складу са пројектном документацијом и законском регулативом. Аутор је испитао 5626 вентилационих система у Шведској и утврдио да свега 34% система ради према параметрима пројектне документације и у складу са важећом законском регулативом.

Шajn и др. (Schein et al., 2003) развили су специјализовани алат VPACC¹⁷ (Box Performance Assessment Control Charts) за детекцију грешке код VAV терминал боксова. VPACC користи базу података са дозвољеним границама грешака добијеним статистичком обрадом података при исправном раду терминал боксова. Измерене вредности пореде се са доњим и горњим дозвољеним граничним вредностима за терминал бокс. Уколико измерена вредност иде ван дозвољених граница, тада се сматра да уређај не ради добро.

Фенг и др. (Feng et al., 2005) написали су рад о унапређењу система дијагностике на регулационим жалужинама техником AFDD¹⁸ (Damper Automated Fault Detection). Ради се о техници дијагностике која мери величине које се односе на перформансе жалужине и упоређује их са величинама из базе података, нпр. да ли је лопатица жалужине у

¹⁷ VPACC (Box Performance Assessment Control Charts) – специјализовани алат за детекцију грешке код VAV терминал боксова.

¹⁸ AFDD (Damper Automated Fault Detection) – систем дијагностике грешке у раду регулационе жалужине.

прописаној позицији за дате услове. Процена је аутора да праћењем рада AFDD техником само ОА жалужине у HVAC системима може да се уштеди од 10% до 30% енергије за грејање и хлађење.

Иницијална грешка на неком сензору може да се пренесе на неку другу локацију система, па да и при исправном раду сензора систем као целина прави грешку и не ради добро. Аутори су у прошлости доста урадили на примени PCA¹⁹ (Principal Component Analysis) и JAA (Joint Angle Analysis) метода за детекцију и дијагнозу FDD²⁰ (Fault Detection and Diagnosis) вишеструких грешака на VAV системима.

Ванг и др. (Wang et al., 2004) применили су PCA метод на VAV систем, где су развијени модели на бази топлотног биланса и биланса масе. Установили су да је PCA метод за детекцију и дијагностиковање грешке у VAV системима знатно лакши за примену од анализе неуронским мрежама. Међутим, PCA метод не приказује физику проблема што га мало дисквалификује за откривање извора грешке. PCA метод добро показује разлику вредности коју показује сензор у односу на реалну вредност, што је важно за детекцију и дијагностику грешке, али сигурно да је за откривање извора грешке потребно још доста експертизе.

Квин и Ванг (Qin and Wang, 2005) успешно су применили PCA метод као ефикасан алат за детектовање и дијагностиковање грешке на VAV бокс терминалима. За изоловање, одређивање извора грешке коришћен је SPE²¹ метод. Упоређивањем уочено је да деветнаести бокс терминал има највишу SPE вредност. Експертизом је закључено да овај бокс терминал има грешку. Сензор терминала је замењен и FDD стратегија је поновљена док следећа грешка није откривена.

Ду и Јин (Du and Jin, 2007a) урадили су детекцију и дијагнозу вишеструких грешака на VAV систему методама PCA²² и JAA²³. PCA метод анализирао је систем и два локална подсистема са циљем да истовремено детектује вишеструке грешке. Праћен је цео систем подешавањем модела I са циљем да се детектују неправилности рада целог система, а затим су анализом подсистема локалним моделима А и В потврђене вишеструке грешке на VAV систему. Примена JAA модела имала је за циљ да помоћу локалних модела изолује изворе појединих грешака система. Након иницијалне детекције користећи SPE вредности за цео VAV систем *слика 2.54a*, грешке су утврђене на основу SPE вредности два подсистема *слике 2.54b* и *2.54c*.

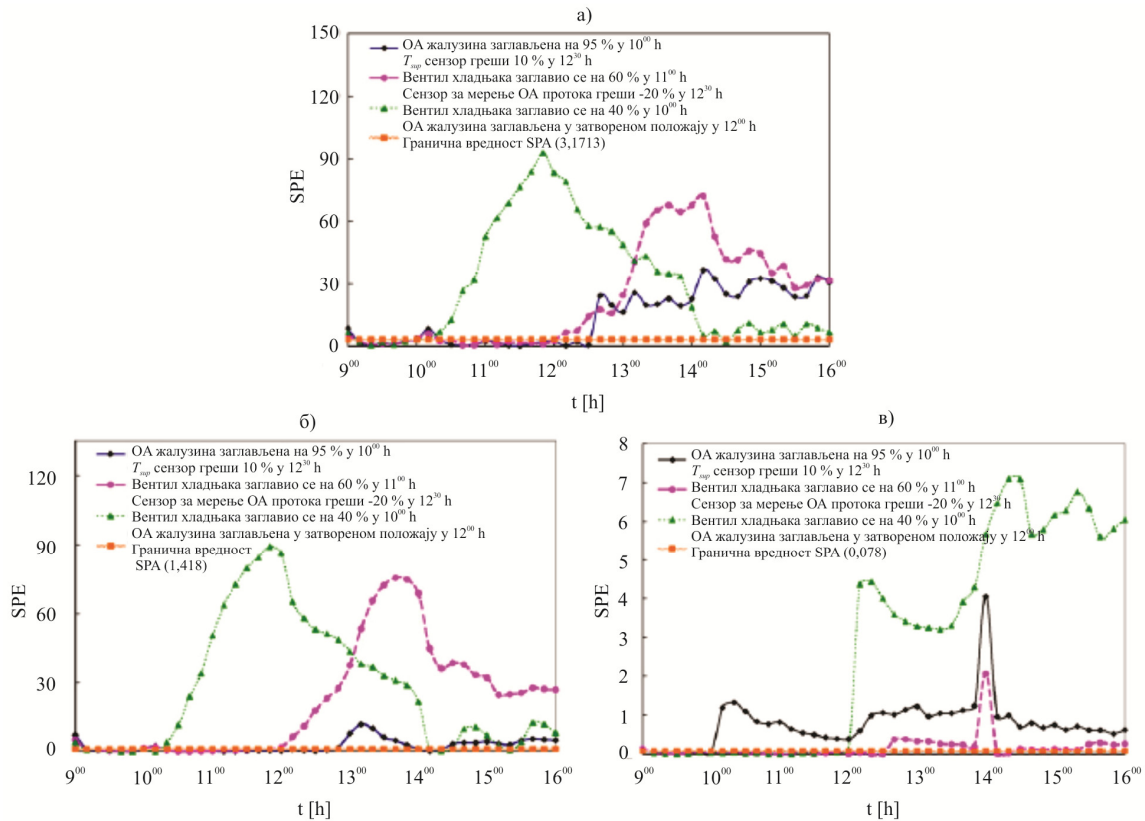
¹⁹ PCA (Principal Component Analysis) – анализа својствених компоненти, метода обраде података којом се из групе уочавају најважнији подаци.

²⁰ FDD (Fault Detection and Diagnosis) – метод детекције и дијагностицирања грешке на систему.

²¹ SPE (Square Prediction Error) – метода регресионе анализе која се користи за предвиђање параметара неког система.

²² PCA (Principal Component Analysis) – анализа својствених компоненти, метода обраде података којом се из групе уочавају најважнији подаци.

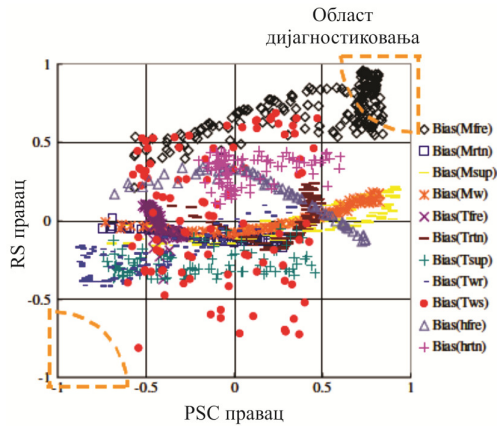
²³ JAA (Joint Angle Analysis) – метод којим се открива извор грешке на неком систему где се упоређују правци вектора неке величине система за два случаја: када систем ради без грешке и када систем ради са грешком.



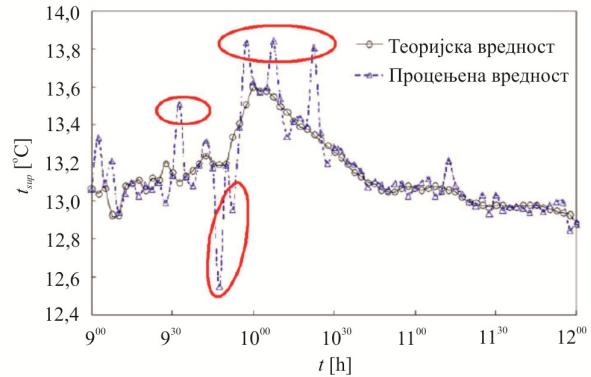
Слика 2.54 SPE графици за: а) цео VAV систем (модел I), б) подсистем хладњака (модел А) и в) подсистем регулације протока ваздуха жалюзинама (модел В), (Du, 2007а)

РСА метод веома брзо детектује грешке у раду система, док је ЈАА метод веома ефикасан да открије извор грешке. ЈАА метод приказује векторе кретања грешке у РСС и RS координатама. Правци кретања вектора грешака упоређени су са одговарајућим правцима кретања вектора познатих грешака који се налазе у бази података. Дијагностика је базирана на углу између правца вектора грешке и познатог правца вектора грешке из базе података. На овај начин уз познавање физике проблема могуће је открити извор грешке. Нпр. на слици 2.55 приказани су правци кретања вектора грешака различитих мерних величина, одакле се види да сензор који мери проток свежег ваздуха прави грешку (Du and Jin, 2007б). Предуслов примене РСА и ЈАА методе јесте да се дође до хронолошких података о раду VAV система да би се формирали модели и база података грешака сензора.

Ду и др. (Du et al., 2007в) приказали су унапређену примену РСА и ЈАА методе која детектује и дијагностикује систематску и случајну грешку расипања измерених вредности сензорима у VAV системима. Детектоване су и дијагностиковане грешке PID регулатора жалюзина у VAV системима. Годину дана касније применили су РСА и ЈАА методе за детектовање и дијагностиковање систематске и случајне грешке рада уређаја за мерење протока жалюзинама и VAV бокс терминалима (Du et al., 2008). У наслову свог рада аутори свом дијагностичком алату дају префикс “robot”.



Слика 2.55 Дијагностиковање грешке сензора за мерење протока ваздуха (Du and Jin, 2007a)



Слика 2.56 Предвиђене вредности неуронском мрежом (Du et al., 2009)

Ду и др. (Du , 2009) користили су WNN²⁴ (Wavelet Neural Network), као и интегрисану примену WNN и вештачких неуронских мрежа ANN²⁵ (Artificial Neural Network) да дијагностикују грешке сензора температуре, протока и притиска у VAV системима. WNN користи се за обраду реалних података добијених са система. Систем је подељен на три подсистема, на основу којих су добијене карактеристике система.

На слици 2.56 приказано је поређење температуре ваздуха за снабдевање добијене мерењем и предвиђањем методом ANN. Вредности предвиђене температуре ANN методом нису сасвим тачне, а разлика је у поређењу са реалним вредностима и виша од 5%. Аутори су ANN методу користили у комбинацији са WNN методом која је коришћена за предходну обраду реалних, почетних података. Након обраде података WNN методом дијагностички процес ANN методом је знатно унапређен. Треба истаћи да ни применом WNN методе, нити применом ANN методе не могу добро да се опишу физичке релације између појединих физичких величина у VAV системима.

2.4 Мерење протока ваздуха АТР жалузиром

У прошлости много више се урадило на предвиђању моментне карактеристике лептирастог затварача који се користе у разним процесима регулисања, него на предвиђању моментне карактеристике жалузина које се користе за мерење и регулацију протока ваздуха у VAV системима. Сарфкаја (Sarpkaya, 1959, 1961) је развио у лабораторијским условима теоријски модел који се показао као веома тачан у предвиђању моментне карактеристике лептирастог затварача са танком лопатицом. Сарфкајин модел развијен је уз претпоставку безвртложног, нестишљивог струјање флуида.

²⁴ WNN (Wavelet Neural Network) – примена вештачких неуронских мрежа ANN уз додаток ”Wavelet” трансформације, технике која се користи за анализу података, а развијена је као алтернатива краткотрајној Фуријеовој трансформацији.

²⁵ ANN (Artificial Neural Network) – метода примене вештачких неуронских мрежа;

Огава и др. (Ogawa et al., 1995) анализирали су моментну карактеристику лептирастог затварача, где се извршни елемент лептирастог затварача обртао око своје централне осе. Визуализацијом струјања воде преко лептирастог затварача аутори су уочили да долази до одвајања флуидне струје на задњој страни извршног елемента, па су за анализу моментне карактеристике користили теорију слободног струјања.

Такође су дефинисали коефицијенте момента као:

$$C_t = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho v^2 d^3} = \frac{2\pi \sin 2\alpha}{4 \cdot (4 + \pi \sin \alpha)^2}, \quad (2.35)$$

$$C_u = \frac{M}{\Delta p d^3} = \frac{M}{\frac{1}{2}\zeta \rho v^2 d^3}, \quad (2.36)$$

где су:

M - момент којим флуид делује на извршни елемент лептирастог затварача [Nm];

ρ - густина флуида [kg/m³];

Δp - пад притиска кроз лептирасти затварач [Pa];

d - пречник извршног елемента лептирасти затварач [m];

α - нападни угао извршног елемента лептирастог затварача [°];

v - брзина струјања флуида [m/s] и

ζ - коефицијент локалног отпора лептирастог затварача [-].

Једначине (2.35) и (2.36) које предвиђају моментну карактеристику лептирастог затварача кориговане су узимањем у обзир утицаја зидова цеви и дебљине лептира. Утицај зида цеви узет је у обзир корекцијом нападног угла лептира, док је дебљина лептира узета у обзир преко коефицијента који зависи од релативне дебљине лептира t/d . На овај начин добијене су једначине комбинацијом теоријске анализе и експерименталних резултата.

Аутори су утврдили да теорија слободне струјнице може успешно да се примени за предвиђање моментне карактеристике равног крила под условом да је Рејнолдсов број $Re > 10^4$. Резултати добијени из коригованих једначина добро су се поклопили са експерименталним резултатима за нападне углове лептира мање од 70°. За нападне углове лептира веће од 70° постоји велика разлика између података добијених коригованим једначинама и експериментом. Максимални момент јавља се при нападним угловима лептира од 50° до 60°.

Хазенфлуг (Hasenpflug, 1998) редефинисао је Сарфкајин модел користећи теорију слободне струјнице, где је визуелно приказао неколико решења потенцијалног струјања ваздуха кроз лептир. Модел моментне карактеристике лептирастог затварача који узима у обзир стишљивост флуида развили су Морис и др. (Morris et al., 1989). Закључили су да је моделирање за стишљив ваздух мање значајно за HVAC системе, јер су варијације

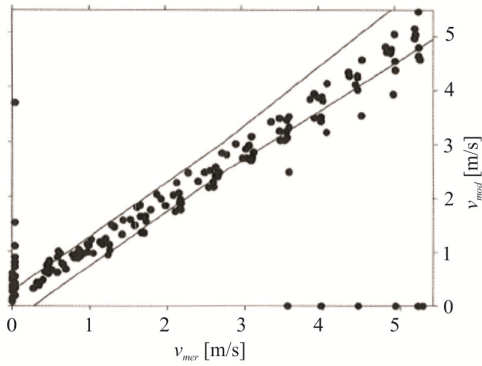
притиска мале у поређењу са атмосферским притиском, те да је нестишљиво струјање сасвим валидно при моделирању.

У прошлости се мало урадило на предвиђању моментне карактеристике жалужине правоугаоног и квадратног пресека која се користи у процесима мерења протока ваздуха и регулисања параметара HVAC система. Федершпил (Federspiel, 2004a, 2004b) је прилагодио модел моментне карактеристике лептирастог затварача који је предложио Хазенфлуг (Hasenpflug, 1998) за једну лопатицу регулационе жалужине квадратног пресека. Модел који је предложио Федершпил повезује брзину струјања ваздуха испред жалужине, положај мерне лопатице и момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу регулационе жалужине. Из развијеног математичког модела могуће је посредно одредити брзину струјања ваздуха испред жалужине на основу мерења нападног угла мерне лопатице и момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу. Услед везе између брзине струјања ваздуха, момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу и положаја мерне лопатице, Федершпил је овај мерни уређај назвао ATP (Air Torque Position) жалужина.

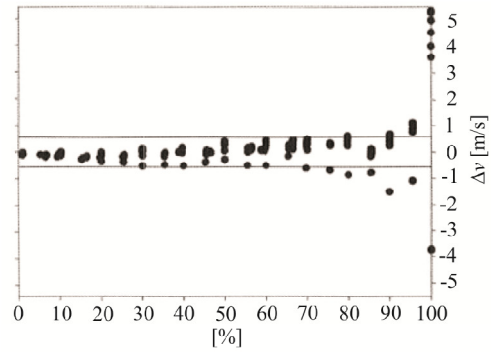
Са циљем да дође до ATP жалужине, аутор је морао да прилагоди класичну комерцијалну жалужину како би била осетљивија за потребе мерења момента. Мерну станицу на испитној инсталацији формирао је помоћу Прантлових цеви, где је једну цев поставио у центар, док је остале четири поставио на растојању 0,038 m од зидова цеви. Математички модел је калибрисан са једном групом, док је верификован са другом групом експерименталних података. Федершпил је добио математички модел за који тврди да има универзални карактер и може да се користи за различите пресеке, облике лопатица, број лопатица и начин вођења лопатица. Међутим, аутор је испитивање методе и верификацију математичког модела урадио само за ATP жалужину:

- квадратног пресека 0,61 x 0,61 m;
- која се налази на самом улазу VAV система;
- у виду решетке, са четири лопатице;
- са једним типом равне лопатице и
- са супротносмерним вођењем лопатица.

На *слици 2.57* приказани су резултати верификације математичког модела ATP жалужине испред које је неузнемирена, униформна ваздушна струја. Приказане су границе које представљају разлику измерене и моделске брзине струјања: +/- 10 % од тренутно измерене вредности брзине струјања или +/- 5% од пуне скале (узима се шира граница). Може да се уочи да се већина резултата налази у оквиру дефинисаних граница, где само поједине мерне тачке иду ван граница. Резултати који иду ван дефинисаних граница добијени су при отвореној ATP жалужини, када је мали момент којим ваздушна струја делује на лопатицу, *слика 2.58*. Може да се уочи да је скоро у целом опсегу нападног угла ATP жалужине апсолутна разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха у границама +/- 1 m/s.

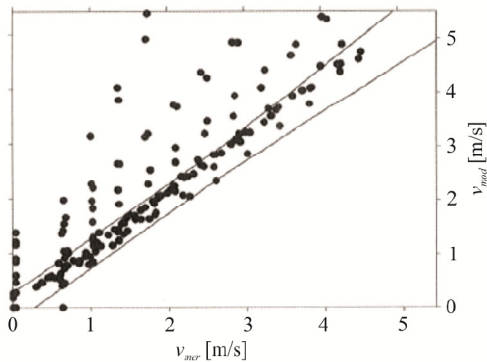


Слика 2.57 Верификација математичког модела АТР жалузине (Federspiel, 2004б)

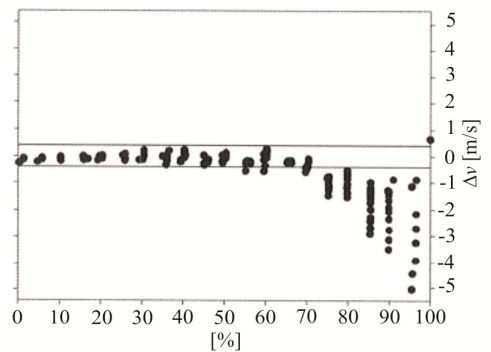


Слика 2.58 Верификација математичког модела АТР жалузине (Federspiel, 2004б)

На слици 2.59 приказани су резултати верификације математичког модела АТР жалузине испред које је постављен отпор, па је ваздушна струја неуниформна. Приказане су границе које представљају разлику измерене и моделске брзине струјања: $\pm 10\%$ од измерене вредности брзине струјања или $\pm 5\%$ од пуне скале (узима се шира граница). Може да се уочи да постављени отпор утиче на адекватност математичког модела и тачност мерења протока ваздуха, где одређени број мерних тачака иде ван дефинисаних граница, слика 2.59. Резултати који иду ван дефинисаних граница добијени су при отворености АТР жалузине већој од 70% , док се при мањој отворености од 70% резултати мерења налазе у оквиру дефинисаних граница, слика 2.60. Аутор је закључио да при отворености АТР жалузине мањој од 70% отпор постављен испред жалузине не утиче на адекватност математичког модела и тачност мерење протока ваздуха.

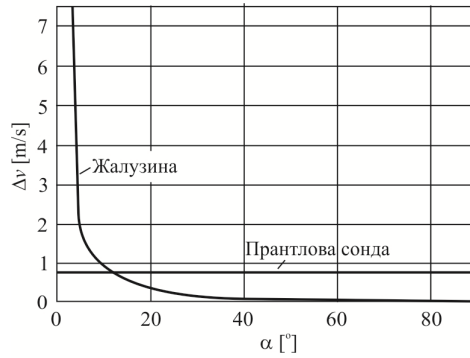


Слика 2.59 Верификација математичког модела АТР жалузине (Federspiel, 2004б)



Слика 2.60 Верификација математичког модела АТР жалузине (Federspiel, 2004б)

Најважнији услови рада јављају се при отворености АТР жалузине од 10% до 20% . То су уобичајни радни услови ОА жалузине када се обезбеђује минимална количина свежег ваздуха. При овим условима АТР жалузина је знатно тачнија и мање осетљива на неуниформност ваздушне струје од Прантлове сонде (Federspiel, 2004б), слика 2.61.



Слика 2.61 Поређење неизвесности мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузеном и Прантловом сондом (Federspiel, 2004б)

2.5 Закључна разматрања

Преглед развоја метода мерења и регулације протока ваздуха у HVAC системима указује на то да данас постоји више метода мерења и регулације протока ваздуха, али да не може да се говори о најбољој методи. Пројектанти морају добро да познају предности и недостатке појединих метода за мерење и регулацију протока ваздуха у HVAC системима, како би правилним избором методе добили функционалан и енергетски ефикасан HVAC систем.

Услед великог потенцијала уштеде енергије у HVAC системима уочљив је интензиван развој нових и постојећих метода мерења и регулације протока ваздуха у HVAC системима. На основу наведених референци може да се види да је развој метода мерења и регулације протока ваздуха веома актуелан. У том духу предмет интересовања у оквиру докторске дисертације је АТР жалузина, мерило протока ваздуха чији потенцијали до сада нису употпуности сагледани. Хазенфлуг (Hasennpflug, 1998) и Федершпил (Federspiel, 2004а, 2004б) започели су развој АТР жалузина за мерење протока ваздуха који је настављен истраживањем у оквиру докторске дисертације.

3. ЛАБОРАТОРИЈСКИ ПРОТОТИП АТР ЖАЛУЗИНЕ

3.1 Увод

АТР жалузина мери проток ваздуха посредно мерењем положаја лопатице и момента којим ваздушна струја делује на лопатицу жалузине. Када се конструкција АТР жалузине упореди са комерцијалном регулационом жалужином, видљиве су разлике које АТР жалузине омогућују да мери нападни угао лопатице и момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу. Управо из тог разлога формирање лабораторијског прототипа АТР жалузине објашњено је конструкционим изменама на комерцијалној регулационој жалузине.

3.2 Регулационе клапне и жалузине

Комерцијалне регулационе клапне и жалузине нису погодне за мерење брзине струјања моментном карактеристиком лопатице, услед малог момента којом ваздушна струја делује на лопатице. На *слици 3.1* приказана је комерцијална правоугаона клапна, а на *слици 3.2* комерцијална правоугаона жалузина. Код комерцијалних регулационих жалузина и клапни оса лопатице С поклапа се са осом О око које се обрће лопатица, *слика 3.3*. Управо је поклапање оса разлог малог момента којим ваздушна струја делује на лопатице комерцијалних регулационих жалузина и клапни.



Слика 3.1 Комерцијална правоугаона клапна



Слика 3.2 Комерцијална правоугаона жалузина

Комерцијална регулациона клапна, шематски приказана на *слици 3.3*, има једну лопатицу и погодна је за анализу и развијање математичког модела АТР жалузине. За невртно и слободно струјање Кирхоф (Kirchoff, 1869) је утврдио да је нападна тачка силе D у функцији нападног угла лопатице α :

$$\frac{d}{L} = \frac{3}{4} \left(\frac{\cos \alpha}{4 + \pi \sin \alpha} \right), \quad (3.1)$$

где су:

α - нападни угао лопатице $[\text{°}]$;

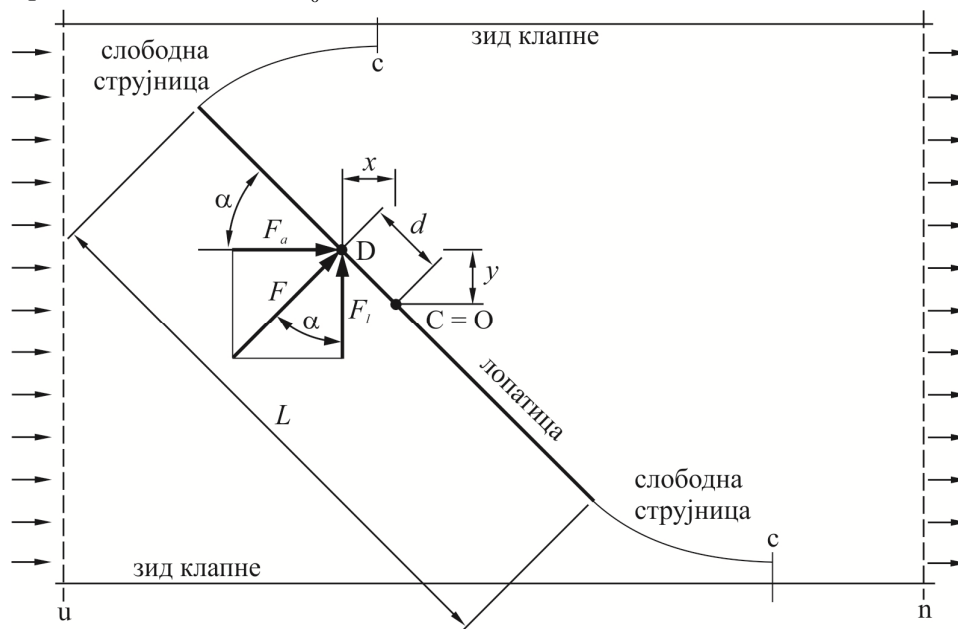
L - дужина лопатице клапне $[\text{m}]$ и

d - растојање од нападне тачке силе D до осе лопатице C $[\text{m}]$.

Сарфкаја (Sарfкаја, 1961), Кимура и Огава (Kimura и Ogawa, 1995) утврдили су да математички модел (3.1) није погодан за затворене цевне системе. Погоднија је следећа веза између нападне тачке силе и нападног угла лопатике:

$$\frac{d}{L} = d_0 \left(\frac{4 \cos \alpha}{4 + \pi \sin \alpha} \right)^n, \quad (3.2)$$

где су: вредности константе $d_0 = 0,187$ и експонента $n = 2$.



Слика 3.3 Шематски приказ једне лопатике комерцијалне регулационе клапне

Момент којим ваздушна струја делује на лопатицу клапне гласи:

$$M = F \cdot d, \quad (3.3)$$

или преко компонентних сила:

$$M = F_a \cdot y + F_i \cdot x = F_a \cdot d \sin \alpha + F_i \cdot d \cos \alpha, \quad (3.4)$$

где су:

F - сила ваздушне струје нормална на површину лопатике [N];

F_a - пројекција силе ваздушне струје у правцу осе канала [N];

F_i - пројекција силе ваздушне струје у правцу нормалном на правац осе канала [N];

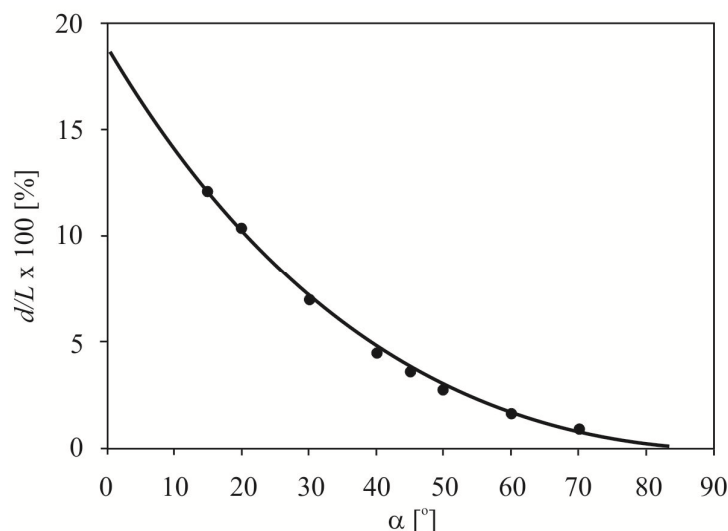
x - крак силе F_i у односу на осу обртања O [m] и

y - крак силе F_a у односу на осу обртања O [m].

На слици 3.4 графички је приказана зависност релативног положаја d/L нападне тачке силе D у односу на осу лопатике C у функцији нападног угла α . Приказана графичка

зависност добијена је из једначине (3.2). Када је нападни угао $\alpha = 0^\circ$ (клапна потпуно отворена), нападна тачка силе D је на релативном положају 18,75 % од осе лопатице C слике 3.3 и 3.4. При отвореној клапни крак силе d је највећи, али је најмања сила F којом ваздушна струја делује на лопатицу. На овај начин момент M којим ваздушна струја делује на лопатицу клапне је мали, једначине (3.2) и (3.3).

Када је нападни угао $\alpha = 90^\circ$ (клапна потпуно затворена), нападна тачка силе D је на релативном положају 0 % од осе лопатице C , слике 3.3 и 3.4. При затвореној клапни када је сила F којом ваздушна струја делује на лопатицу највећа, крак силе d је најмањи. На овај начин момент M којим ваздушна струја делује на лопатицу једнак је нули, једначине (3.2) и (3.3).



Слика 3.4 Положај нападне тачке силе ваздушне струје у функцији нападног угла лопатице (Hassenpflug, 1999)

Према једначинама (3.2), (3.3) и (3.4) момент којим ваздушна струја делује на лопатицу комерцијалне клапне може да се повећа измештањем осе O око које се обрће лопатица. Измештањем осе обртања O из осе лопатице C у целом опсегу рада жалузине (нападни углови лопатице од 0° до 90°) повећава се момент којим ваздушна струја делује на лопатицу. На овај начин комерцијална клапна постаје осетљивија, те прилагођена потребама мерења брзине струјања ваздуха моментном карактеристиком лопатице клапне.

3.3 Формирање лабораторијског прототипа АТР жалузине

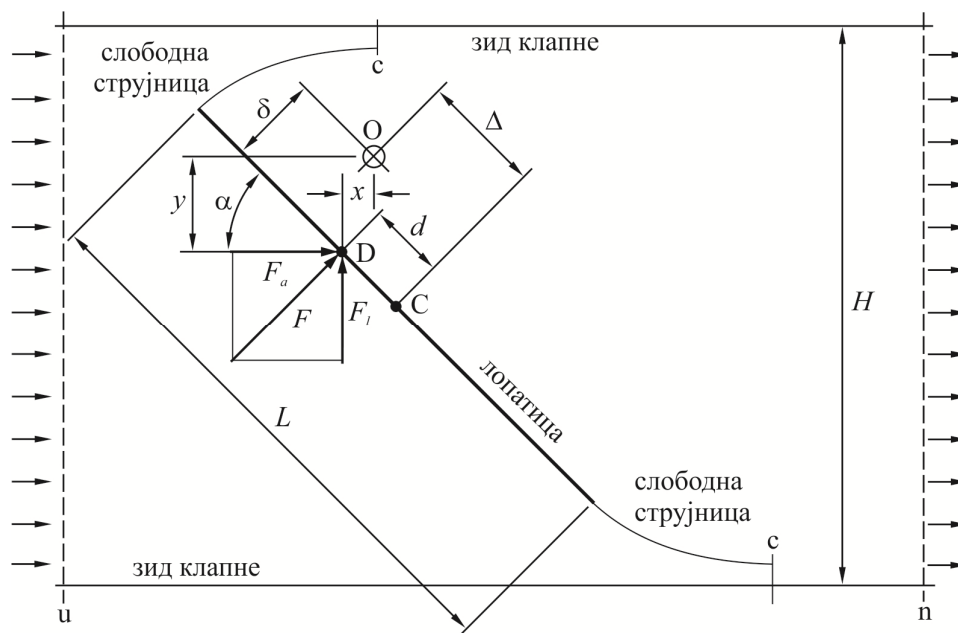
3.3.1 Измештање осе обртања лопатице клапне

Захтеви при реконструкцији комерцијалне клапне су:

- постизање што већег момента којим ваздушна струја делује на лопатицу клапне;
- минималне преправке како би се у што већој мери задржао облик комерцијалних клапни;
- да лопатица остане у оквиру габарита клапне и
- постизање пуног хода лопатице клапне (код комерцијалних жалузина ход је 90°).

Наравно, не могу се сви набројани захтеви у потпуности постићи, јер су поједини у супротности. Нпр. уколико се измести оса обртања лопатице O , да би се постигао пун ход лопатице мора да се изађе ван оквира габарита клапне.

Померање осе обртања лопатице O из осе лопатице C урађено је у два правца: у правцу лопатице за растојање Δ и у правцу нормалном на правац лопатице за растојање δ , слика 3.5.



Слика 3.5 Шематски приказ лопатице АТР клапне (Federspiel, 2004a)

Услед измештања осе обртања на лопатицу клапне сада делују два момента ваздушне струје, слика 3.6. Укупни момент којим ваздушна струја делује на лопатицу клапне гласи:

$$M = M_1 + M_2 = F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2, \quad (3.5)$$

где су:

M_1 - момент који настаје деловањем ваздушне струје на предњу површину лопатице [Nm];

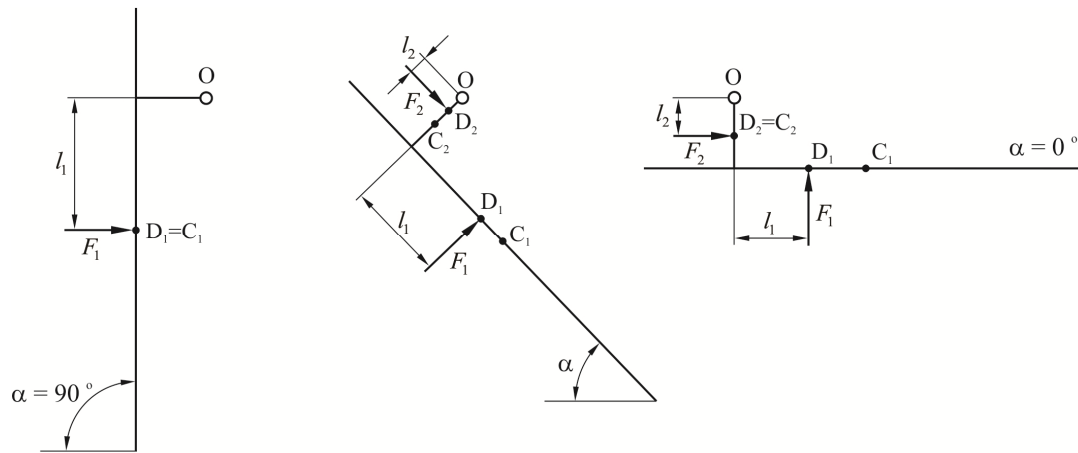
M_2 - момент који настаје деловањем ваздушне струје на носач лопатице [Nm];

F_1 - сила која настаје дејством ваздушне струје на предњу површину лопатице [N];

F_2 - сила која настаје дејством ваздушне струје на површину носача лопатице [N];

l_1 - крак силе ваздушне струје F_1 [m] и

l_2 - крак силе ваздушне струје F_2 [m].



Слика 3.6 Моменти којима ваздушна струја делује на лопатицу клапне са измештеносом обртања

Момент који настаје деловањем ваздушне струја на предњу површину лопатице клапне гласи:

$$M_1 = F_1(\Delta - d). \quad (3.6)$$

Из геометрије лопатице клапне приказане на слици 3.5 дефинишу се попречна и уздужна растојања од нападне тачке D до осе обртања O:

$$y = -\delta \cos \alpha + (\Delta - d) \sin \alpha, \quad (3.7)$$

$$x = (\Delta - d) \cos \alpha + \delta \sin \alpha. \quad (3.8)$$

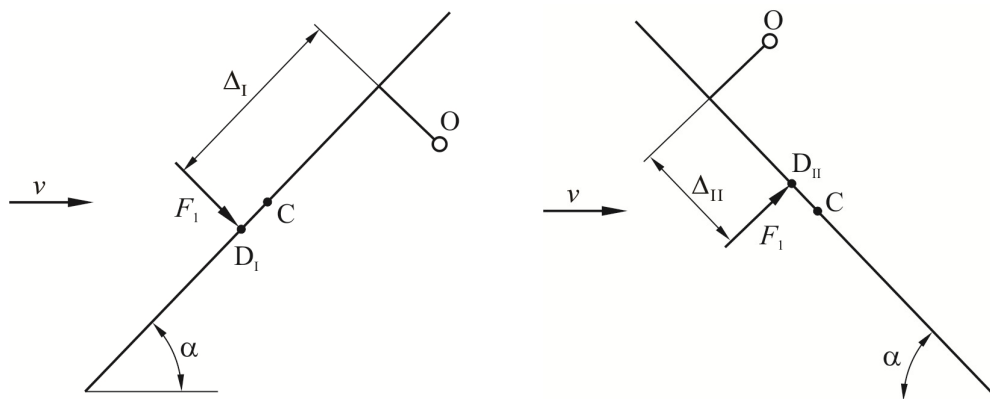
Момент којим ваздушна струја делује на предњу површину лопатице клапне дефинисан преко компонентних сила гласи:

$$M_1 = F_a \cdot y + F_l \cdot x = F_a \cdot [-\delta \cos \alpha + (\Delta - d) \sin \alpha] + F_l \cdot [(\Delta - d) \cos \alpha + \delta \sin \alpha]. \quad (3.9)$$

Циљ измештања осе обртања је да растојање од нападне тачке силе D до осе обртања лопатице O буде што је могуће веће, колико то дозвољавају остали услови, како би момент којим ваздушна струја делује на лопатицу клапне био што већи, једначина (3.9). Измештање осе обртања O у правцу лопатице Δ ради се са циљем повећања момента M_1 који настаје деловањем ваздушне струје на предњу површину лопатице. Без измештања осе обртања у правцу лопатице Δ не може да се користи моментна карактеристика лопатице клапне, па чак и за случај нападног угла лопатице од 90° , када се јавља највећа сила којом ваздух делује на површину лопатице.

Према Кирхоховој једначини (3.1) положај нападне тачке силе D мења се са нападним углом лопатице α . Притисак ће бити виши на оном крају лопатице на који прво наиђе ваздушна струја. Из тог разлога ће нападна тачка силе D бити на оном крају лопатице

на који прво наиђе струја ваздуха, *слика 3.7*. Препорука је да се обртна оса O помери супротно од краја лопатице на који прво наилази струја ваздуха, случај I приказан на *слици 3.7*. На овај начин се при истим условима повећава крак силе ваздушне струје $\Delta_I > \Delta_{II}$, а према једначини (3.9) и момент којим ваздушна струја делује на предњу површину лопатице клапне $M_{II} > M_{III}$.



Слика 3.7 Положај измештене обртне осе O лопатице клапне

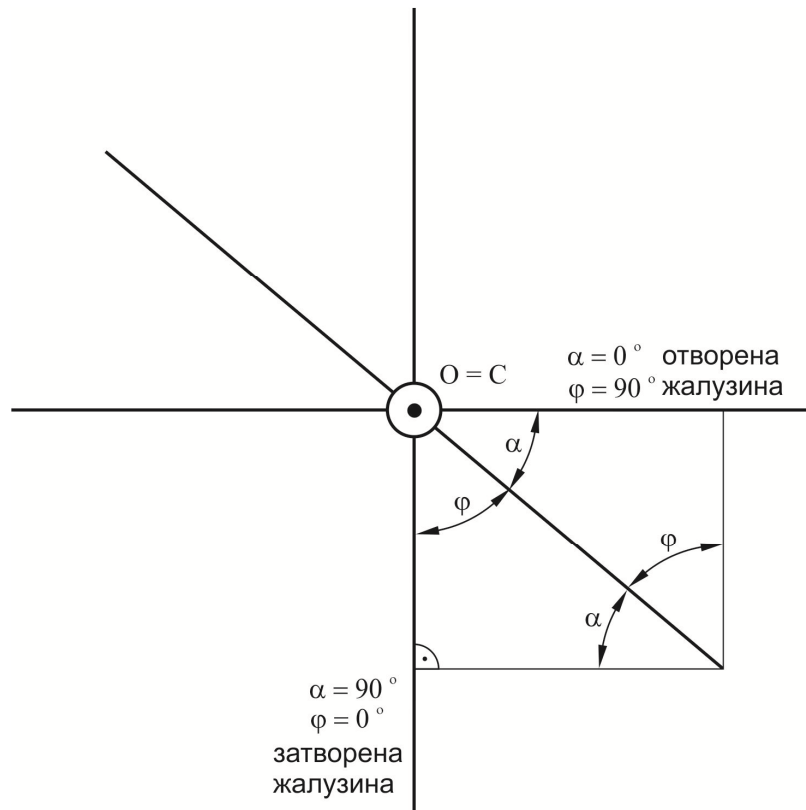
Центар обртања O помера се нормално у односу на лопатицу за величину δ са циљем да се при потпуно отвореној жалузини оствари додатна сила F_2 , која би правила момент када је лопатица у хоризонталном положају. На овај начин повећава се момент при већој отворености жалузине, тј. мањем нападном углу α . Када је жалузина скроз отворена, нападни угао лопатице $\alpha = 0$, јавља се највећи додатни момент M_2 и обрнуто. Додатни момент је стога у функцији нападног угла лопатице:

$$M_2 = f(\alpha). \quad (3.10)$$

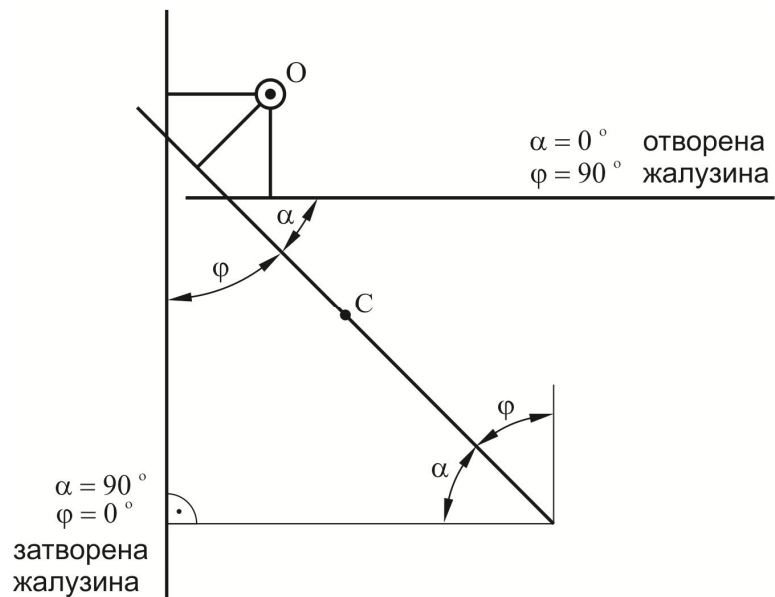
3.3.2 Формирање угломера за одређивање положаја лопатице АТР жалузине

Код регулационе жалузине где се поклапају оса лопатице C и оса око које се обрће лопатица O , нападни угао лопатице дефинише се класичним угломером приказаним на *слици 3.8*. Када је оса обртања лопатице O померена у односу на осу лопатице C тада није могуће мерити нападни угао лопатице жалузине класичним угломером приказаним на *слици 3.8*. Услед померености осе обртања лопатица адекватно не прати положаје дефинисане на угломеру *слика 3.8*.

У циљу мерења нападних углова лопатице када се оса обртања лопатице O измести у односу на осу лопатице C , формиран је угломер заокретањем лопатице жалузине са кораком 10° *слика 3.9*. Угломер је формиран тако да положаји лопатице АТР жалузине адекватно прате положаје дефинисане угломером *слика 3.9*.



Слика 3.8 Класичан угломер за мерење положаја лопатице регулационе жалузине



Слика 3.9 Угломер за мерење положаја лопатице АТР жалузине

На сликама 3.8 и 3.9 дефинисани су нападни углови лопатице α и φ . Нападни угао α је угао отклона лопатице од хоризонталне равни, док је нападни угао φ угао отклона лопатице у односу на вертикалну раван.

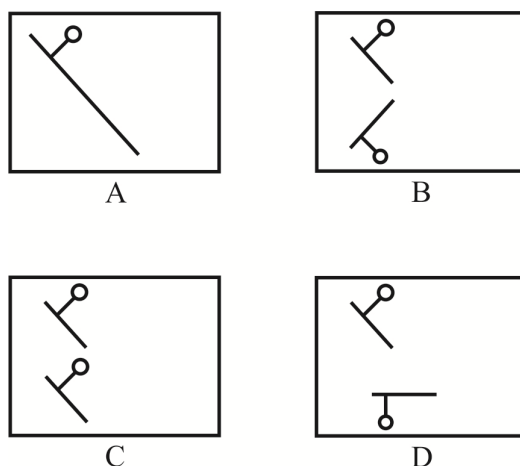
Положај лопатице може равноправно да се одреди нападним углом α или нападним углом φ , где је веза између углова:

$$\alpha + \varphi = 90^\circ. \quad (3.11)$$

Иако нападни углови лопатице могу да се дефинишу и мере на оба приказана начина, пракса је код регулационих жалузина да се нападни угао лопатице дефинише као угао отклона лопатице од хоризонталне равни.

За потребе експерименталног истраживања формиран је лабораторијски прототип АТР жалузине, квадратног попречног пресека 0,25 x 0,25 m. Лабораторијски прототип АТР жалузине има могућност измене лопатица, којом је планирано да се испитају четири могућа типа АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку (слика 3.10):

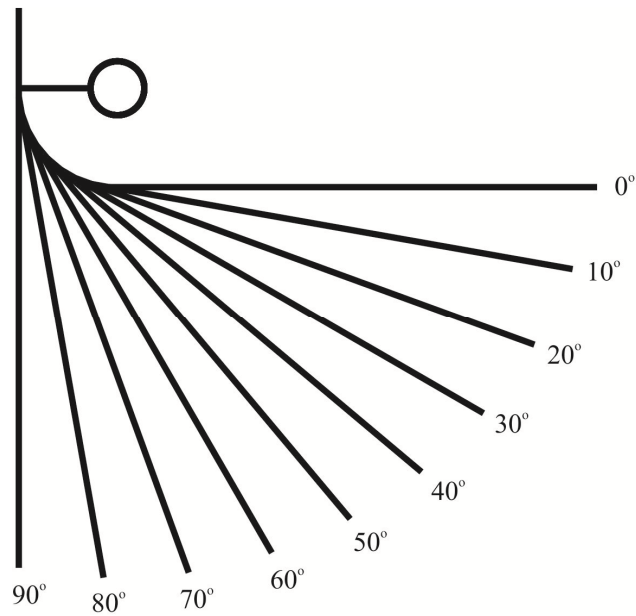
- А – једна лопатица (клапна);
- В – две унакрсно вођене лопатице;
- С – две паралелно вођене лопатице и
- D – две лопатице, где је једна лопатица мерна, док је друга лопатица уочена у хоризонталном положају.



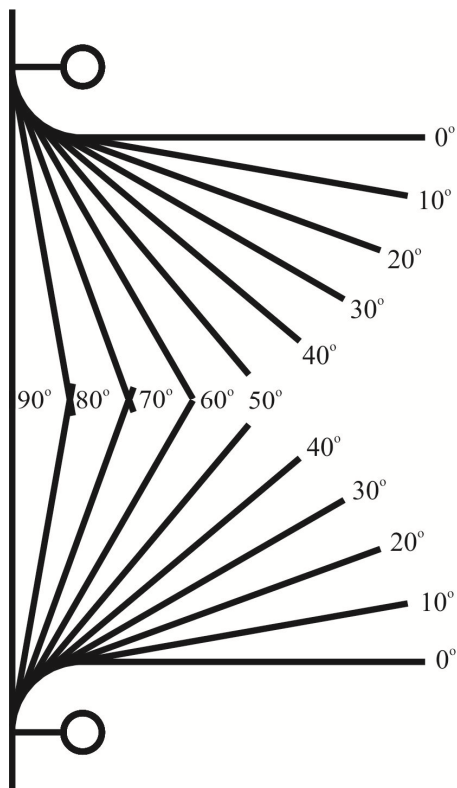
Слика 3.10 Типови АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку

На слици 3.11 приказан је угломер формиран за дефинисање положаја лопатице АТР жалузине типа А. На слици 3.12 приказан је угломер формиран за дефинисање положаја лопатица АТР жалузина типа В и D. На слици 3.13 приказан је угломер формиран за дефинисање положаја лопатица АТР жалузине типа С.

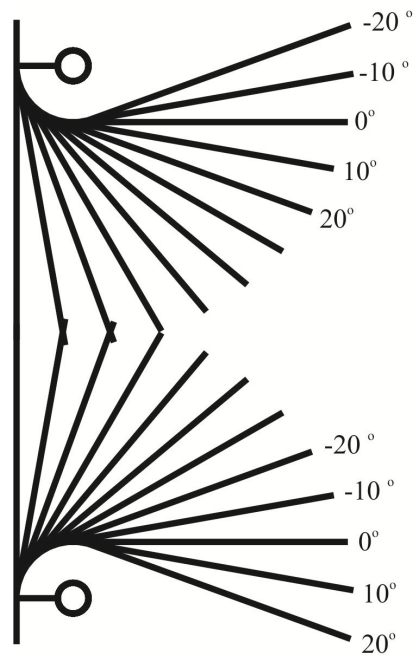
АТР жалузина типа С услед паралелног вођења лопатица при измештеној оси обртања има знатно смањен ход лопатице. Код испитиване АТР жалузине типа С услед смањења хода лопатице, мерења су урађена и за нападне углове лопатице мање од 0° , тј. ход лопатице је био од -20° до 20° , слика 3.13.



Слика 3.11 Угломер формиран за дефинисање положаја лопатице АТР жалузине типа А



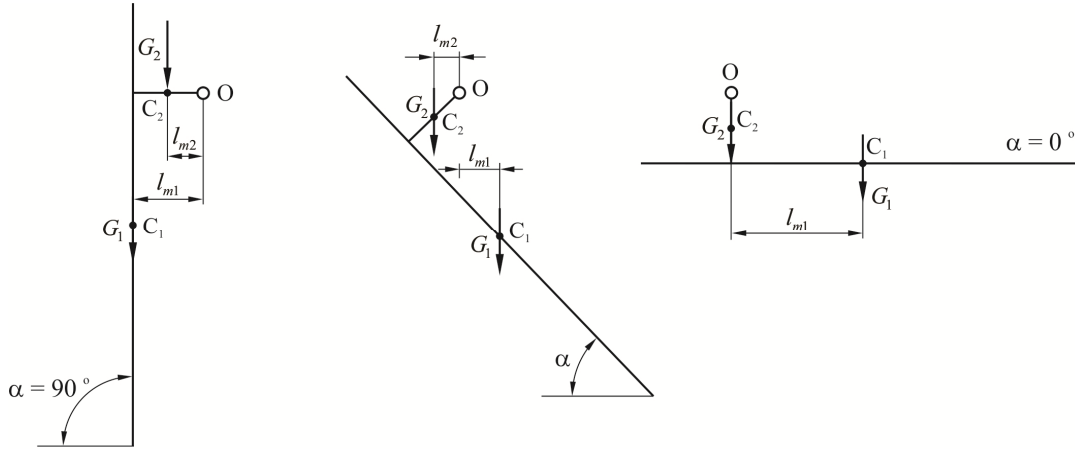
Слика 3.12 Угломер формиран за дефинисање положаја лопатица АТР жалузине типа В и D



Слика 3.13 Угломер формиран за дефинисање положаја лопатица АТР жалузине типа С

3.3.3 Смањење мртвог момента мерне лопатице АТР жалузине

Мртви момент настаје под дејством силе тежине мерне лопатице и носача мерне лопатице АТР жалузине. Вредност мртвог момента мења се са нападним углом мерне лопатице *слика 3.14*, а крива зависности мртвог момента и нападног угла мерне лопатице представља једну од карактеристика АТР жалузине.



Слика 3.14 Мртви момент лопатице и носача лопатице АТР жалузине

Према конструкцији мерне лопатице чији је изглед приказан на *сликама 3.15 и 3.16* мртви момент се добија из Варињонове теореме као збир момента тежине мерне лопатице M_{m1} и момента силе тежине носача мерне лопатице M_{m2} :

$$M_m = M_{m1} + M_{m2} = G_1 l_{m1} + G_2 l_{m2} = m_1 g l_{m1} + m_2 g l_{m2} = f(\alpha), \quad (3.12)$$

где су:

- m_1 – маса мерне лопатице [kg];
- m_2 – маса носача мерне лопатице [kg];
- G_1 – сила тежине мерне лопатице [N];
- G_2 – сила тежине носача мерне лопатице [N];
- g – гравитационо убрзање [m/s²];
- l_{m1} – крак силе тежине мерне лопатице [m] и
- l_{m2} – крак силе тежине носача мерне лопатице [m].

Крак силе тежине мерне лопатице l_{m1} и крак силе тежине носача мерне лопатице l_{m2} дефинишу се на основу геометрије са *слике 3.14*:

$$l_{m1} = \delta \sin \alpha - \Delta \cos \alpha, \quad (3.13)$$

$$l_{m2} = \frac{\delta}{2} \sin \alpha. \quad (3.14)$$

Уврштавањем једначина (3.13) и (3.14) у једначину (3.12) мртви момент за конструкцију мерне лопатице приказане на *слици 3.14* је:

$$M_m = g\delta \left[m_1 \left(1 - \frac{\Delta}{\delta} \operatorname{ctg} \alpha \right) + \frac{m_2}{2} \right] \sin \alpha. \quad (3.15)$$

За разлику од корисног момента M којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу, мртви момент мерне лопатице M_m је некористан и непожељан момент. Као некористан, мртви момент је елиминисан тарирањем на вагарској електроници.

Мртви момент мерне лопатице непожељан је из два разлога:

- оптерећује вратило и лежајеве чиме се повећава момент трења, па смањује активни момент ваздушне струје који се са лопатице преноси на мерило момента и
- повећава опсег мерења момента и заузима већи део мерног опсега, што смањује тачност мерења активног момента којим ваздушна струја делује на лопатицу.

Мртви момент је као и момент трења - „паразитни” момент те га је потребно смањити на најмању могућу меру. На основу једначине (3.15) може да се види да је за постојеће растојање између осе лопатице S и осе обртања лопатице O мртви момент могуће смањити смањењем масе мерне лопатице. Масу мерне лопатице могуће је смањити на два начина:

- избором материјала мерне лопатице и
- смањењем дебљине мерне лопатице.

Избором материјала од кога се израђује мерна лопатица са што мањом густином попут алуминијумског лима $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ и смањењем дебљине лима мерне лопатице на 0,5 mm знатно се смањује маса мерне лопатице, а самим тим и њен мртви момент. Међутим, на овај начин се у исто време смањује и чврстоћа лопатице, што доводи до њеног већег савијања приликом дејства ваздушне струје. Сада се део активног момента M не преноси на мерило момента, већ се троши на савијање лопатице, чиме се смањује осетљивост и тачност мерила момента АТР жалузине. Попут мртвог момента и момента трења и момент који се троши на савијање лопатице представљају „паразитне” моменте те их је потребно смањити на најмању могућу меру.

3.3.4 Смањење угиба лопатице АТР жалузине

Захтеви за што мањим мртвим моментом и што мањим угибом мерне лопатице који настаје услед дејства ваздушне струје су супростављени. Са циљем да се смањи мртви момент, а да се у исто време активни момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу у што већој мери пренесе на мерило момента, разматрана је могућност да се смањи дебљина мерне лопатице и да се она уради са ојачањима. Анализиран је случај лопатица са два уздужна ојачања, сваки ширине 10 mm и дебљине 2 mm, који се налазе на растојању 31 mm од осе лопатице, *слике 3.15 и 3.16*.



Слика 3.15 Изглед мерне лопатице АТР жалузине типа А израђене од поцинкованог челичног лима са уздужним ојачањима

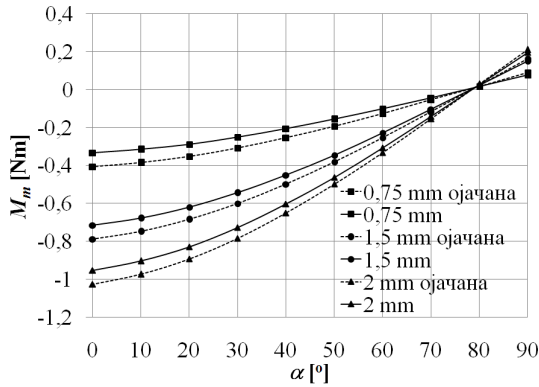


Слика 3.16 Изглед мерне лопатице АТР жалузине типа В, С и D израђене од поцинкованог челичног лима са уздужним ојачањима

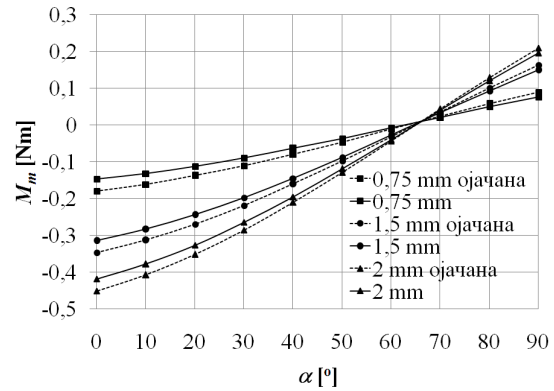
Према једначини (3.15) нацртани су графици зависности мртвог момента од нападаног угла мерне лопатице за случај лопатица са и без уздужних ојачања и то за комерцијалне дебљине лима од 0,75 mm, 1,5 mm и 2 mm. На сликама 3.17 и 3.18 приказана је графичка зависност мртвог момента и нападаног угла мерне лопатице израђене од поцинкованог челичног лима ($\rho = 7600 \text{ kg/m}^3$), док је на сликама 3.19 и 3.20 приказана графичка зависност мртвог момента и нападаног угла мерне лопатице израђене од алуминијумског лима.

Мерне лопатице направљене од алуминијумског лима услед мање масе имају мањи мртви момент (слике 3.19 и 3.20) у односу на мерне лопатице направљене од поцинкованог челичног лима слике 3.17 и 3.18. Међутим, алуминијумски лим има мању чврстоћу, па је за израду лопатица лабораторијске АТР жалузине изабран челични поциковани лим. На сликама од 3.17 до 3.20 уочљиво је да смањењем дебљине лима од којих је направљена мерна лопатица долази до смањења њеног мртвог момента. Испрекиданим линијама приказана је зависност мртвог момента од нападаног угла мерне лопатице за случај са ојачањима, док је пуним линијама приказана иста зависност за случај мерне лопатице без ојачања. Постављањем предложених уздужних ојачања повећава се мртви момент мерне лопатице. Међутим, постављањем ојачања и смањењем дебљине лима мерне лопатице долази до значајног смањења мртвог момента мерне лопатице. Сасвим очекивано са становишта мртвог момента неповољнија је варијанта клапне (АТР жалузина типа А) у односу на жалузину са две лопатице (АТР жалузине типа В, С и D).

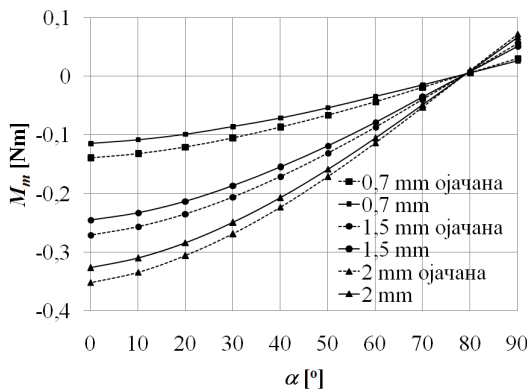
Након анализе утицаја врсте материјала, дебљине лима и предложеног ојачања на мртви момент мерне лопатице, анализиран је утицај дебљине поцинкованог челичног лима и предложеног ојачања на угиб мерне лопатице АТР жалузине. У комерцијалном програму методом коначних елемената одређени су угиби лопатице који настају под дејством ваздушне струје. Анализиране су мерне лопатице са и без предложеног ојачања, израђене од поцинкованог челичног лима дебљина доступних на тржишту: 0,75 mm, 1 mm, 1,25 mm, 1,5 mm и 2 mm. Сила која делује у центру притиска лопатице од 18 N једнако је распоређена по површини лопатице.



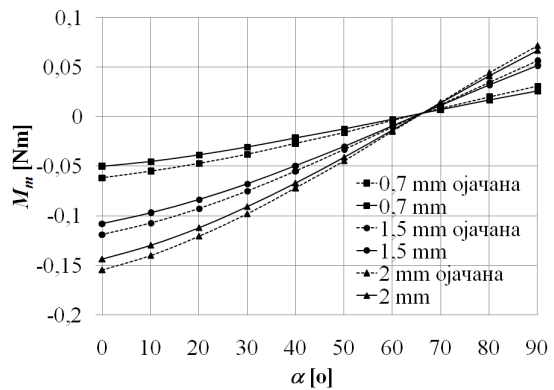
Слика 3.17 Анализа мртвог момента мерне лопатице АТП жалузине типа А израђене од поцинкованог лима



Слика 3.18 Анализа мртвог момента мерне лопатице АТП жалузине типа В, С и D израђене од поцинкованог лима



Слика 3.19 Анализа мртвог момента мерне лопатице АТП жалузине типа А израђене од алуминијумског лима



Слика 3.20 Анализа мртвог момента мерне лопатице АТП жалузине типа В, С и D израђене од алуминијумског лима

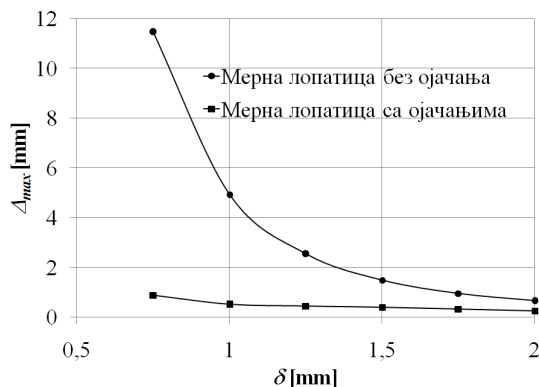
Усвојени запремински коначни елемент у облику тетраедра, модел “SOLID 92” експериментално је верификован. Одређен је максимални угиб укљештеног поцинкованог челичног лима под дејством силе, слика 3.21. Поцинковани лим 1, дебљине 0,5 mm, укљештен је помоћу стеге 2 и парчета дрвета 4, слика 3.21а. Пре постављања тега 3, масе 1 kg, у центар притиска, компаратор 5 је подешен на нулу, слика 3.21б. Након постављања тега у центар притиска долази до угиба поцинкованог лима, слика 3.21в, где се величина максималног угиба на слободном крају лима читава на компаратору, слика 3.21г.

Измерени максимални угиб поцинкованог лима на слободном крају износи $\Delta_{max} = 6$ mm, док је анализом методом коначних елемената моделом, под истим условима као и у приказаном експерименту, добијен максимални угиб поцинкованог челичног лима на слободном крају од $\Delta_{max} = 5,6$ mm. Услед доброг поклапања измерене и израчунате вредности максималног угиба, закључено је да се ради о адекватном моделу за анализу коначним елементима.

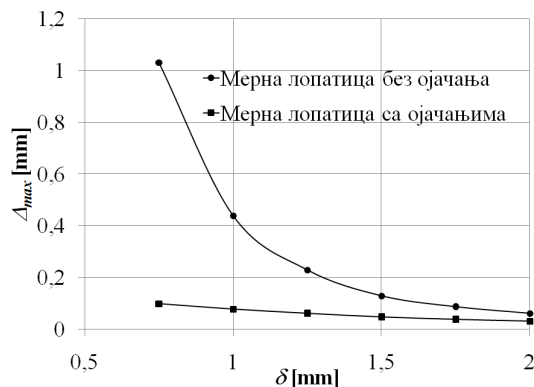


Слика 3.21 Експериментално одређивање максималног угиба укљештене плоче од поцинкованог челичног лима дебљине 0,5 mm

На слици 3.22 приказана је зависност максималног угиба од дебљине мерне лопатице за случај АТР жалузине типа А, док је на слици 3.23 приказана је зависност максималног угиба од дебљине мерне лопатице за случај АТР жалузина типа В, С и D. Са становишта угиба мерне лопатице под дејством ваздушне струје знатно је повољнија варијанта жалузине са две краће лопатице (АТР жалузине типа В, С и D) од варијанте клапне са једном дужом лопатицом (АТР жалузина типа А). Уочљиво је да се повећањем дебљине лима од којег је израђена мерна лопатица и постављањем ојачања смањује угиб мерне лопатице.



Слика 3.22 Зависност максималног угиба од дебљине мерне лопатице за случај АТР жалузине типа А

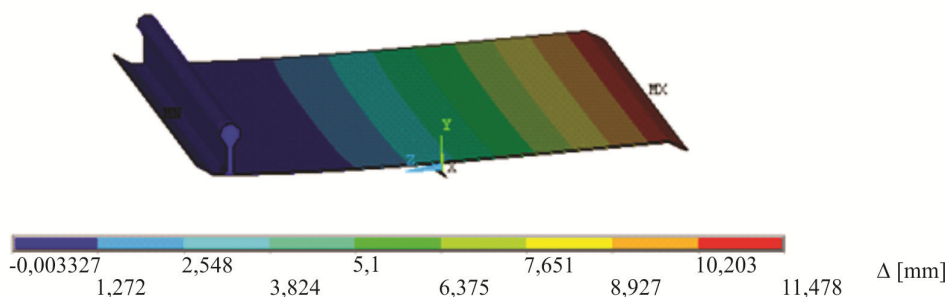


Слика 3.23 Зависност максималног угиба од дебљине мерне лопатице за случај АТР жалузина типа В, С и D

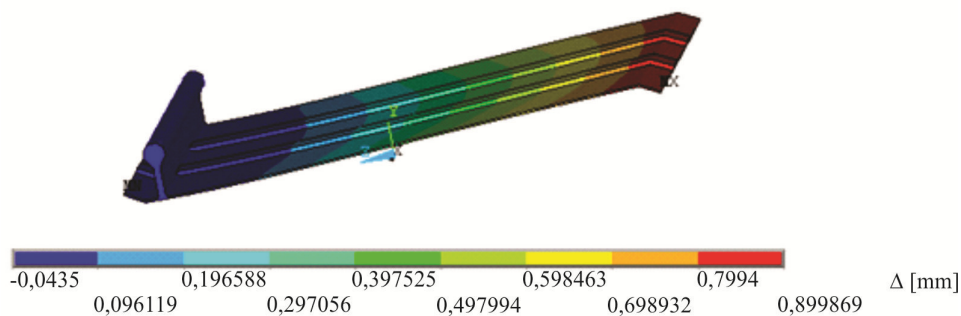
Мерна лопатица израђена од поцинкованог челичног лима дебљине 0,75 mm са предложеним ојачањима има приближну вредност максималног угиба као мерна лопатица израђена од поцинкованог челичног лима дебљине 2 mm без ојачања. Међутим, мерна лопатица дебљине 2 mm без ојачања има више него дупло већи мртви момент у односу на мерну лопатицу дебљине 0,75 mm са предложеним ојачањима. Такође, може да се уочи да само значајним смањењем дебљине поцинкованог челичног лима ефекат смањења угиба мерне лопатице предложеним ојачањима има смисла.

На слици 3.24 приказани су угиби мерне лопатице израђене од поцинкованог челичног лима дебљине 0,75 mm без ојачања, за случај АТР жалузине типа А. На слици 3.25 приказани су угиби мерне лопатице израђене од поцинкованог челичног лима дебљине 0,75 mm са предложеним ојачањима, за случај АТР жалузине типа А. Може да се уочи да се дуж лопатице десетоструко смањује угиб постављањем предложених уздужних ојачања. Максимални угиб на крају мерне лопатице смањује се са 11,4 mm на 0,89 mm.

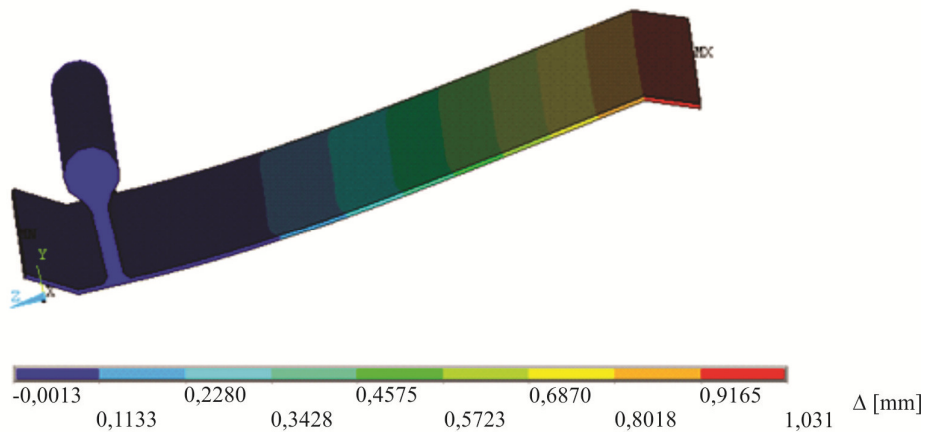
На слици 3.26 приказани су угиби мерне лопатице израђене од поцинкованог челичног лима дебљине 0,75 mm без предложених ојачања, за случај АТР жалузине типа В, С и D. На слици 3.27 приказани су угиби мерне лопатице израђене од поцинкованог челичног лима дебљине 0,75 mm са предложеним ојачањима, за случај АТР жалузине типа В, С и D. Може да се уочи исти тренд као и код АТР жалузине типа А, да се дуж лопатице десетоструко смањује угиб постављањем предложених уздужних ојачања. Максимални угиб на крају мерне лопатице смањује се са 1,031 mm на 0,101 mm.



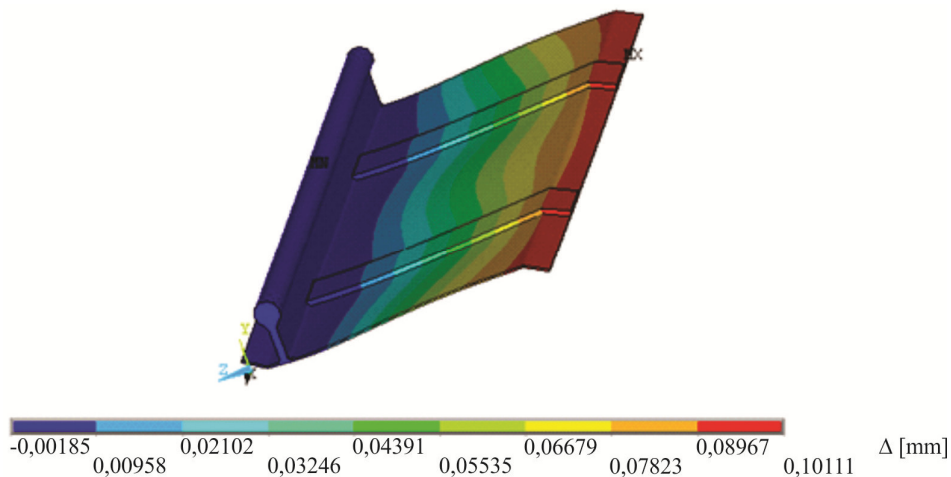
Слика 3.24 Угиб мерне лопатице дебљине 0,75 mm без ојачања за случај АТР жалузине типа А



Слика 3.25 Угиб мерне лопатице дебљине 0,75 mm са предложеним ојачањима за случај АТР жалузине типа А



Слика 3.26 Угиб мерне лопатице дебљине 0,75 mm без предложених ојачања за АТР жалузине типа В, С и D

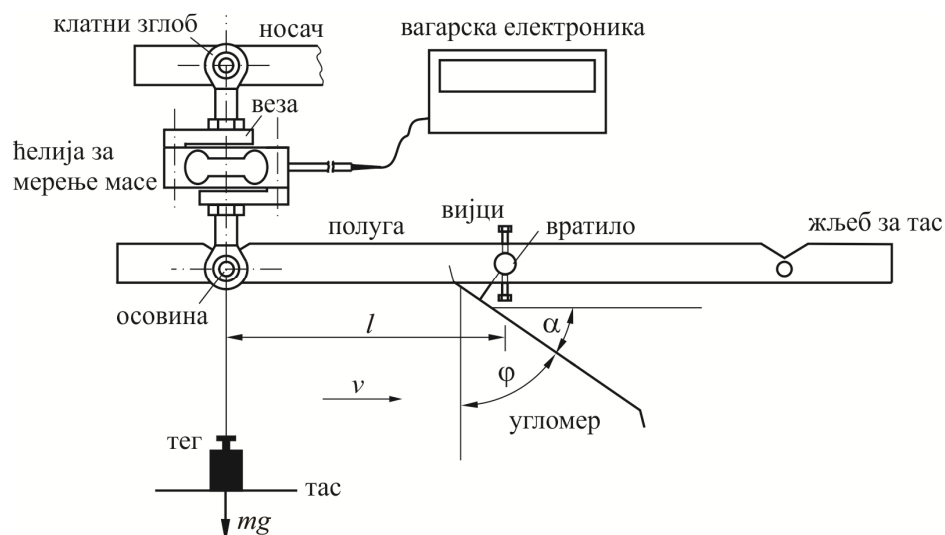


Слика 3.27 Угиб мерне лопатице дебљине 0,75 mm са предложеним ојачањима за АТР жалузине типа В, С и D

Избором поцинкованог челичног лима дебљине од 0,75 mm за израду мерних лопатица смањена је маса, а самим тим и мртви момент који делује на мерну лопатицу АТР жалузине. У исто време постављањем два ојачања ширине 10 mm и дебљине 2 mm, која се налазе на растојању 31 mm од осе лопатице знатно је смањен угиб мерне лопатице под дејством ваздушне струје. На овај начин су испуњена два супростављена захтева да мерна лопатица има што је могуће мањи мртви момент и да угиб закочене мерне лопатице буде што је могуће мањи.

3.3.5 Технички опис и принцип рада лабораторијског прототипа АТР жалужине

Шематски приказ лабораторијског прототипа АТР жалужине формиран за потребе експерименталног испитивања приказан је на *слици 3.28*.



Слика 3.28 Шематски приказ лабораторијског прототипа АТР жалужине

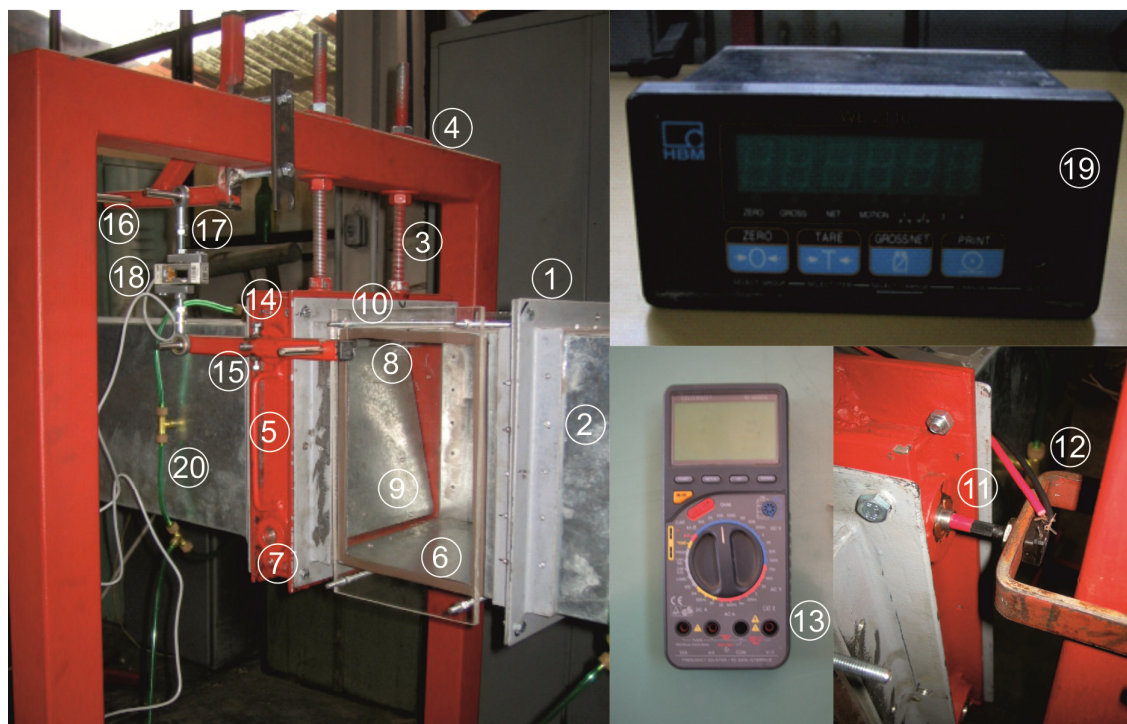
Мерна лопатица је носачем у виду шелни чврсто везана за вратило. Вратило је помоћу два вијка чврсто везано за полуку. Сензор за мерење масе се преко везе и клатних зглобова поставља на осовинице које се налазе на полузи и носачу. Сензор за мерење масе повезује се на вагарску електронику. Нападни угао мерне лопатице дефинише се помоћу формираног угломера.

Услед чврсте везе између мерне лопатице и вратила момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу тежи да увије вратило. Како је вратило чврсто везано за полуку не долази до увијања вратила, већ се момент ваздушне струје преноси на полуку која растеже сензор за мерење масе. Измерена маса је мера момента ваздушне струје, где се до момента долази калибрисањем помоћу таса и тегова.

Изглед лабораторијског прототипа АТР жалужине приказан је на *слици 3.29*. Лабораторијски прототип АТР жалужине се преко прирубница (1) причвршћује за канал (2), док се преко вијака (3) причвршћује за носач (4) и нивелише према каналу (2). Канал лабораторијског прототипа АТР жалужине састоји се из предњег дела (5) и задњег дела (6). Предњи део (5) је челични оквир, чија једна страница може да се скида. Демонтажном страницом омогућује се измена лопатица и формирање четири типа лабораторијског прототипа АТР жалужина шематски приказаних на *слици 3.10*.

У челичном оквиру урађена су улежиштења (7) у које се постављају вратила (8). Мерна лопатица (9) је шелнама чврсто везане за вратило (8). Предњи и задњи део лабораторијског прототипа АТР жалужине везују се путем прирубничког споја (10). Задњи део мерног уређаја (6) израђен је од поцинкованог челичног лима и има две провидне странице израђене од клирита. Провидна страна омогућава постављање угломера и читавање положаја мерне лопатице путем угломера.

Ротациони потенциометар (11) увучен је кроз отвор носача потенциометра (12), а затим је увучен у отвор на вратилу (8). Кроз ротациони потенциометар (11) и вратило (8) пробушени су отвори, који се доводе у саосни положај и кроз које се провлачи штифт. Носач потенциометра (12) вијцима се учвршћује за носач лабораторијског прототипа жалузине АТР (4). На овај начин ротациони потенциометар (11) лако се монтира и демонтира, па омогућује реализацију четири типа лабораторијског прототипа АТР жалузина, *слика 3.10*. Довођењем у жељени положај лопатице (9) према углумеру, мења се електрична отпорност ротационог потенциометра (11), чија се вредност приказује на унимеру (13).



Слика 3.29 Изглед лабораторијског прототипа АТР жалузине

Вијци (14) се попусте, вратило (8) са лопатицом (9) се доведе у жељени положај, а затим се вијци (14) притегну чиме се вратило (8) чврсто везује за мерну полуку (15). На мерној полуци (15) и носачу полуге (16) постављене су осовинице на које се преко везе и клатних зглобова (17) поставља сензор за мерење масе (18). Момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу (9) преноси се на сензор за мерење масе (18) који је повезан на вагарску електронику (19) на којој се очитава вредност момента. Непосредно испред предњег дела лабораторијског прототипа АТР жалузине на месту (20) мере се температура и натпритисак ваздушне струје.

За довођење мерне лопатице у жељени положај у лежиштима су коришћени радијални, куглични, једноредни лежајеви произвођача “SKF”, ознаке 61800 (SKF, 2013). Ради се о лежајевима који имају веома мало трење и приликом деловања активног момента ваздушне струје стварају веома мали момент трења. Основне карактеристике коришћених лежајева дате су у *табели 3.1*.

Табела 3.1 Карактеристике радијалног, кугличног, једноструког лежаја произвођача "SKF", ознаке 61800 (SKF, 2013)

d [mm]	D [mm]	B [mm]	C [kN]	C_0 [kN]	P_u [kN]	m [kg]
10	19	5	1,38	0,585	0,025	0,0055

У табели 3.1 приказане су следеће величине:

- d – унутрашњи пречник лежаја [m] ;
- D – спољашњи пречник лежаја [m] ;
- B – ширина лежаја [m];
- C – динамичка носивост лежаја [N];
- C_0 – статичка носивост лежаја [-];
- P_u – максимално оптерећење лежаја [N];
- m – маса лежаја [kg];

3.3.6 Избор мерне полуге и сензора за мерење масе АТР жалужине

Момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалужине одређује се мерењем масе и израчунавањем из израза за момент силе:

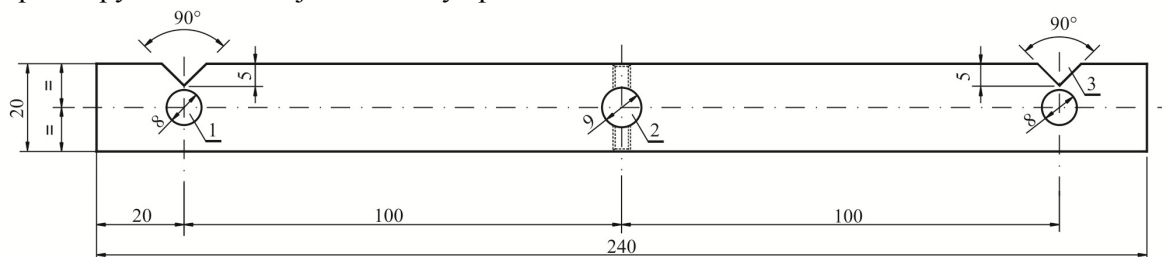
$$M = mgl, \quad (3.16)$$

где су:

- m - маса измерена на сензору масе [kg];
- g - гравитационо убрзање [m/s²] и
- l - дужина крака мерне полуге [m].

Дужи крак полуге омогућује осетљивије мерило момента АТР жалужине, једначина (3.16). Дужина крака мерне полуге диктирана је компактношћу АТР жалужине. За лабораторијски прототип АТР жалужине коришћена је полука дужине крака $l = 100$ mm, чији је цртеж са димензијама приказан на слици 3.30. Од велике је важности било да се крак мерне полуге l , растојање између центара отвора за осовину (1) и отвора за вратило (2) на слици 3.30, што тачније изради. Тачност димензије l утиче на тачност мерења момента M којим ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалужине, једначина (3.16).

На полузи се налазе две осовине за постављање сензора масе и два жљеба за постављање таса са тегом. Два осовине и два жљеба урађени су ради провере момента, где тас са тегом преко једног жљеба даје позитивну вредност момента, док тас са тегом преко другог жљеба даје негативну вредност момента.



Слика 3.30 Цртеж коришћене мерне полуге са краком дужине $l = 100$ mm

При избору сензора за мерење масе водило се рачуна да се обухвати рад АТР жалузине за све положаје мерних лопатица $\alpha = 0 \div 90^\circ$. При вишим вредностима нападног угла на мерну лопатицу делују веће вредности момента ваздушне струје. Услед тога затворенија АТР жалузина може да мери ниже вредности брзине струјања у односу на отворенију АТР жалузину. Да би АТР жалузина била осетљива за све положаје нападног угла мерне лопатице, избор сензора за мерење масе урађен је за међу положај мерне лопатице $\alpha = 45^\circ$ при максималној брзини струјања од $v = 10 \text{ m/s}$.

Момент којим ће ваздушна струја деловати на мерну лопатицу АТР жалузине зависи од карактеристике система. Из тог разлога избор сензора за мерење масе урађен је на основу предходног мерења параметара ваздушне струје за међуположај мерне лопатице $\alpha = 45^\circ$. Предходна мерења параметара ваздушне струје урађена су за АТР жалузину типа А, код које се очекују више вредности момента у односу на АТР жалузине типа В, С и D. Вредности предходних мерења приказане су у *табели 3.2*.

Табела 3.2 Вредности предходног мерења параметара ваздушне струје за АТР жалузину типа А

$\alpha [^\circ]$	$p_a [\text{Pa}]$	$t [^\circ\text{C}]$	$p_m [\text{Pa}]$	$v [\text{m/s}]$
45	99730	31,45	298,8	10,83

Из једначине стања идеалног гаса одређује се густина ваздуха:

$$\rho = \frac{p_a + p_m}{R \cdot T} = \frac{p_a + p_m}{R \cdot (273,15 + t)} = 1,144 \text{ kg/m}^3, \quad (3.17)$$

где су:

p_a - атмосферски притисак [Pa];

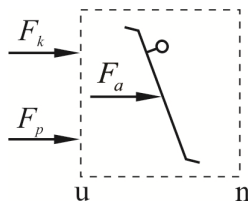
p_m - натпритисак ваздушне струје испред лопатице [Pa];

$R = 287$ - гасна константа за ваздух [J/kgK];

t - температура ваздуха испред лопатице [$^\circ\text{C}$] и

T - температура ваздуха испред лопатице [K].

Аксијална сила којом ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалузине одредиће се на поједностављен начин. Примениће се једначина о промени количине кретања на контролну запремину са струјним површинама постављеним непосредно испред и иза мерне лопатице, *слика 3.31*, при чему се занемарује импулсна и сила притиска којима ваздушна струја делују на ниструјну површину (n) контролне запремине.



Слика 3.31 Аксијална сила којом ваздушна струја делује на мерну лопатицу

Аксијална сила којом ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалузине једнака је збиру импулсне и силе притиска којима ваздушна струја делује на уструјну површину (u) контролне запремине:

$$F_a = F_k + F_p = \rho v^2 A + p_m A = (\rho v^2 + p_m) b^2$$

$$= (1,144 \cdot 10,83^2 + 298,8) \cdot 0,25^2 = 27,06 \text{ N},$$
(3.18)

где су:

F_k - импулсна сила ваздушне струје [N];

F_p - притисна сила ваздушне струје [N];

A - површина попречног пресека АТР лопатице [m^2] и

b - дужина странице АТР лопатице [m].

Пројекција укупне силе ваздушне струје у правцу нормалном на правац осе канала је:

$$F_l = F_a \cdot \text{tg } \alpha = 27,06 \cdot \text{tg}(45^\circ) = 27,06 \text{ N}.$$
(3.19)

Једначином (3.2) одређује се растојање од нападне тачке силе D до центра лопатице C у правцу лопатице:

$$d = L \cdot d_0 \left(\frac{4 \cos \alpha}{4 + \pi \sin \alpha} \right)^n = 0,240 \cdot 0,187 \cdot \left(\frac{4 \cdot \cos 45^\circ}{4 + 3,14 \cdot \sin 45^\circ} \right)^{0,2} = 0,00928 \text{ m}.$$

Једначинама (3.7) и (3.8) одређују се нападне тачке пројекција сила ваздушне струје:

$$x = \delta \cdot \sin \alpha + (\Delta - d) \cdot \cos \alpha = 0,02 \cdot 0,707 + (0,105 - 0,00928) \cdot 0,707 = 0,0818 \text{ m},$$

$$y = -\delta \cdot \cos \alpha + (\Delta - d) \cdot \sin \alpha = -0,02 \cdot 0,707 + (0,105 - 0,00928) \cdot 0,707 = 0,0535 \text{ m},$$

где су геометријске вредности за мерну лопатицу АТР жалузине типа А:

$$\Delta = 0,105 \text{ m},$$

$$\delta = 0,02 \text{ m}.$$

Момент којим ваздушна струја делује на лопатицу добија се из једначине (3.9):

$$M = F_a \cdot y + F_l \cdot x = 27,06 \cdot 0,0535 + 27,06 \cdot 0,0818 = 3,66 \text{ Nm}.$$

Из једначине за одређивање момента (3.16) рачуна се максимална маса коју треба да мери сензор:

$$m = \frac{M}{g \cdot l} = \frac{3,66}{9,81 \cdot 0,1} = 3,73 \text{ kg} .$$

Момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалужине типа А је нешто мањи од момента који је добијен поједностављеним рачуном. Када се узме у обзир и да на АТР жалужине типа В, С и D услед мање површине лопатице делује мањи момент ваздушне струје, усвојен је сензор за мерење масе мерног опсега до 3 kg, произвођача “НВМ”, модел “PW4MC3” (НВМ, 2013а) чије су карактеристике дате у *табели 3.3*.

Табела 3.3 Карактеристике сензора за мерење масе произвођача “НВМ”, модел “PW4MC3” (НВМ, 2013а)

Класа тачности мерне ћелије [-]	C3
Максимални број мерних интервала[-]	3000
Мерни опсег [g]	0 ÷ 3000
Минимална резолуција [g]	0,5
Осетљивост (Cn) [mV/V]	2 ± 0,2
Нулта сигнал [mV/V]	0 ± 0,1
Утицај температуре на нулу мерила [% од Cn/10 K]	0,0233
Утицај температуре (20 – 40 °C) на осетљивост [% од Cn/10 K]	± 0,0175
Грешка услед хистерезиса [% од Cn]	± 0,015
Грешка услед нелинеарности [% од Cn]	± 0,015
Минимални мртви терет [% од Cn]	± 0,0245
Грешка услед одступања од центра оптерећења [% од Cn]	± 0,0233
Радни опсег температуре [°C]	- 10 ÷ 50
Максимално оптерећење мерне ћелије [g]	4500
Оптерећење при којем долази до прекида ћелије [g]	9000
Материјал ћелије	Al
Серијски број	1-PW4C3/3kg-1

3.3.7 Калибрисање мерила момента АТР жалужине

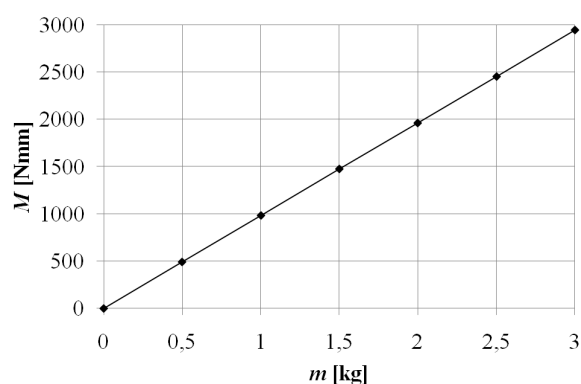
У *табели 3.3* може да се уочи да је нелинеарност усвојеног сензора за мерење масе веома мала, практично занемарљива. Веза између масе m и момента силе M је линеарна, једначина (3.16). Како су вредности гравитационог убрзања $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ и дужина крака полуке $l = 100 \text{ mm}$ константне вредности у изразу (3.16):

$$M = C \cdot m , \quad (3.20)$$

може да се уочи константа мерила момента која има вредност $C = 0,981 \text{ [Nm/kg]}$. На основу израза за момент силе (3.20) добијена је калибрациона крива мерила која је приказана на *слици 3.32*, где константа мерила момента C представља нагиб криве.

Сензор за мерење масе прикључен је на вагарску електронику произвођача “НВМ”, модел “WE2110” (НВМ, 2013б), чије су карактеристике дате у *табели 3.4*, а чији је изглед приказан на *слици 3.29*. Мерило момента калибрисано је на основу калибрационе криве, *слика 3.32*. Вагарска електроника даје могућност да се унесе линеарна калибрациона крива до пет мерних тачака. Како се ради о линеарној зависности, довољно је калибрисати мерило момента са две мерне тачке. Калибрисање је урађено помоћу тегова масе 0,5 kg и 1 kg, према шематском приказу датом на *слици 3.28*.

Тегу масе 0,5 kg који је окачен о сензор за мерење масе одговара момент интензитета 490,5 Nmm, па је вредност момента унета у вагарску електронику. Затим је поступак поновљен са тегом масе 1 kg коме одговара момент интензитета 981 Nmm. На овај начин се мерењем масе на дисплеју вагарске електронике приказује одговарајући момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалузине.



Слика 3.32 Калибрациона крива мерила момента за вредности константе мерила $C = 0,981 \text{ Nm/kg}$

Табела 3.4 Карактеристике вагарске електронике произвођача НВМ, модел WE2110 (НВМ, 2013б)

Класа тачности	6000 d према EN45501
Мерни опсег [mV/V]	0 ÷ 3,5
Мерне јединице	g, kg, t, lb
Линеаризација	пет тачака
Мерни опсег без филтера [Hz]	60
Филтер	1/1 ÷ 1/200
Серијски број	6870005

Вагарска електроника произвођача “НВМ”, модел “WE2110” поред могућности уноса линеарне калибрационе криве, поседује такође и функције “filter” и “tare”. Ради се о функцијама без којих је немогуће валидно мерити и приказивати момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалузине. Приликом мерења момента јавља се флукуација мерног сигнала момента АТР жалузине. Функција “filter” вагарске електронике филтрира сигнал мерног момента АТР жалузине, како би био погодан за приказивање и даље коришћење. Мерна лопатица АТР жалузине конструисана је тако да буде што лакша, тј. да има што мањи мртви момент. Међутим, мртви момент иако минимизован и даље је присутан, делује на мерну лопатицу и преноси се на мерило момента АТР жалузине. Функцијом “tare” вагарске електронике анулира се мртви

момент, тако да се мери само активни момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалузине.

Мерна лопатица АТР жалузине конструисана је тако да се што већи део активног момента ваздушне струје пренесе на мерило момента, тј да се што мањи део активног момента потроши на трење (присуство лежајева, потенциометра и механизма за кочење мерних лопатица АТР жалузина) и савијање лопатице. На овај начин је постигнуто да мерна лопатица АТР жалузине буде више статички осетљива на промену брзине струјања ваздуха. Међутим и поред тога што се већи део активног момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу пренесе на мерило момента, постоји и даље мањи део активног момента ваздушне струје који се троши на трење и савијање мерне лопатице.

Услед присуства “паразитних” момената након сваког подешавања нападног угла мерне лопатице урађено је контролисање мерног момента АТР жалузине. Контролисање је урађено према шематском приказу датом на *слици 3.28* тегом масе 1 kg, тј. према једначини (3.16) контролним моментом од 981 Nm. Корекциони фактор очитаног момента дефинисан је као:

$$\gamma = \frac{mgl}{M_{ATP}}, \quad (3.21)$$

где су:

M_{ATP} – момент очитан на дисплеју вагарске електронике [Nm].

m – маса контролног тега [kg];

На овај начин је добијен корекциони фактор чија је вредност већа од јединице. Множењем корекционог фактора са моментом очитаним на дисплеју вагарске електронике добија се активни момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалузине:

$$M = \gamma \cdot M_{ATP}. \quad (3.22)$$

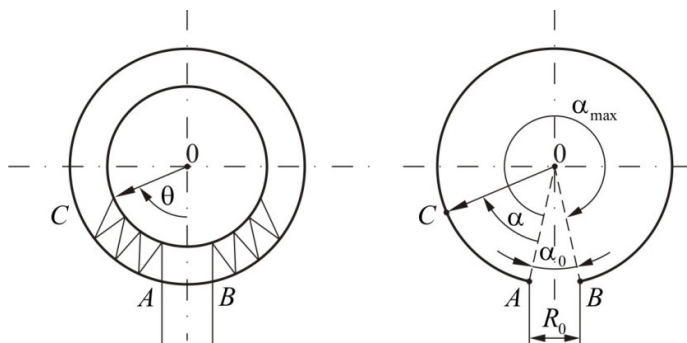
3.3.8 Калибрисање ротационог потенциометра

За мерење нападног угла мерне лопатице АТР жалузине, тј за потребе одређивања његове мерне неизвесности, коришћен је ротациони потенциометар произвођача “Dadaelectronics”, модел “Тусо 10k” (Dadaelectronics, 2013). Коришћени потенциометар дат је на *слици 3.33*, а његов шематски приказ на *слици 3.34*.

Ротациони потенциометар је уређај који несумњиво повећава конфор мерења, где је могуће добијени сигнал послати на даљину. Међутим, као и коришћени куглични лежајеви и механизам за пренос момента ваздушне струје на мерило момента, ротациони потенциометар троши део активног момента ваздушне струје.



Слика 3.33 Изглед ротационих потенциометара произвођача “Dadaelectronics”, модел “Тусо 10k”



Слика 3.34 Шематски приказ ротационог потенциометра

Мерном углом θ одговара угао отклона клизача:

$$\alpha = \theta - \frac{\alpha_0}{2}, \quad (3.23)$$

где је α_0 - угао АОВ [°] на слици 3.34.

Уколико се уведу следеће смене:

$$p = \frac{\alpha}{\alpha_{\max}}, \quad (3.24)$$

$$q = \frac{R_0}{R}, \quad (3.25)$$

где су:

α - тренутни угао клизача [°];

α_{\max} - максимални угао клизача [°];

R_0 - почетна електрична отпорност [Ω] и

R - тренутна електрична отпорност [Ω],

израз за излазни електрични напон ротационог потенциометра гласи:

$$U = U_n \frac{p}{1 + q \cdot p(1 - p)}, \quad (3.26)$$

где је U_n – номинални електрични напон ротационог потенциометра [V].

Израз (3.26) је математички модел ротационог потенциометра, који је више теоријска интерпретација него израз за тачно одређивање угла. Разлог томе је што су ротациони потенциометри при мањим вредностима угла отклона клизача нелинеарни и имају велику грешку мерења. Зато је приликом постављања ротационог потенциометра препорука да се направи предотклон од неколико десетина степени, чиме се елиминише зона рада потенциометра са лошим карактеристикама. У табели 3.5 дате су основне

карактеристике коришћеног ротационог потенциометра произвођача “Dadaelectronics”, модел “Тусо 10” где се види да чак до 30° отклона клизача није препоручљиво мерење електричне отпорности.

Након постављања и фиксирања ротациони потенциометар је калибрисан према формираном угломеру. Како је виђено на основу извода из теорије и карактеристика коришћеног ротационог потенциометра није могуће користити пун опсег мерења електричне отпорности од 0 до 10 kΩ. Приликом калибрисања ротационог потенциометра, направљен је отклон клизача од минимум 30°, како би се избегла зона нетачног рада ротационог потенциометра.

Табела 3.5 Карактеристике ротационог потенциометра произвођача “Dadaelectronics”, модел “Тусо 10”

Снага [mW]	10
Максимална вредност мерног опсега [kΩ]	10
Тип отпорника	угљенични
Механички угао ротације [°]	300
Електрични угао ротације [°]	260
Максимална радна температура [°C]	40
Минимална радна температура [°C]	- 25
Радни век [Ciklus]	25000

3.4 Закључна разматрања

Конструкцијским изменама у односу на комерцијалну регулациону жалузину формирана је лабораторијска АТР жалузина чије лопатице не чине решетку. Измештањем осе обртања, формирањем угломера и механизма за пренос момента ваздушне струје са лопатице на мерило момента, добијен је уређај који на посредан начин, мерењем нападног угла лопатице и момента којим ваздушна струја делује на лопатицу мери запремински проток ваздуха. У циљу развоја АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку и развоја саме методе мерења запреминског протока ваздуха моментном карактеристиком АТР жалузине, на основу експерименталних података урађено је математичко моделирање и верификација математичког модела.

4. РАЗВОЈ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА И ПЛАН ИСТРАЖИВАЊА АТР ЖАЛУЗИНЕ

4.1 Увод

Федершпил (Federspiel, 2004a) је прилагодио математички модел моментне карактеристике лептирастог вентила који је предложио Хазенфлуг (Hasenpflug, 1998) и на тај начин дефинисао математички модел који повезује брзину струјања испред мерне лопатице, положај мерне лопатице и момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалужине. Математички модел развио је користећи теорију слободне струјнице за клапну, *слика 3.5*, а применио га и верификовао за случај АТР жалужине чије лопатице формирају решетку а која је смештена на улазу у систем.

За потребе развоја АТР жалужине чије лопатице не формирају решетку, као и развоја методе мерења протока ваздуха моментном карактеристиком АТР жалужине, коришћен је математички модел који је предложио Федершпил. Математички модел калибрисан је и верификован на основу података експерименталног испитивања АТР жалужина чије лопатице не формирају решетку. У даљем тексту приказан је развој математичког модела АТР жалужине на основу теорије слободног струјања ваздуха кроз клапну (Federspiel, 2004a).

4.2 Развој математичког модела АТР жалужине

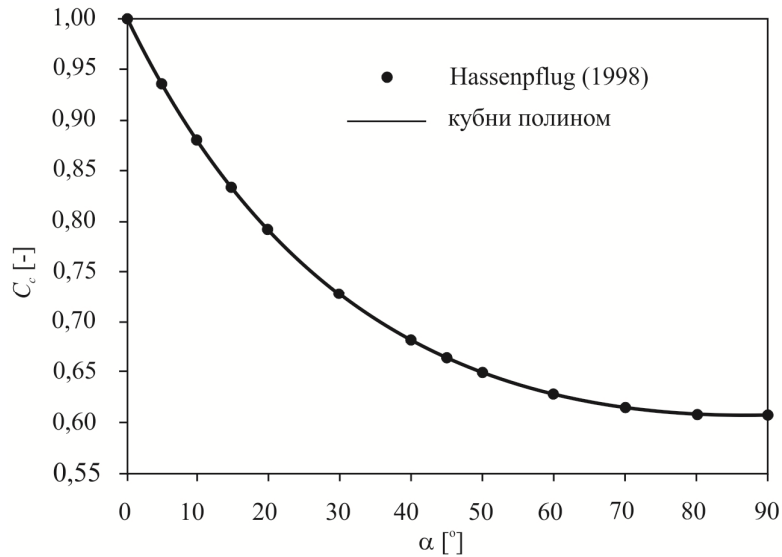
Карактеристике ваздушне струје зависе од коефицијента контракције АТР жалужине, који се дефинише се као:

$$C_c = \frac{A_c}{A_a}, \quad (4.1)$$

где су:

- A_c - површина попречног пресека на месту контракције $[m^2]$ и
- A_a - светла површина попречног пресека $[m^2]$.

Површине попречног пресека из једначине (4.1) зависе од нападног угла лопатице, па је и коефицијент контракције у функцији нападног угла лопатице жалужине. За једноставне геометрије, каква је клапна приказана на *слици 3.5*, коефицијент контракције може да се одреди аналитички (Sаркава, 1961 и Hasenpflug, 1998). Зависност коефицијента контракције може успешно да се прикаже помоћу полинома трећег степена. На *слици 4.1* кружићи су подаци добијени аналитичким поступком који је дефинисао Хазенфлуг (Hasenpflug, 1998), а који користи теорију комфорног пресликавања, док је пуном линијом приказана апроксимација полиномом трећег степена. Максимална разлика између аналитички добијеног коефицијента контракције и приказаног полиномом трећег степена је само 0,21 %.



Слика 4.1 Зависност коефицијента контракције и нападног угла лопатиче жалузине (Hassenpflug 1998)

У случају нестишљивог струјања, брзина струјања на месту контракције (c) у вези је са уструјним (u) и ниструјним (n) брзинама струјања. Једначина континуитета за стационарне услове струјања ваздуха гласи:

$$Q = v_u A_u = v_c A_c = const. \quad (4.2)$$

где су:

v_u - брзина струјања уструјно од места контракције [m/s];

v_c - брзина струјања на месту контракције АТР жалузине [m/s];

A_u - површина попречног пресека уструјно од места контракције [m²] и

A_c - површина попречног пресека на месту контракције АТР жалузине [m²].

Комбиновањем једначина (4.1) и (4.2), долази се до следеће везе:

$$\frac{v_u}{v_c} = \frac{A_c}{A_u} = \frac{C_c A_a}{A_u}. \quad (4.3)$$

За АТР жалузину висине канала H , дужине лопатиче L и дебљине лопатиче t , приказане на слици 3.5, једначина (4.3) постаје:

$$\frac{v_u}{v_c} = \frac{C_c}{H} \left(H - \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} L - t \cos \alpha \right), \quad (4.4)$$

где су:

α - нападни угао лопатиче [°] и

β - нападни угао лопатиче када је жалузина затворена [°].

Уколико је дужина лопатице мања од висине канала $L < H$, тада кроз жалузину пролази ваздух и када је жалузина затворена. Зато су постављени прагове, како испод и изнад жалузине не би пролазио ваздух када се жалузина затвори.

Запремински проток ваздуха кроз АТР жалузину дефинише се као:

$$Q = C_Q A_u \sqrt{\frac{2(p_u - p_n)}{\rho}}, \quad (4.5)$$

где су:

C_Q - коефицијент протока [-];

A_u - површина попречног пресека уструјно од места контракције [m^2].

p_u - уструјни притисак од места контракције [Pa];

p_n - ниструјни притисак од места контракције [Pa] и

ρ - густина ваздуха [kg/m^3].

Коефицијент притиска C_p дефинисан за мерну бленду једначином (2.10), често се користи да се прикажу струјне карактеристике жалузине:

$$\frac{p_u - p_n}{\rho} = C_p \frac{v^2}{2}, \quad (4.6)$$

где коефицијент притиска може да се повеже са уструјном v_u , ниструјном v_n или брзином на месту контракције v_c . Из једначине (4.6) може да се види да је коефицијент притиска заправо бездимензиони пад притиска кроз АТР жалузину.

Када су уструјна и ниструјна површина попречног пресека једнаке, тада су коефицијент притиска и коефицијент протока у следећој вези:

$$C_p = \frac{1}{C_Q^2}. \quad (4.7)$$

Проблем пада притиска повезан је са наглом експанзијом и за затворени цевовод решен је аналитички и може да се пронађе у већини литературе из области механике флуида (Викиров, 1987). За случај затвореног цевовода пад притиска дефинише се као:

$$\frac{p_u - p_n}{\rho} = \frac{(v_c - v_n)^2}{2}. \quad (4.8)$$

Комбиновањем једначина (4.3), (4.6) и (4.8) долази се до везе између коефицијента протока, коефицијента контракције и светле површине попречног пресека жалузине:

$$C_{Q,a} = \frac{C_{c,a} A_{a,a}}{A_u - C_{c,a} A_{a,a}}. \quad (4.8)$$

Како су предходне једначине изведене за аксијални правац у цевоводу, у једначини (4.8) додат је индекс “а”.

4.2.1 Аксијална сила којом ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалузине

Мерење и регулација протока ваздуха могућа су за три положаја жалузине на цевоводу HVAC система:

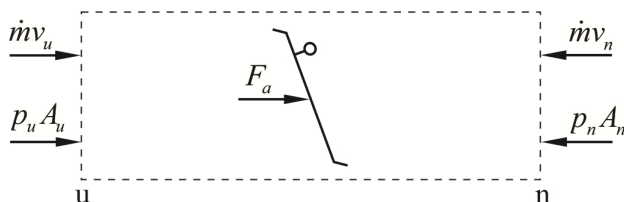
- жалузина постављена у цевоводу - испред и иза жалузине налазе се праве, равне деоница цевовода – нпр. ОА жалузина.
- жалузина постављена на излазу из система (иза жалузине не постоји, док испред жалузине постоји права, равна деоница цевовода) – нпр. жалузина VAV бокс терминала и
- жалузина постављена на улазу у систем (испред жалузине не постоји, док иза жалузине постоји права, равна деоница цевовода) – ситуација која се ретко среће.

АТР жалузина постављена у цевоводу. Једначина о промени количине кретања за контролну запремину са струјним површинама испред и иза жалузине (слика 4.2) гласи:

$$\dot{m}(v_u - v_n) + p_u A_u - p_n A_n - F_a = 0, \quad (4.9)$$

где су:

F_a - уздужна сила која делује на лопатицу [N] и
 \dot{m} - масени проток ваздуха [kg/m³].



Слика 4.2 Контролна запремина са струјним површинама испред и иза АТР жалузине

За једнаке површине попречних пресека, брзине струјања испред и иза жалузине су једнаке $v_u = v_n$, па је уздужна сила која делује на лопатицу жалузине производ разлике притиска и површине попречног пресека:

$$F_a = (p_u - p_n) A_u. \quad (4.10)$$

Комбиновањем једначина (4.8) и (4.10) долази се до једначине:

$$F_a = \frac{\rho A_u}{2} (v_c - v_n)^2. \quad (4.11)$$

Заменом једначине (4.3) у једначину (4.11) она постаје:

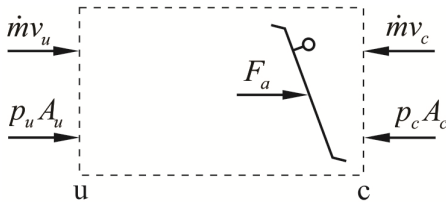
$$F_a = \frac{\rho A_u v_u^2}{2} \left(\frac{A_u - C_{c,a} A_{a,a}}{C_{c,a} A_{a,a}} \right)^2. \quad (4.12)$$

Уколико се уздужна сила (4.12) повеже са коефицијентом протока (4.8), уздужна сила сада постаје:

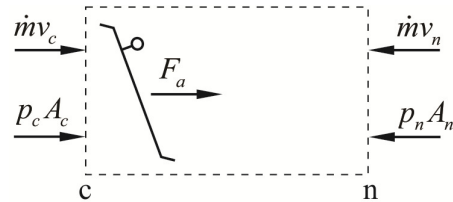
$$F_a = \frac{\rho A_u v_u^2}{2 \cdot C_{Q,a}}. \quad (4.13)$$

АТР жалузина постављена на излази цевовода. За случај када је жалузина постављена на излаз цевовода релативни притисак на месту контракције је једнак нули, *слика 4.3*. Једначина (4.7) сада постаје:

$$\frac{p_u}{\rho} = \frac{(v_c - v_u)^2}{2}. \quad (4.14)$$



Слика 4.3 Контролна запремина за АТР жалузину постављену на излазу цевовода



Слика 4.4 Контролна запремина за АТР жалузину постављену на улазу цевовода

Једначина о промени количине кретања написана за контролну запремину са струјним површинама испред и иза АТР жалузине гласи:

$$\dot{m}(v_u - v_c) + p_u A_u - p_c A_c - F_a = 0. \quad (4.15)$$

Уврштавањем једначине (4.14) у једначину (4.15) долази се до аксијалне силе којом ваздух делује на жалузину:

$$F_a = \frac{\rho A_u}{2} (v_c - v_u)^2. \quad (4.16)$$

Једначина (4.16) еквивалентна је једначини (4.11).

АТР жалузина постављена на улазу у цевовод. За случај када је жалузина постављена на улазу у цевовод, тотални притисак на месту контракције је једнак нули, *слика 4.4*. Такође, релативни притисак и брзина струјања уструјно од АТР жалузине имају вредност нула. Применом Бернулијеве једначине и једначине о промени количине кретања, промена тоталног притиска услед контракције гласи:

$$-\frac{p_{t,n}}{\rho} = \frac{(v_c - v_n)^2}{2}. \quad (4.17)$$

Аксијална сила је једнака производу промене тоталног притиска и уструјне површине попречног пресека:

$$F_a = \frac{\rho A_u}{2} (v_c - v_n)^2. \quad (4.18)$$

Једначина (4.18) еквивалентна је са једначином (4.11). Пошто су једначине (4.11), (4.16) и (4.18) еквивалентне, аксијална сила је независна од уструјних и ниструјних услова.

Када је нападни угао лопатице једнак нули, аксијална сила већа је од нуле услед отпора који пружају лопатице отворене жалужине. Модели које су дали Сарфкаја (Sarpkaya, 1961) и Хазенфлуг (Hasenpflug, 1998) предвиђали су да нема отпорне силе када је жалужина отворена. Отпорна сила је инкорпорирана у модел претпостављајући коефицијент контракције мањи од јединице када је жалужина у потпуности отворена. Коефицијент отпора када је жалужина отворена дефинише се као:

$$c_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A_f v^2}, \quad (4.19)$$

где су:

F_D - сила отпора (аксијална сила) [N] и

A_f - површина лопатица жалужине пројектована на пресек нормалан на брзину струјања ваздуха [m²].

Комбиновањем једначине (4.12) и (4.19) долази се до квадратне једначине која обухвата коефицијент контракције, коефицијент отпора и геометрију жалужине:

$$C_{c,a}^2 (c_D A_f A_{a,a}^2 - A_u A_{a,a}^2) + C_{c,a} (2 A_u^2 A_{a,a}) - A_u^3 = 0. \quad (4.20)$$

Уколико је позната вредност коефицијента отпора када је АТР жалужина отворена, тада може да се из једначине (4.20) одреди коефицијент контракције за отворену АТР жалужину. Вредност коефицијента контракције за отворену АТР жалужину користи се за израчунавање коефицијента контракције.

4.2.2 Попречна сила којом ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалужине

Попречна сила дефинисана је под претпоставком да је лопатица инфитизимално танка ($A_f = 0$), тако да је коефицијент контракције једнак јединици када је нападни угао лопатице АТР жалужине једнак нули. Под наведеном претпоставком, поперечна сила је у вези са нападним углом и средњом брзином на следећи начин:

$$F_l = \frac{\rho v_u^2 A_u}{2 C_{Q,l} \tan \alpha}, \quad (4.21)$$

где је $C_{Q,l}$ поперечни коефицијент протока за инфетизимално танку лопатицу АТР жалужине [-].

Како се ради о попречном правцу, нормалном на правац струјања у једначини (4.21) код коефицијента протока стављен је индекс l (lateral). Аналогно једначини (4.9) добија се једначина за одређивање попречног коефицијента протока:

$$C_{Q,l} = \frac{C_{c,l} A_{a,l}}{A_u - C_{c,l} A_{a,l}}, \quad (4.22)$$

где је $C_{c,l}$ попречни коефицијент контракције (исти као на *слици 4.1*, није подешен према коефицијенту отпора из једначине 4.20). Попречни коефицијент контракције је једнак јединици када је нападни угао нула.

Светла површина која се користи за израчунавање попречне силе, одређује се уз претпоставку да је дебелина лопатице једнака нули:

$$A_{a,l} = H - NW \sin \alpha, \quad (4.23)$$

где су:

N – број лопатица [-] и

W – ширина лопатице [m].

4.2.3 Момент којим ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалузине

Момент којим ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалузине одређује се на основу предходно дефинисаних једначина. У једначине (3.7) и (3.8) уврсте се растојања од осе обртања лопатице О до осе лопатице С у правцу лопатице Δ и у правцу нормалном на правац лопатице δ , *слика 3.5*. Из једначине (3.7) одређује се крак аксијалне силе ваздушне струје y , док се из једначине (3.8) одређује крак попречне силе ваздушне струје x .

У зависности од ситуације присутне на систему из једне од једначина (4.11), (4.16) или (4.18) одреди се аксијална сила ваздушне струје F_a , док се из једначине (4.21) одреди попречна сила ваздушне струје F_l . Аксијална и попречна сила ваздушне струје уврсте се у једначину (3.9) из које се одреди део момента којим ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалузине. Уврштавајући једначину (3.9) у једначину (3.5), долази се до укупног активног момента којим ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалузине.

Комбинацијом једначине (3.5) и горе дефинисаних једначина, добија се једначина погодна за одређивање брзине струјања ваздуха АТР жалузином:

$$v^2 = G^2(\alpha) \frac{2M}{\rho A_u D_h}, \quad (4.24)$$

где је $G(\alpha)$ - корелацијска функција [-].

Корелацијска функција је величина која искључиво зависи од нападног угла лопатице:

$$G(\alpha) = \left(\frac{D_h}{\frac{y}{C_{Q,a}^2} + \frac{x}{C_{Q,l}^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.25)$$

У једначини (4.25) D_h је хидраулички пречник цевовода [m], док се уздужни коефицијент протока $C_{Q,a}$ одређује се из једначине (4.9). Хидраулички пречник D_h омогућује да математички модел дефинисан једначинама (4.24) и (4.25) може да се примени за различите пресеке АТР жалузина (кружни, правоугаони и квадратни).

4.3 План истраживања АТР жалузина реализованих у прошлости

Федершпил (Federspiel, 2004a, 2004b) је установио да АТР жалузина може успешно да се користи за мерења протока ваздуха у HVAC системима, где је верификацијом математичког модела добио разлику измерене и моделске брзине струјања +/- 10 % од измерене вредности или +/- 5 % од пуне мерне скале (узимао је ширу границу).

Наведено је да математички модел има универзални карактер, да може да се користи за различите пресеке, облике лопатица, број лопатица и начин вођења лопатица. Међутим, Федершпил је испитивање методе мерења АТР жалужином и верификацију математичког модела урадио само за АТР жалужину:

- квадратног пресека 0,61 x 0,61 m;
- која се налази на улазу система (ситуација која се ретко среће у пракси);
- са четири лопатице (лопатице формирају решетку),
- са једним типом лопатице – равна лопатица и
- са супротносмерним вођењем лопатица.

Федершпил у свом раду није узео у обзир многе важне факторе који утичу на адекватност модела и тачност мерења брзине струјања и није испитао многе карактеристике АТР жалузина. Нпр. није узео у обзир хистерезис приликом испитивања АТР жалузина, при чему је познато да жалузина поседује одређени хистерезис који може да утиче на резултат мерења, а који се повећава са бројем лопатица (Krawow, 1998). Федершпил није урадио испитивање и верификовао математички модел за случај АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку, а које су веома заступљене на HVAC системима. Такође, аутор није урадио испитивање и верификацију модела за два најзаступљенија положаја АТР жалузина на VAV систему: жалужину смештену у цевоводу и жалужину смештену на крају цевовода.

У *табели 4.1* дат је збирни преглед утицајних фактора и карактеристика које је Федершпил (Federspiel, 2004a, 2004b) анализирао код АТР жалужине са четири супротносмерно вођене лопатице која се налази на улазу у цевовод.

Табела 4.1 Збирни преглед утицајних фактора и карактеристика које је Федершпил анализирао код АТР жалузине са четири супротносмерно вођене лопатице која се налази на улазу у цевовод Федершпил (Federspiel, 2004a, 2004b)

Положај АТР жалузине на систему	АТР жалузина на улазу у цевовод
Тип АТР жалузине	-
Тип лопатице АТР жалузине	-
Пресек АТР жалузине	-
Мртви момент мерне лопатице АТР жалузине	√
Корекциони фактор момента АТР жалузине	-
Пад притиска кроз АТР жалузину	-
Потрошња енергије АТР жалузине	-
Коефицијент протока АТР жалузине	-
Нула АТР жалузине	-
Режим струјања АТР жалузине	-
Линеарност АТР жалузине	-
Корелацијска функција АТР жалузине (без хистерезиса)	√
Корелацијска функција АТР жалузине (са хистерезисом)	-
Верификација математичког модела (без хистерезиса)	√
Верификација математичког модела (са хистерезисом)	-
Утицај отпора испред АТР жалузине (без хистерезиса)	-
Утицај отпора иза АТР жалузине (без хистерезиса)	√
Утицај отпора испред АТР жалузине (са хистерезисом)	-
Утицај отпора иза АТР жалузине (са хистерезисом)	-
Утицај температуре ваздушне струје	-
Утицај натпритиска ваздушне струје	-
Утицај атмосферског притиска ваздуха	-
Мерна неизвесност АТР жалузине	√
Временска константа АТР жалузине	-
Статичка осетљивост АТР жалузине	-
Коефицијент пригушења АТР жалузине	-
Утицај ауторитета АТР жалузине	-

4.4 План истраживања АТР жалузина предвиђених докторском дисертацијом

4.4.1 Основна хипотеза докторске дисертације

Хазенфлуг (Hasenpflug, 1998) и Федершпил (Federspiel, 2004a, 2004b) су својим радовима несумњиво покренули и дали немерљив допринос развоју АТР жалузина. Међутим, потребно је урадити свеобухватну верификацију предложеног математичког модела како би се потврдила његова универзалност. У оквиру докторске дисертације план је био да се ураде истраживања којим се аутори нису бавили у прошлости. Испитана је АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку, што је веома чест случај код регулационих жалузина на системима.

За АТР жалузине чије лопатице не формирају решетку урађено је математичко моделирање, где је испитан утицај хистерезиса, локалних отпора (испред и иза жалузине), присуства праве деонице иза жалузине и малих вредности брзина струјања на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха.

Испитивањем су одређене и следеће карактеристике АТР жалузине: корекциони фактор момента, нула мерила, режим струјања, линеарност, пад притиска, губитак енергије, коефицијент протока, статичка осетљивост и временска константа мерила. Такође је анализирана неопходност корекције математичког модела услед промене густине, тј. неопходност постојања сензора температуре, натпритиска и атмосферског притиска. Ради се о веома важним карактеристикама којима се употпуњује слика о мерилу протока, а којима се нису бавили аутори у прошлости. У *табели 4.2* дат је збирни преглед утицајних фактора и карактеристика који су анализирани код АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку.

Табела 4.2 Збирни преглед утицајних фактора и карактеристика који су анализирани код АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку

Положај АТР жалузине на систему	АТР жалузина у цевоводу				АТР жалузина на крају цевовода			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Тип АТР жалузине	-	√	√	-	-	-	-	-
Утицај ауторитета АТР жалузине	-	√	√	-	-	-	-	-
Тип лопатице АТР жалузине	-	-	-	-	-	-	-	-
Пресек АТР жалузине	-	-	-	-	-	-	-	-
Мртви момент мерне лопатице АТР жалузине	√	√	-	-	-	-	-	-
Корекциони фактор момента АТР жалузине	√	√	√	√	√	√	√	√
Пад притиска кроз АТР жалузину	√	√	√	√	√	√	√	√
Потрошња енергије АТР жалузине	√	√	√	√	√	√	√	√
Коефицијент протока АТР жалузине	√	√	√	√	√	√	√	√
Нула АТР жалузине	√	√	√	√	-	-	-	-
Режим струјања АТР жалузине	√	√	√	√	-	-	-	-
Линеарност АТР жалузине	√	√	√	√	√	√	√	√
Корелацијска функција АТР жалузине (без хистерезиса)	√	√	√	√	√	√	√	√
Корелацијска функција АТР жалузине (са хистерезисом)	√	√	√	√	√	√	√	√
Верификација математичког модела (без хистерезиса)	√	√	√	√	√	√	√	√
Верификација математичког модела (са хистерезисом)	√	√	√	√	√	√	√	√
Утицај отпора испред АТР жалузине (без хистерезиса)	√	√	√	√	√	√	√	√
Утицај отпора иза АТР жалузине (без хистерезиса)	√	√	√	√	-	-	-	-
Утицај отпора испред АТР жалузине (са хистерезисом)	√	√	√	√	√	√	√	√
Утицај отпора иза АТР жалузине (са хистерезисом)	√	√	√	√	-	-	-	-
Утицај температуре ваздушне струје	√	√	√	√	√	√	√	√
Утицај натпритиска ваздушне струје	√	√	√	√	√	√	√	√
Утицај атмосферског притиска ваздуха	√	√	√	√	√	√	√	√
Мерна неизвесност АТР жалузине	√	√	√	√	-	-	-	-
Временска константа АТР жалузине	√	√	√	√	-	-	-	-
Статичка осетљивост АТР жалузине	√	√	√	√	-	-	-	-
Коефицијент пригушења АТР жалузине	-	-	-	-	-	-	-	-
Радни век кугличног лежаја	√	-	-	-	-	-	-	-

У оквиру истраживања коришћене су следеће основне научне методе:

- дескриптивна метода;
- анализа и синтеза;
- експериментална метода;
- статистичка обрада података;
- аналитичко моделирање података и
- нумеричко моделирање применом методе коначних запремина.

Успостављена је основна хипотеза докторске дисертације да математички модел дефинисан једначинама (4.24) и (4.25) има универзални карактер и може успешно да се користи за тачно и поуздано мерење запреминског протока ваздуха. На основу предходних истраживања које је урадио Федершпил (Federspiel, 2004а, 2004б) претпостављено је да се ради о мерилу код кога је разлика измерене и моделске брзине струјања АТР жалужине $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања или $\pm 5\%$ од пуне мерне скале (узета је шира граница). Мерење параметара рада АТР жалужине за потребе математичког моделирања и верификације математичког модела урађено је за опсег брзина струјања 0 до 10 m/s непосредно испред жалужине.

4.4.2 Положај АТР жалужине на VAV систему

Познато је да положај жалужина на систему има значајан утицај на карактеристике жалужине (Веселаге, 1998а). Испитивање АТР жалужина обављено је према препорукама стандарда ANSI/AMCA 500 D (ANSI/AMCA, 2007), којим је предложено да се испред жалужине налази равна, права деоница дужине 3 m, а иза жалужине равна, права деоница дужине 2 m.

У оквиру докторске дисертације план је био да се испитају два положаја АТР жалужина на систему која се најчешће јављају у пракси:

- жалужина у цевоводу и
- жалужина постављена на крају цевовода.

Код АТР жалужине у цевоводу остављена је равна права деоница дужине 3 m испред жалужине и 2 m иза жалужине. Код жалужине постављене на крају цевовода скинута је права равна деоница дужине 2 m која се налази иза жалужине. На овај начин ваздух директно из АТР жалужине излази у простор лабораторије.

Непостојање праве деонице иза жалужине потенцијално може да утиче на резултат мерења протока ваздуха АТР жалужином. Циљ истраживања био је да се сагледа утицај присуства праве деонице иза АТР жалужине на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха. На овај начин би се утврдило да ли иза АТР жалужине мора да постоји права деоница. Ради се о веома важној информацији за потребе пројектовања и извођења система. Веома често мерило протока мора да се уграђује на крају система, када се мери проток ваздуха који се убацује у неки простор, где иза мерила протока нема праве деонице. У случају када мерило протока треба да се угради на крају система, тада се бира мерило протока које може тачно да мери и без присутне праве деонице иза мерила.

4.4.3 Утицај ауторитета АТР жалузине

Променом хидрауличке карактеристике система долази до промене карактеристике жалузине, што се одражава на тачност мерења протока. Нпр. довољно је преместити жалузину из једног у други део система и добити другу карактеристику жалузине и другу вредност протока ваздуха. На овај начин и присуство равне деонице иза жалузине мења хидрауличку карактеристику система, а самим тим и ауторитет жалузине (дефинисан једначином 2.21).

Са циљем да се сагледа како хидрауличка карактеристика система утиче на тачност мерења протока АТР жалужином, испитан је утицај ауторитета на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања ваздуха АТР жалужином. Променом отпора на испитној инсталацији промењен је ауторитет АТР жалузине. Из тог разлога током мерења параметара рада АТР жалузине мерен је пад притиска на жалузини и пад притиска на делу инсталације којом се управља жалужином. За две различите вредности ауторитета АТР жалузине мерени су параметри жалузине, при чему хистерезис жалузине није узиман у обзир.

За једну вредност ауторитета АТР жалузине мерена је група параметара рада жалузине која је коришћена за математичко моделирање. Затим је за другу вредност ауторитета АТР жалузине мерена група параметара рада жалузине која је коришћена за поређење са групом параметара добијеном на основу математичког модела за прву вредност ауторитета АТР жалузине. На овај начин сагледан је утицај ауторитета АТР жалузине на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања ваздуха. Промена отпора на деоници лабораторијског постројења на којој се налази АТР жалузина реализована је скидањем каналског грејача са постројења. Урађена су испитивања АТР жалузина типа В и С за случај када се жалузина налази у цевоводу.

4.4.4 Тип АТР жалузине

Број лопатица АТР жалузине. Веома често се у HVAC системима за мерење и регулацију протока ваздуха користе жалузине чије лопатице не формирају решетку, где је број лопатица жалузине мањи од три. Ради се о клапнама и жалузинама са две лопатице, мањих површина попречног пресека, које се највише срећу у VAV терминал боксовима. Како је доказано да број лопатица има утицај на поједине карактеристике жалузине попут линеарности и хистерезиса (Krawow, 1998), било је интересантно да се приказани математички модел верификује управо за жалузине чије лопатице не формирају решетку.

Начин вођења лопатица АТР жалузине. Када жалузина има више од једне лопатице, тада је лопатице могуће доводити у жељени положај паралелно или супротносмерно. Начин вођења лопатица жалузине битно утиче на струјну слику, тј. поље притиска (Veselaere, 1998b). Зато је било важно да се АТР жалузине испитају за оба начина вођења лопатица.

Експериментално истраживање урађено је у оквиру Лабораторије за механику флуида, Факултета техничких наука у Новом Саду. За потребе експерименталног истраживања коришћен је постојећи ваздушни тунел који је модификован у сврху испитивања АТР жалузина према препорукама стандарда (ANSI/AMCA 500 D, 2007). Направљен је

лабораторијски прототип АТР жалужине са изменљивим лопатицама, којим су испитана четири могућа типа АТР жалужина (*слика 3.10*) чије лопатице не формирају решетку:

- А – једна лопатица;
- В – две унакрсно вођене лопатице;
- С – две паралелно вођене лопатице и
- D – две лопатице, где је једна лопатица мерна, док је друга лопатица укочена у хоризонталном положају.

Тип лопатице. Постоји више типова лопатица жалужина: равне, равне са савијеним крајевима, равне са V жлебом, аеродинамички обликоване (Becelaere et al., 2005). У оквиру докторске дисертације коришћене су АТР жалужине са равним, на крајевима савијеним лопатицама чији је изглед приказан на *сликама 3.15 и 3.16*, а какве се најчешће користе код комерцијалних жалужина *слике 3.1 и 3.2*. Разлика између коришћених лопатица за потребе испитивања АТР жалужина и лопатица комерцијалних жалужина је у ојачању и оси обртања лопатице.

Лопатице АТР жалужине које су предмет испитивања докторске дисертације имају ојачања дуж лопатица, са циљем да се постигне довољна чврстоћа како не би дошло до увијања лопатице и да се смањи непотребан и штетан мртви момент лопатице. Такође, оса обртања лопатице је измештена ван осе лопатице, са циљем да се повећа активни момент који ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалужине. У оквиру докторске дисертације није планирано да се експерименталним путем анализира утицај облика лопатице на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалужином. Знатно би било комфорније утицај облика лопатице у будућности анализирати нумеричким симулацијама методом коначних запремина.

4.4.5 Пресек АТР жалужина

Развијеним математичким моделом АТР жалужине, једначине (4.24) и (4.25), предвиђа се мерење запреминског протока ваздуха АТР жалужинама различитог облика и величине попречног пресека. За потребе истраживања коришћена је АТР жалужина квадратног пресека 0,25 x 0,25 m. Планом експерименталних истраживања није предвиђена анализа утицаја величине и облика пресека на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха АТР жалужине. Знатно би било комфорније утицај облика и величине пресека АТР жалужине у будућности анализирати нумеричким симулацијама методом коначних запремина.

4.4.6 Мртви момент мерне лопатице АТР жалужина

Мртви момент мерне лопатице АТР жалужине непожељна је појава током мерења активног момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу. Иако се “тарирањем” електронски елиминисе показивање мртвог момента, он повећава момент трења и опсег мерења момента услед чега се смањује осетљивост и тачност мерења активног момента ваздушне струје. Из тог разлога план је био да се испита мртви момент мерних лопатица АТР жалужина.

Измерена је зависност мртвог момента и нападног угла мерних лопатица АТР жалужина. Мерење мртвог момента мерних лопатица урађено је за миран ваздух, када нема струјања ваздуха кроз канал, где су читаване вредности момента за различите вредности нападних углова мерних лопатица АТР жалужина. Како се момент ваздушне

струје код АТР жалузина типа В, С и D мери на горњој лопатици, која је код ових типова АТР жалузина иста, мртви момент мерних лопатица АТР жалузина типа В, С и D је једнак. Из тог разлога је урађено испитивање мртвог момента АТР жалузине типа А и В.

4.4.7 Корекциони фактор момента АТР жалузине

Активни момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу не преноси се у целости на мерило момента. Активни момент ”потроши” се на момент трења (присуство лежајева, потенциометра и механизма за кочење мерних лопатица), али и на савијање мерне лопатице АТР жалузине. Са циљем да се добије активни момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу, формиран је корекциони фактор према једначини (3.21), којим је коригован мерни момент који се читава на вагарској електроници. Након сваког подешавања нападног угла мерне лопатице контролисан је мерни момент АТР жалузине. Мерни момент је контролисан тегом масе 1 kg тј. контролним моментом од 981 Nmm према шематском приказу датом на *слици 3.28*.

4.4.8 Пад притиска кроз АТР жалузину

Код мерила брзине и протока, где се сензор поставља у флуидну струју (сензор пружа отпор флуидној струји) већ је постао стандард да произвођачи дају податак о паду притиска мерила. Податак о паду притиска мерила брзине је од изузетне важности за пројектанте HVAC система. Из тог разлога је током мерења параметара рада мерен и пад притиска на АТР жалузини.

4.4.9 Потрошња енергије АТР жалузине

У последње време све више се говори о потрошњи енергије техничких уређаја, који се према потрошњи енергије сврставају и у енергетске класе. Потрошња енергије АТР жалузине зависи од пада притиска кроз жалузину. На основу измерених вредности пада притиска, добијени су подаци о електричној снази која је потребна за рад АТР жалузине:

$$\Delta P = Q \cdot \Delta p, \quad (4.26)$$

и делу електричне снаге вентилатора која је потребна за рад АТР жалузине:

$$\Delta P_{vent} = \frac{\Delta P}{\eta_{vent}}, \quad (4.27)$$

где су:

Δp - пад притиска на АТР жалузини [Pa];

Q - запремински проток [m^3/s] и

η_{vent} - степен ефикасности вентилатора [-].

4.4.10 Коефицијент протока АТР жалужине

АТР жалужина је елемент система који пружа отпор струјању ваздуха, па је један од важних параметара у њеном раду коефицијент протока. Коефицијент протока показује колико је смањен проток ваздушне струје у систему постављањем АТР жалужине:

$$C_Q = \frac{Q_{ATP}}{Q} = \frac{v_{ATP}}{v}, \quad (4.28)$$

где су:

Q_{ATP} - запремински проток ваздуха кроз лабораторијско постројење са АТР жалужином [m^3/s];

Q - запремински проток ваздуха кроз лабораторијско постројење без АТР жалужине [m^3/s];

v_{ATP} - брзина струјања ваздуха кроз лабораторијско постројење са АТР жалужином [m/s] и

v - брзина струјања ваздуха кроз лабораторијско постројење без АТР жалужине [m/s].

На месту мерења брзине струјања на лабораторијском постројењу подешена је брзина струјања ваздуха на 5 m/s. Након подешавања брзине струјања постављена је АТР жалужина на лабораторијско постројење, а затим је на месту мерења брзине измерена брзина струјања ваздуха са АТР жалужином. Брзина струјања ваздуха са присутном АТР жалужином на лабораторијском постројењу мерена је за различите положаје нападних углова мерне лопатице АТР жалужине. Коефицијенти протока одређени су за све типове АТР жалужина и то за оба положаја жалужине на систему.

4.4.11 Нула АТР жалужине

При сваком положају лопатице јавља се минимална вредност брзине струјања ваздуха када мерило момента АТР жалужине почиње да реагује. Потребно је снимити ову минималну брзину струјања, која представља нулу мерила. При вредностима брзине струјања испод минималне брзине, постоји струјање ваздуха које не може да се региструје АТР жалужином.

Лопатице АТР жалужине доводе се у жељени положај према формираном угломеру кугличним лежајевима. Како би се реализовало довођење лопатица АТР жалужине у жељени положај мора да постоји зазор између лопатице и кућишта жалужине. За вертикални положај лопатица АТР жалужине постоји између лопатица и кућишта са свих страна зазор ширине 1 mm. Услед зазора између лопатица и кућишта, чак и за случај затворене АТР жалужине постоји проток ваздуха кроз жалужину.

Измерене су минималне брзине струјања ваздуха које могу да се региструју на свим типовима АТР жалужина, за случај када се жалужине налазе у цевоводу. Измерене су две минималне вредности брзине струјања ваздуха: брзина при којој момент ваздушне струје постаје једнак 1 Nm и брзина са којом је смислено радити мерење обзиром да је апсолутна грешка мерења момента 1 Nm. На основу измерених параметара рада АТР жалужина одређени су и режими струјања при минималним брзинама струјања ваздуха.

4.4.12 Режим струјања ваздуха кроз АТР жалузине

На основу измерених параметара рада одређени су режими струјања АТР жалузина. Режији струјања израчунати су за све типове АТР жалузина, за случај када се жалузина налази у цевоводу.

4.4.13 Линеарност карактеристике АТР жалузине

У раду Лизардоса и др. (Lizardos et al., 2000) дошло се до линеарне зависности између промене положаја лопатице и промене запреминског протока. Аутори су у разматрање узели две правоугаоне жалузине са четири лопатице: жалузину са паралелним вођењем и жалузину са супротносмерним вођењем лопатица. Познато је да се жалузина са нелинеарном карактеристиком може софтверски превести у жалузину са линеарном карактеристиком (Krawow, 1998). Међутим, на карактеристику АТР жалузине мора се обратити пажња приликом пројектовања система, јер се може хидрауличким прорачуном преко адекватне вредности ауторитета доћи до линеарне карактеристике АТР жалузине и на тај начин избећи софтверско подешавање и убрзати регулација протока ваздуха. Планирано је да се на основу добијених резултата мерења параметара рада свих типова и положаја АТР жалузина анализира њена карактеристика.

4.4.14 Верификација математичког модела АТР жалузине

За потребе математичког моделирања и верификације математичког модела урађене су две независне групе мерења параметара рада АТР жалузине. Прва група независних података коришћена је за математичко моделирање (одређивање корелацијске функције), док је друга група независних података коришћена за верификацију математичког модела.

Верификација математичког модела урађена је за случај када се не узима и случај када се узима у обзир хистерезис АТР жалузине. АТР жалузина је механички мерни уређај код кога се очекује изванредан хистерезис. Хистерезис настаје услед присуства кугличних лежајева којима се води лопатица, механизма преноса момента ваздушне струје, мерила момента, потенциометра за мерење нападног угла лопатице и технике мерења параметара рада жалузине при моделирању и верификацији математичког модела. Идеја је била да се сагледа утицај присутног хистерезиса на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха. Познавањем утицаја хистерезиса дефинише се начин подешавања АТР жалузине. Такође, сагледава се природа хистерезиса и донела одлука да ли хистерезис може софтверски да се елиминише.

Корелацијска функција АТР жалузине. Корелацијска функција АТР жалузине дефинисана у једначинама (4.24) и (4.25) одређена је експерименталним путем на основу прве групе независних мерења параметара рада жалузине.

За потребе анализирања утицаја хистерезиса на вредност корелацијске функције параметри рада АТР жалузине мерени су према следећем плану:

- повећањем брзине струјања и смањењем нападног угла мерне лопатице;
- смањењем брзине струјања и смањењем нападног угла мерне лопатице ;
- повећањем брзине струјања и повећањем нападног угла мерне лопатице и
- смањењем брзине струјања и повећањем нападног угла мерне лопатице.

Мерења параметара рада АТР жалужине добијена на основу четири наведена плана мерења осликавају реалну ситуацију која се јавља приликом рада жалужине, када долази до повећања и смањења брзине струјања и до повећања и смањења нападног угла лопатице жалужине.

Корелацијска функција која не узима у обзир хистерезис формирана је узимањем у обзир само мерења која су добијена повећањем брзине струјања и смањењем нападног угла мерне лопатице. Корелацијска функција која узима у обзир хистерезис формирана је као збир четири корелацијске функције које су добијене за четири дефинисана плана мерења.

Приликом анализирања корелацијске функције АТР жалужине поред утицаја хистерезиса, анализиран је и утицај положаја АТР жалужине на вредност корелацијске функције. Промена вредности корелацијске функције услед промене положаја АТР жалужине и узимањем у обзир хистерезиса, наговестила је утицај положаја и хистерезиса на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалужине.

Верификација не узимањем у обзир хистерезиса. Верификација математичког модела не узимањем у обзир хистерезиса АТР жалужине урађена је упоређивањем података добијених математичким моделом (корелацијска функција добијена без утицаја хистерезиса) и измерених вредности добијених повећањем брзине струјања и смањењем нападног угла мерне лопатице. Измерени и моделски подаци су упоређени, како би се видело колико је адекватан математичким модел. У анализи адекватности математичког модела коришћена је и зависност разлике измерене и моделске брзине струјања од нападног угла мерне лопатице АТР жалужине. Верификација математичког модела не узимањем у обзир хистерезиса урађена је за све типове и положаје АТР жалужина.

Верификација узимањем у обзир хистерезиса. Верификација математичког модела узимањем у обзир хистерезиса АТР жалужине урађена је поређењем података добијених математичким моделом (корелацијска функција добијена узимањем у обзир хистерезиса) и измерених вредности добијених узимањем у обзир хистерезиса на основу горе приказана четири плана мерења. Измерени и моделски подаци су упоређени како би се видело колико је адекватан математичким модел. У анализи адекватности математичког модела коришћена је и зависност разлике измерене и моделске брзине струјања од нападног угла мерне лопатице АТР жалужине. Верификација математичког модела узимањем у обзир хистерезиса урађена је за све типове и положаје АТР жалужина.

4.4.15 Утицај отпора испред и иза АТР жалужине

Локални отпори испред и иза АТР жалужине уносе поремећај у струјно поље и потенцијално могу да утичу на резултат мерења запреминског протока ваздуха. Идеја је била да се сагледа утицај присутног локалног отпора испред и иза АТР жалужине на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха. На овај начин би се утврдило да ли непосредно испред или иза жалужине сме да се нађе локални отпор. Ради се о веома важном податку како за пројектовање нових система, тако и при уградњи мерила протока на постојеће системе. Када на систему нема довољно места, па непосредно испред и иза мерила протока мора да се нађе локални

отпор, тада се при избору мерила протока води рачуна да оно буде неосетљиво на утицај присутног локалног отпора.

Урађено је испитивање утицаја отпора испред и иза АТР жалузина. Код жалузина постављених у цевоводу испитан је утицај отпора испред и иза жалузине, док је код жалузина постављених на крају система испитан само утицај отпора постављеног испред жалузине. Испитивање утицаја отпора на адекватност математичког модела и тачност мерења протока ваздуха урађено је за све типове АТР жалузина.

На испитној инсталацији, на растојању 0,5 m испред и 0,5 m иза АТР жалузине физички су постављени локални отпори. Како је попречни пресек АТР жалузина 0,25 x 0,25 m, отпори су практично постављени на растојањима $2 D_h$ испред и иза жалузине. Локални отпори реализовани су плочама од челичног лима, које су спуштене кроз одговарајуће жљебове у канал и учвршћене у вертикалном положају. Плоче су спуштене до половине пресека канала, тако да на датим местима смањују светлу површину попречног пресека канала за 50 %.

Утицај присутних локалних отпора на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања АТР жалузином утврђен је мерењем параметара рада жалузине са присутним локалним отпорима. За АТР жалузине смештене у цевоводу прво је постављена плоча у жљеб испред АТР жалузине и измерени су параметри рада жалузине. Плоча је затим извађена и премештена у жљеб иза АТР жалузине, жљеб испред жалузине је затворен, а затим су измерени параметри рада жалузине. За АТР жалузине смештену на крају цевовода, постављена је плоча у жљеб испред АТР жалузине, а затим су измерени параметри рада жалузине.

Утицај локалног отпора без хистерезиса. Измерене су брзине струјања са присутним локалним отпором у ваздушној струји и упоређене са брзинама струјања добијеним из математичког модела АТР жалузине којим није узет у обзир хистерезис жалузине. Поред поређења измерене и моделске брзине струјања ваздуха у анализи утицаја локалног отпора на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања коришћена је и зависност разлике измерене и моделске брзине струјања од нападног угла мерне лопатице АТР жалузине.

Утицај локалног отпора са хистерезисом. Измерене су брзине струјања са присутним локалним отпором у ваздушној струји и упоређене са брзинама добијеним из математичког модела АТР жалузине којим је узет у обзир хистерезис жалузине. Поред поређења измерене и моделске брзине струјања ваздуха у анализи утицаја локалног отпора на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања коришћена је и зависност разлике измерене и моделске брзине струјања од нападног угла мерне лопатице АТР жалузине.

4.4.16 Утицај густине ваздуха

У математичком моделу (4.24) у имениоцу израза налази се члан који означава густину ваздушне струје. Овим чланом коригује се математички модел услед промене густине ваздушне струје која делује на мерну лопатицу АТР жалузине. Да би се дошло до густине ваздушне струје према једначини стања идеалног гаса морају да се мере три параметра: натпритисак, температура и атмосферски притисак ваздушне струје. Ово повлачи за собом постојање три додатна сензора на АТР жалузини: термометра,

манометра и барометра. Поставља се питање неопходности три додатна сензора, па су посебно сагледани утицаји натпритиска, температуре и атмосферског притиска ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузинима.

Утицаји натпритиска, температуре и атмосферског притиска ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања урађени су за све типове АТР жалузина и то за случајеве када се жалузина налази у цевоводу и на крају цевовода.

Утицај натпритиска ваздушне струје. Током мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузинима долази до промене натпритиска ваздушне струје. Уколико се током мерења АТР жалузинима не мери натпритисак ваздушне струје и не коригује математички модел, уноси се додатна грешка мерења брзине струјања ваздуха.

Утицај натпритиска ваздушне струје сагледан је коришћењем измерених података параметара рада АТР жалузине. При анализи је коришћено поређење измерене и моделске брзине струјања за два случаја: случај када је натпритисак испред АТР жалузине узет у обзир при одређивању густине ваздушне струје и случај када натпритисак испред АТР жалузине није узет у обзир при одређивању густине ваздушне струје.

Утицај атмосферског притиска. Током мерења протока ваздушне струје АТР жалузинима долази до промене атмосферског притиска. Уколико се током мерења АТР жалузинима не мери атмосферски притисак и не коригује математички модел, већ се користи средња вредност атмосферског притиска, уноси се додатна грешка мерења протока.

Утицај атмосферског притиска ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузинима сагледан је коришћењем измерених података. За анализу је коришћено поређење измерене и моделске брзине струјања за два случаја: случај када се измерена вредност атмосферског притиска узима у обзир при одређивању густине ваздушне струје и случај када се измерена вредност атмосферског притиска не узима у обзир при одређивању густине ваздушне струје. За други случај густина ваздушне струје одређена је тако што је на измерену вредност атмосферског притиска додата вредност од 10 mbar.

Утицај температуре ваздушне струје. Кроз жалузине постављене на HVAC системима пролази током године ваздух променљиве температуре. Нпр. кроз жалузину у каналу за убацивање свежег ваздуха у зимском периоду пролази хладан ваздух, док током лета пролази топао ваздух. Уколико се не би мерила температура ваздуха и математички модел кориговао преко члана густине, настала би додатна грешка мерења.

Како се математички модел коригује на основу измерене температуре ваздушне струје, експеримент је реализован на собној температури, без контролисања амбијенталне температуре у лабораторији и температуре ваздушне струје испред АТР жалузине.

Утицај температуре ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузинима сагледан је коришћењем измерених података. За анализу је коришћено поређење измерене и моделске брзине струјања ваздуха за два случаја:

случај када је измерена вредност температуре узета у обзир при одређивању густине ваздушне струје и случај када измерена вредност температуре није узета у обзир при одређивању густине ваздушне струје. За други случај густина ваздушне струје одређена је тако што је од измерене вредности температуре одузета вредност температуре од 10 °C.

4.4.17 Неизвесност мерења брзине струјања ваздуха АТР жалужином

Мерење брзине струјања ваздуха АТР жалужином је посредно мерење брзине, при чему се до брзине струјања долази мерењем следећих величина: момента којим ваздушна струја делује на лопатицу жалужине, нападног угла лопатице жалужине, температуре и натпритиска ваздушне струје испред лопатице жалужине и атмосферског притиска ваздуха. Температура и натпритисак ваздушне струје испред мерне лопатице жалужине и атмосферски притисак ваздуха мере се у циљу одређивања густине ваздуха, за потребе корекције математичког модела (4.24).

Одређивање густине ваздуха мерењем поменутих величина уноси грешку нижег реда величине у односу на грешку која настаје мерењем момента којим ваздушна струја делује на лопатице и нападног угла лопатице АТР жалужине. Из тог разлога је формиран модел за одређивање неизвесности мерења брзине струјања ваздуха посредно мерењем само момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу и нападног угла мерне лопатице АТР жалужине (потпоглавље 6.3).

Очекује се да се при већим вредностима брзине струјања јављају веће вредности момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалужине, те се при мерењу момента прави мања грешка. Потпуно је идентична ситуација са већином постојећих мерила брзине струјања и протока ваздуха (анемометар са топлим жицом, Питова сонда, Вентуријева цев, класична жалужина, бленда итд), где се прави мања грешка мерењем виших вредности брзине, односно протока ваздуха.

Приликом развоја АТР жалужине тежило се да се формира уређај који ће са задовољавајућом неизвесношћу мерити проток ваздуха при малим вредностима брзина струјања. Из тог разлога је интересантно да се прикажу вредности неизвесности мерења брзине струјања ваздуха АТР жалужином, када се мере ниже вредности брзине струјања испод 3 m/s, када већина постојећих мерила или има велику мерну неизвесност или напросто не може да измери брзину струјања ваздуха. Одређена је неизвесност мерења свих типова АТР жалужина при различитим вредностима брзина струјања и нападних углова мерне лопатице, за случај када се жалужина налази у цевоводу.

За потребе одређивања непоузданости мерења брзине струјања АТР жалужином C_v одређено је стандардно одступање мерења момента s_M и нападног угла мерне лопатице s_α . За одређивање стандардног одступања коришћен је већи број поновљених мерења ($n > 20$) при исти мерним условима.

За потребе одређивања стандардног одступања при мерењу момента коришћена је аквизиција података која је прикључена на персонални рачунар. Мерење момента снимано је током времена, где је број измерених вредности при истим условима мерења био и до пар хиљада. Континуално мерење момента за сваки тип АТР жалужине урађено је за различите вредности брзина струјања ваздуха и при различитим вредностима нападног угла мерне лопатице према плану датом у *табели 4.3*.

Табела 4.3 План варијације параметара при одређивању мерне неизвесности АТР жалузина

	0,35 m/s	0,7 m/s	1,4 m/s	2,8 m/s
-20 °	-	-	C	C
0 °	A	A	B,C,D	B,C,D
20 °	-	-	C	C
30 °	A	A	B,D	B,D
60 °	A	A	B,D	B,D
90 °	A	A	B,D	B,D

У једначини (6.41) извод корелацијске функције по нападном углу мерне лопатице АТР жалузине одређен је нумеричким диференцирањем експериментално добијене корелацијске функције по нападном углу мерне лопатице. Нумеричко диференцирање урађено је за случај еквидистантних интерполационих чворова (Ралевић, 2002).

За потребе одређивања непоузданости мерења нападног угла мерне лопатице АТР жалузине коришћен је ротациони потенциометар. Калибрационе криве ротационих потенциометара одређене су према формираним угломерима приказаним на *сликама 3.11, 3.12 и 3.13*. За сваки ротациони потенциометар једна калибрациона крива снимана је повећањем нападног угла мерне лопатице, док је друга калибрациона крива снимана смањењем нападног угла мерне лопатице. Калибрациона крива ротационог потенциометра добијена је као аритметичка средина две снимљене калибрационе криве.

Ротациони потенциометри су при нижим вредностима угла отклона клизача нелинеарни и имају велику грешку мерења, па је из тог разлога приликом постављања ротационог потенциометра направљен предотклон од тридесет степени, да се елиминише зона рада потенциометра са нелинеарном карактеристиком.

Стандардно одступање мерења нападног угла лопатице АТР жалузине угломером процењено је одређивањем стандардног одступања измерене вредности електричне отпорности из следеће релације:

$$\frac{s_{\alpha}}{\alpha} = \frac{s_R}{R}, \quad (4.29)$$

где су:

s_{α} – стандардно одступање мерења нападног угла лопатице формираним угломером на АТР жалузини [°];

s_R – стандардно одступање мерења електричне отпорности ротационим потенциометром [Ω];

α – нападни угао лопатице [°] и

R – тренутна електрична отпорност ротационог потенциометра [Ω].

Са циљем да се дође до стандардног одступања ротационог потенциометра за сваки нападни угао мерне лопатице двадесет пута је подешен угао и мерена електрична отпорност ротационог потенциометра. Коришћењем једначине (6.6) одређено је стандардно одступање мерења нападног угла ротационим потенциометром

Расипање мерног момента и нападног угла мерне лопатике АТР жалузина обрађено је методом Хи хвадрата. За све типове АТР жалузина утврђено је да ли мерни момент и нападни угао мерне лопатике имају статистички нормалну расподелу. Расипање мерног момента и нападног угла мерне лопатике анализирано је и методом Шовенеа којом је проверено да ли у резултатима мерења момента и нападног угла има присутне грубе грешке мерења. Предуслов примене методологије одређивања мерне неизвесности описане јесте статистички нормална расподела и мерење без грубих грешака.

Да би се дошло до неизвесности посредног мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузином, поред непоузданости при мерењу момента и нападног угла лопатике, потребно је одредити и систематску грешку посредног мерења брзине струјања АТР жалузином. За одређивање систематске грешке АТР жалузине потребно познавати систематску грешку мерила момента ΔM и систематску грешку у експерименталном одређивању корелацијске функције $\Delta G(\alpha)$.

Проверавањем контролним тегом масе 1 kg (еквивалентан моменту који ствара ваздушна струја од 981 Nmm) пре и после мерења одређена је систематска грешка мерила момента. Корелацијска функција одређена је експерименталним путем из једначине (4.24), где систематска грешка корелацијске функције зависи од систематске грешке мерења брзине струјања ваздуха и систематске грешке мерења момента:

$$\Delta G(\alpha) = \sqrt{\frac{\Delta v^2 \rho b^2}{2 \cdot \Delta M}}, \quad (4.29)$$

где су:

b – дужина странице канала АТР жалузине [m];

Δv – апсолутна грешка мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузином [m/s];

ρ – густина ваздуха [kg/m^3] и

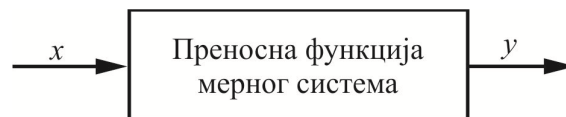
ΔM – систематска грешка мерења момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалузине [Nm].

4.4.18 Карактеристике преносне функције АТР жалузине

Преносна функција која повезује улазну x и излазну y величину неког мерног уређаја, слика 4.5 може да се апроксимира следећим општим изразом:

$$\sum_{i=1}^n a_i \frac{d^i y}{dt^i} = b_0 x, \quad (4.30)$$

где n одређује ред преносне функције мерења, док су a_i и b_0 константе једначине преносне функције.



Слика 4.5 Преносна функција мерног система

За вредност $n = 0$ добија се мерни систем нултог реда где преносна функција гласи:

$$y = \frac{b_0}{a_0} x, \quad (4.31)$$

а коефицијент:

$$K = \frac{b_0}{a_0}, \quad (4.32)$$

назива се статичка осетљивост.

Код мерног система нултог реда анализира се само однос излазне и улазне величине на основу кога може да се види колика је статичка осетљивост мерног система.

За вредност $n = 1$ добија се мерни систем првог реда где се карактеристике преносне функције дефинишу следећом једначином:

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x, \quad (4.33)$$

односно једначином:

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x. \quad (4.34)$$

Увођењем коефицијента осетљивости (4.32) и временске константе:

$$\tau = \frac{a_1}{a_0}, \quad (4.35)$$

једначина преносне функције мерног система првог реда постаје:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Kx. \quad (4.36)$$

Код мерних система првог реда поред статичке осетљивости анализира се и временски одзив мерног система, где се доводи импулсна функција на улазу мерног система и анализира излазна функција система током времена.

За вредност $n = 2$ добија се мерни систем другог реда где се карактеристике функције преноса дефинишу следећом једначином:

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x. \quad (4.37)$$

Дефинисањем непригушене (сопствена) фреквенције ω_n , коефицијента пригушења ζ и статичке осетљивости K (4.32) као:

$$\omega_n^2 = \frac{a_0}{a_2}, \quad (4.38)$$

$$\zeta = \frac{a_1}{2 \cdot \sqrt{a_0 a_2}}, \quad (4.39)$$

једначина која описује карактеристике преносне функције мерног система постаје:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dy}{dt} + y = Kx. \quad (4.40)$$

Мерни системи су у највећем броју случајева другог реда, где се посматрају карактеристике преносне функције како у временском, тако и у фреквенцијском домену. Тада се говори о амплитудској и фреквенцијској карактеристици преносне функције мерног система.

Карактеристике преносне функције АТР жалужине анализирани су као да је у питању мерни систем првог реда. Анализа није толико свеобухватна као кад би се карактеристике преносне функције АТР жалужине анализирале као код мерног система другог реда, јер се не узима у обзир фреквенцијски домен и пригушење мерног система. Међутим, и оваква анализа даје информацију о временском одзиву мерног сигнала и статичкој осетљивости АТР жалужине.

У диференцијалном облику једначина која описује карактеристике преносне функције АТР жалужине као мерног система првог реда гласи:

$$a_1 \frac{dM}{dt} + a_0 M = b_0 v, \quad (4.41)$$

тј.

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dM}{dt} + M = \frac{b_0}{a_0} v. \quad (4.42)$$

Увођењем смена за статичку осетљивост K (4.32) и временску константу τ (4.35) једначина која описује карактеристике преносне функције АТР жалужине (4.42) као мерног система првог реда сада гласи:

$$\tau \frac{dM}{dt} + M = K v, \quad (4.43)$$

или у следећем облику:

$$\tau \cdot M' + M = K \cdot v. \quad (4.44)$$

Операторски облик предходне једначине гласи:

$$\frac{M(D)}{v} = \frac{K}{\tau D + 1}, \quad (4.45)$$

где су:

$M(D)$ - вредност мерног момента зависна од времена [Nm];

v - импулсна функција брзине струјања [m/s];

τ - временска константа [s] и

$D = \frac{d}{dt}$ - оператор.

Опште решење диференцијалне једначине гласи:

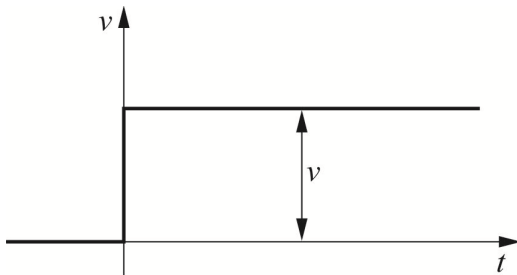
$$M(t) = K \cdot v \cdot h(t) \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \right], \quad (4.46)$$

где су:

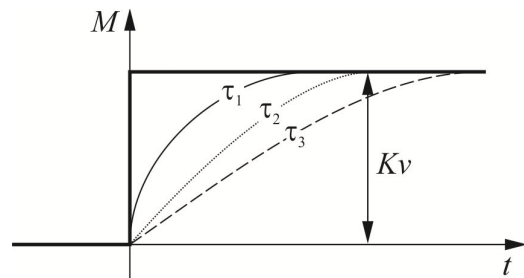
v – константна вредност брзине струјања [m/s] и

$h(t)$ – јединична импулсна функција [-].

Карактеристике преносне функције АТР жалузине требало би да се одреде довођењем импулсне побуде у виду тренутне константне брзине струјања на улаз АТР жалузине, *слика 4.6*. Тренутним довођењем константне вредности брзине струјања неће доћи до тренутног пораста мерног момента на његову максималну вредност која одговара импулсној побуди, *слика 4.7*. За успостављање максималне вредности момента од тренутка довођења константне брзине струјања потребан је одређени временски период. Овај временски период је веома важна карактеристика јер показује временски одзив мерила момента АТР жалузине.



Слика 4.6 Импулсна побуда у виду тренутне константе брзине струјања ваздуха



Слика 4.7 Одзивна функција на импулсну побуду

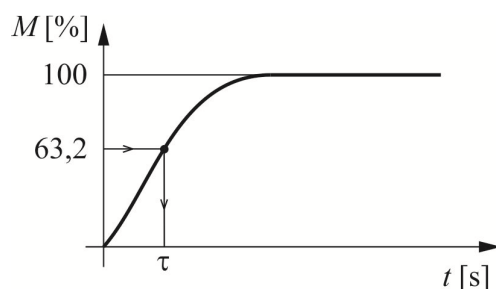
Проблем је тренутно довести константну вредност брзине струјања ваздуха на улаз АТР жалузине. Зато је као импулсна побуда коришћен сигнал који је добијен постављањем тега масе 1 kg на мерило момента према *слици 3.28*. Постављени тег одговара брзини струјања ваздуха која би деловала на лопатицу АТР жалузине моментом од 981 Nm. Мерило момента прикључено је на аквизицију података, док је

аквизиција података прикључена на персонални рачунар. Постављањем тега долази током времена до пораста мерног сигнала мерила момента АТР жалужине, што се преко аквизиције података снима на пресоналном рачунару.

Једнозначно решење диференцијалне једначине (4.44) добијено је калибрисањем општег решења, тј. одређивањем временске константе (4.35) и статичке осетљивости (4.32) АТР жалужине.

Временска константа АТР жалужине. Временска константа АТР жалужине је време које је потребно да прође од тренутка довођења импулсне побуде до тренутка када мерни сигнал достигне 63,2 % своје максималне вредности. Мерењем одзивне функције мерила момента АТР жалужине на импулсну побуду, добијена је зависност мерног сигнала момента и времена приказана на *слици 4.8*, из које је одређена временска константа мерила. Временска константа је мера временског одзива мерила момента на доведену импулсну побуду *слика 4.8*.

Поред брзине струјања као улазне величине и мерила момента као излазне величине преносне функције, нападни угао мерне лопатице је величина која је узета у обзир приликом одређивања временске константе АТР жалужине.



Слика 4.8 Одређивање временске константе мерила момента АТР жалужине

Статичка осетљивост АТР жалужине. Вредност момента којим ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалужине мора да буде довољно велика да би се момент тачно мерио коришћеним мерилом момента. Како је циљ да се што тачније мери момент којим ваздушна струја делује на лопатицу, било је потребно да се развије статички осетљива АТР жалужина, код које се за малу вредност брзине струјања ваздуха региструје што виша вредност момента.

Коефицијент статичке осетљивости АТР жалужине K одређен је на основу мерења момента и брзине струјања за стационарне услове, из једначине (4.24) :

$$K = \frac{M}{v} . \quad (4.47)$$

Статичка осетљивост АТР жалужине мења се са променом положаја мерне лопатице, па је коефицијент статичке осетљивости K одређен за различите вредности нападних углова мерне лопатице. Добијени коефицијент статичке осетљивости сведен је на стандардне услове (температура ваздуха 20 ° и атмосферски притисак 101325 Pa).

4.4.19 Радни век АТР жалузине

Истраживањем у оквиру докторске дисертације није планирана анализа и предвиђање поузданости рада АТР жалузине. План је само да се укаже на правилан избор и коришћење појединих делова АТР жалузине како би се продужио њен радни век.

4.4.20 Нумеричке симулације рада АТР жалузине

Да би се дошло до одговарајућих података за потребе развоја АТР жалузина, потребно је урадити велики број експеримената. У циљу смањења трошкова развоја АТР жалузина и саме методе мерења протока ваздуха моментном карактеристиком АТР жалузине у будућности би требало да се раде нумеричке симулације. У оквиру докторске дисертације урађене су нумеричке симулације методом коначних запремина. За нумеричке симулације коришћен је комерцијални програм "Star CCM+" који користи метод коначних запремина.

За потребе верификације нумеричке симулације коришћени су подаци добијени експерименталним истраживањем. Докторска дисертација приказује само подешавање нумеричке симулације на основу експерименталних података, док ће испитивање АТР жалузине нумеричким симулацијама бити предмет следеће етапе развоја АТР жалузине.

Решења нумеричких симулација верификована суна два начина:

- мерењем профила брзине иза АТР жалузине анемометром са топлом жицом и
- експерименталном верификацијом математичког модела добијеног решењима нумеричке симулације.

Мерења профила брзине струјања иза АТР жалузине урађено је на константној температури ваздуха од 35 °С која је регулисана каналским грејачем са термостатом. Профил брзине струјања мерен је на растојању 35 cm од осе обртања мерне лопатице АТР жалузине. Циљ није био да се тачно измери брзина струјања иза лопатице, што је и немогуће. На овом растојању и даље се осети утицај мерне лопатице у ваздушној струји, где није формиран униформан, теоријски профил брзине. Циљ је био да се измереним профилом брзине непосредно иза лопатице АТР жалузине анализира поремећај који лопатица изазива у струји ваздуха. Измерени и нумерички профили брзине су упоређени да се види да ли лопатице уносе исти тренд поремећаја у ваздушну струју за оба начина решавања проблема.

Нумеричке симулације урађене су само за случај када је жалузина у цевоводу, тј. када постоји равна права деоница цевовода испред и иза АТР жалузине. Нумеричке симулације урађене су за АТР жалузине типа А и В. Мерења параметара рада АТР жалузина за потребе верификације решења нумеричке симулације урађена су за пар вредности брзина струјања и нападних углова, према плановима приказаним у *табели 4.4* за жалузину типа А и у *табели 4.5* за жалузину типа В.

Табела 4.4 План мерења параметара рада АТР жалужине типа А за потребе верификације нумеричког модела

	2 m/s	4 m/s	6 m/s	8 m/s	10 m/s
0°	-	-	-	-	-
10°	-	-	-	-	-
20°	-	-	-	-	-
30°	-	-	-	-	-
40°	-	√	-	√	-
50°	-	-	-	-	-
60°	-	-	-	-	-
70°	√	√	-	-	-
80°	-	-	-	-	-
90°	-	-	-	-	-

Табела 4.5 План мерења параметара АТР жалужине типа В за потребе верификације нумеричког модела

	2 m/s	4 m/s	6 m/s	8 m/s	10 m/s
0	-	-	-	-	-
10	-	-	√	-	√
20	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-
40	-	√	-	√	-
50	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-
70	√	√	-	-	-
80	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-

Други начин верификације решења нумеричких симулација је знатно важнији за АТР жалужину као мерни уређај од верификације мерењем профила брзине непосредно иза лопатице жалужине. За потребе верификације коришћена су два низа независних експерименталних података. Решењима нумеричке симулације урађено је математичко моделирање, а затим је добијени математички модел верфикован експерименталним подацима.

Коришћењем података из првог низа мерења као улазне податке нумеричке симулације (нападног угла мерне лопатице и брзине струјања ваздуха испред мерне лопатице), нумеричком симулацијом израчунат је момент ваздушне струје који делује на мерну лопатицу АТР жалужине. На основу познате брзине струјања, нападног угла и момента ваздушне струје добијена је корелацијска функција (4.25) и калибрисана је једначина за одређивање брзине струјања АТР жалужине (4.24). На овај начин је урађено математичко моделирање АТР жалужине на основу решења нумеричке симулације.

Верификација математичког модела урађена је подацима другог независног низа мерења. На основу измереног момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу и нападног угла мерне лопатице из горе дефинисаног математичког модела (4.24) и (4.25) добијена је моделска брзина струјања. Моделска брзина струјања упоређена је са измереном брзином струјања ваздуха.

4.5 Закључна разматрања

На основу дефинисаног математичког модела и изложеног детаљног плана развоја мерила и методе мерења моментном карактеристиком АТР жалузине, уочљиво је да централно место у развоју припада експерименталној методи. У циљу доказа основне хипотезе докторске дисертације, одређивања утицајних фактора на адекватност математичког модела и тачност мерења протока, као и одређивања карактеристика АТР жалузине, на самом почетку било је потребно формирати лабораторијско постројење за испитивање АТР жалузине.

Постоје препоруке за формирање лабораторијских постројења за испитивање комерцијалних регулационих жалузина, попут препорука које даје стандард ANSI/AMCA 500 - D из 2007 године (ANSI/AMCA 500 - D, 2007). Већина постојећих препорука је искоришћено, али су унети и поједини детаљи везани за АТР жалузине, како би се добило комфортно и довољно флексибилно лабораторијско постројење којим је могуће реализовати дефинисан план истраживања мерила и методе мерења протока ваздуха моментном карактеристиком АТР жалузине.

5. ЛАБОРАТОРИЈСКО ПОСТРОЈЕЊЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ АТР ЖАЛУЗИНА

5.1 Увод

Лабораторијско постројење за испитивање АТР жалузина реализовано је у оквиру Лабораторије за механику флуида, Факултета техничких наука у Новом Саду. Делови постојећег ваздушног тунела пројектованог и изведеног за потребе магистарског рада под називом “Аеродинамичко постројење за испитивање турбомашина са великом тачношћу мерења” (Vuković, 1972) искоришћени су за формирање новог лабораторијског постројења, чији је изглед приказан на *слици 5.1*.



Слика 5.1 Изглед лабораторијског постројења за испитивање АТР жалузина

Лабораторијско постројење за испитивање АТР жалузина пројектовано је и изведено према препорукама стандарда ANSI/AMCA 500 - D из 2007 године (ANSI/AMCA 500 - D, 2007). Стандард обухвата лабораторијске методе за испитивање жалузина које се користе за мерење и регулацију запреминског протока ваздуха.

5.2 Поставке експеримента на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина

Експериментално испитивање АТР жалузина на формираном лабораторијском постројењу ради се за потребе:

- верификације математичког модела;
- верификације нумеричког модела и
- континуалног мерења момента.

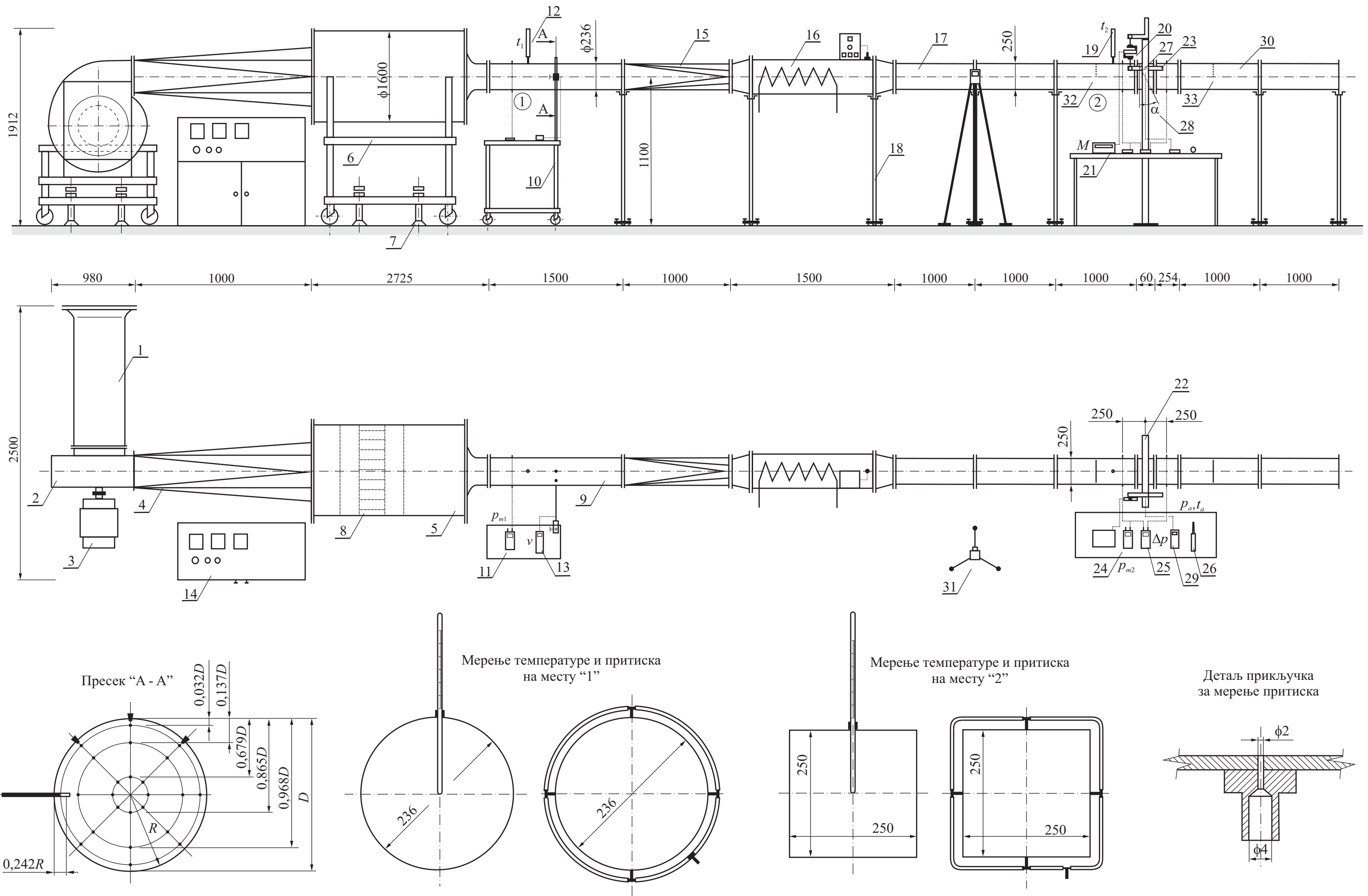
Сходно потребама урађене су три поставке експеримента на формираном лабораторијском постројењу.

5.2.1 Поставка експеримента за потребе верификације математичког модела АТР жалузина

Експериментално испитивање које се на лабораторијском постројењу ради за потребе верификације математичког модела АТР жалузина је најобимније испитивање. Из тог разлога ће се кроз поставку експеримента за потребе верификације математичког модела АТР жалузина детаљно описати лабораторијско постројење, док ће се за преостале две поставке експеримента описати само специфичности саме поставке.

Поставка експеримента лабораторијског постројења за потребе верификације математичког модела АТР жалузина шематски је приказана *слици 5.2*. Основни делови лабораторијског постројења су:

1. усисна цев;
2. вентилатор;
3. електромотор једносмерне струје;
4. дифузор;
5. комора за умиривање ваздушне струје;
6. покретна колица;
7. завртњевци;
8. сито и саће за умиривање ваздушне струје;
9. права деоница за мерење брзине струјања;
10. колица са подесивим стативом за позиционирање анемометра са топлим жицом;
11. манометар;
12. термометар;
13. анемометар са топлим жицом;
14. орман са електроником за управљање радом вентилатора;
15. прелазни комад;
16. каналски грејач;
17. права деоница испред АТР жалузине;
18. носачи канала са подесивим стопама за нивелисање;
19. термометар;
20. сензор за мерење масе;
21. вагарска електроника;
22. АТР жалузина;
23. мерне полуга;
24. манометар;
25. диференцијални манометар;
26. уређајем за мерење притиска, температуре и релативне влажности ваздуха
27. ротациони потенциометар
28. угломер;
29. унимер;
30. права деоница иза АТР жалузине;
31. термовизијска камера;
32. локални отпор испред АТР жалузине и
33. локални отпор иза АТР жалузине.



Слика 5.2 Шематски приказ поставке експеримента за потребе верификације математичког модела АТР жалузине

Ваздух се преко усисне цеви (1) из лабораторијског простора увлачи у лабораторијско постројење. Проток ваздуха кроз лабораторијско постројење остварује се помоћу вентилатора (2) и електромотора једносмерне струје (3). Радам вентилатора управља се преко ормана са електроником (14). Дифузор (4) кинетичку енергију преводи у притисну енергију ваздушне струје, делимично разбија вихорно струјање које се јавља иза вентилатора (2) и уводи ваздушну струју у комору за умиривање ваздушне струје (5). Комора (5) садржи сито и саће за умиривање ваздушне струје (8); ту се у комори разбија вихорно струјање које настаје иза вентилатора (2) и обезбеђује униформна ваздушна струја у правој деоници за мерење брзине струјања (9). Вентилатор (2) и комора за умиривање ваздушне струје (5) налазе се на покретним колицима (6) која садрже завртњеве (7) за нивелисање и учвршћивање. Брзина ваздушне струје на правој деоници (9) мери се анемометром са топлом жицом (13). За потребе позиционирања анемометра са топлом жицом (13) користе се колица са подесивим стативом (10). На правој деоници за мерење брзине струјања (9) поред брзине мере се и натпритисак и температура ваздушне струје манометром (11) и термометром (12).

Ваздух се из праве деонице за мерење брзине струјања преко прелазног комада (15) уводи у каналски грејач ваздуха (16). Каналским грејачем (16) ваздух се загрева на потребну температуру, а затим се уводи у праву деоница испред АТР жалузине (17). Канали се налазе на носачима са подесивим стопама за нивелисање (18) којим је у потпуности омогућено нивелисање вентилатора (2), коморе за умиривање ваздушне струје (5) и каналског дела лабораторијског постројења. Пад притиска на АТР жалузине (22) мери се диференцијалним манометром (25). За мерење температуре и натпритиска ваздуха испред АТР жалузине (22) користе се термометар (19) и манометар (24). Сензор за мерење масе (20), мерне полуга (23) и вагарска електроника (21) чине мерило момента који ствара ваздушна струја. Амбијентални услови: притисак, температура и релативна влажност ваздуха мере се уређајем за мерење притиска, температуре и релативне влажности ваздуха (26). За мерење нападног угла лопатице АТР жалузине (22) користи се ротациони потенциометар (27) који се калибрише према угломеру (28), док се вредност електричног отпора мери унимером (29). Термовизијска камера (31) користи се за проверу заптивености прирубничких спојева.

Иза АТР жалузине (22) налази се права деоница (30). Како је предмет испитивања АТР жалузина квадратног пресека 250 x 250 mm, праве деонице испред (17) и иза (30) жалузине су истог пресека као испитивана жалузина. Према препорукама стандарда (ANSI/AMCA 500 - D, 2007) права деоница (17) испред АТР жалузине је дугачка 3 m, док је права деоница иза АТР жалузине дугачка 2 m. Деонице су формиране прирубничким спајањем деоница дужине 1 m, чиме је омогућена монтажа и демонтажа деоница за потребе поставке експеримента. Каналски грејач (16) прирубничким спојем је везан за канал, па је скидањем грејача и преспајањем канала омогућена промена ауторитета АТР жалузине. На растојању 0,5 m испред и 0,5 m иза АТР жалузине формиран су локални отпори струјању ваздуха у каналу (32) и (33) за потребе поставке експеримента. Локални отпори су заправо плоче израђене од челичног лима, које могу да се спусте кроз одговарајуће жљебове у канал и учврсте, тако да се на датим местима смањује светла површина попречног пресека канала за 50 %. Користећи унимер (29) на АТР жалузине (22) подеси се жељени нападни угао лопатице. Мртви момент мерне лопатице АТР жалузине тарира се на вагарској електроници (21). На орману са електроником за управљање радом вентилатора (14) подеси се жељени

проток ваздуха кроз лабораторијско постројење према показивању анемометра са топлом жицом (13).

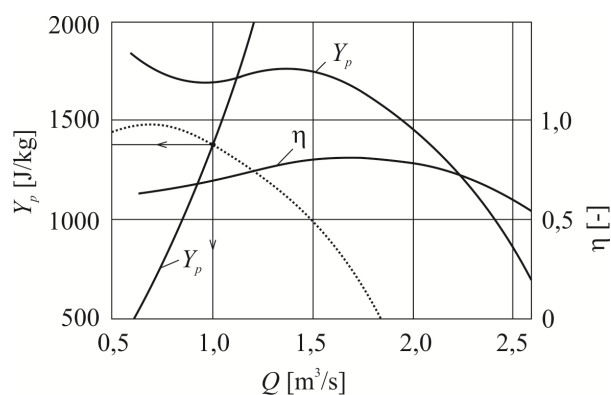
Након подешавања нападног угла лопатице АТР жалузине и протока ваздуха и постизања стационарног струјања ваздуха кроз лабораторијско постројење читавају се параметри рада жалузине према поставци експеримента:

- натпритисци (11) и (24);
- температуре (12) и (26);
- брзина струјања ваздуха (13);
- пад притиска (25);
- амбијентални притисак и температура (26) и
- момент ваздушне струје (21).

Вентилатор. У лабораторијском постројењу коришћен је средњепритисни центрифугални вентилатор произвођача „Термоелектро“ из Србије, модел К4С – 50 чији је изглед дат на *слици 5.3*. На *слици 5.4* приказане су: карактеристика вентилатора при $n = 2860 \text{ o/min}$ (Vuković, 1972) и карактеристика лабораторијског постројења за случај скроз отворене АТР жалузине типа А.



Слика 5.3. Електромотор произвођача „Раде Кончар“, модел ОН 137 и вентилатора произвођача „Термоелектро“, модел К4С – 50



Слика 5.4. Карактеристика вентилатора произвођача „Термоелектро“, типа К4С – 50 (Vuković, 1972) и лабораторијског постројења

Електромотор. За погон вентилатора коришћен је електромотор једносмерне струје произвођача „Раде Кончар“ из Хрватске, модел ОН 137, приказан на *слици 5.3*. Основне техничке карактеристике једносмерног електромотора дате су у *табели 5.1*.

Број обртаја вентилатора одржава се константним у границама $\pm 0,5\%$, без обзира на промену електричног напона мреже (Vuković, 1972). Регулација једносмерног електромотора реализована је помоћу тиристора, променом електричног напона ротора. Изглед ормана и управљачке табле тиристорске регулације броја обртаја приказан је на *сликама 5.5* и *5.6*.

Табела 5.1. Техничке карактеристике мотора једносмерне струје произвођача „Раде Кончар“, модел ОН 137

Електрични напон [V]	440
Електрична струја [A]	55
Електрична снага [kW]	22
Број обртаја [min ⁻¹]	5000



Слика 5.5 Орман тиристорске регулације броја обртаја



Слика 5.6 Управљачка табла тиристорске регулације броја обртаја

За случај приказан на слици 5.4 када је на лабораторијском постројењу скроз отворена АТР жалузина типа А, максимални проток вентилатора при ком може да се уради експеримент износи 1 m³/s (одговара брзини струјања на излазу из коморе за мешање од 16 m/s), напор вентилатора је 1380,2 J/kg, док је снага електромотора једносмерне струје:

$$P = \frac{\rho Q Y_p}{\eta} = \frac{1,16 \cdot 1 \cdot 1380,2}{0,79} = 2026,6 \text{ W} \approx 2 \text{ kW}, \quad (5.1)$$

где су:

Q - запремински проток ваздуха [m³/s];

ρ - густина ваздуха [kg/m³];

Y_p - напор вентилатора [J/kg] и

η - степен ефикасности вентилатора [-].

Експериментално испитивање АТР жалузина урађено је за опсег мерења брзине струјања непосредно испред жалузине од 0 m/s до 10 m/s.

Дифузор. Коришћен је дифузор у облику зарубљене купе која се постепено шири, да би се што ефикасније превела кинетичка енергија у притисну енергију. Моћ превођења кинетичке енергије у притисну енергију највише зависи од поља брзина код улаза у дифузор и од угла купе φ . Кад је угао φ мали дифузор мора да буде дуг, па су губици на трење сразмерно велики. Кад се дифузор нагло шири може лако да дође до

отцепљивања вртлога, што за последицу има велике губитке енергије. На основу многобројних експеримената, нпр (Горлин, 1964) утврђено је да оптимални угао ширења купастог дифузора износи $\varphi = 6^\circ \div 12^\circ$.

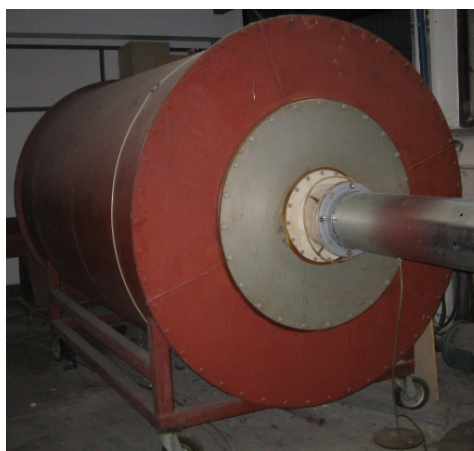
Комора за умиривање ваздушне струје. Комора за умиривање ваздушне струје има за циљ да разбије вртложно струјање настало иза вентилатора, тако да статички притисци на изласку из коморе буду свуда једнаки, практично немерљивих колебања, при свим устаљеним протоцима ваздуха кроз вентилатор (Vuković, 1972).

На *слици 5.7* приказан је изглед коморе за умиривање ваздушне струје са покретним колицима. Два сита постављена у комору за умиривање ваздушне струје имају улогу да разбију крупне вртлоге у мање делове (Vuković, 1972). Испитивања су показала (Кагановљев, 1947) да сита равнају профил брзине. Нпр. ако се разлике апсолутних брзина струјања у пресецимама испред и иза сита означе са Δv_1 и Δv_2 тада је њихова веза:

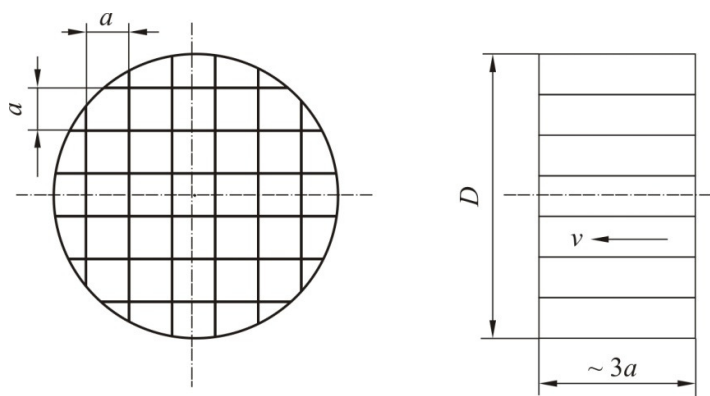
$$\Delta v_1 = \Delta v_2 \left(\frac{2 - \zeta}{2 + \zeta} \right), \quad (5.2)$$

где је: ζ - коефицијент отпора сита [-].

Иза сваког сита остају вртложни трагови, који нешто даље нестају. У циљу елиминисања вртложних трагова и усмеравања ваздушне струје у правцу осе коморе, између два сита постављена је решетка у облику саћа. Решетка је постављена на растојању $D/2$ од завршетка цеви коморе, пречника D . Размере постављене решетки (Fan Performance Test, 1953) приказане су на *слици 5.8*.



Слика 5.7. Комора за умиривање ваздушне струје



$$a = (0,075 \div 0,150) D$$

Слика 5.8. Препоруке за израду решетки са саћем (Fan Performance Test, 1953)

Деоница за мерење брзине струјања. Ради комфорнијег мерења брзине струјања мерна деоница је направљена од цеви кружног пресека, *слика 5.9*. На излазни отвор коморе за умиривање ваздушне струје прирубничким спојем монтирана је цев израђена од поцинкованог челичног лима унутрашњег пречника 236 mm. Цев је дугачка 1,5 m на чијој су половини дужине избушени отвори за мерење брзине струјања. Отвори су пречника 8 mm тако да у њих може да уђе сонда анемометра са топлом жицом.

Анемометар са топлом жицом. За мерење брзине струјања ваздуха коришћен је анемометар са топлом жицом произвођача “Testo”, модел 425 (TESTO, 2005), приказан на *слици 5.10*. У *табели 5.2* приказане су техничке карактеристике коришћеног анемометра. Анемометар са топлом жицом одликује се великом осетљивошћу, па је коришћена функција “mean” за временско осредњавање брзине струјања у тачки. Период осредњавања током мерења брзине струјања ваздуха био је 10 s.



Слика 5.9 Колица са подесивим стативом за позиционирање анемометра са топлом жицом



Слика 5.10. Анемометар са топлом жицом произвођача “Testo”, модел 425

Табела 5.2. Техничке карактеристике анемометра са топлом жицом произвођача “Testo”, модел 425 (TESTO, 2005)

Мерни опсег [m/s]	0 - 20
Мерна неизвесност [m/s]	$\pm (0,03 \text{ m/s} + 5 \% \text{ тренутно измерене брзине})$
Резолуција [m/s]	0,01
Радна температура [°C]	- 20 ÷ 50 °C
Серијски број	01585954

Услед потребе за великим бројем мерења средња брзина струјања ваздуха добијена је коришћењем методе мерења брзине у једној тачки која је препоручена од стране стандарда ISO 7145 (ISO 7145, 1982). Постављањем сонде анемометра на растојање $0,242 R$ од зида цеви мерена је средња брзина струјања ваздуха, где је R - унутрашњи полупречник цеви [m]. Коришћена метода мерења предходно је проверена методом брзина – површина која је препоручена од стране стандарда ANSI/AMCA 500 – D (ANSI/AMCA 500 - D, 2007), а чији је план мерења приказан на детаљу *слике 5.2*.

Колица са подесивим стативом. Сонда анемометра са топлом жицом произвођача “Testo”, модел 425 је градуисана, али је скала слабо видљива. Из тог разлога су ради лакшег позиционирања приликом провере методом брзина – површина положаји на скали маркирани траком. У циљу што тачнијег постављања сонде анемометра у жељени положај и повећања поновљивости мерења брзине, коришћена су колица са

подесивим стативом *слика 5.9*. Колица омогућавају премештање статива са анемометром по простору лабораторије, док статив има три степена слободe: две транслације и једну ротацију и омогућава довођење сонде анемометра у жељени положај.

На *слици 5.9* приказан је један од положаја анемометра са топлом жицом приликом провере методе мерења средње брзине струјања ваздуха из једне тачке помоћу методе брзина – површина. Приликом провере методом брзина – површина анемометар са топлом жицом довођен је подесивим стативом у тачке дефинисане планом мерења брзине струјања приказаним на пресеку А-А *слике 5.2*. Након провере методом брзина - површина врх сонде анемометра постављен је и учвршћен стативом у хоризонтални положај на позицију $0,242 R = 28,55 \text{ mm}$ од зида цеви. Преостала три отвора који су коришћени за проверу методом брзина - површина су затворени (пресек А-А на *слици 5.2*). Измерена средња брзина струјања на мерном месту праве деонице није средња брзина струјања испред мерне лопатике АТР жалюзине. Средњу брзину струјања ваздуха непосредно испред АТР жалюзине није могуће тачно измерити, па се до ње дошло из једнакости масеног протока на месту мерења (1) и на месту непосредно испред мерне лопатике АТР жалюзине (2):

$$\dot{m} = \rho_1 v_2 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = \text{const}, \quad (5.3)$$

$$v_2 = \frac{\rho_1 v_1 A_1}{\rho_2 A_2}, \quad (5.4)$$

где су:

v_1 - брзина струјања на мерном месту [m/s];

A_1 - површина попречног пресека на мерном месту [m²];

ρ_1 - густина ваздуха на мерном месту [kg/m³];

A_2 - површина попречног пресека испред АТР жалюзине [m²] и

ρ_2 - густина ваздуха испред АТР жалюзине [kg/m³].

Површине попречног пресека на мерном месту и на месту испред АТР жалюзине су:

$$A_1 = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{0,236^2 \cdot 3,14}{4} = 0,0437 \text{ m}^2, \quad (5.5)$$

$$A_2 = b^2 = 0,25^2 = 0,0625 \text{ m}^2. \quad (5.6)$$

Гуштине ваздуха у каналу на мерном месту и на месту испред АТР жалюзине добијају се из једначине стања идеалног гаса за дате услове:

$$\rho_1 = \frac{p_{m1} + p_a}{RT_1}, \quad (5.7)$$

$$\rho_2 = \frac{p_{m2} + p_a}{RT_2}, \quad (5.8)$$

где су:

p_a - атмосферски притисак [Pa];

R - гасна константа [J/kgK];

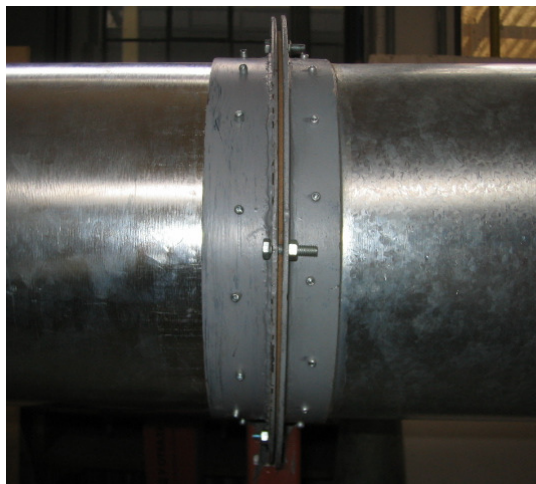
T_1 - температура ваздуха на мерном месту [K];

T_2 - температура ваздуха испред АТР жалюзине [K];

p_{m1} - натпритисак ваздуха на мерном месту [K] и

p_{m2} - натпритисак ваздуха испред АТР жалюзине [K].

Одређивање брзине струјања ваздуха непосредно испред АТР жалюзине једначином (5.4) валидно је само под условом да од места мерења брзине струјања (1) до места непосредно испред АТР жалюзине (2) нема цурења ваздуха. Места на којима на вентилационим каналима најчешће долази до цурења ваздуха су прирубнички спојеви. У циљу спречавања цурења ваздуха урађено је заптивање прирубничких спојева гумом *слика 5.11*.



Слика 5.11. Изглед заптивеног прирубничког споја канала



Слика 5.12. Контрола цурења ваздуха на прирубничком споју термовизијском камером произвођача “Wuhan”, модел “ThermoPro™TP8S”

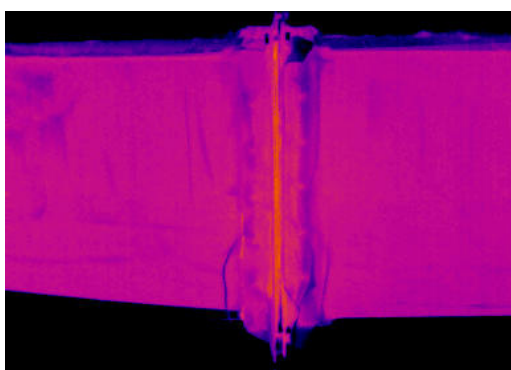
Контрола прирубничких спојева заптивених гумом на ваздушном каналу лабораторијског постројења урађена је термовизијском камером произвођача “Wuhan”, модел “ThermoPro™TP8S”. Техничке карактеристике термовизијске камере (WUHAN, 2012) приказане су у *табели 5.3*, док је термовизијска камера приказана на *слици 5.12*.

Термовизијска камера произвођача “Wuhan”, модел “ThermoPro™TP8S” даје могућност уноса литерарне вредности коефицијента емисије материјала од ког је површина објекта израђена. Такође, камера има модерну опцију да се на основу унете вредности површинске температуре неког објекта одреди коефицијент емисије материјала од кога

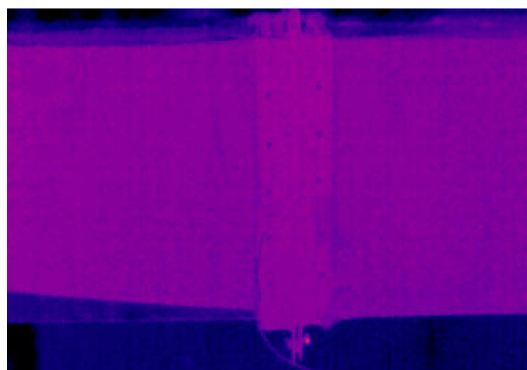
је објекат израђен. Искоришћена је могућност да се за реалне услове одреди коефицијент емисивности површине канала израђеног од поцинкованог челичног лима, обложеног индустријском сребрном траком. Након постизања радних услова термопар је залепљен на облогу зида канала, након чега је термовизијском камером измерена температура у тачки у којој је постављен термопар. Вредност коефицијента емисивности варирана је све док се температура измерена термовизијском камером не поклопи са температуром коју региструје термопар. Вредност коефицијента емисивности добијена на овај начин коришћена је за снимање температурног поља у сврху контроле цурења ваздуха из прирубничког споја.

Табела 5.3 Техничке карактеристике коришћене термовизијске камере произвођача “Wuhan”, модел “ThermoPro™TP8S” (WUHAN, 2012)

Визир	0,6” високе OLED резолуције, 640 x 480 пиксела
Електронски зум	од x1 до x10
Температурни опсег	за филтер 1 од – 20 °С до 250 °С
	за филтер 2 од 200 °С до 600 °С
Радна температура	– 20 °С до 60 °С
Мерна неизвесност	±1 °С или ±1% од читавања за филтер 1
	±2 °С или ±2% од читавања за филтер 2
Корекција емисивности	од 0,01 до 1, са кораком 0,01
Аутоматска корекција	Растојања, релативне влажности, атмосферске трансмисије и екстерне оптике



Слика 5.13 Термовизијска фотографија прирубничког споја са цурењем ваздуха



Слика 5.14 Термовизијска фотографија прирубничког споја без цурења ваздуха

Контрола цурења ваздуха урађена је при брзини струјања ваздуха у каналу од 6 m/s, при чему ваздух загрејан каналским грејачем на температуру од 35 °С. Загревањем ваздуха у каналу направљена је разлика између температуре амбијенталног и каналског ваздуха већа од 10 °С. На овај начин могло је визуелно да се уочи цурење ваздуха из прирубничког споја (јасно видљива светлија боја на месту прирубничког зазора) слика 5.13, као и добро заптивање прирубничког споја на коме не долази до цурења ваздуха слика 5.14.

Манометар и термометар на месту мерења брзине струјања. Натпритисак и температура ваздушне струје мерени су на месту мерења брзине струјања за потребе одређивања густине ваздуха (5.7) и брзине струјања (5.4) испред АТР жалюзине. Натпритисак

ваздуха мерен је деференцијалним манометром произвођача “Testo”, модел 525 чији је изглед приказан на *слици 5.15*, док је температура ваздуха мерена стакленим термометром произвођача ”TLOS” чији је изглед приказан на *слици 5.16*. Техничке карактеристике диференцијалног манометра произвођача “Testo”, модел 525 (TESTO, 2013a) приказане су у *табели 5.4*, док су техничке карактеристике стакленог термометра произвођача “ TLOS” (TLOS, 2013) приказане у *табели 5.5*.



Слика 5.15 Диференцијални манометар произвођача “Testo”, модел 525



Слика 5.16 Стаклени термометар произвођача “TLOS”

Табела 5.4 Техничке карактеристике диференцијалног манометра произвођача “Testo”, модел 525 (TESTO, 2013a)

Мерни опсег [Pa]	0 - 2500
Мерна неизвесност [%]	± 0,1
Резолуција [Pa]	0,1
Преоптерећење [Pa]	12500
Серијски број	1046112

Табела 5.5 Техничке карактеристике термометра произвођача “TLOS” (TLOS, 2013)

Мерни опсег [°C]	0 - 50
Мерна неизвесност [°C]	± 0,05
Резолуција [°C]	0,1
Серијски број	2 – 2006 HR K – 4 - 1002

Једна страна диференцијалног манометра произвођача “Testo”, модел 525 прикључена је на статички прстен, док је друга страна слободно остављена на атмосферски притисак. Статички прстен има за циљ да осредњи натпритисак ваздушне струје који се мери на четири места по ободу цеви, где су мерна места међусобно померена за 90°. Статички прстен је за мерно место (1) приказан путем детаља на *слици 5.2*

Манометар и термометар испред АТР жалузине. Натпритисак и температура ваздушне струје мерени су испред АТР жалузине са циљем да се одреди густина ваздуха (5.8) и брзина струјања (5.4) испред АТР жалузине. Натпритисак ваздуха испред АТР жалузине мерен је диференцијалним манометром произвођача “Testo”, модел 521, чији је изглед приказан на *слици 5.17*, док је температура ваздуха мерена сетом стаклених термометара произвођача “Precision” чији је изглед приказан на *слици 5.18*.

Диференцијални манометар одликује се великом осетљивошћу, па је коришћена функција “mean” за временско осредњавање мереног натпритиска ваздушне струје, где је период осредњавања био 10 s.

Техничке карактеристике диференцијалног манометра произвођача “Testo”, модел 521 приказане су у *табели 5.6* (TESTO, 2013б), док су техничке карактеристике сета стаклених термометара произвођача “Precision” приказане у *табели 5.7*.



Слика 5.17 Диференцијални манометар произвођача “Testo” модел 521



Слика 5.18 Сет стаклених термометара произвођача “Precision”

Табела 5.6 Техничке карактеристике диференцијалног манометра произвођача “Testo” модел 521 (TESTO, 2013б)

Мерни опсег [Pa]	0 - 1000
Мерна неизвесност [%]	± 0,1 % од вредности целе скале
Радна температура [°C]	0 – 50
Резолуција [Pa]	1
Серијски број	01645992/902

Табела 5.7 Техничке карактеристике сета стаклених термометара произвођача “Precision” (PRECISION, 2013)

Мерни опсег [°C]	0 ÷ 18
	17 ÷ 35
	34 ÷ 52
Мерна неизвесност [°C]	±0,025
Резолуција [°C]	0,05

Једна страна диференцијалног манометра произвођача “Testo”, модел 521 прикључена је на статички прстен испред АТР жалужине, док је друга страна слободно остављена на атмосферском притиску. Статички прстен има за циљ да осредњи натпритисак ваздушне струје који се мери на четири места по ободу цеви, где су мерна места међусобно померена за 90°. Статички прстен је за мерно место (2) приказан путем детаља на *слици 5.2*.

Уређајем за мерење притиска, температуре и релативне влажности ваздуха. Мерење амбијенталних услова у лабораторији: температуре, притиска и релативне влажности реализовано је уређајем произвођача “PCE”, модел THB38 (PCE, 2013). Изглед уређаја приказан је на *слици 5.19*, док су техничке карактеристике уређаја приказане у *табели 5.8*.

Амбијентални (атмосферски) притисак мерен је за потребе одређивања густине ваздушне струје у једначинама (5.7) и (5.8) и брзине струјања испред АТР жалужине једначином (5.4). Амбијентална температура и релативна влажност мерене су за потребе подешавања термовизијске камере за контролу цурења ваздуха из прирубничких спојева канала.

Диференцијални манометар. За мерење пада притиска кроз АТР жалужину коришћен је диференцијални манометар произвођача “Testo”, модел 521, приказан на *слици 5.17*. Један прикључак диференцијалног манометра повезан је на статички прстен испред АТР жалужине (2), док је други прикључак повезан на статички прстен иза АТР жалужине. Статички прстенови имају за циљ да осредњавају натпритиске ваздушне струје испред и иза АТР жалужине. За потребе мерења пада притиска кроз АТР жалужину коришћени су статички прстенови приказани путем детаља на *слици 5.2* за мерно место (2).

Према препорукама стандарда (ANSI/AMCA 500 - D, 2007) за потребе мерења пада притиска кроз жалужину статички прстенови постављени су на растојању 250 mm испред и 250 mm иза АТР жалужине, тј. један хидраулички пречник D_h испред и иза жалужине.

Сваки од статичких прстенова мери натпритисак ваздушне струје на четири места по ободу цеви, где су мерна места међусобно померена за 90° . Диференцијални манометар одликује се великом осетљивошћу, па је коришћена функција “mean” за временско осредњавање разлике притиска. Период осредњавања током мерења разлике притиска био је 10 s.



Слика 5.19 Уређај за мерење притиска, температуре и релативне влажности произвођача “PCE”, модел THB38

Табела 5.8 Техничке карактеристике уређаја за мерење притиска, температуре и релативне влажности ваздуха произвођача “PCE”, модел THB38 (PCE, 2013)

Мерни опсег (температура) [°C]	0 - 50
Резолуција (температура) [°C]	0,1
Мерна неизвесност (температура) [°C]	0,8
Мерни опсег (притисак) [mbar]	10 - 1100
Резолуција (притисак) [mbar]	1
Мерна неизвесност (притисак) [mbar]	±1,5 (до 1000 mbar) и ±2 (изнад 1000 mbar)
Мерни опсег (релативна влажност) [%]	10 - 95
Резолуција (релативна влажност) [%]	0,1
Мерна неизвесност (релативна влажност) [%]	± 1 (до 70%) и ± 3 (изнад 70%)
Серијски број	Q529217

Каналски грејач. У оквиру Лабораторије за механику флуида у простору у којем је смештено постројење за испитивање АТР жалузина не постоји могућност контролисања амбијенталних услова. Када је потребно температуру ваздуха одржавати константном коришћен је каналски грејач приказан на слици 5.20.



Слика 5.20 Каналски грејач



Слика 5.21 Орман са електроником за регулацију температуре ваздуха

Тип каналског грејача је индуктивно – отпорни. Иза грејача налази се дефлектор који служи за заштиту термопара од топлотног зрачења. Инсталирана снага грејача је 6,4 kW. Димензије грејача су 300 x 300 x 1500 mm. Регулација температуре ради се преко регулатора, који одржава константну температуру ваздуха на крају канала грејача, на основу мерења температуре ваздуха термопаром. Регулатор има могућност мануелног избора два типа регулације: ON – OFF¹ и PID. Избор типа регулације зависи од жељеног начина постизања задате температуре. За потребе експеримента коришћен је тип ON – OFF регулације. На слици 5.21 приказана је управљачка табле каналског грејача. На управљачкој табли, преко тастера за унос, задаје се вредност температуре која се жели држати константном. На дисплеју (1) управљачке табле у сваком моменту приказана је измерена температура ваздуха у околини термопара. На прекидачу (2) подешава се тип регулације, док се на прекидачу (3) укључује и искључује грејач.

¹ ON – OFF – најпростији тип регулације, где се грејач периодично пали и гаси.

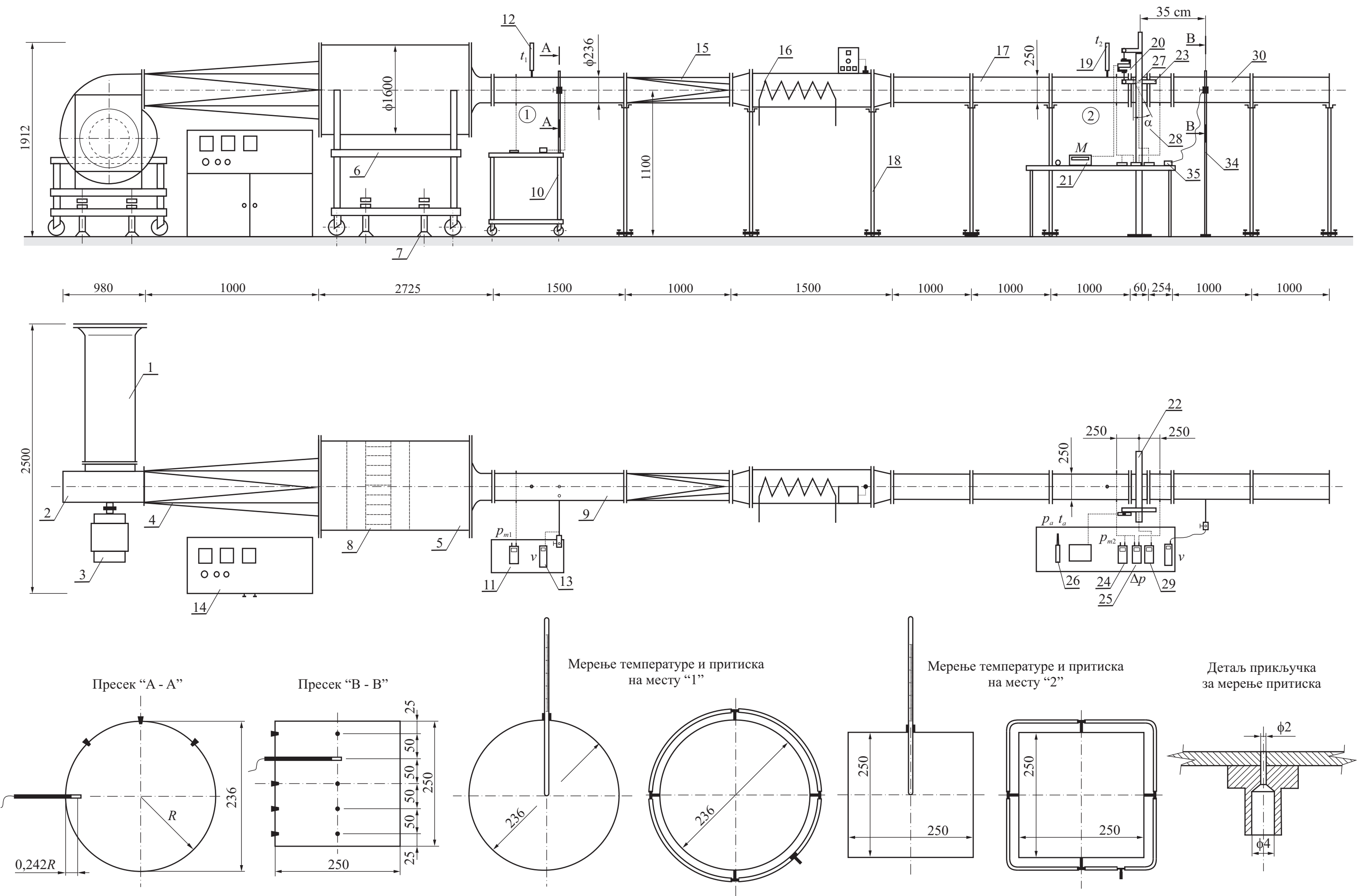
5.2.2 Поставка експеримента за потребе верификације нумеричких модела АТР жалузина

Поставка експеримента лабораторијског постројења за потребе верификације нумеричких модела АТР жалузина приказана је на *слици 5.22*. Верификација нумеричких модела урађена је мерењем пада притиска кроз АТР жалузину и профила брзине струјања ваздуха на растојању 35 cm иза АТР жалузине. Мерења профила брзине струјања и пада притиска кроз АТР жалузину урађена су на константној температури ваздуха од 35 °C. Задата температура је одржавана константном каналским грејачем са термостатом.

За потребе мерења профила брзине избушено је пет отвора на растојању 35 cm од обртне осе мерне лопатице АТР жалузине, по висини квадратног канала странице 250 mm. Отвори су избушени на следећим растојањима од горње ивице канала: 25 mm, 75 mm, 125 mm, 175 mm и 225 mm, где је план распореда отвора приказан путем пресека В-В на *слици 5.22*. На изабраном месту на коме су формираны отвори смислено је мерити профил брзине. Ради се о месту које се не налази непосредно иза лопатице АТР жалузине, већ је мало удаљено тако да присуство лопатица и даље утиче на профил брзине, што је важно за потребе верификације нумеричког модела. Како је поред мерења средње брзине струјања ваздуха потребно мерити и профил брзине иза АТР жалузине, коришћен је додатни статив за позиционирање сонде анемометра са топлом жицом (34) и додатни анемометар са топлом жицом (35). АТР жалузина је симетричан уређај, па су нумеричке симулације урађене за само једну половину жалузине, са циљем да се повећа брзина израчунавања. Из тог разлога је приликом мерења профила брзине иза АТР жалузине анемометар са топлом жицом постављан у центар канала, где је практично глава анемометра на симетралној равни жалузине.

Користећи унимер (29) на АТР жалузини (22) подеси се жељени нападни угао лопатице. Мртви момент мерне лопатице АТР жалузине тарира се на вагарској електроници (21). На орману са електроником за управљање радом вентилатора (14) подеси се жељени проток ваздуха кроз лабораторијско постројење, а према показивању анемометра са топлом жицом (13). На управљачкој табли каналског грејача (16) подеси се температура ваздуха на 35 °C. Након подешавања нападног угла лопатице АТР жалузине, протока и температуре ваздуха и постизања стационарног струјања ваздуха кроз лабораторијско постројење читавају се параметри поставке експеримента:

- натпритисци (11) и (24);
- температуре (12) и (19);
- брзина струјања ваздуха (13);
- пад притиска (25);
- амбијентални притисак и температура (26);
- момент ваздушне струје (21) и
- профил брзине иза АТР жалузине (35).



Слика 5.22 Шематски приказ поставке експеримента за потребе верификације нумеричких симулација АТР жалузина

Анемометар са топлом жицом. За мерење профила брзине струјања ваздуха иза АТР жалузине коришћен је анемометар са топлом жицом произвођача “Testo”, модел 400 (TESTO, 2013в) приказан на *слици 5.23*. Ради се заправо о аквизицији, модел 400, на коју се поставља сонда са топлом жицом. У *табели 5.9* приказане су техничке карактеристике коришћеног анемометра. Анемометар са топлом жицом одликује се великом осетљивошћу, па је коришћена функција “mean” за временско осредњавање брзине струјања у тачки. Период осредњавања током мерења брзине струјања ваздуха иза АТР жалузине био је 30 s.

Табела 5.9 Техничке карактеристике анемометра са топлом жицом произвођача “Testo”, модел 400 (TESTO, 2013в)

Мерни опсег [m/s]	0,6 - 20
Мерна неизвесност [m/s]	$\pm(0,2 \text{ m/s} + 1 \% \text{ тренутно измерене брзине})$
Резолуција [m/s]	0,01
Радна температура [°C]	-30 ÷ 140 °C
Серијски број	01302525/612

Подесиви статив. У циљу што тачнијег постављања сонде анемометра у жељени положај и повећања поновљивости мерења брзине иза АТР жалузине, коришћен је подесиви статив приказан на *слици 5.24*. Подесиви статив има три степена слободе: две транслације и једну ротацију и омогућава довођење сонде анемометра у жељени положај.



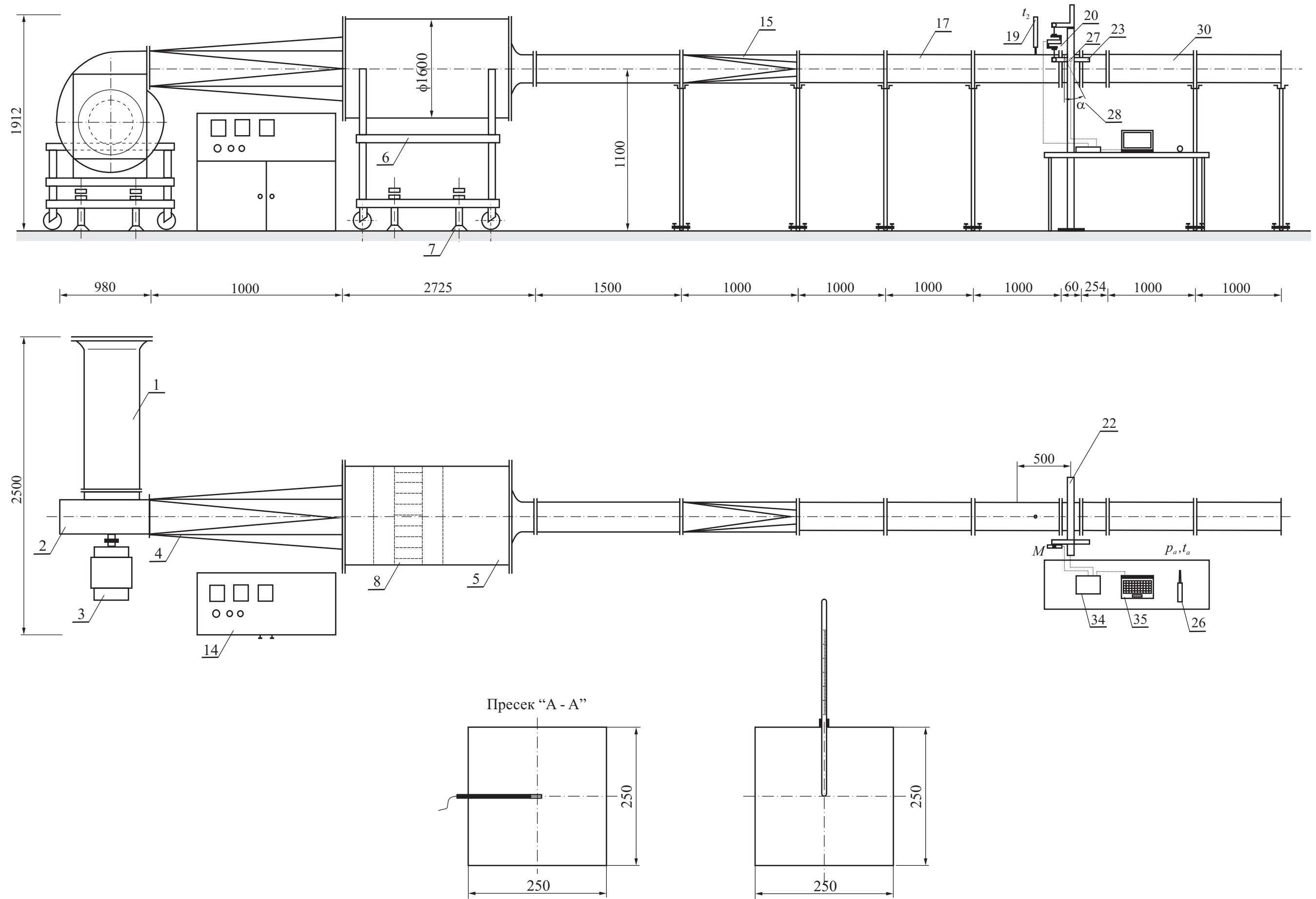
Слика 5.23 Анемометар са топлом жицом произвођача “Testo”, модел 400



Слика 5.24 Подесиви статив за позиционирање анемометра са топлом жицом

5.2.3 Поставка експеримента за потребе континуалног мерења момента АТР жалузине

Поставка експеримента лабораторијског постројења за потребе континуалног мерења момента АТР жалузине шематски је приказана на *слици 5.25*. Континуално мерење момента ради се у циљу одређивања мерне неизвесности и карактеристика преносне функције АТР жалузине. Сензор за мерење масе (20) и ротациони потенциометар (27) повезани су на аквизицију података (34), док је аквизиција података повезана на персонални рачунар (35).



Слика 5.25 Шематски приказ поставке експеримента за континуално мерење момента АТР жалузине

За потребе дефинисања карактеристике преносне функције АТР жалузине континуално је праћен одзив сигнала мерила момента ваздушне струје на основу улазног сигнала брзине струјања. За потребе улазног сигнала коришћен је тег масе 1 kg који је постављен на мерило момента према шематском приказу датом на *слици 3.28*. Постављени тег даје мерилу момента импулсну побуду, а одговара моменту вааздушне струје од 981 Nmm.

Након укључивања аквизиције података (34) и персоналног рачунара (35), подеси се жељени нападни угао лопатице АТР жалузине. Мртви момент мерне лопатице АТР жалузине тарира се софтверски на рачунару. Тег масе 1 kg окачи се према шематском приказу датом на *слици 3.8* на мерило момента, а затим се на персоналном рачунару (35) преко специјализованог софтвера континуално прати одзив мерила момента.

Аквизиција података. Континуално прикупљање сигнала сензора за мерење масе реализовано је аквизицијом података произвођача "HBM", модел "QUANTUMxMX840A". На *слици 5.26* приказан је изглед, док су *у табели 5.10* приказане техничке карактеристике аквизиције података произвођача "HBM" модел "QUANTUMxMX840A " (*HBM, 2013в*).

Табела 5.10 Техничке карактеристике аквизиције за прикупљање података произвођача "HBM" модел "QUANTUMxMX840A" (HBM-в, 2013в)

Улази	Број	8 електрично изолованих улаза један од другог и од напајања електричном енергијом
Типови сензора	Прикупљање са више од 15 типова сензора	Мерне траке са пуним или пола моста, индуктивни са пуним или полу мостом, пиезоотпорни са пуним или полу мостом, потенциометри, отпорни термометри, термопарови, инкрементални ротациони енкодериитд.
A/D конвертер		24 битни делта сигма конвертер
Опсег података	Hz	0,1 ... 19.200 подесиви за сваки опсег
Активни филтер	Hz	0,01 ... 3.200 (-3 dB)
Максимално растојање	m	100
Електрични напон напајања (DC)	V	10 ... 30 (24 V номинални напон)
Номинални температурни опсег	°C	-20 ... +60
Радни температурни опсег	°C	-20 ... +65
Температурни опсег складиштења	°C	-40 ... +75
Релативна хлапавост	%	5 ... 95
Механички тест на вибрације (30 min)	m/s ²	50
Механички тест на удар (6 ms)	m/s ²	350



Слика 5.26 Изглед аквизиције података произвођача “HBM”, модел “QUANTUMxMX840A” (HBM-в, 2013)

5.3 Закључна разматрања

Један од највећих проблема при мерењу протока ваздуха је и даље мерење протока ваздуха са брзинама струјања испод 4 m/s. Овако мале вредности брзина струјања већина постојећих метода или не могу да измере или мере са великом неизвесношћу (Schroeder et al., 2004). Приликом развоја АТР жалужине тежило се да се формира уређај који ће са задовољавајућом неизвесношћу мерити проток ваздуха управо при малим вредностима брзина струјања. У том духу је мерење брзине струјања ваздуха за потребе математичког моделирања и верификације математичког модела урађено анемометром са топлом жицом, уређајем који са задовољавајућом неизвесношћу мери мале вредности брзине струјања ваздуха.

Формирано лабораторијско постројење за испитивање АТР жалужина детаљно је описано и дате су техничке карактеристике коришћене мерне опреме. Детаљан опис лабораторијског постројења и познате техничке карактеристике коришћене мерне опреме говоре доста, али не и довољно о неизвесности мерења брзине струјања ваздуха АТР жалужином. Из тог разлога је било потребно да се одреди неизвесност мерења брзине струјања ваздуха АТР жалужином.

6. НЕИЗВЕСНОСТ МЕРЕЊА БРЗИНЕ СТРУЈАЊА ВАЗДУХА АТР ЖАЛУЗИНОМ

6.1 Увод

У циљу одређивања неизвесности мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузином било је потребно развити математички модел за одређивање неизвесности мерења. Математички модел за одређивања неизвесности мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузином развијен је коришћењем опште теорије о неизвесности мерења физичке величине и математичког модела АТР жалузине, једначина (4.24).

6.2 Неизвесност мерења непосредно мерене физичке величине

6.2.1 Основни термини теорије грешака

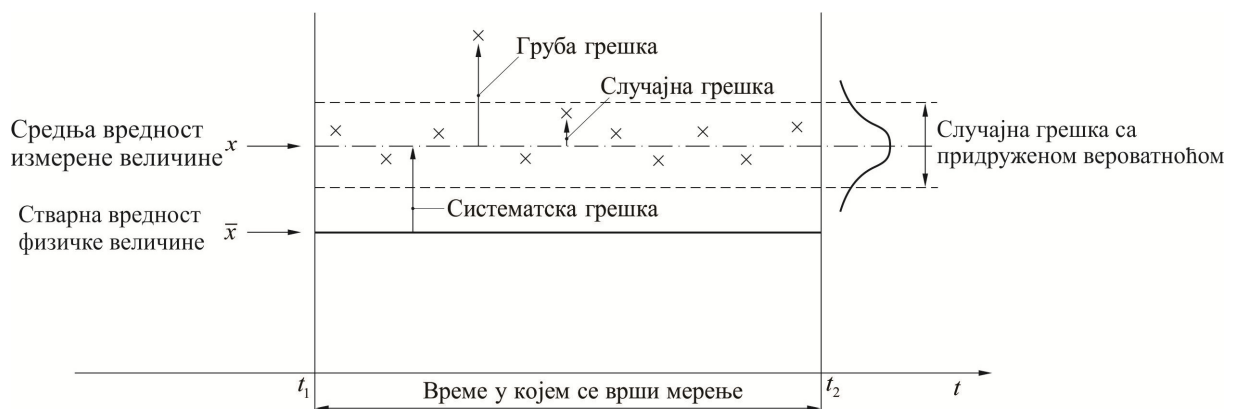
Мерење је експериментални поступак којим се одређује вредност мерене величине у одређеним околностима. Међутим, и уз примену најтачнијих мерних метода и уређаја увек долази до одређеног одступања између стварне и измерене вредности физичке величине. Ова одступања настају услед: несавршености мерне опреме, мерног поступка, мерног објекта и личне грешке мерача. Настала одступања називају се апсолутним грешкама мерења и представљају разлику између вредности очитане на мерилу x_i и стварне вредности мерене величине x ,

$$\Delta_i = x_i - x. \quad (6.1)$$

где је грешка позитивна ако је измерена вредност већа од стварне вредности и обрнуто.

За оцену одступања стварне од измерене вредности често се користи и појам релативне грешке, која се дефинише као однос апсолутне грешке Δ_i i - тог мерења и стварне вредности мерене величине x

$$\varepsilon_i = \frac{x_i - x}{x} = \frac{x_i}{x} - 1. \quad (6.2)$$



Слика 6.1. Основни термини теорије грешака (ISO 5168, 2005)

Према законитости настајања грешке се деле на: систематске, случајне и грубе грешке.

Систематска грешка је грешка чији је узрок у великом броју случајева неизбежан. Систематске грешке не могу да се избегну понављањем мерења под истим условима и статистичком анализом. Важна карактеристика систематских грешака, помоћу које оне некада могу да се установе је чињеница да имају приближно сличну величину и исти знак, тј. да се увек јављају у истом смеру (измерена величина је увек већа или мања од стварне вредности) при понављању мерења у приближно једнаким условима.

Случајне грешке смањују се понављањем мерења под истим условима и статистичком обрадом резултата мерења. Случајне грешке мерења битно се разликују од систематских, јер при скоро сваком поновљеном мерењу у приближно једнаким условима, са подједнаком вероватноћом могу бити како позитивне тако и негативне (*слика 6.1*). Узроци настанка случајних грешака мерења не могу да се утврде, а то значи да не могу да се искључе из процеса мерења.

Грубе грешке (фаталне грешке), обично су изазване непажњом или пропустом у примени основних физичких принципа на којима се базира метода мерења. Груба грешка је грешка мерења или посматрања која настаје услед немарног читавања са мерила, неисправног мерила или услед неправилног избора мерног поступка. Под грубом грешком подразумева се она грешка чија вредност прелази троструку вредност стандардне девијације (*слика 6.1*). Ове грешке се лако уочавају и искључују из резултата мерења.

Стварна вредност мерене величине x је непозната и представља се преко средње вредности мерене величине. Према је грешка мерења непозната величина, неизвесност мерења може да се процени ако је расподела мерених вредности око средње вредности позната. Уколико је мерена величина случајна независна променљива, тј. уколико има стохастички карактер, мерна неизвесност се обично процењује узимањем n мерених вредности и рачунањем стандардне расподеле, где се препоручује да је број мерених величина $n > 20$.

6.2.2 Стандардно одступање

Да би добио мерило за процењивање неизвесности мерног поступка, Гаус (Gaus) је увео неки вид еквивалентне грешке, где је квадрат еквивалентне грешке s помножио са бројем мерења n и изједначио са збиром квадрата стварних случајних грешака појединачних мерења,

$$ns^2 = \Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2 = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2 \quad (6.3)$$

одакле је дошао до израза за израчунавање еквивалентне грешке,

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} . \quad (6.4)$$

Ова величина се у теорији статистике назива стандардно одступање или средња квадратна грешка. Из теорије статистике ушла су још два термина у теорију грешака: варијација и дисперзија, и оба су дефинисана као квадрат стандардног одступања s^2 .

Уколико је број поновљених мерења довољно велики $n \rightarrow \infty$, стандардно одступање s , једначина (6.4), практично се не разликује од стандардне девијације σ . Према томе,

стандардно одступање s представља процену стандардне девијације σ . При обрачуну мерења рачуна се стандардно одступање s , јер је вредност девијације σ у суштини непозната.

Ако се стандардно одступање (6.4) подели са стварном вредношћу x мерене величине, добија се релативно стандардно одступање:

$$\varepsilon = \frac{s}{x} = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{x} - 1\right)^2}. \quad (6.5)$$

Изрази (6.4) и (6.5) практично се не користе због непознавања стварне грешке $\Delta_i = x_i - x$, тј. стварне величине x . Уз апроксимацију да је стварна величина приближна средњој аритметичкој средини измерених вредности $x \approx \bar{x}$, изрази (6.4) и (6.5) добијају практични значај и постају:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6.6)$$

$$\varepsilon = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\bar{x}} - 1\right)^2}. \quad (6.7)$$

6.2.3 Неизвесност средње аритметичке вредности

Код мерења физичке величине сврха понављања мерења је: а) да се пронађе средња аритметичка вредност резултата свих мерења \bar{x} , тако да је што ближа стварној вредности физичке величине x и б) да се смањи грешка одређене средње аритметичке вредности. Разлика стварне и средње аритметичке вредности представља грешку средње аритметичке вредности:

$$\bar{x} - x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i. \quad (6.8)$$

Услед непознавања стварне вредности x , тачна вредност ове грешке никад не може да се егзактно одреди, али зато може да се процени њена вероватна вредност. Полази се од претпоставке да важи:

$$ns^2 = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 \approx \left(\sum_{i=1}^n \Delta_i\right)^2. \quad (6.9)$$

Кореновањем једначине (6.9)

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i = s\sqrt{n},$$

и уврштавањем у једначину (6.8), добија се израз:

$$x = \bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (6.10)$$

Из једначине (6.10) следи да грешка средње аритметичке вредности (члан s/\sqrt{n}) опада са квадратним кореном броја n поновљених мерења, под претпоставком да је стандардно одступање s константно. Грешка средње аритметичке вредности назива се непоузданост средње аритметичке вредности. Уколико се узме у обзир стандардно одступање (6.6) и ако се дефинисана величина означи словом C , добија се следећи израз:

$$C = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6.11)$$

Треба напоменути да једначине (6.10) и (6.11) важе за статистичку сигурност $P = 68,3\%$ (вероватноћа да ће се стварна вредност налазити унутар подручја непоузданости износи $P = 0,6826 = 68,3\%$).

Општији израз за мерну непоузданост даје се у облику:

$$C = \frac{zs}{\sqrt{n}} = \frac{z}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = z \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6.12)$$

где је z виšekратник стандардног одступања:

$$z = (x - \bar{x}) / s, \quad (6.13)$$

који зависи од изабране статичке сигурности P , табела 6.1.

Табела 6.1. Зависност виšekратника z од статистичке сигурности P за нормалну расподелу (Свијановић, 1998)

Статистичка сигурност P	Виšekратник стандардног одступања z	Границе унутар којих се налази $n \cdot P$ мерних резултата	Удео резултата изван граница $n(1-P)/n$ [%]	Непоузданост средње вредности $C = zs/\sqrt{n}$
0,50	0,674	$\bar{x} \pm 0,674s$	50	$0,674s/\sqrt{n}$
0,683	1	$\bar{x} \pm s$	31,7	s/\sqrt{n}
0,95	1,960	$\bar{x} \pm 1,960s$	5	$1,960s/\sqrt{n}$
0,9544	2	$\bar{x} \pm 2s$	4,56	$2s/\sqrt{n}$
0,99	2,576	$\bar{x} \pm 2,576s$	1	$2,576s/\sqrt{n}$
0,9973	3	$\bar{x} \pm 3s$	0,27	$3s/\sqrt{n}$
0,99994	4	$\bar{x} \pm 4s$	0,006	$4s/\sqrt{n}$

Непоузданост средње аритметичке средине је с једнаком вероватноћом позитивна или негативна величина. Имајући то у виду, једначина (6.8) може да се напише у следећем облику:

$$(x = \bar{x} \pm C) \rightarrow P \quad (6.14)$$

Унутар ових граница (подручја непоузданости) налази се стварна вредност x мерене величине, где ширина границе зависи од броја поновљених мерења. Права вредност x налази се између:

$$\text{➤ горње границе непоузданости } (x + C) \rightarrow P,$$

и

$$\text{➤ доње границе непоузданости } (x - C) \rightarrow P.$$

Релативна непоузданост средње аритметичке вредности резултата свих мерења, дефинисана је односом непоузданости C и средње аритметичке средине \bar{x} :

$$\varepsilon = \frac{C}{\bar{x}} = \frac{zs}{\bar{x}\sqrt{n}}. \quad (6.15)$$

У пракси се никад не догађа да су грешке мерења само случајне, тј. да су све систематске грешке у потпуности отклоњене. Због тога се у израз (6.14) укључују све систематске грешке које нису отклоњене. Ако се преостале систематске грешке означе са E и уврсте у једначину (6.14) проширују се границе непоузданости средње аритметичке вредности:

$$(x = \bar{x} \pm |C| \pm |E|) \rightarrow P, \quad (6.16a)$$

или

$$(x = \bar{x} \pm (|C| + |E|)) \rightarrow P. \quad (6.16b)$$

Израз у загради једначине (6.16b):

$$(U = \pm (|C| + |E|)) \rightarrow P. \quad (6.17)$$

назива се неизвесност мерења (или мерна неизвесност). Из једначине (6.17) очигледно је да се са порастом поновљених мерења не добије неограничено смањење неизвесности мерења. Заправо, са порастом n смањује се само члан $|C|$, док члан $|E|$ остаје константан. Одавде следи да понављање мерења има смисла само док члан $|C|$ не постане близак или мањи од члана $|E|$.

Релативна неизвесност мерења, дефинише се следећим изразом:

$$\left(u = \frac{U}{\bar{x}}\right) \rightarrow P. \quad (6.18)$$

Када су преостале систематске грешке занемарљиве у односу на случајне $E/C \rightarrow 0$, неизвесност тежи у непоузданост, $U \rightarrow C$.

За примену предходне теорије морају бити задовољена два предуслова: а) да се расподела случајних грешака покова нормалној расподели и б) да је број n поновљених мерења довољно велик ($25 < n < 30$). Уколико други предуслов није задовољен, потребно је применити студентову расподелу.

6.2.4 Примена студентове расподеле

При малом броју поновљених мерења n процена стандардног одступања s према једначини (6.6) није довољно сигурна. Зато се у метрологији за одређивање непоузданости средње вредности C употребљава Студентова расподела, где је студент псеудоним за Госета (W.S.Gosseta). Непоузданост средње аритметичке вредности дефинише се као:

$$C = \frac{ts}{\sqrt{n}} = fs, \quad (6.19a)$$

$$f = \frac{t}{\sqrt{n}}, \quad (6.19b)$$

где је s процена стандардног одступања (6.6), док је t фактор Студентове расподеле. Фактор студентове расподеле t је увек већи од фактора z нормалне Гаусове расподеле, али се разлика између њих смањује са порастом броја мерења n . Вредности фактора студентове расподеле за различите вредности бројева мерења n и статистичких сигурности P приказани су у *табели 6.2* ($t = t(n, P)$).

6.2.5 Расподела χ^2 (Chi квадрат)

Код већег броја мерења веома је важно да се утврди да ли расподела измерених вредности задовољава неку од теоријских расподела, нпр. нормалну Гаусову расподелу. Да би се то проверило рачуна се функција χ^2 , која је дефинисана једначином:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{\bar{x}} = \frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2}{\bar{x}} \quad (6.20)$$

где су:

Δ_i - појединачна случајна грешка код i -тог мерења и

\bar{x} - средња аритметичка вредност резултата свих мерења.

Добијена вредност χ^2 из једначине (6.20) треба да се упореди са теоријским вредностима из *табеле 6.3*. Ако χ^2 , нпр. за $n = 20$ мерења има вредност између 11,7 и 27,2 (што у *табели 6.3* одговара интервалу вероватноће $0,90 < P < 0,10$) може се сматрати да је расподела резултата мерења углавном статистички нормална. Другим речима, закључује се да су разлике између експерименталних и теоријских вредности случајне, па се прихвата хипотеза о нормалној (Гаусовој) расподели резултата мерења.

Табела 6.2. Вредности фактора студентове расподеле $t = t(n, P)$ за различите вредности бројева мерења n и статичке сигурности (Ćirić i dr., 1991)

n	$P = 0,50$		$P = 0,683$		$P = 0,90$		$P = 0,95$		$P = 0,99$		$P = 0,9973$	
	t	f	t	f	t	f	t	f	t	f	t	f
3	0,82	0,47	1,32	0,76	2,92	1,69	4,30	2,48	0,92	5,73	18,35	10,60
4	0,76	0,38	1,20	0,60	2,35	1,18	3,18	1,59	5,84	2,92	9,16	4,58
5	0,74	0,33	1,15	0,51	2,13	0,95	2,78	1,24	4,60	2,06	6,60	2,96
6	0,73	0,30	1,11	0,45	2,02	0,82	2,57	1,05	4,03	1,65	5,50	2,25
7	0,72	0,27	1,09	0,41	1,94	0,73	2,46	0,93	3,71	1,40	4,90	1,85
8	0,71	0,25	1,08	0,38	1,90	0,67	2,37	0,84	3,50	1,24	4,53	1,60
9	0,71	0,23	1,07	0,36	1,86	0,62	2,31	0,77	3,35	1,12	4,27	1,42
10	0,70	0,22	1,06	0,34	1,83	0,58	2,26	0,72	3,25	1,03	4,09	1,30
11		0,21		0,33	1,81	0,55	2,23	0,67	3,17	0,96	3,96	1,19
12		0,20		0,31	1,79	0,52	2,20	0,63	3,11	0,90	3,85	1,11
13		0,19		0,29	1,78	0,49	2,18	0,60	3,05	0,85	3,76	1,04
14		0,19		0,28	1,77	0,47	2,16	0,58	3,01	0,81	3,69	0,99
15		0,18	1,04	0,27	1,76	0,45	2,14	0,55	2,98	0,77	3,64	0,94
16				0,26	1,75	0,44	2,13	0,53	2,95	0,74	3,59	0,90
17				0,25		0,42	2,12	0,51	2,92	0,71	3,54	0,86
18				0,24		0,41	2,11	0,50	2,90	0,68	3,51	0,83
19				0,24		0,40	2,10	0,48	2,88	0,66	3,48	0,80
20		0,15		0,23	1,73	0,39	2,09	0,47	2,86	0,64	3,45	0,77
21				0,22		0,38		0,45	2,84	0,62	3,42	0,75
22				0,22		0,37		0,44	2,83	0,60	3,40	0,72
23				0,22		0,36		0,43	2,82	0,59	3,38	0,70
24				0,21		0,35		0,42	2,81	0,57	3,36	0,69
25	0,68	0,14	1,03	0,21	1,71	0,34	2,06	0,41	2,80	0,56	3,34	0,67
30				0,19		0,31		0,37	2,80	0,50	3,28	0,60
50				0,14		0,24		0,28	2,70	0,38	3,18	0,45
100				0,10		0,17		0,20	2,60	0,26	3,10	0,31
200				0,07		0,12		0,14	2,60	0,18	3,04	0,22
∞	0,674	0	1,000	0	1,654	0	1,960	0	2,576	0	3,000	0

6.2.6 Критеријум Шовенеа (Chauveneta)

Функција χ^2 служи као тест за статистичку расподелу серије мерења, али она ништа подробније не говори о одступању неког појединачног резултата од средње аритметичке вредности резултата свих мерења, нити да ли је то појединачно одступање статистички прихватљиво. Може да се деси да неки резултат из серије мерења нарочито одступа, тј. да његово одступање, случајна грешка Δ_i , нарочито много одступа у поређењу са другим резултатима. Овакав сумњив резултат, чији узрок одступања може бити непознат, тешко да би могао да се сврста у нормалну расподелу. Према критеријуму Шовенеа може да се испита да ли је овакав сумњив резултат мерења сагласан нормалној расподели. Поступак примене критеријума Шовенеа приказан је у неколико следећих корака:

- одреди се аритметичка средина низа поновљених мерења n

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (6.21)$$

- одреде се привидне апсолутне грешке појединачних мерења:

$$e_i = x_i - \bar{x}; \quad (6.22)$$

Слика 6.3 Вредности χ^2 за различите бројеве мерења n и статистичке сигурности P (Ćirić i dr, 1991)

n	P												
	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,000157	0,000628	0,00393	0,0158	0,0642	0,148	0,455	1,074	1,642	2,706	3,841	5,412	6,635
2	0,0201	0,0404	0,103	0,211	0,446	0,713	1,368	2,408	3,219	4,605	5,991	7,824	9,210
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,665	4,642	6,258	7,815	9,837	11,345
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,195	3,357	4,878	5,989	7,779	9,488	11,668	13,277
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,343	3,000	4,351	6,064	7,289	9,236	11,070	13,388	15,086
6	0,872	1,134	1,635	2,204	3,070	3,828	5,348	7,231	8,558	10,645	12,592	15,033	16,812
7	1,239	1,564	2,167	2,833	3,822	4,671	6,346	8,383	9,803	12,017	14,067	16,622	18,475
8	1,646	2,032	2,733	3,490	4,594	5,527	7,344	9,524	11,030	13,362	15,507	18,168	20,090
9	2,088	2,532	3,325	4,168	5,380	6,393	8,343	10,656	12,242	14,684	16,919	19,679	21,666
10	2,558	3,059	3,940	4,865	6,179	7,267	9,342	11,781	13,442	15,987	18,307	21,161	23,209
11	3,053	3,609	4,575	5,578	6,989	8,148	10,341	12,899	14,631	17,275	19,675	22,618	24,725
12	3,571	4,178	5,226	6,304	7,807	9,034	11,340	14,011	15,812	18,549	21,026	24,054	26,217
13	4,107	4,765	5,892	7,042	8,634	9,926	12,340	15,119	16,985	19,812	22,362	25,472	27,688
14	4,660	5,368	6,571	7,790	9,467	10,821	13,339	16,222	18,151	21,064	23,685	26,873	29,141
15	5,229	5,985	7,261	8,547	10,307	11,721	14,339	17,332	19,311	22,307	24,996	28,259	30,578
16	5,812	6,614	7,962	9,312	11,152	12,624	15,338	18,418	20,465	23,542	26,296	29,633	32,000
17	6,408	7,255	8,672	10,085	12,002	13,531	16,338	19,511	21,615	24,769	27,587	30,995	33,409
18	7,015	7,906	9,390	10,865	12,857	14,440	17,338	20,601	22,760	25,989	28,869	33,346	34,805
19	7,633	8,567	10,117	11,651	13,716	15,352	18,388	21,689	23,900	27,204	30,114	33,687	36,191
20	8,260	9,237	10,851	12,444	14,578	16,266	19,337	22,775	25,038	28,412	31,410	35,020	37,566
21	8,897	9,915	11,591	13,240	15,445	17,182	20,337	23,858	26,171	29,615	32,671	36,343	38,932
22	9,542	10,600	12,238	14,041	16,314	18,101	21,337	24,939	27,301	30,813	33,924	37,659	40,289
23	10,196	11,293	13,091	14,848	17,187	19,021	22,337	26,018	28,429	32,007	35,172	38,968	41,638
24	10,855	11,992	13,848	15,659	18,062	19,943	23,337	27,096	29,553	33,196	36,415	40,270	42,980
25	11,524	12,697	14,611	16,473	18,940	20,867	24,337	28,172	30,675	34,382	37,652	41,566	44,314
26	12,198	13,409	15,379	17,292	19,820	21,792	25,336	29,246	31,795	35,563	38,885	42,856	45,642
27	12,879	14,125	16,151	18,114	20,703	22,710	26,336	30,319	32,912	36,741	40,113	44,140	46,963
28	13,565	14,847	16,928	18,939	21,588	23,647	27,336	31,391	34,027	37,916	41,337	45,419	48,278
29	14,256	15,574	17,708	19,768	22,475	24,577	28,336	32,461	35,139	39,087	42,557	46,693	49,588
30	14,953	16,306	18,493	20,599	23,364	25,508	29,336	34,530	36,250	40,256	43,773	47,962	50,892

- одреди се средње квадратно одступање s низа n поновљених мерења, једначином (6.6);
- оцени се која од привидних грешака има највећу вредност e_{imax} ;
- да би се утврдило да ли је i - то мерење са максималном привидном грешком промашај, дефинише се параметар Шовенеа као:

$$q_i = \frac{e_{imax}}{s}; \quad (6.23)$$

- за број мерења n из *табеле 6.4*, читава се горња гранична вредност параметра Шовенеа q_g ;
- ако је $q_i > q_g$ уочени резултат мерења је промашај, па га треба одбацити. Број поновљених мерења смањује се тиме за један, а цео поступак се понавља, све докле док горња гранична вредност параметра Шовенеа не буде већа од израчунате вредности $q_g > q_i$.

Табела 6.4. Горње граничне вредности параметра Шовенеа (Свијановић, 1998)

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
q_g	1,15	1,38	1,54	1,65	1,73	1,80	1,86	1,91	1,96
n	11	12	13	14	15	16	17	18	19
q_g	2,00	2,04	2,07	2,10	2,13	2,16	2,18	2,20	2,22
n	20	21	22	23	24	25	26	27	28
q_g	2,24	2,26	2,28	2,30	2,32	2,33	2,34	2,35	2,37
n	29	30	31	32	33	34	35	36	37
q_g	2,38	2,39	2,40	2,42	2,43	2,44	2,45	2,46	2,47
n	38	39	40	45	50	55	60	65	70
q_g	2,48	2,49	2,50	2,54	2,58	2,61	2,64	2,66	2,69
n	75	80	85	90	95	100	150	200	-
q_g	2,72	2,74	2,76	2,78	2,80	2,81	2,93	3,02	-

6.3 Неизвесност мерења посредно мерене физичке величине

При одређивању неизвесности посредно мерених величина разматрају се два карактеристична случаја:

- систематске грешке непосредно мерених физичких величина $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ су у великој мери откривене и отклоњене, тако да главни утицај на грешке мерења физичких величина имају случајне грешке и
- грешке мерења непосредно мерених величина $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ су систематске, док је удео случајних грешака у односу на систематске занемарљиво мали.

6.3.1 Непоузданост посредно мерене физичке величине

Нека су физичке величине x_1, x_2, \dots, x_n резултати непосредних мерења док су одговарајуће случајне грешке $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ и нека је посредно мерена физичка величина дата функцијом:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (6.24)$$

Случајна грешка посредно мерене физичке величине дефинише се преко тоталног диференцијала једначине (6.24):

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \delta x_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \delta x_i. \quad (6.25)$$

Ако се диференцијали δy и δx_i , као бесконачно мале величине, замене одговарајућим грешкама Δy и Δx_i , тада се добија једначина:

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \Delta x_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i, \quad (6.26)$$

где је члан $\frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i = \Delta y_{x_i}$ парцијална грешка величине y проузрокована грешком Δx_i .

Према томе, случајна грешка посредно мерене физичке величине y једнака је збиру парцијалних грешака:

$$\Delta y = \Delta y_{x_1} + \Delta y_{x_2} + \dots + \Delta y_{x_n} = \sum_{i=1}^n \Delta y_{x_i}. \quad (6.27)$$

Ако су грешке непосредно мерених величина $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ случајне грешке, оне се мењају од случаја до случаја и по величини и по знаку.

Због тога једначина (6.27) није погодан за примену, те се једначина (6.27) квадрира:

$$(\Delta y)^2 = \sum_{i=1}^n (\Delta y_{x_i})^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (\Delta y_{x_i})(\Delta y_{x_j}). \quad (6.28)$$

Парцијалне грешке са подједнаком вероватноћом имају позитивне и негативне вредности, стога други члан у једначини (6.28) код већег броја случаја има малу вредност, тако да се добија једначина:

$$(\Delta y)^2 = \sum_{i=1}^n (\Delta y_{x_i})^2, \quad (6.29)$$

или после замене члана $\Delta y_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i$ добија се једначина:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 (\Delta x_i)^2}. \quad (6.30)$$

Ако се у израз (6.30) грешке Δx_i и Δy замене одговарајућим стандардним одступањем s_{x_i} и s_y , тада се за стандардно одступање s_y посредно мерене физичке величине добија општа једначина:

$$s_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 s_{x_i}^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 s_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 s_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 s_{x_n}^2}. \quad (6.31)$$

Општи израз за релативно стандардно одступање ε_y посредно мерене физичке величине дефинише се као:

$$\varepsilon_y = \frac{s_y}{y} = \frac{1}{y} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 s_{x_i}^2}. \quad (6.32)$$

Како је свака величина x_i из једначине $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ измерена n пута, уз услов $s_{x_i} \approx \sigma_{x_i}$, то је непоузданост средње аритметичке средине вредности посредно мерене физичке величине у складу са парцијалним непоузданостима $C_i = s_{x_i} / \sqrt{n}$.

Према томе непоузданост посредно мерене физичке величине y гласи:

$$C_y = \frac{s_y}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 s_{x_i}^2}, \quad (6.33)$$

док је релативна непоузданост:

$$\varepsilon(C_y) = \frac{C_y}{\bar{y}} = \frac{1}{\bar{y}} \frac{s_y}{\sqrt{n}}. \quad (6.34)$$

Изрази (6.33) и (6.34), за непоузданост средње аритметичке вредности посредно мерене физичке величине, неће дати добре процене уколико није испуњен услов $s_{x_i} \approx \sigma_{x_i}$, тј. ако n број поновљених мерења није довољно велики ($n > 25$). Када се ради о малом броју мерења ($n < 25$), тада се код непосредних мерења физичке величине за процену користи Студентова расподела. Ако је за све мерне величине x_i број n поновљених мерења исти, тада је непоузданост средње аритметичке вредности посредно мерене величине у складу с парцијалним непоузданостима $C_i = s_{x_i} t / \sqrt{n}$, где се t фактор односи на исту статистичку

сигурност P за све мерене величине x_i . Према томе, непоузданост посредно мерене величине се у овом случају рачуна из следећих израза:

$$C_y = \frac{t}{\sqrt{n}} s_y, \quad (6.35)$$

$$\varepsilon(C_y) = \frac{C_y}{\bar{y}} = \frac{1}{\bar{y}} \frac{t}{\sqrt{n}} s_y. \quad (6.36)$$

6.3.2 Систематска грешка посредно мерене физичке величине

За одређивање систематске грешке посредно мерене физичке величине постоје два приступа. Ако функција (6.24) може да се логаритмује, тада она постаје:

$$\log y = \log x_1 + \log x_2 + \dots + \log x_n. \quad (6.37)$$

Уколико се једначина (6.37) диференцира добија се једначина:

$$\frac{dy}{y} = \frac{dx_1}{x_1} + \frac{dx_2}{x_2} + \dots + \frac{dx_n}{x_n}. \quad (6.38)$$

Ако се диференцијали dy и dx_i , као бесконачно мале величине, замене одговарајућим грешкама Δy и Δx_i , тада се добија једначина:

$$\varepsilon = \frac{|\Delta y|}{y} = \frac{|\Delta x_1|}{x_1} + \frac{|\Delta x_2|}{x_2} + \dots + \frac{|\Delta x_n|}{x_n}, \quad (6.39)$$

којом се одређују апсолутна Δy и релативна грешка ε посредно мерене y .

Уколико функција (6.24) није погодна за логаритмовање систематска грешка посредно мерене физичке величине Δy одређује се помоћу тоталног диференцијала функције (6.30), тј. једначине (6.32).

6.4 Неизвесност мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузином

Мерење брзине струјања ваздуха АТР жалузином је посредно мерење брзине. Мерењем нападног угла мерне лопатице и момента којим ваздушна струја делује на лопатицу из једначине (4.24) добија се брзина струјања ваздуха.

6.4.1 Непоузданост мерења брзине струјања АТР жалузином

Диференцирањем једначине (4.24) добијају се парцијални изводи брзине v струјања по моменту M и нападном углу лопатице α :

$$\frac{\partial v}{\partial M} = \frac{G(\alpha)}{(2 \cdot M \rho A_u D_h)^{1/2}}, \quad (6.40)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \alpha} = \frac{\partial G(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \left(\frac{2 \cdot M}{\rho A_u D_h} \right)^{1/2}. \quad (6.41)$$

Према једначинама (6.30), (6.31) и (6.33) добијају се стандардно одступање, релативно стандардно одступање и непоузданост посредно мерене брзине струјања АТР жалузином:

$$s_v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial M} \right)^2 s_M^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \alpha} \right)^2 s_\alpha^2}, \quad (6.42)$$

$$\varepsilon_v = \frac{s_v}{v} = \frac{1}{v} \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial M} \right)^2 s_M^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \alpha} \right)^2 s_\alpha^2}, \quad (6.43)$$

$$C_v = \frac{s_v}{\sqrt{n}} = \sqrt{n} \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial M} \right)^2 s_M^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \alpha} \right)^2 s_\alpha^2}, \quad (6.44)$$

где су:

s_M - стандардно одступање мерења момента [Nm] и

s_α - стандардно одступање мерења нападног угла лопатице [°].

Уврштавањем једначина (6.40) и (6.41) у једначине (6.42), (6.43) и (6.44) стандардно одступање, релативно стандардно одступање и непоузданост посредно мерене брзине струјања АТР жалузином гласе:

$$s_v = \sqrt{\left[\frac{G(\alpha)}{(2 \cdot M \rho A_u D_h)^{1/2}} \right]^2 s_M^2 + \left[\frac{\partial G(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \left(\frac{2 \cdot M}{\rho A_u D_h} \right)^{1/2} \right]^2 s_\alpha^2}, \quad (6.45)$$

$$\varepsilon_v = \frac{s_v}{v} = \frac{1}{v} \sqrt{\left[\frac{G(\alpha)}{(2 \cdot M \rho A_u D_h)^{1/2}} \right]^2 s_M^2 + \left[\frac{\partial G(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \left(\frac{2 \cdot M}{\rho A_u D_h} \right)^{1/2} \right]^2 s_\alpha^2}, \quad (6.46)$$

$$C_v = \frac{s_v}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\left[\frac{G(\alpha)}{(2 \cdot M \rho A_u D_h)^{1/2}} \right]^2 s_M^2 + \left[\frac{\partial G(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \left(\frac{2 \cdot M}{\rho A_u D_h} \right)^{1/2} \right]^2 s_\alpha^2}. \quad (6.47)$$

Према једначини (4.25) види се да би парцијални извод корелацијске функције $G(\alpha)$ по нападном углу α био веома сложен. Како се корелацијска функција $G(\alpha)$ добија мерењем, до парцијалног извода корелацијске функције $G(\alpha)$ по нападном углу α доћи ће се нумеричким диференцирање експериментално добијене корелацијске функције.

6.4.2 Систематска грешка мерења брзине струјања АТР жалузином

Логаритмовањем једначина (4.24) постаје :

$$2 \cdot \log(v) = 2 \cdot \log[G(\alpha)] + \log\left(\frac{2}{\rho A_u D_h}\right) + \log(M). \quad (6.48)$$

Диференцирањем једначине (6.48) добија се:

$$\frac{dv}{v} = \frac{dG(\alpha)}{\alpha} + 2 \cdot \frac{dM}{M}. \quad (6.49)$$

Ако се диференцијали dv , $dG(\alpha)$ и dM као бесконачно мале величине, замене одговарајућим грешкама Δv , $\Delta G(\alpha)$ и ΔM , тада се добија једначина:

$$\varepsilon(E_v) = \frac{|\Delta v|}{v} = \frac{|\Delta G(\alpha)|}{\alpha} + 2 \cdot \frac{|\Delta M|}{M}, \quad (6.50)$$

којом се одређују апсолутна Δv и релативна $\varepsilon(E_v)$ грешка посредно мерене брзине струјања АТР жалузином.

6.5 Закључна разматрања

На основу опште теорије о неизвесности мерења физичке величине и математичког модела АТР жалузине развијен је математички модел за одређивање неизвесности мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузином. На овај начин у потпуности су заокружене теоријске основе неопходне за обраду и анализу експерименталних података према дефинисаном плану истраживања.

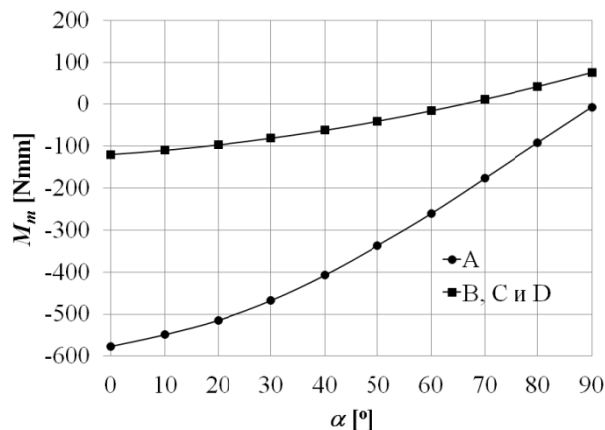
7. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА И АНАЛИЗА ПОДАТАКА

7.1 Увод

На основу мерења параметара рада предметних АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку, а према детаљно дефинисаном плану истраживања, урађена је обрада, анализа и дискусија измерених података. Реч је о великом броју параметара рада АТР жалузина, па су подаци обрађени и приказани табеларно и графички ради што лакше и квалитетније анализе.

7.2 Мртви момент мерне лопатице АТР жалузине

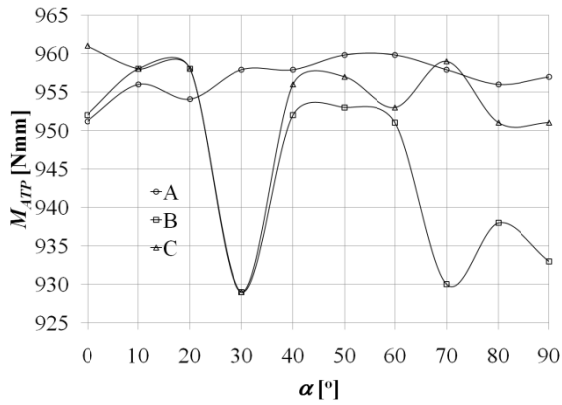
На слици 7.1 приказана је зависност мртвог момента и нападног угла мерне лопатице АТР жалузина. Мерна лопатица АТР жалузина типа В, С и D је идентична, па је и мртви момент АТР жалузина типа В, С и D исти. Мерна лопатица АТР жалузине типа А има веће димензије имасу у поређењу са мерном лопатицом АТР жалузина типа В, С и D. Услед тога, сасвим очекивано интезитет мртвог момента АТР жалузине типа А је већи од интезитета мртвог момента АТР жалузина типа В, С и D. На овај начин потврђено је да је интезитет мртвог момента мерне лопатице АТР клапне мањи у поређењу са мртвим моментом мерне лопатице АТР жалузине истих димензија.



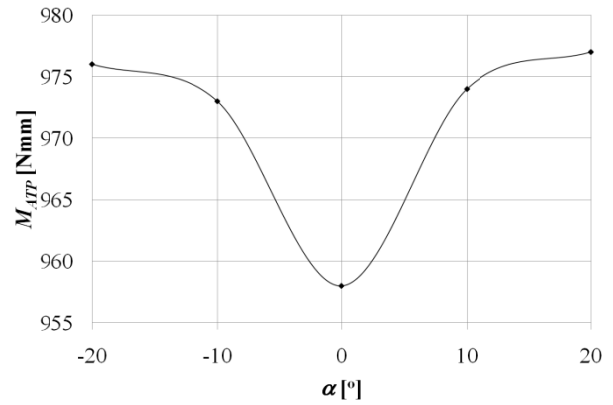
Слика 7.1 Мртви момент мерних лопатица АТР жалузина

7.3 Корекциони фактор АТР жалузина

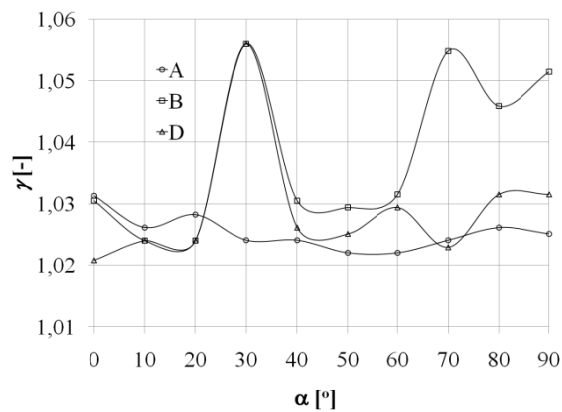
Након сваког подешавања нападног угла мерне лопатице урађено је контролисање измереног момента АТР жалузине. Измерени момент је контролисан тегом масе 1 kg тј. контролним моментом од 981 Nmm. Уочена је разлика између вредности контролног момента који износи 981 Nmm и мерених момената које показује вагарска електроника АТР жалузина, слике 7.2 и 7.3. Разлика потиче од тога што се цео активни момент ваздушне струје не преноси на мерило момента. Део активног момента потроши се на момента трења (присуство лежајева, потенциометра имеханизма за кочење мерних лопатица АТР жалузина), док се део активног момента потроши на савијање мерне лопатице. Са циљем да се добије активни момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу, на основу провере контролним моментом, формиран је корекциони фактор према једначини (3.21), којим је коригован измерени момент АТР жалузине слике 7.4 и 7.5.



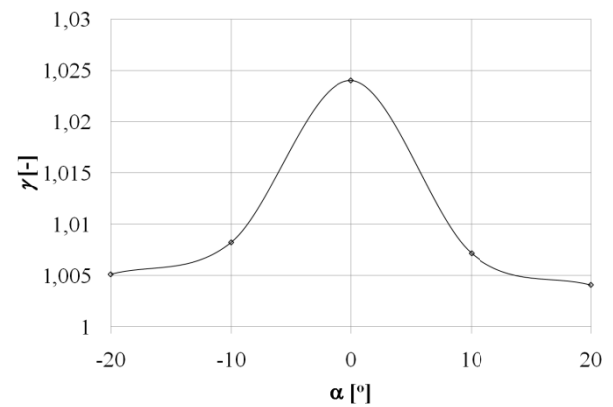
Слика 7.2 Типични резултати контроле измереног момента ATP жалузине типа A, B и D



Слика 7.3 Типични резултат контроле измереног момента ATP жалузине типа C



Слика 7.4 Типична зависност корекционог фактора момента од нападног угла мерне лопатице ATP жалузине типа A, B и D

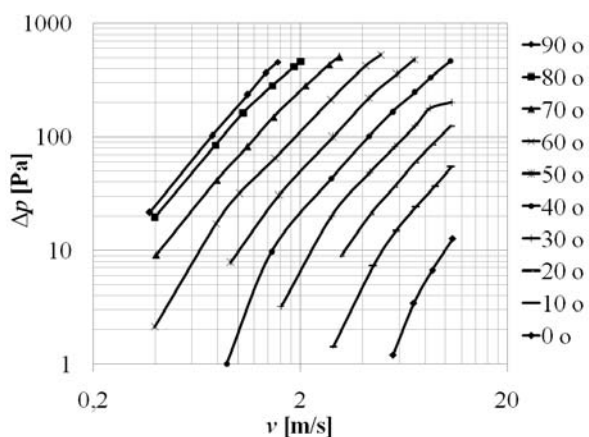


Слика 7.5 Типична зависност корекционог фактора момента од нападног угла мерне лопатице ATP жалузине типа C

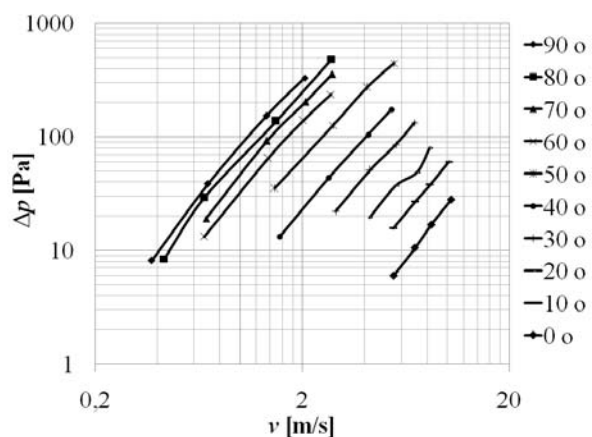
Може да се уочи на основу вредности корекционог фактора измереног момента да су збирно момент трења и момент који се троши на савијање лопатице свега пар процената од активног момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу, што је предуслов мерења протока ваздуха ATP жалузином. Из тог разлога при развоју ATP жалузине требало би тежити да корекциони фактор измереног момента буде што ближи јединици. Када је након подешавања положаја мерне лопатице одређен корекциони фактор измереног момента γ према једначини (3.21), његовим множењем са измереним моментом на вагарској електроници M_{ATP} , добија се активни момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу ATP жалузине M , једначина (3.22).

7.4 Пад притиска кроз ATP жалузину

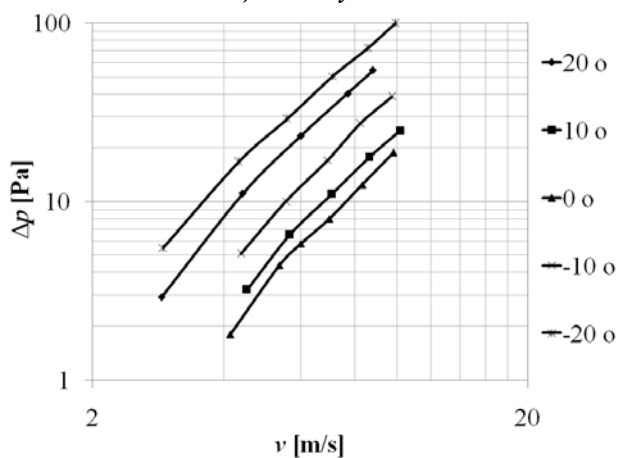
На сликама од 7.6 до 7.9 приказани су падови притиска кроз ATP жалузину за случај када се жалузина налази у цевоводу, док су на сликама од 7.10 до 7.11 приказани падови притиска кроз ATP жалузину за случај када се жалузина налази на крају цевовода.



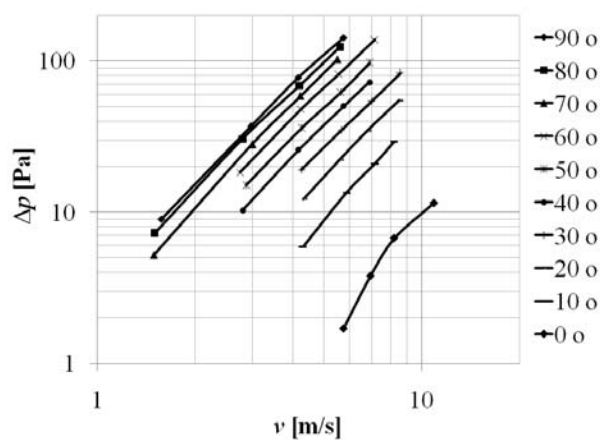
Слика 7.6 АТР жалузина типа “А” у цевоводу



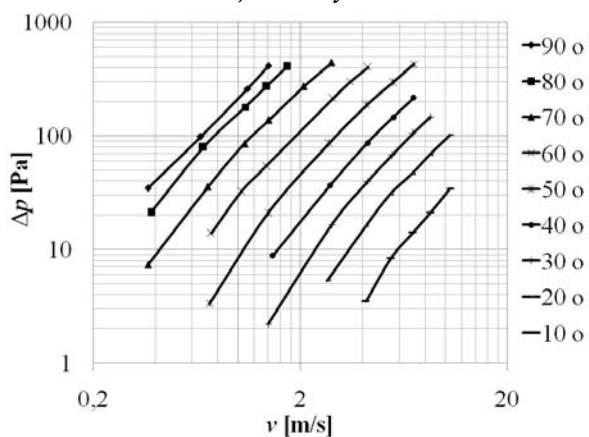
Слика 7.7 АТР жалузина типа “В” у цевоводу



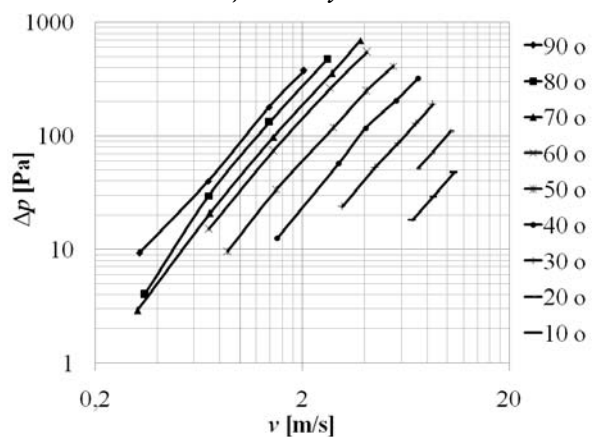
Слика 7.8 АТР жалузина типа “С” у цевоводу



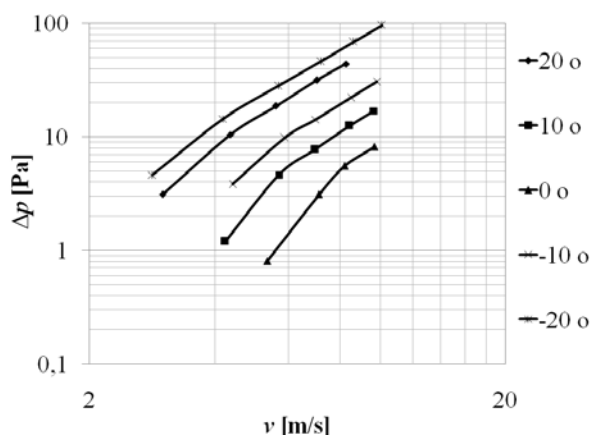
Слика 7.9 АТР жалузина типа “D” у цевоводу



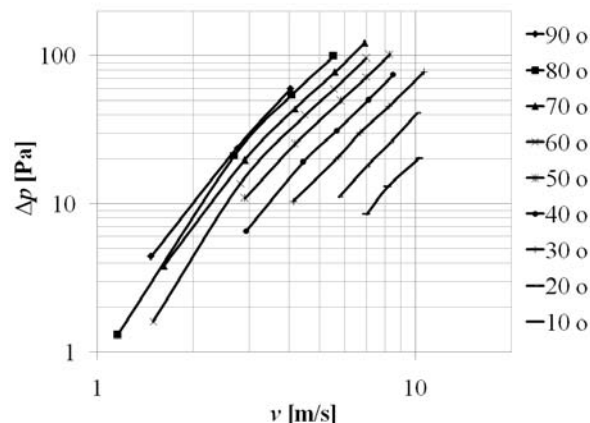
Слика 7.10 АТР жалузина типа “А” на крају цевовода



Слика 7.11 АТР жалузина типа “В” на крају цевовода



Слика 7.12 АТР жалузина типа "С" на крају цевовода



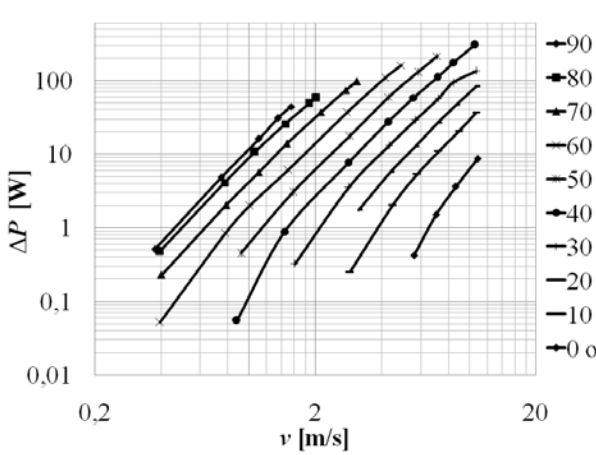
Слика 7.13 АТР жалузина типа "D" на крају цевовода

За потребе мерења протока ваздуха жалужином центар обртања лопатица измештен је са циљем да АТР жалузина постане функционална и да се повећа момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу жалузине. Реконструкцијом жалузине није се очекивало да се смањи отпор струјања ваздуха, те формирана АТР жалузина било да је у цевоводу или на крају цевовода има и даље велики пад притиска као свој основни недостатак. Повећањем нападног угла мерне лопатице, тј. затварањем повећава се пад притиска кроз АТР жалужину.

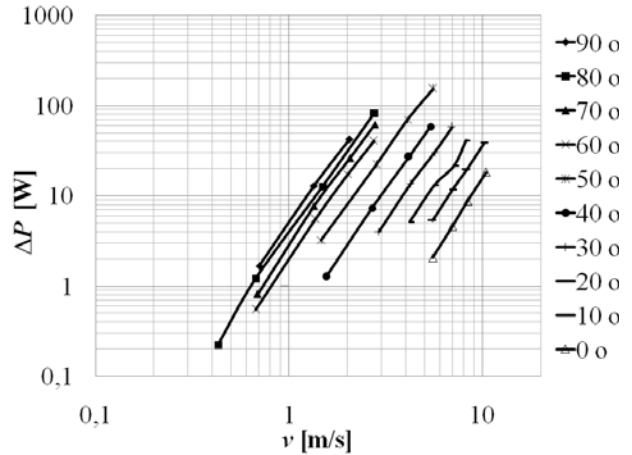
Највећи пад притиска сасвим очекивано јавља се код АТР жалузине типа В због унакрсног вођења лопатица (Веселаге, 1998а), затим следе типови А, D и С. За разматрани опсег мерења брзине пад притиска код АТР жалузине типа В иде од пар Паскала при отвореној жалузини до 500 Pa при затвореној жалузини. Иако се најмањи пад притиска јавља код АТР жалузине типа С (при затвореној жалузини пад притиска иде до 100 Pa) ипак је са становишта пада притиска најповољнија жалузина типа D (пад притиска при затвореној жалузини иде нешто преко 100 Pa). Разлог томе је што је ход АТР жалузине типа С због паралелног вођења лопатица мањи у поређењу са типом D. Мањи пад притиска кроз АТР жалужину типа D је очекиван, јер је једна лопатица мерна, док је друга лопатица укочена у хоризонталном положају, баш из разлога да се добије мањи пад притиска.

7.5 Губитак снаге на АТР жалузини

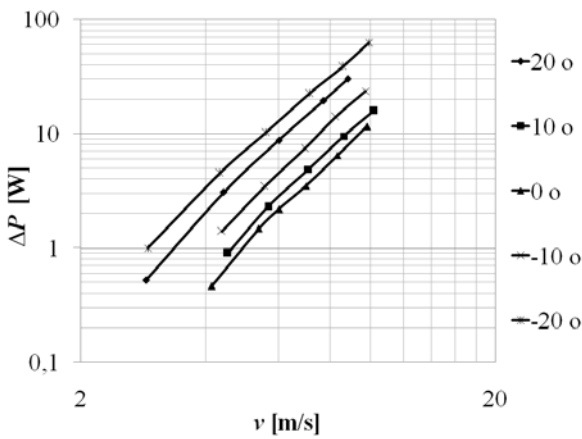
Губитак снаге зависи од пада притиска кроз АТР жалужину, једначина (4.26). На сликама од 7.14 до 7.17 приказани су губици снаге кроз АТР жалужину за случај када се жалузина налази у цевоводу, док су на сликама од 7.18 до 7.21 приказани губици снаге кроз АТР жалужину за случај када се жалузина налази на крају цевовода.



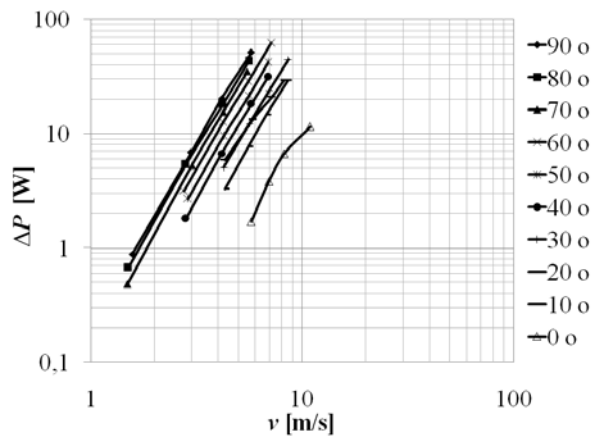
Слика 7.14 АТР жалузина типа А у цевоводу



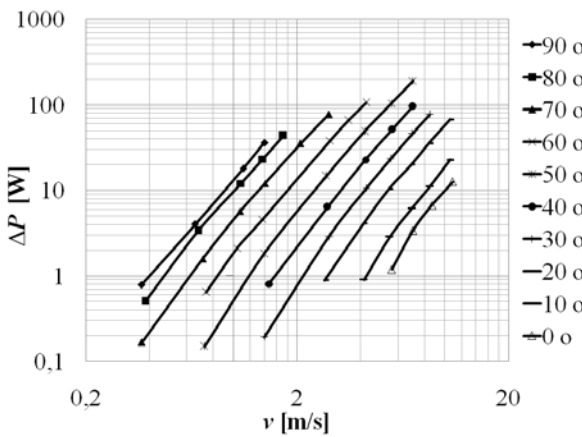
Слика 7.15 АТР жалузина типа В у цевоводу



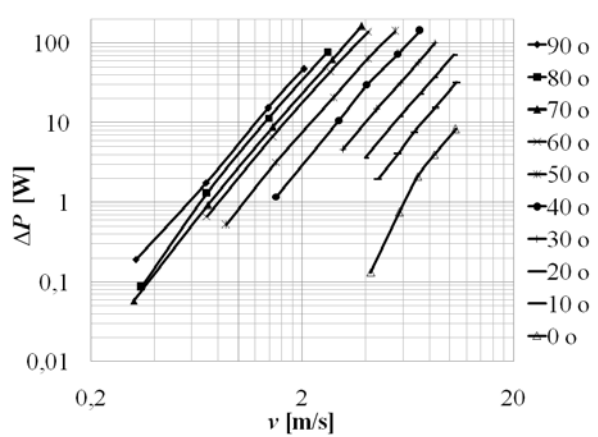
Слика 7.16 АТР жалузина типа С у цевоводу



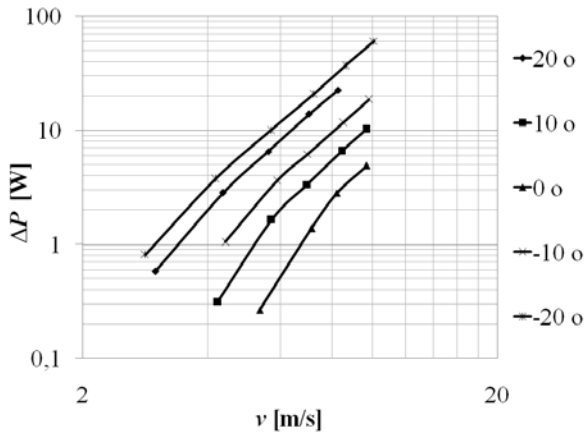
Слика 7.17 АТР жалузина типа D у цевоводу



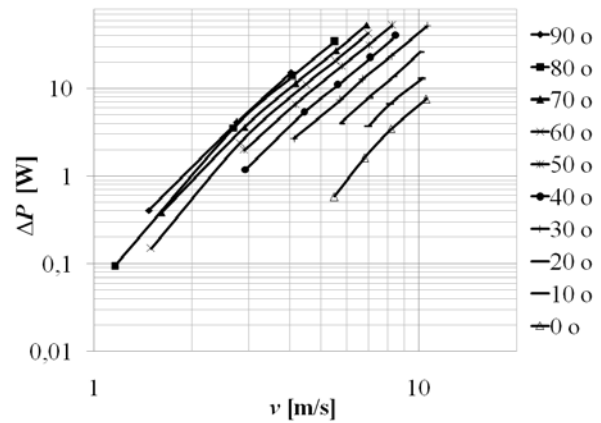
Слика 7.18 АТР жалузина типа А на крају цевовода



Слика 7.19 АТР жалузина типа В на крају цевовода



Слика 7.20 АТР жалузина типа С на крају цевовода

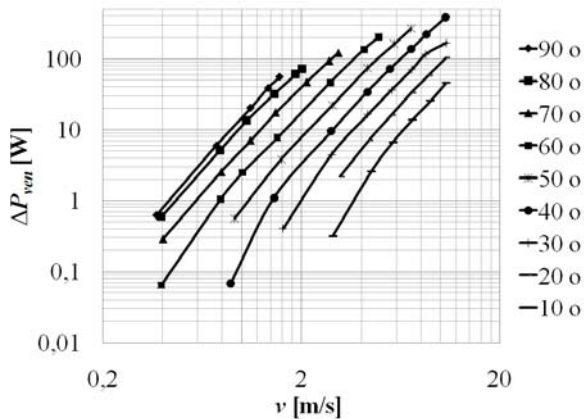


Слика 7.21 АТР жалузина типа D на крају цевовода

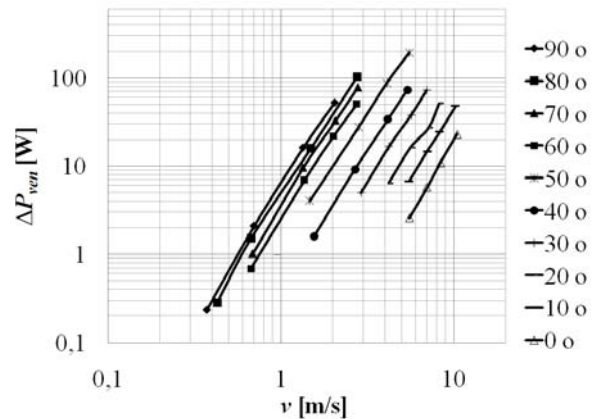
Са становишта енергетске ефикасности знатно је занимљивије од самог губитка снаге на жалузини да се види колико снаге вентилатора је потребно да се утроши за рад АТР жалузине. Из тог разлога ће се приказати губитак снаге на АТР жалузини према једначини (4.27) поделити са степеном ефикасности рада вентилатора.

7.6 Снага вентилатора неопходна за рад АТР жалузине

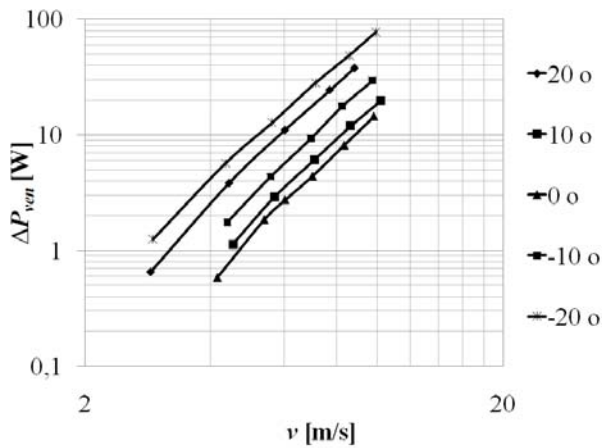
Снага вентилатора неопходна за рад АТР жалузине је већа од губитка снаге на самој жалузини, једначина (4.27). На сликама од 7.22 до 7.25 приказана је снага коју вентилатор троши за рад АТР жалузине за случај када се жалузина налази у цевоводу, док је на сликама од 7.26 до 7.29 приказана снага коју вентилатор троши за рад АТР жалузине за случај када се жалузина налази на крају цевовода.



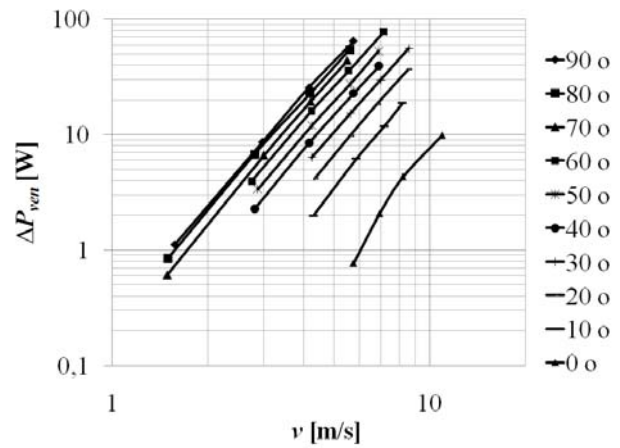
Слика 7.22 АТР жалузина типа А у цевоводу



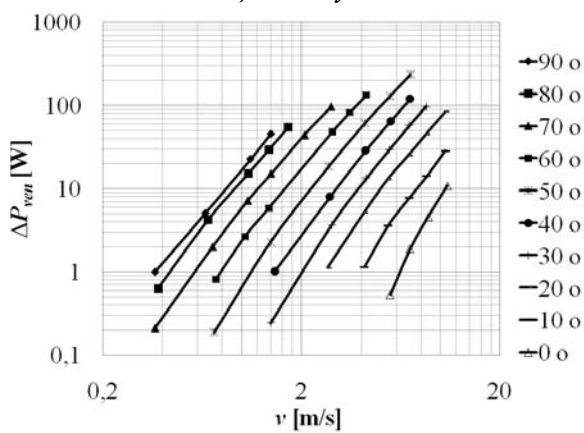
Слика 7.23 АТР жалузина типа В у цевоводу



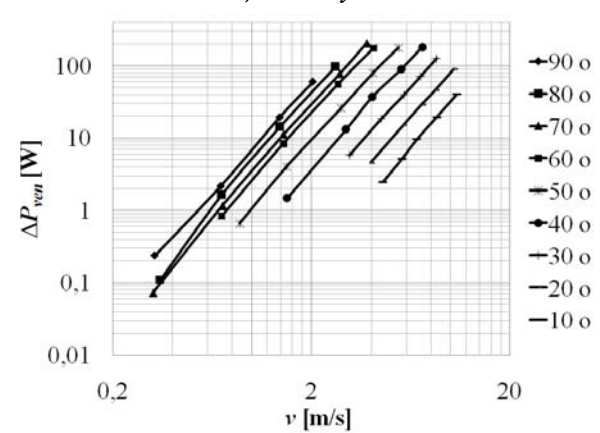
Слика 7.24 АТР жалузина типа С у цевоводу



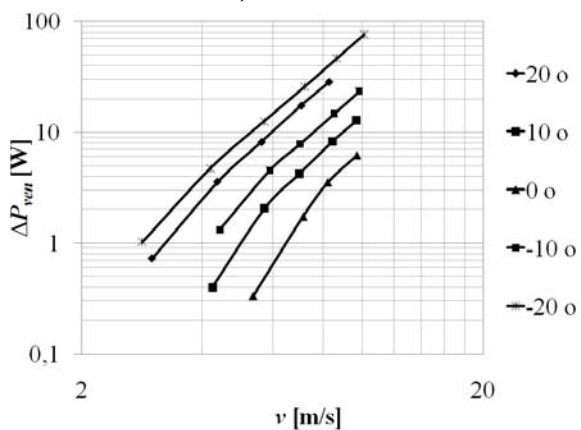
Слика 7.25 АТР жалузина типа D у цевоводу



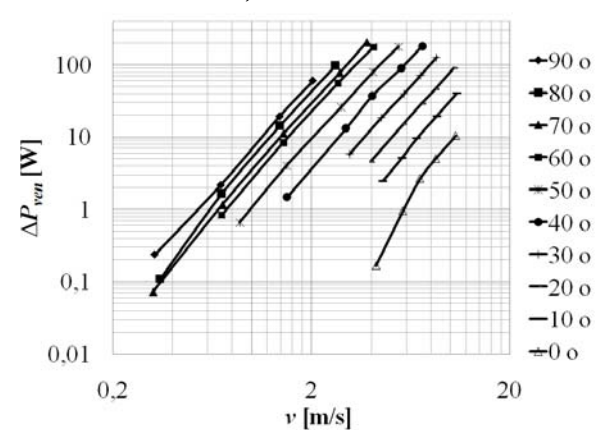
Слика 7.26 АТР жалузина типа А на крају цевовода



Слика 7.27 АТР жалузина типа В на крају цевовода



Слика 7.28 АТР жалузина типа С на крају цевовода



Слика 7.29 АТР жалузина типа D на крају цевовода

Нешто мало већа снага вентилатора потребно је да се утроши за рад АТР жалузина које се налазе на крају цевовода у односу на жалузине које се налазе у цевоводу. Највећа снага потребна је за рад АТР жалузине типа В, затим следе типови АТР жалузина А, D и С. Међутим, тип АТР жалузина С има услед паралелног вођења лопатица кратак ход, па је ипак са становишта потрошње енергије најповољнија АТР жалузина типа D. Илустрације ради посматраће се АТР жалузина типа В за чији је рад потребна највећа снага и АТР жалузина типа D за чији је рад потребна најмања снаге. При брзини

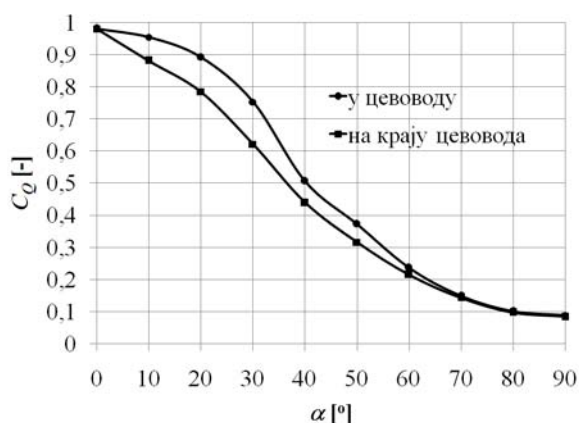
струјања ваздуха у цевоводу од 5 m/s, нападном углу мерне лопатике 50° и за случај када се АТР жалузине налази на крају цевовода, део снаге вентилатора који се троши на рад жалузине типа В је 100 W, а на тип D је 20 W. Може да се закључи да је снага коју вентилатор троши на рад АТР жалузине типа В реда величине сијалице “жаруље”, док је снага коју вентилатор троши на рад АТР жалузине типа D реда величине “штедљиве” сијалице.

7.7 Коefицијент протока АТР жалузине

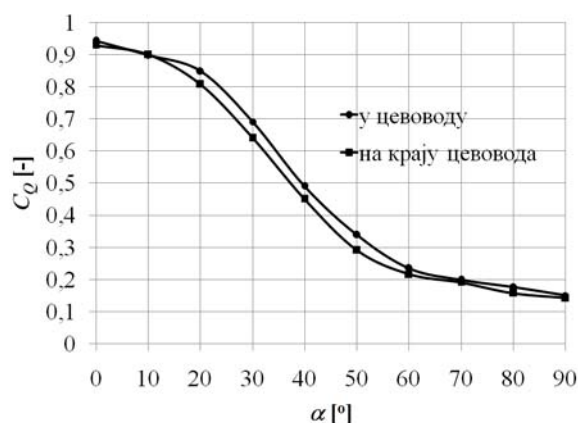
Једна од важних карактеристика АТР жалузине је коefицијент протока који показује колико је смањен проток ваздушне струје у систему постављањем АТР жалузине. На сликама од 7.30 до 7.33 приказани су коefицијенти протока АТР жалузине за два случаја: када се жалузине налазе у цевоводу и када се жалузине налазе на крају цевовода. Коefицијенти протока одређени су за вредност брзине струјања ваздуха у цевоводу испред АТР жалузине од 5 m/s. Повећавањем нападног угла мерне лопатике долази до пораста коefицијента протока, тј. до загушења ваздушне струје.

Са становишта загушења ваздушне струје најнеповољнији су типови АТР жалузине А и В, док је најповољнији тип С, али у исто време то је тип који има услед паралеленог вођења најмањи ход лопатица. Може да се уочи да је са становишта загушења флуидне струје заправо најповољнији тип АТР жалузине D, који има пун ход лопатике попут типова АТР жалузине А и В.

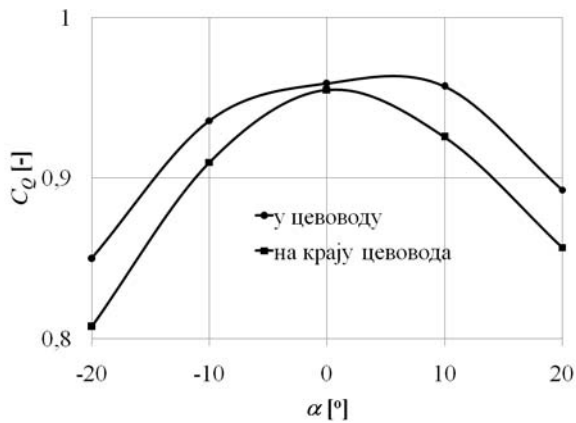
Илустрације ради анализираће се АТР жалузине типа А која има најнижу вредност и АТР жалузине типа D која има највишу вредност коefицијента протока. Брзина струјања ваздуха у цевоводу износи 5 m/s и АТР жалузине се налази у цевоводу. При нападном углу мерне лопатике од 0° , коefицијенти протока жалузине типа А и D су исти и износе 0,97, што значи да је смањење протока у систему постављањем АТР жалузине 3 %. При нападном углу мерне лопатике од 90° коefицијент протока АТР жалузине типа А је 0,09, док коefицијент протока АТР жалузине типа D износи 0,5. При нападном углу мерне лопатике од 90° , постављањем АТР жалузине типа А смањује се проток ваздуха у систему за 91 %, док се постављањем АТР жалузине типа D смањује проток ваздуха у систему за 50 %.



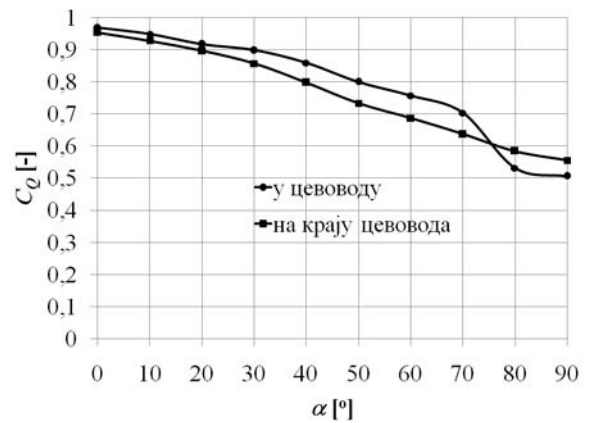
Слика 7.30 Коefицијент протока АТР жалузине типа А



Слика 7.31 Коefицијент протока АТР жалузине типа В



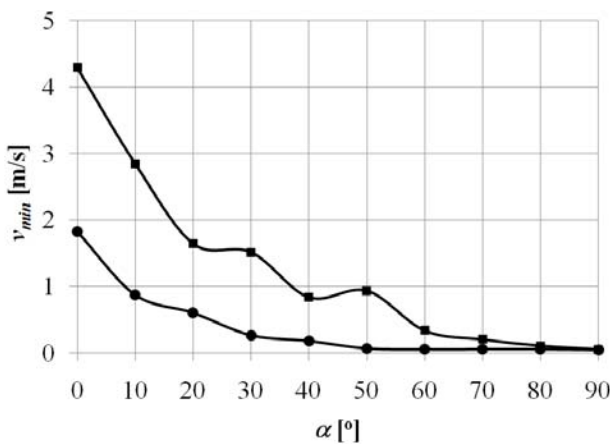
Слика 7.32 Коефицијент протока АТР жалузине типа С



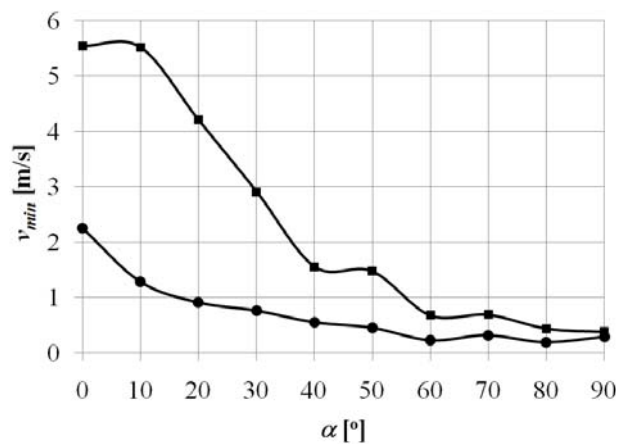
Слика 7.33 Коефицијент протока АТР жалузине типа D

7.8 Нула АТР жалузине

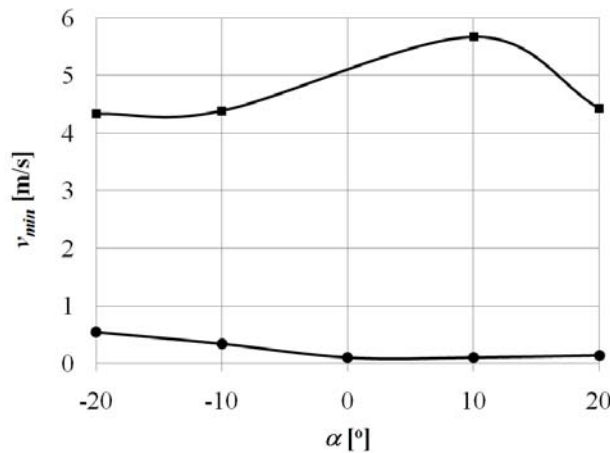
На сликама од 7.34 до 7.37 приказане су минималне брзине струјања ваздуха које могу да се мере АТР жалузинама за случај када се жалужине налазе у цевоводу.



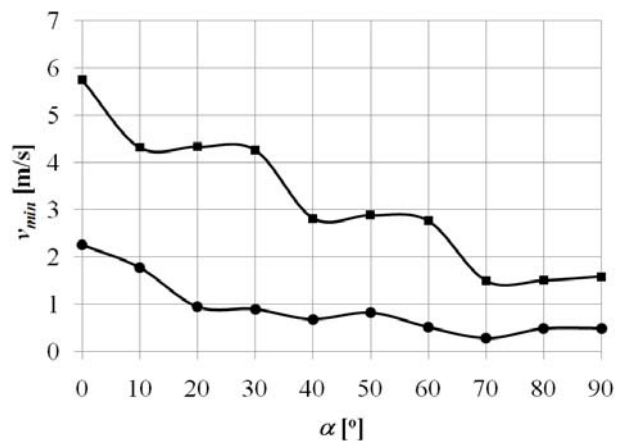
Слика 7.34 АТР жалужина типа А у цевоводу



Слика 7.35 АТР жалужина типа В у цевоводу



Слика 7.36 АТР жалужина типа С у цевоводу



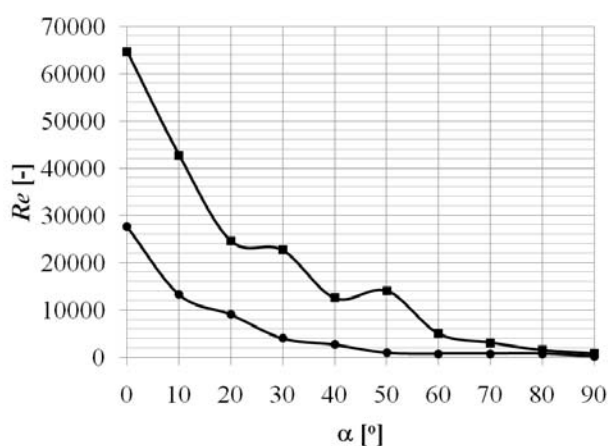
Слика 7.37 АТР жалужина типа D у цевоводу

Доња крива на сликама представља минималну брзину при којој мерило момента почиње да реагује, тј. брзину при којој је момент ваздушне струје једнак 1 Nmm. Горња крива на сликама представља минималну брзину струјања са којом је било смислено мерити с обзиром да је апсолутна грешка мерења момента 1 Nmm.

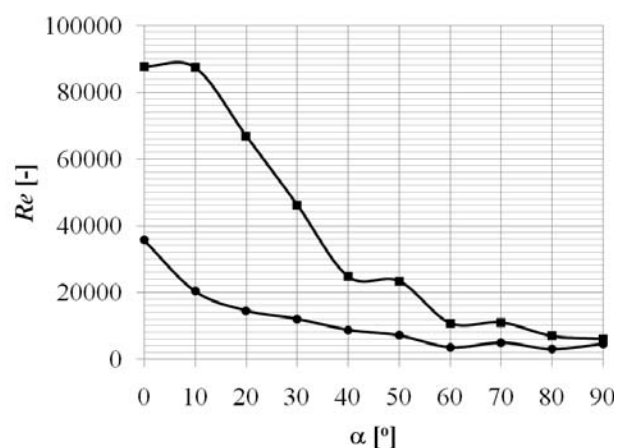
Најнижу вредност брзине струјања ваздуха при којој мерило момента реагујена ваздушну струјуима АТР жалузина типа С, затим следе типови А, В и D. Уколико се изузме АТР жалузина типа С због малог хода, види се да мерило момента АТР жалузине типа А у већем делу хода мерне лопатице (нападни угао мерне лопатице од 40° до 90°) реагује на веома мале вредности брзине струјања. Брзине струјања при којима мерило момента почиње да реагује код АТР жалузина типа В и D у већем делу хода мерне лопатице (нападни угао мерне лопатице од 20° до 90°) је мањи од 1 m/s.

Најнижу вредност минималне брзине струјања коју је смислено мерити с обзиром на вредност мерне неизвесности има АТР жалузина типа А. При нападним угловима мерне лопатице од 60° до 90° вредност минималне брзине струјања је од 0,05 до 0,2 m/s, што је ред величине мерења минималне брзине струјања код анемометра са топлом жицом. Смањењем нападног угла мерне лопатице (испод 60°) повећава се вредност минималне брзине струјања код АТР жалузине типа А, при чему минимална брзина струјања АТР жалузине типа А и даље има нижу вредност у односу на АТР жалузине типа В, С и D. Уколико се изузме АТР жалузина типа С због малог хода мерне лопатице, може да се констатује да АТР жалузина типа D има највишу вредност минималне брзине струјања. Минимална брзина струјања код АТР жалузине типа D чак и при нападном углу мерне лопатице од 90° има вредност изнад 1 m/s.

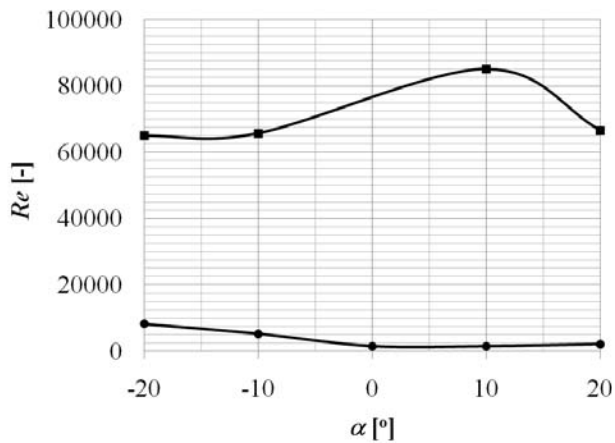
Занимљиво је видети режиме при мерењу минималне брзине струјања ваздуха АТР жалузинама, *слике* од 7.38 до 7.41. Може да се уочи да су АТР жалузине типа А (при нападним угловима мерне лопатице од 40° до 90°) и типа С (при нападним угловима мерне лопатице од 0° до 20°) само на самом почетку реаговања мерила момента у ламинарном режиму струјања. При минималним брзинама струјања које је смислено мерити сви типови АТР жалузина налазе се у зони турбулентног режима струјања.



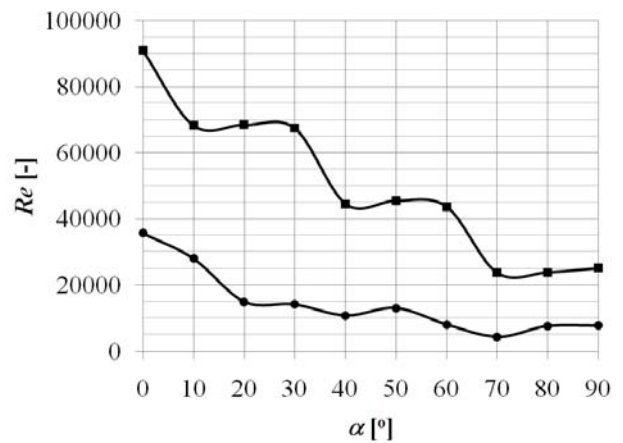
Слика 7.38 АТР жалузина типа А у цевоводу



Слика 7.39 АТР жалузина типа В у цевоводу



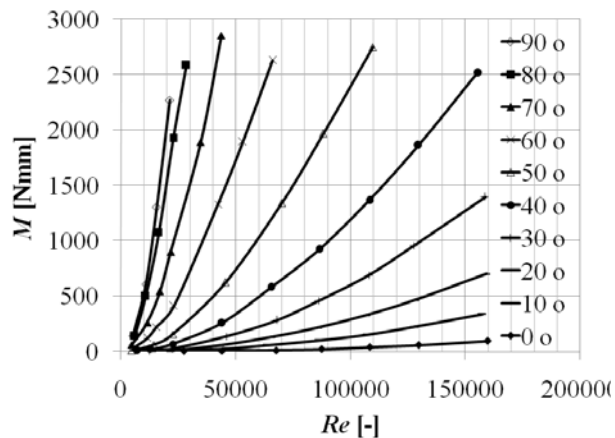
Слика 7.40 АТР жалузина типа С у цевоводу



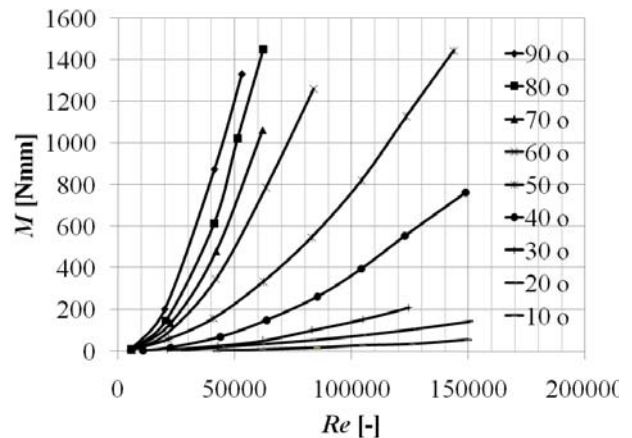
Слика 7.41 АТР жалузина типа D у цевоводу

7.9 Режим струјања ваздуха кроз АТР жалузине

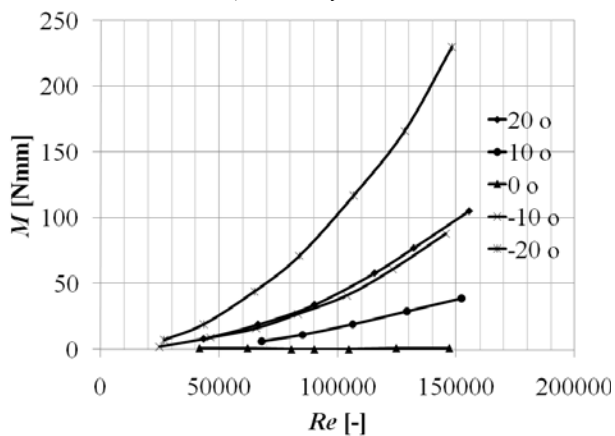
На сликама од 7.42 до 7.45 приказани су резултати мерења момента АТР жалузинама које се налазе у цевоводу у функцији Рејнолдсовог броја. У целом мерном опсегу, код сва четири типа АТР жалузина јавља се турбулентан режим струјања.



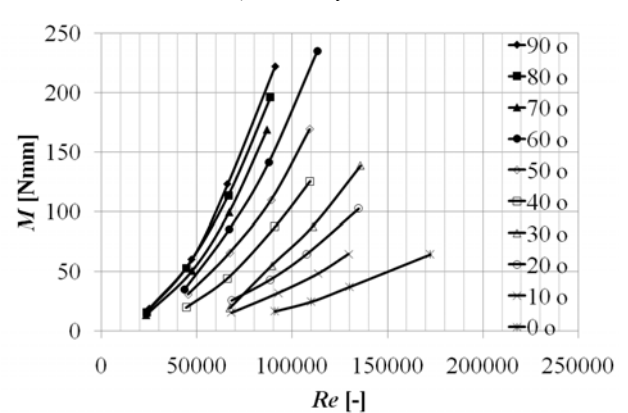
Слика 7.42 АТР жалузина типа А у цевоводу



Слика 7.43 АТР жалузина типа В у цевоводу



Слика 7.44 АТР жалузина типа С у цевоводу



Слика 7.45 АТР жалузина типа D у цевоводу

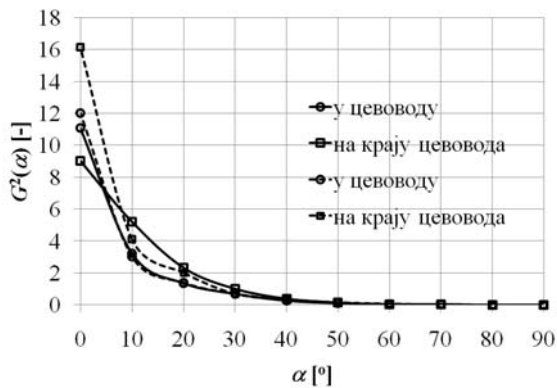
7.10 Линеарност АТР жалузине

Брзина струјања ваздуха која се мери АТР жалузином у функцији је нападног угла мерне лопатице и момента којим ваздух делује на мерну лопатицу. Из тог разлога је занимљиво видети зависност брзине струјања и нападног угла мерне лопатице и брзине струјања и момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу. Према једначини (4.28) коефицијент протока приказан *сликама* од 7.30 до 7.33 индиректни је показатељ нелинеарне зависности брзине струјања ваздуха од нападног угла мерне лопатице код свих типова АТРжалузине. Зависност измереног момента и Рејнолдсовог броја приказана на *сликама* од 7.42 до 7.45 индиректни је показатељ нелинеарне зависности брзине струјања ваздуха и момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу код свих типова АТРжалузине.

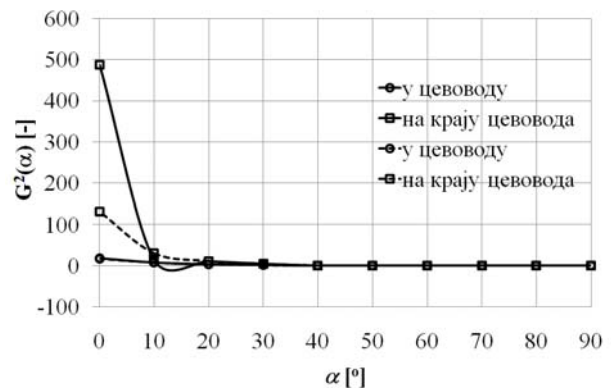
7.11 Верификација математичког модела АТРжалузине

7.11.1 Корелацијска функција математичког модела АТРжалузине

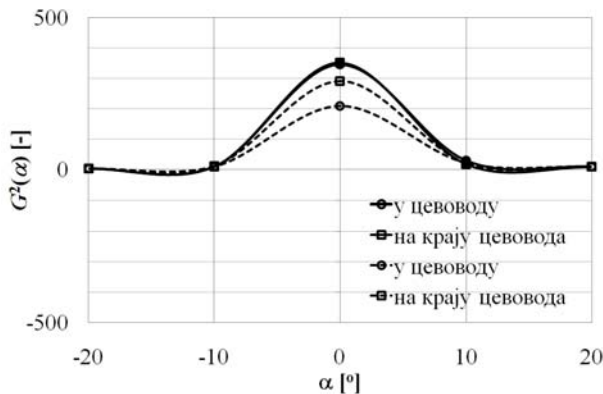
На *сликама* од 7.46 до 7.49 приказане су корелацијске функције из математичког модела (4.24) добијене експерименталним путем. Пуним линијама приказане су корелацијске функције добијене узимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине, док су испрекиданим линијама приказане корелацијске функције добијене неузимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине.



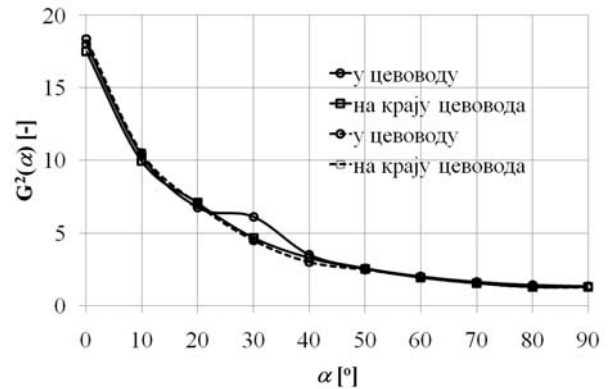
Слика 7.46 Корелацијска функција АТР жалузине типа А



Слика 7.47 Корелацијска функција АТР жалузине типа В



Слика 7.48 Корелацијска функција АТР жалузине типа С



Слика 7.49 Корелацијска функција АТР жалузине типа D

Уколико се посматра опсег нападног угла од 0° до 90° корелацијска функција има исти тренд код свих типова АТР жалузина, где се повећањем нападног угла смањује вредност корелацијске функције. При истим мерним условима разлика у вредности корелацијских функција различитих типова АТР жалузина настаје услед различитих вредности момената који делују на мерну лопатицу жалузине.

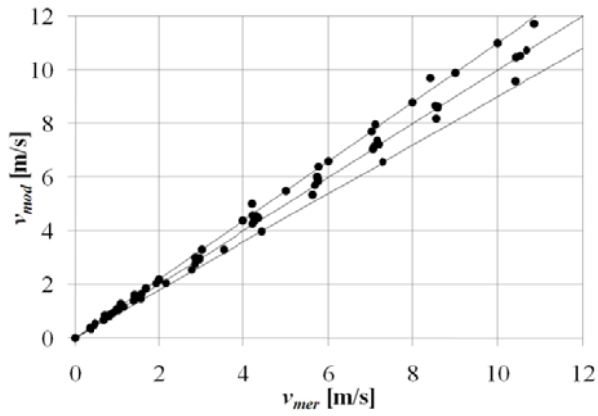
Приметно је да постоји значајна разлика у вредности корелацијске функције за случај када је АТР жалузина смештена у цевоводу и за случај када се АТР жалузина налази на крају цевовода, без обзира да ли се узима или не узима у обзир утицај хистерезиса. Одступање корелацијске функције за два приказана положаја јавља се при отворенијој АТР жалузини, тј. када је нападни угао мерне лопатице мањи од 40° .

Корелацијска функција АТР жалузине смештене на крају цевовода има већу вредност у односу на корелацијску функцију АТР жалузине смештене у цевоводу. Такође, крива корелацијске функције АТР жалузине смештене у цевоводу је глаткија у односу на криву корелацијске функције АТР жалузине смештене на крају цевовода. При отворенијој жалузини, тј. када је нападни угао мерне лопатице мањи од 40° значајан утицај на вредност корелацијске функције има и хистерезис АТР жалузине, без обзира да ли се жалузина налази у цевоводу или на крају цевовода. Изузетак утицаја положаја и хистерезиса на вредност корелацијске функције при отворенијој жалузини јавља се код АТР жалузине типа D, где долази до релативно доброг поклапања вредности корелацијске функције без обзира на положај и утицај хистерезиса жалузине.

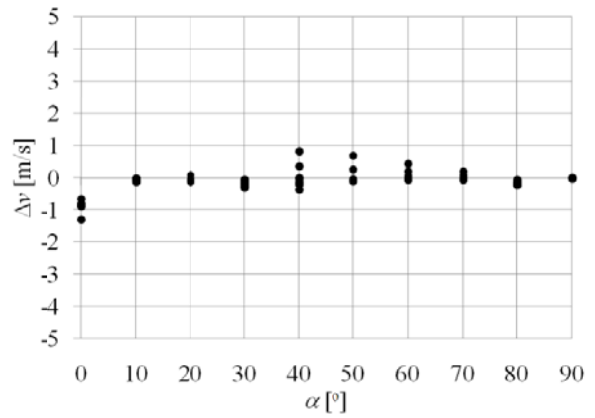
Услед проширења мерног опсега код АТР жалузине типа С корелацијска функција је негативна када су лопатице у зони са негативним нападним углом. Може да се уочи мерна симетрија корелацијске функције са једне и друге стране око вредности нападног угла 0° , када је АТР жалузина типа С скроз отворена.

7.11.2 Верификација математичког модела неузимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине

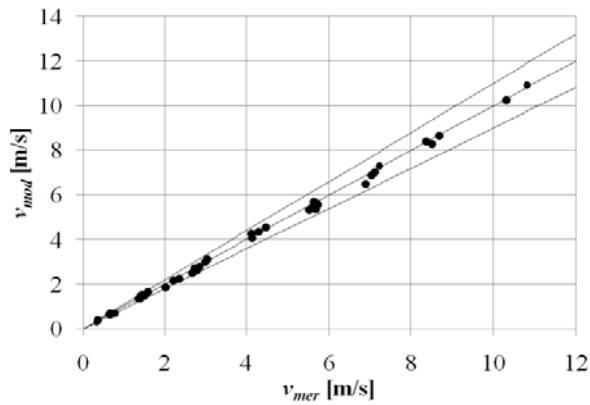
На *сликама* од 7.50 до 7.57 приказани су резултати верификације математичког модела неузимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине. Мерења параметара рада АТР жалузине урађена су повећањем брзине струјања и смањењем нападног угла мерне лопатице за случај када се жалузина налази у цевоводу. Математичко моделирање урађено је са једним низом мерења, док је верификација математичког модела урађена са другим низом мерења. Са леве стране дате су *слике* 7.50, 7.52, 7.54 и 7.56 на којима је за сваки тип испитиване АТР жалузине приказано поређење брзине струјања ваздуха добијене мерењем v_{mer} и брзине струјања ваздуха добијене математичким моделом v_{mod} . Са десне стране дате су *слике* 7.51, 7.53, 7.55 и 7.57 на којима је за сваки тип испитиване АТР жалузине приказана разлика Δv између измерене брзине v_{mer} и моделске брзине v_{mod} у функцији нападног угла лопатице α .



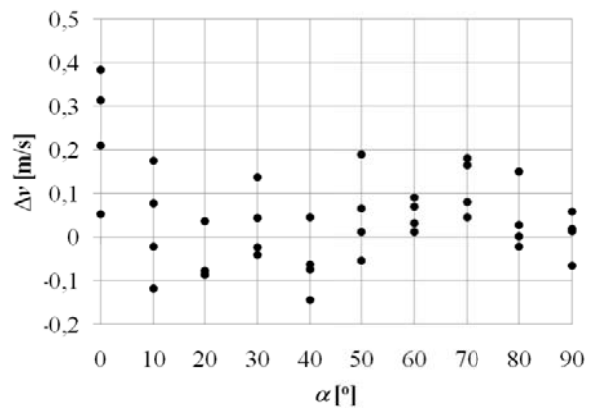
Слика 7.50 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



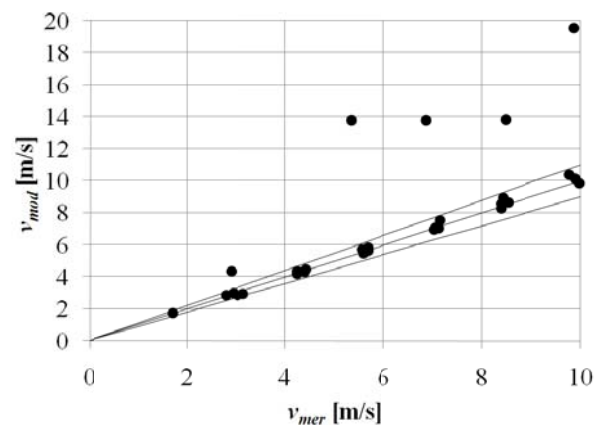
Слика 7.51 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (Δv у функцији α)



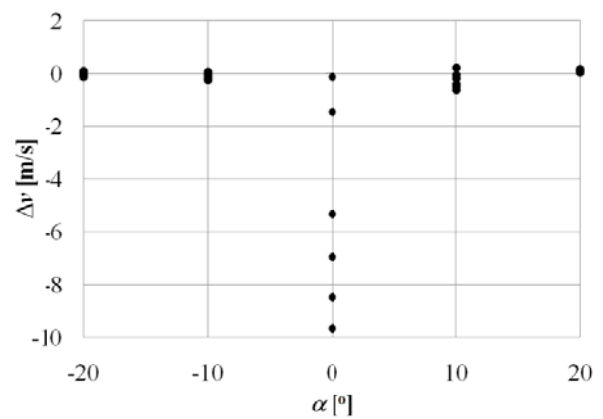
Слика 7.52 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



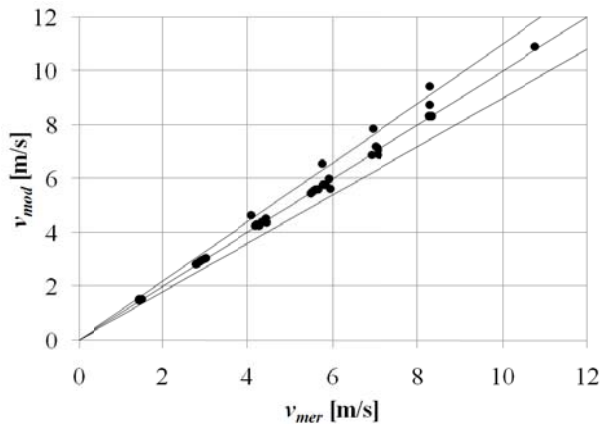
Слика 7.53 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (Δv у функцији α)



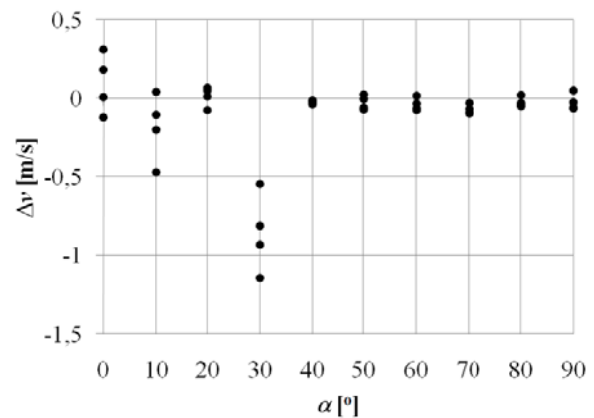
Слика 7.54 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.55 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (Δv у функцији α)



Слика 7.56 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.57 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (Δv у функцији α)

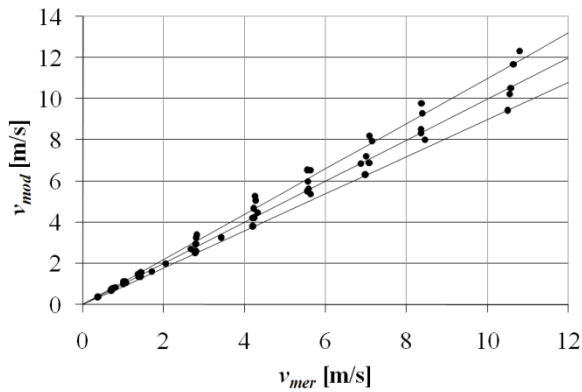
На сликама 7.50, 7.52, 7.54 и 7.56 може да се уочи да је у случају када се АТР жалузина налази у цевоводу разлика измерене v_{mer} и моделске брзине v_{mod} у границама $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха. На овај начин потврђен је резултат који је добио Федершпил (Federspiel, 2004б) за случај АТР жалузине на улазу у цевовод, са лопатицама у виду решетке (четири супротносмерно вођене лопатице). Федершпил је добио разлику измерене v_{mer} и моделске брзине v_{mod} у границама $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања или $\pm 5\%$ пуне скале мерења брзине. При нижим вредностима брзине струјања ваздуха када се јављају веће грешке мерења Федершпил је узимао ширу границу $\pm 5\%$ пуне скале мерења, док је при вишим брзинама струјања када се јављају мање грешке мерења узимао ужу границу $\pm 10\%$ од измерене брзине струјања, слике 2.57 и 2.59.

Уочава се да је при верификацији математичког модела испитиваних типова АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку добијен повољнији резултат. Разлог томе лежи у чињеници што је Федершпил при мерењу брзине струјања за потребе моделирања и верификације математичког модела користио Прантлову сонду. Прантлова сонда има већу мерну неизвесност при нижим вредностима брзине струјања ваздуха у поређењу са анемометром са топлом жицом који је коришћен за потребе мерења брзине у оквиру докторске дисертације. Мерна неизвесност Прантлове сонде при нижим вредностима брзине струјања ваздуха диктирана је неизвесношћу диференцијалног мерила притиска (Schroederetal., 2000).

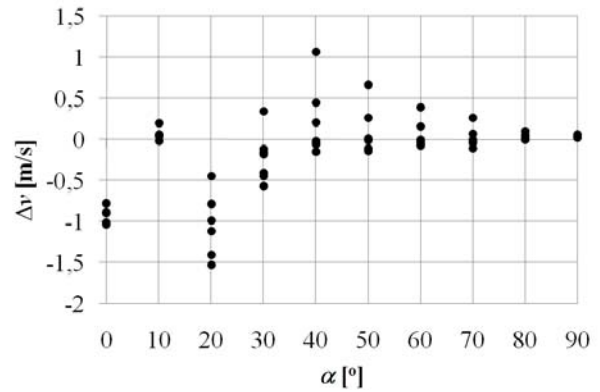
Веома мали број мерних тачака иде ван границе $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха. Ради се о мерним тачкама које су добијене при отворенијој жалузини, што може да се види на сликама 7.51, 7.53, 7.55 и 7.57. Највеће одступање јавља се код АТР жалузине типа С и то при потпуно отвореној жалузини слика 7.55.

На сликама од 7.58 до 7.65 приказани су резултати верификације математичког модела не узимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине, где су мерења урађена повећањем брзине струјања и смањењем нападног угла мерне лопатице за случај када се жалузина налази на крају цевовода. Математичко моделирање урађено је са једним низом мерења, док је верификација математичког модела урађена са другим низом мерења. Са леве стране дате су слике 7.58, 7.60, 7.62 и 7.64 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказано поређење измерене брзине v_{mer} и моделске брзине v_{mod} струјања ваздуха. Са десне стране дате су слике 7.59, 7.61, 7.63 и 7.65 на којима је за сваки тип АТР жалузине

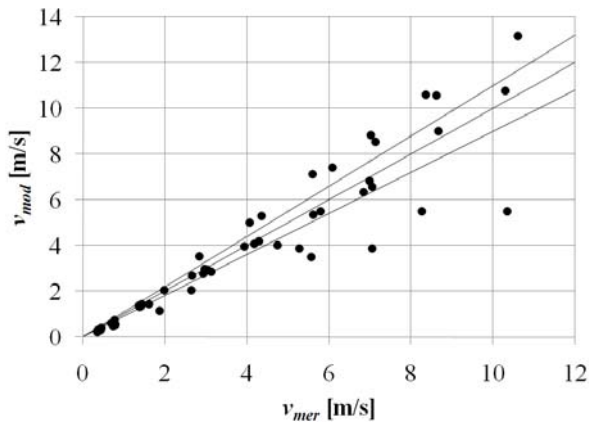
приказана разлика Δv измерене и моделске брзине струјања ваздуха у функцији нападног угла лопатице α .



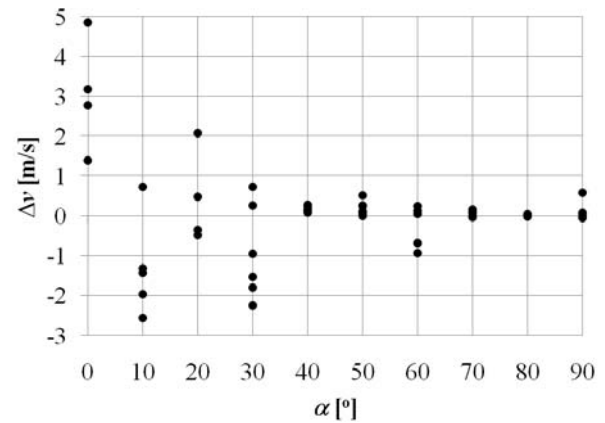
Слика 7.58 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



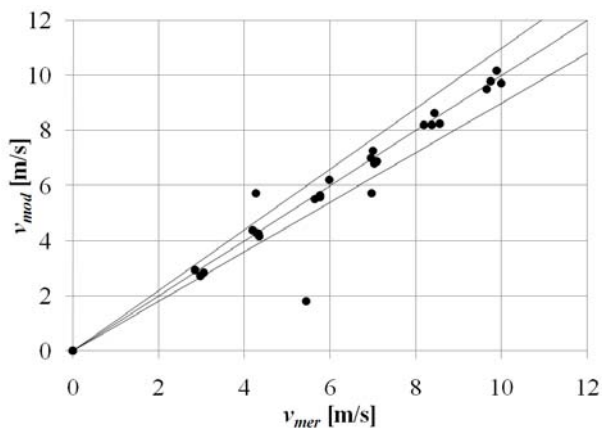
Слика 7.59 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (Δv у функцији α)



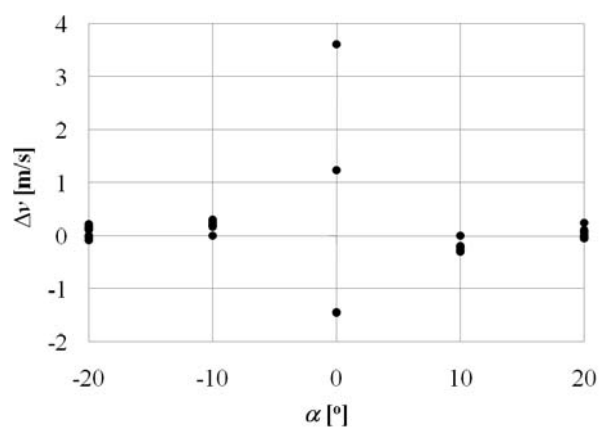
Слика 7.60 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



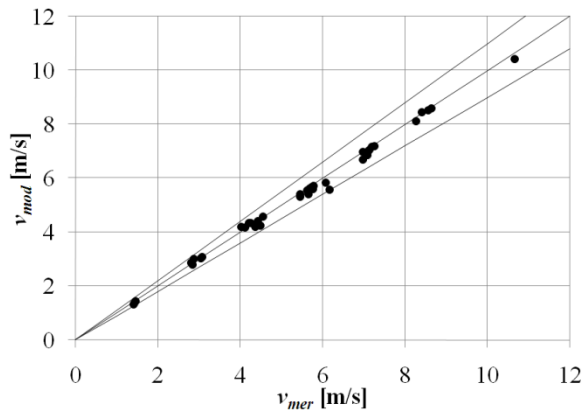
Слика 7.61 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (Δv у функцији α)



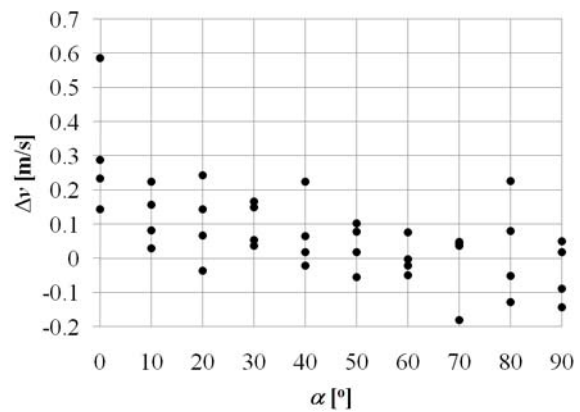
Слика 7.62 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.63 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (Δv у функцији α)



Слика 7.64 Верификација математичког модела АТР жалужине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.65 Верификација математичког модела АТР жалужине типа D (Δv у функцији α)

На сликама 7.587.60, 7.62 и 7.64 уочава се да је за случај када се АТР жалужине налазе на крају цевоводаразлика измерене и моделске брзине нешто већа у односу за случај када се АТР жалужина налази у цевоводу. На овај начин наговештава се да је математички модел адекватнији, а мерење брзине струјања ваздуха тачније за случај када се АТР жалужина налази у цевоводу у односу на случај када се АТР жалужина налази на крају цевовода. Генерално гледајући као и код АТР жалужина смештених у цевоводу и код АТР жалужина смештених на крају цевовода при отворенијој жалужини разлика измерене брзине и моделске брзине иде ван границе $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха. Нпр. за најнеповољнији случај АТР жалужине типа В приказан на слици 7.60 уочава се да је разлика измерене и моделске брзине ван граница $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине за опсег нападног угла мерне лопатике од 0° до 40° .

Из истих разлога као и код АТР жалужина које се налазе у цевоводу и код жалужина које се налазе на крају цевовода при верификацији математичког модела добијен је повољнији резултат (уже границе верификације) у поређењу са резултатима које је добио Федершпил, слика 2.59.

7.11.3 Верификација математичког модела узимањем у обзир хистерезиса АТР жалужине

Мерења су урађена узимањем у обзир хистерезиса АТР жалужине за четири случаја:

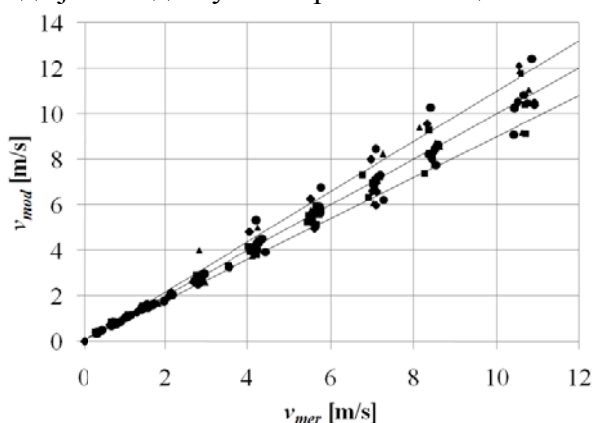
- повећањем брзине струјања и смањењем нападног угла мерне лопатике (симбол ●);
- смањењем брзине струјања и смањењем нападног угла мерне лопатике (симбол ■);
- повећањем брзине струјања и повећањем нападног угла мерне лопатике (симбол ▲) и
- смањењем брзине струјања и повећањем нападног угла мерне лопатике (симбол ◆).

Математички модел калибрисан је тако да је корелацијска функција за одређени нападни угао мерне лопатике добијена као аритметичка средина четири дефинисана случаја мерења. Другим, независним низом измерених величина за сваки од четири случаја мерења верификован је формиран математички модел. Како хистерезис реално

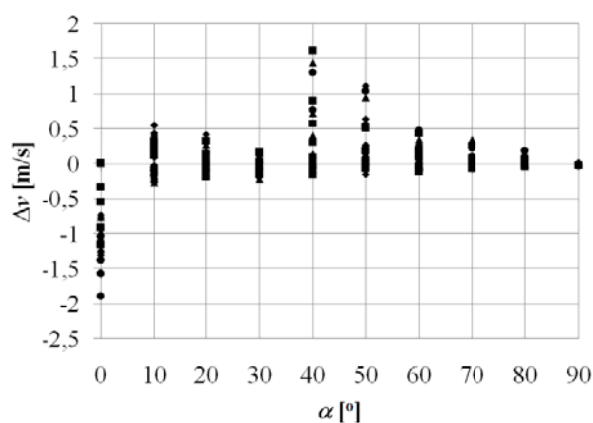
постоји при раду жалузина (Krakow, 1998), верификација математичког модела узимањем у обзир хистерезиса је значајнија и релевантнија.

На сликама од 7.66 до 7.73 приказани су резултати верификације математичког модела узимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине за случај када се жалузина налази у цевоводу. Са леве стране дате су слике 7.66, 7.68, 7.70 и 7.72 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказано поређење измерене моделске брзине. Са десне стране дате су слике 7.67, 7.69, 7.71 и 7.73 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказана разлика измерене и моделске брзине у функцији нападног угла.

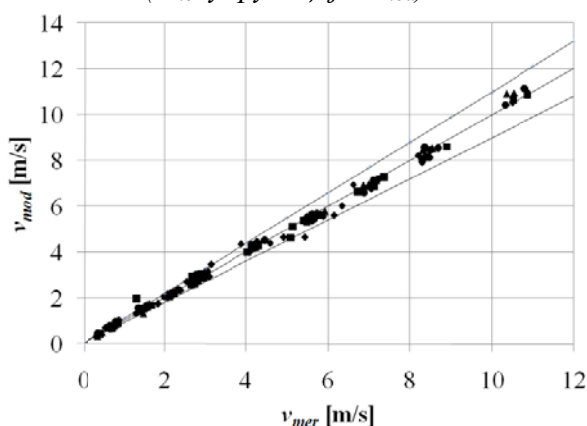
Разлика измерене и моделске брзине код свих типова АТР жалузина смештених у цевоводу, изузев типа С, налази се у границама $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха. На основу вредности разлике измерене и моделске брзине за АТР жалузину типа С, приказаној на слици 7.71, може да се уочи да математички модел није адекватан само при скроз отвореној жалузини када је нападни угао мерне лопатице 0° . Генерално код свих типова АТР жалузина јавља се тенденција да је при затворенијој жалузини мања разлика између измерене и моделске брзине, те је при затворенијој жалузини математички модел адекватнији, а мерење тачније. Нпр. код типова АТР жалузина А, В и Д разлика измерене и моделске брзине у пар мерних тачака иде ван границе $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине и то при потпуно отвореној жалузини, када је нападни угао мерне лопатице 0° .



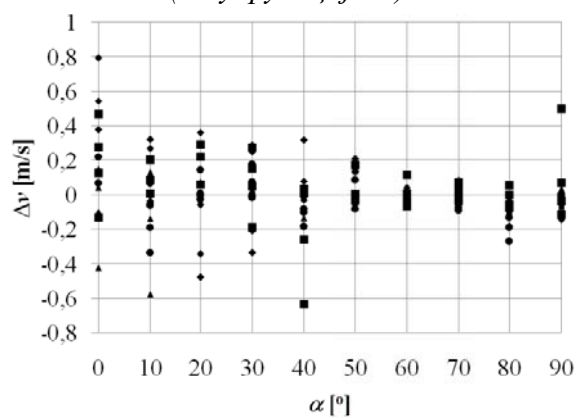
Слика 7.66 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



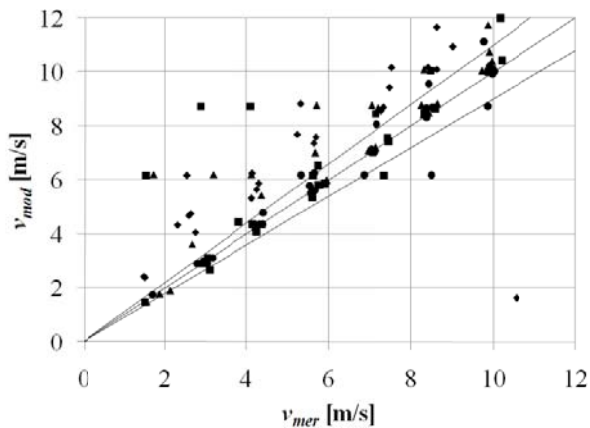
Слика 7.67 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (Δv у функцији α)



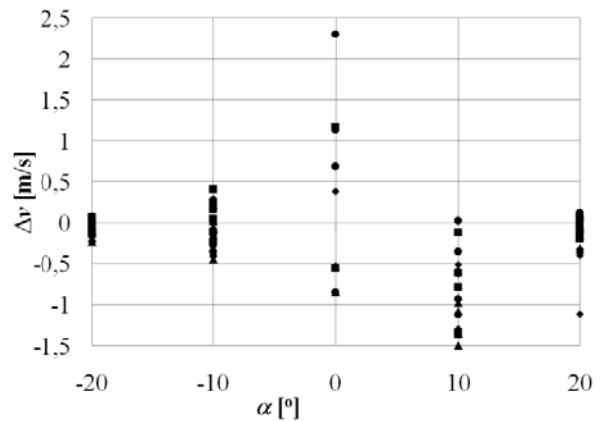
Слика 7.68 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



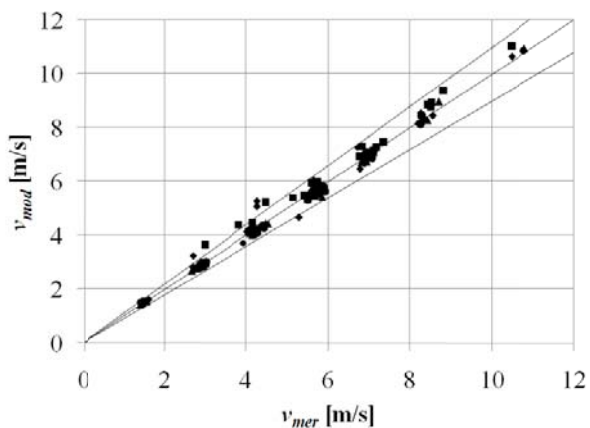
Слика 7.69 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (Δv у функцији α)



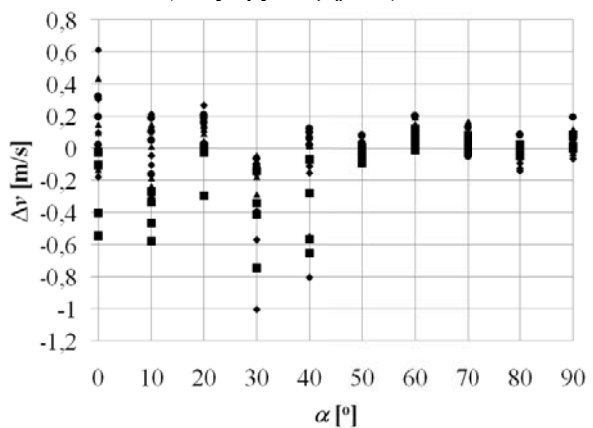
Слика 7.70 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.71 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (Δv у функцији α)



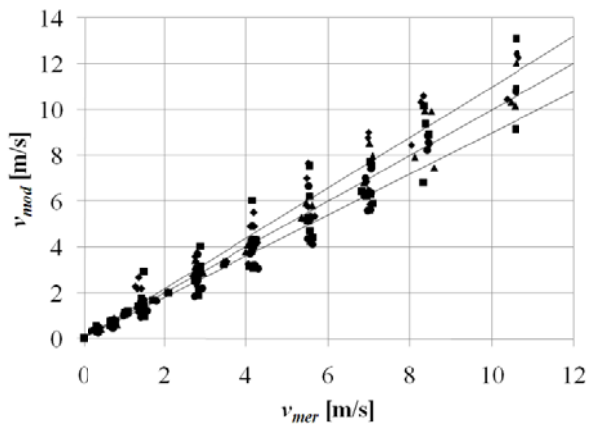
Слика 7.72 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



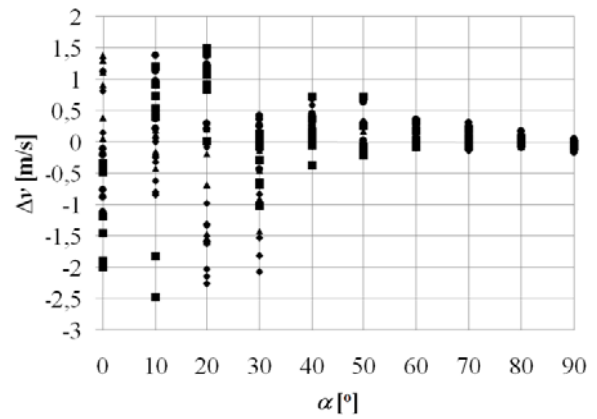
Слика 7.73 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (Δv у функцији α)

На сликама од 7.74 до 7.81 приказани су резултати верификације математичког модела узимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине за случај када се жалузина налази на крају цевовода. Са леве стране дате су слике 7.74, 7.76, 7.78 и 7.80 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказано поређење измерене и моделске брзине струјања ваздуха. Са десне стране дате су слике 7.75, 7.77, 7.79 и 7.81 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказана разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха.

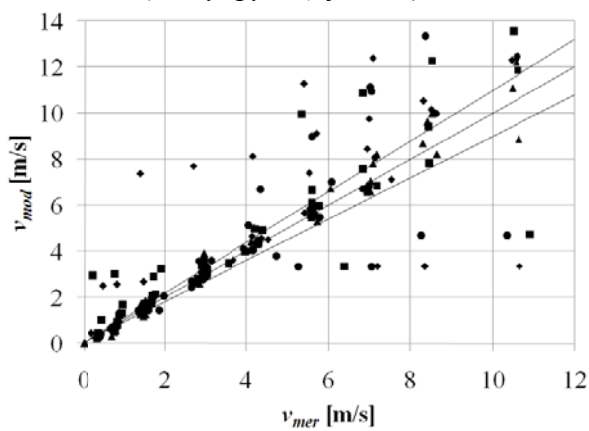
За разлику од АТР жалузина смештених у цевоводу, код свих типова АТР жалузина смештених на крају цевовода разлика измерене и моделске брзине у већем броју мерних тачака иде ван граница $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха. Када се хистерезис жалузине узима у обзир предложени математички модел је адекватнији, а мерење брзине струјања тачније за случај када се АТР жалузина налази у цевоводу у односу на случај када се АТР жалузина налази на крају цевовода. Генерално код свих типова АТР жалузина смештених на крају цевовода јавља се тенденција да се при затворенијој жалузини јавља мања разлика између измерене и моделске брзине, те је тада математички модел адекватнији, а мерење тачније брзине струјања тачније.



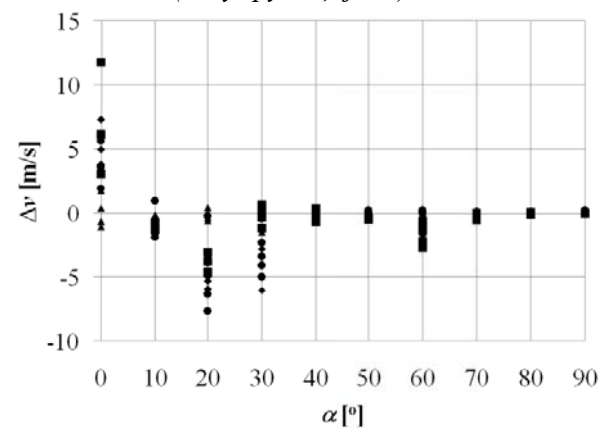
Слика 7.74 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



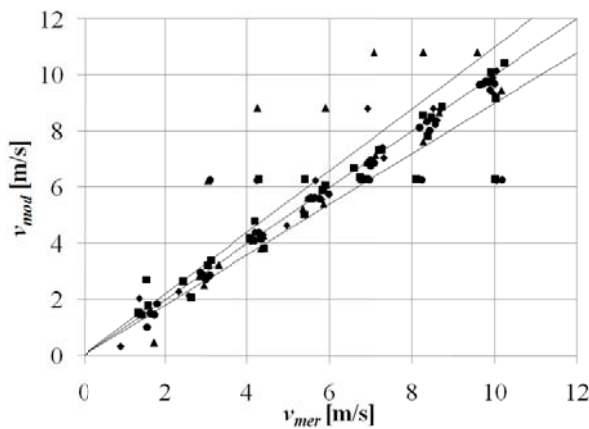
Слика 7.75 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (Δv у функцији α)



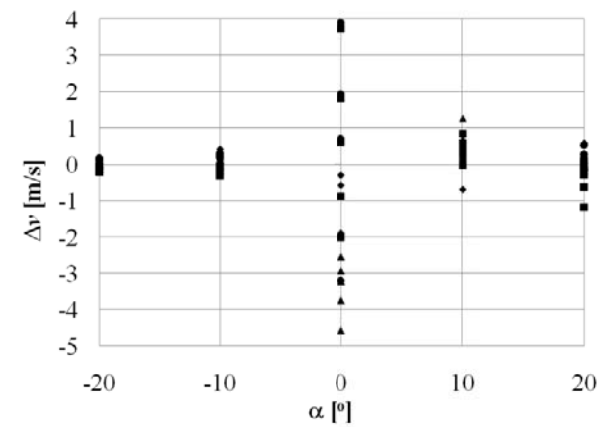
Слика 7.76 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



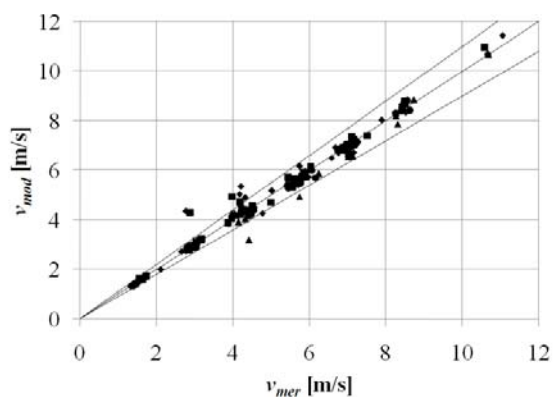
Слика 7.77 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (Δv у функцији α)



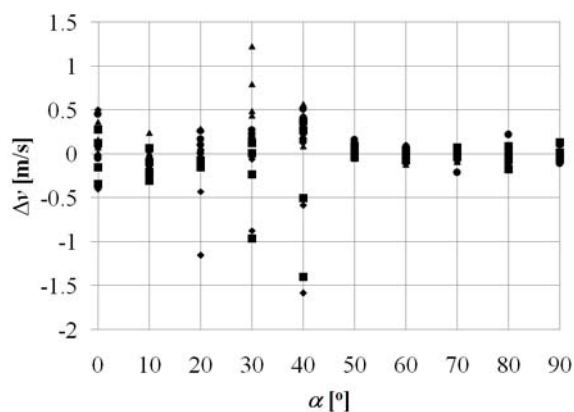
Слика 7.78 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.79 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (Δv у функцији α)



Слика 7.80 Верификација математичког модела АТР жалужине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



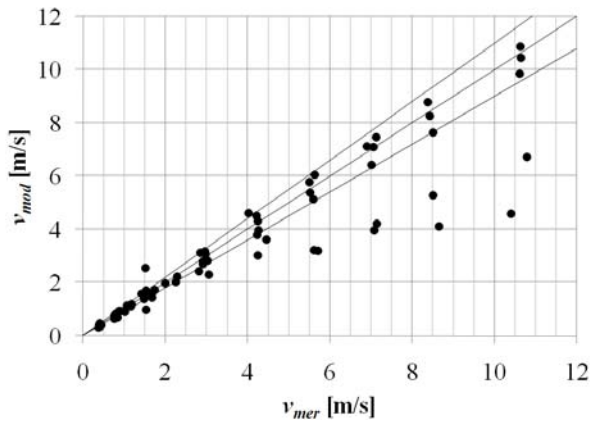
Слика 7.81 Верификација математичког модела АТР жалужине типа D (Δv у функцији α)

7.12 Утицај локалног отпора на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалужином

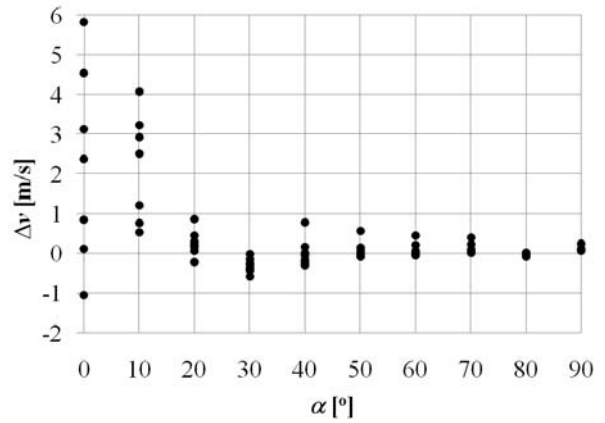
7.12.1 Утицај локалног отпора неузимањем у обзир хистерезиса АТР жалужине

Утицај локалног отпора на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалужина одређен је постављањем челичног лима у жљеб нормално на раван канала, тако да је светли пресек канала смањен за 50 %. Код АТР жалужина смештених у цевоводу мерења су урађена прво постављањем плоче у жљебна растојању 0,5 m испред жалужине. Након мерења плоча је извађена и жљеб испред АТР жалужине је затворен. Жљеб на растојању 0,5 m иза АТР жалужине је отворен, плоча је постављена у њега, а затим су урађена мерења параметара рада жалужине. Код АТР жалужина смештених на крају цевовода мерења су урађена постављањем плоче у жљеб који се налази на растојању 0,5 m испред жалужине. Мерења брзине урађена са присутним локалним отпором у ваздушној струји су затим упоређена са брзином добијеном из математичког модела АТР жалужине којим није узет у обзир хистерезис жалужине.

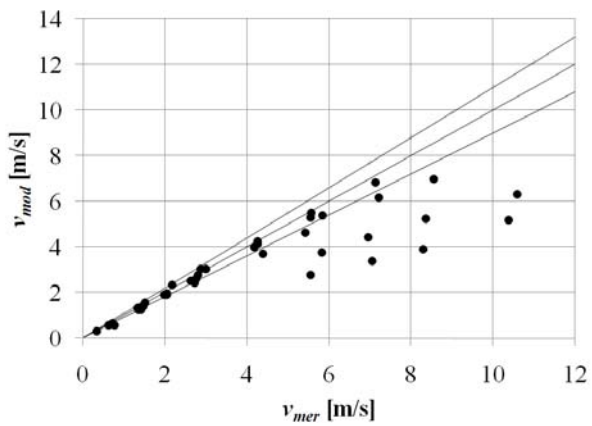
На сликама од 7.82 до 7.89 приказан је утицај локалног отпора постављеног испред АТР жалужине смештене у цевоводу. Са леве стране дате су слике 7.82, 7.84, 7.86 и 7.88 на којима је за сваки тип АТР жалужине приказано поређење измерене и моделске брзине струјања ваздуха. Са десне стране дате су слике 7.83, 7.85, 7.87 и 7.89 на којима је за сваки тип АТР жалужине приказана разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха у функцији нападног угла лопатице.



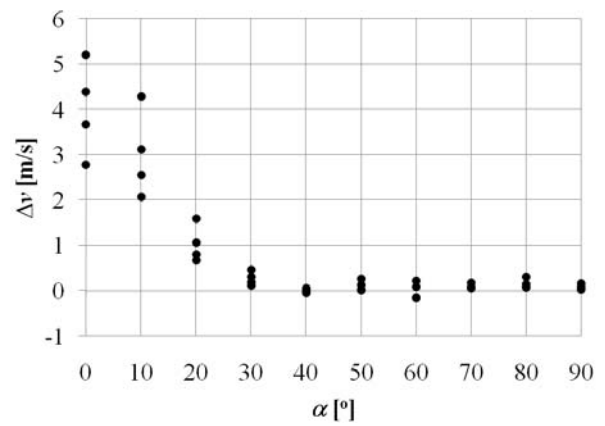
Слика 7.82 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



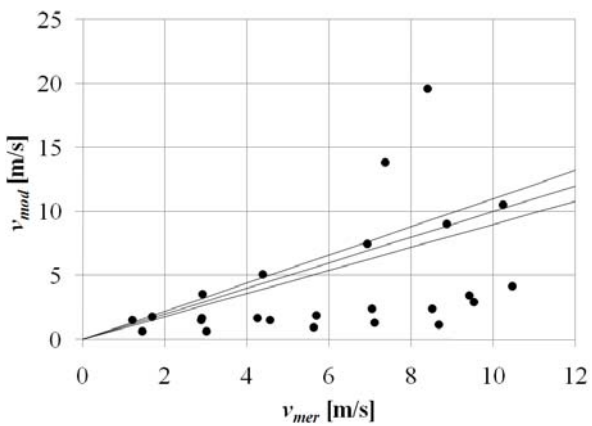
Слика 7.83 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (Δv у функцији α)



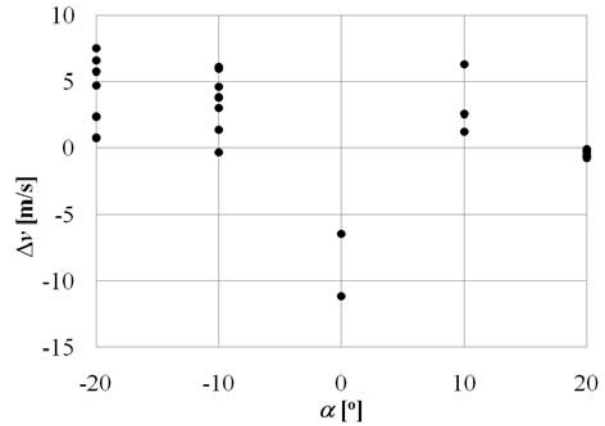
Слика 7.84 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



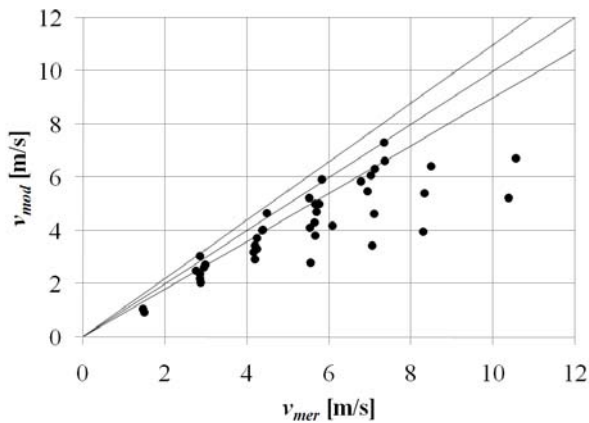
Слика 7.85 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (Δv у функцији α)



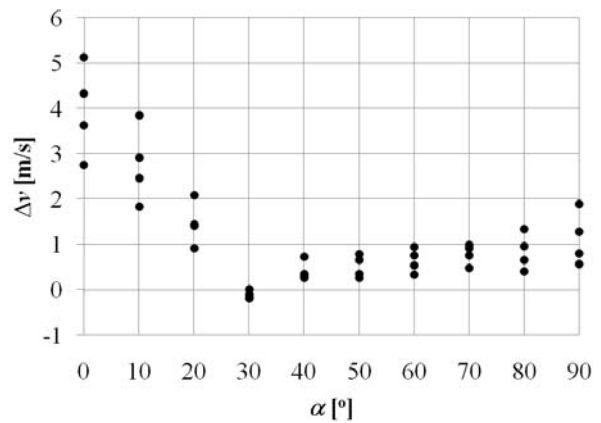
Слика 7.86 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.87 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (Δv у функцији α)



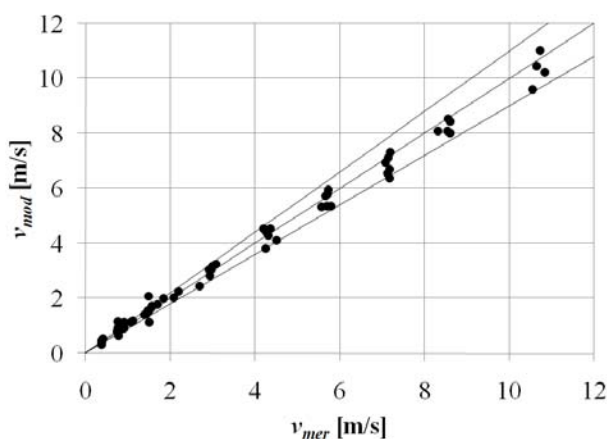
Слика 7.88 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



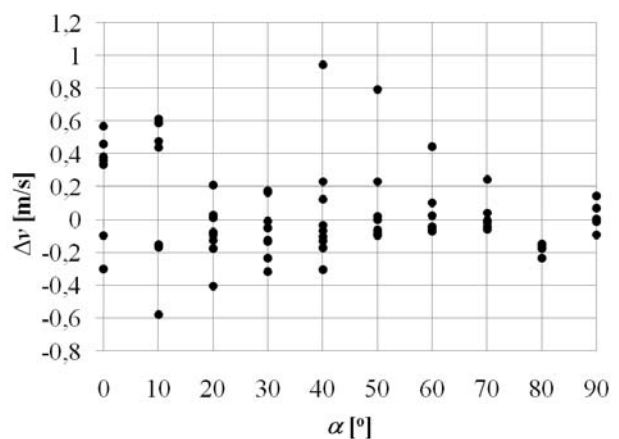
Слика 7.89 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (Δv у функцији α)

На сликама од 7.90 до 7.97 приказан је утицај локалног отпора постављеног иза АТР жалузине смештене у цевоводу. Са леве стране дате су слике 7.90, 7.92, 7.94 и 7.96 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказано поређење измерене и моделске брзине струјања ваздуха. Са десне стране дате су слике 7.91, 7.93, 7.96 и 7.98 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказана разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха у функцији нападног угла лопатице.

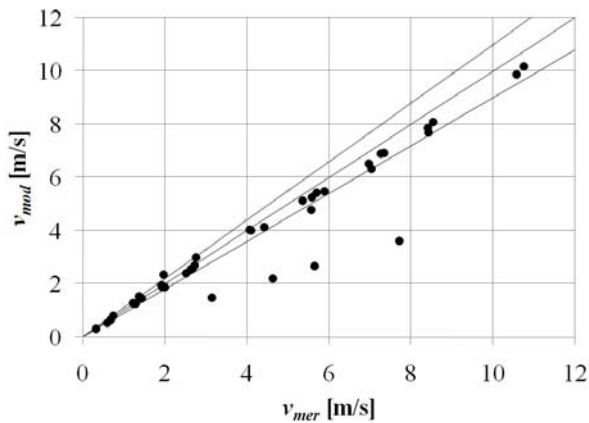
За случај када се АТР жалузина налази у цевоводу а математички модел не узима у обзир хистерезис, може да се уочи да при отворенијој жалузини (нападни угао мерне лопатице од 0° до 30°) постоји значајан утицај локалног отпора испред жалузине на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања. До исте тенденције је дошао и Федершил (Federspiel, 2004a, 2004b) за случај АТР жалузине са четири супротносмерно вођене лопатице смештене на улазу у цевовод. За нападне углове мерне лопатице веће од 30° утицај локалног отпора испред жалузине постаје мање значајан, изузев код АТР жалузине типа С, где је утицај локалног отпора испред жалузине значајан у целом мерном опсегу, слика 7.87.



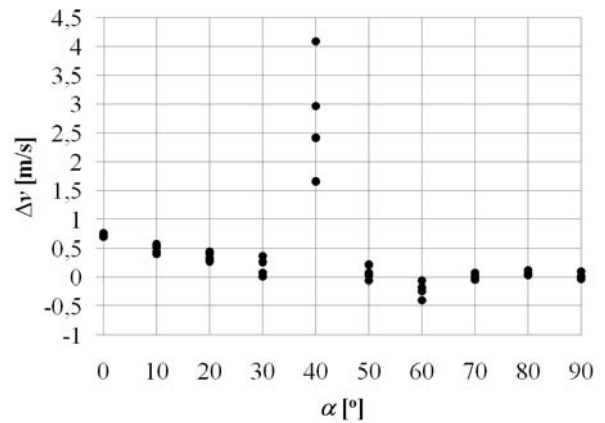
Слика 7.90 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



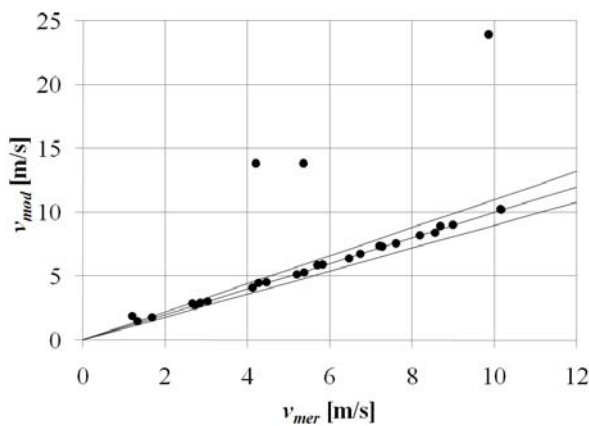
Слика 7.91 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (Δv у функцији α)



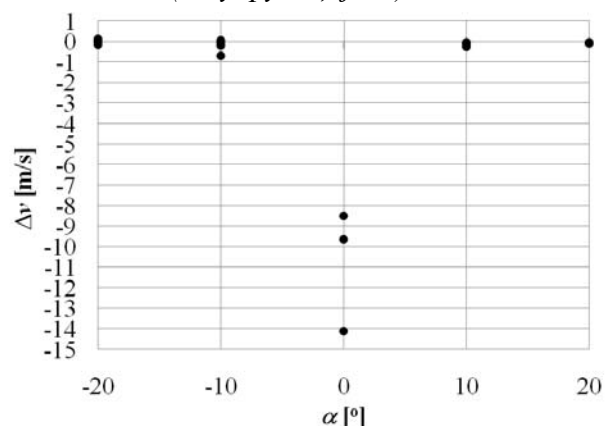
Слика 7.92 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



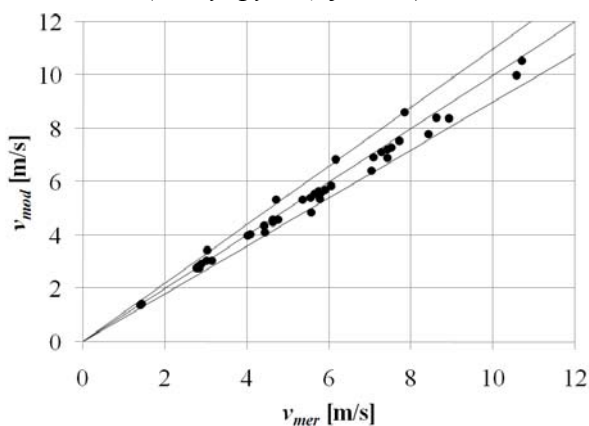
Слика 7.93 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (Δv у функцији α)



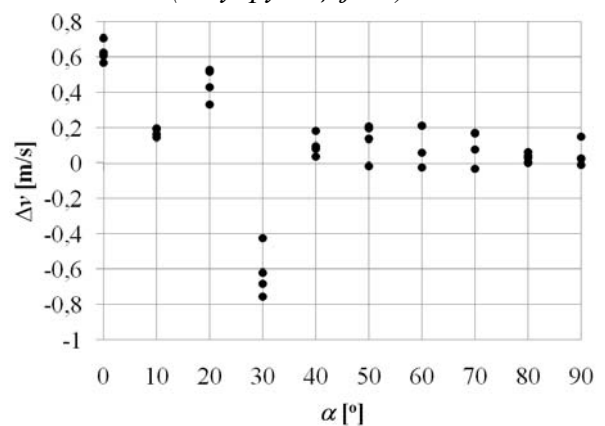
Слика 7.94 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.95 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (Δv у функцији α)



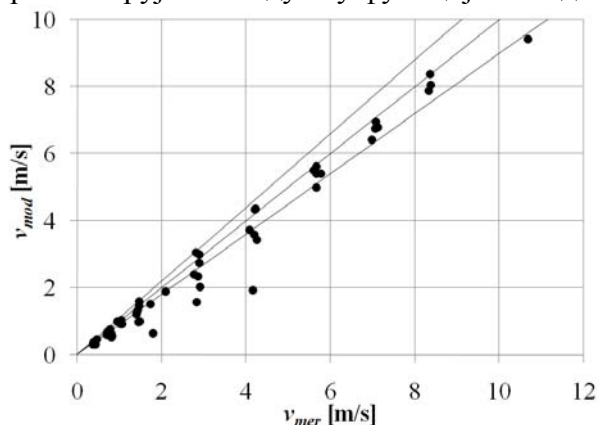
Слика 7.96 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



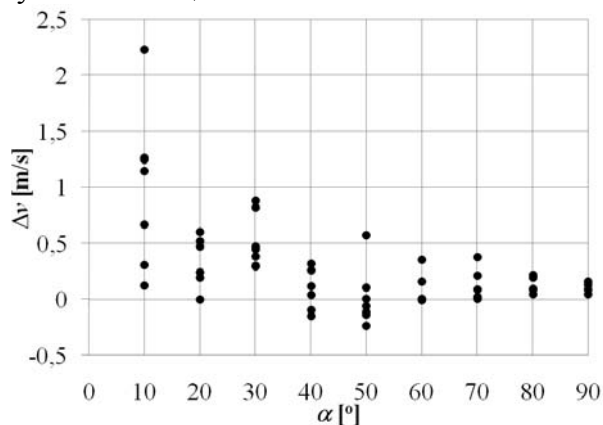
Слика 7.97 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (Δv у функцији α)

Утицај локалног отпора иза АТР жалузине на адекватност математичког модела и тачност мерења је знатно мању односу на утицај локалног отпора испред жалузине, па и при отворенијој жалузини. Овакву тенденцију показује чак и АТР жалузина типа С, код које разлика измерене и моделске брзине иде ван дефинисаних граница само при скроз отвореној жалузини (нападни угао мерне лопатице 0°), слика 7.95.

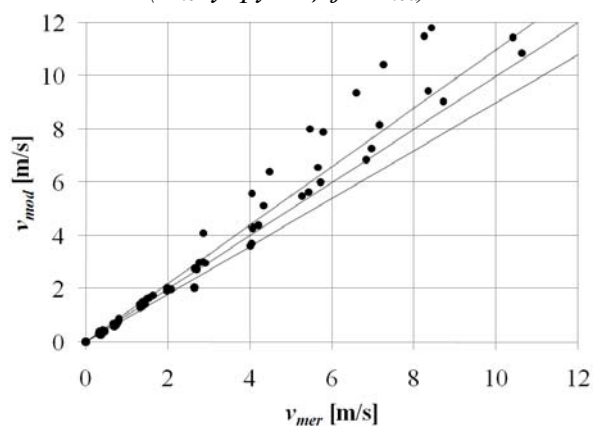
На сликама од 7.98 до 7.105 приказан је утицај локалног отпора постављеног испред АТР жалужине која се налази на крају цевовода. Са леве стране дате су слике 7.98, 7.100, 7.102 и 7.104 на којима је за сваки тип АТР жалужине приказано поређење измерене и моделске брзине струјања ваздуха. Са десне стране дате су слике 7.99, 7.101, 7.103 и 7.105 на којима је за сваки тип АТР жалужине приказана разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха у функцији нападног угла лопатиче.



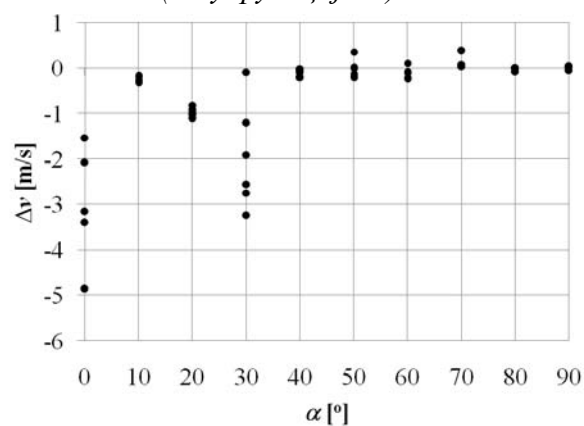
Слика 7.98 Верификација математичког модела АТР жалужине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



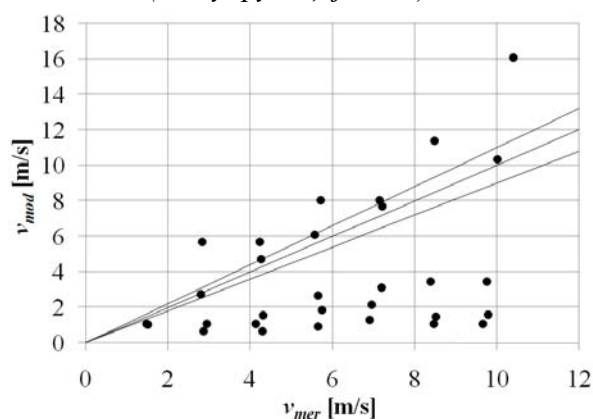
Слика 7.99 Верификација математичког модела АТР жалужине типа А (Δv у функцији α)



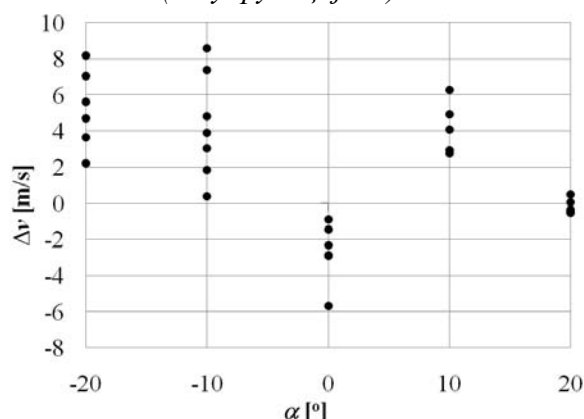
Слика 7.100 Верификација математичког модела АТР жалужине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



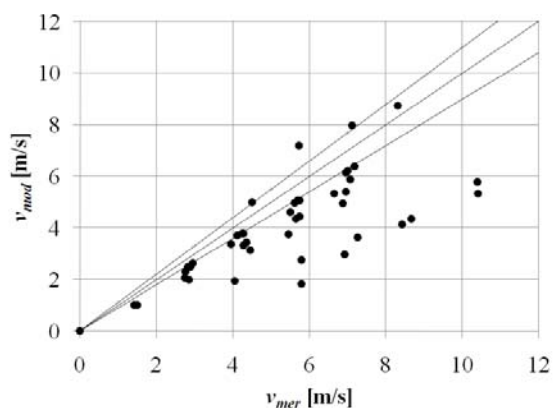
Слика 7.101 Верификација математичког модела АТР жалужине типа В (Δv у функцији α)



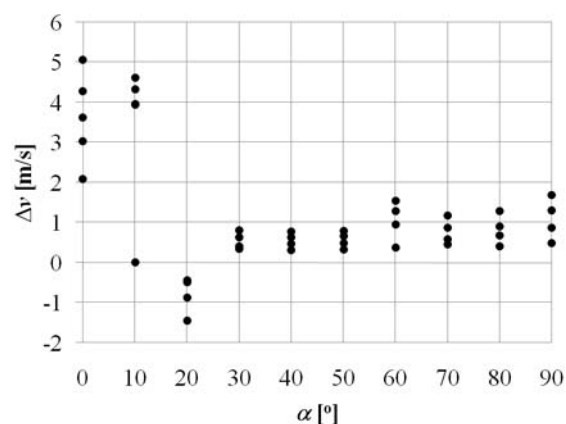
Слика 7.102 Верификација математичког модела АТР жалужине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.103 Верификација математичког модела АТР жалужине типа С (Δv у функцији α)



Слика 7.104 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})

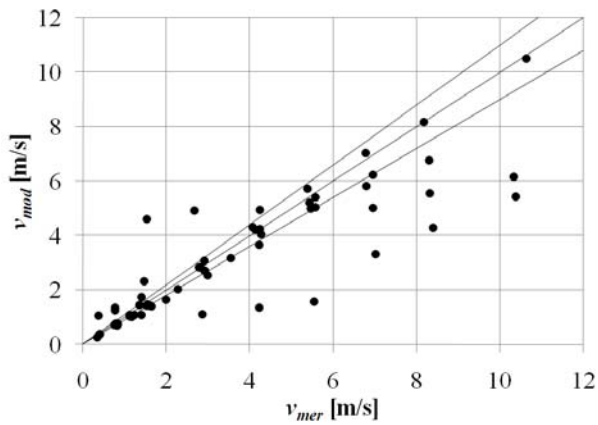


Слика 7.105 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (Δv у функцији α)

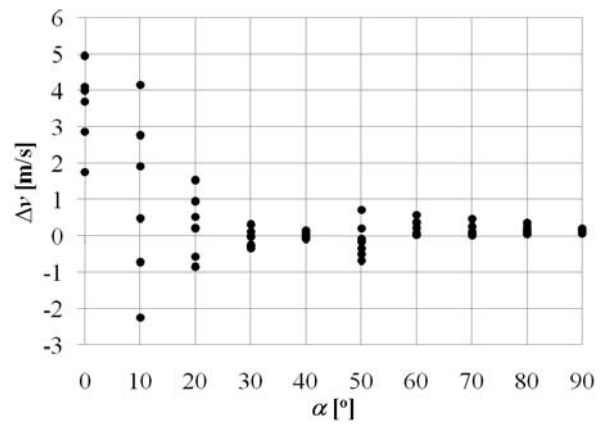
За случај када се АТР жалузина налази на крају цевоводу, а математички модел не узима у обзир хистерезис жалузине, уочава се иста тенденција као и када се жалузина налази у цевоводу. При отворенијој жалузини (нападни угао мерне лопатице од 0° до 30°) постоји значајан утицај локалног отпора испред жалузине на адекватност математичког модела и тачност мерења. За нападне углове мерне лопатице веће од 30° утицај локалног отпора испред жалузине постаје мање значајан, изузев код АТР жалузине типа С, где је утицај локалног отпора испред жалузине значајан у целом мерном опсегу, *слика 7.103*. Када математички модел не узима у обзир хистерезис АТР жалузине, приказани подаци не могу да укажу на то да постоји значајнија разлика у утицају локалног отпора испред жалузине, за случајеве када се жалузина налази у цевоводу и када се жалузина налази на крају цевовода.

7.12.2 Утицај локалног отпора узимањем у обзир хистерезиса АТР жалузине

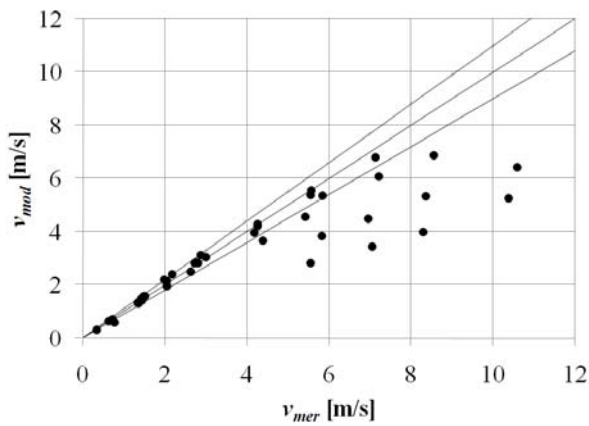
Утицај локалног отпора на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузине одређен је постављањем челичног лима у жљеб нормално на раван канала, тако да је светли пресек канала смањен за 50 %. Код АТР жалузине смештених у цевоводу мерења су урађена прво постављањем плоче у жљеб на растојању 0,5 m испред жалузине. Након мерења плоча је извађена и жљеб испред АТР жалузине је затворен. Жљеб на растојању 0,5m иза АТР жалузине је отворен, плоча је постављена у њега, а затим су урађена мерења параметара рада жалузине. Код АТР жалузине смештених на крају цевовода мерења су урађена постављањем плоче у жљеб који се налази на растојању 0,5m испред жалузине. Измерене брзине са присутним локалним отпором у ваздушној струји су затим упоређене са брзином добијеном из математичког модела АТР жалузине којим је узет у обзир хистерезис жалузине. На *сликама* од 7.106 до 7.113 приказан је утицај локалног отпора постављеног испред АТР жалузине која је смештена у цевоводу. Са леве стране дате су *слике* 7.106, 7.108, 7.110 и 7.112 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказано поређење измеренеи моделске брзине струјања ваздуха. Са десне стране дате су *слике* 7.107, 7.109, 7.111 и 7.113 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказана разлика измеренеи моделске брзине струјања ваздуха у функцији нападног угла лопатице.



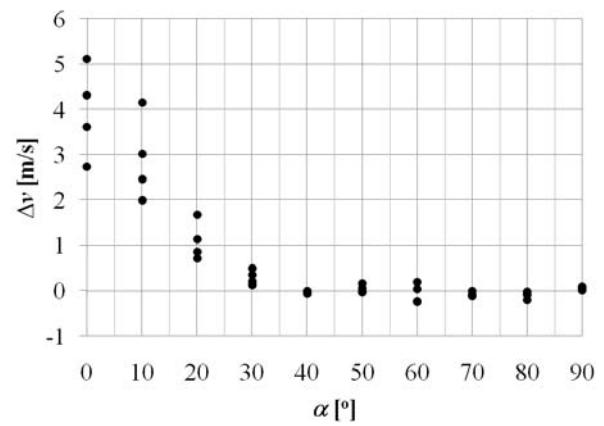
Слика 7.106 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



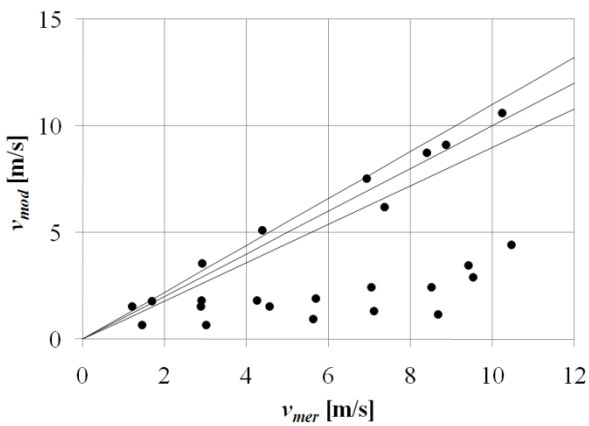
Слика 7.107 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (Δv у функцији α)



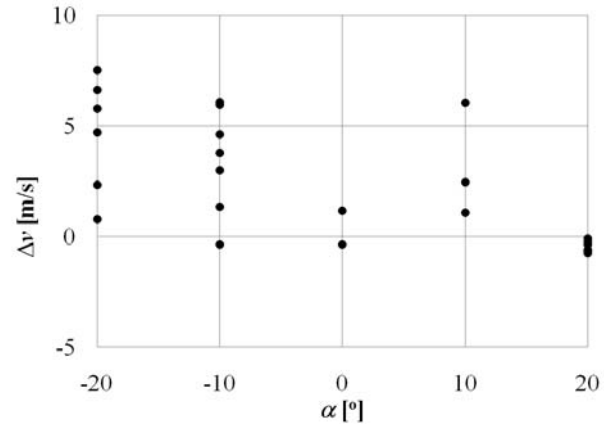
Слика 7.108 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



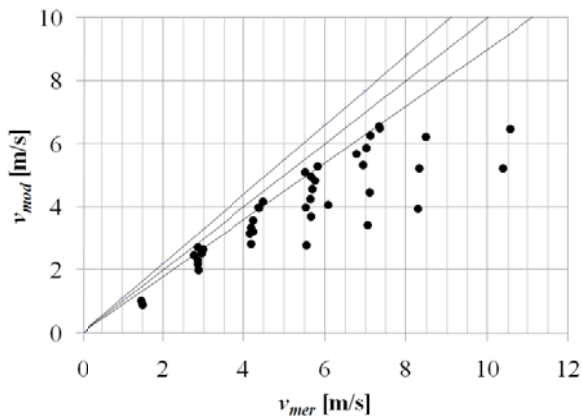
Слика 7.109 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (Δv у функцији α)



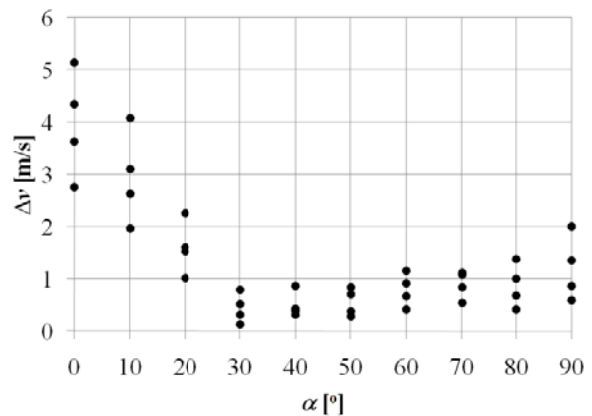
Слика 7.110 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.111 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (Δv у функцији α)



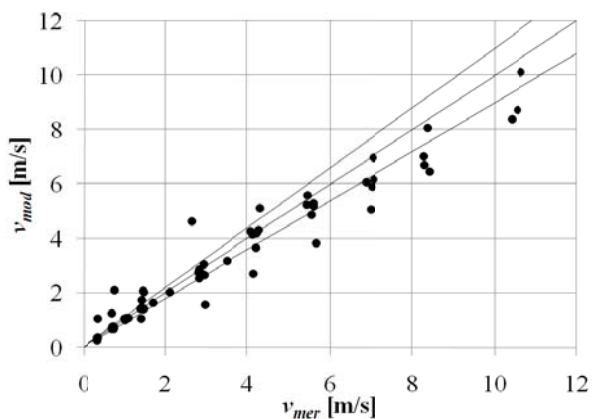
Слика 7.112 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



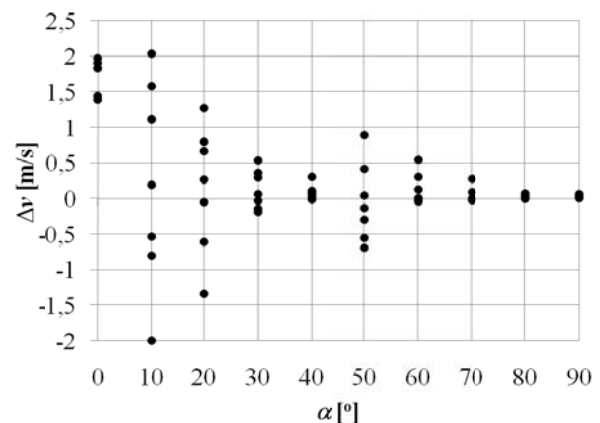
Слика 7.113 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (Δv у функцији α)

На сликама од 7.114 до 7.121 приказан је утицај локалног отпора постављеног иза АТР жалузине која је смештена у цевоводу. Са леве стране дате су слике 7.114, 7.116, 7.118 и 7.120 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказано поређење измерене и моделске брзине струјања ваздуха. Са десне стране дате су слике 7.115, 7.117, 7.119 и 7.121 на којима је за сваки тип АТР жалузине приказана разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха у функцији нападног угла лопатице.

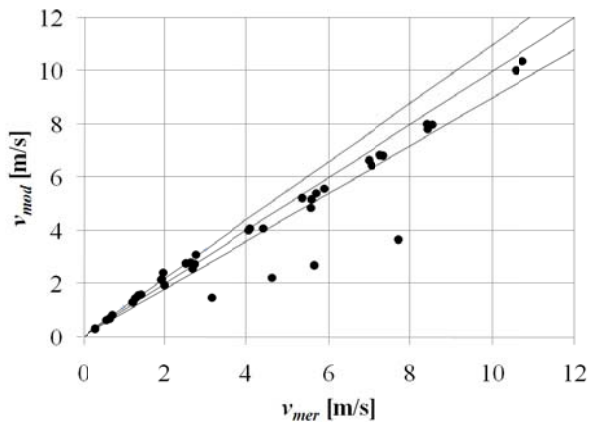
За случај када се АТР жалузина налази у цевоводу а математички модел узима у обзир хистерезис, може да се уочи иста тенденција као у случају када се АТР жалузина налази у цевоводу а математички модел не узима у обзир хистерезис. При отворенијој жалузини (нападни угао мерне лопатице од 0° до 30°) постоји значајан утицај локалног отпора испред жалузине на адекватност математичког модела и тачност мерења. За нападне углове мерне лопатице веће од 30° утицај локалног отпора испред жалузине постаје мање значајан, изузев код АТР жалузине типа С, где је утицај локалног отпора испред жалузине значајан у целом мерном опсегу, слика 7.111.



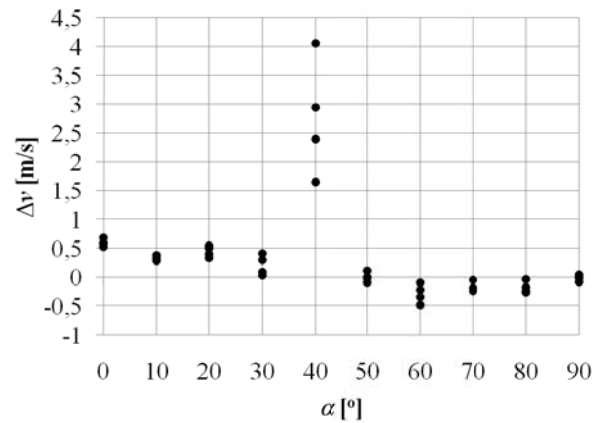
Слика 7.114 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



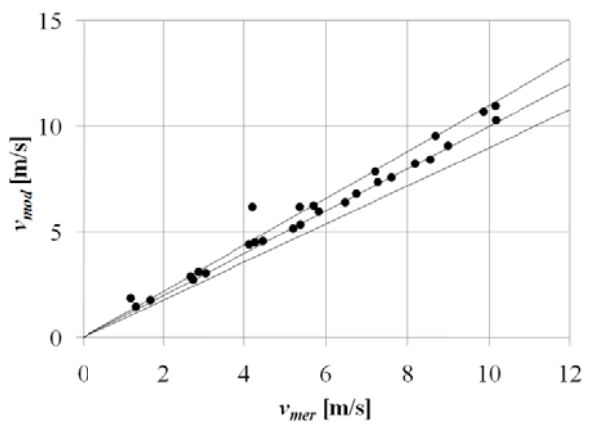
Слика 7.115 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А (Δv у функцији α)



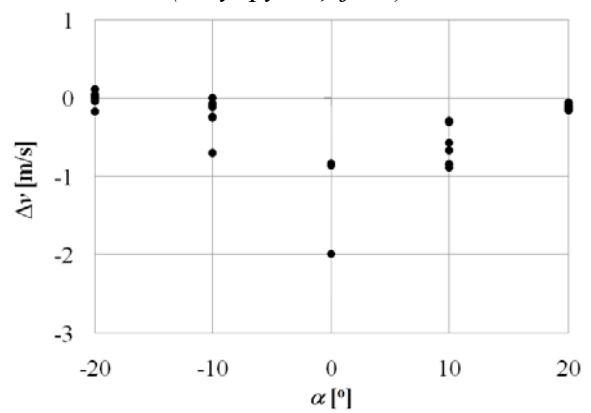
Слика 7.116 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



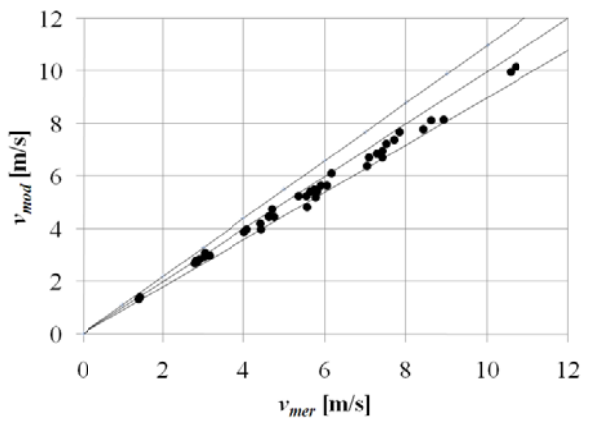
Слика 7.117 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В (Δv у функцији α)



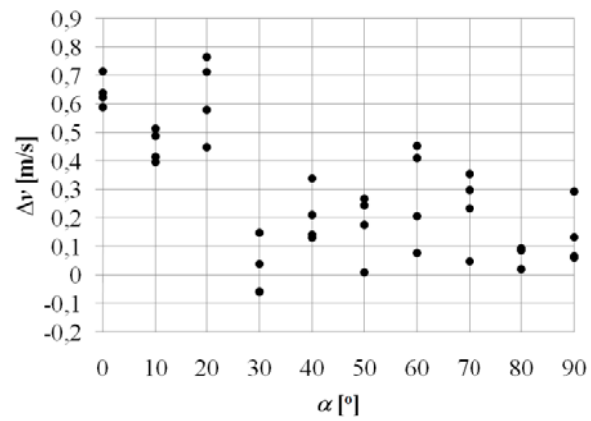
Слика 7.118 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.119 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (Δv у функцији α)



Слика 7.120 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



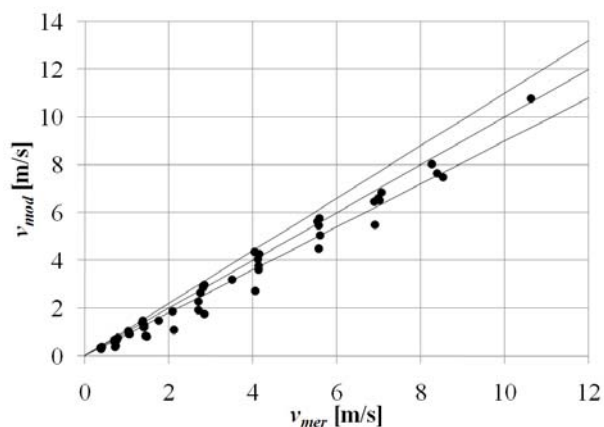
Слика 7.121 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (Δv у функцији α)

Утицај локалног отпора иза АТР жалузине на адекватност математичког модела и тачност мерења је знатно мањи у односу на утицај локалног отпора испред жалузине, па и при отворенијој жалузини. Овакву тенденцију показује чак и АТР жалузина типа С, код које разлика између измерене и моделске брзине струјања ваздуха иде ван дефинисаних граница само при скроз отвореној жалузини (нападни угао мерне лопатице 0°), слика 7.119. Генерално се стиче утисак да је утицај локалног отпора било

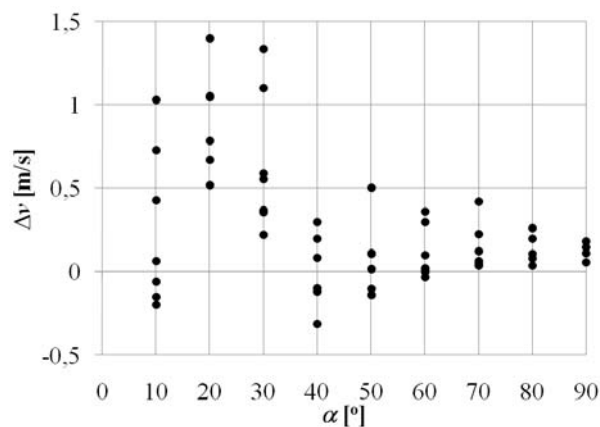
испред или иза жалужине нешто већи када математички модел узима у обзир хистерезис.

На сликама од 7.122 до 7.129 приказан је утицај локалног отпора постављеног испред АТР жалужине која је смештена на крају цевовода. Са леве стране дате су слике 7.122, 7.124, 7.126 и 7.128 на којима је за сваки тип АТР жалужине приказано поређење измеренеи моделске брзине струјања ваздуха. Са десне стране дате су слике 7.123, 7.125, 7.127 и 7.129 на којима је за сваки тип АТР жалужине приказана разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха у функцији нападног угла лопатице.

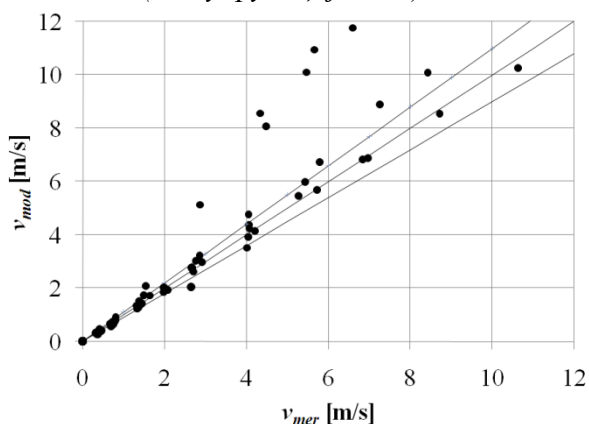
За случај када се АТР жалужина налази на крају цевоводу а математички модел узима у обзир хистерезис жалужине јавља се иста тенденција као када се АТР жалужина налази на крају цевоводу а математички модел не узима у обзир хистерезис. При отворенијој жалужини (нападни угао мерне лопатице од 0° до 30°) постоји значајан утицај локалног отпора испред жалужине на адекватност математичког модела и тачност мерења. За нападне углове мерне лопатице веће од 30° утицај локалног отпора испред жалужине постаје мањи, изузев код АТР жалужине типа С, где је утицај локалног отпора испред жалужине значајан у целом мерном опсегу, слика 7.127.



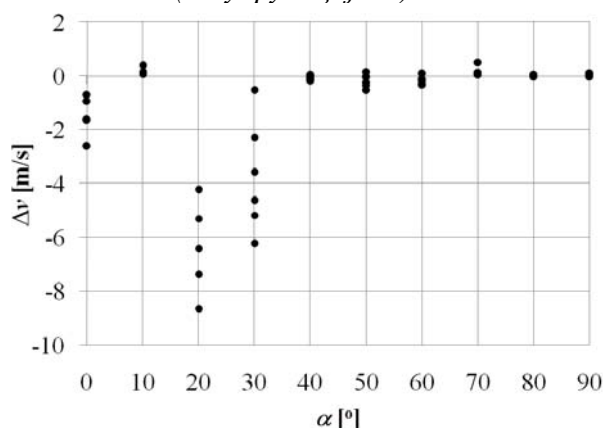
Слика 7.122 Верификација математичког модела АТР жалужине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



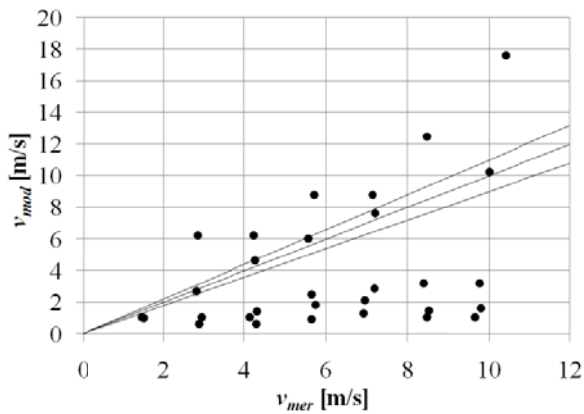
Слика 7.123 Верификација математичког модела АТР жалужине типа А (Δv у функцији α)



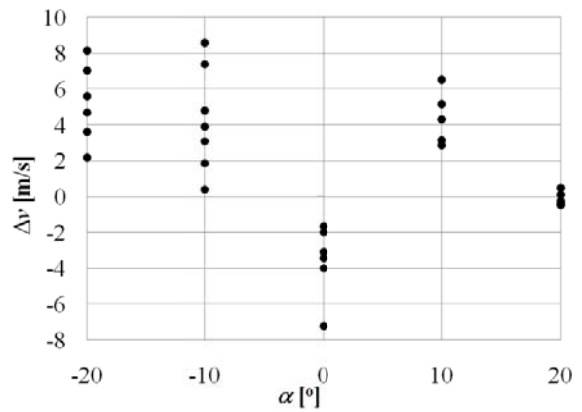
Слика 7.124 Верификација математичког модела АТР жалужине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



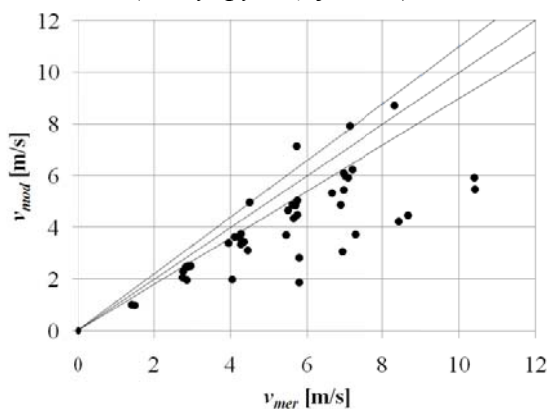
Слика 7.125 Верификација математичког модела АТР жалужине типа В (Δv у функцији α)



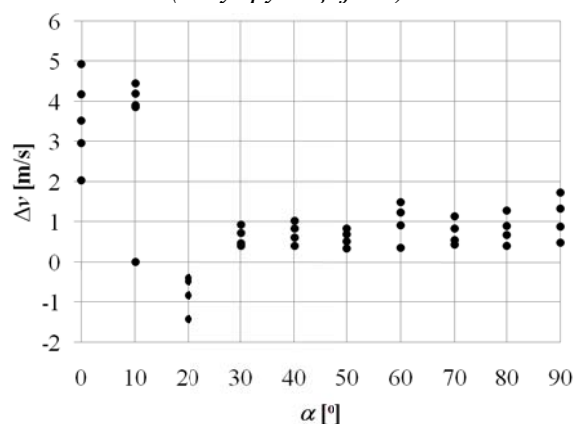
Слика 7.126 Верификација математичког модела АТР жалужине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.127 Верификација математичког модела АТР жалужине типа С (Δv у функцији α)



Слика 7.128 Верификација математичког модела АТР жалужине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.129 Верификација математичког модела АТР жалужине типа D (Δv у функцији α)

За случај када математички модел узима у обзир хистерезис АТР жалужине, приказани подаци не могу да укажу на то да постоји значајнија разлика у утицају локалног отпора за случајеве када се жалужина налази у цевоводу и када се налази жалужина налази на крају цевовода.

7.13 Утицај густине на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалужином

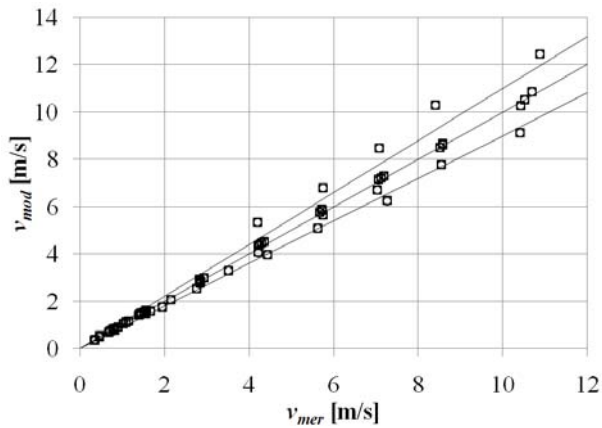
Корекција математичког модела (4.24) услед промене густине ваздуха повлачи за собом постојање три додатна сензора на АТР жалужини: термометра, манометра и барометра. Неопходност постојања три додатна сензора сагледана је анализом утицај натпритиска, температуре и атмосферског притиска ваздушне струјена адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалужином.

7.13.1 Утицај натпритиска ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалужином

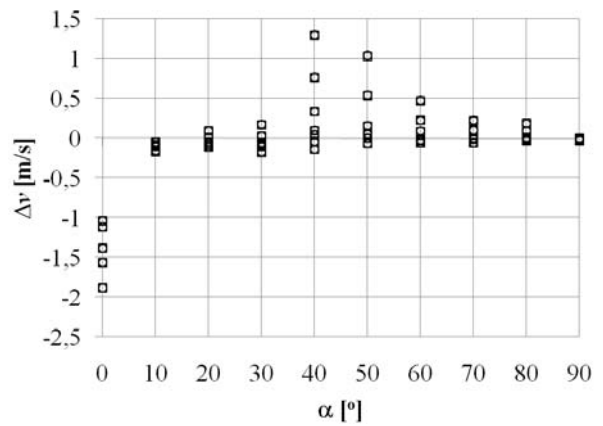
Утицај натпритиска ваздушне струје сагледан је коришћењем измерених података. За анализу је коришћено поређење измерене и моделске брзине струјања ваздуха за два случаја: случај када је натпритисак испред АТР жалужине узет у обзир при одређивању

густине ваздушне струје (симбол “○”) и случај када натпритисак испред АТР жалужине није узет у обзир при одређивању густине ваздушне струје (симбол “□”).

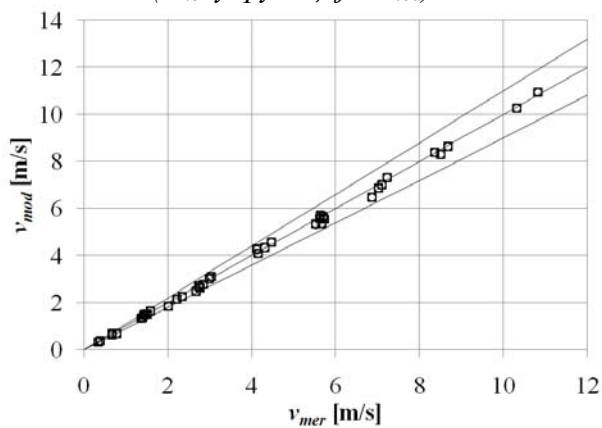
На сликама од 7.130 до 7.137 приказани су резултати анализе за случај када се АТР жалужина налази у цевоводу, док су на сликама од 7.138 до 7.145 приказани резултати анализе за случај када се АТР жалужина налази на крају цевовода.



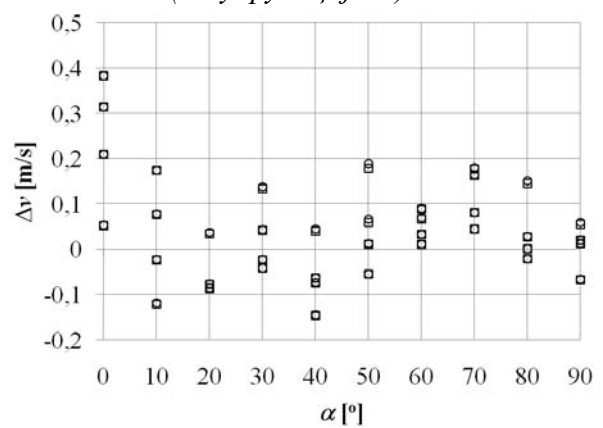
Слика 7.130 Верификација математичког модела АТР жалужине типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



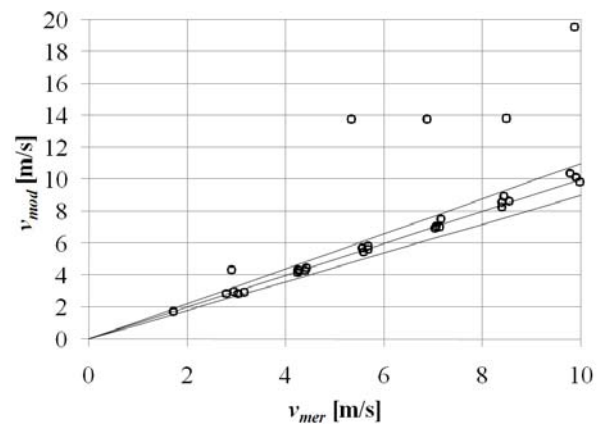
Слика 7.131 Верификација математичког модела АТР жалужине типа А (Δv у функцији α)



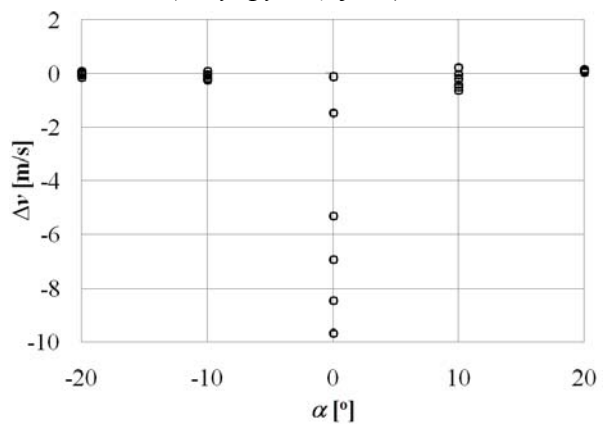
Слика 7.132 Верификација математичког модела АТР жалужине типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



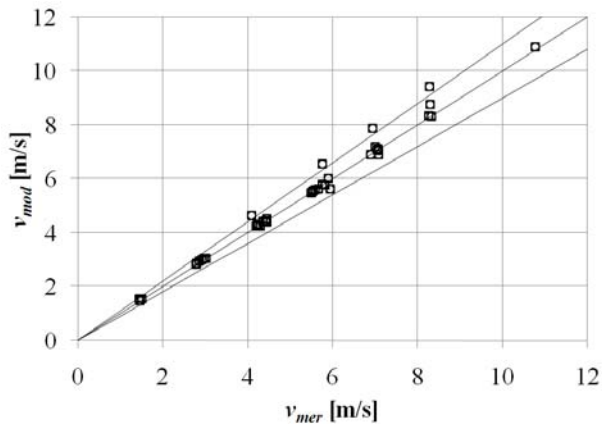
Слика 7.133 Верификација математичког модела АТР жалужине типа В (Δv у функцији α)



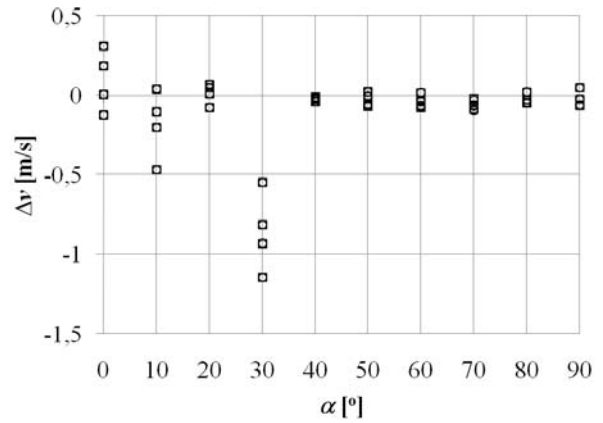
Слика 7.134 Верификација математичког модела АТР жалужине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



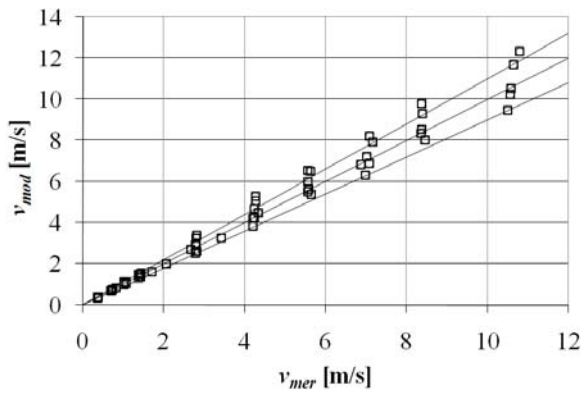
Слика 7.135 Верификација математичког модела АТР жалужине типа С (Δv у функцији α)



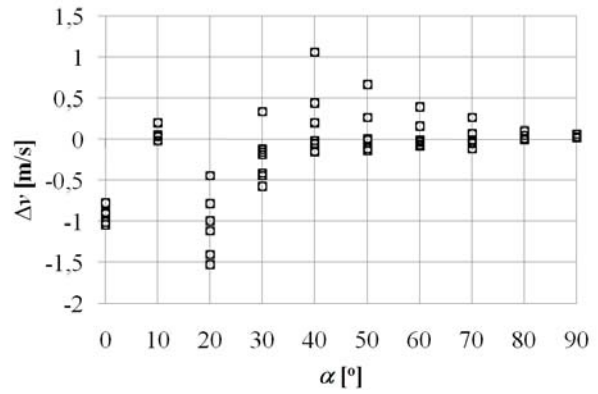
Слика 7.136 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



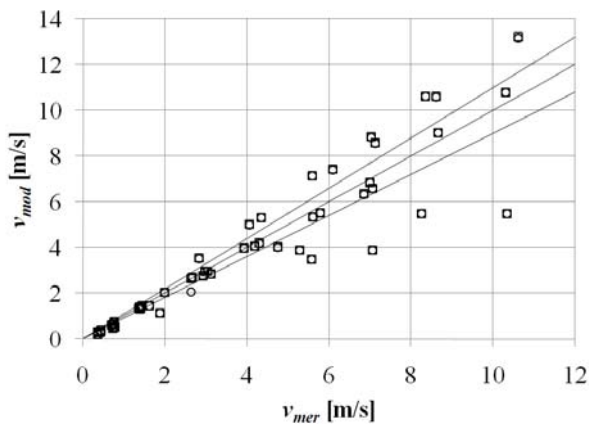
Слика 7.137 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (Δv у функцији α)



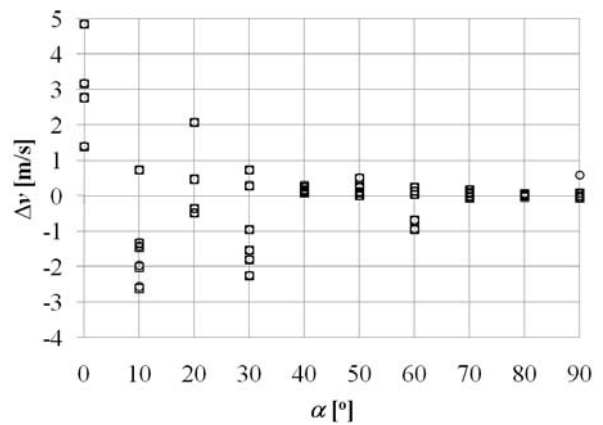
Слика 7.138 Верификација математичког модела АТР жалузине типа A (v_{mer} у функцији v_{mod})



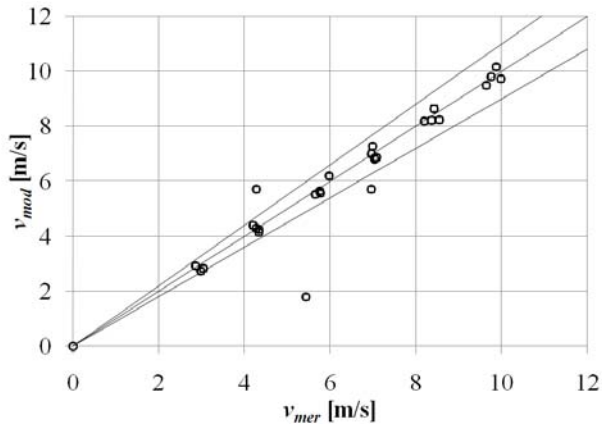
Слика 7.139 Верификација математичког модела АТР жалузине типа A (Δv у функцији α)



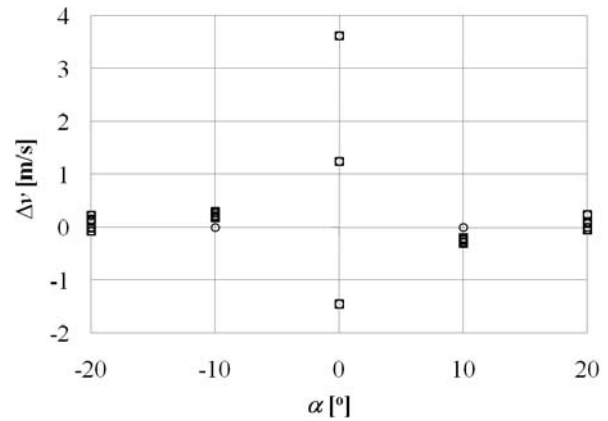
Слика 7.140 Верификација математичког модела АТР жалузине типа B (v_{mer} у функцији v_{mod})



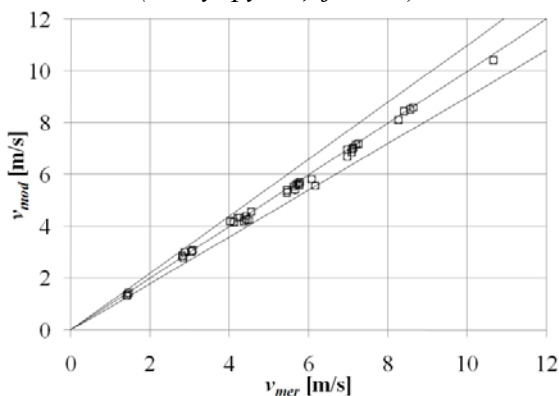
Слика 7.141 Верификација математичког модела АТР жалузине типа B (Δv у функцији α)



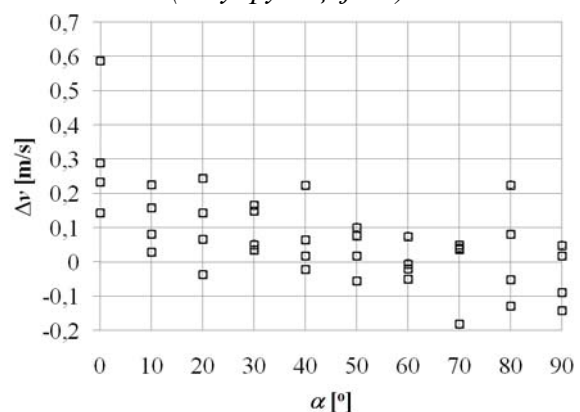
Слика 7.142 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.143 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (Δv у функцији α)



Слика 7.144 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.145 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D (Δv у функцији α)

Може да се уочи да је за оба дефинисана положаја АТР жалузина на систему и за све разматране типове АТР жалузина утицај натпритиска ваздушне струје занемарљив. Употпуности долази до поклапања резултата мерења без обзира да ли се узима или се не узима у обзир натпритисак при рачунању густине ваздушне струје. Мали утицај натпритиска се на неки начин и очекивао. Највише вредности натпритисака ваздушне струје испред мерне лопатице кретале су се до свега пар стотина Паскала, а познато је из литературе (ANSI/AMCA 500 D, 2007) да при натпритисцима ваздушне струје нижим од 1000 Pa утицај натпритиска на густину ваздушне струје може да се занемари. На овај начин потврђена је претпоставка од великог значаја, јер АТР жалузине није потребан манометар за мерење натпритиска ваздушне струје испред мерне лопатице.

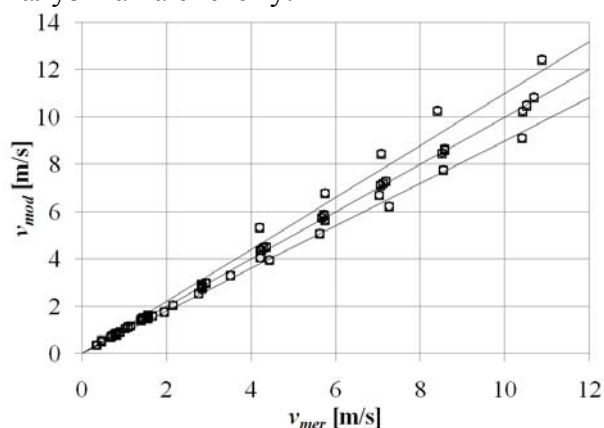
7.13.2 Утицај атмосферског притиска на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалужином

Утицај атмосферског притиска ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалужином сагледан је коришћењем измерених података. За анализу је коришћено поређење измерене и моделске брзине струјања ваздуха за два случаја: случај када је измерена вредност атмосферског притиска узета у обзир при одређивању густине ваздушне струје (симбол “o”) и случај када је измерена вредност атмосферског притиска није узета у обзир при одређивању густине ваздушне струје (симбол “□”). За други случај је густина ваздушне струје одређена тако да је на

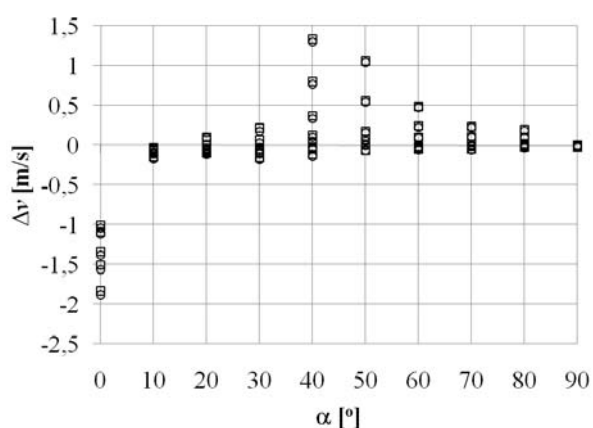
измерену вредност атмосферског притиска додата вредност од 10 mbar. На сликама од 7.146 до 7.153 приказани су резултати анализе за случај када се АТР жалузина налази у цевоводу, док су на сликама од 7.154 до 7.161 приказани резултати анализе за случај када се АТР жалузина налази на крају цевовода.

На основу анализе резултата мерења може да се закључи да положај АТР жалузине у систему и тип АТР жалузине не утичу на грешку мерења која настаје услед лоше процене атмосферског притиска. Услед грешке у процени атмосферског притиска ваздуха за 10 mbar долази до промене разлике измерене и моделске брзине струјања ваздуха од приближно 0,5 %. У поређењу са дефинисаним границама разлике измерене и моделске брзине за АТР жалузине, утицај грешке у процени атмосферског притиска од 10 mbar делује нижег реда.

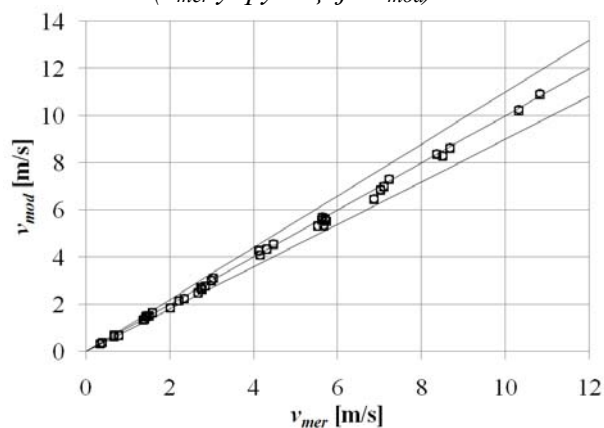
Како промена средњег дневног атмосферског притиска на месечном нивоу иде и до пар десетина милибара, потребно је радити корекцију математичког модела на основу измерене вредности атмосферског притиска. Олакшавајућа околност је та што атмосферски притисак не зависи од параметара ваздушне струје, већ од надморске висине и временских прилика. Довољно је имати само један барометар на HVAC систему, на коме се мери атмосферски притисак и са кога се шаље сигнал до свих АТР жалузина на систему.



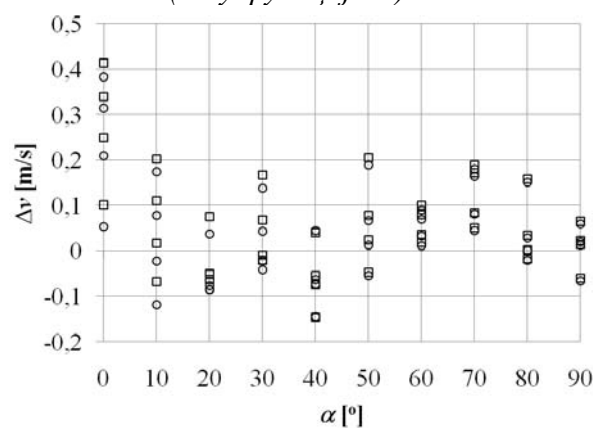
Слика 7.146 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А у цевоводу (v_{mer} у функцији v_{mod})



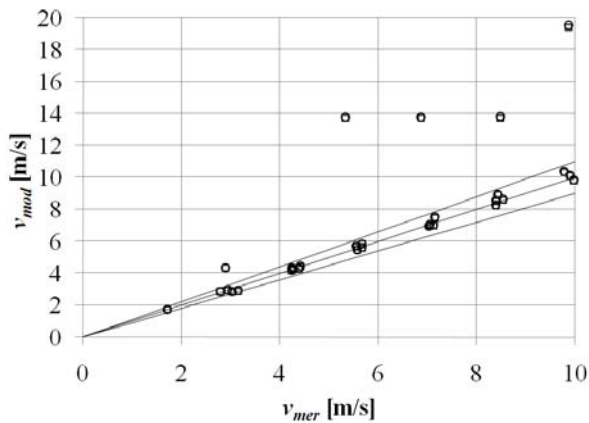
Слика 7.147 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А у цевоводу (Δv у функцији α)



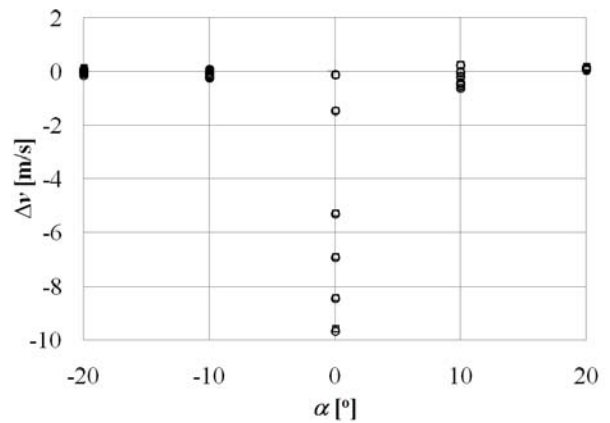
Слика 7.148 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В у цевоводу (v_{mer} у функцији v_{mod})



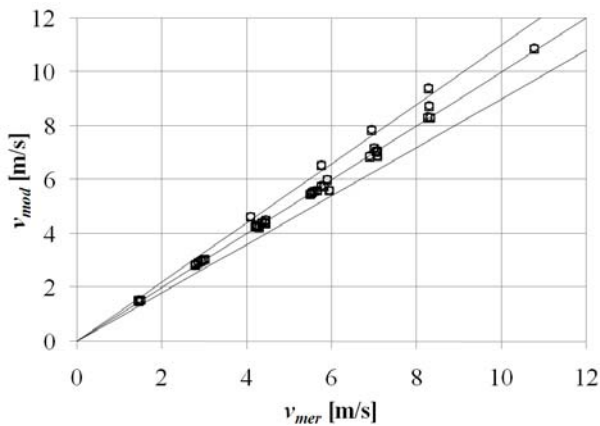
Слика 7.149 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В у цевоводу (Δv у функцији α)



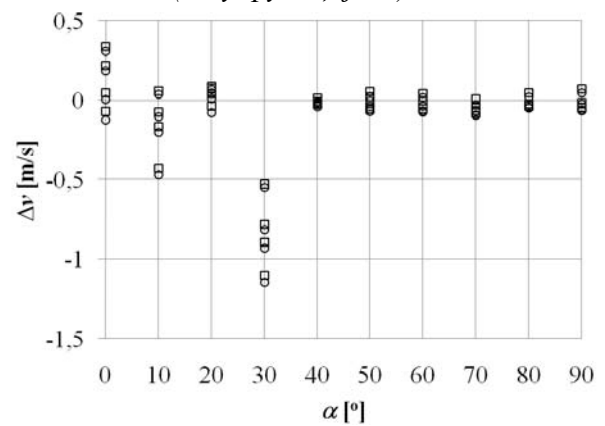
Слика 7.150 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С у цевоводу (v_{mer} у функцији v_{mod})



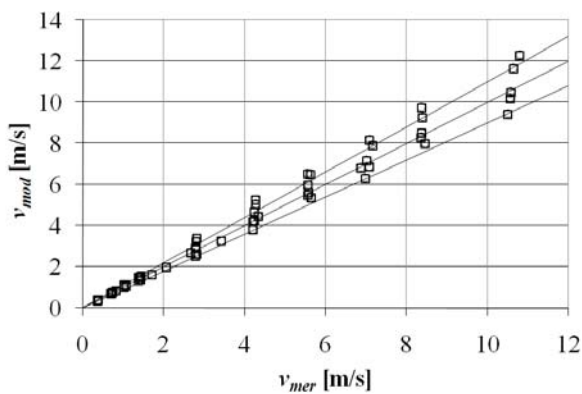
Слика 7.151 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С у цевоводу (Δv у функцији α)



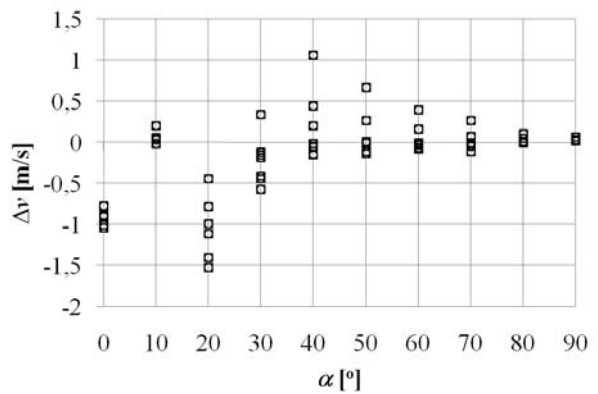
Слика 7.152 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D у цевоводу (v_{mer} у функцији v_{mod})



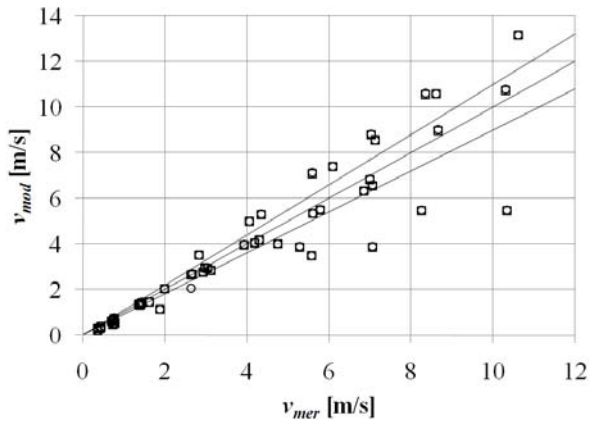
Слика 7.153 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D у цевоводу (Δv у функцији α)



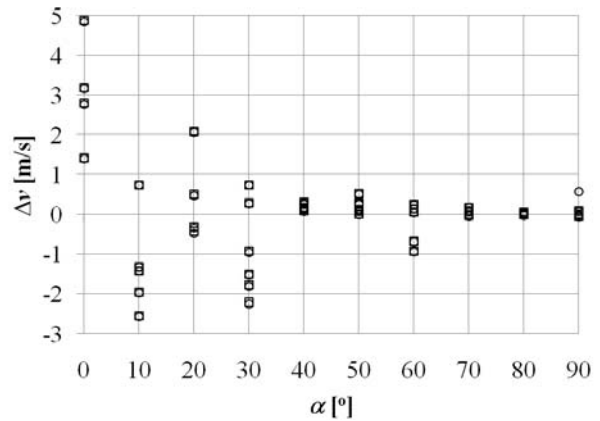
Слика 7.154 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А на крају цевовада (v_{mer} у функцији v_{mod})



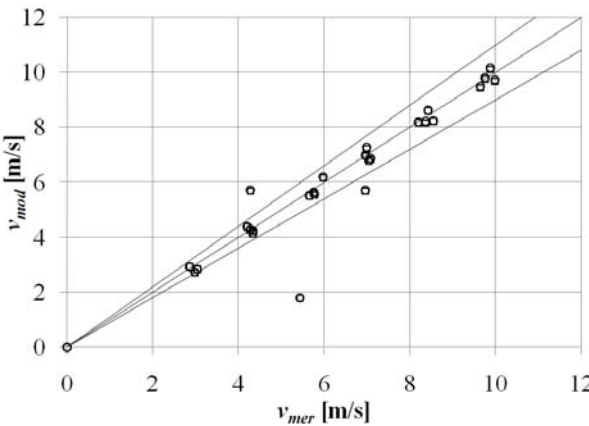
Слика 7.155 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А на крају цевовада (Δv у функцији α)



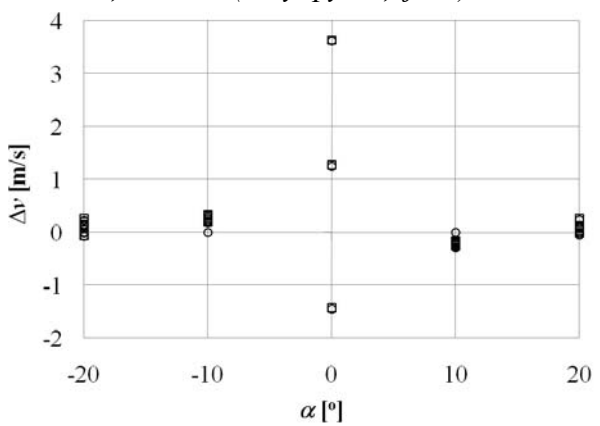
Слика 7.156 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В на крају цевовда (v_{mer} у функцији v_{mod})



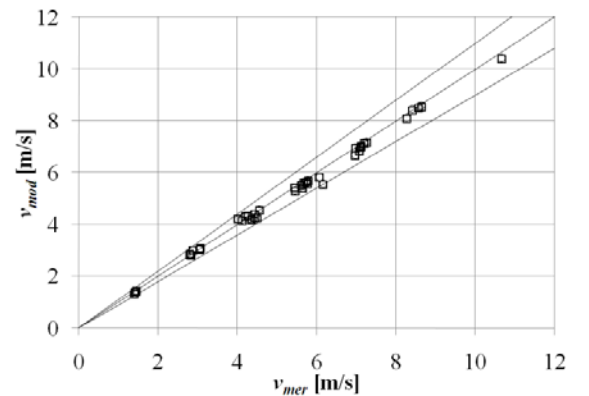
Слика 7.157 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В на крају цевовода (Δv у функцији α)



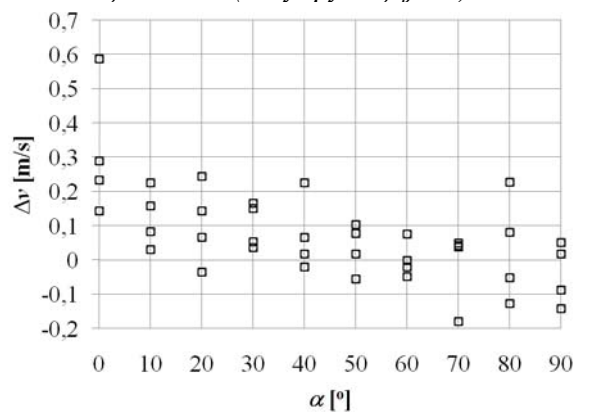
Слика 7.158 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С на крају цевовда (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.159 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С на крају цевовода (Δv у функцији α)



Слика 7.160 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D на крају цевовда (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.161 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D на крају цевовода (Δv у функцији α)

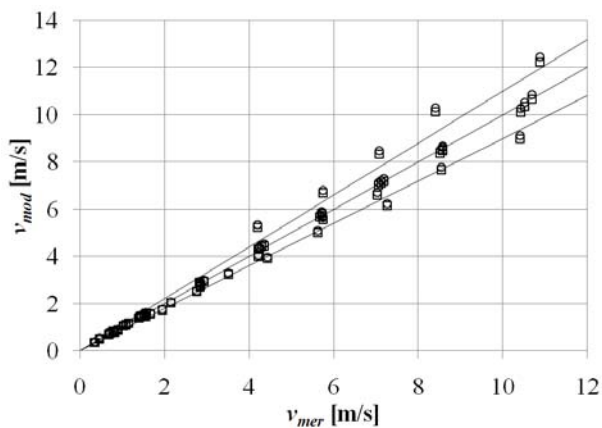
7.13.3 Утицај температуре ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузином

Утицај температуре ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузином сагледан је коришћењем измерених података. За анализу је коришћено поређење измерене и моделске брзине струјања ваздуха за два случаја:

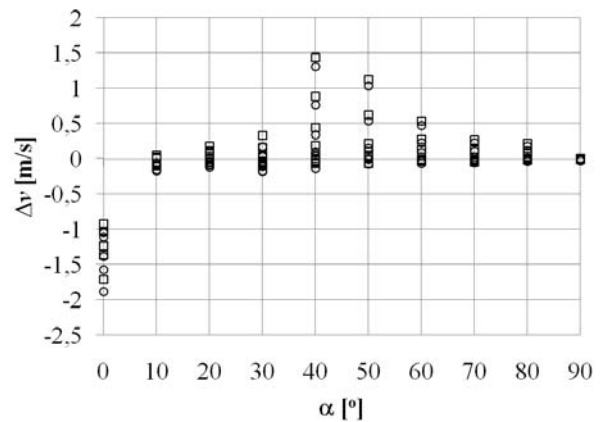
случај када је измерена вредност температуре узета у обзир при одређивању густине ваздушне струје (симбол “○”) и случај када измерена вредност температуре није узета у обзир при одређивању густине ваздушне струје (симбол “□”). За други случај је густина ваздушне струје одређена тако што је од измерене вредности температуре одузета температура од 10 °C.

На сликама од 7.162 до 7.169 приказани су резултати анализе за случај када се АТР жалузина налази у цевоводу, док су на сликама од 7.170 до 7.177 приказани резултати анализе за случај када се АТР жалузина налази на крају цевовода.

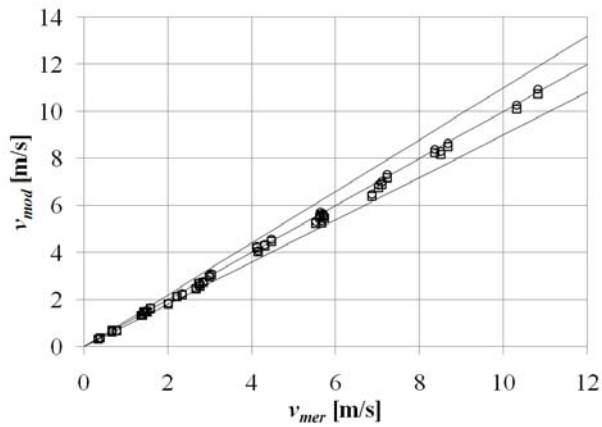
На основу анализе резултата мерења може да се закључи да положај АТР жалузине у систему и тип АТР жалузине не утичу на грешку мерења која настаје услед лоше процене температуре ваздушне струје. Услед грешке у процени температуре за 10 °C долази до промене разлике измерене и моделске брзине струјања ваздуха за приближно 2 %. Уочена промена је и даље нижег реда величине од дефинисаних граница разлике измерене и моделске брзине струјања ваздуха. Међутим, ако се узме у обзир да разлика температуре ваздуха између летњег и зимског периода може да буде и до $\Delta t = 60$ °C (случај жалузине у каналу за убацивање свежег ваздуха на HVAC системима), тада може да се закључи да лоша процена температуре ваздушне струје може значајно да утиче на адекватност модела и тачност мерења брзине струјања ваздуха АТР жалужином. Из тог разлога испред мерне лопатнице АТР жалузине мора да постоји температурна сонда која ће мерити температуру ваздушне струје, на основу чије вредности ће се кориговати математички модел.



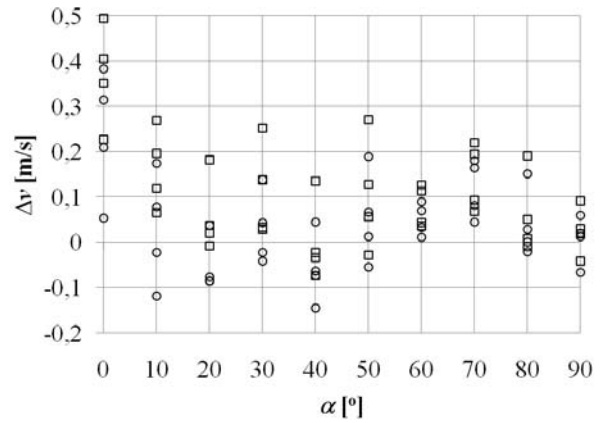
Слика 7.162 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А у цевоводу (v_{mer} у функцији v_{mod})



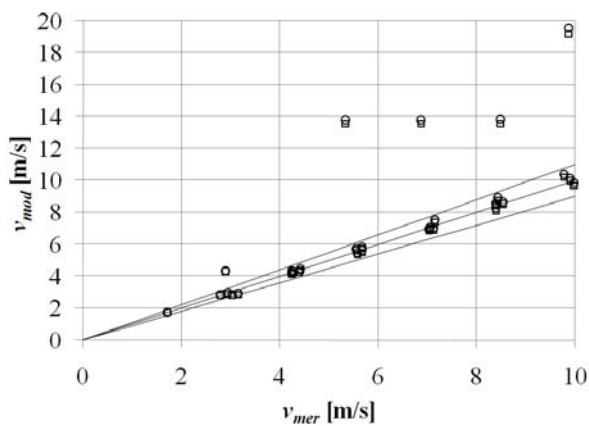
Слика 7.163 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А у цевоводу (Δv у функцији α)



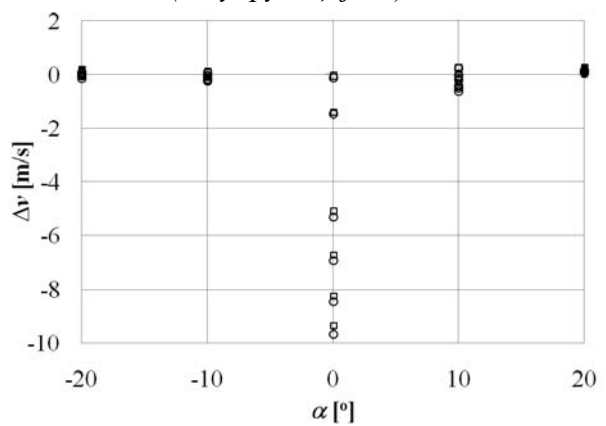
Слика 7.164 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В у цевоводу (v_{mer} у функцији v_{mod})



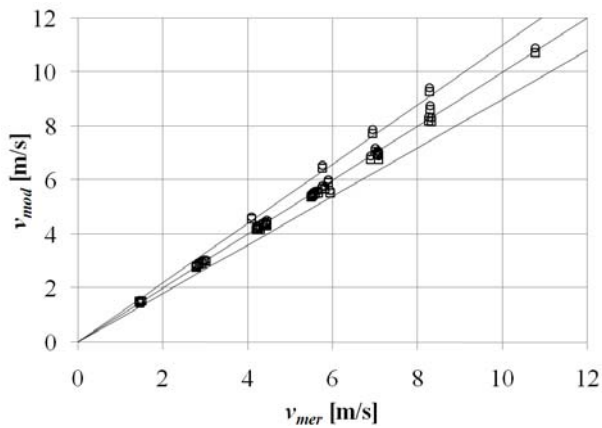
Слика 7.165 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В у цевоводу (Δv у функцији α)



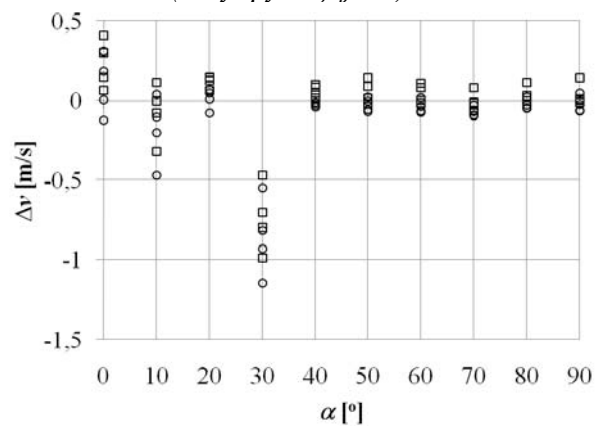
Слика 7.166 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С у цевоводу (v_{mer} у функцији v_{mod})



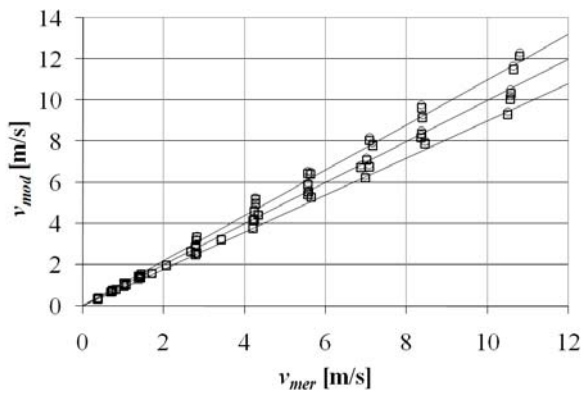
Слика 7.167 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С у цевоводу (Δv у функцији α)



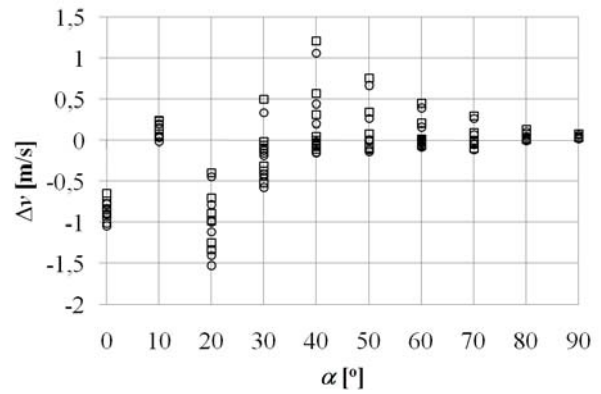
Слика 7.168 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D у цевоводу (v_{mer} у функцији v_{mod})



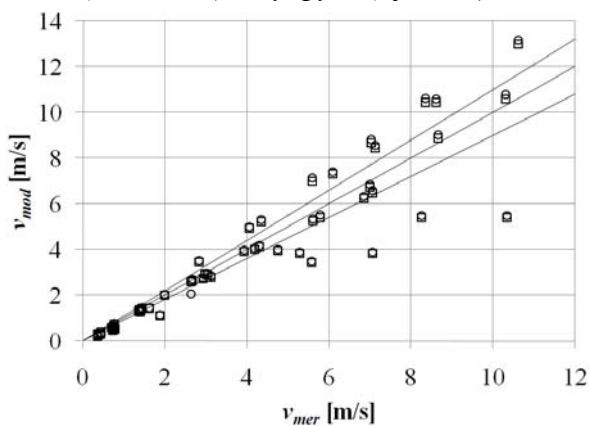
Слика 7.169 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D у цевоводу (Δv у функцији α)



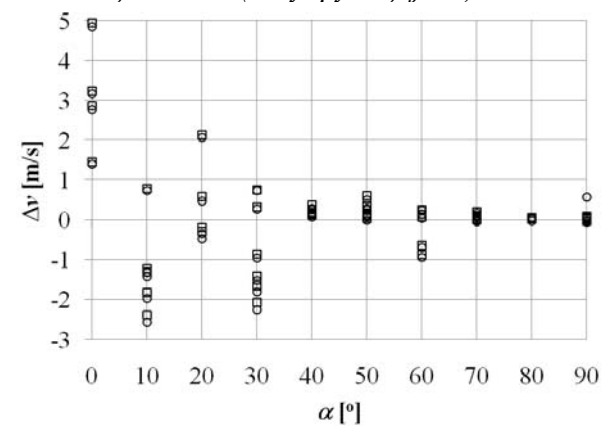
Слика 7.170 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А на крају цевовода (v_{mer} у функцији v_{mod})



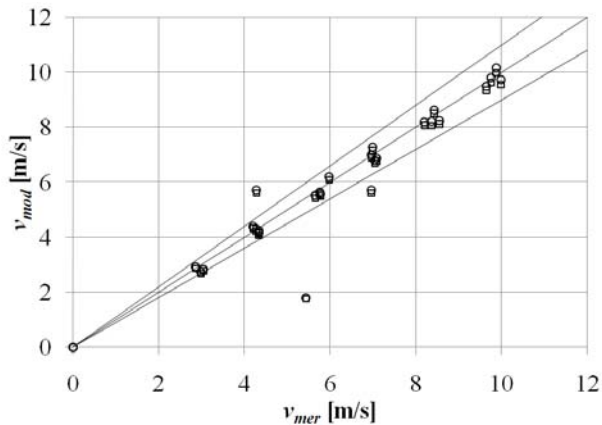
Слика 7.171 Верификација математичког модела АТР жалузине типа А на крају цевовода (Δv у функцији α)



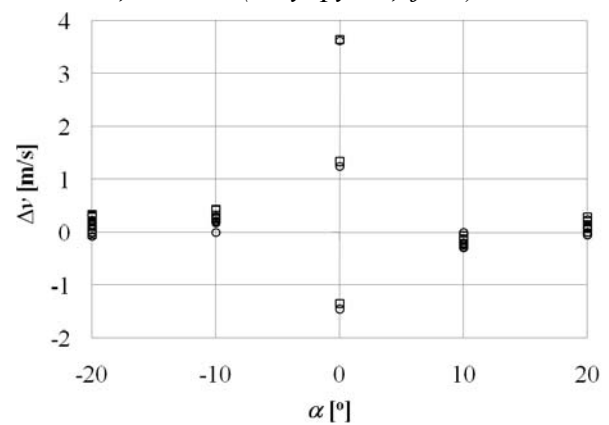
Слика 7.172 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В на крају цевовода (v_{mer} у функцији v_{mod})



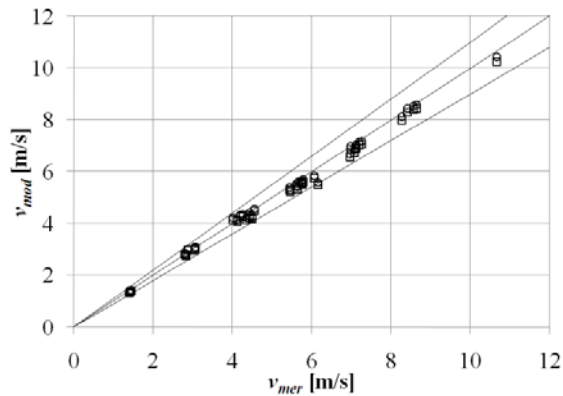
Слика 7.173 Верификација математичког модела АТР жалузине типа В на крају цевовода (Δv у функцији α)



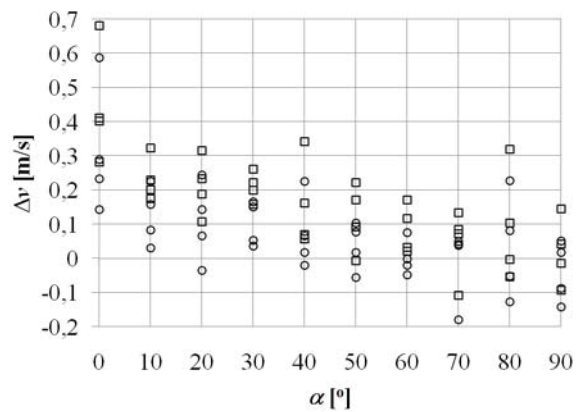
Слика 7.174 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С на крају цевовода (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.175 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С на крају цевовода (Δv у функцији α)



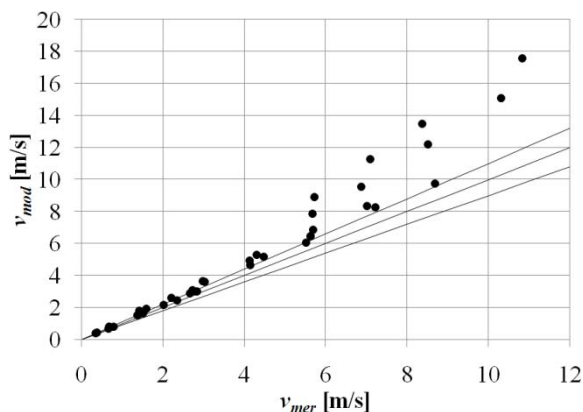
Слика 7.176 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D на крају цевовода (v_{mer} у функцији v_{mod})



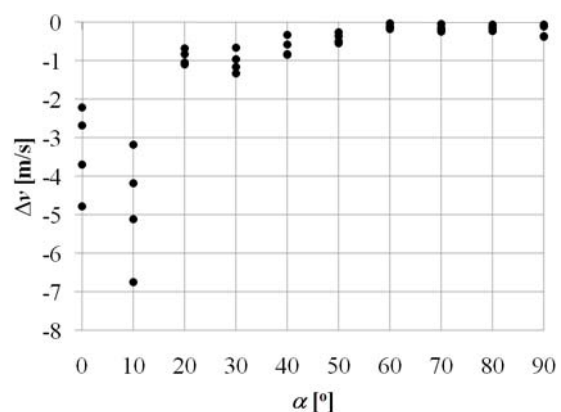
Слика 7.177 Верификација математичког модела АТР жалузине типа D на крају цевовода (Δv у функцији α)

7.14 Утицај ауторитета на адекватност математичког модела и тачност мерења АТР жалузином

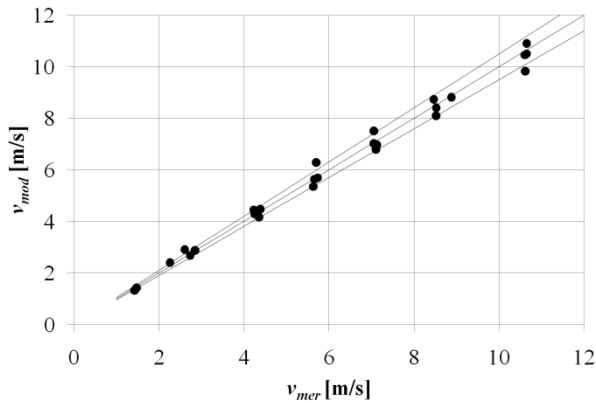
Урађена су мерења параметара рада АТР жалузина типа В и С са грејачем и без грејача на лабораторијском постројењу. На овај начин добијена су за сваки од ова два испитивана типа жалузина два низа независних података, за две различите вредности ауторитета жалузине. Један низ података коришћен је за математичко моделирање, док је други низ података коришћен за верификацију математичког модела. На сликама од 7.178 до 7.181 приказани су резултати верификације математичког модела. На сликама лево приказано је поређење измерене и моделске брзине струјања ваздуха, док је на сликама десно приказана разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха у функцији нападног угла мерне лопатице.



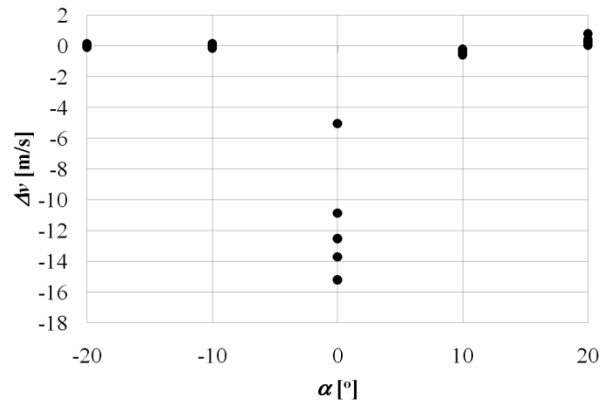
Слика 7.178 Верификација математичког модела АТР жалузине типа B (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.179 Верификација математичког модела АТР жалузине типа B (Δv у функцији α)



Слика 7.180 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 7.181 Верификација математичког модела АТР жалузине типа С (Δv у функцији α)

Анализом измерених притисака слике 7.7 и 7.8 уочљиво је да АТР жалузина типа В има највише вредности притиска испред мерне лопатице услед супротносмерног вођења лопатица, док АТР жалузина типа С има најниже вредности притиска испред мерне лопатице услед паралелног вођења лопатица. Овакви резултати потврда су резултата које су добили Бекелере и др. (Veselaere et al., 2005). Променом ауторитета АТР жалузине типа В која има супротносмерно вођење лопатица разлика измерене и моделске брзине иде ван дефинисаних граница $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха и то у готово целом опсегу мерења брзине. На овај начин математички модел АТР жалузине типа В постаје неадекватан, а мерење брзине струјања нетачно.

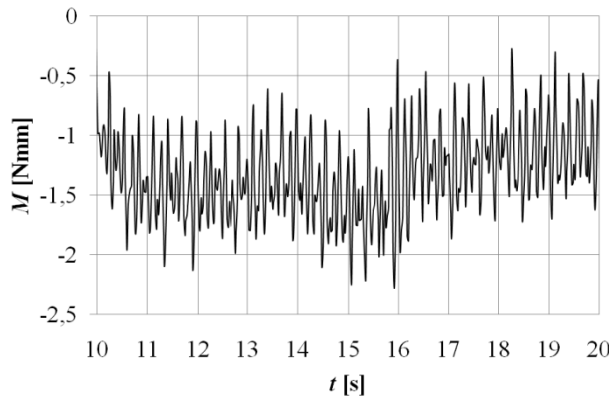
Променом ауторитета АТР жалузине типа С која има паралелно вођење лопатица разлика измерене и моделске брзине остаје у дефинисаним граница $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха, изузев кроз отворене жалужине (нападни угао мерне лопатице 0°). Променом ауторитета АТР жалузине типа С математички модел остаје адекватан, а мерење брзине струјања може да се сматра тачним. Закључује се да је утицај ауторитета на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања ваздуха знатно већи код АТР жалузина са супротносмерно вођеним лопатицама у односу на АТР жалужине са паралелним вођењем лопатица.

7.15 Расипање мерних резултата АТР жалузине

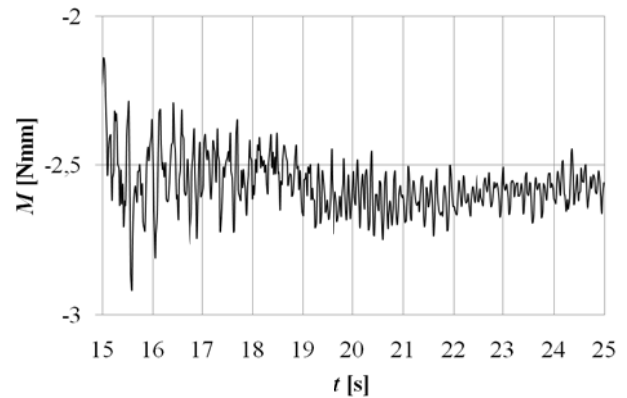
Први корак у одређивању непоузданости мерења брзине струјања АТР жалужином C_v према једначини (6.44) био је одређивање стандардног одступања мерења момента s_M и нападног угла мерне лопатице s_α према једначини (6.6). За одређивање стандардног одступања коришћен је већи број поновљених мерења ($n > 20$) при исти мерним условима.

За потребе одређивања стандардног одступања при мерењу момента коришћена је аквизиција података која је прикључена на персонални рачунар. Мерење момента снимано је током времена, где је број измерених вредности при истим условима мерења био и до пар хиљада. Континуирано мерење момента за сваки тип АТР жалузине урађено је за различите вредности брзина струјања ваздуха и при различитим вредностима нападног угла мерне лопатице.

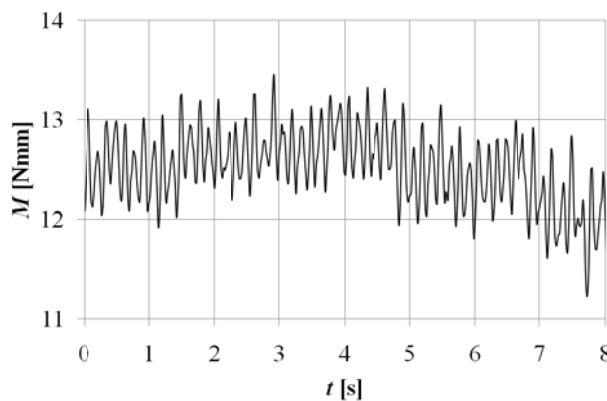
На сликама од 7.182 до 7.189 приказано је расипање измереног момента АТР жалузине типа А са променом брзине струјања и нападног угла мерне лопатице. Сlike са леве стране показују расипање измереног момента при брзини струјања ваздуха од 0,35 m/s, док слике са десне стране приказују расипање измереног момента при брзини струјања од 0,7 m/s.



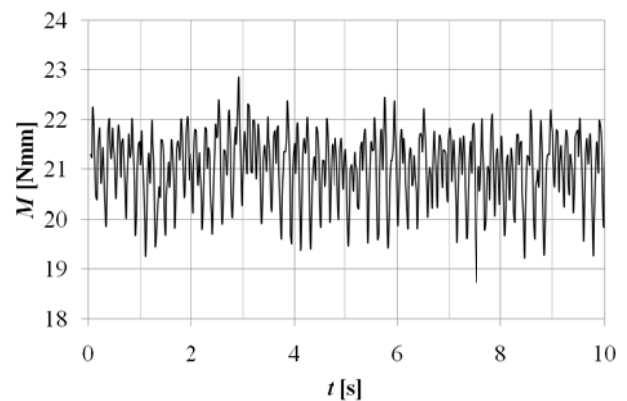
Слика 7.182 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа А при $\alpha = 0^\circ$ и $v = 0,35$ m/s



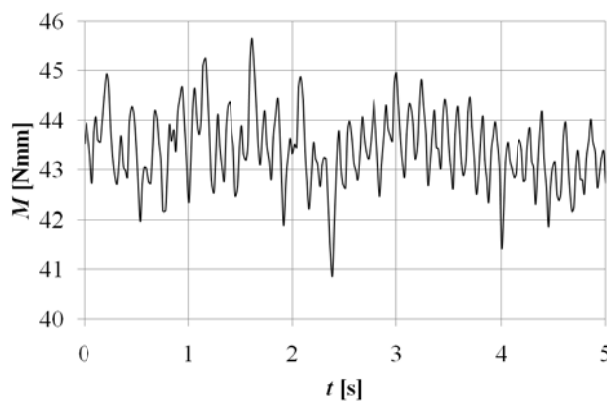
Слика 7.183 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа А при $\alpha = 0^\circ$ и $v = 0,7$ m/s



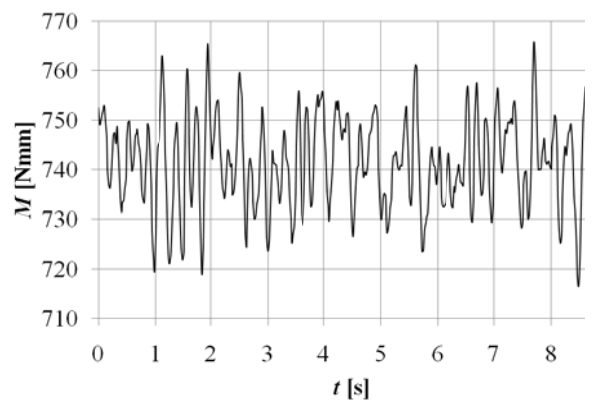
Слика 7.184 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа А при $\alpha = 30^\circ$ и $v = 0,35$ m/s



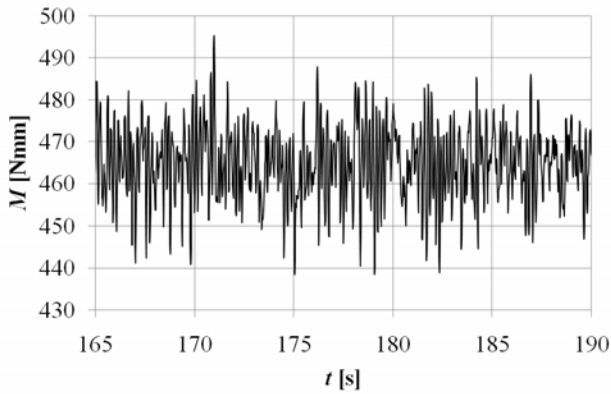
Слика 7.185 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа А при $\alpha = 30^\circ$ и $v = 0,7$ m/s



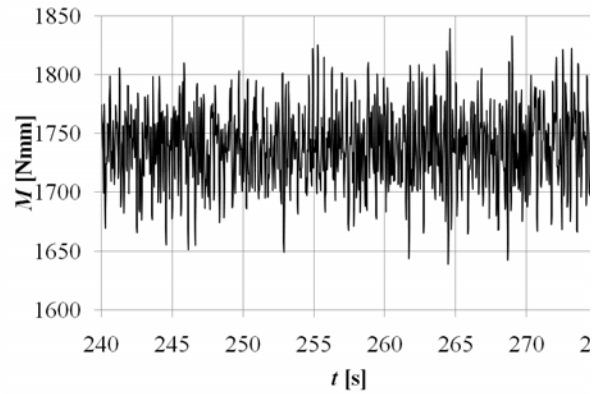
Слика 7.186 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа А при $\alpha = 60^\circ$ и $v = 0,35$ m/s



Слика 7.187 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа А при $\alpha = 60^\circ$ и $v = 0,7$ m/s

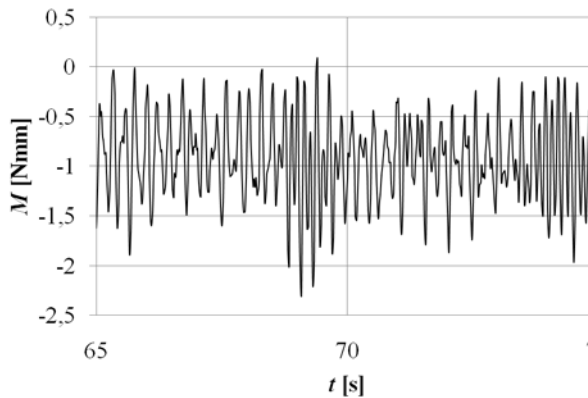


Слика 7.188 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа А при $\alpha = 90^\circ$ и $v = 0,35 \text{ m/s}$

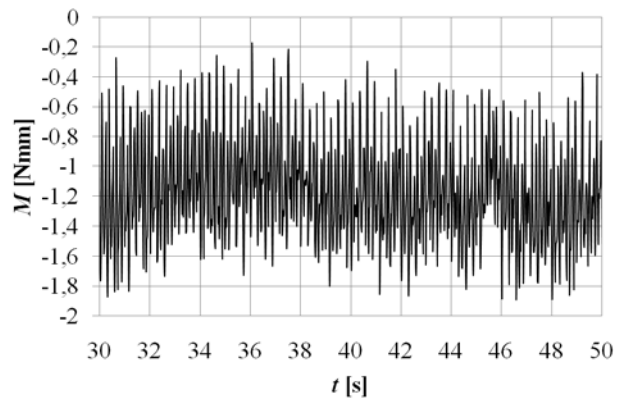


Слика 7.189 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа А при $\alpha = 90^\circ$ и $v = 0,7 \text{ m/s}$

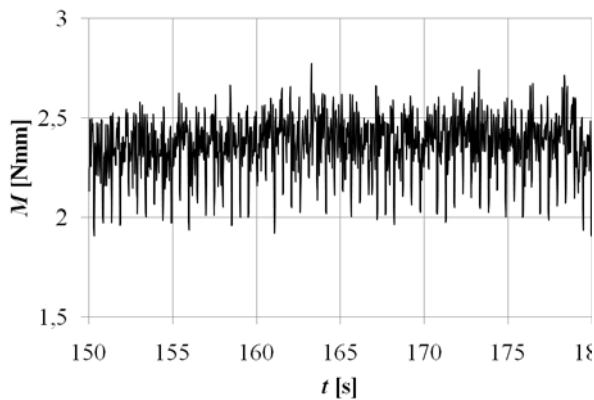
На сликама од 7.190 до 7.197 приказано је расипање измереног момента АТР жалузине типа В са променом брзине струјања и нападног угла мерне лопатице. Сlike са леве стране показују расипање измереног момента при брзини струјања ваздуха од 1,4 m/s, док слике са десне стране приказују расипање измереног момента при брзини струјања од 2,8 m/s.



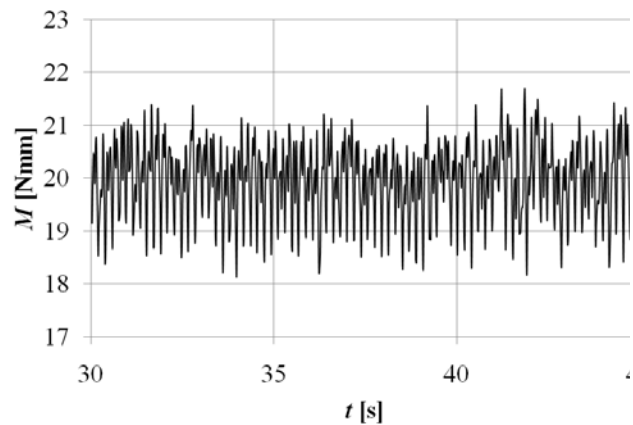
Слика 7.190 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа В при $\alpha = 0^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$



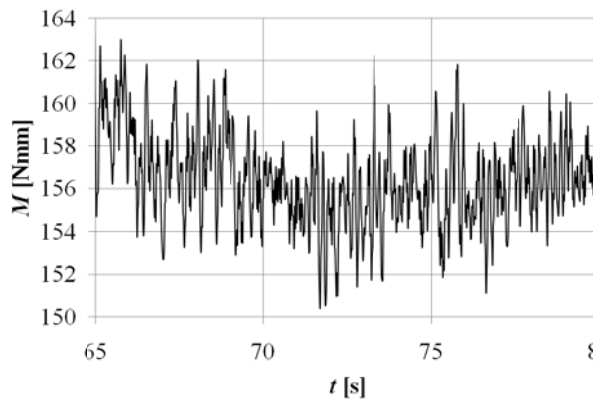
Слика 7.191 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа В при $\alpha = 0^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$



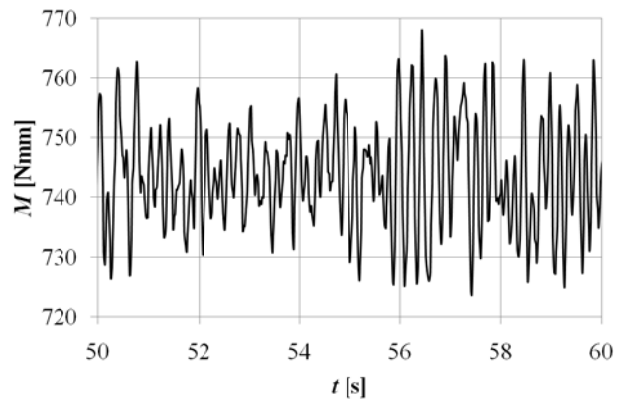
Слика 7.192 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа В при $\alpha = 30^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$



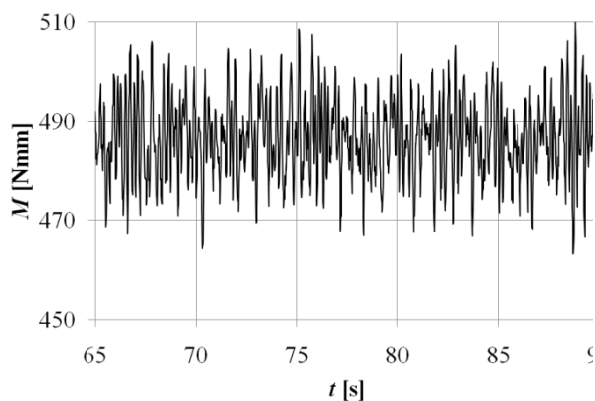
Слика 7.193 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа В при $\alpha = 30^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$



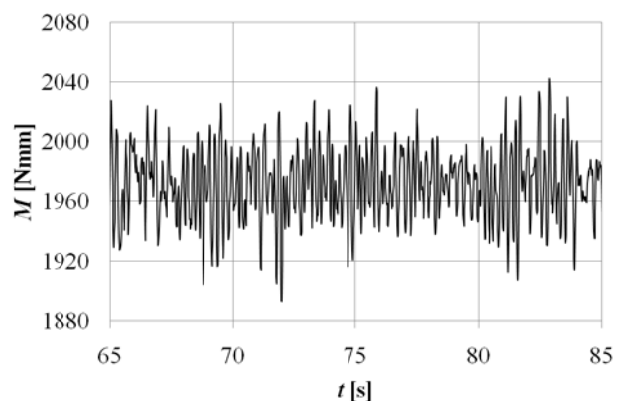
Слика 7.194 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа В при $\alpha = 60^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$



Слика 7.195 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа В при $\alpha = 60^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$

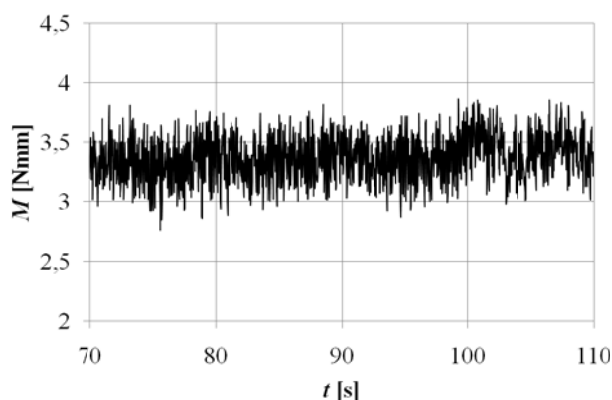


Слика 7.196 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа В при $\alpha = 90^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$

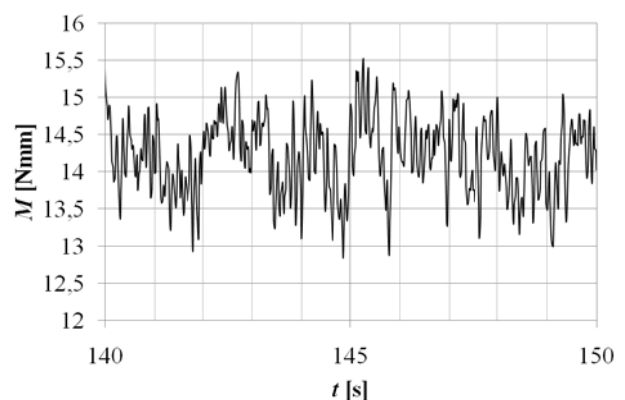


Слика 7.197 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа В при $\alpha = 90^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$

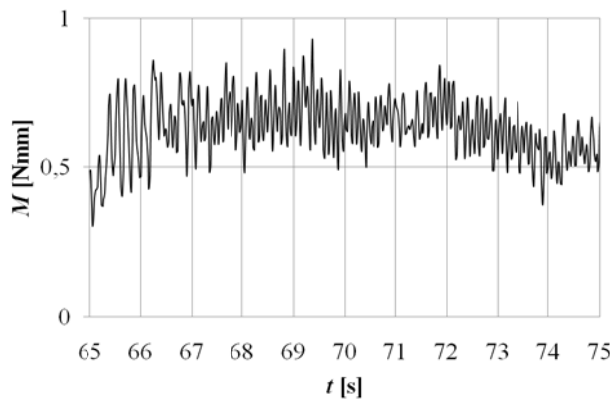
На сликама од 7.198 до 7.203 приказано је расипање мерног момента АТР жалузине типа С са променом брзине струјања и нападног угла мерне лопатнице. Сlike са леве стране показују расипање мерног момента при брзини струјања ваздуха од 1,4 m/s, док слике са десне стране приказују расипање мерног момента при брзини струјања од 2,8 m/s.



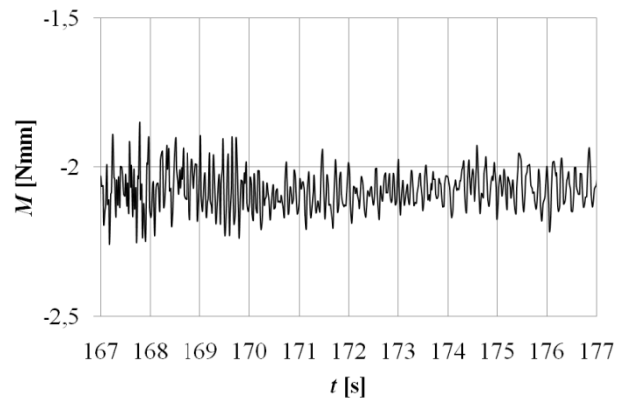
Слика 7.198 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа С при $\alpha = 20^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$



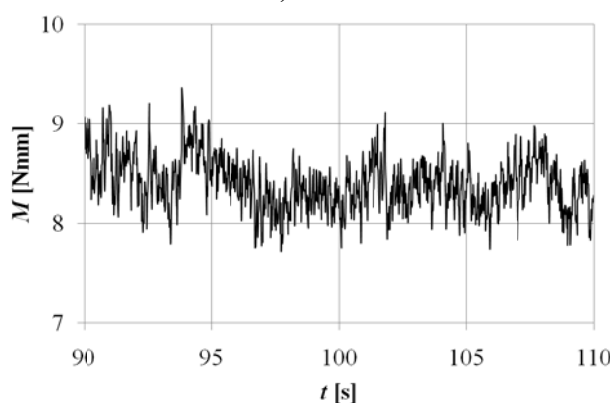
Слика 7.199 Расипање измереног сигнала АТР жалузине типа С при $\alpha = 20^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$



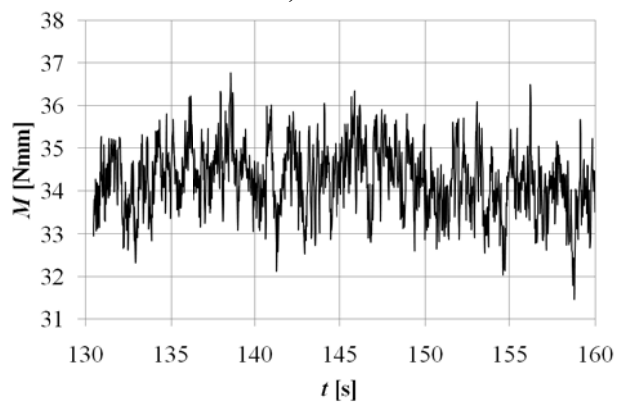
Слика 7.200 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа С при $\alpha = 0^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$



Слика 7.201 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа С при $\alpha = 0^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$

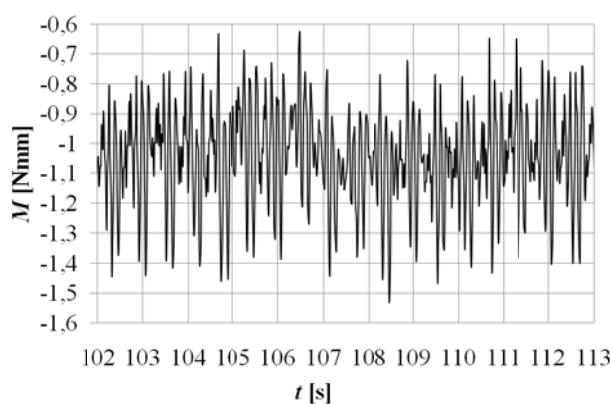


Слика 7.202 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа С при $\alpha = -20^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$

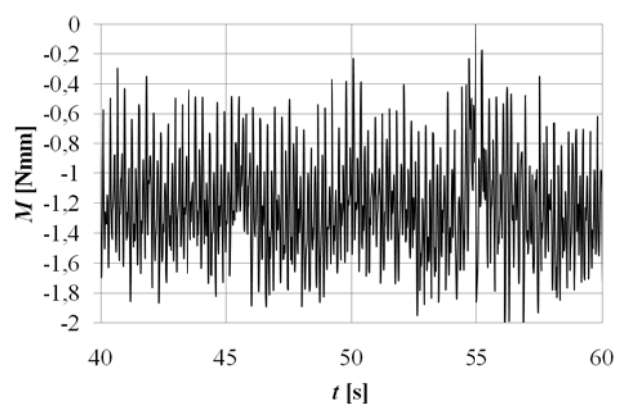


Слика 7.203 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа С при $\alpha = -20^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$

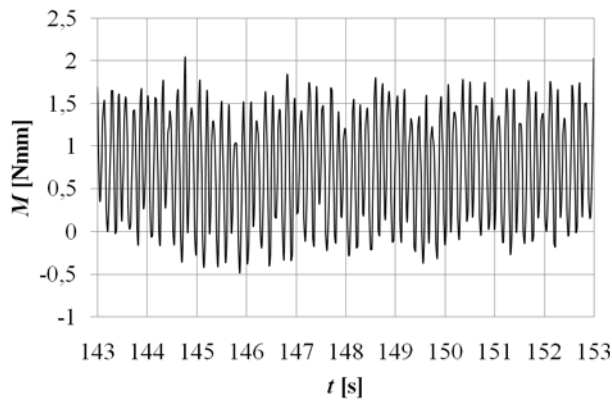
На сликама од 7.204 до 7.211 приказано је распаѓе измереног момента АТР жалузине типа D са променом брзине струјања и нападног угла мерне лопатике. Сlike са леве стране показују распаѓе измереног момента при брзини струјања ваздуха од 1,4 m/s, док слике са десне стране приказују распаѓе измереног момента при брзини струјања ваздуха од 2,8 m/s.



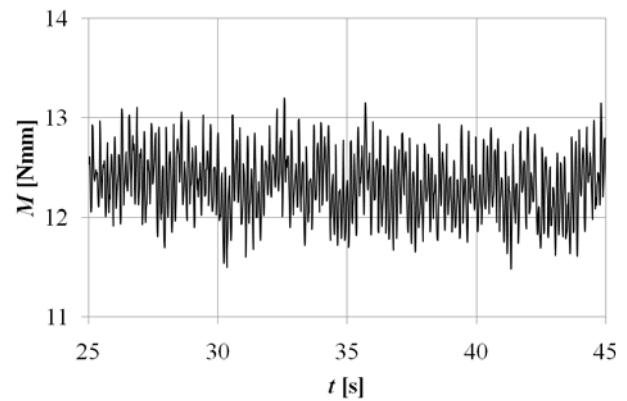
Слика 7.204 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа D при $\alpha = 0^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$



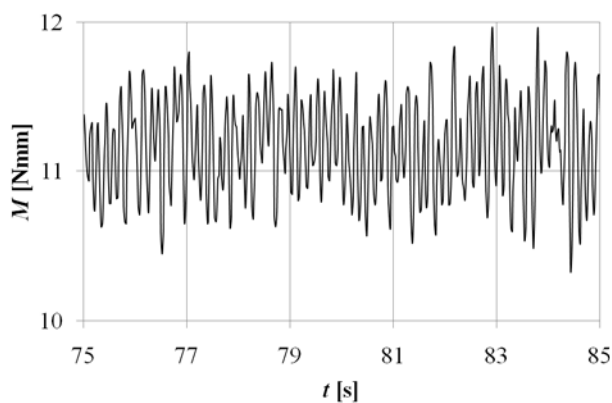
Слика 7.205 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа D при $\alpha = 0^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$



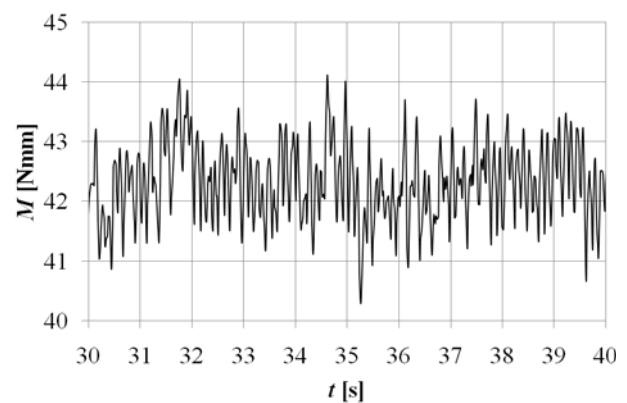
Слика 7.206 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа D при $\alpha = 30^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$



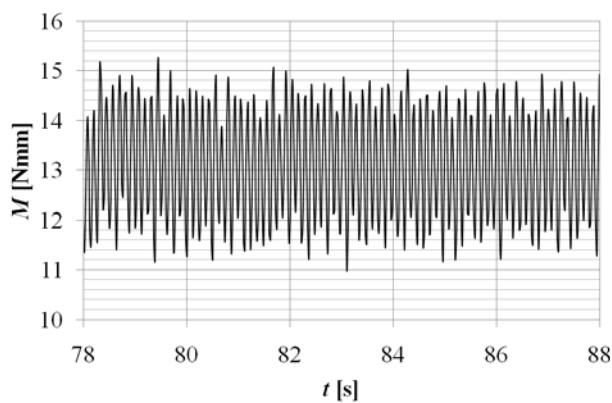
Слика 7.207 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа D при $\alpha = 30^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$



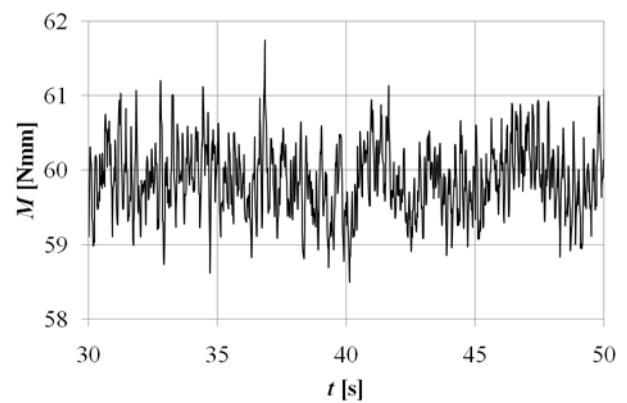
Слика 7.208 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа D при $\alpha = 60^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$



Слика 7.209 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа D при $\alpha = 60^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$



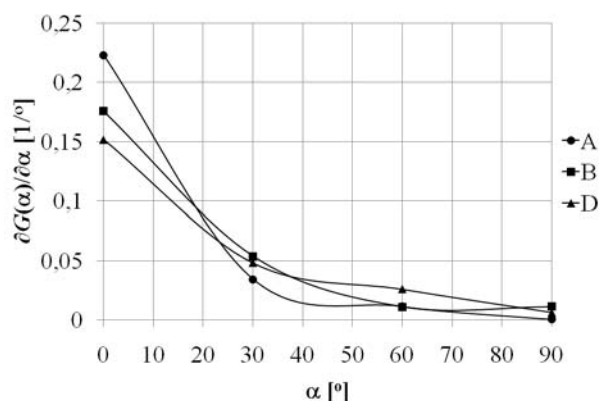
Слика 7.210 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа D при $\alpha = 90^\circ$ и $v = 1,4 \text{ m/s}$



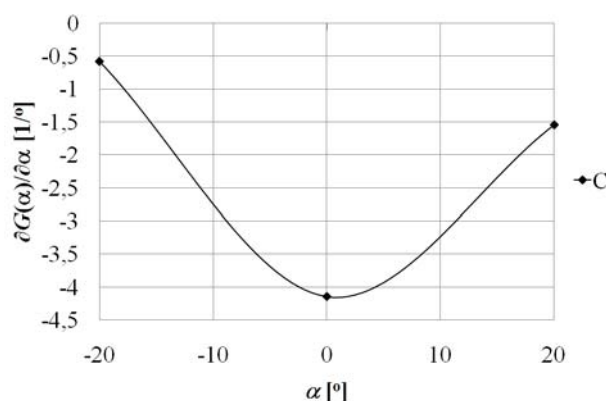
Слика 7.211 Распаѓе измереног сигнала АТР жалузине типа D при $\alpha = 90^\circ$ и $v = 2,8 \text{ m/s}$

Распаѓе измереног момента АТР жалузина обрађено је методом Хи квадрата описаног у поглављу 6.1.5. Утврђено је да код свих типова АТР жалузина измерени момент има статистички нормалну расподелу. Распаѓе измереног момента проверено је и методом Шовенеа описаног у поглављу 6.1.6, где је утврђено да у резултатима мерења момента нема присутне грубе грешке мерења. На овај начин стекли су се услови да се на измерене резултате примени методологија за одређивање мерне неизвесности описана у поглављу 6.3.

У једначини (6.41) извод корелацијске функције по нападном углу мерне лопатице АТР жалузине одређен је нумеричким диференцирањем експериментално добијене корелацијске функције по нападном углу мерне лопатице. Нумеричко диференцирање урађено је за случај еквидистантних интерполационих чворова. Резултати нумеричког диференцирања корелацијске функције за АТР жалузине типа А, В и D, приказани су на слици 7.212, док су за АТР жалузину типа С приказани на слици 7.213.



Слика 7.212 Резултати нумеричког диференцирања корелацијске функције за АТР жалузине типа А, В и D



Слика 7.213 Резултати нумеричког диференцирања корелацијске функције за АТР жалузину типа С

У табелама од 7.1 до 7.4 приказана је непоузданост мерења момента разматраним АТР жалузинама за различите вредности брзина струјања ваздуха и нападног угла мерне лопатице. Непоузданост мерења момента изражена је са статистичком сигурношћу од 99 %.

Табела 7.1 Непоузданост мерења момента АТР жалузином типа А са статистичком сигурношћу од 99 %

v [m/s]	0,35				0,7				
	α [°]	0	30	60	90	0	30	60	90
\bar{M} [Nmm]		-1,48	12,41	43,17	464,9	-2,67	22,29	741,0	1737,6
s_M [Nmm]		0,356	0,511	0,985	8,563	0,058	0,831	9,856	31,69
C_M [Nmm]		0,0580	0,062	0,142	0,551	0,009	0,074	1,144	1,909
$\varepsilon(C_M)$ [%]		3,918	0,507	0,329	0,118	0,347	0,335	0,154	0,109

Табела 7.2 Непоузданост мерења момента АТР жалузином типа В са статистичком сигурношћу од 99 %

v [m/s]	1,4				2,8				
	α [°]	0	30	60	90	0	30	60	90
\bar{M} [Nmm]		-0,986	2,044	159,8	486,5	-1,163	20,27	743,6	1971,5
s_M [Nmm]		0,520	0,326	2,185	14,69	0,324	0,801	8,649	23,58
C_M [Nmm]		0,040	0,012	0,164	0,587	0,026	0,056	0,780	1,921
$\varepsilon(C_M)$ [%]		4,118	0,626	0,103	0,120	2,271	0,276	0,104	0,097

Табела 7.3 Непouzданост мерења момента АТР жалузинуом типа С са статистичком сигурношћу од 99 %

v [m/s]	1,4			2,8		
α [°]	-20	0	20	-20	0	20
\bar{M} [Nmm]	8,407	0,527	3,409	34,23	-2,099	14,23
s_M [Nmm]	0,290	0,176	0,252	0,780	0,107	0,518
C_M [Nmm]	0,018	0,016	0,013	0,050	0,009	0,050
$\varepsilon(C_M)$ [%]	0,224	3,141	0,387	0,148	0,461	0,354

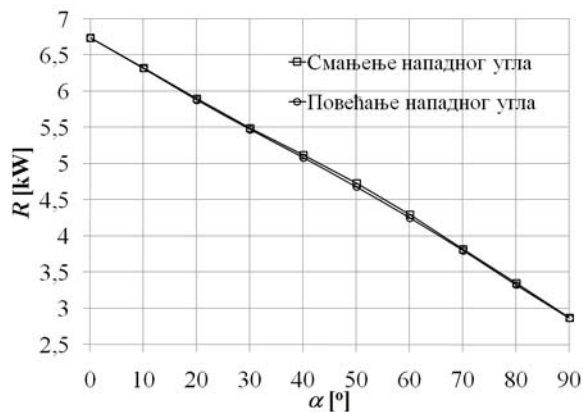
Табела 7.4 Непouzданост мерења момента АТР жалузинуом типа D са статистичком сигурношћу од 99 %

v [m/s]	1,4				2,8			
α [°]	0	30	60	90	0	30	60	90
\bar{M} [Nmm]	-1,096	1,148	11,65	13,21	-1,217	12,69	42,31	62,85
s_M [Nmm]	0,175	0,714	0,754	1,150	0,332	0,787	0,636	0,543
C_M [Nmm]	0,016	0,048	0,045	0,076	0,026	0,050	0,073	0,039
$\varepsilon(C_M)$ [%]	1,474	4,246	0,390	0,578	2,155	0,396	0,173	0,063

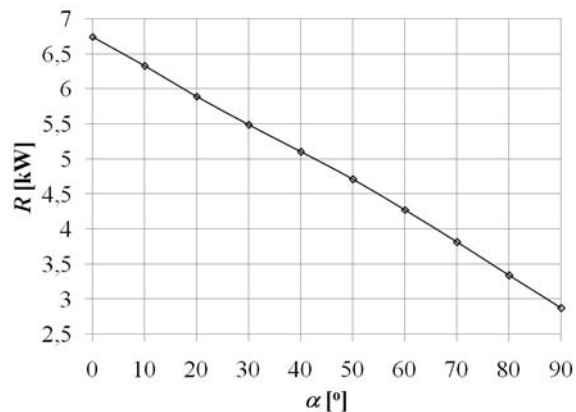
На основу вредности непоузданости мерења момента може да се наслути и непоузданост мерења брзине струјања АТР жалузинама. Смањењем нападног угла мерне лопатице, тј. отварањем АТР жалузине повећава се непоузданост мерења момента. Дрaстично повећање непоузданости мерења момента настаје при смањењу нападног угла АТР жалузине од 30° до 0° (АТР жалузине типа А, В и D). Такође, може да се уочи да при вишим вредностима брзина струјања ваздуха смањује се непоузданост мерења момента АТР жалузинуом.

За потребе одређивања непоузданости мерења нападног угла мерне лопатице АТР жалузине коришћен је ротациони потенциометар. На *слици 7.214* приказане су калибрационе криве ротационог потенциометра за АТР жалузину типа А, где је за калибрацију коришћен угломер приказан на *слици 3.9*. Једна калибрациона крива снимљена је при повећању нападног угла мерне лопатице, док је друга калибрациона крива снимљена при смањењу нападног угла мерне лопатице. Може да се уочи присуство благог хистерезиса мерењем нападног угла мерне лопатице ротационим потенциометром.

На *слици 7.215* приказана је аритметичка средина снимљених кривих која представља калибрациону криву ротационог потенциометра за АТР жалузину типа А. Ротациони потенциометри су при нижим вредностима угла отклона клизача нелинеарни и имају велику грешку мерења, па је из тог разлога приликом постављања ротационог потенциометра направљен предотклон од тридесет степени, да се елиминише зона рада потенциометра са нелинеарном карактеристиком. И поред тога може да се уочи блага нелинеарност у зависности нападног угла мерне лопатице и електричне отпорности ротационог потенциометра која додатно утиче на грешку мерења.



Слика 7.214 Хистерезис мерења нападног угла мерне лопатице ротационим потенциометром



Слика 7.215 Калибрациона крива мерења нападног угла мерне лопатице ротационим потенциометром

Стандардно одступање мерења нападног угла лопатице угломером процењено је одређивањем стандардног одступања измерене вредности електричне отпорности из једначине (4.29).

Са циљем да се дође до стандардног одступања ротационог потенциометра за сваки нападни угао мерне лопатице двадесет пута је подешаван угао и мерена електрична отпорност ротационог потенциометра. Коришћењем једначине (6.6) одређено је стандардно одступање мерења нападног угла ротационим потенциометром, а резултати су приказани у *табели 7.5*. Како је избегнута зона нелинеарности код ротационог потенциометра, добијен је исти ред величине вредности непоузданости мерења нападног угла мерне лопатице за све вредности измереног угла. Прерачунавањем према једначини (4.29) добијено максимално стандардно одступање нападног угла лопатице износи $0,5^\circ$. Са максимално добијеном вредношћу стандардног одступања угла лопатице од $0,5^\circ$ урађен је прорачун неизвесности мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузинима.

Табела 7.5 Непоузданост мерења нападног угла лопатице АТР жалузине са статистичком сигурношћу од 99 %

α [°]	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
\bar{R} [kW]	2,869	3,336	3,810	4,273	4,706	5,102	5,483	5,892	6,324	6,741
s_R [kW]	0,0152	0,0189	0,0195	0,0312	0,0273	0,0265	0,0239	0,0202	0,0160	0,0270
C_R [kW]	0,008	0,010	0,011	0,018	0,015	0,015	0,013	0,011	0,009	0,015
$\epsilon(C_R)$ [%]	0,306	0,326	0,295	0,421	0,334	0,299	0,251	0,197	0,146	0,230

Током прорачуна уочено је да је већи утицај непоузданости мерења момента од утицаја непоузданости мерења нападног угла мерне лопатице на укупну непоузданости мерења брзине струјања АТР жалузине као посредно мерене величине.

7.16 Неизвесност мерења брзине струјања АТР жалузинима

Проверавањем контролним тегом масе 1 kg (еквивалентан моменту који ствара ваздушна струја од 981 Nmm) пре и после мерења уочена је систематска грешка мерила момента. Контролним тегом пре мерења момента утврђен је корекциони фактор којим

је коригована измерена вредност момента *слике 7.4 и 7.5*. Након мерења момента поново је урађена провера контролним тегом, где је уочена разлика реда величине 1 Nmm, колико износи и резолуција мерења момента (диктирана резолуцијом сензора за мерење масе). Систематска грешка корелацијске функције добијена је из једначине (4.30) на основу систематске грешке момента и систематске грешке анемометра са топлом жицом. Систематска грешка анемометра са топлом жицом дата је од стране произвођача (TESTOa, 2013) и износи $\Delta v = 0,03\text{m/s}$.

У *табели 7.6* дата је вредност систематске грешке експериментално одређене корелацијске функције за стандардне услове. Током одређивања неизвесности мерења брзине струјања АТР жалужином уочено је да је утицај систематске грешке корелацијске функције мањи од утицаја систематске грешке мерила момента.

Табела 7.6 Систематска грешка експериментално одређене корелацијске функције дата за стандардне услове

ρ [kg/m ³]	Δv [m/s]	ΔM [Nmm]	ΔG [-]
1,2	0,03	1	0,091

У *табели 7.7* приказана је неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужине типа А као посредно мерене физичке величине. Мерна неизвесност одређена је за две вредности брзине струјања 0,35 m/s и 0,7 m/s, где је у оба случаја статистичка вероватноћа 99 %.

Табела 7.7 Неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужином типа А са статистичком сигурношћу од 99 %

v [m/s]	0,35				0,7			
α [°]	0	30	60	90	0	30	60	90
s_v [m/s]	0,1612	0,0288	0,0135	0,0061	0,0635	0,0368	0,0528	0,0118
C_v [m/s]	0,0146	0,0035	0,0019	0,0003	0,0094	0,0067	0,0061	0,0007
U_v [m/s]	5,6467	0,0606	0,0181	0,0019	5,1689	0,0074	0,0061	0,0007
u_v [%]	1613,3	17,32	5,19	0,54	738,4	1,06	0,87	0,10

У *табели 7.8* приказана је неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужине типа В као посредно мерене физичке величине. Мерна неизвесност одређена је за две вредности брзине струјања 1,4m/s и 2,8m/s, где је у оба случаја статистичка вероватноћа 99 %.

Табела 7.8 Неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужином типа В са статистичком сигурношћу од 99 %

v [m/s]	1,4				2,8			
α [°]	0	30	60	90	0	30	60	90
s_v [m/s]	0,3638	0,0526	0,0256	0,0481	0,2103	0,0558	0,0536	0,0828
C_v [m/s]	0,0283	0,002	0,0019	0,0035	0,0171	0,0101	0,0048	0,0067
U_v [m/s]	18,4071	1,3830	0,0198	0,0094	23,061	0,1510	0,0086	0,0081
u_v [%]	1314,7	98,7	1,41	0,676	823,6	5,39	0,308	0,292

У табели 7.9 приказана је неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужине типа С као посредно мерене физичке величине. Мерна неизвесност одређена је за две вредности брзине струјања 1,4m/s и 2,8m/s, где је статистичка вероватноћа 99 %.

Табела 7.9 Неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужином типа С са статистичком сигурношћу од 99 %

v [m/s]	1,4			2,8		
α [°]	-20	0	20	-20	0	20
s_v [m/s]	2,60608	2,4006	1,0444	0,57155	1,0245	0,96617
C_v [m/s]	0,1689	0,2250	0,0545	0,1041	0,0919	0,0939
U_v [m/s]	2,598008	868,46523	0,3925	0,1767	869,4	0,4166
u_v [%]	185,5	62033,2	28,03	6,31	31050,9	14,87

У табели 7.10 приказана је неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужине типа D као посредно мерене физичке величине. Мерна неизвесност одређена је за две вредности брзине струјања 1,4m/s и 2,8m/s, где је статистичка вероватноћа 99 %.

Табела 7.10 Неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужином типа D са статистичком сигурношћу од 99 %

v [m/s]	1,4				2,8			
α [°]	0	30	60	90	0	30	60	90
s_v [m/s]	0,1185	0,2415	0,0517	0,0583	0,2101	0,0848	0,0351	0,0149
C_v [m/s]	0,0109	0,0164	0,0031	0,0038	0,0165	0,0154	0,0040	0,0010
U_v [m/s]	13,726	2,512	0,251	0,216	13,478	0,2935	0,0785	0,0461
u_v [%]	980,4	179,4	17,97	15,45	481,3	10,48	2,80	1,64

Сасвим очекивано код свих типова АТР жалужине добијен је тренд да се повећањем брзине струјања смањује неизвесност мерења брзине. Такође очекивано, са повећањем нападног угла лопатице смањује се неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужином.

Са становишта неизвесности мерења малих вредности брзина струјања најповољнија је АТР жалужине типа А. Она може са задовољавајућом неизвесношћу (до $\pm 5\%$) да мери брзину струјања од 0,35 m/s при нападним угловима већим од 60° , а брзину струјања од 0,7 m/s при нападним угловима већим од 30° . Затим следи АТР жалужина типа В која са задовољавајућом неизвесношћу може да мери брзину струјања од 1,4 m/s при нападним угловима већим од 60° , а брзину струјања од 2,8 m/s при нападним угловима већим од 30° . Неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужине типа С указује на то да овај тип жалужине не може да се користи за мерење брзина струјања испод 3 m/s. Неизвесност мерења брзине струјања АТР жалужине типа D указује да она не може поуздано да мери брзину струјања од 1,4 m/s, док са задовољавајућом неизвесношћу може да мери брзину струјања од 2,8 m/s при нападним угловима већим од 60° .

Генерално гледајући сви типови АТР жалужина не могу да мере овако мале брзине струјања при нападним угловима мерне лопатице од 0° до 30° . Такође, АТР жалужине типа А, В и D имају завидну мерну неизвесност при нападном углу АТР жалужине од 90° . Нпр. АТР жалужина типа А има неизвесност од $\pm 0,54\%$ при мерењу брзине

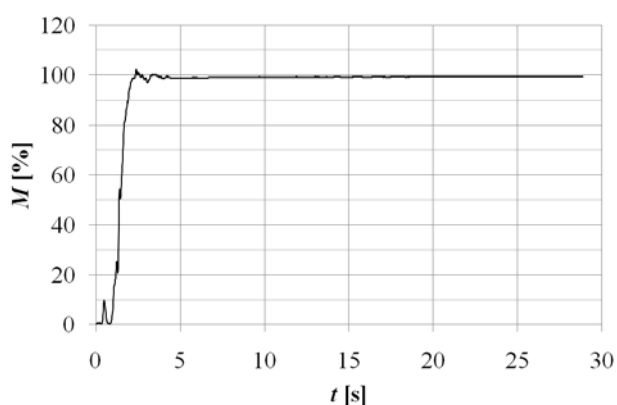
струјања од 0,35 m/s и $\pm 0,1\%$ при мерењу брзине струјања од 0,7 m/s, док АТР жалузине типа В има неизвесност од $\pm 0,67\%$ при мерењу брзине струјања од 1,4 m/s и $\pm 0,29\%$ при мерењу брзине струјања од 2,8 m/s.

7.17 Карактеристике преносне функције АТР жалузине

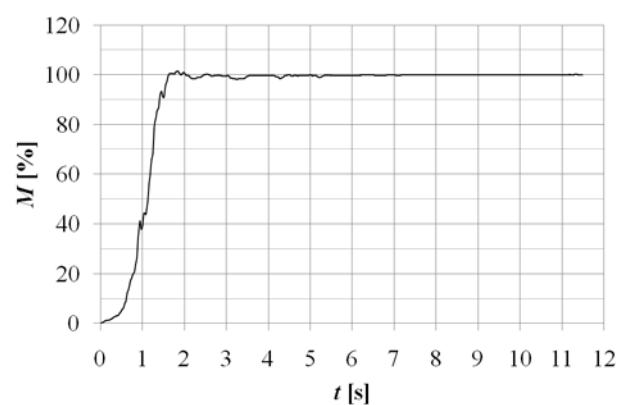
Карактеристике преносне функције АТР жалузине анализирани су посматрајући жалузину као мерни систем првог реда. Анализирана је одзивна функција мерила момента АТР жалузине на улазну импулсну побуду. Као импулсна побуда коришћен је сигнал добијен постављањем тега масе 1 kg на мерило момента према шеми датој на слици 3.28. Постављени тег одговара брзини струјања ваздуха која би деловала на лопатицу АТР жалузине моментом од 981 Nmm. Мерило момента прикључено је на аквизицију података, док је аквизиција података прикључена на персонални рачунар. Постављањем тега долази током времена до пораста мереног сигнала мерила момента АТР жалузине, што се преко аквизиције података снима на пресоналном рачунару.

Изглед одзивних функција мерила момента различитих типова АТР жалузине приказани су на сликама од 7.216 до 7.219. Ради се о типичним одзивним функцијама, са одређеним временом одзива, преоптерећењем, осциловањем око мерене величине и уравнотежењем. Оно што може да се уочи на одзивним функцијама мерила момента јесте да је од тренутка довођења импулсне побуде потребно да прође свега пар секунди да се добије 100 % мерног сигнала.

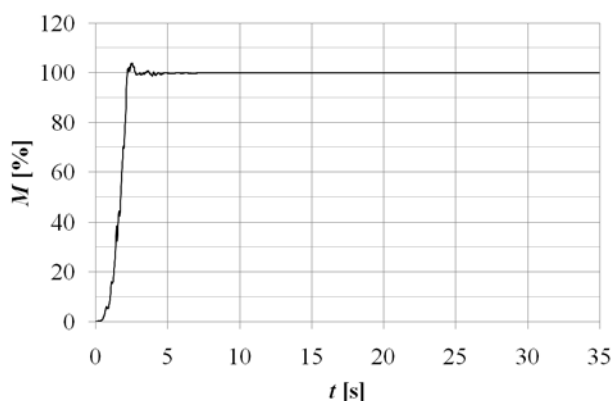
Идеја је да се дође до временске константе АТР жалузине, тј. до времена које протекне од тренутка довођења импулсне побуде до тренутка када мерени сигнал достигне 63,2 % своје максималне вредности. Поред брзине струјања као улазне величине и мерила момента као излазне величине преносне функције, нападни угао мерне лопатице је величина која је такође узета у обзир приликом одређивања временске константе АТР жалузине. У табелама 7.11 и 7.12 приказани су резултати одређивања временских константи за различите типове АТР жалузине при различитим нападним угловима мерних лопатица.



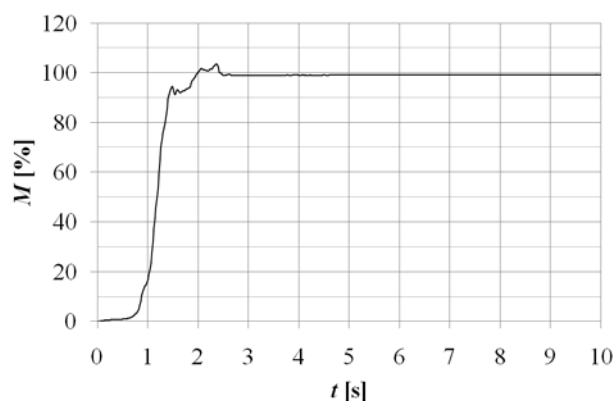
Слика 7.216 Измерени момент АТР жалузине типа А при нападном углу лопатице од 0°



Слика 7.217 Измерени момент АТР жалузине типа В при нападном углу лопатице од 30°



Слика 7.218 Измерени момент АТР жалузине типа С при нападном углу лопатице од 0°



Слика 7.219 Измерени момент АТР жалузине типа D при нападном углу лопатице од 60°

Табела 7.11 Временске константе АТР жалузина типа А, В и D

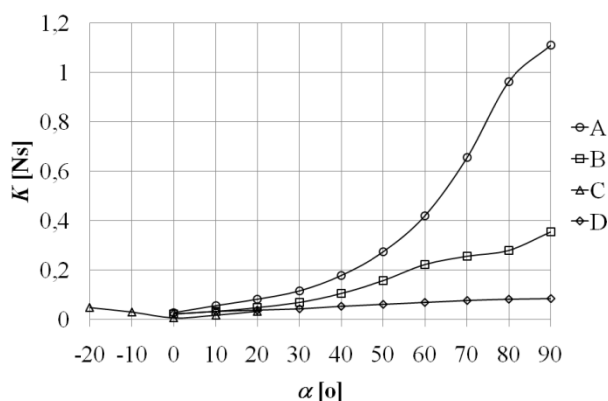
Тип АТР жалузине	$\alpha [^\circ]$				$\tau_{sr} [^\circ]$
	0	30	60	90	
А	1,6	2,9	0,735	2,3	1,883
В	1,4	1,25	3,1	-	1,916
D	1,4	1,7	1,22	2,8	1,78

Табела 7.12 Временска константа АТР жалузине типа С

Тип АТР жалузине	$\alpha [^\circ]$			$\tau_{sr} [^\circ]$
	-20	0	20	
С	1,4	1,8	1,7	1,633

На основу резултата приказаних у табелама 7.11 и 7.12 може се уочити да ни за један тип АТР жалузине не постоји законитост промене временске константе са нападним углом мерне лопатице. Добијене су различите вредности временских константи, истог реда величине које се крећу у распону од 1,5 s до 3 s. Уколико се за сваки тип АТР жалузине одреди аритметичка средина временских константи, тада се вредности временских константи разматраних АТР жалузина крећу од 1,6 s до 1,9 s. На крају одређена је аритметичка средина временских константи свих типова АТР жалузина. Довођењем импулсне побуде еквивалентне брзини струјања ваздуха која би деловала на мерну лопатицу АТР жалузине моментом од 981 Nm, временска константа разматраних АТР жалузина износи 1,8 s.

На слици 7.220 приказана језависност коефицијента статичке осетљивости АТР жалузина и нападног угла мерне лопатице, добијена довођењем импулсне побуде у виду константне брзине струјања еквивалентне моменту од 981 Nm. Сасвим очекивано на основу анализе досадашњих резултата мерења, коефицијент статичке осетљивости расте са порастом нападног угла мерне лопатице. Другим речима, при затворенијој АТР жалузини мерни уређај је осетљивији, па се при нижим вредностима брзине струјања јављају више вредности мереног момента. Највише вредности коефицијента осетљивости за дату побуду има АТР жалузина типа А, а затим следе типови В, С и D.



Слика 7.220 Коефицијент статичке осетљивости АТР жалузине на импулсну побуду брзине струјања еквивалентну моменту од 981 Nmт

На основу зависности коефицијента статичке осетљивости и нападног угла мерне лопатице, може да се закључи да показатељ статичке осетљивости може да буде и корелацијска функција дефинисана једначином (4.25), а добијена мерењем и приказана на сликама од 7.46 до 7.49. Ниже вредности корелацијске функције показатељ су статички осетљивије АТР жалузине.

7.18 Радни век АТР жалузине

Истраживањем у оквиру докторске дисертације није планирана анализа и предвиђање поузданости рада АТР жалузине. Планирано је да се укаже на правилан избор и коришћење појединих делова АТР жалузине како би се продужио њен радни век.

Изузетно је важно правилно одабрати сензор масе, тако да током рада не дође до његовог преоптерећења (поглавље 3.3.6). На основу техничких карактеристика изабраног сензора масе приказаних у табели 3.3 може да се види да сензор масе трпи преоптерећење од 50 % од свог мерног опсега након чега улази у област трајне пластичне деформације кад постаје неупотребљив, док преоптерећењем 150% од мерног опсега долази до прекида траке сензора масе.

За правилан рад АТР жалузине важно је да се сензори за мерење температуре, натпритиска, атмосферског притиска и сензора масе периодично проверавају. Како се пренос момента ваздушне струје са мерне лопатице до мерила момента реализује механичким путем нарочито је важна периодична провера сензора масе контролним тегом. Након сваког подешавања положаја мерне лопатице обавезно треба да се уради провера контролним тегом. Након провере контролним тегом, на основу очитане вредности момента и контролног момента потребно је одредити нову вредност корекционог фактора која се уноси у аквизицију АТР жалузине.

АТР жалузина садржи кугличне лежајеве којим се доводе лопатице у жељени положај према вредности добијене са ротационог потенциометра. Како су куглични лежајеви и ротациони потенциометар механички делови са ограниченим веком трајања, на први поглед по питању поузданости они представљају најкритичнија места на АТР жалузине. Међутим, треба нагласити да комерцијална АТР жалузина која би се у будућности постављала на системе користила би се само са једним положајем мерне лопатице. Мерна лопатица би се довела у жељени положај, затим би се фиксирала и

АТР жалузина би се ставила у функцију. Број обртаја кугличног лежаја и ротационог потенциометра током експлоатације АТР жалузина биће веома мали.

Према техничким карактеристикама ротационог потенциометра приказаним у *табели 3.5*, број радних циклуса, тј. број пуног окретања ротационог потенциометра је 25000. Број могућих окретања ротационог потенциометра је неколико реда величина већи од реалног броја окретања потенциометра током експлоатације АТР жалузине.

Ради илустрације одредиће се век трајања усвојеног радијалног кугличног лежаја за оптерећења АТР жалузине типа А. Радијална сила која делује на лежај гласи:

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{13,5^2 + 15^2} = 20,18 \text{ N}, \quad (7.1)$$

где су:

$F_x = 13,5 \text{ N}$ - радијална сила која делује на лежај у правцу x – осе и

$F_y = 15 \text{ N}$ - радијална сила која делује на лежај у правцу y – осе.

Статичка носивост лежаја гласи:

$$P_o = X_o \cdot F_x + Y_o \cdot F_y = 0,6 \cdot 13,5 + 0,5 \cdot 15 = 15,6 \text{ N}, \quad (7.2)$$

где су:

$X_o = 0,6$ - фактор лежаја у правцу x – осе и

$Y_o = 0,5$ - фактор лежаја у правцу y – осе.

Када је статичка носивост мања од радијалне силе која делује на лежај $P_o < F_r$, усваја се да је статичка носивост једнака еквивалентној носивости лежаја $P_o = P$ (FKL, 2013).

Основни век трајања лежаја са вероватноћом од 90 %, изражен у бројевима обртаја гласи:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^3 = \left(\frac{1380}{15,6} \right)^3 = 692251 \text{ обртаја}, \quad (7.3)$$

где су:

C – динамичка носивост лежаја [N] и

P – еквивалентна носивост лежаја [N].

7.19 Закључна разматрања

Испитана је АТР жалузина чије лопатице не формирају решетку, што је веома чест случај код регулационих жалузина на системима. На основу приказаних резултата и анализе може да се закључи да је циљ истраживања употпуности реализован. Развијена је АТР жалузина за мерење запреминског протока ваздуха чије лопатице не формирају решетку и формиран је адекватан математички модел. Потврђена је основна хипотеза докторске дисертације да дефинисани математички модел може успешно да се користи за тачно и поуздано мерење запреминског протока ваздуха.

На основу приказаних резултата може се уочити да се ради о великом броју експеримената и понављања. У циљу смањења времена и трошкова експерименталног истраживања у будућности би требало у развој АТР жалузине укључити и нумеричке симулације. Занимљиво би било испитати утицај попречног пресека и типа лопатице на адекватност математичког модела нумеричким симулацијама. Ради се о утицајима којима се нису бавили аутори у прошлости. У том духу су у оквиру докторске дисертације урађене нумеричке симулације методом коначних запремина према детаљно дефинисаном плану истраживања. Циљ нумеричких симулација био је да се подеси нумерички модел, како би се потврдила могућност коришћења методе коначних запремина у развоју АТР жалузина.

8. ПРИМЕНА РАЧУНАРСКЕ ДИНАМИКЕ ФЛУИДА У РАЗВОЈУ АТР ЖАЛУЗИНЕ

8.1 Увод

Већина проблема у области механике флуида описана је нелинеарним парцијалним диференцијалним једначинама које немају опште аналитичко решење. То се посебно односи на турбулентно струјање које због стохастичке природе струјања не може да се опише аналитички. Аналитичко решење нелинеарних парцијалних једначина могуће је одредити само у случају ламинарног струјања и то за одређен број једноставних случајева.

Услед тога проблеми механике флуида су се у прошлости углавном решавали применом експерименталне методе. Експериментална метода уско је повезана са теоријом, јер се примена сваке методе мерења заснива на познавању теорије. Експерименталним путем добија се ограничен број информација о некој појави (притисак, температура, проток, сила, момент др. у коначном броју тачака струјног простора). На основу једног резултата мерења не може се закључити о утицају појединог параметра, као што се то може да се уради код аналитичког решења. Понављањем експеримента за различите комбинације вредности утицајних параметара могуће је створити слику о појави. Експериментални приступ решавања проблема у области механике флуида је веома често сложен, дуготрајан и скуп.

У последње време све више се користи рачунарска динамика флуида за решавање парцијалних диференцијалних механике флуида. Развојем рачунара испуњени су услови за нумеричко решавање нелинеарних парцијалних диференцијалних једначина које описују струјање флуида. На овај начин почела је да се развија трећа грана механике флуида под називом рачунарска динамика флуида (CAD – Computational Fluid Dynamics). Експериментална метода и рачунарска динамика флуида су веома сличне. Рачунарска динамика флуида ослања се на знања из теорије, а из једног нумеричког решења неког проблема не може да се закључи о утицају појединог параметра на појаву која се описује. При симулацији сложенијих проблема може се догодити да нумерички поступак не конвергира, па инжењер који ради симулацију мора имати доста искуства, као и инжењер који изводи експеримент.

Анализа струјања флуида применом методе нумеричке динамике флуида састоји се из следећих корака (Ferziger and Perić, 2002), (STAR, 2009):

- сакупљање података о реалним, физичким моделима, који могу бити исти или веома слични;
- дефинисање геометријског модела домена;
- избор математичког модела;
- дискретизација простора (генерисање мреже);
- дискретизација једначина (дефинисање нумеричке мреже);
- постављање граничних услова;
- усвајање модела турбуленције (и других модела по потреби);
- итеративно решавање нумеричке шеме до задатог нивоа остатка итерације (критеријум конвергенције);

- анализа резултата са аспекта стабилности и тачности;
- графичко постпроцесирање нумеричких резултата, ради разумевања и интерпретације понашања модела;
- поређење са експерименталним подацима и
- обрада резултата.

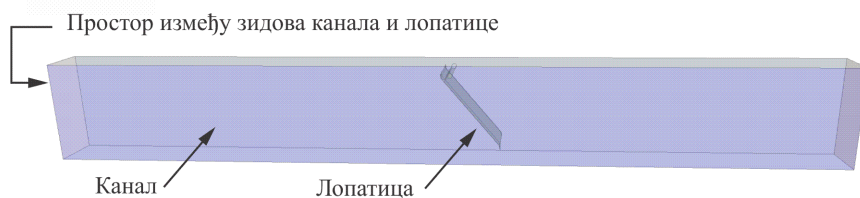
8.2 Сакупљање података о сличним физичким моделима

Први корак при изради нумеричке симулације неког инжењерског проблема јесте да се сагледају и анализирају подешавања нумеричке симулације (гранични услови, модел турбуленције, генерисање мреже итд.) и резултати нумеричке симулације која има сличан физички модел. Искуства у подешавању, резултатима и анализи резултата нумеричке симулације сличног физичког модела могу бити драгоцене и знатно смањити време рада на изради нумеричке симулације. АТР жалузина представља тело смештено у каналу које се опструјања принудно струјом ваздуха. Веома велики број нумеричких симулација изведен је за сличне физичке моделе. У оквиру докторске дисертације коришћена су знања и искуства везана за сличан физички модел разрађен у литератури (STAR, 2009).

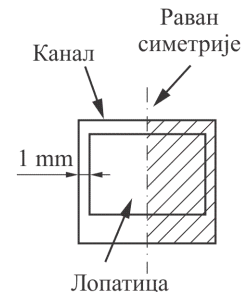
8.3 Дефинисање геометријског модела домена

Геометријски модел домена над којим ће се изводити нумеричке симулације треба да буде што више сличан геометријском домену физичког модела. Веома често је потребно апроксимирати геометријски модел домена, на тај начин што ће из њега избацити мање значајни детаљи. На овај начин се свесно уноси грешка у домен над којим ће се изводити нумеричке симулације, али се у исто време смањује време потребно за решавање једначина. Из тог разлога потребно је добро познавати физички смисао проблема, јер се не сме направити апроксимација геометријског модела домена која ће значајно утицати на резултате и њихову стабилност.

На *слици 3.29* приказан је геометријски модел домена физичког модела АТР жалузине типа А, док је на *слици 8.1* приказан геометријски модел домена над којим ће се изводити нумеричке симулације за АТР жалузине типа А при нападном углу лопатице од 50° . Геометријски модел домена састоји се од канала у којем је смештена мерна лопатица тако да ваздух струји кроз простор између зидова канала и лопатице.



Слика 8.1 Геометријски модел домена АТР жалузине типа А при нападном углу лопатице од 50°



Слика 8.2 Симетричан попречни пресек канала са лопатицом

На геометријском моделу домена над којим ће се изводити нумеричке симулације АТР жалузина урађене су две апроксимације:

- продужене су лопатице до зида канала и
- смањена је дужина канала испред и иза лопатица АТР жалузина.

Код геометријског модела домена физичког модела постоје зазори између лопатица и зидова канала, *слика 8.2*. Ширина зазора је 1 mm, и они обезбеђују довођење лопатица у жељени положај. Приликом струјања ваздуха преко лопатице АТР жалузине део ваздуха пролази кроз зазоре, знатно се убрзавајући на месту зазора. Прелиминарним симулацијама утврђено је да геометријски модел домена над којим се изводе нумеричке симулације са зазорима између зидова канала и лопатица даје лоше и нестабилне резултате. Из тог разлога је геометријски модел домена над којим ће се изводити нумеричке симулације апроксимиран, тако да су лопатице продужене до зидова канала, и не постоји милиметарски зазор. Струјање ваздуха сада је могуће само испод и изнад лопатица АТР жалузина.

Дужина праве равне деонице испред лопатице АТР жалузине је 3 m, док је иза лопатице 2 m. Уколико би геометријски модел домена над којим се изводе нумеричке симулације имао једнаке дужине правих деоница испред и иза лопатица АТР жалузина као геометријски модел физичког модела, тада би се знатно успорило решавање проблема. Из тог разлога је урађена апроксимација, тако што су праве деонице испред и иза лопатица геометријског модела домена над којим се врше нумеричке симулације узете да су дужине 1 m.

Услед симетричности геометријског модела домена у односу на раван симетрије, *слика 8.2*, за потребе нумеричких симулација коришћена је само једна половина геометријског модела домена. На овај начин знатно је смањено време решавања проблема нумеричким симулацијама.

8.4 Избор математичког модела

Основне једначине динамике флуида су:

- једначина континуитета;
- једначина кретања и
- енергијска једначина.

Једначина континуитета или закон одржања масе описује биланс масе елементарне запремине флуида $\Delta x \Delta y \Delta z$. За нестационарно, тродимензијско струјање стишљивог флуида једначина континуитета гласи:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0, \quad (8.1)$$

где су:

ρ - густина флуида $[\text{kg/m}^3]$;

t - време $[\text{s}]$;

x, y, z - осе Декартовог правоугаоног координатног система $[\text{m}]$;

$v_x(x, y, z, t)$ - брзина струјања флуида у правцу x - осе Декартовог правоугаоног координатног система $[\text{m/s}]$;

$v_y(x, y, z, t)$ - брзина струјања флуида у правцу y - осе Декартовог правоугаоног координатног система $[\text{m/s}]$;

$v_z(x, y, z, t)$ - брзина струјања флуида у правцу z - осе Декартовог правоугаоног координатног система $[\text{m/s}]$.

За стационарно $\left(\frac{\partial}{\partial t} = 0\right)$, тродимензијско струјање нестишљивог ($\rho = \text{const.}$) флуида једначина континуитета постаје:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (8.2)$$

Једначина кретања изведена је из другог Њутновог закона, из равнотеже унутрашњих и спољашњих сила које делују на флуид. За нестационарно струјање нестишљивог флуида једначина кретања гласи:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (8.3)$$

где су:

p - притисак флуида $[\text{Pa}]$;

ν - кинематска вискозност флуида $[\text{m}^2/\text{s}]$;

X, Y, Z - пројекције спољашњих запреминских сила на осе Декартовог правоугаоног координатног система $[\text{m/s}^2]$;

За нестишљив флуид нелинеарне диференцијалне једначине другог реда (8.3) називају се Навије – Стоксове (Navier-Stokes) једначине.

Енергијска једначина описује биланс енергије за елементарну запремину флуида. За нестишљив флуид енергијска једначина гласи:

$$\rho c_v \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(v_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + v_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \Phi, \quad (8.4)$$

где су:

c_v - специфична топлота при константној запремини [J/kgK];

T - температура флуида [K];

λ - коефицијент проводљивости топлоте [W/m²K];

μ - динамичка вискозност флуида [Pa · s] и

Φ - функција вискозне дисипације [1/s²].

Функција вискозне дисипације дефинише се као:

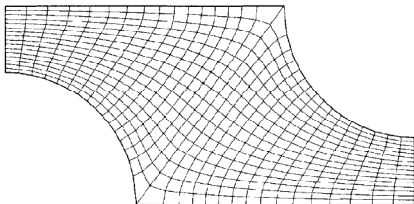
$$\Phi = 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2. \quad (8.5)$$

Ваздух је стишљив флуид, међутим при струјању са малим вредностима Маховог броја ($M < 0,3$) може да се сматра да је ваздух нестишљив флуид. Како је струјање ваздуха кроз АТР жалюзине са Маховим бројем $M < 0,3$, нумеричка симулација је урађена са ваздухом као нестишљивим флуидом. Нумеричке симулације АТР жалюзина урађене су на константним температурама, где се сматрано да је ваздух идеалан гас, једначина (3.17).

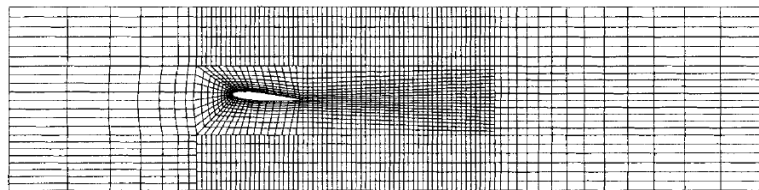
8.5 Дискретизација простора

Следећи корак у изради нумеричке симулације је дискретизација домена над којим се врши прорачун. Подручје се подели на коначан број малих запремина, где се свакој запремини додели један или више чворова у којима ће се рачунати вредности поља физичких величина која се појављују у једначинама. Резултат дискретизације простора назива се геометријска мрежа. Постоје два основна типа геометријских мрежа:

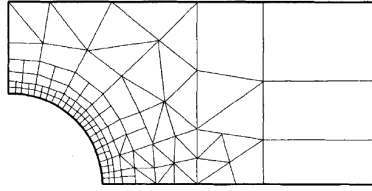
- структурирана мрежа и
- неструктурирана мрежа.



Слика 8.3 Структурирана 2D мрежа (Ferziger and Perić, 2002)



Слика 8.4 Структурирана 2D мрежа (Ferziger and Perić, 2002)



Слика 8.5 Неструктурирана 2D мрежа (Ferziger and Perić, 2002)

Код структуриране мреже положај сваке запремине је јединствено дефинисан индексима, нпр. код 3D мреже координатама у три правца Декартовог правоуглог координатног система. Ради се о веома једноставној мрежи, где се код 3D мреже запремина граничи са шест суседних запремина. Структурирана мрежа може да буде генерисана једном облашћу *слика 8.3*, или из више области *слика 8.4* (области са финијом и грубљом мрежом). Предност структуриране мреже је та што знатно олакшава програмирање. Недостаци су што може да се користи само за једноставније геометријске моделе домена и што се тешко контролише расподела запремина у геометријском моделу домена.

Неструктурирана мрежа користи се за сложеније геометрије. Ради се о флексибилнијој мрежи која се боље прилагођава (фитује) границама геометријског модела домена, *слика 8.5*. Запремине могу да имају различит облик, где нема ограничења у броју суседних запремина и броју чворова. Недостатак неструктуриране мреже је тај што захтева сложеније програмирање.

У коришћеном CFD програму постоје три облика коначних запремина:

- тетраедар, *слика 8.6* – решење споро конвергира;
- полиедар, *слика 8.7* – решење брже конвергира у односу на тетраедарску мрежу и даје конфорнију мрежу на прелазу између региона;
- призма (тримована запремина), *слика 8.8* – захтева најмање меморије за генерисање мреже, али не даје конфоран прелаз између појединих региона.

За нумеричке симулације АТР жалузина коришћена је полиедарска геометријска мрежа, као компромис у брзини извршења нумеричке симулације, *слика 8.9*. У *табели 8.1* приказане су карактеристике генерисане мреже за АТР жалузину типа А при нападном углу лопатице од 50° .

Табела 8.1 Карактеристике генерисане мреже АТР жалузину типа А при нападном углу лопатице од 50°

Капацитет меморије [МВ]	55,49
Број запремина [-]	113710
Број површина [-]	662635
Број темена [-]	541437

Квалитет генерисане мреже проверава се преко три параметра:

- квалитета површине запремине;
- квалитета облика запремине и
- промене запремине.

Квалитет површине запремине. За добар квалитет запремине у погледу њене површине потребно је да јединични вектор нормале површине буде усмерен од центра запремине. Када постоји одређени број запремина код којих је јединични вектор нормале усмерен ка центру запремине, тада је квалитет површине мањи од 1.

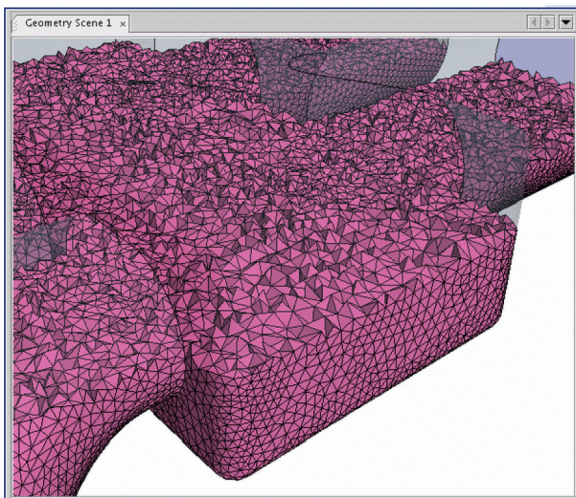
Квалитет облика запремине. За вредност параметра 1 запремина има савршен облик, правилан тетраедар, хексаедар итд. Како вредност параметра тежи нули запремина све више одступа од идеалног облика. У зависности од изабраног физичког модела запремина може да има квалитет 10^{-6} а да нумеричка симулација ради без проблема.

Промена запремине. Представља однос запремине према највећој запремини у њеном суседству. Вредност параметра 1 указује да је запремина једнака или већа од највеће запремине са којом се граничи. Велике промене у суседним запреминама доводе до нестабилности приликом решавања проблема (флукуација параметра који се одређује). Вредности параметра 10^{-3} и мање сматрају се сумњивим и треба их преиспитати.

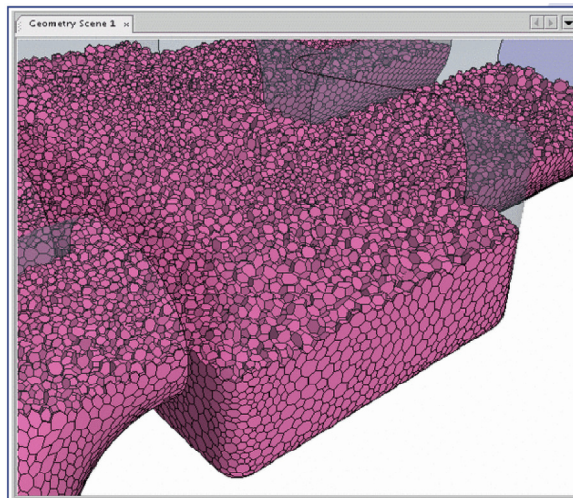
Препоручене минималне вредности параметара којима се дефинише квалитет генерисане геометријске мреже дате су у *табели 8.2*.

Табела 8.2 Минимале вредности параметара којим се дефинише квалитет геометријске мреже

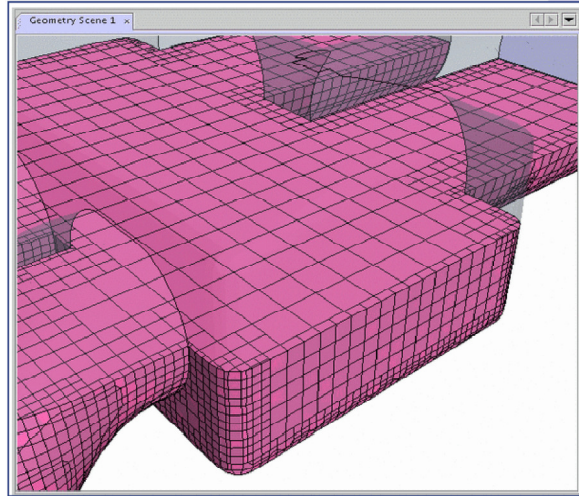
Квалитет површине запремине	0,93 - 0,95
Квалитет облика запремине	10^{-6} - 10^{-9}
Промена запремина	10^{-3} - 10^{-4}



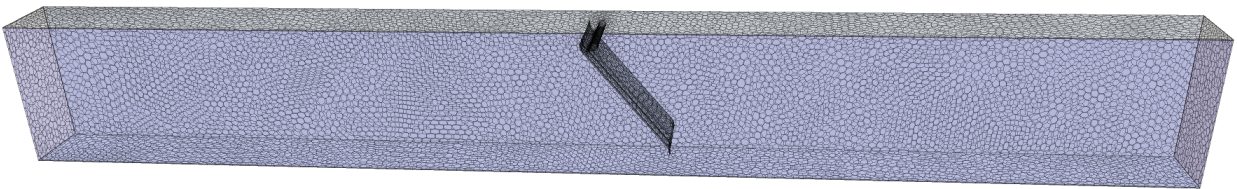
Слика 8.6 Тетраедарска мрежа (STAR, 2009)



Слика 8.7 Полиедарска мрежа (STAR, 2009)

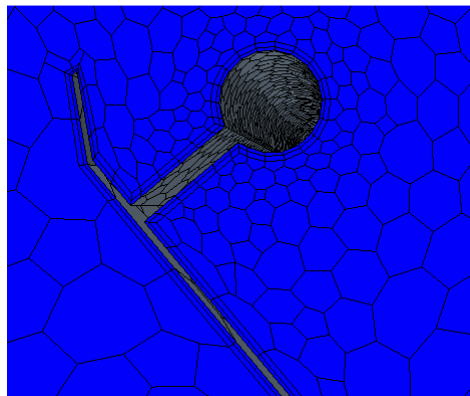


Слика 8.8 Тримова мрежа (STAR, 2009)



Слика 8.9 Изглед генерисане полиедарске мреже за жалузину типа А при нападном углу лопатице од 50°

На граници геометријске мреже запремина формирају се ортогоналне призматичне запремине, слика 8.10. Слојеви призматичних запремина неопходни су да би се тачно симулирала турбуленција и пренос топлоте на граници геометријске мреже. Дебљина, број слојева и расподела призматичних слоја мреже одређује се према коришћеном моделу турбуленције. Препорука је да број призматичних слојева и њихова дебљина треба да расте са смањењем Рејнолдсовог броја Re (Hirsch, 2007), (STAR, 2009). Услед тога нумеричке симулације АТР жалузина, код којих се остварује принудно струјање ваздуха, реализоване су са мањим дебљинама и мањим бројем слојева призматичних запремина.



Слика 8.10 Призматични слојеви запремина на граници чврсте површине и флуида

Густина геометријске мреже веома је важан параметар нумеричке симулације. Гушћа мрежа, са већим бројем коначних запремина даје тачније и стабилније решење. Међутим, густина мреже ограничена је ресурсима рачунара на коме се изводе нумеричке симулације. У том духу густина мреже треба да буде компромис брзине извршења и тачности са једне стране и стабилности решења нумеричке симулације са друге стране.

8.6 Дискретизација једначина

Дискретизација парцијалних диференцијалних једначина је поступак у коме се парцијалне диференцијалне једначине апроксимирају алгебарским једначинама. Резултат дискретизације парцијалних диференцијалних једначина на задатој геометријској мрежи јесте систем алгебарских једначина, где се на сваку запремину геометријске мреже примењују једначине одржања масе, кретања и енергије.

Дискретизација парцијалних диференцијалних једначина ради се једном од три методе:

- методом коначних запремина (МКЗ¹);
- методом коначних елемената (МКЕ²) и
- методом коначних разлика (МКР³).

МКЕ и МКЗ користе неструктурирану геометријску мрежу и имају сложен систем алгебарских једначина, док МКР користи структурирану геометријску мрежу и имају једноставан систем алгебарских једначина.

Дискретизација парцијалних диференцијалних једначина веома је важна, јер од ње зависи брзина нумеричке симулације и тачност решења. CFD програм Star CCM+ који је коришћен за нумеричке симулације АТР жалузина користи метод коначних запремина.

За одређивање вредности променљивих на границама контролне запремине користе се различите методе интерполације. Методе интерполације раде се према развијеним нумеричким шемама. Нумеричке шеме које се највише користе за одређивање променљивих на границама контролне запремине су (Džijan, 2010), (Ferziger and Perić, 2002):

- експоненцијална шема;
- узводна шема;
- шема централних разлика;
- QUICK⁴ (Quadratic Upwind Scheme) шема;
- линеарно узводна шема;
- хибридна шема;
- комбинована шема;

¹ МКЗ - методом коначних запремина.

² МКЕ - методом коначних елемената.

³ МКР - методом коначних разлика.

⁴ QUICK (Quadratic Upwind Scheme) – узводна шема која се темељи на провлачењу квадратне функције кроз три чвора.

- скуп конвенцијски ограничених шема;
- скуп TVD⁵ (Total Variation Diminishing) шема са лимитерима протока и
- ENO⁶ (Essential Non-oscillatory Scheme) и WENO (Weighted Essential Non-oscillatory Scheme) шеме.

Нумеричке симулације АТР жалузина урађене су са линеарном узводном шемом (Second Order Upwind), *слика 8.11*. Вредност променљиве φ_n (притиска, температуре, брзине и др.) на границама контролне запремине n , према шеми приказаној на *слици 8.11* добија се из једначине:

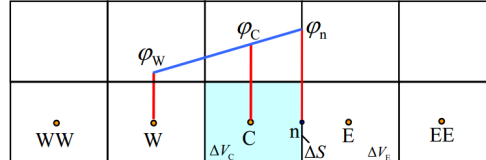
- случај када је масени проток флуида кроз површину ΔS већи од нуле $\dot{m} > 0$:

$$\varphi_n = \varphi_C + \frac{1}{2}(\varphi_C - \varphi_W), \quad (8.6)$$

- случај када је масени проток флуида кроз површину ΔS мањи од нуле $\dot{m} < 0$

$$\varphi_n = \varphi_C + \frac{1}{2}(\varphi_E - \varphi_{EE}), \quad (8.7)$$

где су вредности променљиве φ узете у различитим тачкама (C, W, E, EE) шеме приказане на *слици 8.11*.



Слика 8.11 Шематски приказ коришћене линеарно узводне нумеричке мреже (Džijan, 2010)

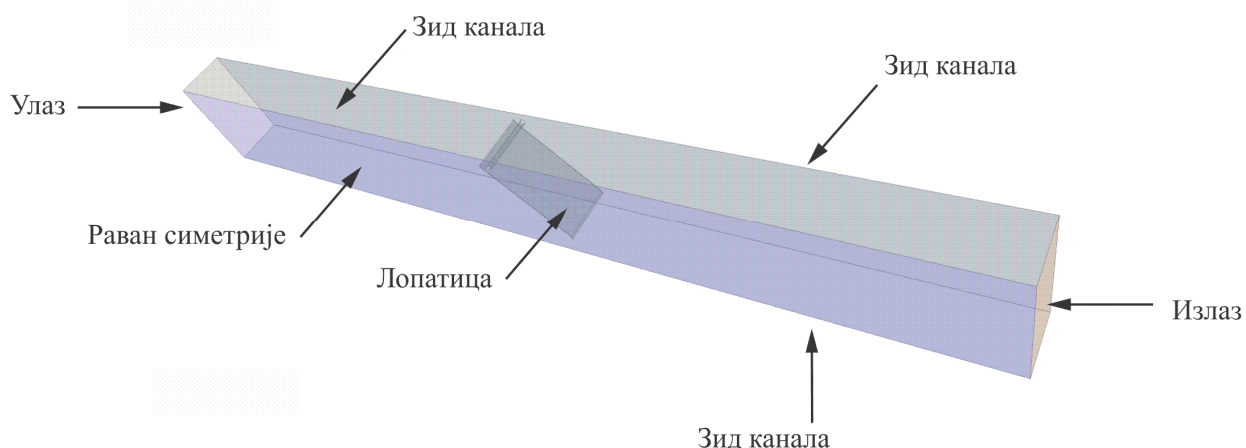
8.7 Гранични услови

На границама геометријске мреже дефинишу се гранични услови. Гранични услови геометријске мреже нумеричке симулације АТР жалузине типа А приказани су на *слици 8.12*, а могу се сврстати у четири групе:

- зидови канала и лопатица;
- улаз у канал;
- излаз из канала и
- раван симетрије.

⁵ TVD (Total Variation Diminishing) – шема са лимитерима протока.

⁶ ENO (Essential Non-oscillatory Scheme) и WENO (Weighted Essential Non-oscillatory Scheme) - су проширење TVD шеме које се користе на структурираним мрежама и у нумеричкој шеми користе већи број чворова тако да су теже применљиве на неструктурираним мрежама, а и скупље у погледу времена рачунања.



Слика 8.12 Гранични услови геометријске мреже АТП жалузине типа А при нападном углу лопатице од 50°

Зидови канала и лопатица посматрани су као глатке површине, на којима нема клизања ваздуха. Посматрано је да је температура ваздуха једнака температури зида канала и лопатице:

$$t = t_z. \quad (8.8)$$

као и да су све компоненте брзине струјања ваздуха на зидовима једнаке нули:

$$v_x = v_y = v_z = 0. \quad (8.9)$$

На улазу у домен задаје се масени проток ваздуха. Излаз из домена је отворен ка околини, где се претпоставља да на месту излаза нема разлике притиска:

$$\Delta p = 0. \quad (8.10)$$

Формирани домен представља једну половину домена физичког модела. Услов симетричности узет је у обзир тако да је компонента брзине ваздушне струје нормална на раван симетрије једнака нули.

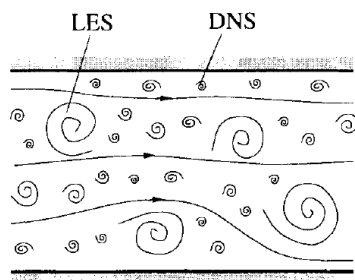
8.8 Модели турбуленције

Турбулентно струјање карактерише се веома широким спектром турбулентних флукуација физичких величина, различитих амплитуда и фреквенција, слика 8.13. Турбулентно струјање може се сматрати хаотичним струјањем где поља физичких величина (брзина, притисак итд.) показују случајне промене у временским и просторним координатама, где је могуће статистички одредити њихове средње вредности.

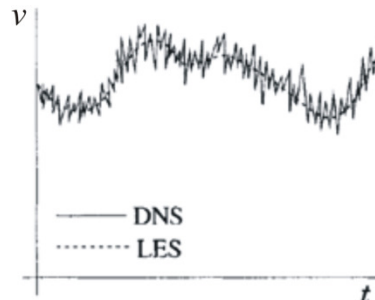
При директном решавању парцијалних диференцијалних једначина DNS⁷ (Direct Numerical Simulation) при турбулентном струјању треба да се користи веома фина

⁷ DNS (Direct Numerical Simulation) - директно решавање парцијалних диференцијалних једначина.

геометријска мрежа која обухвата најмање дужине и тако мали временски интервал интеграције да се обухвате највише фреквенције, при чему би тачност нумеричко модела била веома висока. За реалне инжењерске проблеме такав приступ решавању проблема је и даље превише захтеван са становишта капацитета и брзине рачунања рачунаром (Ferziger and Perić, 2002).



Слика 8.13 Шематски приказ турбулентног струјања (Ferziger and Perić, 2002)



Слика 8.14 Зависности брзине струјања током времена у једној тачки простора (Ferziger and Perić, 2002)

Вртлози већих димензија имају већу енергију од вртлога мањих димензија. Директна нумеричка симулација која обухвата вртлоге већих димензија LES⁸ (Large Eddy Simulation) има из тог разлога више смисла од директне нумеричке симулације која би обухватила вртлоге малих димензија (Ferziger and Perić, 2002), слика 8.14.

Скуп временски осредњених парцијалних диференцијалних једначина назива се Рејнолдсовим једначинама. Рејнолдсовим осредњавањем Навије-Стоксових једначина RANS⁹ (Raynolds Averaged Navier Stokes) покушава се стохастичка природа турбулентног струјања приказати временским осредњеним пољима физичких величине, а то је могуће ако се узме бесконачно много корелација између физичких величина. С друге стране, искуство показује да је довољно познавати коначан број корелација да би се прорачунале карактеристике поља интересантне у погледу инжењерске праксе и на тој чињеници се темеље модели турбуленције (Džijan, 2010). Основа оваквог прилаза је да је турбулентно струјање састављено из просечне вредности брзине струјања \bar{v} и тренутног одступања брзине струјања v' .

Најраспрострањенији модел турбуленције је $k - \epsilon$ модел, који се базира на временском осредњавању кинетичке енергије турбуленције k и дисипације кинетичке енергије ϵ којом се она неповратно претвара у унутрашњу енергију. Нумеричке симулације АТР жалузина изведене су управо са $k - \epsilon$ моделом турбуленције.

⁸ LES (Large Eddy Simulation) - директно решавање парцијалних диференцијалних једначина које обухвата само вртлоге већих димензија.

⁹ RANS (Raynolds Averaged Navier Stokes) - Рејнолдсовим осредњавањем стохастичка природа турбулентног струјања приказује се временским осредњеним пољима физичких величине.

Постоји више варијанти најраспрострањенијег $k - \epsilon$ модела (STAR, 2009):□

- Стандардни $k - \epsilon$ модел;
- Напредни $k - \epsilon$ модел;
- LRN¹⁰ $k - \epsilon$ модел (Low Reynolds Number, за мале вредности Рејнолдсових бројева);
- двослојни $k - \epsilon$ модел;
- RNG¹¹ $k - \epsilon$ модел (Re-Normalisation Group, погодан за унутрашња струјања и када постоје оштра скретања флуидне струје);

Поједини модели турбуленције развијени су за потребе примене у домену непосредно уз сам зид. Средња вредност брзине у тачки уз сам зид, при турбулентном струјања флуида пропорционална је логаритамском растојању од посматране тачке до зида:

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ + C^+, \quad (8.11)$$

где су:

- u^+ - бездимензиона брзина [-];
- k - Фон Карманова (Von Kármán) константа [-];
- y^+ - бездимензионо растојање од зида [-];
- C^+ - бездимензиона константа [-];

Бездимензионо растојање од тачке у којој се посматра средња брзина при турбулентном струјању до зида гласи:

$$y^+ = \frac{y \cdot v_\tau}{\nu}, \quad (8.11)$$

где су:

- y - растојање од посматране тачке до зида [m];
- v_τ - брзина трења [m/s];
- ν - кинематска вискозност флуида [m/s];

Стандардни $k - \epsilon$ модел и напредни $k - \epsilon$ модел погодни су за грубље мреже, где је вредност y^+ у граничним запреминама до зида 30 и више. Напредни модел ће генерално дати боље резултате од стандардног модела. Двослојни (Two-Layer) стандардни $k - \epsilon$ модел и двослојни напредни $k - \epsilon$ су флексибилни према облицима геометријских мрежа и могу да се користе у истом домену где има и мањих вредности y^+ (у границама 1 до 30), (STAR, 2009).

¹⁰LRN (Low Reynolds Number) – модел турбуленције за мале вредности Рејнолдсових бројева.

¹¹ RNG (Re-Normalisation Group) - $k - \epsilon$ модел погодан за унутрашња струјања и када постоје оштра скретања флуидне струје;

Постоји и модел турбуленције $k - \omega$ који се базира на временском осредњавању кинетичке енергије турбуленције k и угаоне брзине ротације честица ω (Džijan, 2010)□

8.9 Итеративно решавање нумеричке шеме

Велики број параметара утиче на резултате нумеричке симулације. Параметри нумеричког модела могу да се варирају, па се прати брзина, конвергенција, стабилност резултата и тачност резултата у поређењу са резултатима добијеним експерименталним путем.

Подешавање нумеричке симулације може да се опише у неколико корака:

- усвајање параметара нумеричке симулације на основу теоријских препорука и реализованих модела;
- анализирање свих процеса са аспекта променљивости у времену, градијента у простору;
- увођење одређене апроксимације и
- усвајање парамететара који ће се варирати и параметара који ће остати константи.

Променљиве које су вариране при развоју нумеричких модела АТР жалузина били су:

- величина (финоћа) мреже и
- број, распоред и висина призматичних слојева у граничном слоју.

8.10 Анализа резултата са аспекта стабилности и тачности

Квалитет решења добијеног нумеричком симулацијом дефинише се преко:

- критеријума конвергенције релативних остатака решења и
- вредности решења физичке величине од интереса.

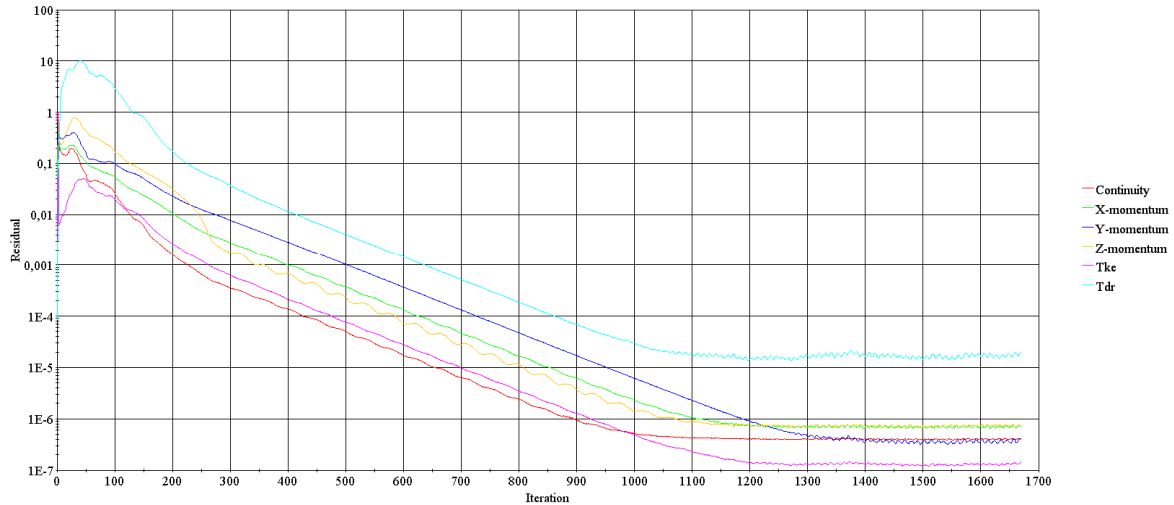
Оба наведена критеријума морају да се узму у обзир приликом оцене квалитета решења добијеног нумеричком симулацијом.

8.10.1 Критеријум конвергенције

Потребно је дефинисати критеријум конвергенције којим ће се прекинути итеративни поступак решавања проблема када решење постане довољно тачно. Постоје два нивоа итерација: унутрашње (решавају линеарне једначине) и спољашње (у вези су са нелинеарношћу и са везом између једначина), (Ferziger, Perić, 2002).

Према препорукама из литературе сматра се да је решење конвергирало ка тачном решењу када су релативни остаци нумеричких решења испод 0,1% (10^{-3}) и када они не варирају више од једног реда величине (Ferziger, Perić, 2002).

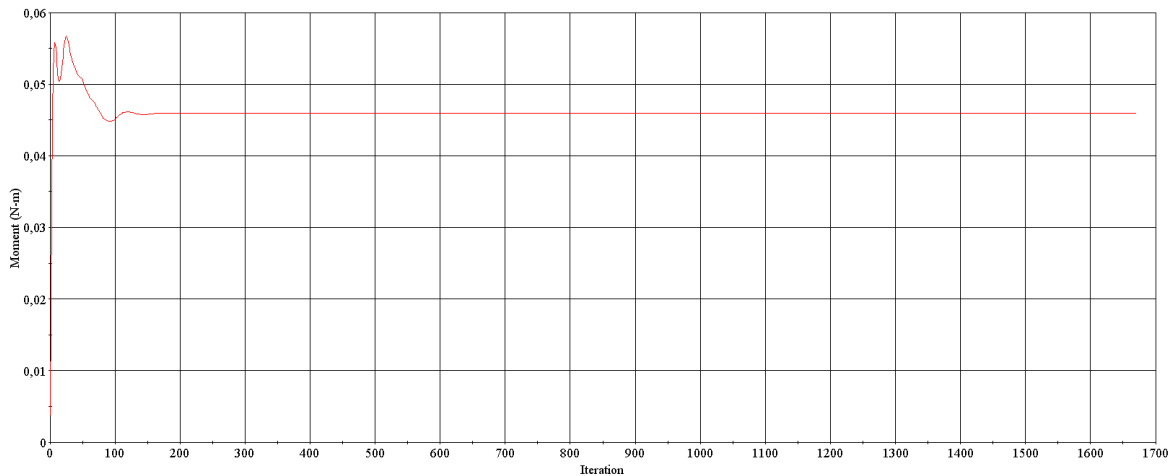
На *слици 8.15* приказан је монитор конвергенције на коме се прати смањење и стабилност релативних остатака нумеричког решења.



Слика 8.15 Пример мониторинга конвергенције релативних остатака итерација

8.10.2 Вредност решење физичке величине од интереса

Према препорукама из литературе осцилације вредности решења физичке величине која је од интереса не би требало да буду веће од 1 % између две итерације (Ferziger, Perić, 2002). Физичка величина која је од интереса и која се одређује нумеричким симулацијама АТР жалузине је момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу жалузине, слика 8.16.



Слика 8.16 Пример мониторинга момента којим ваздушна струја делује на лопатицу АТР жалузине

За израчунавање интензитета момента силе који делује на мерну лопатицу АТР жалузине у CFD програму коришћен је следећи математички модел:

$$M = \sum_{i=1}^n \left[\vec{r}_i \times \left(\vec{F}_{p_i} + \vec{F}_{\tau_i} \right) \right] \cdot \vec{a}, \quad (8.11)$$

где су:

i - ти део површине лопатице [-];

\vec{F}_{p_i} - вектор силе притиска која делује на i - ти део површине мерне лопатице [N];

\vec{F}_{τ_i} - вектор силе смицања која делује на i - ти део површине мерне лопатице [N];

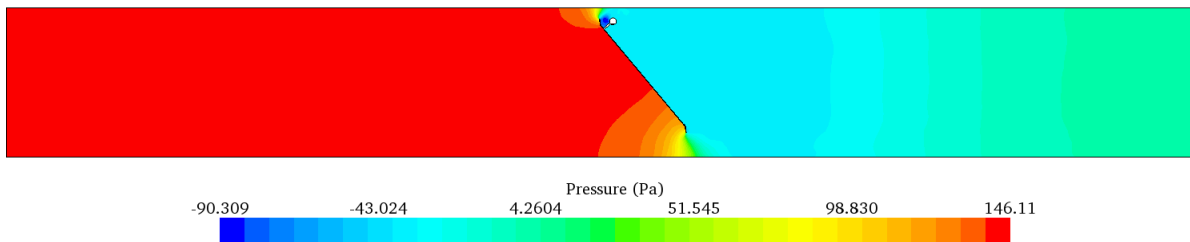
\vec{a} - јединични вектор који дефинише осу која пролази кроз обртну тачку лопатице x_0 око које се остварује момент [-] и

\vec{r}_i - вектор положаја i - тог дела површине мерне лопатице у односу на обртну тачку лопатице x_0 [m].

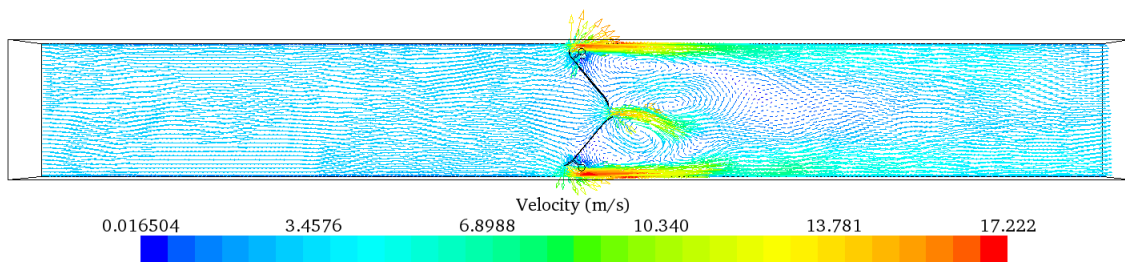
8.10 Постпроцесирање

Постпроцесирање представља приказивање и обраду резултата добијених нумеричком симулацијом. Нумеричком симулацијом добија се веома велик број података које је потребно адекватно приказати за потребе анализе. Највећа предност решавања једначина нумеричким путем комерцијалним CFD програмима јесте могућност визуализације добијених података (поље скалара, поље вектора, 3D визуализација, графички приказ корисничких функција итд). Постпроцесирањем визуализација података може да се подеси пре или после нумеричке симулације. Предност подешавања визуализације података пре пуштања нумеричке симулације је та што током симулације могу да се визуелно прате подаци.

На *слици 8.16* приказано је поље притиска на симетралној равни АТР жалузине типа А (за нападни угао лопатице од 50° и масени проток ваздуха од $0,21 \text{ kg/s}$), док је на *слици 8.17* приказано поље вектора брзине на симетралној равни АТР жалузине типа В (за нападни угао мерне лопатице од 50° и масени проток ваздуха од $0,21 \text{ kg/s}$).



Слика 8.16 Поље притиска на симетралној равни АТР жалузине типа А (за нападни угао лопатице од 50° и масени проток ваздуха од $0,21 \text{ kg/s}$)



Слика 8.17 Поље вектора брзине на симетралној равни АТР жалузине типа В (за нападни угао мерне лопатице од 50° и масени проток ваздуха од $0,21 \text{ kg/s}$)

8.11 Експериментална верификација решења нумеричке симулације

Велики број добијених података, њихова визуализација и велике могућности постпроцесирања CFD програмима несумњиво повећавају конфор и олакшавају анализу података, међутим мора да се води рачуна о томе да нумеричко решење даје приближне резултате.

Нумеричко решење даје приближне резултате из следећих разлога (Ferziger, Perić, 2002):

- грешка моделирања реалног система због усвојених апроксимација;
- апроксимација просторне дискретизације (већ поједностављен модел прилагођава се границама коначних запремина);
- простор је дискретизован одређеном резолуцијом која треба да је компромис између тачности и времена решавања;
- за сложене геометрије, мрежа мора да буде неструктурирана, што значи да је распоред коначних запремина неправилан, да би се што боље уклопио у геометрију модела;
- поједностављења и апроксимације у диференцијалним једначинама (апроксимација диференцијалних једначина алгебарским у времену и простору);
- итеративни поступак се завршава када је постигнута одређена грешка конвергенције и
- моделирање турбуленције и других процеса.

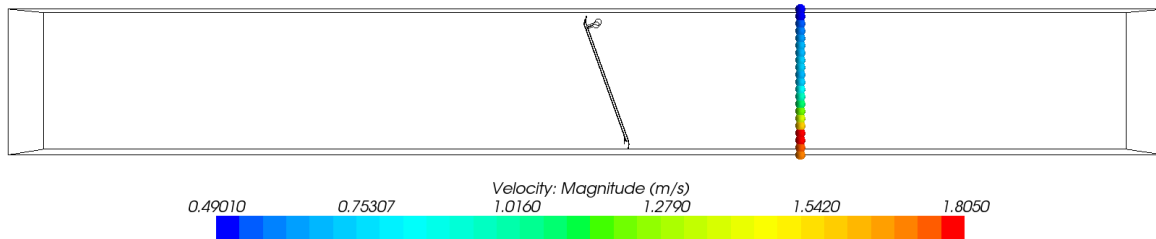
Гранични услови, финоћа мреже или модел турбуленције могу да буду неодговарајући за моделирани физички проблем. Иако су задовољена два горе дефинисана критеријума квалитета решења и моделирани проблем је математички тачан, не мора да значи да моделирани проблем добро представља реалан процес. Несумњиво да је добро теоријско и практично познавање физике процеса који се анализира од велике користи у откривању грешке нумеричког решења. Међутим, да би се у потпуности утврдила грешка нумеричког решења мора да се уради верификација експерименталном методом.

Примена експерименталне методе на неком физичком моделу у области механике флуида зна веома често да буде веома сложена, дуготрајна и скупа. Основни задатак нумеричких симулација је да се смањи време рада експерименталном методом на физичком моделу. На овај начин се нумеричким симулацијама на довољно брзом рачунару знатно скраћује време истраживања.

Међутим, нумерички модел мора експериментално да се верификује, па се веома често поставља питање код истраживача до ког нивоа треба да иде верификација експерименталном методом? Оно што је сигурно јесте да нема смисла да се уради експериментална верификација нумеричког модела за све комбинације фактора и нивоа истраживања. На овај начин би се практично паралелно користиле експериментална и нумеричка методе.

За потребе верификације нумеричког модела АТР жалузина типа А и В у постпроцесингу CFD програма урађена су два подешавања.

Првим подешавањем постављен је виртуални сензор за мерење профила брзине на 35 cm иза обртне осе мерне лопатице, *слика 8.18*. Профил брзине добијен нумеричком симулацијом упоређен је са профилом брзине добијеним мерењима на истом месту на физичком моделу.



Слика 8.18 Профил брзине 35 cm иза лопатице АТР жалузине типа А (за нападни угао лопатице од 70° и масени проток ваздуха од $0,05578 \text{ kg/s}$)

Другим подешавањем у постпроцесингу CFD програма дефинисан је мониторинг момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалузине, *слика 8.16*. За верификацију нумеричког модела коришћена су два независна низа измерених података.

Коришћењем података из првог низа мерења као улазних података нумеричке симулације (нападни угао мерне лопатице и брзина струјања ваздуха испред мерне лопатице), нумеричком симулацијом израчунат је момент ваздушне струје који делује на мерну лопатицу АТР жалузине. На основу познате брзине струјања, нападног угла и момента ваздушне струје добијена је корелацијска функција (4.25) и калибрисана је једначина за одређивање брзине струјања АТР жалузине (4.24). На овај начин урађено је математичко моделирање АТР жалузине на основу решења нумеричке симулације.

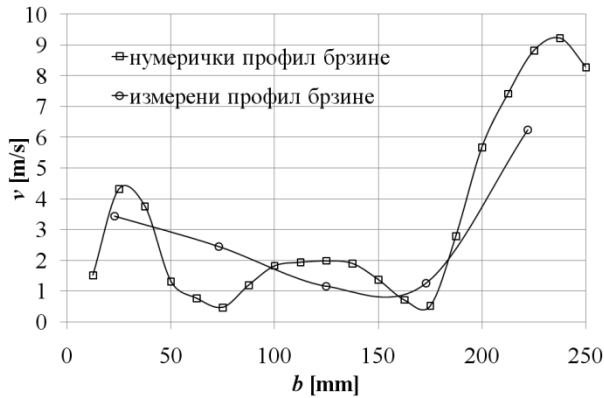
Верификација математичког модела урађена је подацима другог независног низа мерења. На основу измереног момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу и нападног угла мерне лопатице из горе дефинисаног математичког модела (4.24) и (4.25) добијена је моделска брзина струјања. Моделска брзина струјања упоређена је са измереном брзином струјања ваздуха.

8.12 Резултати експерименталне верификације нумеричке симулације

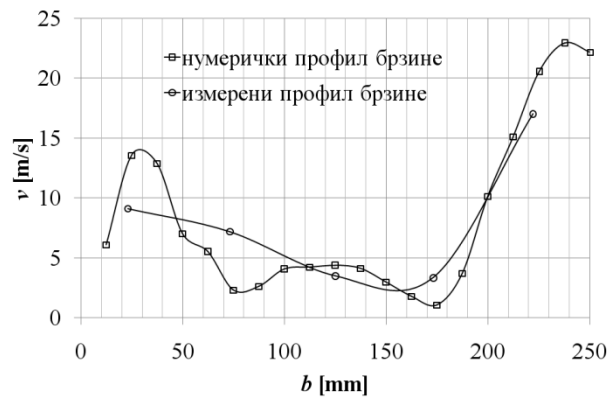
8.12.1 Провера профила брзине струјања иза лопатице АТР жалузине

Место на којем је урађено мерење профила брзине није валидно за тачно мерење брзине струјања ваздуха, јер на растојању 35 cm иза осе лопатице АТР жалузине није успостављен униформан, теоријски профил брзине. Међутим, тачно мерење брзине струјања није био циљ, већ је циљ био да се измереним профилом брзине непосредно иза лопатице АТР жалузине анализира поремећај који лопатица изазива у струји ваздуха. Нумерички и измерени профил брзине упоређени су како би се видело да ли лопатице АТР жалузине имају исти тренд поремећаја који уносе у ваздушну струју за два разматрана начина решавања проблема.

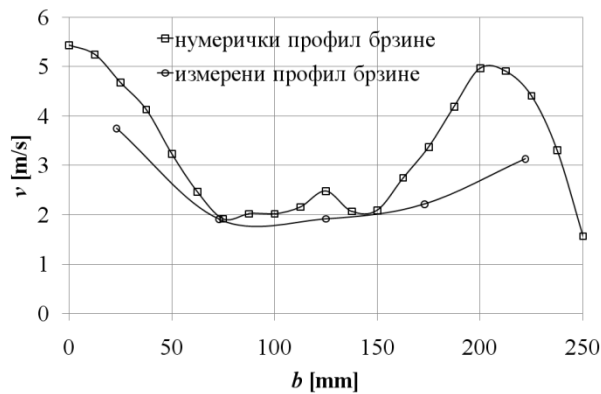
Резултати поређења нумеричког и измереног профила брзине приказани су на сликама од 8.19 до 8.22 за АТР жалузине типа А, а на сликама од 8.23 до 8.28 за АТР жалузине типа В.



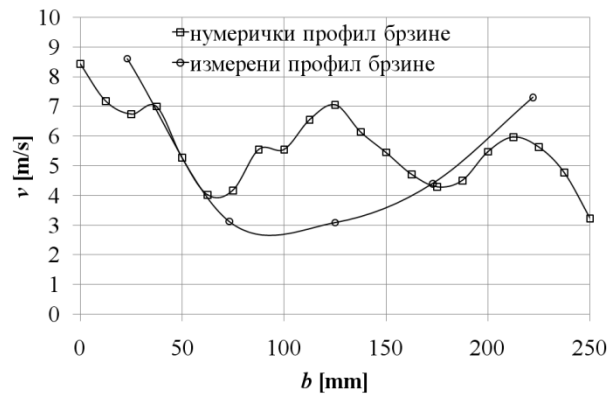
Слика 8.19 АТР жалужина типа А при нападном углу лопатнице од 40° и масеном протоку ваздуха од $0,1 \text{ kg/s}$



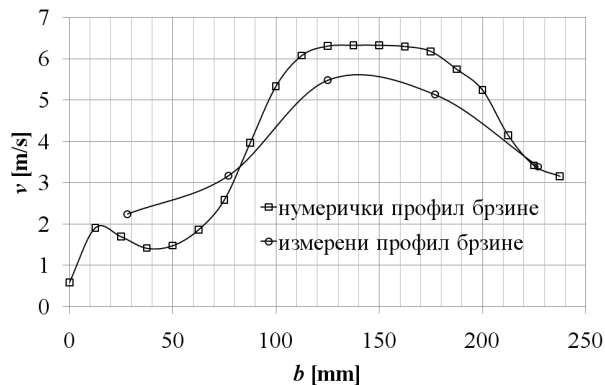
Слика 8.20 АТР жалужина типа А при нападном углу лопатнице од 40° и масеном протоку ваздуха од $0,21 \text{ kg/s}$



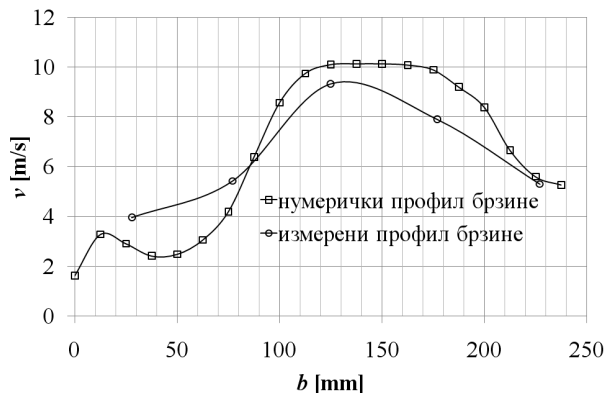
Слика 8.21 АТР жалужина типа А при нападном углу лопатнице од 70° и масеном протоку ваздуха од $0,16 \text{ kg/s}$



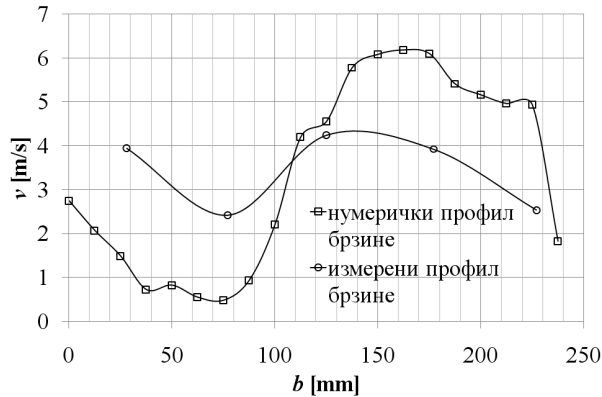
Слика 8.22 АТР жалужина типа А при нападном углу лопатнице од 70° и масеном протоку ваздуха од $0,42 \text{ kg/s}$



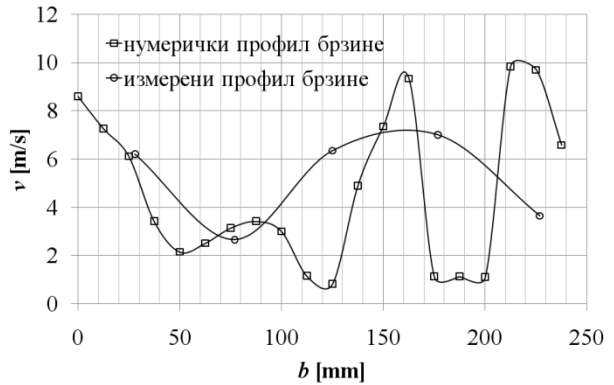
Слика 8.23 АТР жалужина типа В при нападном углу лопатнице од 10° и масеном протоку ваздуха од $0,3 \text{ kg/s}$



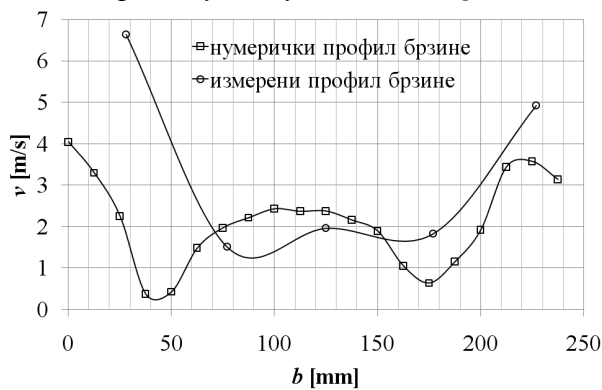
Слика 8.24 АТР жалужина типа В при нападном углу лопатнице од 10° и масеном протоку ваздуха од $0,49 \text{ kg/s}$



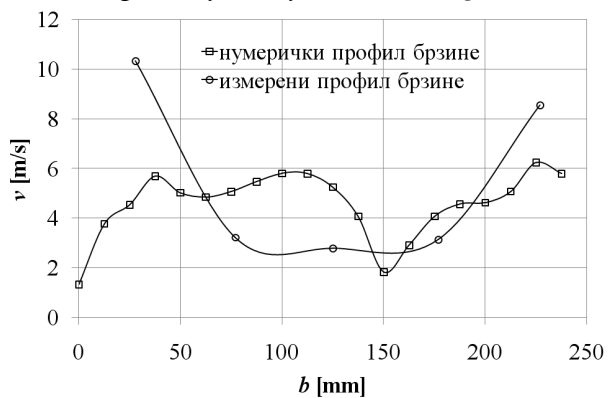
Слика 8.25 АТР жалузина типа В при нападном углу лопатице од 40° и масеном протоку ваздуха од $0,22 \text{ kg/s}$



Слика 8.26 АТР жалузина типа В при нападном углу лопатице од 40° и масеном протоку ваздуха од $0,49 \text{ kg/s}$



Слика 8.27 АТР жалузина типа В при нападном углу лопатице од 70° и масеном протоку ваздуха од $0,14 \text{ kg/s}$

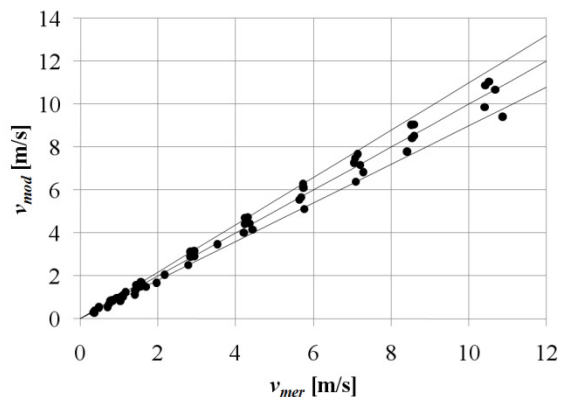


Слика 8.28 АТР жалузина типа В при нападном углу лопатице од 70° и масеном протоку ваздуха од $0,23 \text{ kg/s}$

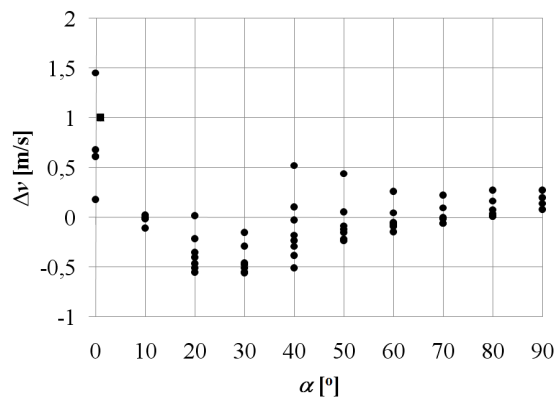
Код обе испитиване АТР жалузине може да се уочи да лопатице имају исти тренд поремећаја који уносе у ваздушну струју при нумеричком и експерименталном начину решавања проблема. Такође, уочљиво је да је код оба типа испитиваних АТР жалузина боље поклапање нумеричког и измереног профила брзине при мањим нападним угловима мерне лопатице, када је жалузина отворенија.

8.12.2 Математичко моделирање решењима нумеричке симулације

На сликама 8.29 и 8.30 приказани су резултати верификације математичког модела добијеног на основу решења нумеричке симулације за АТР жалузину типа А. На слици 8.29 приказано је поређење измерене брзине v_{mer} и моделске брзине v_{mod} струјања ваздуха. На слици 8.30 приказана је разлика Δv измерене и моделске брзине струјања ваздуха у функцији нападног угла лопатице α .



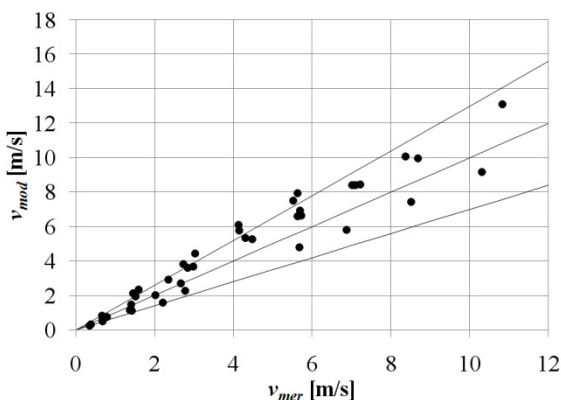
Слика 8.29 Верификација решења нумеричке симулације за АТР жалузину типа А (v_{mer} у функцији v_{mod})



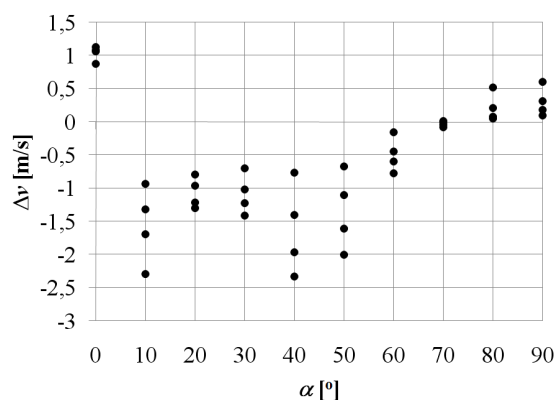
Слика 8.30 Верификација решења нумеричке симулације за АТР жалузину типа А (Δv у функцији α)

На слици 8.29 може да се уочи да је разлика измерене и моделске брзине у границама $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха. Разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха већа је при нижим вредностима нападног угла мерне лопатице, када је АТР жалузина отворенија, слика 8.30. На овај начин су резултати нумеричке симулације АТР жалузине типа А у потпуности верификовани, где су резултати идентични као у случају када је математички модел (4.24) и (4.25) моделиран подацима добијеним експерименталним путем, слике 7.50 и 7.51.

На сликама 8.31 и 8.32 приказани су резултати верификације математичког модела добијеног на основу решења нумеричке симулације за АТР жалузину типа В. На слици 8.31 приказано је поређење измерене брзине и моделске брзине струјања ваздуха. На слици 8.32 приказана је разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха у функцији нападног угла лопатице.



Слика 8.31 Верификација решења нумеричке симулације за АТР жалузину типа В (v_{mer} у функцији v_{mod})



Слика 8.32 Верификација решења нумеричке симулације за АТР жалузину типа В (Δv у функцији α)

На слици 8.31 може да се уочи да је разлика измерене и моделске брзине у границама $\pm 30\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха. Разлика измерене и моделске брзине струјања ваздуха већа је при нижим вредностима нападног угла мерне лопатице, када је

АТР жалузину отворенија, *слика 8.32*. Разлика измерене и моделске брзине је знатно већа од разлике када је математички модел (4.24) и (4.25) моделиран подацима добијеним експерименталним путем, *слике 7.52 и 7.53*. АТР жалузина је мерни уређај и верификација математичког модела добијена на основу решења нумеричке симулације знатно је важнија од верификације поређењем нумеричког и измереног профила брзине непосредно иза жалузине. Стога може се закључити да решења нумеричке симулације АТР жалузине типа В нису експериментално верификована.

8.13 Закључна разматрања

У оквиру докторске дисертације урађене су нумеричке симулације методом коначних запремина према детаљно дефинисаном плану истраживања. Математички модел АТР жалузине типа А и В моделиран је решењима нумеричких симулација. Експериментална верификација разматраног математичког модела урађена је на два начина:

- поређењем нумеричког и измереног профила брзине непосредно иза лопатица АТР жалузина и
- експерименталном верификацијом математичког модела АТР жалузине добијеног на основу решења нумеричке симулације.

Нумерички и измерени профили брзине показују исти тренд непосредно иза испитиваних АТР жалузина. Разлика измерене и моделске брзине код АТР жалузина типа А је у границама $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха, док је код АТР жалузина типа В у границама $\pm 30\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха.

На овај начин су решења нумеричке симулације код АТР жалузине типа А у потпуности верификована. Математички модел добијен решењима нумеричке симулације је адекватан, где су резултати верификације исти као и у случају када је математички модел АТР жалузине типа А добијен експерименталним путем. Даљи развој АТР жалузине типа А може да се настави предложеним параметрима нумеричке симулације, где би требало испитати утицај величине и облика попречног пресека и типа лопатице на адекватност математичког модела и тачност мерења жалужином.

Решења нумеричке симулације код АТР жалузине типа В нису верификована. Постоји значајна разлика у резултатима за случај када је математички модел добијен решењима нумеричке симулације и експерименталним путем. Потребно је у будућности урадити нова подешавања нумеричке симулације, првенствено модела турбуленције и урадити верификацију решења нумеричке симулације.

У сваком случају докторском дисертацијом потврђена је могућност коришћења методе коначних запремина у даљем развоју АТР жалузина, где уз адекватне ресурсе рачунара постоји знатан потенцијал смањења времена и трошкова у односу на експериментална истраживања.

9. ЗАКЉУЧАК

Предмет истраживања у оквиру докторске дисертације је развој методе и мерила запреминског протока ваздуха. Запремински проток ваздуха мерен је квадратном регулационом жалузином на посредан начин, мерењем момента којим ваздушна струја делује на укочену лопатицу и положаја лопатице жалужине. Услед начина рада у литератури је овакав тип жалужине добио назив АТР (Air Torque Position) жалужина.

На основу измерених вредности брзине струјања ваздуха, положаја лопатице и момента којим ваздушна струја делује на лопатицу жалужине урађено је математичко моделирање и верификација математичког модела. Коришћењем добијеног математичког модела брзина струјања ваздуха одређује се посредно мерењем положаја лопатице и момента којим ваздушна струја делује на лопатицу жалужине. Запремински проток ваздуха је производ измерене брзине струјања ваздуха и површине попречног пресека испред регулационе жалужине.

Експериментално истраживање реализовано је у Лабораторији за механику флуида, Факултета техничких наука у Новом Саду. За потребе експерименталног истраживања коришћен је постојећи ваздушни тунел који је модификован у сврху испитивања АТР жалужина према препорукама стандарда (ANSI/AMCA 500 D, 2007). На овај начин је формирано лабораторијско постројење за испитивање АТР жалужина. Направљена је лабораторијска АТР жалужина квадратног пресека (0,25 x 0,25 m) са изменљивим лопатицама, којом су испитана четири могућа типа АТР жалужина чије лопатице не формирају решетку:

- А – једна лопатица;
- В – две унакрсно вођене лопатице;
- С – две паралелно вођене лопатице и
- D – две лопатице, где је једна лопатица мерна, док је друга лопатица укочена у хоризонталном положају.

Испитана је АТР жалужина чије лопатице не формирају решетку, што је веома чест случај код регулационих жалужина на системима. За АТР жалужине чије лопатице не формирају решетку урађено је математичко моделирање, где је испитан утицај хистерезиса, локалних отпора (испред и иза жалужине), присуства праве деонице иза жалужине и малих вредности брзина струјања на адекватност математичког модела и тачност мерења запреминског протока ваздуха. Испитивањем су одређене и следеће карактеристике АТР жалужине: корекциони фактор момента, нула мерила, режим струјања, линеарност, пад притиска, губитак енергије, коефицијент протока, утицај ауторитета, статичка осетљивост и временска константа мерила. Ради се о веома важним карактеристикама којима се употпуњује слика о мерилу протока, а којима се нису бавили аутори у прошлости.

Када се при математичком моделирању и верификацији математичког модела хистерезис АТР жалужине узме у обзир, код већег броја мерних тачака разлика измерене и моделске брзине креће се изван граница +/-10 % од тренутно измерене брзине струјања ваздуха и то само при отворенијој жалужини (нападни угао мерне лопатице мањи од 40°). Без обзира на положај АТР жалужине на систему, када је нападни угао мерне лопатице мањи од 40°, хистерезис има значајан утицај на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања ваздуха. Ово је веома важан податак за подешавање АТР жалужина, који указује да треба да се

избегава опсег нападног угла мерне лопатице од 0° до 40° , поготово кад се има у виду да је природа хистерезиса таква да не може лако софтверски да се елиминише.

Без обзира на положај АТР жалужине, локални отпор испред жалужине значајно утиче на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања ваздуха када је нападни угао мерне лопатице мањи од 30° . Без обзира на положај АТР жалужине локални отпор иза жалужине има знатно мањи утицај на адекватност математичког модела и тачност мерења у поређењу са утицајем локалног отпора испред жалужине, па чак и када је нападни угао мерне лопатице мањи од 30° .

Уочено је да је утицај локалног отпора АТР жалужине на адекватност математичког модела и тачност мерења већи када математички модел узима у обзир хистерезис жалужине. Анализом утицаја локалног отпора АТР жалужине закључује се да иза и испред жалужине може да се налази локални отпор. У случају када се локални отпор налази испред АТР жалужине тада нападни угао мерне лопатице жалужине треба подесити да буде већи од 30° .

Када се АТР жалужина постави на крају цевовода код већег броја мерних тачака разлика измерене и моделске брзине креће се изван границе од $\pm 10\%$ од тренутно измерене брзине струјања ваздуха. Закључено је да је математички модел адекватнији, а мерење тачније за случај када се АТР жалужине налазе у цевоводу у односу на случај када се налазе на крају цевовода. Међутим, код АТР жалужина постављених на крају цевовода математички модел је неадекватан а мерење нетачно само за случај отвореније жалужине, када је нападни угао лопатице мањи од 40° . Ради се о веома важној информацији јер је могуће постављати АТР жалужине на крају цевовода, за потребе мерења протока ваздуха непосредно на месту убацивања у кондиционирани простор, под условом да се подеси нападни угао мерне лопатице да буде већи 40° .

За потребе анализе усвојена је граница задовољавајуће неизвесности мерења од $\pm 5\%$. АТР жалужина типа С не може са задовољавајућом неизвесношћу да мери протоке ваздуха при брзинама струјања испод 4 m/s . Сви остали типови АТР жалужина могу са задовољавајућом неизвесношћу да мере протоке ваздуха при брзинама струјања мањим од 4 m/s , под условом да је нападни угао мерне лопатице већи од 60° . Посебно треба истаћи АТР жалужину типа А. При нападном углу мерне лопатице од 90° , АТР жалужина типа А има мерну неизвесност од $\pm 0,54\%$ при мерењу брзине струјања од $0,35\text{ m/s}$ и мерну неизвесност од $\pm 0,1\%$ при мерењу брзине струјања од $0,7\text{ m/s}$.

Развијена АТР жалужина одликује се преносним механизмом код кога се највећи део момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу пренесе на мерило момента. Формирањем корекционог фактора као односа контролног момента и момента измереног АТР жалужином, установљено је да је удео “паразитних” момента свега пар процената у односу на момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу жалужине.

Мерило момента АТР жалужине почиње да реагује при веома малим брзинама струјања ваздуха. АТР жалужина типа А почиње да реагује при брзинама струјања испод $0,1\text{ m/s}$ (нападни угао мерне лопатице од 40° до 90°), док АТР жалужине типа В и Д почињу да реагује при брзинама струјања испод 1 m/s (нападни угао мерне лопатице од 20° до 90°). Само на самом почетку реаговања мерила момента јавља се ламиран режим

струјања, док се у целокупном преосталом мерном опсегу јавља турбулентан режим струјања ваздуха.

Без обзира на положај кроз АТР жалузину се јавља велики пад притиска, где најнеповољнији тип В има пад притиска до 500 Pa, док најповољнији тип D има пад притиска до 100 Pa. Део снаге вентилатора која је потребна за рад АТР жалузине диктирана је падом притиска кроз жалузину. При брзини струјања ваздуха у цевоводу од 5 m/s, максимални део снаге вентилатора који се троши на рад жалузине типа В је 100 W (ред величине сијалице “жаруље”), а на тип D је 20 W (ред величине “штедљиве” сијалице). Смањењем нападног угла мерне лопатице АТР жалузине смањује се потрошња енергије потребна за рад жалузине.

Са становишта загушења ваздушне струје мерним сензором најнеповољнији су типови АТР жалузина А и В, док је најповољнији тип D. При нападном углу мерне лопатице од 90°, када се АТР жалузина налази у цевоводу, коефицијент протока жалузине типа А је 0,09, док коефицијент протока жалузине типа D износи 0,5. Пре постављања АТР жалузина мора се имати на уму да њеним постављањем долази до значајног смањења протока ваздуха.

Корекција математичког модела услед промене густине ваздуха повлачи за собом постојање три додатна сензора на АТР жалузину: термометра, манометра и барометра. Неопходност постојања три додатна сензора сагледана је анализом утицај натпритиска, температуре и атмосферског притиска ваздушне струје на адекватност математичког модела и тачност мерења брзине струјања ваздуха АТР жалужином. Установљено је да натпритисак ваздушне струје има мали утицај, док температура ваздушне струје и атмосферски притисак имају значајан утицај на адекватност математичког модела и тачност мерења. Препорука је да манометар испред мерне лопатице АТР жалузине може да се изостави, док термометар за мерење температуре ваздушне струје испред мерне лопатице и барометар за мерење атмосферског притиска морају да постоје на систему.

Преносне карактеристике АТР жалузине анализирани су посматрајући жалузину као мерни систем првог реда. Анализирани су одзивна функција мерила момента АТР жалузине на улазну импулсну побуду. Установљено је да је временска константа АТР жалузина 1,8 s при доведеној импулсној побуди која одговара мерном моменту од 981 Nmm. Сасвим очекивано установљено је да коефицијент статичке осетљивости АТР жалузине расте са порастом нападног угла мерне лопатице. Управо из тог разлога при затворенијој АТР жалузину могуће је са задовољавајућом неизвесношћу мерити и ниже вредности брзине струјања.

Циљ истраживања је у потпуности реализован при чему је развијена АТР жалузина за мерење запреминског протока ваздуха са лопатицама које не формирају решетку и за њу је формиран адекватан математички модел. Потврђена је основна хипотеза докторске дисертације да дефинисани математички модел може успешно да се користи за тачно и поуздано мерење запреминског протока ваздуха. Разлика између измерене и моделске брзине је +/-10 % од тренутно измерене брзине струјања, што је повољнија граница од оне коју је Федершпил добио за АТР жалузине чије лопатице формирају решетку, а налазе се на улазу у цевовод (Federspiel, 2004a, 2004b).

Верификована је нумеричка симулација методом коначних запремина за АТР жалузину типа А. Математички модел добијен решењима нумеричке симулације је експериментално верификован, са разликом између измерене и моделске брзине од +/- 10 % од тренутно измерене брзине струјања. Резултати верификације су исти као и у случају када је математички модел АТР жалузине типа А добијен експерименталним путем. На овај начин потврђена је могућност коришћења методе коначних запремина у даљем развоју АТР жалузина, где уз адекватне ресурсе рачунара постоји знатан потенцијал смањења времена и трошкова у односу на експериментална истраживања. Докторска дисертација представља својеврстан научни допринос јер су урађена истраживања којима се аутори нису бавили у прошлости.

ОЗНАКЕ

a – површина попречног пресека нормализована по површини попречног пресека максимално отворене жалюзине [%];

a – дужина квадратне странице отвора на сити коморе за стабилизацију ваздушне струје [m];

\bar{a} – јединични вектор који дефинише осу која пролази кроз обртну тачку лопатице x_0 око које се остварује момент [-]

a_1, a_2, a_3, a_4 – константе полинома за одређивање значајности притиска;

a_0, a_1, a_2, a_3 – константе диференцијалне једначине која описује преносну функцију мерног система;

A – светла површина пресека у односу на укупну површину пресека мерне бленде [-];

A – површина попречног пресека АТР жалюзине [m²];

A_1 – површина попречног пресека на месту мерења брзине струјања на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалюзина [m²];

A_2 – површина попречног пресека на месту непосредно испред мерне лопатице на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалюзина [m²];

A_0, A_1, \dots, A_n – константе полинома који дефинише зависност површине попречног пресека жалюзине и регулацијског сигнала који се шаље актуатору жалюзине;

A_f – површина лопатице АТР жалюзине пројектована на пресек нормалан на брзину струјања [m²];

A_F – светла површина попречног пресека жалюзине [m²];

A_{Fmax} – површина попречног пресека максимално отворене жалюзине [m²];

A_c – површина попречног пресека на месту контракције АТР жалюзине [m²];

A_a – светла површина попречног пресека АТР жалюзине [m²];

$A_{a,a}$ – светла површина попречног пресека АТР жалюзине у аксијалном правцу струјања [m²];

$A_{a,l}$ – светла површина попречног пресека АТР жалюзине у правцу нормалном на правац струјања [m²];

A_u – површина попречног пресека уструјно од места контракције АТР жалузине [m^2];
 A_n – површина попречног пресека ниструјно од места контракције АТР жалузине [m^2];
 AD – ауторитет жалузине [%];
 b – дужина странице канала/канала АТР жалузине [m];
 b_1, b_2, b_3, b_4 – константе полинома за одређивање значајности снаге;
 b_0 – константа у диференцијалној једначини која описује преносну функцију мерног система;
 B – ширина лежаја [m];
 B_0 и B_1 – константе једначине која описује линеарну зависност светле површине попречног пресека жалузине и регулацијског сигнала који се шаље актуатору;
 c_v – константа пропорционалности између коефицијента протока и светле површине жалузине [$m/Pa^{0.5} s$];
 c_v – специфична топлота при константној запремини [J/kgK];
 c_D – коефицијент отпора отворене АТР жалузине [-];
 C – константа Прантлове сонде [-];
 C – константа Кинговог закона код анемометра са топлом жицом;
 C – коефицијент у математичком моделу жалузине;
 C – динамичка носивост лежаја [N];
 C – константа мерила момента АТР жалузине [Nm/kg];
 C – непоузданост мерења средње аритметичке средине;
 C_i – непоузданост мерења средње аритметичке средине i – те непосредно мерене физичке величине;
 C_y – непоузданост мерења средње аритметичке средине посредно мерене физичке величине;
 C_R – непоузданост мерења електричне отпорности ротационим потенциометром [Ω];
 C_v – непоузданост посредно мерене брзине струјања АТР жалузином [m/s];

C_v – коефицијент протока [$\text{m}^3/\text{Pa}^{1/2} \cdot \text{s}$];

C_{vmax} – коефицијент протока при максимално отвореној жалузини [$\text{m}^3/\text{Pa}^{1/2} \cdot \text{s}$];

C_p – коефицијент притиска [-];

C_{gh} – коефицијент који повезује проток и пад притиска кроз грејач/хладњак [kg/m^7];

C_Q – коефицијент протока АТР жалузине [-];

C_{Qa} – коефицијент протока дефинисан за аксијални правац струјања кроз АТР жалузину [-];

C_{Ql} – коефицијент протока дефинисан за правац нормалан на аксијални правац струјања кроз АТР жалузину [-];

C_0, C_1, \dots, C_n – константе полинома који описује зависност нелинеарног и линеарног регулацијског сигнала који се шаље актуатору жалузине;

C_0 – статичка носивост лежаја [N];

C_c – коефицијент контракције АТР жалузине [-];

$C_{c,a}$ – коефицијент контракције АТР жалузине дефинисан за аксијални правац струјања [-];

$C_{c,l}$ – коефицијент контракције АТР жалузине дефинисан за правац нормалан на аксијални правац струјања [-];

C_M – непоузданост мерења момента АТР жалузином [Nm];

C^+ – бездимензиона константа [-];

CO_{2RA} – масено – запреминска концентрација угљен - диоксида у рециркулационом ваздуху [kg/m^3];

CO_{2MA} – масено – запреминска концентрација угљен - диоксида у комори за мешање [kg/m^3];

CO_{2OA} – масено – запреминска концентрација угљен - диоксида у убаченом свежем ваздуху [kg/m^3];

d – пречник радног кола вентилатора [m];

d – пречник извршног елемента лептир вентила [m];

d – растојање од нападне тачке силе D до осе лопатице C [m] ;

d – унутрашњи пречник лежаја [m] ;

d_0 – константа у једначини која повезује нападну тачку силе притиска ваздуха и нападни угао лопатице жалузине;

D – константа Кинговог закона код анемометра са топлим жицом;

D – дужина странице правоугаоног канала/плenumsа [m];

D – спољашњи пречник лежаја [m];

D – спољашњи пречник сита у комори за стабилизацију ваздушне струје [m];

D_h – хидраулички пречник цевовода [m];

D – унутрашњи пречник цевовода на месту мерења брзине струјања на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина [m];

e_0 – електрични напон на излазу анемометра са топлим жицом [V];

e_i – привидна грешка i - тог мерења;

e_{imax} – максимална привидна грешка мерења;

E – систематска грешка мерења;

F – сила ваздушне струје нормална на површину лопатице АТР жалузине [N];

F_r – радијална сила која делује на лежај [N];

F_a – пројекција силе ваздушне струје на лопатицу АТР жалузине у правцу уздужне осе канала [N];

F_l – пројекција силе ваздушне струје на лопатицу АТР жалузине у правцу нормалном на правац уздужне осе канала [N];

F_1 – сила ваздушне струје нормална на предњу површину лопатице АТР жалузине [N];

F_2 – сила ваздушне струје нормална на површину носача лопатице АТР жалузине [N];

F_k – импулсна сила ваздушне струје [N];

F_p – притисна сила ваздушне струје [N];

\vec{F}_{p_i} – вектор силе притиска која делује на i - ти део површине мерне лопатице [N];

F_D – сила отпора [N];

F_x – радијална сила која делује на лежај у правцу x – осе ;

F_y – радијална сила која делује на лежај у правцу y – осе.

\vec{F}_{τ_i} - сила смицања која делује на i - ти део површине мерне лопатице [N];

g – гравитационо убрзање [m/s^2];

G_1 – сила тежине мерне лопатице [N];

G_2 – сила тежине носача мерне лопатице [N];

$G(\alpha)$ – корелацијска функција [-];

h – енталпија ваздуха [J/kg];

h_{RA} – енталпија рециркулисаног ваздуха [J/kg];

h_{MA} – енталпија ваздуха у комори за мешање [J/kg];

h_{OA} – енталпија свежег ваздуха [J/kg];

$h(t)$ – јединична импулсна функција [-];

H – фактор који код регулацијског сигнала компензује хистерезис жалузине [-];

H – висина кућишта АТР жалузине [m];

k – кинетичка енергија турбуленције [m^2/s^2];

k - Фон Карманова (Von Kármán) константа [-];

K – статичка осетљивост [Ns];

l – дужина крака мерне полуге [m];

l_1 – крак силе ваздушне струје F_1 [m];

l_2 – крак силе ваздушне струје F_2 [m];

l_{m1} – крак силе тежине мерне лопатице G_1 [m];

l_{m2} – крак силе тежине носача мерне лопатице G_2 [m];

L – дужина лопатице [m];

L_{10} – основни век трајања лежаја са вероватноћом од 90 % [obrtaја];

m – маса измерена на сензору масе АТР жалузине [kg];

m – маса лежаја [kg];

m – маса контролног тега [kg];

m_1 – маса мерне лопатице [kg];

m_2 – маса носача мерне лопатице [kg];

\dot{m} – масени протока ваздуха [kg];

M – Махов број [-];

M – момент којим флуид делује на извршни елемент лептир вентила [Nm];

M – активни момент којим ваздушна струја делује на лопатицу правоугаоне клапне [Nm];

M – активни момент којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалузине [Nm];

M – излазни сигнал мерила момента АТР жалузине [%];

$M(D)$ – одзивни сигнал мерног момента АТР жалузине [Nm];

$M(t)$ – одзивни сигнал мерног момента АТР жалузине [Nm];

\bar{M} – аритметичка средина мерног момента АТР жалузине [Nm];

M' – први извод момента ваздушне струје са временом [Nm/s];

M_1 – активни момент којим ваздушна струја делује на предњу површину лопатице АТР жалузине [Nm];

M_2 – активни момент којим ваздушна струја делује на површину носача лопатице АТР жалузине [Nm];

M_m – мртви момент АТР жалузине [Nm];

M_{m1} – мртви момент мерне лопатице АТР жалузине [Nm];

M_{m2} – мртви момент носача мерне лопатице АТР жалузине [Nm];

M_{ATP} – момент очитан на дисплеју вагарске електронике АТР жалузине [Nm].

MR – степен мешања свежег и рециркулисаног ваздуха на излазу коморе за мешање VAV система [-];

n – број обртаја вентилатора [o/min];

n – експонент у једначини која повезује нападну тачку силе притиска ваздуха и нападни угао лопатице жалузине;

n – ред преносне функције мерног система [-];

n – број мерења [-];

N – број лопатица АТР жалузине [-];

OA – карактеристика ОА жалузине [%];

OA_{lin} – линеарна карактеристика ОА жалузине [%];

OA_{sr} – средња вредност карактеристике ОА жалузине [%];

OA_{min} – минимална вредност карактеристике ОА жалузине [%];

OA_{max} – максимална вредност карактеристике ОА жалузине [%];

p – притисак ваздуха [Pa];

p – параметар ротационог потенциометра [-];

p_a – атмосферски притисак ваздуха [Pa];

p_m – натпритисак ваздушне струје испред мерне лопатице АТР жалузине [Pa];

p_{m1} – натпритисак ваздушне струје на месту мерења брзине струјања лабораторијског постројења за испитивање АТР жалузина [Pa];

p_{m2} – натпритисак ваздушне струје испред мерне лопатице лабораторијског постројења за испитивање АТР жалузина [Pa];

p_s – статички притисак ваздуха [Pa];

p_t – тотални притисак ваздуха [Pa];

p_d – динамички притисак ваздуха [Pa];

p_{MA} – статички притисак у комори за мешање VAV система [Pa];

p_{ven} – статички притисак вентилатора [Pa];

$p_{ven,i}$ – статички притисак непосредно на излазу из вентилатора [Pa];

p_u – уструјни притисак од места контракције [Pa];

p_n – ниструјни притисак од места контракције [Pa];

p_{bn} – тотални ниструјни притисак од места контракције [Pa];

p_c – притисак на месту контракције [Pa];

P – снага вентилатора [W];

P – статичка сигурност мерне неизвесности [%];

P – еквивалентна носивост лежаја [N];

P_{vrat} – снага на вратилу вентилатора [W];

P_{vent} – снага вентилатора [W];

P_u – максимално оптерећење лежаја [N];

P_o – статичка носивост лежаја [N];

\vec{r}_i – вектор положаја i – тог дела површине мерне лопатице у односу на обртну тачку лопатице x_0 [m].

R – гасна константа [J/kgK];

R – унутрашњи полупречник цевне деонице за мерење брзине струјања ваздуха на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина [m];

R – тренутна електрична отпорност ротационог потенциометра [Ω];

\bar{R} – аритметичка средина мерења електричне отпорности ротационим потенциометром [Ω];

R_0 – почетна електрична отпорност ротационог потенциометра [Ω];

Re – Рејнолдсов број [-];

s – регулацијски сигнал нормализован у односу на максималну вредност регулацијског сигнала који се шаље актуатору жалюзине [%];

s – стандардно одступање мерене величине;

s_{xi} – стандардно одступање i – те непосредно мерене величине;

s_y – стандардно одступање посредно мерене величине;

s_R – стандардно одступање мерења електричне отпорности ротационим потенциометром [Ω];

s_α – стандардно одступање мерења нападног угла лопатице формираним угломером на АТР жалюзини [$^\circ$];

s_M – стандардно одступање мерења момента АТР жалузином [Nm];

s_v – стандардно одступање посредног мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузином [m/s];

S – регулацијски сигнал послат на актуатор жалюзине [-];

S_{PI} – линеаризован регулацијски сигнал послат на актуатор жалюзине [-];

S_k – регулацијски сигнал који је компензовао присуство хистерезиса жалюзине [-];

S_{id} – идеалан регулацијски сигнал када би жалузина радила без присуства хистерезиса [-];

t – дебљина извршног елемента лептир вентила [m];

t – време [s];

t – дебљина лопатице АТР жалюзине [m];

t – температура ваздушне струје испред мерне лопатице АТР жалюзине [Pa];

t – фактор Студентове расподеле [-];

t_{sup} – температура ваздуха за снабдевање на VAV систему [$^\circ\text{C}$];

t_z – температура зида канала [$^\circ\text{C}$];

T – температура ваздуха испред мерне лопатице АТР жалюзине [K];

T - температура флуида [K];

T_{RA} – температура рециркулисаног ваздуха на VAV систему [K];

T_{RAsr} – средња температура рециркулисаног ваздуха VAV систему [K];

T_{MA} – температура ваздуха у комори за мешање VAV система [K];

T_{MAsr} – средња вредност температуре ваздуха у комори за мешање VAV система [K];

T_{MAmin} – минимална вредност температуре ваздуха у комори за мешање VAV система [K];

T_{MAmax} – максимална вредност температуре ваздуха у комори за мешање VAV система [K];

T_{OA} – температура свежег ваздуха на VAV систему [K];

T_{OAsr} – средња температура свежег ваздуха на VAV систему [K];

T_v – температура виртуелног сензора која се добија из CFD модела [K];

T_r – реална температура која се мери [K];

T_1 – температура ваздуха на месту мерења брзине струјања на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина [K];

T_2 – температура ваздуха на месту непосредно испред мерне лопатице на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина [K];

u – релативна мерна неизвесност [-];

u_v – релативна неизвесност посредно мерене брзине струјања АТР жалузином [-];

u^+ - бездимензиона брзина при турбулентном струјања флуида непосредно уз сам зид [-];

U – електрични напон на излазу ротационог потенциометра [V].

U – мерна неизвесност;

U_v – неизвесност посредно мерене брзине струјања АТР жалузином [m/s];

U_n – номинални електрични напон ротационог потенциометра [V];

U_{POT} – линеаризован регулацијски сигнал којим се управља радом жалузина у екокомајзеру и вентилатором у потисном воду [%];

U_{POV} – линеаризован регулацијски сигнал којим се управља радом жалузина у екокомајзеру и вентилатором у повратном воду [%];

v – брзина струјања флуида [m/s];

v – импулсна функција брзине струјања ваздуха АТР жалузине [m/s];

v – брзина струјања ваздуха кроз лабораторијско постројење без АТР жалузине [m/s].

v_{ATP} – брзина струјања ваздуха кроз лабораторијско постројење са АТР жалузином [m/s];

v_c – брзина струјања на месту контракције АТР жалузине [m/s];

v_n – брзина струјања ваздуха ниструјно од места контракције АТР жалузине [m/s];

v_τ - брзина трења [m/s];

v_u – брзина струјања ваздуха уструјно од места контракције на АТР жалузине [m/s];

v_1 – брзина струјања ваздуха на мерном месту лабораторијског постројења за испитивање АТР жалузина [m/s];

v_2 – брзина струјања ваздуха непосредно испред мерне лопатице на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина [m/s];

v_{min} – минимална брзина струјања ваздуха при којој мерило момента АТР жалузине почиње да реагује [m/s];

v_{min} – минимална брзина струјања ваздуха коју је смислено мерити АТР жалузином [m/s];

v_{mer} – брзина струјања ваздуха добијена мерењем анемометром са топлом жицом на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина [m/s];

v_{mod} – брзина струјања добијена из математичког модела АТР жалузине [m/s];

$v_x(x, y, z, t)$ - брзина струјања флуида у правцу x - осе Декартовог правоугаоног координатног система [m/s];

$v_y(x, y, z, t)$ - брзина струјања флуида у правцу y - осе Декартовог правоугаоног координатног система [m/s];

$v_z(x, y, z, t)$ - брзина струјања флуида у правцу z - осе Декартовог правоугаоног координатног система [m/s].

\bar{v} - просечна брзина струјања [m/s].

v' - тренутно одступање брзине струјања [m/s].

W – ширина лопатице АТР жалузине [m];

q – параметар ротационог потенциометра [-];

q_i – параметар Шовенеа i - тог мерења;

q_g – горња гранична вредност параметра Шовенеа;

Q – запремински проток ваздуха [m³/s];

Q - запремински проток ваздуха кроз лабораторијско постројење без АТР жалузине [m³/s];

Q_{ATP} – запремински проток ваздуха кроз лабораторијско постројење са АТР жалузином [m³/s];

Q_{OA} – запремински проток ваздуха кроз ОА жалузину економијзера VAV система [m³/s];

Q_{POT} – запремински проток ваздуха у потисном воду VAV система [m³/s];

Q_{MA} – запремински проток ваздуха кроз комору за мешање VAV система [m³/s];

Q_{POV} – запремински проток ваздуха у повратном воду VAV система [m³/s];

Q_{MT2} – запремински проток ваздуха одређен помоћу улазне решетке мерном техником MT2 [m³/s];

x – експонент у математичком моделу жалузине;

x – улазна величина преносне функције мерног система;

x – крак силе F_l у односу на осу обртања О жалузине [m];

x – стварна вредност мерене величине;

x – оса Декартовог правоугаоног координатног система [m];

x_i – вредност очитана на мерилу;

\bar{x} – средња аритметичка вредност мерне величине;

x_0 – обртна тачка лопатице;

X – запреминска сила специфицирана по маси у правцу x - осе Декартовог правоугаоног координатног система $[\text{m/s}^2]$;

X_o – фактор лежаја у правцу x – осе ;

y – крак силе F_a у односу на осу обртања O жалузине $[\text{m}]$;

y – излазна величина преносне функције мерног система;

y – посредно мерена физичка величина;

y – оса Декартовог правоугаоног координатног система $[\text{m}]$;

y - растојање од тачке у којој се посматра брзина до зида $[\text{m}]$;

y^+ - бездимензионо растојање од тачке у којој се посматра брзина до зида $[-]$;

Y – запреминска сила специфицирана по маси у правцу y - осе Декартовог правоугаоног координатног система $[\text{m/s}^2]$;

Y_o – фактор лежаја у правцу y – осе ;

Y_p – напор вентилатора $[\text{J/kg}]$;

z – вишекратник стандардног одступања мерене величине $[-]$;

z – оса Декартовог правоугаоног координатног система $[\text{m}]$;

Z – запреминска сила специфицирана по маси у правцу z - осе Декартовог правоугаоног координатног система $[\text{m/s}^2]$;

Грчка слова:

α – нападни угао лопатице $[\text{°}]$;

α – нападни угао извршног елемента лептир вентила $[\text{°}]$;

α – тренутни угао клизача ротационог потенциометра $[\text{°}]$;

$\bar{\alpha}$ – аритметичка средина мерења нападног угла лопатице на формираном угломеру АТР жалузине $[\text{°}]$;

α_0 – почетни угао клизача ротационог потенциометра [$^\circ$];

α_{max} – максимални угао клизача ротационог потенциометра [$^\circ$];

β – нападни угао лопатице када је жалузина затворена [$^\circ$];

γ – корекциони фактор очитаног момента на вагарској електроници АТР жалузине [-].

δ – растојање од измештене осе обртања О до нападне тачке силе D у правцу нормалном на правац лопатице АТР жалузине [m];

δ – дебљина лима од које је направљена лопатица [m];

Δ – растојање од измештене осе обртања О до нападне тачке силе D у правцу лопатице АТР жалузине [m];

Δ – угиб мерне лопатице [m];

Δ – апсолутна грешка мерења;

Δ_{max} – максимални угиб мерне лопатице [m];

Δv – систематска грешка мерења брзине струјања ваздуха [m/s];

Δv – разлика између измерене брзине и брзине струјања ваздуха добијене из математичког модела АТР жалузине [m/s];

Δv – апсолутна грешка мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузином [m/s];

ΔM – систематска грешка мерења момента којим ваздушна струја делује на мерну лопатицу АТР жалузине [Nm];

Δ_i – апсолутна грешка i - те мерене величине;

ΔG – систематска грешка корелацијске функције АТР жалузине [Nm];

Δp – пад притиска [Pa];

Δp – разлика притиска [Pa];

Δp – пад притиска кроз жалузину [Pa] ;

Δp – пад притиска кроз отворену жалузину [Pa] ;

Δp – пад притиска кроз лептир вентил [Pa];

Δp_t – укупни пад притиска на делу на коме жалузина регулише проток, без пада притиска кроз саму жалузину [Pa];

Δp_{gh} – пад притиска на спољашњој страни грејача и хладњака [Pa];

Δt – разлика температуре [K];

ΔT – разлика у температурама ваздуха на излазу коморе за мешање [K];

Δv_1 – разлика апсолутне брзине струјања ваздуха у попречном пресеку испред сита коморе за стабилизацију ваздушне струје [m/s];

Δv_2 – разлика апсолутне брзине струјања ваздуха у пресеку иза сита коморе за стабилизацију ваздушне струје [m/s];

Δy – грешка посредно мерене величине;

ΔP – губитак снаге на АТР жалузине [W];

ΔP_{ven} – снага неопходна за рад АТР жалузине [W];

ΔS – површина странице контролне запремине [m²];

ε – релативна грешка мерења [-];

ε – релативно стандардно одступање [-];

ε – релативна непоузданост средње аритметичке средине [-];

ε – релативна грешка мерења посредно мерене физичке величине [-];

ε – дисипација кинетичке енергије [m²/s³];

ε_i – релативна грешка i – тог мерења [-];

ε_y – релативно стандардно одступање посредно мерене физичке величине [-];

ε_v – стандардно одступање посредног мерења брзине струјања ваздуха АТР жалузином [-];

$\varepsilon(C_y)$ – релативна непоузданост посредно мерене физичке величине [-];

$\varepsilon(C_M)$ – релативна непоузданост мерења момента АТР жалузином [-];

$\varepsilon(C_R)$ – релативна непоузданост мерења електричне отпорности ротационим потенциометром АТР жалузине [-];

$\varepsilon(E_y)$ – релативна систематска грешка посредно мерене брзине струјања ваздуха АТР жалузином [-];

ζ – коефицијент пригушења мерног сигнала [-];

ζ – коефицијент отпора сита [-].

ζ – коефицијент локалног отпора лептир вентил [-].

η – степен ефикасности вентилатора [-];

η_{ven} – значајца снаге [-];

η_{ven} – степен ефикасности вентилатора [-];

λ – коефицијент проводљивости топлоте [W/m^2K];

μ – динамичка вискозност флуида [$Pa \cdot s$]

ν – кинематска вискозност флуида [m^2/s];

θ – одговара угао отклона клизача [$^\circ$];

ρ – густина ваздуха [kg/m^3];

ρ_1 – густина ваздуха на месту мерења брзине струјања лабораторијског постројења за испитивање АТР жалузина [kg/m^3];

ρ_2 – густина ваздуха непосредно испред мерне лопатице на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина [kg/m^3];

ρ_{MA} – густина ваздуха у комори за мешање VAV система [kg/m^3];

ρ_{OA} – густина свежег ваздуха на VAV систему [kg/m^3];

φ – нападни угао мерне лопатице жалузине [$^\circ$];

φ – угао купе дифузора на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина [$^\circ$];

φ_n – вредност променљиве на границама контролне запремине n

σ – стандардна девијација мерене величине;

σ_{xi} – стандардна девијација i – те непосредно мерене физичке величине;

τ – временска константа [s];

τ_{sr} – средња вредност временске константе за испитиване АТР жалюзине [s];

Φ – значица протока [-];

Φ – функција вискозне дисипације [1/s²].

χ^2 – функција Хи квадрат;

Ψ – значица притиска [-];

ω – угаона брзина ротације честица fluida [1/s²];

ω_n – сопствена (непригушена) фреквенција осциловања мерног сигнала [1/s];

Индекси:

a (Axial) – уздужни;

a (Apparent) – светао, видљив;

a (Air) – ваздух;

АТР (Air Torque Position) – метода мерења протока ваздуха мерењем момента којим ваздушна струја делује на лопатицу и положаја лопатице жалюзине;

AFDD (Damper Automated Fault Detection) – систем дијагностике грешке у раду регулационе жалюзине;

ANN (Artificial Neural Network) – метода примене вештачких неуронских мрежа;

c (Contraction) – место контракције струје ваздуха на АТР жалюзини;

C – оса лопатице жалюзине;

CAD – (Computer Aided Design) – пројектовање помоћу рачунара;

CAV (Constant Air Volume) – системи за грејање, вентилацију и климатизацију код којих је проток ваздуха константан, где се промена температуре ваздуха у кондиционраном простору остварује променом оптерећења грејача/хладњака.

CFD (Computer Fluid Dynamics) – рачунарска динамика флуида;

CO₂ – угљен диоксид;

d – динамичка величина;

D – нападна тачка силе;

$D = \frac{d}{dt}$ – оператор;

DNS (Direct Numerical Simulation) - директно решавање парцијалних диференцијалних једначина.

FR (Frequency Regulation) – фреквентна регулација;

FEM (Finite Element Method) – метод коначних елемената;

FDD (Fault Detection and Diagnosis) – метод детекције и дијагностицирања грешке на систему;

gh – грејач и хладњак VAV система;

g – горња гранична вредност;

EA (Exhaust Air) – жалузина економајзера којом се регулише количина отпадног ваздуха избаченог из VAV система;

EM (Entaphy Method) – енталпијска метода одређивања протока ваздуха на VAV систему;

ENO (Essential Non-oscillatory Scheme) i WENO (Weighted Essential Non-oscillatory Scheme) - су проширење TVD шеме које се користе на структурираним мрежама и у нумеричкој шеми користе већи број чворова тако да су теже применљиве на неструктурираним мрежама, а и скупле у погледу времена рачунања;

h (Hydraulic) – хидраулички;

HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) – системи за грејање, вентилацију и климатизацију;

i – једна међувредност из низа измерених вредности;

id – идеално;

JAA (Joint Angle Analysis) – метод којим се открива извор грешке на неком систему где се упоређују правци вектора неке величине система за два случаја: када систем ради без грешке и када систем ради са грешком;

k – компензација регулацијског сигнала за присуство хистерезиса на жалузини;

l (Lateral) – попречно;

LDA (Laser Doppler Anemometer) – ласер Доплер анемометар;

LES (Large Eddy Simulation) - директно решавање парцијалних диференцијалних једначина које обухвата само вртлоге већих димензија;

lin – линеарно;

m – маса;

m (Manometer) – манометарски;

M – момент ваздушне струје;

MA (Mixing Air) – комора на VAV системима у којој се мешају свеж и рециркулисани ваздух;

MS (Measuring Station) – мерна станица је место на VAV систему на којем се неком од постојећих метода мери проток ваздуха;

MT (Measuring Technique) – Мерна техника;

MKR – метод коначних разлика;

MKE – метод коначних елемената;

MKZ – метод коначних запремина;

max – максимална вредност величине;

min – минимална вредност величине;

meг – измерена величина;

mod – величина добијена из математичког модела;

n – ниструјно;

n (Nominal) – номинални;

O – оса око које се обрће лопатица жалюзине;

OA (Outside Air) – жалузина економијзера којом се регулише количина свежег ваздуха убаченог у систем;

ON - OFF – најпростији тип регулације, грејач се периодично пали и гаси;

p – притисак;

p – пумпа;

POT – потис VAV система;

POV – поврат VAV система;

PID (Proportional Integral Derivative) – пропорционално, интегрално, диференцијални тип регулације;

PI (Proportional Integral) – пропорционално, интегрални тип регулације;

PCA (Principal Component Analysis) – анализа својствених компоненти, метода обраде података којом се из групе уочавају најважнији подаци;

r (Real) – реални сензор;

R – електрична отпорност;

RA (Recirculation Air) – жалузина економијзера којом се регулише количина рецикулационог ваздуха у систему;

RANS (Raynolds Averaged Navier Stokes) - Рејнолдсовим осредњавањем стохастичка природа турбулентног струјања приказује се временски осредњеним пољима физичких величине;

RNG (Re-Normalisation Group) - k - ϵ модел погодан за унутрашња струјања и када постоје оштра скретања флуидне струје;

s – статичка величина;

sr – средња вредност величине.

sup (Supply) – снабдевање.

SPE (Square Prediction Error) – метода регресионе анализе која се користи за предвиђање параметара неког система;

t – тотална величина;

TB (Terminal Box) – терминал бокс је место на VAV систему на којем се мери и регулише количина ваздуха која се убацује у кондиционирани простор;

TVD (Total Variation Diminishing) – шема са лимитерима протока;

u – уструјно;

v (Virtual) – виртуелни сензор;

v – брзина;

ven – вентилатор;

vrat – вратило;

VAV (Variable Air Volume) – системи за грејање, вентилацију и климатизацију код којих се температура ваздуха у кондиционираном простору регулише променом протока ваздуха, док оптерећење грејача/хладњака остаје константно.

VPACC (Box Performance Assessment Control Charts) – специјализовани алат за детекцију грешке код VAV терминал боксова;

WNN (Wavelet Neural Network) – примена вештачких неуронских мрежа ANN уз додаток "Wavelet" трансформације, технике која се користи за анализу података, а развијена је као алтернатива краткотрајној Фуријеовој трансформацији;

Q – запремински проток;

QUICK (Quadratic Upwind Scheme) – узводна шема која се темељи на провлачењу квадратне функције кроз три чвора.

x – непосредно мерена физичка величина;

x_i – i -та измерена вредност непосредно мерене физичке величине;

y – посредно мерена физичка величина;

α – нападни угао мерне лопатице АТР жалюзине;

0 – почетна вредност;

1 – место на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина на ком се мери брзина струјања;

2 – место непосредно испред мерне лопатице на лабораторијском постројењу за испитивање АТР жалузина;

ЛИТЕРАТУРА

Air Conditioning Clinic, (2001). VAV systems, A Publication of the Trane Company, TRG-TRC014-EN.

ANSI/AMCA 500 D, (2007). Laboratory Methods of Testing Dampers for Rating, American National Standard Institut.

ASHRAE, (1997). ASHRAE Handbook-Fundamentals, Chapter14.

ASHRAE, (1988). ANSI/ASHRAE Standard 111 – 1988, Practise for measurement, testing, adjusting, and balancing of building heating, ventilation, air – conditioning and refrigeration systems. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air – Conditioning Engineers, Inc.

ASME Standard MFC – 3M, (2004). Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle, and Venturi, Includes Addenda A R4.

Becelaere, R. V., (1998a). Understanding the Effects of Damper Pressure Drop on HVAC Systems, ASHRAE Journal, Vol. 40, No. AMCA, pp. 45 – 46, ISSN 0001 – 2491.

Becelaere, R.V., Sauer, H.J., Finaish, F., (2005). Flow Resistance Characteristics of Airflow Control Dampers, HVAC & R Reaserch, Vol.11, No.1, pp. 119 – 131, ISSN 1078 – 9669.

Becelaere, R. V., (1998b). Mixing Box Damper Testing, ASHRAE Transactions, Vol. 104, No. 1A, pp. 1226 – 1231, ISSN 0001 – 2505.

Bukurov, Ž., (1987). Mehanika fluida, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

Cho, Y.H., Liu, M., (2008). Minimum airflow reset of single duct VAV terminal boxes, Building and Environment, Vol. 44, unesi br., pp.1867 – 1885, 0360-1323.

Cvijanović, P., (1998). Merenje fluidnih veličina, MP “Stylos“, Novi Sad.

Drees, K., Wegner, J., Janu, G., (1992). Ventilation air flow measurement for ASHRAE standard 62 - 1989, ASHRAE Journal, Vol. 34, No. 10, pp. 40 – 45, ISSN 0001 – 2491.

Du, Z., Jin, X., (2007a). Detection and diagnosis for multiple faults in VAV systems, Energy and Buidlings, Vol. 39, No. 8, pp. 923 – 934, ISSN 03278 – 7788.

Du, Z., Jin, X., (2007b). Detection and diagnosis for sensor fault in HVAC systems, Energy Conversation and Management, Vol. 48, No.3, pp. 693 – 702, ISSN 0196-8904.

Du, Z., Jin, X., Wu, L., (2007c). Fault detection and diagnosis based on improved PCA with JAA method in VAV systems, Building and Environment, Vol. 42, No. 9, pp. 3221 – 3232, ISSN 0360-1323.

Du, Z., Jin, X., Yang, X., (2008). A robot fault diagnostic tool for flow rate sensors in air dampers and VAV terminals, *Energy and Building*, Vol. 41, No. 3, pp. 279 – 286, unesi ISSN 0378-7788.

Du, Z., Jin, X., Wu, L., (2009). Fault diagnosis for temperature, flow rate and pressure sensors in VAV systems using wavelet neural network, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 9, pp. 1624 – 1631, ISSN 0306-2619.

Džijan, I., (2010). Računalna dinamika fluida, Fakultet strojarstva i brodogradnje, skripta.

Elovitz, K., (2009). Controlling outside airflow in VAV systems, *HPAC Engineering*, October 2009, pp. 24 – 30, www.hpac.com.

Engdahl, F., (1998). Evaluation of Swedish Ventilation Systems, *Building and Environment*, Vol. 33, No. 4, pp. 197 – 200, ISSN 0360 - 1323.

Engdahl, F., Svensson, A., (2003). Pressure controlled variable air volume system, *Energy and Building*, Vol. 35, No. 11, pp. 1161 – 1171, ISSN 03278 - 7788.

Fan Performance Test, (1953), London.

Felker, L., (2002). Minimum outside air damper, *ASHRAE Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 30 – 36, ISSN 0001 – 2491.

Federspiel, C., (2004a). Using the Torque Characteristics of Dampers to Measure Airflow Part I: Analysis and Testing, *HVAC&R Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 53 – 64, ISSN 1078 - 9669.

Federspiel, C., (2004b). Using the Torque Characteristics of Dampers to Measure Airflow, Part II: Model Development and Validation, *HVAC&R Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 65 – 72, ISSN 1078 - 9669.

Feng M.Y., Roth, K., Westphalen, D., Brodrick, J., (2005). Damper diagnostics, *ASHRAE Journal*, Vol. 47, No. 6, pp. 58 - 62, ISSN 0001 – 2491.

Fisk, W. J., Faulkner, D., Sullivan, D.P., (2005). Technologies for Measuring Flow Rates of Outdoor Air in HVAC Systems: Some Causes and Suggested Cures for Measurement Errors, *ASHRAE Transactions*, Vol. 111, No. 2, pp. 456 – 463, ISSN 0001 - 2505.

Fisk, W. J., Faulkner, D., Sullivan, D.P., (2006). Measuring of OA Intake Rates, *ASHRAE Journal*, Vol. 48, No. 8, pp. 50 – 57, ISSN 0001 – 2491.

Ferziger, J. H., Perić, M., (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, 3rd edition, ISBN 3 – 540 – 42074 – 6.

FKL (2013), FKL Kotrljajući ležajevi i kardani, katalog, www.fkl-serbia.com.

Горлин, С., Слезингер, И., (1964). Аэромеханические измерения методы и приборы, Москва.

Haines, R.W., (1994). Ventilation air, the economy cycle, and VAV Heating, Piping, and Air Conditioning, ASHRAE Journal, Vol. 66, No. 10, pp. 71-73, ISSN 0001 – 2491.

Hassenpflug, W. C., (1998). Free Streamlines, Computers and Mathematics with applications, Vol. 36, No. 1, pp. 69 - 129, ISSN 0898 - 1221.

HBM, (2013a). Single point load cell PW4M C3, Data Sheet, B2224-2.1 en, www.hbm.com.

HBM, (2013b). Digital Weighing Indicator WE2110, Operating manual, A1215-1.0 en, www.hbm.com.

HBM, (2013b). Universal amplifier model Quantum X MX840A, data sheet, B2924 – 2.0 en, www.hbm.com.

Hirsch, C., (2007). Numerical Computation of Internal and External Flows - Volume 1: Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, second edition, Butterworth-Heinemann, ISBN: 978-0-7506-6594-0.

Hughes, B.R., Ghani, S.A.A., (2008). A numerical investigation into the effect of wind vent dampers on operating conditions, Building and Environment, Vol. 44, No. 3, pp. 237 – 248, ISSN 0360 – 1323.

ISO 7145 (1982). Determination of flow rate of fluids in closed conduits of circular cross – section. Method of velocity measurement at one point of the cross - section, International Standard Organisation.

ISO 5168 (2005). Measurement of fluid flow - Procedures for the evaluation of uncertainties, International Standard Organisation.

Кагановичев, Т., (1947). Выравнивание действия сетки в ротоках жидкости и газов, труды ЦАГИ, вып. 604.

Kettler, J., (1998). Controlling Minimum Ventilation Volume in VAV Systems, ASHRAE Journal Vol. 40, No. 5, pp. 45 – 49, ISSN 0001 - 2491.

Kirchoff, G.R., (1869). Zur Theorie Freier Flüssigkeitsstrahlen, Journal für die reine und angewandte Mathematik, pp. 289 – 298.

Klopfenstein, R., (1998). Air velocity and flow measurement using a Pitot tube, ISA Transactions, Vol. 37, No. 4, pp. 257 – 263, ISSN 0019 – 0578.

Krakow, K., (1998). Reduction of Hysteresis in PI - Controlled Systems, ASHRAE Transactions, Vol. 104, No. 1A, pp. 524 – 529, ISSN 0001 - 2505.

Krakow, K., Zhao, F., Muhsin, A., (2000). Economizer Control, ASHRAE Transactions, Vol. 106, No. 2, pp. 13 – 24, ISSN 0001 - 2505.

Lizardos, E., Elovitz, K.M., (2000). Damper Sizing Using Damper Authority, ASHRAE Journal, Vol. 42, No. 4, pp. 37 – 41, ISSN 0001 - 2491.

Liu, M., Feng, J., Wang, Z., Wu, L., Zheng, K., Pang, X., (2010). Impacts of Static Pressure Reset on VAV System Air Leakage, Fan Power, and Thermal Energy, ASHRAE Transactions, Vol. 116, No.1, pp. 428 – 436, ISSN 0001 – 2505.

Mease, N.E., Cleaveland, W.G., Mattingly, G.E. and J.M.Hall., (1992). Air speed calibrations at international institute of standards and technology, Proceedings of the 1992 Measurement Science Conference, Anaheim, Calif.

Morris, M.J., Dutton, J.C., (1989). Aerodynamic torque characteristics of butterfly valves in compressible flow, Journal of Fluid Engineering, Vol. 11, No.1, pp. 392 – 399, ISSN 0098-2202.

Nassif, N., Kaji, S., Sabourin, R., (2004). Modeling and validation of existing vav system components, Proceeding of Esim, Canadian Conference on Building Simulation, pp. 135-141.

Nassif, N., Moujaes., S., (2008). A new operating for economizer dampers of VAV system, Energy and Building, Vol. 40, No. 3, pp. 289 – 298, ISSN 03278 - 7788.

Ogawa, K., Kimura, T., (1995). Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve - Prediction of torque characteristics, ISA Transactions, Vol. 34, No. 4, pp. 327 – 333, ISSN 0019 - 0578.

PCE (2013). Manual PCE-THB38, www.pce-industrial-needs.com

PRECISION, (2013). Precision Thermometers in Sets, <http://www.amarell.de/thermometers/thermometersets.htm>

Ralević, N., Medić, S., (2002). Matematika I (drugi deo), Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

Robinson, K., (1998). Damper Control Characteristics and Mixing Effectiveness of an Air – Handling Unit Combination Mixing/Filter Box, ASHRAE Transactions, Vol. 104, No. 1A, pp. 629 - 637 , ISSN 0001 – 2505.

Sarpkaya, T., (1959). Oblique impact of a bounded stream on a plane lamina, Journal of the Franklin Institute, Vol. 267, No. 3, pp. 229 – 242, ISSN 0016 - 0032.

Sarpkaya, T., (1961). Torque and cavitation characteristics of butterfly valves, Journal of Applied Mechanics, Vol. 28, No. 4, pp. 511 – 518, ISSN 0021 – 8936.

Schroeder, C., Krarti, M., Brandemuehl, M., (2000). Error Analysis of Measurement and Control Techniques of Outside Air Intakes Rates in VAV Systems, ASHRAE Transactions, Vol. 106, No. 2, pp. 26 – 27, ISSN 0001 - 2505.

Seem, J., House, G., Klaassen, C., (1998). Leave the Outdoor Air Damper Wide Open, ASHRAE Journal, Vol. 40, No. 2, pp. 58 – 60, ISSN 0001 - 2491.

Shein, J., House, J., (2003). Application of Control Charts for Detecting Faults in Variable - Air - Volume Boxes, ASHRAE Transactions, Vol. 109, No. 2, pp. 671 – 682, ISSN 0001 - 2505.

Singh, G., (2010). VAV vs CAV, Engineered System, Vol. 27, No. 4, pp. 38 – 44, ISSN 0891-9976.

SKF, (2013). Deep groove ball bearings, single row, unsealed, Data Sheet, www.skf.group.com

Song,H.G., Wang, L., Baek,S.H., (2009). Multidisciplinary optimization of a butterfly valve, ISA Transactions, Vol.48, No. 3, pp. 370 – 377, ISSN 0019 – 0578.

Solberg, D., Dougan, D., Damiano, L., (1990). Measurement for control of fresh air intakes, ASHRAE Journal, Vol. 32, No. 1, pp. 45 – 51, ISSN 0001 – 2491.

STAR (2009). STAR-CCM+ Training, CD – adapco.

Sun, Z., Wang, S. (2009). A CFD-based test method for control of indoor environment and space ventilation, Building and Environment, Vol. 45, No. 6, pp. ISSN 0360 – 1323.

Tan, H., Dexter,A., (2006). Estimating airflow rates in air-handling units from actuator control signals, Building and Environment, Vol. 41, No. 10, pp. 1291 – 1298, ISSN 0360-1323.

TESTO, (2005). Compact Thermal Anemometer Testo 425 - Direct display of volume-flow, air velocity and temperature, Data sheet, 0981 9054/ru/R/A/06.2005, www.testo.com.

TESTO, (2013a). Reference differential pressure gauges for industry Testo 525, Data sheet, www.testo.com.

TESTO (2013b). Testo 521 – Testo 526, Instruction manual, www.testo.com.

TESTO, (2013b). Testo400, Testo 650,Testo 950, Bedienungsanleitung, www.testo.com.

TLOS, (2013). Stakleni termometar napunjen sa živom, http://labns.com/Termometri_areometri.htm.

Venko, S., Pavlovič, E., Maček, A., (2012).Precizno regulisanje protoka vazduha, 40.Kongres klimatizacije, grejanja i hlađenja, Beograd 5 – 7 decembar, pp. 356 – 365.

Vuković, V., (1972). Aerodinamičko postrojenje za ispitivanje turbomašina sa velikom tačnošću, magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

Wang, S., Xiao, F., (2004). Detection and diagnosis of AHU sensor faults using principal component analysis method, Energy Conversion and Management, Vol. 45, No. 17, pp. 2667 – 2686, ISSN 0196-8904.

Wang, G., Liu, M., (2003). Two Energy Efficiency Measures for Constant Air Volume Exhaust Systems: Using Dampers and Variable Frequency Drives, ASHRAE Transactions, Vol. 103, pp. 30 – 35, ISSN 0001 – 2505.

Wei, G., Liu, M., Claridge, D., (2004). Integrated Damper and Pressure Reset for VAV Supply Fan Control, ASHRAE Transactions, Vol. 110, No.2., pp. 309 – 313, ISSN 0001 – 2505.

WUHAN, (2012). Thermo Pro™ TP 8S – User Manual, www.ipi-infrared.com.au.

Qin, J., Wang, S., (2005). A fault detection and diagnosis strategy of VAV air-conditioning systems for improved energy and control performances, Energy and Buildings, Vol. 37, No. 10, pp. 1035 – 1048, ISSN 03278 – 7788.

Ćirić, D., Đurić, M., Milinski, N., Satarić, M., (1991). Osnovi merenja u fizici i obrada rezultata merenja, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.