

Program za projektiranje ventilacijskih instalacija metodom jednakih otpora

Gojko Magazinović, dipl. inž.,
Brodograđevna industrija »Split«,
OOUR »Konstrukcije«,
58000 Split,
Put udarnika 19

U radu je prikazan postupak projektiranja ventilacijskih instalacija metodom jednakih otpora. Za izloženi postupak dan je program za džepno računalo »Hewlett-Packard 67«. Program omogućuje projektiranje instalacija sisne i tlačne ventilacije, te elemente okruglog i pravokutnog poprečnog presjeka. Primjena programa je prikazana na primjeru.

Uvod

Proračunavanje i uravnotežavanje elemenata ventilacijskih instalacija je dugotrajan i zamoran posao, pa se već odavno javila potreba osuvremenjavanja ovoga procesa. Jedno od mogućih rješenja je primjena džepnih programabilnih računala koji višestruko smanjuju vrijeme za izradu projekta, po Loeffleru [1, 2] i do 90 posto. Pored toga, primjenom računala mogu se postići točnija i bolja konstrukcijska rješenja.

U ovome radu prikazan je program za projektiranje ventilacijskih instalacija metodom jednakih otpora. Program, izrađen za računalo »Hewlett-Packard 67«, primjenljiv je za projektiranje instalacija sisne i tlačne ventilacije, te elemenata okruglog i pravokutnog poprečnog presjeka. Po želji korisnika programom se mogu projektirati ventilacijske instalacije i metodama jednakih i opadajućih brzina.

Metoda jednakih otpora

Metoda jednakih otpora smatra se jednom od najboljih metoda za dimenzioniranje niskotlačnih ventilacijskih instalacija. Posebno se prepo-

ručuje za dimenzioniranje instalacija sisne ventilacije [3].

Dimenzioniranje metodom jednakih otpora za- sniva se na zahtjevu da padovi tlaka po jedinici duljine svih elemenata instalacije budu jednaki, tj. da vrijedi:

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = \text{const.}, \quad (1)$$

gdje su:

Δp — pad tlaka u sekciji ventilacijske instalacije, Pa,

l — duljina sekcije, m,

λ — faktor trenja,

d — promjer sekcije, m,

v — brzina strujanja zraka, m/s,

ρ — gustoća zraka, kg/m³.

Uz pretpostavku da je $\lambda = \text{const.}$, kao i $\rho = \text{const.}$, te:

$$v = \frac{Q}{A}, \quad (2)$$

$$d = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot A}{\pi}}, \quad (3)$$

sređivanjem se dobija:

$$\frac{A_i}{A_1} = \left(\frac{Q_i}{Q_1} \right)^{0.8}, \quad (4)$$

gdje su:

A_i — površina poprečnog presjeka i -te sekcije, m²,

A_1 — površina poprečnog presjeka prve sekcije, m²,

Q_i — protok kroz i -tu sekciju, m³/s,

Q_1 — protok kroz prvu sekciju (ukupni protok), m³/s.

Dimenzije prve sekcije određene su ukupnim protokom i početnom brzinom na izlazu iz ventilatora, a time su, jednadžbom (4), određeni po-

prečni presjeci i brzine u svim preostalim sekcijama ventilacijske instalacije. S obzirom da metoda jednakih otpora ne uključuje utjecaj lokalnih otpora, često ovako određene dimenzije dovede do različitih statističkih tlakova na mjestima grananja ventilacijske instalacije. U tom slučaju potrebno je, mijenjanjem dimenzija poprečnog presjeka, odrediti takve dimenzije koje će rezultirati približno jednakim padovima tlaka u paralelnim granama ventilacijske instalacije — postupak uravnotežavanja mreže.

Pad statičkog tlaka u pojedinim sekcijama ventilacijske instalacije određen je jednadžbom:

$$\Delta p = \left(\xi + \frac{\lambda \cdot l}{d} \right) \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho, \quad (5)$$

gdje je ξ — ukupni faktor lokalnih otpora u sekciji.

Ukupni statički tlak ventilatora tada je određen sumom statičkih padova tlaka sekcija »na najnepovoljnijem putu«.

Opis programa

Okrugli presjeci

Za zadani protok kroz prvu sekciju i odabranu početnu brzinu, program određuje idealni promjer sekcije. Ovaj promjer se zaokružuje na najbližu standardnu vrijednost, nakon čega program određuje površinu poprečnog presjeka sekcije, kao i stvarnu brzinu zraka u sekciji. Po zadavanju duljine sekcije i iznosa ukupnog faktora lokalnih otpora, program određuje iznos faktora trenja i pad tlaka u sekciji.

U ovome programu faktor trenja je određen Pečornikovom jednadžbom [4]:

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{15}{Re} + 0,269 \cdot \frac{k}{d} \right) \right]^2}, \quad (6)$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (7)$$

gdje su:

k — apsolutna hrapavost stijenke, m,

Re — Reynoldsova značajka,

ν — kinematička viskoznost zraka, m²/s.

Unaprijed uprogramirane vrijednosti za apsolutnu hrapavost ($k = 0,15$ mm), gustoću ($\rho = 1,2$ kg/m³) i kinematičku viskoznost zraka ($\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ m²/s) mogu se, po želji, i promijeniti. Tablica 1. sadrži podatke o gustoći i kinematičkoj viskoznosti zraka u funkciji temperature. Po završenom proračunu prve sekcije, pristupa se proračunu ostalih sekcija. Ovaj proračun odgovara proračunu prve sekcije, s tom razlikom što je jedini ulazni podatak protok kroz promatranu sekciju.

Ako se elementi ventilacijske instalacije ne dimenzioniraju metodom jednakih otpora, proračun svih sekcija se vrši kao proračun prve sekcije, tj. zadavanjem protoka i željene brzine kroz sekciju.

Pravokutni presjeci

Za zadani protok kroz prvu sekciju i odabranu početnu brzinu, program određuje idealnu površinu poprečnog presjeka sekcije. Nakon izbora jedne od dimenzija poprečnog presjeka, program određuje drugu. Ovako određena dimenzija se zaokružuje na najbližu standardnu vrijednost, nakon čega program određuje stvarni iznos površine poprečnog presjeka i stvarnu brzinu zraka u sekciji. Po zadavanju duljine sekcije i iznosa ukupnog faktora lokalnih otpora, program određuje iznos faktora trenja i pad tlaka u sekciji. Promjer sekcije u jednadžbama (5), (6) i (7) tada je određen ekvivalentnim promjerom:

$$d_{ek} = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + h}, \quad (8)$$

gdje su b i h širina i visina pravokutnog poprečnog presjeka.

Po završenom proračunu prve, pristupa se proračunu ostalih sekcija. Ovaj proračun odgovara proračunu prve sekcije, s tom razlikom što se kao ulazni podaci zadaju protok kroz promatranu sekciju, te jedna od dimenzija pravokutnog poprečnog presjeka (najčešće jedna od dimenzija prethodne sekcije).

Ako se elementi ventilacijske instalacije ne dimenzioniraju metodom jednakih otpora, proračun svih sekcija se vrši kao proračun prve sekcije, tj. zadavanjem protoka i željene brzine kroz sekciju.

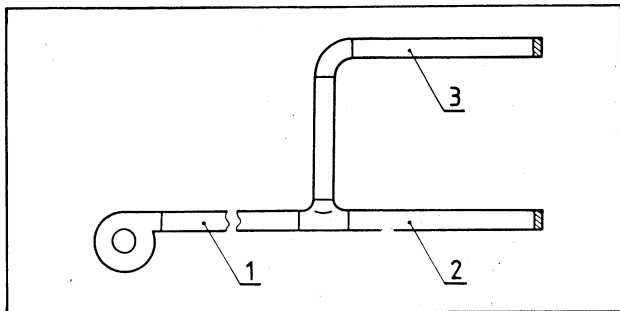
Ispis programa

Tablica 2. sadrži ispis svih naredbi programa za projektiranje ventilacijskih instalacija metodom jednakih otpora.

Funkcije programskih tipki

- a — početak obrade za projektiranje elemenata pravokutnog poprečnog presjeka,
- b — početak obrade za projektiranje elemenata okruglog poprečnog presjeka,
- c — dimenzioniranje prve sekcije,
- d — pretvorba brojčanog iznosa protoka iz m³/h u m³/s,
- e — unos podataka za apsolutnu hrapavost stijenki, gustoću i kinematičku viskoznost zraka,
- A — dimenzioniranje ostalih sekcija pravokutnog poprečnog presjeka,
- B — dimenzioniranje ostalih sekcija okruglog poprečnog presjeka,
- C — izmjena dimenzija sekcija,

SI. 1. Shema ventilacijske instalacije iz primjera proračuna metodom jednakih otpora. Sekcija 1: $Q_1 = 10\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$, $v_1 = 8\ \text{m/s}$, $l_1 = 10\ \text{m}$; sekcija 2: $Q_2 = 5\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$, $l_2 = 4\ \text{m}$, ξ odvojka = 0,1, ξ izlaza = 1,5; sekcija 3: $Q_3 = 5\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$, $l_3 = 9\ \text{m}$, ξ odvojka = 1,2, ξ kolena = 0,25, ξ izlaza = 1,5



D — postotno odstupanje stvarne od idealne površine poprečnog presjeka sekcije,
E — proračun pada tlaka ili proračun dinamičkog tlaka.

Sadržaji registara

0	Q_i	6	ξ_i	B	A_1
1	A_i	7	3600	C	k
2	v_i	8	0,269	D	ρ
3	b_i	9	1000	E	v
4	h_i	A	Q_1	I	$\Delta A\%$
5	d_i				

Upute za korišćenje programa

	Podaci	Tipke	Rezultati
1.	Presnimiti sadržaj 1. i 2. strane magnetske kartice		
2.	Početak obrade		
2.1.	Pravokutni poprečni presjeci:	[f] [a]	0.00
2.2.	Okrugli poprečni presjeci:	[f] [b]	0.00
3.	Po izboru: unos podataka za hrapavost k , gustoću i kin. viskoznost zraka:		
	k (mm)	[ENTER]	k (mm)
	ρ (kg/m ³)	[ENTER]	ρ (kg/m ³)
	v (m ² /s)	[f] [e]	0.00
4.	Po izboru: pretvorba brojčanog iznosa protoka:		
	Q (m ³ /h)	[f] [d]	Q (m ³ /s)
5.	Dimenzioniranje prve sekcije		
5.1.	Pravokutni poprečni presjeci:		
	Q (m ³ /s)	[ENTER]	Q (m ³ /s)
	v (m/s)	[f] [c]	A (m ²)
	b (mm)	[R/S]	h (mm)

5.2. Okrugli poprečni presjeci:

Q (m³/s) [ENTER] Q (m³/s)
 v (m/s) [f] [c] d (mm)

6. Mijenjanje dimenzija

6.1. Pravokutni poprečni presjeci:

h (mm) [C] A (m²)
[R/S] v (m/s)

6.2. Okrugli poprečni presjeci:

d (mm) [C] A (m²)
[R/S] v (m/s)

7. Po izboru: odstupanje usvojene od idealne površine poprečnog presjeka:

[D] » ΔA « (%)
 v (m/s)

8. Proračun pada tlaka

8.1. Za $l = 0$:

0 [ENTER] 0.00
 ξ [E] Δp (Pa)

8.2. Za $l \neq 0$:

l (m) [ENTER] l (m)
 ξ [E] λ
[R/S] Δp (Pa)

9. Proračun dinamičkog tlaka:

0 [ENTER] 0.00
1 [E] p_d (Pa)

10. Dimenzioniranje ostalih sekcija

10.1. Pravokutni poprečni presjeci:

Q (m³/s) [ENTER] Q (m³/s)
 b (mm) [A] h (mm)

10.2. Okrugli poprečni presjeci:

Q (m³/s) [B] d (mm)

Napomene:

- Svaki korak, od 3. do 10. može se ponavljati onoliko puta koliko se želi.
- Redoslijed izvođenja, od 3. do 10. koraka, je proizvoljan, s tim što se mijenjanje dimenzija i proračun padova tlaka vrši po završenom dimenzioniranju sekcije.

Primjer

Na slici 1. dana je shema tlačne ventilacijske instalacije za koju treba izvršiti dimenzioniranje elemenata, te odrediti statički tlak ventilatora.

Elementi ventilacijske instalacije su okruglog po-
rečnog presjeka. Za promjere usvajati standard-
ne brojeve reda R 10 (JUS A. AO. 010).

Podaci	Tipke	Rezultati
--------	-------	-----------

1. Početak obrade:

[f] [b] 0.00

2. Proračun prve sekcije:

$Q_1 = 10000 \text{ m}^3/\text{h}$ [f] [d] $Q_1 = 2,78 \text{ m}^3/\text{s}$
 $v_1 = 8 \text{ m/s}$ [f] [c] $d_1 = 664,9 \text{ mm}$
 $d_1 = 630 \text{ mm}$ [C] $A_1 = 0,3117 \text{ m}^2$
[R/S] $v_1 = 8,91 \text{ m/s}$
[D] $\Delta A = -10,22\%$
 $l_1 = 10 \text{ m}$ [ENTER] $l_1 = 10,00 \text{ m}$
 $\xi_1 = 0$ [E] $\lambda_1 = 0,016$
[R/S] $\Delta p_1 = 11,9 \text{ Pa}$

3. Proračun druge sekcije:

$Q_2 = 5000 \text{ m}^3/\text{h}$ [f] [d] $Q_2 = 1,4 \text{ m}^3/\text{s}$
[B] $d_2 = 503,9 \text{ mm}$
 $d_2 = 500 \text{ mm}$ [C] $A_2 = 0,1963 \text{ m}^2$
[R/S] $v_2 = 7,07 \text{ m/s}$
[D] $\Delta A = -1,54\%$
 $l_2 = 4 \text{ m}$ [ENTER] $l_2 = 4,00 \text{ m}$
 $\xi_2 = 1,6$ [E] $\lambda_2 = 0,017$
[R/S] $\Delta p_2 = 52,1 \text{ Pa}$

Tablica 1. Svojstva zraka pri atmosferskom tlaku
(101 325 Pa) [5]. (Primjedba: brojčani iznos kinetičke
viskoznosti pri temperaturi od -10°C značajno od-
stupa od okolnih vrijednosti. Za primjenu se prepo-
ručuje interpolirana vrijednost $\nu = 11,61 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

T/°C	ρ/kgm^{-3}	$\nu/\text{m}^2\text{s}^{-1}$
-30	1,453	$10,80 \cdot 10^{-6}$
-20	1,395	$12,79 \cdot 10^{-6}$
-10	1,342	$12,43 \cdot 10^{-6}$
0	1,293	$13,28 \cdot 10^{-6}$
10	1,247	$14,16 \cdot 10^{-6}$
20	1,205	$15,06 \cdot 10^{-6}$
30	1,165	$16,00 \cdot 10^{-6}$
40	1,128	$16,96 \cdot 10^{-6}$
50	1,093	$17,95 \cdot 10^{-6}$

4. Proračun treće sekcije:

$Q_3 = 5000 \text{ m}^3/\text{h}$ [f] [d] $Q_3 = 1,4 \text{ m}^3/\text{s}$
[B] $d_3 = 503,9 \text{ mm}$
 $d_3 = 500 \text{ mm}$ [C] $A_3 = 0,1963 \text{ m}^2$
[R/S] $v_3 = 7,07 \text{ m/s}$
 $l_3 = 9 \text{ m}$ [ENTER] $l_3 = 9,00 \text{ m}$
 $\xi_3 = 3,05$ [E] $\lambda_3 = 0,017$
[R/S] $\Delta p_3 = 100,7 \text{ Pa}$

Tablica 2. Ispis naredbi programa za projektiranje
ventilacijskih instalacija metodom jednakih otpora

Br. Naredba	Br. Naredba	Br. Naredba	Br. Naredba	Br. Naredba
001 *LBL a	046 F1 ?	091 STO 4	136 X*1	191 2
002 SF 0	047 STO B	092 GSB 8	137 PAUSE	192 :
003 GTO 0	048 CF 1	093 RCL 4	138 PAUSE	193 RCL D
004 *LBL b	049 FO ?	094 DSP 1	139 X*1	194 x
005 CF 0	050 GTO 1	095 RTN	140 RTN	195 DSP 1
006 *LBL 0	051 GSB 6	096 RTN	141 *LBL E	196 RTN
007 SF 1	052 DSP 1	097 *LBL B	142 STO 6	197 *LBL 5
008 3	053 RTN	098 STO 0	143 X*Y	198 RCL A
009 6	054 RTN	099 GSB 5	144 X=0 ?	199 :
010 0	055 *LBL 1	100 STO 1	145 GTO 4	200 :
011 0	056 DSP 4	101 GSB 6	146 RCL 5	201 8
012 STO 7	057 -X-	102 DSP 1	147 :	202 y ^x
013 :	058 R/S	103 RTN	148 RCL 9	203 RCL B
014 2	059 STO 3	104 RTN	149 x	204 x
015 6	060 :	105 *LBL C	150 RCL 2	205 RTN
016 9	061 EEX	106 FO ?	151 RCL 5	206 *LBL 6
017 STO B	062 6	107 GTO 2	152 x	207 4
018 EEX	063 x	108 STO 5	153 RCL E	208 x
019 3	064 STO 4	109 GSB 7	154 :	209 :
020 STO 9	065 DSP 1	110 GTO 3	155 RCL 9	210 :
021 :	066 RTN	111 *LBL 2	156 :	211 :
022 1	067 RTN	112 STO 4	157 1/X	212 RCL 9
023 5	068 *LBL d	113 GSB 8	158 1	213 x
024 STO C	069 RCL 7	114 RCL 4	159 5	214 RTN
025 1	070 :	115 RCL 3	160 x	215 *LBL 7
026 :	071 RTN	116 x	161 RCL C	216 RCL 9
027 2	072 *LBL e	117 EEX	162 RCL 5	217 :
028 STO D	073 STO E	118 6	163 :	218 x2
029 1	074 R1	119 :	164 RCL 8	219 :
030 5	075 STO D	120 *LBL 3	165 x	220 x
031 EEX	076 R1	121 STI	166 +	221 4
032 6	077 STO C	122 RCL 1	167 LOG	222 :
033 CHS	078 CLX	123 X*Y	168 x2	223 RTN
034 STO E	079 RTN	124 ZCH	169 4	224 *LBL 8
035 CLX	080 *LBL a	125 X*1	170 x	225 RCL 3
036 RTN	081 STO 3	126 DSP 4	171 1/X	226 x
037 *LBL c	082 X*Y	127 R/S	172 DSP 3	227 2
038 STO 2	083 STO 0	128 1/X	173 R/S	228 x
039 X*Y	084 GSB 5	129 RCL 0	174 x	229 RCL 3
040 STO 0	085 STO 1	130 x	175 STO+6	230 RCL 4
041 F1 ?	086 EEX	131 STO 2	176 *LBL 4	231 +
042 STO A	087 6	132 DSP 2	177 RCL 6	232 :
043 RCL 2	088 x	133 RTN	178 RCL 2	233 STO 5
044 :	089 RCL 3	134 RTN	179 x2	234 STO 5
045 STO 1	090 :	135 *LBL D	180 x	235 RTN

5. Ponovni proračun treće sekcije, uravnotežava- nje:

$d_3 = 630 \text{ mm}$ [C] $A_3 = 0,3117 \text{ m}^2$
[R/S] $v_3 = 4,46 \text{ m/s}$
[D] $\Delta A = 56,31\%$
 $l_3 = 9 \text{ m}$ [ENTER] $l_3 = 9,00 \text{ m}$
 $\xi_3 = 3,05$ [E] $\lambda_3 = 0,017$
[R/S] $\Delta p_3 = 39,2 \text{ Pa}$

6. S obzirom da po redu R 10 ne postoji ni je-
dan standardni promjer između 500 i 630 mm,
daljnje uravnotežavanje nije moguće. Razlika
statičkih tlakova grana 2. i 3. je 13 Pa. Statički
tlak ventilatora je:

$$p_v = \Delta p_1 + \Delta p_2 = 11,9 + 52,1 = 64,0 \text{ Pa.}$$

Literatura

- [1] LOEFFLER, J. J.: *Using programmable calculators for ventilation-system desing*, Part I, Basic Design Principles, Plant Engineering (1978) 14, 122—125.
- [2] LOEFFLER, J. J.: *Using programmable calculators for ventilation-system desing*, Part II, Applying the Calculator to Basic Design Principles, Plant Engineering (1978) 19, 149—193.
- [3] ***: *Handbook of air conditioning system design*, McGraw-Hill, New York, 1965.
- [4] KRAUT, B.: *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1982.
- [5] ISACHENKO, V. P., OSIPOVA, V. A., SUKOMEL, A. S.: *Heat transfer*, Mir Publishers, Moscow, 1977.