

Analiza energijskih potreba ventilacije cestovnih tunela

Miodrag Drakulić, Damir Brodar

Ključne riječi

cestovni tunel, uzdužna ventilacija, energijske potrebe, višeparameterska analiza, frekvencijski pretvarači, vrijeme isplativosti

Key words

road tunnel, longitudinal ventilation, power requirements, multiparametric analysis, frequency converters, cost-effectiveness time

Mots clés

tunnel routier, ventilation longitudinale, demande en énergie, analyse multiparamétrique, changeurs de fréquence, temps de rentabilité

Ключевые слова

дорожный туннель, продольная вентиляция, энергетические потребности, многопараметровый анализ, частотные преобразователи, время окупаемости

Schlüsselworte

Strassentunnel, Längsventilation, Energiebedürfnisse, Multiparameteranalyse, Frequenzumformer, Zeit für den Auftritt der Anzahlbarkeit

M. Drakulić, D. Brodar

Prethodno priopćenje

Analiza energijskih potreba ventilacije cestovnih tunela

Razmatraju se energijske potrebe sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela s obzirom na način upravljanja ventilatorima. Analizira se isplativost ugradnje frekvencijskih pretvarača za pogon ventilatora s obzirom na: duljinu tunela, udaljenost među ventilatorskim baterijama i očekivani broj aktivnih ventilatora. Rezultat analize su skupovi optimalnih parametara za koje je vrijeme isplativosti početne investicije ugradnje frekvencijskih pretvarača manje od zahtjevanog vremena.

M. Drakulić, D. Brodar

Preliminary note

Analysis of power required for ventilation of road tunnels

The power required by the longitudinal ventilation system of a road tunnel is analyzed according to the way in which fans are operated. The cost-effectiveness of the use of frequency converters for fan operation is analyzed taking into account: the tunnel length, spacing between fan batteries, and expected number of active fans. The analysis has resulted in a group of optimum parameters for which the time of cost-effectiveness of initial investment in frequency converter installation is shorter than the required time.

M. Drakulić, D. Brodar

Note préliminaire

Analyse de l'énergie requise pour la ventilation des tunnels routiers

La demande en énergie du système longitudinal de ventilation d'un tunnel routier est analysée selon la manière d'opération des ventilateurs. La rentabilité d'installation des changeurs de fréquence pour l'opération des ventilateurs est analysée compte tenu de: longueur de tunnel, distance entre batteries des ventilateurs, et nombre anticipé des ventilateurs actifs. L'analyse a résulté en des groupes de paramètres optimaux pour lesquels le temps de rentabilité d'investissement initial dans l'installation des changeurs de fréquence est moins grand que le temps requis.

М. Дракулич, Д. Бродар

Предварительное сообщение

Анализ энергетических потребностей вентиляции дорожных туннелей

Рассматриваются энергетические потребности системы продольной вентиляции дорожного туннеля с учетом способа управления вентиляторами. Анализируется окупаемость установки частотных преобразователей в приводе вентиляторов с учетом протяженности туннеля, расстояния между вентиляторными батареями и ожидаемого числа активных вентиляторов. Результат анализа – узлы с оптимальными параметрами, для которых время окупаемости начальной инвестиции, связанной с установкой частотных преобразователей, меньше, чем требуемое.

M. Drakulić, D. Brodar

Vorherige Mitteilung

Analyse des Energiebedürfnisses der Ventilation von Strassentunneln

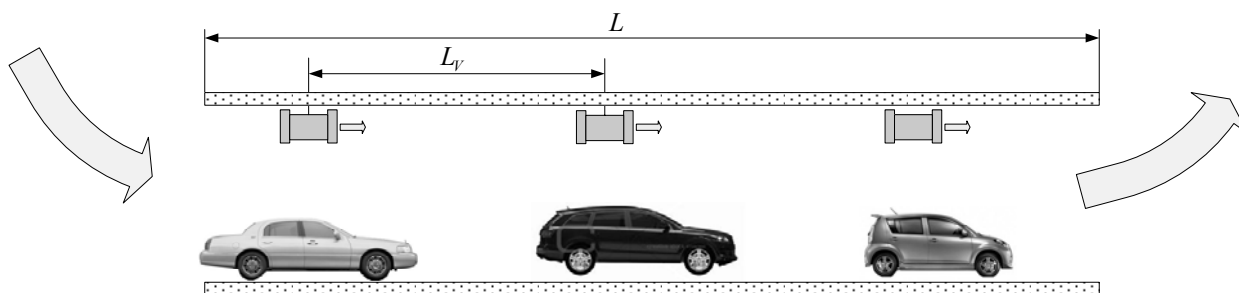
Man erwägt die Energiebedürfnisse des Systems der Längsventilation des Strassentunnels hinsichtlich der Art der Ventilatorensteuerung. Man analysiert die Anzahlbarkeit des Einbaus von Frequenzumformern für den Betrieb der Ventilatoren mit Hinsicht auf die Länge des Tunnels, den Abstand zwischen den Ventilatorbatterien und die erwartete Anzahl der aktiven Ventilatoren. Das Ergebnis der Analyse sind Gruppen von optimalen Parametern für welche die Zeit für den Auftritt der Anzahlbarkeit der Kapitalanlage für den Einbau der Frequenzumformer kürzer ist als die geforderte Zeit.

Autori: Dr. sc. **Miodrag Drakulić**, dipl. ing. str.; **Damir Brodar**, dipl. ing. el., CTP Projekt d.o.o., IGH Grupa, Zagreb

1 Uvod

Sustav ventilacije najveći je potrošač električne energije pri eksploataciji cestovnog tunela te se stoga nameće potreba za traženjem efikasnih struktura i algoritama upravljanja koji će minimizirati potrošnju električne energije u normalnom režimu rada, uz očuvanje propisane kvalitete zraka. Također je spomenutim strukturama i algoritmima upravljanja u slučaju požara potrebno ostvariti idealne aerodinamičke uvjete za sve potencijalne sudionike požarnog incidenta. U slučaju uzdužne ventilacije to podrazumijeva operativnu strategiju kojom se osigurava stratifikacija dima u inicijalnoj fazi požara (omogućena samoevakuacija putnika u ograničenom razdoblju), te kontrolirano odimljavanje u fazi vatrogasne intervencije (omogućen siguran pristup mjestu požara, bez opasnosti od povratnog strujanja dima) [1].

U ovom radu razmatrat će se energijske potrebe uzdužne ventilacije cestovnih tunela, ostvarene pomoću impulsnih ventilatora¹. U tu svrhu usporedit ćemo energijske potrebe sustava uzdužne ventilacije s izravnim pokretanjem ventilatora i konstantnom brzinom vrtnje, kao najzastupljenijim u tehničkoj praksi, sa sustavom koji upravlja ventilatorima preko frekvencijskih pretvarača koji omogućuju promjenu brzine vrtnje ventilatora u širokom rasponu. Također ćemo procijeniti vremena isplativosti ugradnje sustava s frekvencijskim pretvaračima s obzirom na sljedeće kriterije: duljinu tunela, udaljenost među ventilatorskim baterijama i očekivani broj aktivnih ventilatora.



Slika 1. Skica sustava uzdužne ventilacije cestovnih tunela

2 Prethodna istraživanja

U radu [2] prikazana su načela za usporedbu snaga sustava uzdužne ventilacije s izravnim pokretanjem ventilatora i sustava s frekvencijskim pretvaračima te su eksperimentalno ispitane statičke i dinamičke karakteristike odabranih frekvencijskih pretvarača. Simulacijom na virtualnom tunelu [3] pokazano je kako je umirivanje zračne struje u tunelu s frekventno reguliranim ventila-

¹ Sustavi uzdužne ventilacije sa Saccardo mlaznicama nisu predmet ovog rada, jer su znatno rjeđi u tehničkoj praksi.

torima u inicijalnoj fazi požara brže i kvalitetnije u odnosu na sustav s izravnim pokretanjem ventilatora. U radovima, [3], [4] i [5] opisani su mogući napredni algoritmi za upravljanje sustavom ventilacije u normalnom režimu rada. Napredna strategija za upravljanje sustavom uzdužne ventilacije u slučaju požara [1] primijenjena je u Hrvatskoj u tunelima Mala Kapela, Sveti Rok i Brinje, a trenutačno se ugrađuje i u tunelu Učka. Osnovni koncepti upravljanja preko frekvencijskih pretvarača opisani su u [6] i [7].

3 Sustav uzdužne ventilacije cestovnih tunela

3.1 Općenito

Sustav uzdužne ventilacije cestovnih tunela sastoji se u općem slučaju od impulsnih aksijalnih ventilatora grupiranih u baterije, ovješeneh o svod tunela i ekvidistantno smještenih uzduž tunelske cijevi (slika 1.). Ventilatorske baterije obično se sastoje od 2-3 ventilatora, a međusobno moraju biti na takvoj udaljenosti L_V da rad jedne baterije ne utječe na rad susjedne, odnosno da ne smanjuje njezinu porivnu silu i sposobnost prijenosa impulsa na okolni zrak. Velike izlazne brzine zraka na izlazu impulsnih ventilatora (više od 30 m/s) induciraju okolnu zračnu masu i potiču je na gibanje. Upravo zbog spomenutoga impulsnog karaktera ovog tipa ventilacije upravljanje je vrlo složeno, s imanentno ugrađenom tromosti zračne mase na promjenu porivne sile sustava ventilacije.

3.2 Modeliranje procesa sustava uzdužne ventilacije

Za analizu energijskih potreba sustava uzdužne ventilacije neće se uzeti u obzir utjecaj atmosferskih prilika i utjecaj prometovanja vozila koje rezultira onečišćenjem zraka unutar tunela, ali i tlačnim doprinosom, odnosno poremećajem u gibanju zračne mase.

Modeliranje strujanja zračne mase unutar tunela, bez gore navedenih utjecaja, bit će dovoljno za usporedbu potrošnje električne energije sustava ventilacije s izravnim pokretanjem i sustava ventilacije s frekvencijskim pretvaračima.

Matematički model procesa strujanja zraka u tunelu izgradit će se na temelju zakona očuvanja količine gibanja, koji uz određene modifikacije daje jednadžbu dinamičke ravnoteže aksijalnih sila. Strujanje zraka u modelu promatra se kao jednodimenzijnsko, a model strujanja zraka temelji na pretpostavkama iznesenim i detaljno obrazloženim u [1].

3.2.1 Matematičke zakonitosti rada ventilatora

Ako je poznat protok zraka Q_2 , tlačni doprinos p_{V2} i snaga ventilatora P_{V2} pri brzini vrtnje n_2 , mogu se predvidjeti Q_1 , p_{V1} i P_{V1} istog ventilatora pri brzini vrtnje n_1 na temelju jednostavnih jednadžbi:

$$Q_{V1} = Q_{V2} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (1)$$

$$p_{V1} = p_{V2} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (2)$$

$$P_{V1} = P_{V2} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad (3)$$

Brzina zraka kroz ventilator, uz pretpostavku konstantnoga poprečnoga presjeka ventilatora A_V , iznosi:

$$v_V = \frac{Q}{A_V} \quad (4)$$

te stoga, uvrštavanjem u izraz (1), vrijedi izraz:

$$v_{V1} = v_{V2} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (5)$$

3.2.2 Osnovni matematički model strujanja

Uz zanemarivanje utjecaja atmosferskih prilika i utjecaja prometovanja vozila, može se izvesti osnovni matematički model strujanja zraka u tunelu na temelju opće jednadžbe ravnoteže uzdužnih sila koje djeluju na cijeli volumen zraka u tunelu duljine L :

$$F_A = \sum_0^L F_{JF} - \sum_0^L F_L = 0 \quad (6)$$

gdje je:

F_A - sila potrebna za ubrzanje cjelokupne zračne mase pri gibanju uzduž tunela

$\sum_0^L F_{JF}$ - ukupna porivna sila svih impulsnih uzdužnih ventilatora

$\sum_0^L F_L$ - ukupna sila potrebna za svladavanje svih otpora strujanja (u daljnjem tekstu "ukupna sila otpora strujanja")

Za naša će razmatranja biti dovoljan model stacionarnog strujanja zraka te je stoga izraz (6) izjednačen s nulom. S obzirom da se može tvrditi da je poprečni presjek tunnelske cijevi konstantan po cijeloj duljini, radi praktičnosti proračuna izraz (6) će se u daljnjem tekstu izražavati u domeni tlakova ($p = F / A$).

3.2.2 Tlačne komponente modela strujanja

a) Inercijska sila F_A

Ako se modificira *Newtonov* izraz $F = m \cdot a$, dobiva se izraz za silu inercije:

$$\frac{1}{A_T} \cdot F_A = \rho \cdot L \cdot \frac{dv}{dt} = 0 \quad (7)$$

gdje je:

A_T - ploština poprečnog presjeka tunela [m^2]

ρ - gustoća zraka u tunelu [kg/m^3]

L - duljina tunela [m]

v - brzina zračne struje u tunelu [m/s]

S obzirom na izabrani stacionarni model strujanja zraka, inercijska sila F_A jednaka je nuli.

b) Porivna sila ventilatora

Porivna sila $\sum_0^L F_{JF}$ ventilatora predstavlja jedinu

upravljačku veličinu kojom se upravlja gibanjem zračne struje, ali i kvalitetom zraka u tunelu. Ukupna porivna sila ventilatora jednaka je:

$$\sum_0^L F_{JF} = p_V \cdot A_T \quad (8)$$

gdje je:

p_V - ukupni tlačni doprinos sustava uzdužne ventilacije

Nadalje, ukupni tlačni doprinos p_V sustava uzdužne ventilacije može se odrediti izrazom:

$$p_V = N_V \cdot \frac{\eta \cdot \rho \cdot A_V \cdot v_V \cdot (v_V - v)}{A_T} \quad (9)$$

gdje je:

N_V - broj aktivnih ventilatora u tunelu

η - instalacijski faktor, ovisan o položaju ventilatora u odnosu na svod tunela i susjedne baterije

A_V - ploština poprečnog presjeka ventilatora [m^2]

v_V - brzina zraka na izlazu iz ventilatora [m/s]

c) Ukupna sila otpora strujanja

Ukupna sila otpora strujanja $\sum_0^L F_L$ uključuje silu za svladavanje otpora trenja, svih lokalnih otpora strujanja duž tunelske cijevi, te pripadajuće ulazno/izlazne gubitke. Ukupna sila otpora strujanja izražena u domeni tlakova može se izraziti izrazom:

$$\frac{1}{A_T} \cdot \sum_0^L F_L = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{L}{D_H} + \xi_{UL} + \xi_{IZL} \right) \cdot v^2 \quad (10)$$

gdje je:

λ - koeficijent ukupnog otpora strujanja

D_H - hidraulički promjer tunela [m]

ξ_{UL} - koeficijent ulaznih gubitaka

ξ_{IZL} - koeficijent izlaznih gubitaka

4 Strukture upravljanja ventilacijom

4.1 Upravljanje nepromjenjivom brzinom vrtnje

Najčešći način upravljanja ventilacijom jest da se ventilatori pokreću izravnim spajanjem na električnu mrežu. Pri tome svaki od aksijalnih ventilatora može poprimiti 2 različita stanja: aktivan (*ON*) ili isključen (*OFF*). Algoritmom upravljanja određuje se broj ventilatora N_V koji će se vrtjeti nazivnom brzinom vrtnje n_N kako bi se ostvarila željena brzina zračne struje v u tunelu. Može se odrediti zakon upravljanja izravno pokretanih ventilatora:

$$N_V = \text{promjenjivo}$$

$$n = n_N = \text{konst.}$$

Ukupni tlačni doprinos ventilacije s N_V izravno aktiviranih ventilatora jednak je:

$$p_{VD} = N_V \cdot \frac{\eta \cdot \rho \cdot A_V \cdot v_{VN} \cdot (v_{VN} - v)}{A_T} \quad (11)$$

gdje je:

v_{VN} - nazivna brzina zraka na izlazu ventilatora pri nazivnoj brzini vrtnje n_N , [m/s]

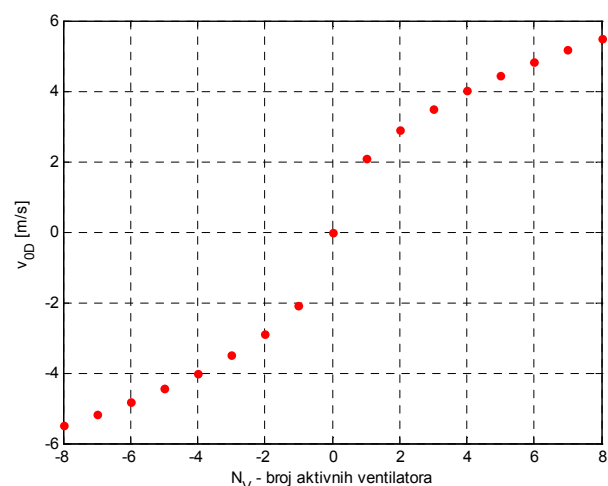
Ukupna snaga sustava ventilacije s izravno pokretnim ventilatorima jednaka je:

$$P_{VD} = N_V \cdot P_{VN} \quad (12)$$

gdje je:

$$P_{VN} - \text{nazivna snaga jednog ventilatora [} kW \text{]}$$

S obzirom da je broj aktivnih ventilatora N_V cijeli broj, ukupni tlačni doprinos p_{VD} i ukupna snaga P_{VD} tijekom rada sustava ventilacije mijenjaju se skokovito. Uvrštavanjem izraza (11) i (10) u jednadžbu (6), jednostavnim modifikacijama te rješavanjem pripadne kvadratne jednadžbe može se dobiti izraz za statičku karakteristiku ventilacije tunela, odnosno izraz za ovisnost brzine strujanja zraka u ustaljenom stanju o broju aktivnih ventilatora $v_{0D} = f(N_V)$. Uobičajena statička karakteristika sustava uzdužne ventilacije za $N_{V \max} = 8$ prikazana je na slici 2.



Slika 2. Statička karakteristika sustava uzdužne ventilacije tunela uz izravno pokretanje ventilatora

4.2 Upravljanje promjenjivom brzinom vrtnje

Drugi promatrani način upravljanja sustavom ventilacije predstavlja upravljanje asinkronim motorima, koji su sastavni dio aksijalnih ventilatora, preko frekvencijskih pretvarača. Algoritmom upravljanja potrebno je odrediti brzinu vrtnje n_{FP} kojom će se vrtjeti svi raspoloživi ventilatori u tunelu $N_V = N_{V \max}$ kako bi se ostvario željeni tlačni doprinos p_{VFP} , te time i zahtijevana brzina zračne struje v u tunelu. Stoga se može odrediti zakon upravljanja sustava ventilacije s frekvencijskim pretvaračima:

$$N_V = N_{V \max} = \text{konst.}$$

$$v_V = v_{VFP} = \text{promjenjivo}$$

Promjenom frekvencije statorske struje asinkronog motora mijenja se brzina vrtnje n [o/min] prema izrazu:

$$n = \frac{60 \cdot f_S}{p} \cdot (1-s) \quad (13)$$

gdje je:

f_S - frekvencija struje statora asinkronog motora [Hz]

p - broj pari polova

s - faktor klizanja

Ako se modificiraju izrazi matematičkog opisa ventilatora (3) i (5) uvrštavanjem nazivne vrijednosti $v_{V2} = v_{VN}$, $P_{V2} = P_{VN}$ pri $n_2 = n_N$, modifikacijom izraza (9), te uzimajući u obzir pretpostavku da se istodobno vrte svi ventilatori brzinom vrtnje n_{FP} , dobivaju se izrazi za opis sustava uzdužne ventilacije upravljanog preko frekvencijskih pretvarača:

$$v_{VFP} = v_{VN} \cdot \left(\frac{n_{FP}}{n_N} \right) \quad (14)$$

$$P_{VFP} = N_{V \max} \cdot \frac{\eta \cdot \rho \cdot A_V \cdot v_{VFP} \cdot (v_{VFP} - v)}{A_T} \quad (15)$$

$$P_{VFP} = N_{V \max} \cdot P_{VN} \cdot \left(\frac{n_{FP}}{n_N} \right)^3 \quad (16)$$

5 Višeparametarska analiza

5.1 Osnovne postavke

Kako bi se ostvarila željena brzina zračne struje v , potrebno je djelovati odgovarajućim tlačnim doprinosom sustava uzdužne ventilacije p_V . U tu ćemo svrhu usporediti snage prethodno opisanih dviju struktura upravljanja uz isti tlačni doprinos.

Osnovna ideja jest pronaći brzinu vrtnje n_{FP} , kojom se vrte svi ventilatori u tunelu (upravljeni preko frekvencijskih pretvarača), za koju će tlačni doprinos p_{VFP} biti jednak tlačnom doprinosu p_{VD} kao da je aktivno N_V (izravno upravljanih), uz nazivnu brzinu vrtnje n_N . Usporedbom izraza (11) i (15), te upotrebom izraza (14), dobiva se izraz za određivanje tražene brzine vrtnje:

$$n_{FP} = \frac{n_N}{v_{VN}} \cdot \frac{v_{0D} \pm \sqrt{v_{0D}^2 + 4 \cdot \frac{N_V}{N_{V \max}} \cdot (v_{VN}^2 - v_{VN} \cdot v_{0D})}}{2} \quad (17)$$

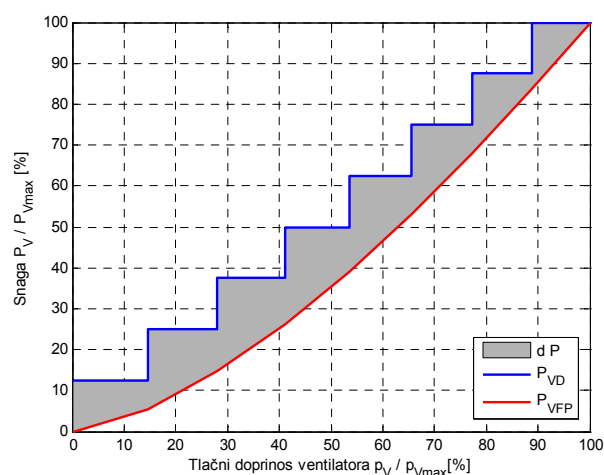
gdje je:

v_{0D} - brzina strujanja zraka u stacionarnom stanju (poglavlje 4.1.)

Na temelju poznate brzine vrtnje n_{FP} i izraza (16) može se odrediti ukupna snaga P_{VFP} sustava ventilacije s frekvencijskim pretvaračima uz uvjet $p_{VFP} = p_{VD}$.

Na slici 3. uspoređena je snaga obiju promatranih struktura upravljanja ventilacije uz $N_{V \max} = 8$, a dobivena ušteda snage jednaka je „sivoj ploštini“ na slici određenog izrazom:

$$dP = P_{VD} - P_{VFP} \quad (18)$$



Slika 3. Usporedba angažiranih snaga ventilacije tunela za različite strukture upravljanja

(P_{VD} - izravno pokretanje; P_{VFP} - pokretanje preko frekvencijskog pretvarača)

5.2 Kriteriji analize

Isti upravljački utjecaj postiže se upravljanjem preko frekvencijskih pretvarača, ali uz manju snagu, što dovodi do uštede električne energije i manje troškove eksploatacije tunela.

U radu se analizira vrijeme isplativosti ugradnje frekvencijskih pretvarača s obzirom na sljedeće parametre (kriterije) sustava uzdužne ventilacije tunela:

- duljina tunela L ,
- udaljenost među ventilatorskim baterijama L_V ,
- postotak aktivnih ventilatora pri izravnom spajanju na energetska mrežu m [%].

5.3 Metodologija analize

Svrha analize jest pronaći skup parametara $\{L_i, L_{Vi}, m_i\}$ za koje će vrijeme isplativosti investicije ugradnje i implementacije frekvencijskih pretvarača $t_{INVESTi}$ biti manje ili jednako od zahtijevanog vremena t_{LIMIT} .

Najprije se za odabrane vrijednosti parametara $L_i \in [L_{\min}, L_{\max}]$ i $L_{Vi} \in [L_{V\min}, L_{V\max}]$ određuje ukupan broj ventilatora u tunelu:

$$N_{V\max i} = \left(\left\lfloor \frac{L_i}{L_{Vi}} + 0.5 \right\rfloor - 1 \right) \cdot N_{VB} \quad (19)$$

gdje je:

$\lfloor \rfloor$ - operator zaokruživanja na manju cjelobrojnu vrijednost

N_{VB} - broj ventilatora u ventilatorskoj bateriji

Na temelju odabranog postotka aktivnih ventilatora s izravnim pokretanjem $m_i \in [0,100]$ i ukupnog broja ventilatora $N_{V\max i}$ određuje se broj aktivnih ventilatora:

$$N_{Vi} = \left\lfloor \frac{m_i}{100} \cdot N_{V\max i} + 0,5 \right\rfloor \quad (20)$$

Na temelju izraza (17) određuje se brzina vrtnje n_{FPi} uz koju će se ostvariti uvjet $p_{VFPi} = p_{VDi}$. Izrazima (12) i (16) određuju se snage P_{VDi} i P_{VFPi} , te se pomoću izraza (18) odredi ušteda snage dP_i . Vrijeme isplativosti investicije ugradnje frekvencijskih pretvarača dano je izrazom:

$$t_{INVESTi} = \frac{K_{INVESTi}}{dP_i \cdot K_{EE} \cdot 365 \cdot 24} \quad (21)$$

gdje je:

$K_{INVESTi}$ - ukupna cijena ugradnje frekvencijskih pretvarača [€]

K_{EE} - cijena električne energije [€/kWh]

Nadalje, ukupna cijena investicije ugradnje frekvencijskih pretvarača:

$$K_{INVESTi} = N_{V\max i} \cdot K_{FP} \quad (22)$$

gdje je:

K_{FP} - cijena jednog frekvencijskoga pretvarača i njegove primjene [€]

Mijenjanjem parametara sustava uzdužne ventilacije $L_i \in [L_{\min}, L_{\max}]$, $L_{Vi} \in [L_{V\min}, L_{V\max}]$ i $m_i \in [0,100]$,

određuju se skupovi parametara $\{L_i, L_{Vi}, m_i\}$ koji zadovoljavaju uvjet:

$$t_{INVESTi} \leq t_{LIMIT} \quad (23)$$

gdje je:

$t_{INVESTi}$ - proračunsko vrijeme isplativosti investicije [god]

t_{LIMIT} - unaprijed zadano vrijeme isplativosti investicije [god].

6 Rezultati analize

Na temelju metodologije iznesene u poglavlju 5.3 napravljene su simulacije, a rezultati su prikazani na slici 4. Pri tome su upotrijebljene vrijednosti parametara sustava ventilacije i geometrijskog oblika tunela prema tablici 1.

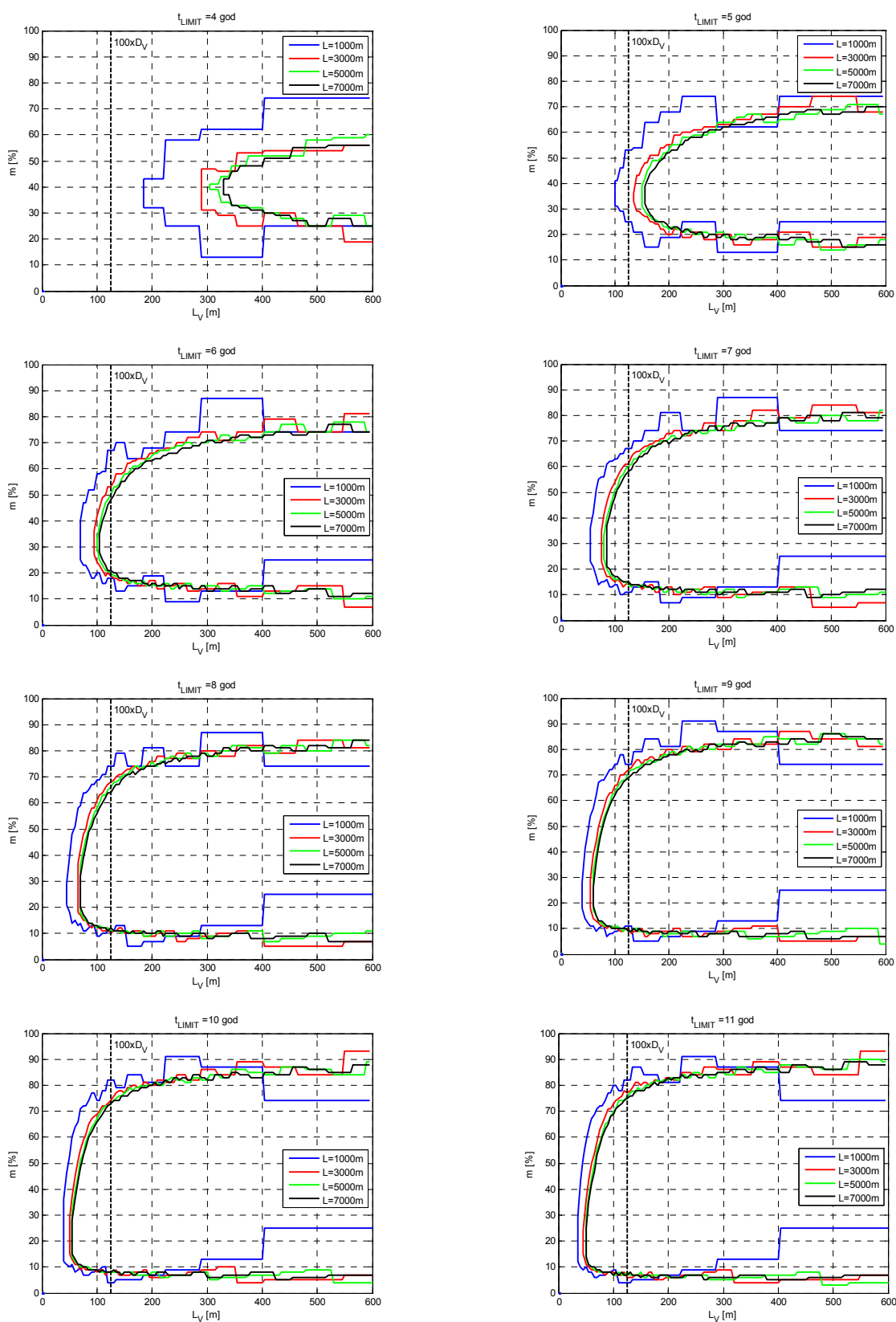
Tablica 1. Parametri sustava ventilacije i geometrije tunela

Parametar	Vrijednost
A_T	56,17 m ²
A_V	1,23 m ²
D_V	1,25 m
η	0,85
v_{VN}	28,9 m/s
n_N	1460 o/min
P_{vN}	33 kW
N_{VB}	2
ρ	1,2 kg/m ³
λ	0,02
D_H	7,83 m
ξ_{UL}	0,5
ξ_{IZL}	1,0

Tablica 2. Financijski parametri

Parametar	Vrijednost
K_{EE}	0,041 €/kWh
K_{FP}	5000 €

Na slici 4. isprekidanom je linijom označena minimalna udaljenost među ventilatorskim baterijama sa $L_V = 100 \times D_V$, ispod koje bi došlo do međusobnog narušavanja rada među baterijama. Stoga je područje lijevo od isprekidane linije izvan razmatranja!



Slika 4. Grafički prikaz parametara L , L_V i m za različita zahtijevana vremena isplativosti t_{LIMIT}

Za svaku od duljina tunela L_i pripadnom je zatvorenom krivuljom (u boji) definirano područje parametara $\{L_V, m_i\}$ kojima je zadovoljen uvjet (23), odnosno uvjet da je vrijeme isplativosti investicije manje ili jednako zahtijevanom vremenu.

Na kraća zahtijevana vremena isplativosti investicije t_{LIMIT} uvelike utječe odabir parametara L_V i m , osobito za kraće tunele. Bez obzira na duljinu tunela, početna investicija ugradnje frekvencijskih pretvarača najbrže će se isplatiti ako se očekuje da najveći dio vremena bude aktivno između 20 % i 60 % izravno pokretanih ventilatora s konstantnom brzinom vrtnje!

7 Zaključak

U radu je uspoređena potrebna snaga sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela s obzirom na način upravljanja ventilatorima: izravnim spajanjem na energetsku mrežu i preko frekvencijskih pretvarača.

- Upotrebom frekvencijskih pretvarača mogu se postići zahtijevane upravljačke razine tlačnog doprinosa, ali uz manji utrošak snage ventilacijskog sustava. Rezultat toga je manja potrošnja električne energije, pa stoga i manji troškovi eksploatacije tunela.
- Na temelju prezentiranih grafičkih rezultata, može se već u fazi projektiranja za prethodno definiranu duljinu tunela optimalno dimenzionirati, s obzirom na udaljenost među ventilatorskim baterijama i očekivani prosječan broj aktivnih ventilatora, sustav uzdužne ventilacije s frekvencijskim pretvaračima da bi vrijeme isplativosti početne investicije bilo što kraće.

LITERATURA

- [1] Drakulić, M.: *Djelovanje sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela u uvjetima požara*, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [2] Nakahori, I.; Ato, T.; Murakami, K.; Araki, D.; Kanatani, T.; Vardy, A.: *The use of inverter-driven jet-fans to reduce tunnel ventilation costs*, 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, New Jersey, (2009), 69-79
- [3] Nakahori, I.; Mitani, A.; Vardy, A.: *Automatic control of two-way tunnels with simple longitudinal ventilation*, 5th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation', Graz, (2010), 74 - 84
- [4] Ferkl, A.; Meinsma, G.: *Finding optimal ventilation control for highway tunnels*, Tunnelling and Underground Space Technology 22 (2007) 2, 222–229
- [5] Bogdan, S., Birgmajer, B., Kovačić, Z.: *Model predictive and fuzzy control of a road tunnel ventilation system*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies 16 (2008) 5, 574-592
- [6] Danfoss: *Najvažnije o frekvencijskim pretvaračima*, 3. izdanje, Graphis d.o.o., Zagreb, 2009
- [7] Leonard, W.: *Control of Electrical Drives*, 2nd edn, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1996.