

**Avtor:**  
dr. Nikola Holeček

## **Modeliranje aerodinamičnih lastnosti kondenzatorjev sušilnih strojev nove generacije**

*Povzetek doktorske disertacije*

Svoje dolgoletno raziskovalno delo na področju akustike gospodinjskih aparatov je Nikola Holeček zaokrožil z doktorsko disertacijo na Univerzi v Ljubljani, Fakulteti za strojništvo, ki jo je zagovarjal 22. decembra lani. V doktorja znanosti je bil promoviran 30. januarja 2007. Doktorsko delo ni le pomemben osebni dosežek temveč tudi pokazatelj uspešnosti razvojno-raziskovalnega dela v podjetju ter Raziskovalne enote Gorenje, katere dolgoletni vodja je dr. Holeček.

V marcu je vsebino doktorske disertacije na zanimiv način predstavil v Modri dvorani, v želji, da bi dosegli čim širši krog bralcev, pa v nadaljevanju objavljamo povzetek disertacije.

### Izvleček

Kondenzator je eden izmed najpomembnejših sestavnih delov sušilnikov perila. Različne izvedbe kondenzatorjev se razlikujejo po energetskih in akustičnih lastnostih. Opravljene so bile meritve hitrosti na izstopu iz kondenzatorjev sušilnikov perila in meritve energijskega toka zvočnega valovanja. Meritve so obsegale kondenzatorje, ki se vgrajujejo v sušilnike perila ter v Gorenju razvit novi tip kondenzatorja s polnilom iz kovinske volne. Izhajajoč iz teoretičnih osnov so raziskane fenomenološke soodvisnosti med aerodinamskim vzbujanjem in emisijo zvoka.

Močnostni spektri hitrosti na izstopu iz kondenzatorjev kažejo značilne razlike: Pri obstoječih tipih kondenzatorjev imajo generično obliko, ki ustreza razpadu turbulence, nanjo pa so naloženi posamezni vrhovi, ki so posledica strukturne izvedbe reber v kondenzatorju.

Meritve energijskega toka zvočnega valovanja kažejo, da je spektralno gostoto možno razčleniti na generični del, ki ni odvisen od detajlov turbulentnega izvora in diskreten del, ki je posledica specifičnih geometrijskih lastnosti kondenzatorja. Dekompozicija zvočnega spektra je bila pomembna za tehnično rešitev, ki je omogočila drugačno rešitev sekundarnega pretočnega trakta kondenzatorja in patentiranje le-te.

### **V okviru naloge je bil razvit novi tip kondenzatorjev.**

Doktorska naloga je usmerjena v raziskave aerodinamskih vplivov strujanja skozi zapleteno geometrijo pretočnega polja na emisijo akustičnega energijskega toka v okolni prostor. Zaradi tega je doktorska naloga usmerjena v študijo turbulentnih pojavov v pretočnih kanalih različnih kondenzatorjev ter pripadajoče akustične emisije.

Poraba energije in zvočna emisija sta najpomembnejši funkcionalni karakteristiki sušilnega stroja za gospodinjstvo, na osnovi katerih se kupci odločajo za nakup. Zvočna emisija je odvisna od izvedbe ventilatorjev, kanalov in aerodinamičnih karakteristik pretočnih kanalov kondenzatorja.

Meritve so pokazale, da razlike v zvočni moči med posameznimi vzorci sušilnih strojev, ki imajo vgrajene različne tipe kondenzatorjev presegajo 3 dB – A vrednotene ravni zvočne moči. To je povzročilo tipične razlike v uvrščanju sušilnih strojev v posamezne cenovne razrede. Iz navedenega je bila oblikovana raziskovalna naloga, ki je bila usmerjena v razvoj kondenzatorja nove generacije.

Študija je bila sočasno vezana na raziskave aerotermodinamskih karakteristik kondenzatorja, kjer isti turbulentni tok vpliva na energijske prenosne pojave v kondenzatorju. Globalni cilj raziskave je bil iskanje funkcionalnega optimuma kondenzatorja, ki bo upošteval tako

**Poraba energije in zvočna emisija sta najpomembnejši funkcionalni karakteristiki sušilnega stroja za gospodinjstvo**

**Doktorska naloga je sestavni del raziskovalnega projekta razvoja kondenzatorja sušilnega stroja nove generacije**

**Tehnična rešitev kondenzatorja, ki je nastala v okviru naloge, je patentno zaščitena in predstavlja osnovo novi generaciji kondenzatorjev sušilnih strojev**

aerotermodinamske kot aeroakustične odvisnosti. Končni cilj raziskave je bil postavitve temeljnih osnov za razvoj in patentiranje nove družine kondenzatorjev v firmi Gorenje.

Doktorska naloga je sestavni del raziskovalnega projekta razvoja kondenzatorja sušilnega stroja nove generacije. Naloga je usmerjena v raziskavo aeroakustičnih lastnosti in optimiranje teh s sodobnimi eksperimentalnimi metodami in orodji. Analizirane so temeljne – teoretične relacije med turbulentnim vzbujanjem v zračnem toku kondenzatorja in generiranim zvočnim poljem.

### Opis dela:

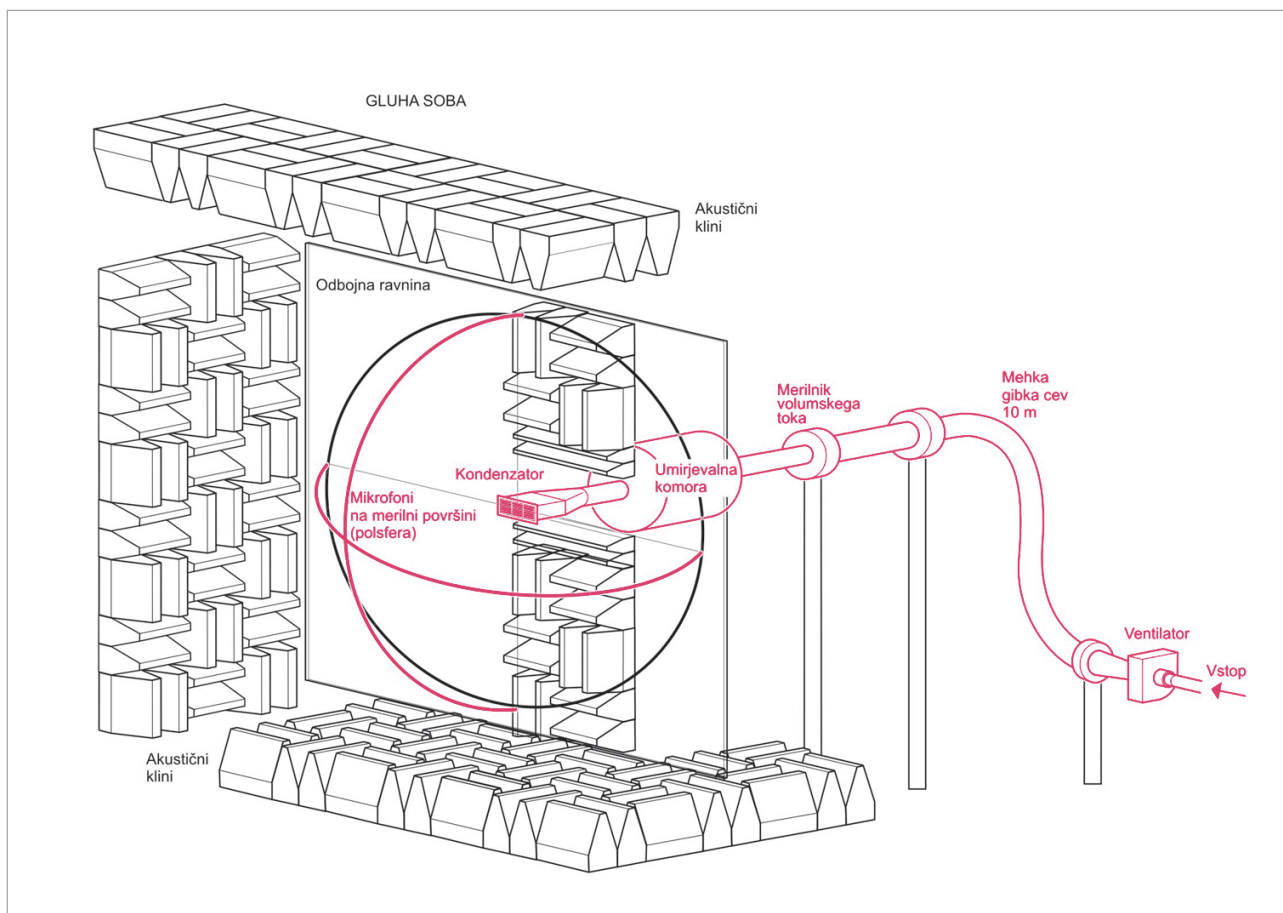
Doktorska disertacija obsega 128 strani. Razdeljena je na 9 poglavij. V doktorskem delu so predstavljeni rezultati eksperimentalnega modeliranja aeroakustičnih lastnosti v izstopnem polju sekundarnega pretočnega trakta kondenzatorja sušilnega stroja. Avtor v nalogi razčleni močnostne spektre zvočne moči in močnostne spektre hitrostnih fluktuacij v generično obliko, ki ustreza razpadu turbulence v izstopnem hitrostnem polju, ter strukturni del, ki pripada geometrijski strukturi sekundarnega pretočnega trakta kondenzatorja. Temelječ na Lighthillovi analogiji in izpeljani spektralni gostoti akustičnega hrupa pri turbulenci, razčleni hrup na generični in strukturno diskretni del, kar ga vodi v oblikovanje nove zasnove sekundarnega pretočnega polja kondenzatorja. Z uvedbo geometrijsko naključne strukture – v obliki vlaknaste porozne strukture pretočnega trakta minimizira diskretni del hrupa. Tehnična rešitev kondenzatorja, ki je nastala v okviru naloge, je patentno zaščitena in predstavlja osnovo novi generaciji kondenzatorjev sušilnih strojev.

V uvodnem delu avtor predstavi namen doktorske naloge, kjer poudari pristop k problemu preko eksperimentalnega modeliranja aeroakustičnih lastnosti toka v kondenzatorju. Predstavi tudi tehnično problematiko, vezano na akustično emisijo v sušilnih strojih, kjer kondenzator predstavlja enega od virov hrupa. Uvodni del zaključí s pregledom stanja na področju povezovanja akustike in mehanike tekočin. Na tem mestu se naveže na Lighthillovo teorijo, ki povezuje cenilke turbulentnega polja z akustičnim poljem, in na Rubinstein-Zhoujev popis frekvenčnega spektra zvoka, ki ga oddaja izotropno turbulentno polje.

V drugem delu avtor na kratko predstavi tehnični problem in umesti kondenzator v sušilni stroj. Predstavi vlogo kondenzatorja in navede tipe kondenzatorjev, ki so v nadaljevanju naloge obravnavani.

V tretjem poglavju predstavi avtor osnovne značilnosti turbulence. Opredeli koherentne vrtinčne strukture, ki prispevajo k turbulentni kinetični energiji majhen delež, vendar so ključne za transport mase, momenta in energije. Opozori na naključno naravo razpada koherentnih struktur, kar je v nelinearni soodvisnosti s samimi koherentnimi strukturami v toku. Nato preide na opis teoretičnih osnov gibanja fluida in se omeji na homogeno izotropno turbulenco, dvotočkovne korelacijske funkcije, spektralno analizo turbulentnega polja in popis kaskadnega razpada koherentnih turbulentnih struktur na osnovi hipoteze Kolmogorova. V nadaljevanju poda aerodinamično teorijo generacije zvoka preko Lighthillovega tenzorja, ki predstavlja vire hrupa. Predstavljena povezava med turbulentnim vzbujanjem in frekvenčnim spektrom emitiranega zvoka usmerja doktorsko nalogo v študij turbulentnih lastnosti toka na izstopu iz kondenzatorja, analizo zvočne moči ter raziskavo njune povezanosti.

V četrtem poglavju so predstavljene metodologije eksperimentalnega dela v nalogi. Opisane so meritve kinematike zračnega toka in meritve zvočne moči na izstopu iz kondenzatorja. Predstavljeni so merilni postopki, ki temeljijo na veljavnih standardih in priporočilih. Opisana je merilna



**Slika 1: Merilna proga za simultano merjenje izsevanja akustične energije in lokalne hitrosti zračnega toka**

**Na osnovi primerjave dveh tipov kondenzatorjev AKG in Gorenje avtor oblikuje tehnično rešitev novega kondenzatorja**

oprema, kjer avtor podrobno predstavi merilni sistem PULSE za določanje zvočne moči po absolutni metodi.

V petem poglavju celovito predstavi eksperiment, ki ga je na področju meritev aerodinamskih lastnosti izvedel na eksperimentalni postaji laboratorija LVTS – Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, na področju meritev akustičnih karakteristik pa je meritve izvedel v akustičnem laboratoriju podjetja Gorenje. Aerodinamske karakteristike poda s prostorsko porazdelitvijo močnostnih spektrov hitrostnih fluktuacij ter porazdelitvijo stopnje turbulence v prečni izstopni ravnini sekundarnega zračnega toka kondenzatorja. V nadaljevanju opiše eksperiment v gluhi komori, kjer poda umestitev kondenzatorja, postavitev dvajsetih mikrofонов za simultano vzorčenje zvočnega tlaka in opiše koncepte vzorčenja signalov pri izbranih robnih pogojih in integralnih pretočnih karakteristikah. Opiše postopke določanja spektrov ravni zvočne moči in lokalne porazdelitve zvočne intenzivnosti skozi izstopno površino kondenzatorja.

V šestem poglavju predstavi rezultate eksperimenta, pri čemer se usmeri v primerjavo dveh tipov kondenzatorjev AKG in Gorenje, ki se med seboj značilno razlikujeta v geometrijski strukturi sekundarnih pretočnih traktov. Pretočni trakt kondenzatorja AKG tvorijo periodične lamelne strukture, v primeru kondenzatorja Gorenje pa je sekundarni pretočni trakt zapolnjen z vlaknasto – porozno strukturo. Rezultati aerodinamskih raziskav kažejo značilno razliko v spektrih moči hitrostnih fluktuacij in v stopnji turbulence. Pri kondenzatorju AKG so značilni ozki vrhovi v spektru hitrostnih fluktuacij. Nasprotno temu kaže kondenzator Gorenje sorazmerno dobro ujemanje z  $-5/3$  zakonom razpada turbulence. Analogne ugotovitve so dobljene pri spektrih zvočne moči, kjer kondenzator AKG kaže izrazit vrh – ton v področju od 800 do 1600 Hz, odvisno od integralnega pretoka zraka. Izrazito ugodno porazdelitev zvočne moči ima kondenzator Gorenje, ki nima značilnih vrhov ne glede na različne pretoke zraka. Na osnovi teh ugotovitev, avtor oblikuje tehnično rešitev novega kondenzatorja.

V sedmem poglavju predstavi model, ki povezuje aerodinamske lastnosti toka in lastnosti izsevane zvočne moči. Pokaže, da je možno energijski tok akustičnega vala v frekvenčnem prostoru analizirati glede na Rubinstein – Zhoujev " $\omega^{-4/3}$ " zakon, ki temelji na predpostavki, da lahko inverzne dekorelacijske čase, ki določajo frekvenco izsevane zvočne moči, nadomestimo s časovnimi korelacijskimi funkcijami. V nalogi je opisan model generacije turbulentnega hrupa, ki za osnovo uporablja meritve turbulentnih lastnosti toka. Iz meritev hitrostnih fluktuacij določi obliko spektra ravnovesnega področja turbulence in področje disipacije turbulentnih vrtincev. Model temelji na povezavi med razliko lastnega in generičnega dela spektra turbulentne hitrosti v povezavi z inverznimi dekorelacijskimi časi.

V zaključnem delu naloge - prilogi avtor podrobno predstavi Lighthillovo akustično analogijo in vsebino patenta, ki opisuje zasnovano tehnično rešitve kondenzatorja z vlaknasto – porozno strukturo sekundarnega pretočnega trakta kondenzatorja.

Avtor je na tematskem področju raziskave v obdobju 2004 – 2006 sodeloval kot avtor odnoso soavtor v sledečih pomembnejših izvirnih znanstvenih prispevkih :

- Identifying drying machine heat exchanger noise, objavljeno v Facta Universitatis. Series, Working and Living Environmental Protection;
- Experimental research of aerodynamic noise induced by condenser of drying machine, objavljeno v International journal of acoustics and vibration;
- Reducing the noise emitted from a domestic clothes-drying machine, objavljeno v Noise control engineering journal;
- Lighthillova akustična analogija in zvočni hrup pri turbolenci, prvi in drugi del, objavljeno v Obzorniku za matematiko in fiziko;
- Experimental research of aerodynamic noise induced by condenser of drying machine, objavljeno v Proceedings of the eleventh international congress on sound and vibration, ICSV11;
- Energy consumption analysis of domestic oven, objavljeno v Strojniškem vestniku.

**Rezultati doktorskega dela so v celoti vključeni v raziskovalno delo EUREKA projekta »CONDENDRYER« 2004-2006**

Rezultati doktorskega dela so v celoti vključeni v raziskovalno delo EUREKA projekta »CONDENDRYER« 2004-2006. Predstavljeno nalogo poleg visokega strokovnega pristopa odlikuje rezultat – novo razvita tehnična rešitev kondenzatorja sušilnega stroja.