

Mjerenje i analiza vibracija energetskih transformatora s ciljem smanjenja buke

Tomislav Bazina^{1,2,3}, Ervin Kamenar^{1,2,3}, Saša Zelenika^{1,2,3,5}, Marko Perčić^{1,2,3}, Željko Vrcan¹, Branimir Čučić⁴ i Mislav Ilijašević⁴

- ¹ Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Laboratorij za precizno inženjerstvo, Vukovarska 58, 51000 Rijeka, Hrvatska
- ² Sveučilište u Rijeci, Centar za mikro- i nanoznanosti i tehnologije, Laboratorij za precizno inženjerstvo i tehnologiju mikro- i nanosustava, Radmile Matejčić 2, 51000 Rijeka, Hrvatska
- ³ Sveučilište u Rijeci, Centar za umjetnu inteligenciju i kibernetičku sigurnost, Laboratorij za umjetnu inteligenciju u mehatronici, Radmile Matejčić 2, 51000 Rijeka, Hrvatska
- ⁵ redoviti član HATZ-a u Odjelu strojarstva i brodogradnje
- ⁴ Končar distributivni i specijalni transformatori d.d., Josipa Mokrovića 8, Zagreb, Hrvatska

Sažetak: Karakterizacija dinamičkog odziva je ključna pri analizi buke energetskih transformatora te određivanju mjera za minimizaciju buke. Nastajanje buke je uvjetovano međudjelovanjem uzbude jezgre i namotaja te prijenosom uzbude fluidom za hlađenje do oplata. Taj kompleksni mehanizam može se analizirati jedino naprednim numeričkim modelima temeljenim na mjerenjima. U ovom se radu, kao izvanredan primjer prijenosa znanja, opisuje napredna vremenska i frekvencijska analiza vibracijskih učinaka temeljena na pažljivom planiranju eksperimenata DoE metodama te opsežnim eksperimentalnim mjerenjima dinamičkog odziva oplata energetskog transformatora tvrtke Končar D&ST d.d. provedenima koristeći beskontaktnu lasersku Doppler interferometrijsku metodu. Provedena analiza stvara preduvjete za razvoj modela koji će omogućiti unapređenje konstrukcije analiziranih kompleksnih sustava s ciljem smanjenja buke te daljnjeg zadovoljavanja sve strožih međunarodnih normi za energetske transformatore.

Ključne riječi: energetski transformatori, analiza buke, mjerenje i modeliranje

1. Uvod

Tvrtka Končar distributivni i specijalni transformatori d.d. (Končar D&ST) iz Zagreba jedna je od vodećih tvrtki u sektoru proizvodnje distributivnih, srednjih energet-

skih i specijalnih transformatora do 160 MVA i 170 kV koja svoje proizvode isporučuje diljem svijeta. Trendovi te novi EU i drugi međunarodni normativni zahtjevi nameću sve strože kriterije u pogledu dozvoljene razine buke takvih uređaja. Tvrtka Končar D&ST se, stoga, snažno usmjerila na ulaganje resursa i znanja u kontinuirani razvoj i unapređenje svojih proizvoda [1]. Karakterizacija dinamičkih odziva je u tom kontekstu ključan aspekt u analizi razine buke energetskih transformatora jer sustavna mjerenja, analiza i modeliranje vibracijskih odziva omogućavaju pronalaženje novih načina minimizacije buke.

Na tom je području istraživačka skupina koja djeluje u sklopu Laboratorija za precizno inženjerstvo Tehničkog fakulteta [2], ali i pri Centru za mikro- i nanoznanosti i tehnologije [3] te Centru za umjetnu inteligenciju i kibernetičku sigurnost [4] Sveučilišta u Rijeci [5], sredinom 2019. godine započela suradnju s tvrtkom Končar D&ST. Doista, uz postizanje navedenih tehničkih rezultata koji povoljno utječu na konkurentnost proizvoda tvrtke Končar D&ST, kroz uspostavljenu suradnju sam Tehnički fakultet u Rijeci značajno promiče prijenos znanja i tehnologija prema gospodarstvu, što se ne samo uklapa u strateške prioritete Sveučilišta u Rijeci, nego daje i veliki doprinos područjima pametne specijalizacije Sveučilišta u Rijeci, ali i onima Republike Hrvatske i EU.

U sklopu zajedničkog rada Končar D&ST i Tehničkog fakulteta provode se, tako, napredne eksperimentalne i numeričke analize dinamičkog odziva različitih tipova energetskih transformatora s ciljem smanjivanja razine buke. Pritom se koriste napredne metode planiranja mjerenja vibracija temeljene na *Design-of-Experiment* (DoE) algoritmima, specijalna hardverska i softverska oprema za beskontaktno mjerenje vibracija dostupna u Laboratoriju za precizno inženjerstvo Tehničkog fakulteta u Rijeci [6], ali i resursi superračunala Bura dostupnog pri Centru za napredno računanje i modeliranje Sveučilišta u Rijeci [7]. Doista, nastajanje buke kod analiziranih uređaja je uvjetovano kompleksnim međudjelovanjem uzbude jezgre i namotaja te prijenosom uzbude kroz fluid za hlađenje do oplata transformatora, što je predmet intenzivnih recentnih znanstvenih istraživanja [8-10].

U sklopu suradnje Tehničkog fakulteta u Rijeci i tvrtke Končar D&ST do sada je uspješno provedeno više kampanja eksperimentalnih mjerenja dinamičkog odziva na različitim tipovima transformatora u različitim režimima rada (kratki spoj i prazni hod) te pri različitim opterećenjima, odnosno različitim razinama magnetske indukcije. U novije se vrijeme provode i mjerenja koja omogućavaju određivanje faktora prigušenja oplata kotlova različitih izvedbi transformatora. Na temelju dobivenih rezultata mjerenja napravljene su sveobuhvatne analize u vremenskoj i frekvencijskoj domeni te su postavljeni temelji za dobivanje modela koji bi trebali omogućiti bolji uvid u mehanizam prijenosa vibracija, stvaranja buke koja je posljedica vibracija te, konačno, unapređenje konstrukcije energetskih transformatora s ciljem identifikacije načina minimizacije buke.

U ovom je radu opisan primjer vibracijske analize energetskog transformatora nazivne snage 90 MVA te nazivnog napona 33 kV. Analiza se temelji na opsežnim eksperimentalnim mjerenjima dinamičkog odziva oplata transformatora te posljedično provedenoj naprednoj vremenskoj i frekvencijskoj analizi rezultata vibracijskih odziva.

2. Mjerna oprema i analizirani sustav

Vibracijska analiza provedena je na oplati (plaštu) uljnog energetskog 90 MVA / 33 kV transformatora prikazanog na Slici 1. Mjerenja su provedena korištenjem beskontaktnog laserskog Doppler vibrometra *Metrolaser Vibromet 500V* [11] te akvizicijske opreme tvrtke National Instruments. Budući da je kvadrat brzine direktni pokazatelj emitirane zvučne snage, u svim je mjerenjima kao mjerena veličina odabrana brzina odziva konstrukcije [10].



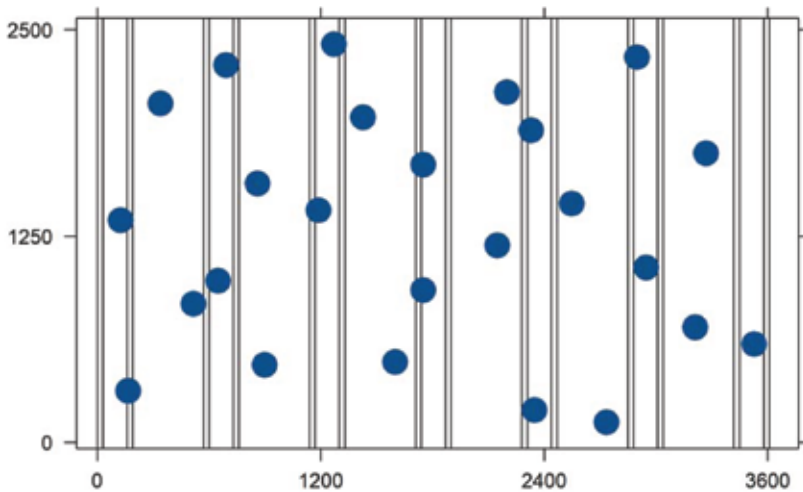
SI 1: Analizirani transformator u tvrtki Končar D&ST d. d.

U sklopu mjerenja analizirana je jedna strana oplata transformatora dimenzija 5x2.5 m u dva različita režima rada: u kratkom spoju te u praznom hodu. U svakom režimu rada provedena su po dva mjerenja s različitim radnim parametrima (Tablica 1). Vodeći računa da su glavni izvori vibracija u kratkom spoju uzrokovani elektromagnetskim silama u namotajima, dok su vibracije u praznom hodu uzrokovane magnetostrikcijom i magnetnim silama u jezgri [12], prilikom testiranja u kratkom spoju transformator je analiziran pri 100 % i 80 % nazivnog opterećenja, dok su ispitivanja u praznom hodu provedena pri magnetskoj indukciji od 1.6 T i 1.3 T.

Tablica 1: Promatrani režimi rada transformatora i odgovarajući radni parametri

Režim rada	Opterećenje [% nazivnog opterećenja]	Indukcija [T]
Kratki spoj	100	-
Kratki spoj	80	-
Prazni hod	-	1.6
Prazni hod	-	1.3

S obzirom na potrebnu reprezentativnost naknadne analize podataka, kao optimalan broj mjernih točaka u svakom režimu rada odabrano je 25 točaka, što je, s obzirom na razmatrane režime rada i radne parametre, rezultiralo s ukupno 100 mjernih točaka. Nakon pomnog razmatranja više različitih DoE metoda, optimalan raspored mjernih točaka određen je korištenjem *Latinized centroidal Voronoi tessellations* metode prema kojoj su točke pažljivo raspoređene po oplati transformatora kako bi se dobila maksimalna prostorna pokrivenost i mogućnost analize utjecaja ukruta na vibracijski odziv (Slika 2).

**SI 2:** Raspored mjernih točaka na oplati transformatora

Mjereni uređaj je pritom u svim mjerenjima postavljen tako da je laserski snop okomit na oplatu transformatora, dok je udaljenost između uređaja i pojedine mjerne pozicije uvijek bila manja od 1 m. Uzimajući u obzir najvišu očekivanu frekvencija odziva, dobar opis vršnih vrijednosti i prijelaza vibracijskih valova osigurani su postavljenjem frekvencije uzorkovanja uređaja na 20 kHz [10]. Za svaku mjernu točku izmjereno je oko 13 sekundi odziva, što je rezultiralo s više od 260 tisuća mjernih

podataka za svaku mjernu poziciju, odnosno, za sve mjerne pozicije u različitim režimima rada te s različitim radnim parametrima, ukupno s više od 26 milijuna podataka. Mjereni podaci su potom, pomoću kalibracijskih konstanti mjernog uređaja, preračunati u amplitudu brzina vibracijskog odziva.

3. Analiza mjerenja i glavni rezultati

Količina eksperimentalno dobivenih rezultata mjerenja otežava obradu podataka, ali omogućava vrlo detaljnu spektralnu analizu. Sve numeričke analize rezultata su, stoga, provedene koristeći resurse računala visokih performansi Bura dostupnog pri Centru za napredno računanje i modeliranje Sveučilišta u Rijeci [7]. Pri obradi i vizualizaciji podataka korišteni su, pak, programski jezik *R* te statistički programski paketi *Minitab* i *Excel*.

3.1. Spektralna analiza

Prilikom analize podataka dobivenih mjerenjima, u prvom je koraku provedena frekvencijska analiza pomoću brze Fourierove transformacije koja je pokazala da se za ukupno 74 od 100 mjernih pozicija najveća amplituda vibracija javlja na frekvenciji 100 Hz, za 21 točku na 200 Hz te za 5 točaka na frekvenciji od 300 Hz. Kod svih mjerenja u režimu kratkog spoja, najveće izmjerene amplitude vibracija su upravo na 100 Hz, dok su na ostalim frekvencijama amplitude vibracija zanemarive. Uočeno je, također, da su najveće amplitude na frekvenciji 100 Hz u režimu kratkog spoja lokalizirane oko jedne dominantne mjerne pozicije (pri 100 % opterećenja najveća amplituda je tu oko 9.000 $\mu\text{m/s}$ a na 80 % opterećenja je najveća amplituda oko 6.500 $\mu\text{m/s}$). U režimu praznog hoda su, pak, mjerenja pokazala trend pada amplituda na frekvenciji od 100 Hz, dok amplitude signala rastu na frekvencijama od 200 i 300 Hz.

3.2. Provjera stacionarnosti i korelacijska analiza u vremenskoj domeni

U nastavku rada provedena je analiza rezultata mjerenja u vremenskoj domeni, te su provedeni i proračuni standardnih pokazatelja kao što su minimalna i maksimalna vrijednost signala, te *peak-to-peak* i efektivne vrijednosti (*root mean square* - RMS) amplituda dinamičkih vremenskih odziva. Dobivene vrijednosti su pokazale da su RMS i *peak-to-peak* pokazatelji značajno veći u režimu kratkog spoja u usporedbi s onima u praznome hodu, dok dobivene vrijednosti u oba režima rada padaju za

približno 50 % kada se napon odnosno indukcija smanje na 80 % nazivnih vrijednosti. U Tablici 2 su, u obliku prosječnih vrijednosti u svih 25 mjernih točaka, prikazane vrijednosti navedenih pokazatelja u razmatranim režimima rada.

Tablica 2: Prosječni pokazatelji vibracijskog odziva u vremenskoj domeni

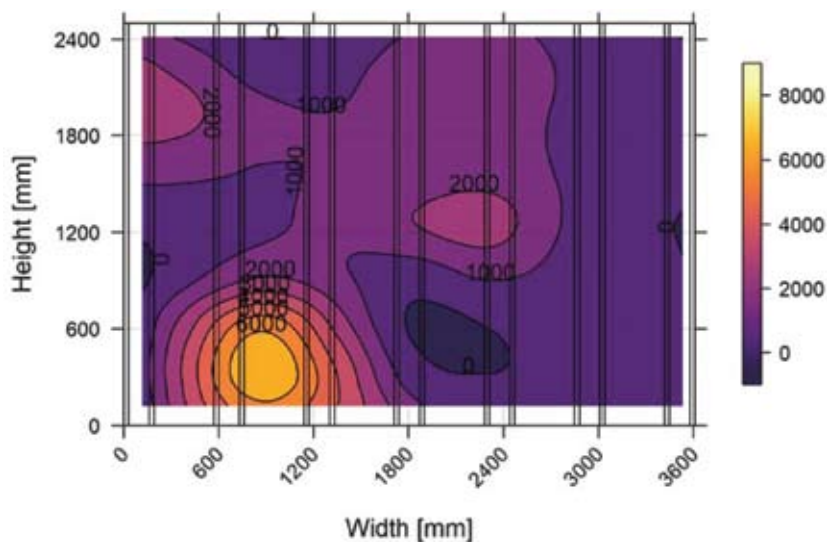
Režim rada	Prosjeak amplitude brzina [$\mu\text{m/s}$]	
	RMS	<i>peak-to-peak</i>
Kratki spoj (100%)	1178	4602
Kratki spoj (80%)	668	2343
Prazni hod (1.6 T)	243	1242
Prazni hod (1.3 T)	101	662

Provedena je i analiza stacionarnosti spektra vibracija [13], izvršena na način da se izlazna amplituda brzina svake mjerne točke u svakom režimu rada podijeli na 100 segmenata (svaki segment veličine ~ 2.600 izmjerenih podataka), te se u svakom segmentu izračunaju RMS i prosječna RMS vrijednost. Pokazano je tako da su u gotovo svim točkama i režimima rada maksimalna odstupanja unutar $\pm 5\%$, uz nekoliko iznimaka gdje je još uvijek odstupanje ograničeno na $\pm 10\%$, te se može zaključiti da su vibracije stacionarne.

Provedena je, naposljetku, i autokorelacijska te međukorelacijska analiza u svakoj mjernoj točki i u različitim režimima rada. Uzimajući u obzir najbolje vremensko poravnanje, odnosno maksimalni koeficijent međukorelacije između dva mjerenja, zaključeno je da su, između mjerenja provedenih tijekom rada transformatora u raznovrsnim režimima rada (kratki spoj – prazni hod), u pravilu prisutne niske korelacije. Zaključeno je, također, da je korelacija pri radu transformatora u kratkom spoju vrlo visoka, uz par izuzetaka, dok je između mjerenja provedenih u praznom hodu prisutna mala korelacija (veliko rasipanje). Korelacija se, stoga, u prosjeku može smatrati umjerenom.

3.3. Utjecaj geometrije oplate na frekvencijski spektar vibracija

Da bi se procijenio utjecaj geometrije kotla na dinamički odziv, izračunate su srednje vrijednosti amplituda i pripadajuće RMS vrijednosti na 100, 200 i 300 Hz, i to posebno za mjerne točke koje se nalaze na ukrutama kotla i one koje su na neukrućenim dijelovima kotla. Analiza je, kao što je i očekivano, pokazala da su u svim režimima rada amplitude vibracija u prosjeku statistički značajno niže kod mjernih točaka koje se nalaze na ukrutama u odnosu na amplitude vibracija mjernih točaka koje se nalaze na dijelu oplate transformatora bez ukruta.



SI 3: Raspodjela amplituda vibracija u režimu rada kratki spoj (100 % opterećenja)

3.4. Modeliranje vibracijskog odziva oplata

Da bi se, naposljetku, odredila raspodjela vibracija po površini oplata transformatora za sve promatrane režime rada i najznačajnije frekvencije, provedeno je modeliranje *Kirigin metodom* [14] za koju je utvrđeno da omogućava dobivanje najboljeg uvida u raspodjelu amplitude brzina po površini ploče na oplati transformatora. Primjer tako dobivenog grafičkog prikaza RMS vibracija za najznačajniju frekvenciju (100 Hz) u režimu kratkog spoja (100 % opterećenja) dan je na Slici 3. Moguće je tu, osjenčano žutom bojom, uočiti najveće amplitude vibracija u prethodno spomenutoj dominantnoj točki. Ovakvo provedena analiza je općenito pokazala da su vršne vrijednosti vibracija na različitim frekvencijama konzistentne kroz različite režime rada. Amplitude u dominantnoj točki su najveće na svim frekvencijama u režimu kratkog spoja, iako se one nešto smanjuju s manjim opterećenjem i prelaskom u režim praznog hoda.

4. Zaključak

U ovom radu opisan je primjer detaljne analize dinamičkih odziva energetskog transformatora u sklopu uspješne suradnje Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci i tvrtke Končar D&ST iz Zagreba. Suradnja između istraživačke skupine Tehničkog

fakulteta u Rijeci i tvrtke Končar D&ST temelji se na eksperimentalnim mjerenjima najnaprednijom mjernom opremom uz planiranje eksperimenata DoE metodama, obradi prikupljenih podataka naprednom statističkom analizom te naprednom modeliranju vibracija energetskih transformatora na superračunalu, a s glavnim ciljem detekcije glavnih izvora vibracija te smanjivanja njihovog intenziteta radi konstantnog unapređivanja krajnjeg isporučenog proizvoda. U radu je, tako, provedena opsežna analiza vibracijskih odziva energetskog transformatora nazivne snage 90 MVA te nazivnog napona 33 kV. Optimalno planiranje eksperimenta korištenjem napredne DoE metode je pritom ključno za dobivanje pouzdanih i reprezentativnih rezultata mjerenja. Na temelju provedenih strukturiranih mjerenja, zaključeno je da je dominantna frekvencija vibracija pri radu transformatora u kratkom spoju na 100 Hz (iako u praznom hodu opada njena dominacija). Doista, u 74 od 100 provedenih mjerenja se upravo na toj frekvenciji javlja najviša vršna vrijednost amplitude brzine vibracija. Najviše amplitude na navedenoj frekvenciji su lokalizirane oko jedne (dominantne) mjerne točke. U istoj mjernoj točki su izmjerene vibracije visoko međukorelirane kroz sve režime rada. Ukrute na oplati pokazuju značajan pozitivan učinak na redukciju amplituda vibracija.

Dobiveni rezultati stvaraju preduvjete za iterativno ugađanje ponašanja transformatora uzevši u obzir interakciju jezgre, namotaja i fluida te, konačno, dobivanje odgovarajućih numeričkih modela analiziranih kompleksnih pojava koji će omogućiti unapređenje konstrukcije transformatora s ciljem smanjenja buke te daljnjeg zadovoljavanja sve strožih međunarodnih normi u pogledu njihove buke.

S obzirom na ostvarene rezultate, kojima je tvrtka Končar D&ST izuzetno zadovoljna, a koji zasigurno predstavljaju izuzetan primjer poslovne suradnje s evidentnim prijenosom znanja, i to ne samo sa Sveučilišta u Rijeci prema privredi nego i, povratno, iz privrede prema Sveučilištu u Rijeci, suradnja na opisanom području rada se, stoga, nastavlja analizom dinamičkih odziva i prigušenja drugih tipova energetskih transformatora. Uspješnom odvijanju aktivnosti uvelike i dalje doprinose vrijedni infrastrukturni resursi, znanja i ekspertize prisutni na Sveučilištu u Rijeci kojima se značajno unapređuje konkurentnost privrede RH, ali je važno istaknuti i da mjerenjima prisustvuju te u njihovom provođenju sudjeluju i studenti završnih godina diplomskog studija strojarstva Tehničkog fakulteta u Rijeci, čime se njihove kompetencije jačaju praktičnim znanjima te, još značajnije, u direktnoj komunikaciji i interakciji sa stručnjacima iz gospodarskog sektora.

Kroz sve te aktivnosti daje se, stoga, značajan doprinos strateškim prioritetima Sveučilišta u Rijeci i Tehničkog fakulteta, te posebno područjima pametne specijalizacije Sveučilišta u Rijeci, Republike Hrvatske (posebno kroz „prevladavanje rascjepkanosti inovacijskog lanca vrijednosti i jaza između znanstveno-istraživačkog i poslovnog sektora“) i EU.

Zahvale

Opisani rad u potpunosti je financirala tvrtka Končar D&ST.

Literatura

- [1] Končar D&ST, *dostupno na* <http://www.koncar-dst.hr/hr/> - *pristupljeno*: 2021-01-05
- [2] Precision Engineering Laboratory, *dostupno na* <http://precenglab.riteh.uniri.hr/> - *pristupljeno*: 2021-01-05
- [3] Sveučilište u Rijeci, Centar za mikro- i nanoznanosti i tehnologije, *dostupno na* <http://nanori.uniri.hr/> - *pristupljeno*: 2021-01-05
- [4] Sveučilište u Rijeci, Centar za umjetnu inteligenciju i kibernetičku sigurnost, *dostupno na* <https://airi.uniri.hr/> - *pristupljeno*: 2021-01-05
- [5] Sveučilište u Rijeci, *dostupno na* <https://uniri.hr/> - *pristupljeno*: 2021-01-05
- [6] Precision Engineering Laboratory, Equipment @RiTeh, *dostupno na* <http://precenglab.riteh.uniri.hr/category/lab-equipment/> - *pristupljeno*: 2021-01-05
- [7] Sveučilište u Rijeci, Centar za napredno računanje i modeliranje, *dostupno na* <https://cnrm.uniri.hr/hr/bura/> - *pristupljeno*: 2021-01-05
- [8] Coutinho, C. et al.: Dynamic Response of Power Transformer Tanks, *Zbornik IEEE 9th Power, Instrumentation and Measurement Meeting (EPIM)*, str. 1-6, Salto, Urugvaj (2018)
- [9] Jingzhu, H. et al.: Electromagnetic vibration noise analysis of transformer windings and core, *IET Electric Power Applications*, Vol. 10 (2016) Br. 4, str. 251-257
- [10] Kozupa, M. & Kmita, G.: Investigation on noise radiation to structure vibration correlation in vibroacoustic of transformer. *Vibroengineering PROCEDIA*, Vol. 3 (2014), str. 160-164
- [11] Precision Engineering Laboratory, Equipment @RiTeh: Metrolaser Vibromet 500V Laser Doppler Vibrometer, *dostupno na* <http://precenglab.riteh.uniri.hr/metrolaser-vibromet-500v-laserski-doppler-vibrometar/> - *pristupljeno*: 2021-01-05
- [12] Hong, K.; Huang, H. & Zhou, J.: Winding Condition Assessment of Power Transformers Based on Vibration Correlation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30 (2014) Br. 4, str. 1735-1742.
- [13] Brandt, A.: Noise and Vibration Analysis: *Signal Analysis and Experimental Procedures*, John Wiley and Sons, ISBN: 978-0-470-74644-8, Chichester (West Sussex, UK), (2011)
- [14] Stein, M. L.: *Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging*, Springer, ISBN: 978-1-4612-7166-6, New York (NY, USA), (2012)